"DIMENSIONAMENTO, CONSTRUÇÃO E TESTES DE MAGNETOS SUPERCONDUTORES"

CARLOS ALBERTO BALDAN

ORIENTADORES: DR. IOSHIAKI DOI
DR. DALTRO GARCIA PINATTI

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Carlos Alberto Baldan e aprovada pela Comissão julgadora em 20/08/87.

Ioshiaki Doi

Tese apresentada na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Agosto/87

À minha esposa
Bel
e meus filhos
Juliana,
Renato.

AGRADECIMENTOS

. Aos Orientadores Dr. Daltro Garcia Pinatti e Dr. Ioshiaki Doi pela orientação eficiente e por todo apoio e condições criadas para a realização deste trabalho.

. A Fundação de Tecnologia Industrial - Centro de Materiais Refratários - Lorena-SP, pelas condições e financiamento da maior parte deste trabalho, e aos meus colegas do CEMAR pelo apoio durante a execução dos trabalhos em especial ao Eng.Carlos Yujiro Shigue.

. Ao Dr. M. Umeda do Electrotechnical Laboratory - Japão, pelo apoio durante o período de estágio naquele País.

SUMÁRIO

A utilização crescente de magnetos supercondutores nos diversos setores, desde a medicina, transporte, energia, extração mineral e até fusão nuclear, demonstra a importância desta tecnologia para uso presente e futuro.

Os capítulos iniciais resumem o estado da arte dos processos de fabricação de fios supercondutores, suas propriedades mecânicas, características básicas e ainda apresentam as técnicas que estão sendo utilizadas para produção deste material no país.

As técnicas de dimensionamento elétrico/mecânico, seguem os critérios mais avançados para projeto e construção de magnetos supercondutores na faixa de 7 ∿ 10T para NbTi e 12 ∿ 14T para Nb_3Sn. Nestes tópicos também são apresentados os cálculos detalhados das tensões mecânicas devido ao enrolamento, resfriamento e energização.

Foram projetados e construídos dois magnetos supercondutores de NbTi para 6,5T e 7T, sendo que este último com ênfase ao cálculo de esforço mecânico elevado, devido sua forma construtiva e características necessárias a sua utilização em separação magnética de minérios.

Para o magneto supercondutor de 12T (Nb_3Sn + NbTi), este trabalho apresenta seu dimensionamento completo, sendo que, sua construção e teste serão objeto de tese de doutoramento, devido sua complexidade de construção.

ABSTRACT

The increasing use of superconducting magnets in several sectors such as medicine, transport, energy, ore extraction and even nuclear fusion, demonstrates the importance of this technology for present and future applications.

The initial chapters summarize the state of the art of superconducting wires manufacturing processes, their mechanical properties and basic characteristics. They present as well the techniques currently employed for production of this material in Brazil.

The techniques for electric and mechanical design adopt the most advanced criteria for the manufacture of superconducting magnets in the range of 7 $\sim$ 10T for NbTi and 12 $\sim$ 14T for Nb_3Sn. In these topics are also displayed detailed calculations of mechanical tensions due to winding, cooling and energizing.

Two NbTi superconducting magnets for 6,5T and 7T were designed and constructed, being emphasized in the latter the calculation of high mechanical efforts owving to its way of construction and the characteristics necessary for its utilization in magnetic separation of ores.

This work presents a complete calculation program for the 12T (Nb_3Sn + NbTi) superconducting magnet. However, its construction and test will be the object of a Ph.D. thesis, by virtue of its complexity.

INDICE

SUMÁRIO i

ABSTRACT ii

CAPÍTULO I - UTILIZAÇÕES DE MAGNETOS SUPERCONDUTORES..... 01

I.1 - Introdução 01
I.2 - Magnetos de Uso em Laboratório 04
I.3 - Magnetos de Grande Porte 06

I.3.1 - Aplicação em Física de Alta Energia 06
I.3.2 - Geração de Energia por Magnetohidrodinâmica 08
I.3.3 - Motores e Geradores 10
I.3.4 - Separação Magnética de Minérios 11
I.3.5 - Armazenamento de Energia 11
I.3.6 - Fusão Nuclear 12
I.3.7 - Transporte por Levitação Magnética 12

CAPÍTULO II - TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE FIOS SUPERCONDUTORES DE NbTi..... 14

II.1 - Introdução 14
II.2 - Preparação da Liga NbTi 16
II.3 - Extrusão..... 19
II.4 - Trefilação 21
II.5 - Torção e Isolamento 24
II.6 - Conclusões 27

CAPÍTULO III - TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE FIOS SUPERCONDUTORES DE Nb Sn 28

III.1 - Introdução 28

III.2 - Método de Bronze 28
III.3 - Difusão Líquido-Sólido 34
III.4 - Metalurgia do Pó 35
III.5 - Adição de Teceiro Elemento 38
III.6 - Conclusões 40

CAPÍTULO IV - CAMPO MAGNÉTICO - GERAÇÃO E MAPEAMENTO 43

IV.1 - Introdução 43
IV.2 - Magnetos Cilíndricos - Solenóide 43

IV.2.1 - Método dos Polinômios (Potencial Escalar)..... 44
IV.2.2 - Cálculo do Campo Magnético ao Longo do Eixo 46
IV.2.3 - Cálculo do Campo Fora do Eixo do Solenóide /4/ 51
IV.2.4 - Mapeamento do Campo Magnético Através de Computador /5/ 54

IV.3 - Magneto Tipo Pista-de-Corrida 61
IV.4 - Conclusões 67

CAPÍTULO V - FORÇAS, INDUTÂNCIA E ENERGIA 68

V.1 - Introdução 68
V.2 - Tensões e Deformações no Enrolamento .. 69

V.2.1 - Equações Básicas 69

V.3 - Pré-Tensão Durante o Enrolamento 73
V.4 - Contração Térmica 75

V.4.1 - Formulação Básica 75

V.5 - Forças Magnéticas 78

V.5.1 - Forças no Plano rθ 79
V.5.2 - Forças Axiais 82

V. 6 - Propriedades Mecânicas 84

V.6.1 - Supercondutores de NbTi 84
V.6.2 - Supercondutores A15 Nb_3Sn .. 86

V. 7 - Cálculo da Indutância 93

V.7.1 - Indutância em Solenóides ... 95

V. 8 - Energia e Proteção 99
V. 9 - Conclusões 106

CAPÍTULO VI - DIMENSIONAMENTO, CONSTRUÇÃO E TESTE DO MAGNETO LABORATÓRIO 6.5T - NbTi.. 107

VI.1 - Introdução 107
VI.2 - Cálculo do Campo Magnético no Eixo Z 107
VI.3 - Mapeamento do Campo Magnético 111
VI.4 - Dimensionamento Mecânico 116
VI.5 - Construção do Magneto Supercondutor 6.5T 121
VI.6 - Testes e Medidas 140
VI.7 - Conclusões 151

CAPÍTULO VII - DIMENSIONAMENTO, CONSTRUÇÃO E TESTE DO MAGNETO "SPLIT-PAIR" DE NbTi ... 152

VII.1 - Introdução 152
VII.2 - Dimensionamento do Campo Magnético . 155
VII.3 - Dimensionamento Mecânico 166
VII.4 - Cálculo, Indutância, Energia e Circuito de Proteção 183
VII.5 - Construção do Magneto "Split-Pair".. 187
VII.6 - Testes e Medidas da Distribuição do Campo Magnético 191
VII.7 - Conclusões 194

CAPÍTULO VIII - DIMENSIONAMENTO DE MAGNETO SUPERCONDUTOR 12T 195

VIII.1- Introdução 195

VIII.2- Mapeamento do Campo Magnético 196
VIII.3- Dimensionamento Mecânico 223

VIII.3.1 - Enrolamento Nb_3Sn 223
VIII.3.2 - Enrolamento NbTi 240
VIII.3.3 - Mapeamento das Tensões ... 262

VIII.4- Conclusões 266

REFERÊNCIAS 267

APÊNDICE 1 - CÁLCULO DE CAMPO MAGNÉTICO DE SOLENÓIDE 276

I - Método dos Polinômios 276
II - Método da Integral da Equação de Biot-Savart 278

APÊNDICE 2 - CÁLCULO BÁSICO DO "WIGGLER" SUPERCONDUTOR 5T 288

APÊNDICE 3 - SEPARAÇÃO MAGNÉTICA DE MINÉRIOS 297

CAPÍTULO I

UTILIZAÇÕES DE MAGNETOS SUPERCONDUTORES

I.1 - INTRODUÇÃO

A supercondutividade, descoberta por Kammerlingh Onnes em 1911, é um fenômeno pelo qual alguns materiais quando resfriados abaixo de sua temperatura crítica T_c apresentam instantâneamente o estado supercondutor, onde sua resistência à passagem de corrente elétrica passa ser zero. Geralmente esta temperatura, abaixo da qual os materiais mostram a transição normal/supercondutor, está próxima a 4,2K que é obtida com a liquefação do gás hélio.

Os trabalhos de Onnes /1/ concentram-se em metais puros (Hg, Pb, Sn) que apresentam baixo valor para o campo crítico $B_c \sim 1/20$ Tesla.

A tabela I mostra os metais puros que apresentam transição supercondutor/normal com as respectivas temperaturas e valores de campo crítico.

No período 1950-1960, Mathias e Kunzler /2/ investigaram ligas metálicas para obter supercondutores com alto campo crítico e que pudessem conduzir altas densidades de corrente. Observar que a transição supercondutor/normal pode ser determinada pela variação da temperatura acima de T_c, ou pelo campo magnético acima de B_c, ou pela densidade de corrente acima de J_c.

A liga supercondutora mais utilizada na atualidade é o Nb50%Ti com pequenas variações do teor de Ti dependendo do uso específico. A figura 1 mostra a superfície de densidade de corrente para uma liga commercial de NbTi no espaço B, J, T.

A manutenção do estado supercondutor depende de se operar sempre em pontos abaixo da superfície gerada no espaço BJT, procurando-se otimizar os valores de J que permitem a aplicação dos materiais supercondutores na geração de campos magnéticos imediatamente abaixo dos valores de B_c destes materiais.

A figura 2 mostra a curva da corrente crítica versus campo magnético para NbTi e Nb_3Sn, que são os supercondutores de maior uso atualmente.

Para aplicação dos materiais supercondutores, na maioria dos casos são produzidos fios supercondutores, nos quais são incor

Tabela I - Temperatura de Transição T_c e Campo Magnético Crítico H_o para Elementos Puros /3/.

ELEMENTO	T_c (K)	H_o (Oe)	ELEMENTO	T_c (K)	H_o (Oe)
Al	1,175±0,002	104,9±0,3	Nb	9,25 ± 0,02	2060±50
Am	0,6 - 1,0		Os	0,66 ± 0,03	70
Be	0,026		Pa	1,4	
Cd	0,517±0,002	28 ± 1	Pb	7,196±0,006	803 ± 1
Ga	1,083±0,001	58,3±0 2	Re	1,697±0,006	200 ± 5
Ga (β)	5,9 - 6,2	560	Ru	0,49 ±0,015	69 ± 2
Ga (γ)	7,0	950	Sn	3,722±0,001	305 ± 2
Ga (Δ)	7,85	815	Ta	4,47 ±0,04	829 ± 6
Hf	0,128	1,27	Tc	7,8 ± 0,1	1410
Hg (α)	4,154±0,001	411 ± 2	Th	1,38 ± 0,02	160 ± 3
Hg (β)	3,949	339	Ti	0,40 ± 0,04	56
In	3,408±0,001	281,5±2	Tl	2,38 ± 0,02	178 ± 2
Ir	0,1125±0,001	16±5	V	5,40 ± 0,05	1408
La (α)	4,88 ± 0,02	800±10	W	0,0154±0,0005	1,15±0,03
La (β)	6,0 ± 0,1	1600-1096	Zn	0,85 ± 0,01	54 ± 0,3
Lu	0,1 ± 0,03	350±50	Zr	0,61 ± 0,15	47
Mo	0,915 ± 0,005	96 ± 3	Zr (ω)	0,65, 0,95	

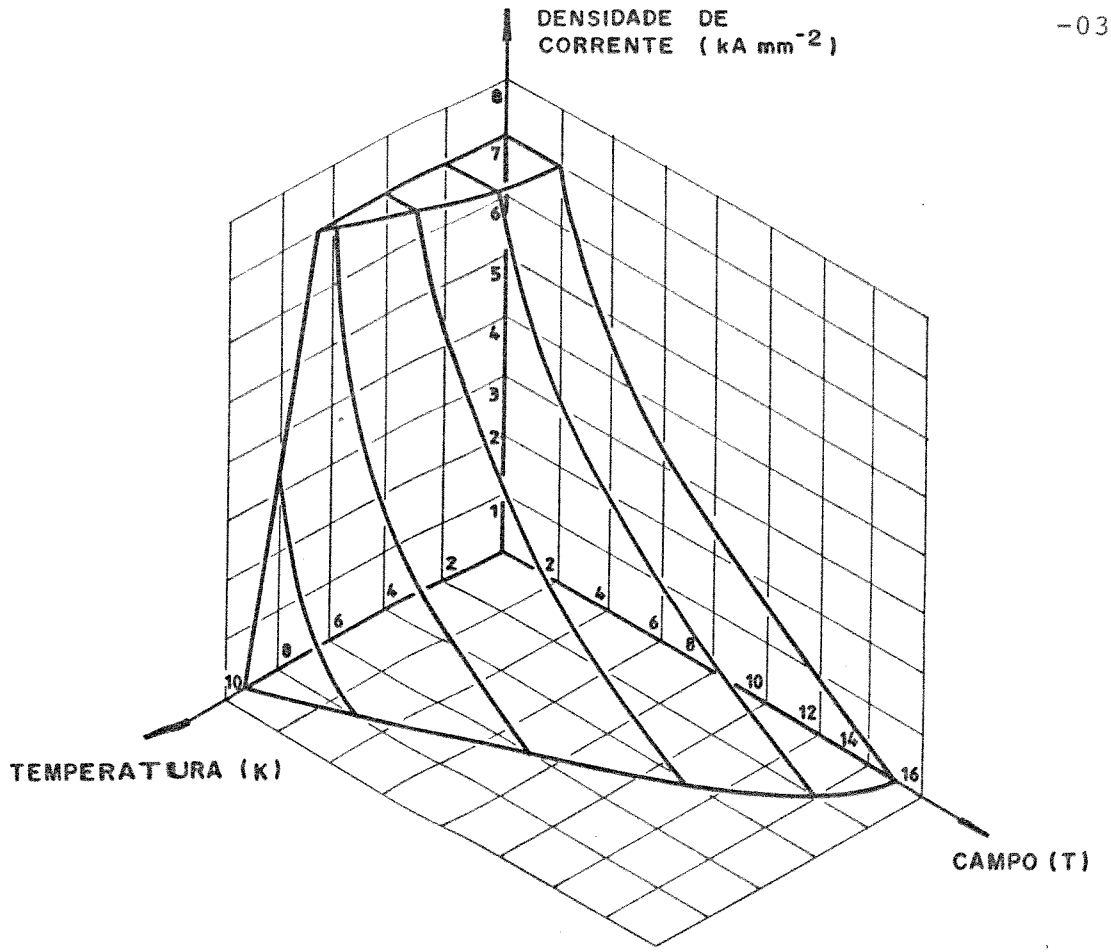


FIG. 1 - SUPERFÍCIE DE CORRENTE CRÍTICA PARA LIGAS SUPERCONDUTORAS COMERCIAIS DE NIÓBIO-TITÂNIO. /4/

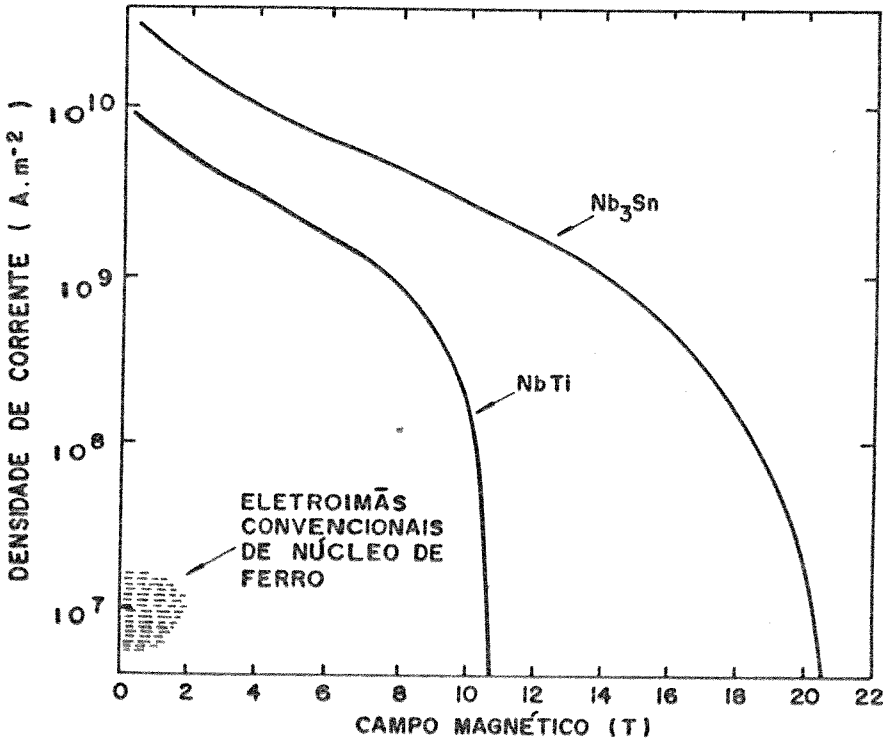


FIG. 2 - CURVAS DE CORRENTE CRÍTICA VERSUS CAMPO MAGNÉTICO PARA NbTi E Nb_3Sn A 4,2 K. A REGIÃO SOMBREADA MOSTRA A FAIXA DE OPERAÇÃO DOS ELETROIMÃS CONVENCIONAIS. /4/

Formato A4 - 210 x 297 mm

papel tecnico Romilec

porados outros metais para aumentar as propriedades de condução térmica e de resistência mecânica (torção, flexão, tração). Para se otimizar as propriedades de campo máximo de uso, os fios supercondutores são fabricados em filamentos dispersos ou separados por cobre, sendo que a relação cobre/supercondutor depende muito da aplicação a que se destina o fio supercondutor.

A tabela II resume as propriedades de alguns fios e cabos supercondutores comerciais; em alguns casos podemos associar suas características ao seu uso.

A força magnética é uma das forças fundamentais da natureza, porém, necessita da existência de campo magnético para produzí-la. Sua aplicação vai desde a biologia e medicina até o transporte, geração e distribuição de energia, mineração etc.

A geração de campo magnético de alta intensidade esteve sempre associada ao grande consumo de energia elétrica e à grande dissipação de energia na forma de calor, baixa densidade de corrente e conseqüentemente grandes volumes e pesos. Estes fatores impedem um fácil manuseio e fino ajuste na homogeneidade do campo magnético, fundamental em algumas aplicações.

A disponibilidade de fios supercondutores em escala comercial permitiu rapidamente a construção de magnetos supercondutores para geração de altíssimos campos magnéticos (20T) sem grande consumo de energia, visto sua resistência ser nula e consequentemente sua dissipação de energia representar apenas alguns watts.

Paralelamente, o desenvolvimento de novos tipos de liquefatores e refrigeradores de hélio permite o uso de grandes magnetos capazes de gerar altos campos em grandes volumes, sempre mantendo a temperatura necessária à manutenção do estado supercondutor.

I.2 - MAGNETOS DE USO EM LABORATÓRIO

Nesta classe de magnetos supercondutores para prática de pesquisa experimental, o campo magnético necessário varia de 5-14 Tesla sobre volumes de 1/100 a 1 litro. Na maioria dos casos a homogeneidade desejada está na faixa de 0.1 a 0.01% em volume esférico de 1 a 5cm de diâmetro.

Tabela II - Fios Supercondutores de NbTi e Nb_3Sn

Fios Supercondutores de NbTi					
Fabricante 1 - Furukawa - Japão					
Dimensões (mm)	Ø Filamento (μm)	Nº Filamentos	Cu/SC	Corrente Crítica (A)	
				(5T)	(7T)
Ø 0,35	10	600	1,0	85	50
0,50	14	600	1,0	180	95
0,70	20	600	1,0	350	200
0,35	8	600	2,0	58	32
0,50	12	600	2,0	110	65
0,70	16	600	2,0	220	130
0,8 x 1,8	29	1200	1,0	1250	700
1,3 x 2,6	34	1200	2,0	1700	1000
1,6 x 3,5	39	1200	3,0	2100	1250
Fabricante 2 - Vacuumschmelze - República Federal Alemã					
Ø 0,3	27	54	1,35	69	44
0,5	44	54	1,35	188	119
0,6	53	54	1,35	263	166
0,7	62	54	1,35	320	216
0,85	75	54	1,35	437	295
1,2 x 0,75	54	150	1,35	768	434
1,0 x 0,6	44	150	1,35	552	312
0,8 x 0,5	36	150	1,35	380	213

Fios supercondutores de Nb_3Sn						
Fabricante 1 - Furukawa - Japão						
Dimensões (mm)	Ø Filamento (μm)	Nº Filamentos	Cu/SC	Corrente Crítica (A)		
				(10T)	(12T)	(14T)
0,17 x 5	21	380	25	250	150	-
0,25 x 5	18	780	15	370	220	-
0,74 x 2,34	5	21000	18	570	310	-
2,3 x 6,0	5	113400	35	6000	4000	2000
Fabricante 2 - Vacuumschmelze - República Federal Alemã						
Ø 0,5	4	4500	23	123	86	58
0,6	4	4500	23	168	118	79
0,7	4	4500	23	228	159	107
0,8	6	4500	23	314	221	148
1,0	6	4500	23	456	321	215
1,25	6	13000	30	591	416	279

Estas unidades instaladas em criostatos compactos permitem fácil operação tanto em transferência de hélio líquido quanto no uso de refrigeradores.

Algumas aplicações demandam altíssimos campos magnéticos para uso na caracterização de outros compostos supercondutores , que possuem alto B_c. Um exemplo é encontrado na caracterização de fios supercondutores de Nb_3Sn e $(NbTi)_3Sn$, onde as medidas de corrente crítica demandam geração de campo externo de 15 a 19T.

No outro extremo estão os magnetos com baixo campo, 2 a 6 Tesla e altíssima homogeneidade (0.01 a 0.001%) utilizados em equipamentos de imagem por ressonância magnética nuclear - RMN. Estes magnetos são aplicados em biologia e medicina, pois além de alto campo magnético, apresentam também alta homogeneidade espacial e temporal, que são essenciais para uso em espectroscopia de biomoléculas, tomografia, navegação intravascular etc.

Atualmente o grande mercado para magnetos supercondutores de "médio porte" está associado ao seu uso em sistemas de imagem por RMN para a medicina. Esta técnica permite exames de corpo inteiro através de imagens geradas pela variação do momento magnético das moléculas.

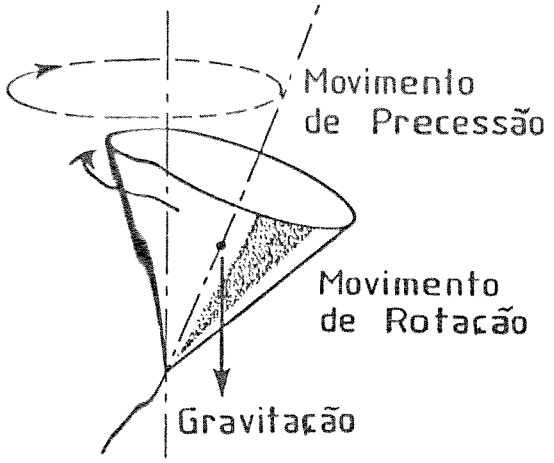
A figura 3 resume o sistema utilizado para geração da imagem que posteriormente é armazenada e permite acompanhamento da evolução de tratamentos médicos, para posterior comparação das imagens (anterior/atual). Este processo não é prejudicial ou de efeito acumulativo como os exames convencionais de tomografia de raio-X.

I.3 - MAGNETOS DE GRANDE PORTE

I.3.1- Aplicação em Física de Alta Energia

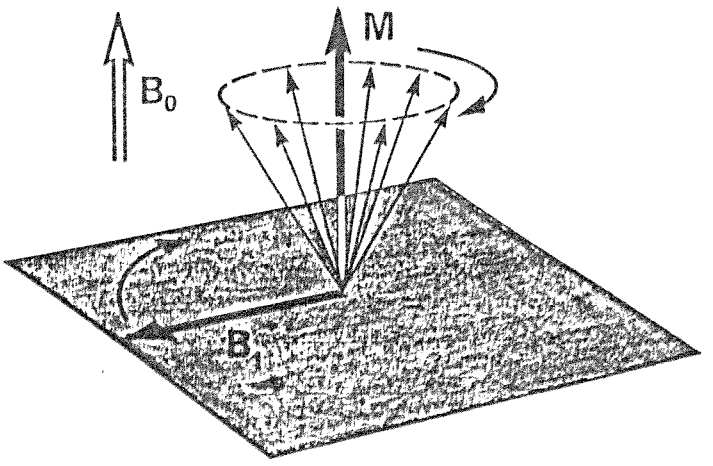
Em instalações convencionais para aceleração, focalização e deflexão de partículas, o consumo de energia elétrica é quase na sua totalidade para geração de campo magnético.

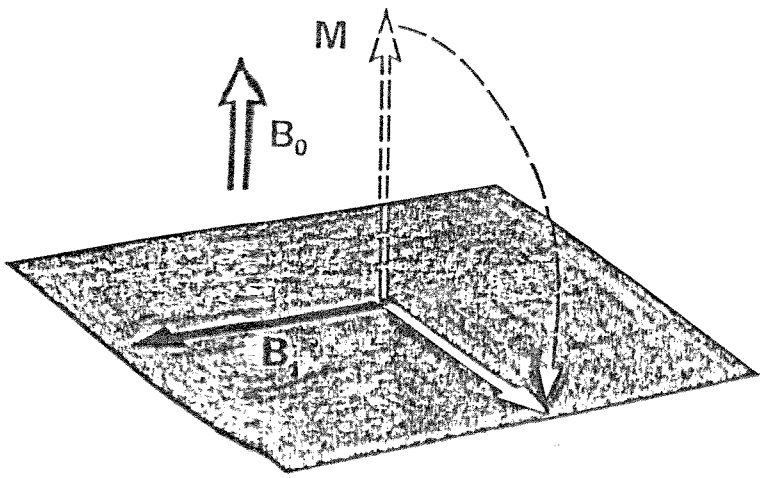
A supercondutividade vem sendo aplicada maciçamente nesta área possibilitando em alguns casos substituir magnetos convencionais que consumiam 60MW, por magnetos supercondutores que neces



PRECESSÃO DO SPIN

PRECESSÃO DEVIDO CAMPO RF





DURAÇÃO DE B_1 PARA ROTAÇÃO DE M DE 90°

BOBINA RECEPTORA DO SINAL DE PRECESSÃO DE Mxy

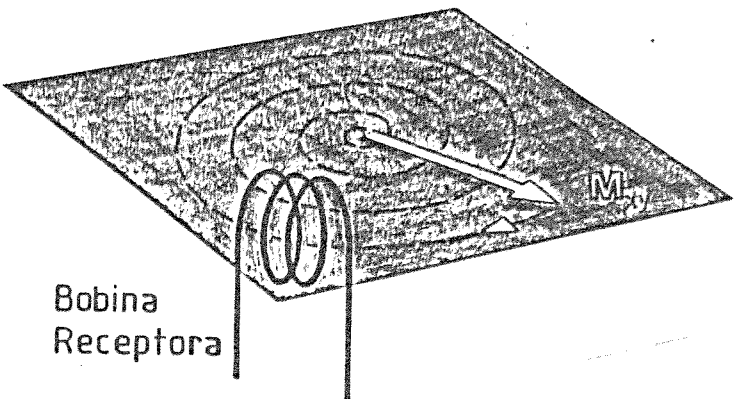


Fig. 3 - Princípio da Imagem por Ressonância Magnética

papel tecnico Romilec

sitam em seus refrigeradores 360KW, como no caso da construção do "Big European Bubble Chamber" CERN com 4,7m de diâmetro interno e campo de 3,5T.

Em uma configuração simplificada de aceleradores de partículas podemos destacar o uso de magnetos supercondutores nos injetores que consistem em aceleradores lineares LINAC construídos à partir de um magneto tipo "sela", formando dipolos, quadrupolos , sextupolos para gerar em grandes comprimentos (4-6m) campos na faixa de 4 a 6T. Após a injeção da partícula nos anéis de aceleração, são utilizados pequenos magnetos, porém, em grande número, como no caso do acelerador de 500MeV-FERMI LAB; 1000 unidades (para deflexão do feixe de partículas).

Outra aplicação de magnetos supercondutores concentra-se nos onduladores e "wigglers" em anéis de radiação sincrotron, onde se pode obter campos de 5 a 7T ao invés de 1T com imãs permanentes de cobalto-samário.

Para atender aos vários projetos de pesquisa em alta energia, bem como modernização de alguns aceleradores existentes, serão demandados um grande número de magnetos supercondutores, sempre procurando obter o máximo campo magnético.

I.3.2- Geração de Energia por Magnetohidrodinâmica (MHD)

O princípio básico de geração de energia por MHD é mostrado na figura 4 e consiste na queima de combustíveis variados em alta temperatura e sua posterior injeção em um canal de geração com adição de partículas ionizantes: K, Cs, Ce etc.

Externamente através de magnetos supercondutores é produzido um campo magnético transversal de 4 a 6T, que ao ser atravessado por partículas ionizadas ocorre a indução de uma FEM, que é retirada na forma DC por contatos elétricos ao longo do canal e conectada a cargas externas.

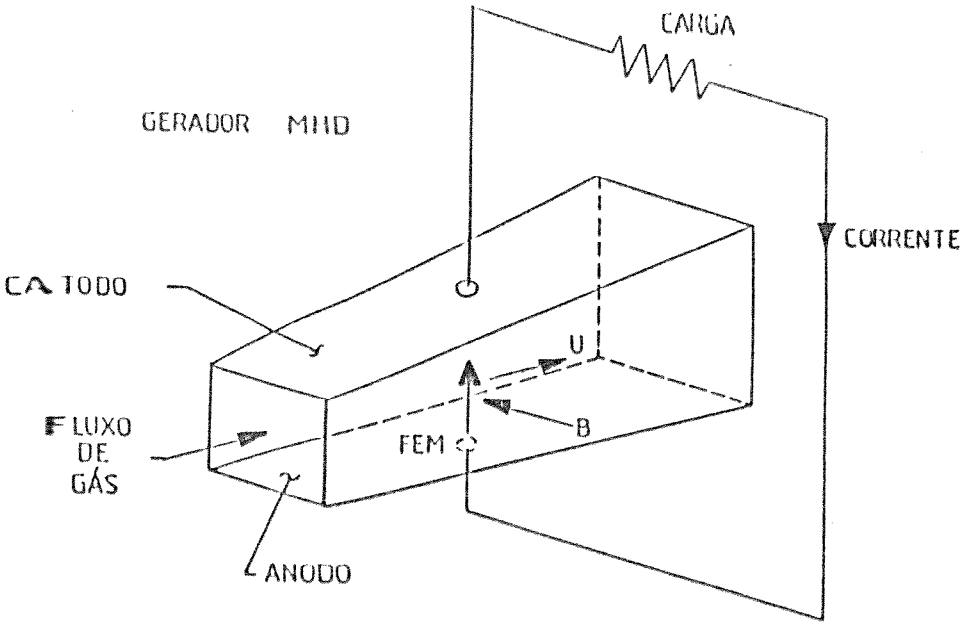
A potência gerada é obtida da equação básica onde:

$$P = \vec{J}.\vec{E} = K(1-K)\sigma\mu^2B^2 \qquad (I.1)$$

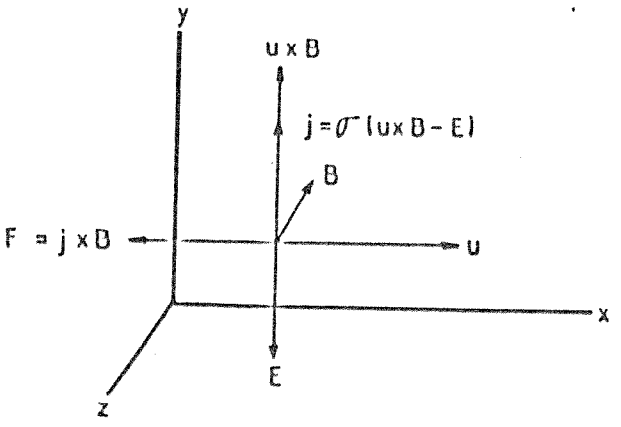
J = densidade de corrente

E = campo elétrico devido à carga

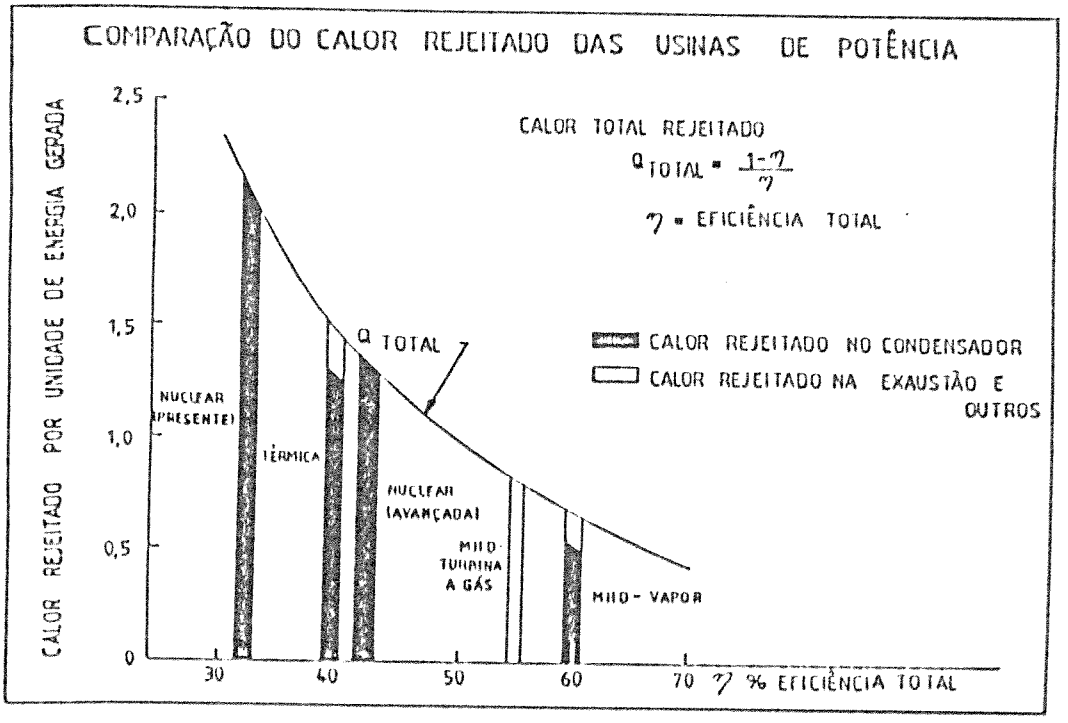
K = parâmetro de carga K=E/μB = 0,5 (pot. máxima)



CONCEITO BÁSICO DO MHD



SISTEMA DE COORDENADAS



CALOR REJEITADO POR KILOWATT ÚTIL VERSUS EFICIÊNCIA DO CICLO

Fig. 4 - Conceito Básico de Operação do Gerador por Magnetohidrodinâmica /5/

σ = condutividade do plasma

μ = velocidade do plasma

B = campo magnético

No caso brasileiro a aplicação imediata deste tipo de gerador está associado à queima de bagaço de cana-de-açúcar, óleos pesados e gás natural.

No caso específico da queima de bagaço, isto seria feito à partir da lignina que possui uma alta relação C/H = 40 , com baixíssimo teor de cinzas, permite a geração de 10 a 15MW_e em canais de MHD de 2m, casado com a produção de bagaço de usinas de 100.000 l/d de álcool .

Após a geração de energia no canal do MHD os gases são resfriados até a temperatura de 900°C, que é a temperatura de uma termoelétrica convencional, que com turbina de alta pressão gera energia com eficiência de 30 a 35%.

Considerando a geração no MHD e posterior geração convencional térmica o conjugado atinge 60 ∿ 65% de eficiência de geração da energia contida na lignina, que representa para módulo de 90.000l/dia de produção de álcool 14MW_e.

Os acidentes recentes com usinas nucleares de geração de energia aceleraram os programas de construção de usinas de geração por MHD em vários países europeus, USA, URSS e Japão.

Prevê-se para 1988 o início de operação da unidade comercial de 500MW-Estado Gres-Região Riazan na URSS, inicialmente queimando gás natural e óleos pesados.

I.3.3- Motores e Geradores

A aplicação de supercondutores em motores de grande torque e baixa rotação justifica-se pela redução do tamanho e peso da unidade por um fator de 10, devido basicamente ao alto campo magnético (5 a 7T) comparados ao campo de saturação de 2T dos motores convencionais.

Comparando-se a relação peso/kVA gerado para vários tipos de geradores temos desde 2kg/KVA para unidades refrigeradas a ar, 0,5kg/kVA para as convencionais sofisticadas refrigeradas com hidrogênio líquido e finalmente as supercondutoras variando de 0,1 a 0,3kg/kVA, porém , operando em potências de 1000 a 5000MVA.

As dezenas de unidades experimentais de geradores supercondutoras operando na faixa de 2000 a 6250kVA e os projetos em execução de unidades de até 30MVA, asseguram a esta aplicação grande possibilidade de se tomar a maior aplicação de supercondutores até final do século.

I.3.4- Separação Magnética de Minérios

O uso de magnetos supercondutores em sistemas de separação magnética de minérios justifica-se pelos altos valores de campo magnético que podem ser utilizados e os gradientes de campo que são gerados. Em vários separadores magnéticos não supercondutores, os valores de gradiente variam de 0,05T/cm (tipo DRUM) até 15T/cm (FRANTZ) operando em campo magnético de 0,15T.

As unidades com magnetos supercondutores operam em campos magnéticos de 2 a 7T e gradientes que chegam até 200T/cm com filtros de lã de aço inoxidável.

As aplicações destes sistemas concentram-se no aproveitamento de finos minerais, onde os separadores convencionais arrastam as partículas magnéticas juntamente com a parte nobre, inviabilizando a sua separação. Outra aplicação destaca-se na limpeza de água de refrigeração em unidades de laminação e trefilação, evitando-se grande poluição fluvial.

Em estudos recentes, os custos de novas unidades industriais equivalem-se somando despesas de capital e de recursos humanos, porém, as unidades supercondutoras apresentam redução de 20% nos custos de operação, basicamente com economia de energia elétrica.

I.3.5- Armazenamento de Energia

Os grandes centros de consumidores de energia elétrica sofrem os problemas desagradáveis do consumo de pico, principalmente quando acarretam "blackout" ou várias quedas do sistema.

Resultados experimentais demonstram que com utilização de magnetos supercondutores, que armazenam energia fora do horário de pico, pode-se estabilizar os circuitos de distribuição com fornecimento por curto tempo (alguns segundos) energia de balanço ativa ou reativa de até 2000MVA.

Novamente as características dos magnetos supercondutores

apresentam baixo consumo de energia para estocagem por prazo indeterminado, mantidas as condições de refrigeração.

Estudos de viabilidade no Japão mostram que sistemas de estabilização com energia estocada de 5GWh apresentam "break-even" de custo de capital de 1100 a 1500 US$/kW que, comparado com outros tipos de geração alternativas como nuclear variam de 1470 a 2010 US$/kW.

I.3.6- Fusão Nuclear

Em um programa conjunto Euratom, Japão e USA estão promovendo os testes de reatores de fusão nuclear para geração de energia. O sistema de contenção do plasma, necessário para geração é baseado em magnetos de configuração "D" operando em campos magnéticos de 5 a 12 T.

A aplicação de materiais supercondutores torna-se necessária para minimizar o consumo de energia elétrica para geração e manutenção do campo magnético. Neste caso específico, os cabos supercondutores são montados em estrutura de cobre, para estabilidade térmica, inseridos em estrutura de aço inoxidável para aumentar as propriedades de resistência mecânica dos supercondutores de Nb_3Sn. A refrigeração é feita através de hélio supercrítico, que passa no interior do condutor.

Atualmente encontra-se em fabricação o "MFTF-Mirror Fusion Test Facility" onde os magnetos supercondutores representam investimentos da ordem de US$ 30 milhões.

I.3.7- Transporte por Levitação Magnética

Um dos grandes problemas da atualidade refere-se ao transporte que impede muitas vezes o progresso dos grandes centros por não disporem de tráfegos em altas velocidades, especialmente em ligação de curta e média distância, como no caso de aeroportos.

Após o sistema do "trem bala" no Japão que viaja de 200 a 300km/h e permite a trabalhadores residentes a 400km do emprego viajar diariamente, o novo sistema em teste é o trem magneticamente levitado.

Neste sistema não há contato do trem com a linha, pois magnetos supercondutores produzem um alto campo magnético que repele o trem do "solo", posteriormente, outros magnetos supercondutores

de propulsão aceleram o trem até velocidade de 500km/h.

O sistema de guia efreios é feito através de magnetos convencionais instalados ao lado do trem nas estruturas de concreto, formando o canal, como mostra a figura 5.

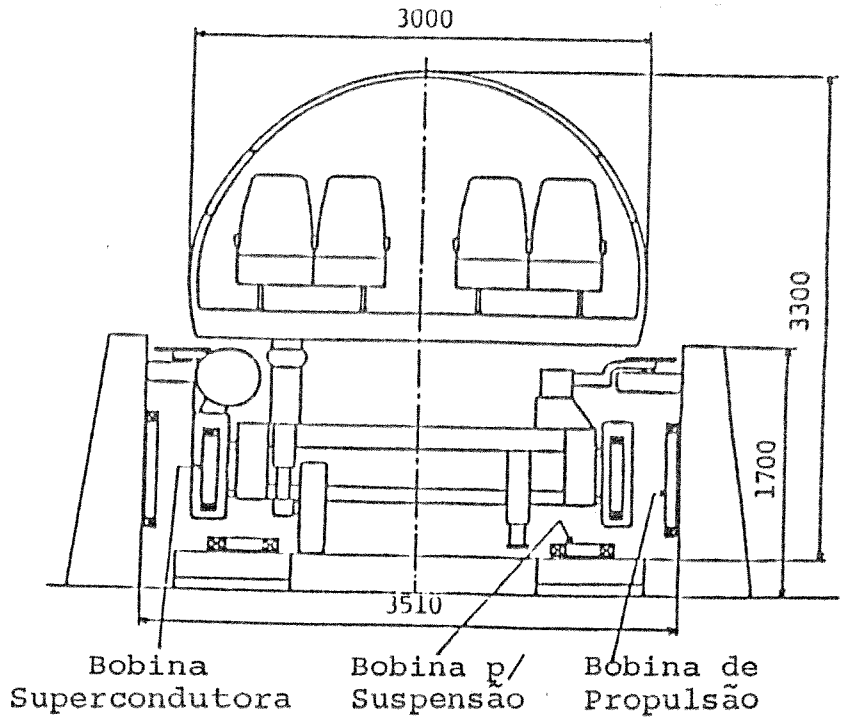


Figura 5 - Seção Transversal do Veículo MLU 001 e Sistema de Guia na Forma "U" /7/

CAPÍTULO II

TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE FIOS SUPERCONDUTORES DE NbTi

II.1 - INTRODUÇÃO

A aplicação de fios supercondutores de NbTi concentra-se na construção de magnetos supercondutores para geração de campos magnéticos até 8T. Em casos especiais com resfriamento até 1.8K(hélio superfluído) é possível gerar 10T.

As propriedades básicas dos supercondutores de NbTi estão resumidas na tabela I , onde são colocados os diversos tipos de vários fabricantes. Para efeito de comparação observar o custo US$/A.m sempre utilizando a corrente crítica $I_c(5T)$ ou $I_c(7T)$.

Em aplicações específicas podemos destacar os supercondutores para magnetos dos equipamentos de imagem por ressonância magnética, que devido à grande demanda procurou-se otimizar os custos, padronizando-se algumas bitolas, como mostrado na tabela II..

O principal parâmetro de comparação dos fios supercondutores comerciais é a sua corrente crítica J_c, que diretamente influencia o custo do magneto. A otimização de J_c é feita através da alta deformação a frio durante a fabricação do fio seguida de tratamentos térmicos para atingir altos valores de J_c.

Este tipo de processamento introduz um grande número de defeitos na estrutura cristalina possibilitando altas forças de aprisionamento de vórtices. Os supercondutores tipo II para campos magnéticos $B>B_{c1}$ apresentam "estado misto", onde existe a presença de vórtice de corrente que penetra no material e se distribui, formando a rede de vórtice. Quando a densidade de corrente J_c é atingida, a força de aprisionamento F_p é superada pela força de Lorentz e o material passa para estado normal:/1/

$$\vec{F}_L = \vec{J}x\vec{B} \; ; \quad \vec{F}_p(B) = -\vec{J}_c x\vec{B} \qquad (II.1)$$

A força de Lorentz atua sobre a rede de vórtice toda vez que uma corrente elétrica atravessa o material supercondutor.

Recentemente uma nova tecnologia de produção da liga supercondutora por fusão em forno de feixe de elétrons seguido de

Tabela I - Propriedades e Custos para Fios Supercondutores de NbTi

FABRICANTES	DIMENSÕES (mm)	CORRENTE (A) a 7T	CUSTO US$/A.mx10^{-3}
Vacuumschmelze	0,75 x 1,2	434	5,8
Furukawa	0,8 x 1,8	700	5,86
Sumitomo	1,0 x 2,0	375	6,15
Hitachi	1,2 x 2,6	900	6,25
IGC/USA	0,98 x 1,47	725	6,08
IMI/Inglaterra	1,0 x 2,0	553	6,18

Tabela II - Propriedades, Dimensões e Custos para Fios Padronizados para Magnetos de Imagem (NMR)

Fabricante: Vacuumschmelze - Custo 4,6 x 10^{-3}US$/A.m				
DIMENSÕES (mm)	Ø FILAMENTO (μm)	Nº FILAMENTO	Cu/Sc	CORRENTE (A) a 5T
Ø 0,6	45/53	24/54	6,5/1,35	88/263
0,7	52/62	24/54	6,5/1,35	117/320
0,8	60/67	24/54	6,5/1,35	149/355
0,9	67/75	24/54	6,5/1,35	183/437
1,0	75/	24/	6,5/	220/
1,1	82/	24/	6,5/	260/
1,2	92/	24/	6,5/	314/
1,3	97/	24/	6,5/	342/
1,5	112/	24/	6,5/	430/
2,0	149/	24/	6,5/	710/

alta taxa de deformação a frio durante a fabricação do fio supercondutor permitiu alcançar valores altíssimos de J_c, que possibilitará a redução nos preços finais dos fios supercondutores NbTi/2/.

II.2 - PREPARAÇÃO DA LIGA NbTi

Para fabricação de fios supercondutores de NbTi são utilizadas barras de NbTi em composição variadas de 44 a 53%pTi,e cobre de alta pureza (eletrolítico livre de oxigênio).

A figura 1 mostra parte do diagrama de fase de NbTi, onde observamos uma fase α-Ti hexagonal que é condutora normal e outra fase β-NbTi bcc que é supercondutora à temperatura de hélio líquido (4,2K) /3/.

Desta figura obtemos dados sobre algumas propriedades intrínsecas da liga, como T_c, deformabilidade, precipitados que estão relacionados com Bc_2, estabilização de fase β por esfriamento rápido após a fusão ("quenching").

A variação de Bc_2 com a concentração de Ti é mostrado na figura 2 .

A dependência da corrente crítica J_c com a concentração de Ti, mostrada na figura 3 foi obtida por medida experimental de vários supercondutores comerciais, todos produzidos à partir de NbTi fundido à arco-VAR.

Para otimização de J_c efetuamos elevadas taxas de deformação a frio durante a fabricação do fio supercondutor. Isto será possível se durante a fabricação da liga evitarmos a precipitação da fase α-Ti , que encrua o material.

Objetivando a melhor qualidade da liga, trabalhos recentes,mostraram a viabilidade de fusão da liga à partir de Nb refinado e titânio puro,a vácuo no forno de feixe de elétrons (fig. 4). Neste processo os teores de intersticiais (O, N, C) no produto final são menores por um fator de 2, o que possibilita menores valores para dureza e consequentemente melhor deformabilidade /4/.

Até estes resultados, afirmava-se que o uso de feixe de elétrons para fusão de NbTi não permitia obter alta homogeneidade da liga devido a diferença entre os pontos de fusão dos materiais

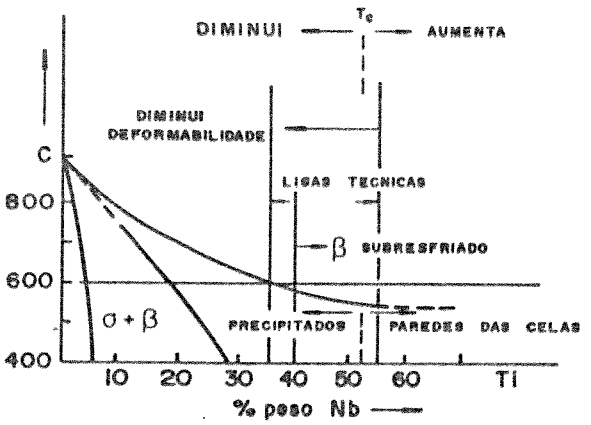


FIG. 1 - DIAGRAMA DE FASE NbTi. /3/

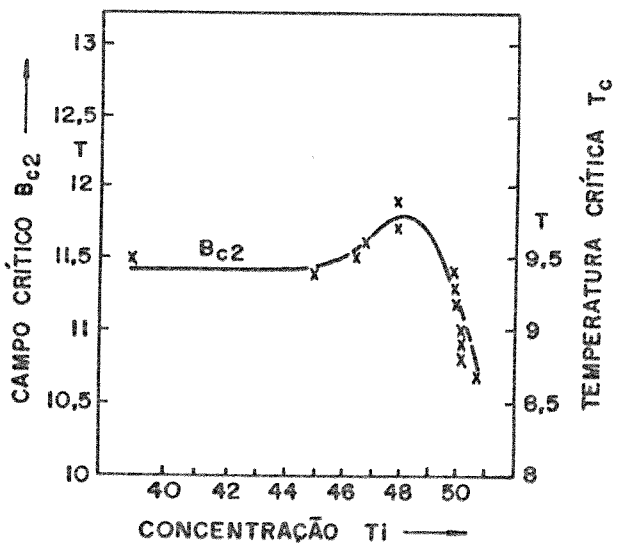


FIG. 2 - CAMPO CRÍTICO MÁXIMO B_{c2} VERSUS CONCENTRAÇÃO DE Ti. /3/

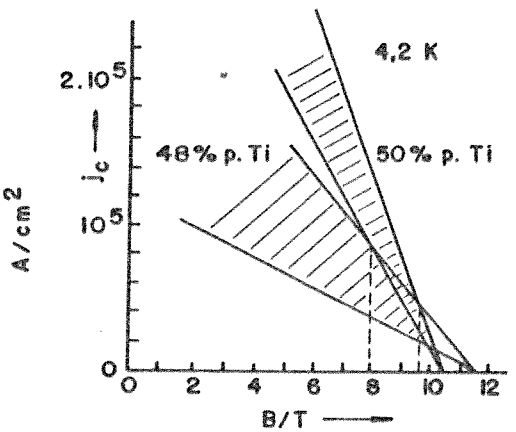
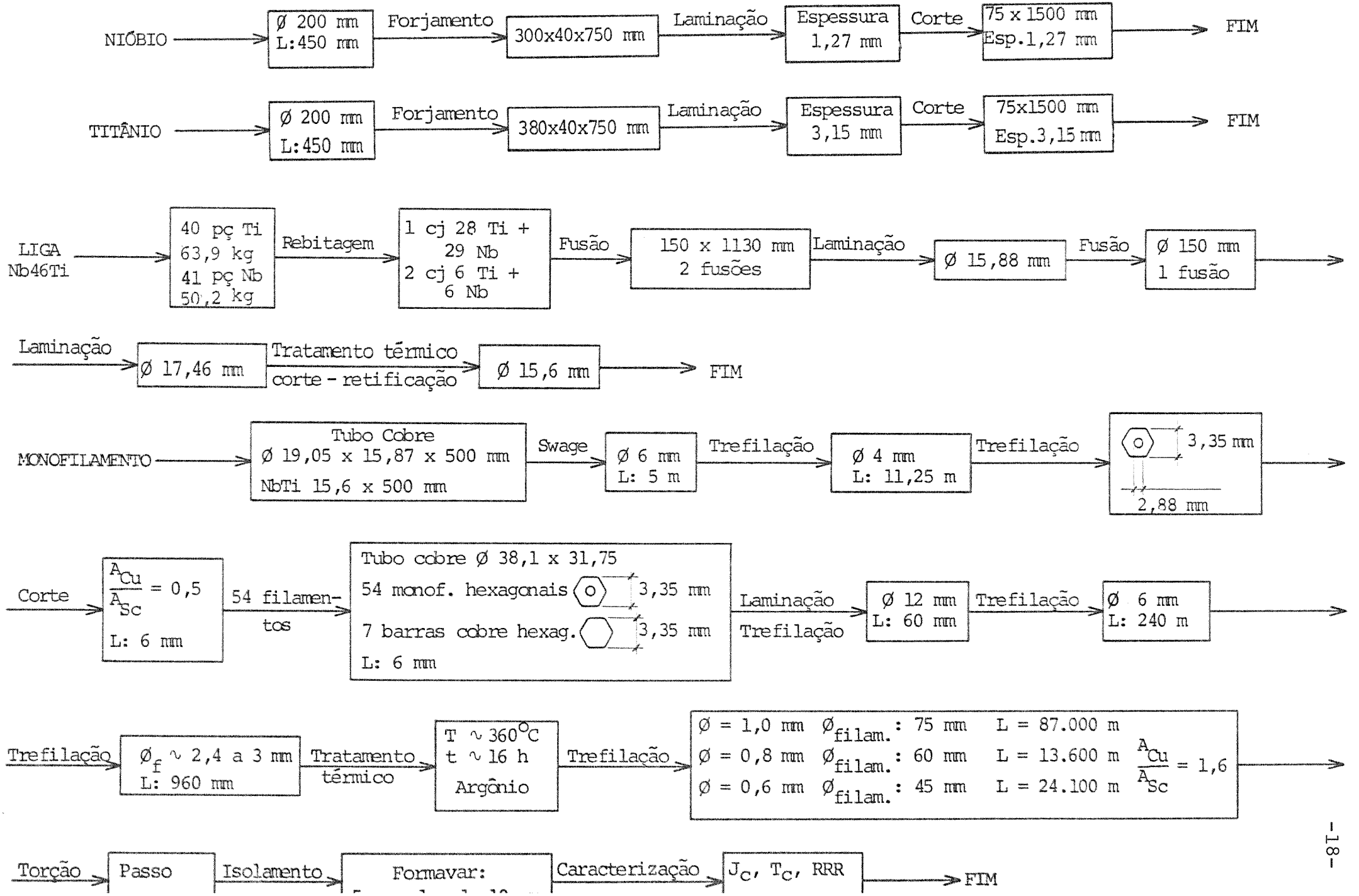


FIG. 3 - DENSIDADE DE CORRENTE CRÍTICA OTIMIZADA PARA SUPERCONDUTORES DE NbTi. /3/

papel tecnico Romilec

FIG. 4 - FIO SUPERCONDUTOR DE NbTi



e suas pressões de vapor, o que foi viabilizado com o controle eletrônico de distribuição de potência e preparação especial do eletrodo à ser fundido.

A figura 5 mostra o esquema dos dois processos VAR e FE, onde podemos notar que a solidificação no FE ocorre rapidamente e por contração o produto descola do cadinho de cobre, diminuindo a contaminação por oxigênio. No processo VAR o material permanece aquecido em contato com o cadinho pois trata-se de processo de refusão a arco com eletrodo consumível em atmosfera inerte.

II.3 - EXTRUSÃO

Após a obtenção da liga NbTi na composição desejada na forma de lingotes ou barras recristalizadas, utilizamos o processo de extrusão para obtenção dos monofilamentos ou multifilamentos de Cu-NbTi.

A extrusão do monofilamento, processo mostrado na fig. 6, consiste na execução de uma caneca de cobre (eletrolítico-OFHC), em seguida é colocado o lingote de NbTi, sendo a caneca fechada por solda por feixe de elétrons a vácuo para evitar contaminação do material.

O "billet" como é chamado o material primário a ser extrudado é aquecido à 700°C e extrudado, geralmente com redução em área de 10 a 20 vezes, ou seja de $\emptyset_{ext}$ 200mm para $\emptyset_{ext}$ 50mm, necessitando de prensa com capacidade conforme calculado abaixo /3/:

$$P = A_o \times K \times \ln \frac{A_o}{A_1} \sim 870t \qquad (II.2)$$

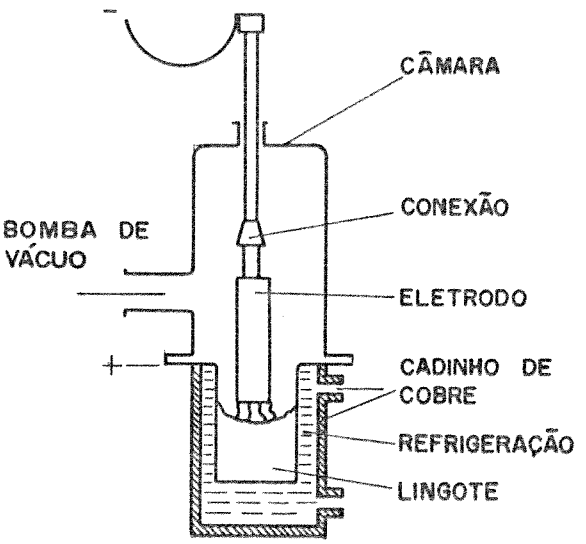
onde;

A_o - área inicial (mm^2)

A_1 - área final (mm^2)

K - resistência à deformação (N/mm^2), sendo para Cu/NbTi$\sim$2, K=180$\sim$200 (N/mm^2)

Na segunda etapa, o monofilamento é trefilado para perfil hexagonal até a dimensão necessária para a sua inserção na nova caneca, onde são arranjados o número equivalente de monofilamentos



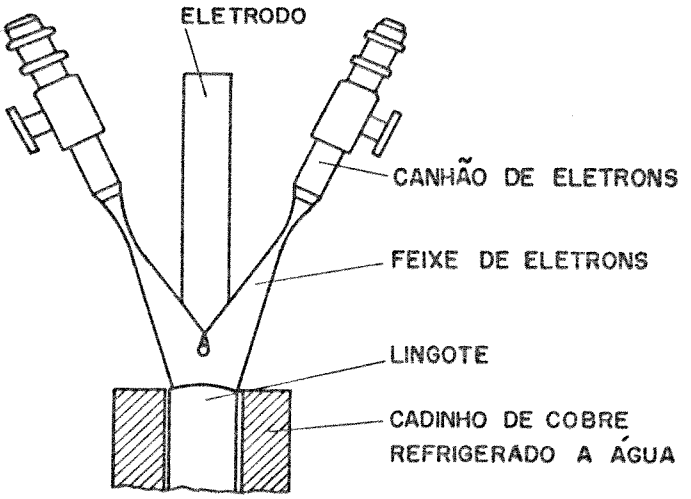


FIG. 5 - ESQUEMA DO FORNO DE FUSÃO A ARCO E FORNO DE FEIXE DE ELÉTRONS. /4/

papel tecnico Romilec

para formar o multifilamento, fig. 6.

Após nova extrusão, obtemos fio em diâmetro que varia de 15 a 30 mm dependendo da capacidade da prensa, sendo que o produto que geralmente atinge 200 a 300m é trefilado a frio até a dimensão final, com tratamentos térmicos intermediários, se desejado.

Desta forma obtém-se grandes comprimentos, que, dependendo do diâmetro final, chegam a dezenas de quilômetros.

Outro processo também utilizado, inicia-se com a inserção de barras de NbTi em bloco furado de cobre, onde o número de filamentos varia de 51 a 121, dependendo do diâmetro do "billet". Se usarmos billet de Ø 200mm para 121 filamentos com relação Cu/NbTi= 1,5 o diâmetro das barras iniciais de NbTi devem ser de Ø 17mm.

Após a montagem, o "billet" é extrudado, como no caso anterior, chegando ao produto final com extrusão em um só estágio. Este processo é utilizado para fios supercondutores de baixo número de filamentos, onde se deseja obter filamentos finos de $\sim$ 5μm , objetivando uso em magnetos para imagem por ressonância magnética.

A extrusão nos dois casos é sempre feita a quente, sendo que esta taxa de redução não contribui para a taxa de deformação total responsável pelo aumento de defeitos e consequentemente dos altos valores de J_c. Por este motivo, estuda-se processos alternativos de laminação a frio para obter altíssimas taxas de deformação $\sim 10^7$ onde os valores teóricos máximos de força de aprisionamento de vórtices possibilitarão grandes avanços no aumento de J_c.

II.4 - TREFILAÇÃO

Para a deformação do produto de extrusão com diâmetro de 30 a 15mm é necessário uso de cabeças monobloco com alta capacidade de tração ($\sim$25t) para 20% redução em área por passe.

Após redução até Ø 12mm pode ser utilizada mesmo uma linha de equipamentos para trefilação normal de cobre, até obter-se o diâmetro final desejado.

A otimização de J_c é executada nesta fase de deformação a frio. As figs. 7 e 8 apresentam alguns resultados para várias taxas de redução com ou sem tratamentos térmicos intermediários.

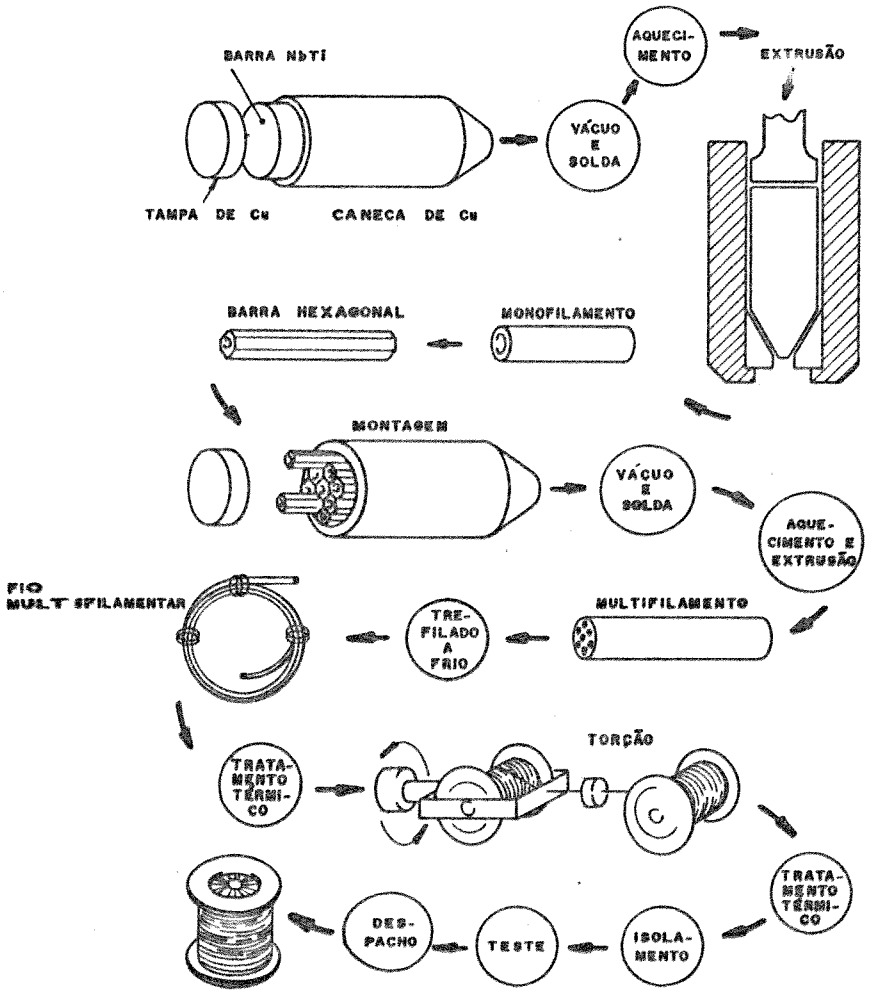


FIG. 6 - PROCESSO DE PRODUÇÃO DE FIOS MULTIFILAMENTARES DE NbTi. /5/

papel tecnico Romilec

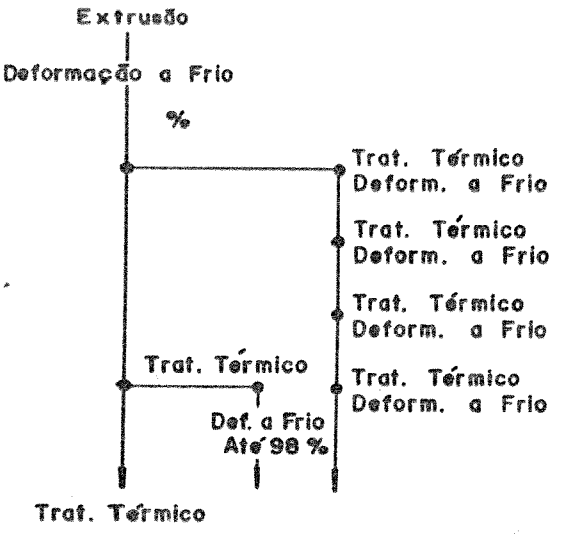


FIG. 7 - DIFERENTES TRATAMENTOS PARA OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES SUPERCONDUTORAS EM NbTi. /3/

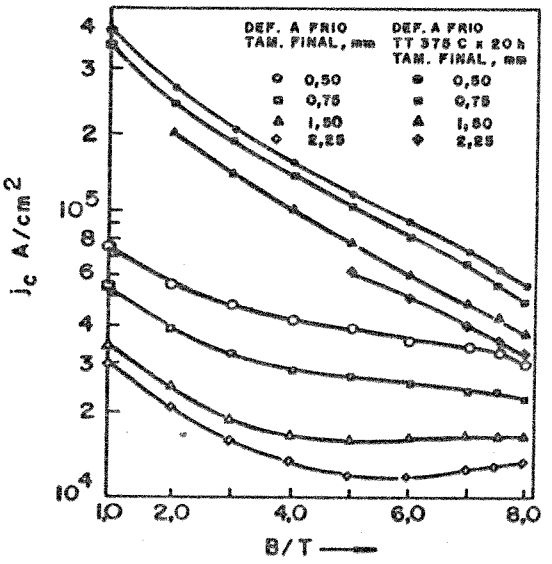


FIG. 8 - DENSIDADE DE CORRENTE CRÍTICA DA LIGA 45% P Ti EM FUNÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO. /3/

Formato A4 - 210 x 297 mm
papel tecnico Romilec

A influência da taxa de deformação elevada está melhor exemplificada através dos cálculos das forças de aprisionamento e sua correlação com tratamentos térmicos intermediários e os resultados de J_c. A fig. 9 ilustra este ajustamento para o caso de fios supercondutores processados à partir de ligas de NbTi obtidas por forno de feixe de elétrons, onde o teor de intersticiais é baixo e permite elevadas taxas de deformação.

Para maximizar o valor de J_c, deve-se ajustar as etapas de trefilação a frio, os tempos e as temperaturas de tratamento térmico, através do cálculo das forças de aprisionamento, por simulação numérica podendo ser estimados e posteriormente medidos por microscópio eletrônico de transmissão.

II.5 - TORÇÃO E ISOLAMENTO

Para reduzir as perdas por corrente induzidas, os fios supercondutores são torcidos em passos constantes dados por /5/

$$\ell_c^2 = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{2 \cdot 10^8 \rho_N \lambda^{1/2} J_{cd}}{\dot{B}} \cdot \frac{W}{W+d} \qquad \text{(II.3)}$$

onde:

$\lambda = \dfrac{\text{área NbTi}}{\text{área total}}$

ρ = resistividade do substrato normal (Ω.cm)

J_{cd} = densidade de corrente desejada (A/cm^2)

$\dot{B}$ = razão de variação do campo magnético (T/s)

W = distância entre filamentos (cm)

d = diâmetro dos filamentos (cm)

ℓ_c = comprimento crítico (cm)

Normalmente é utilizada a relação $(\ell/\ell_c)^2 = 0{,}1$ que define que somente 1/4 da corrente atravessará o substrato para $\ell < \ell_c$.

Na prática, a torção é executada alguns passos antes da dimensão final, principalmente quando se deseja obter condutores retangulares, pois a torção é executada ainda na forma redonda.

A figura 10 ilustra o princípio de um equipamento para torção do fio supercondutor.

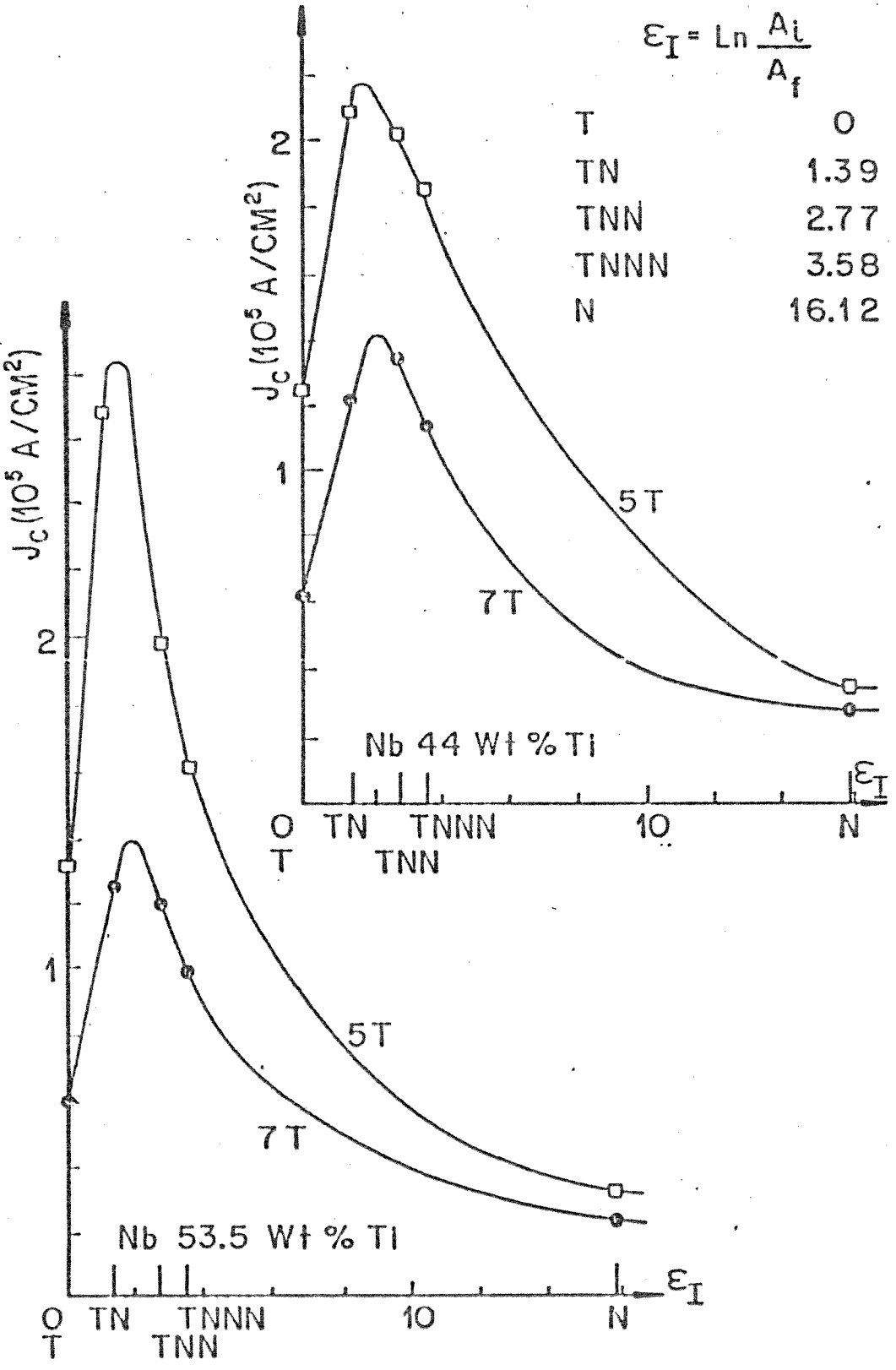
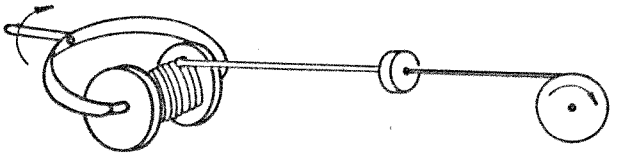


Fig. 9 - Corrente Crítica Versus Deformação para Ligas 53%pTi e 44%pTi /2/

a) ROTAÇÃO DO CARRETEL



b) ROTAÇÃO DA ESPIRA

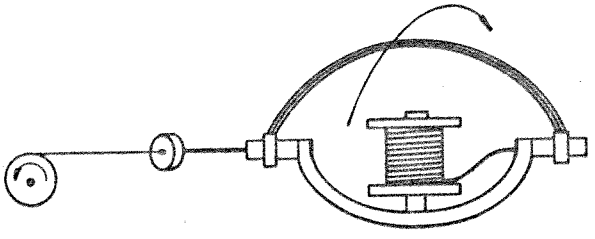


FIG. 10 - MÁQUINA PARA TORÇÃO DE FIOS SUPERCONDUTORES (TWIST). /5/

papel tecnico Romilec

O isolamento nos fios supercondutores é a última etapa, geralmente executada em várias camadas finas e superpostas de vernizes especiais (FORMVAR, KAPTON) que resistem às tensões em baixas temperaturas (4,2K). /6,7/

Normalmente as tensões elétricas de ruptura destes isolamentos correspondem a 14,5kV/mm, com espessura média utilizada de 20μm teremos uma isolação máxima entre camadas de 290V, o que nem sempre é suficiente, demandando a colocação de "mylar" como isolante adicional entre as camadas do enrolamento do magneto supercondutor.

II.6 - CONCLUSÕES

Os fios supercondutores de NbTi dominam 95% das aplicações da supercondutividade na atualidade. O mercado mundial processa centenas de toneladas/ano deste material a um custo médio de US$200/kg, representando valores de bilhões de dólares/ano.

No Capítulo I - Tabela II, vimos os tipos mais utilizados e seus respectivos fabricantes e aplicações, já mostrando uma certa padronização para disponibilidade de atendimento imediato, mesmo com o crescimento da demanda.

As propriedades do fio serão consideradas na escolha do tipo:

a) O processo metalúrgico de fabricação deve ser compatível para criar e otimizar os defeitos para aprisionamento de fluxóides;

b) O cobre utilizado como substrato deve ser de alta condutividade (eletrolítico livre de oxigênio);

c) As propriedades dos fios supercondutores devem ser reprodutíveis;

d) A fabricação de comprimentos longos deve ser possível;

e) Grande número de filamentos com pequeno diâmetro;

f) Otimização da relação Cu/NbTi de acordo com a aplicação;

g) Minimização dos custos de produção.

CAPÍTULO III

TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE FIOS SUPERCONDUTORES DE Nb_3Sn

III.1 - INTRODUÇÃO

Os materiais supercondutores de Nb_3Sn são classificados como compostos intermetálicos A-15. Suas propriedades supercondutoras estão resumidas na tabela I, onde estão também incluídas outros tipos A—15 com respectivas composições e características/1,2/.

Por se tratar de compostos intermetálicos sua fragilidade é muito grande o que dificulta sua fabricação, e posteriormente seu uso deve ser bem dimensionado para que não ocorra degradação de suas propriedades supercondutoras.

Sua aplicação concentra-se em magnetos para geração de altíssimos campos magnéticos 18 a 19T devido ao alto T_c e Bc_2. Os valores de J_c dependem muito do processo de fabricação e será tratado posteriormente.

Para possibilitar sua aplicação em magnetos foi utilizado o processo de fabricação filamentar, ou seja, os fios supercondutores são compostos de um grande número de filamentos finos distribuídos em substratos de baixa resistividade elétrica.

Todos os processos de fabricação utilizam a difusão do estanho na matriz de Nb para formação do Nb_3Sn, sempre colocando como estabilizante térmico o cobre eletrolítico-livre de oxigênio.

A otimização de J_c na maioria dos casos é feita através da variação da temperatura e tempo do tratamento térmico para difusão do Sn e formação do Nb_3Sn. A fig. 1 ilustra a dependência de J_c com o tamanho de grão da película de Nb_3Sn formada /3/.

III.2 - MÉTODO DO BRONZE

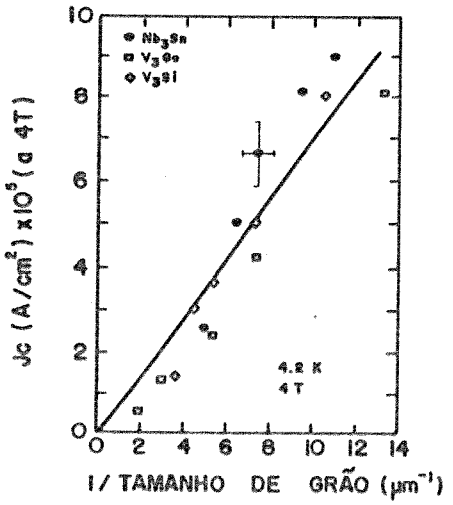
O método mais utilizado para produção de fios de Nb_3Sn é o do bronze, onde é preparada uma liga de CuSn de diversas composições, que passa a atuar como uma fonte de estanho para difusão.

Para se obter máxima difusão do Sn e formação do composto

Tabela I - Supercondutores A15 /1, 2/

ALTO CAMPO CRÍTICO (H_{C_2})		
COMPOSTO	T_c(K)	H_{C_2}(T) a 4,2K
Nb_3Sn	18,3	22,5
Nb_3Al	18,8	29,5
Nb_3Ge	23,0	37,0
Nb_3Ga	20,3	33,5
V_3Ga	15,0	22,0
V_3Si	17,1	22,5

OUTROS COMPOSTOS A15 DE Nb e V			
COMPOSTO	T_c(K)	COMPOSTO	T_c(K)
Nb_3O_3	0,94	V_3O_3	5,15
Nb_3Rh	2,5	V_3Rh	0,38
Nb_3Ir	1,76	V_3Ir	1,39
Nb_3Pt	10	V_3Ni	0,57
Nb_3Au	11	V_3Pd	0,08
Nb_3In	8	V_3Au	3,2
Nb_3Si	18	V_3Al	9,6
Nb_3Bi	2,25	V_3In	13,9
		V_3Ge	7,0
		V_3Sn	4,3
		V_3Pb	3,7
		V_3Sb	0,3



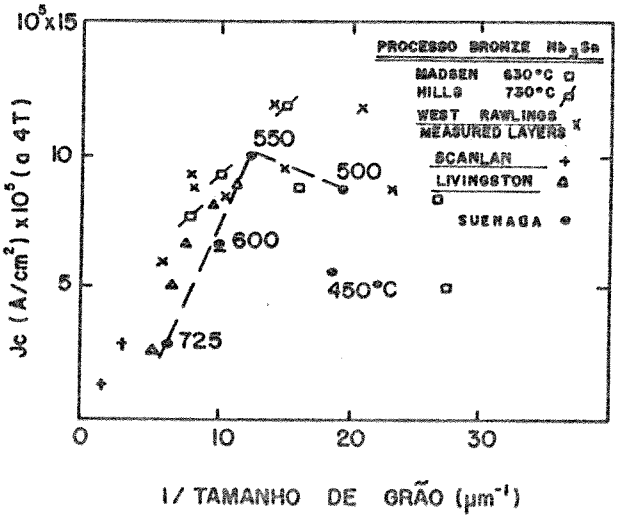


FIG. 1 – DEPENDÊNCIA DA DENSIDADE DE CORRENTE COM O TAMANHO DE GRÃO DO Nb_3Sn. /3/

Formato A4 - 210 x 297 mm

papel tecnico Romitec

Nb_3Sn na maior superfície possível, devemos utilizar a máxima concentração de Sn na liga CuSn porém, mantendo-se as propriedades de deformabilidade necessárias a fabricação dos fios supercondutores de Nb_3Sn.

Observando a fig. 2 do diagrama de fase Cu-Sn teremos como máxima composição para saturação α a liga com 13 $\sim$ 14%pSn. Porém, nos processos comerciais de fabricação do bronze, a desoxidação é feita com fósforo, que atua como inibidor da difusão de estanho. Em outro extremo, a deformabilidade depende do teor de oxigênio e nitrogênio que obriga a uma desoxidação caso contrário não será possível a deformação em taxas de 40% sem tratamentos térmicos intermediários.

Atualmente existe produção especial de bronze para aplicação supercondutora com baixo teor ou livre de fósforo, que são processados à vácuo em fornos de indução seguido de vazamento também a vácuo.

A fig. 3 ilustra os dois processos para produção de fios supercondutores Nb_3Sn pelo método do bronze.

O primeiro parte de tubos de bronze, onde são introduzidas as barras de Nb, sendo posteriormente trefilado em secção hexagonal, obtendo-se o novo filamento. Posteriormente vários monofilamentos são arranjados em um tubo de cobre e trefilados novamente até o diâmetro final.

Neste processo, a estabilização térmica pode ser feita na parte central ou externa sempre utilizando uma barreira de Ta para impedir a difusão do Sn no Cu e a sua contaminação.

O segundo processo utiliza a extrusão, sendo que o "billet" é obtido à partir de um bloco de bronze que é furado para receber várias barras de Nb sendo posteriormente selado a vácuo por solda de feixe de elétrons. Em seguida é extrudado em taxas que variam de 10 a 16 vezes, porém, necessitando de altíssimas capacidades de prensagem.

A figura 4 mostra a força necessária para extrusão de um "billet" em função da temperatura. Este processo a quente inicia o processo de difusão de Sn e consequente formação de Nb_3Sn, por isto a temperatura e o tempo de extrusão devem ser controlados.

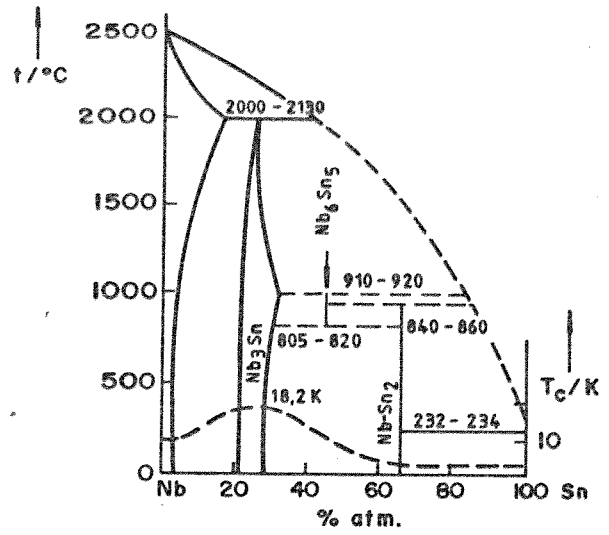


FIG. 2 - DIAGRAMA DE FASE Nb-Sn /4/

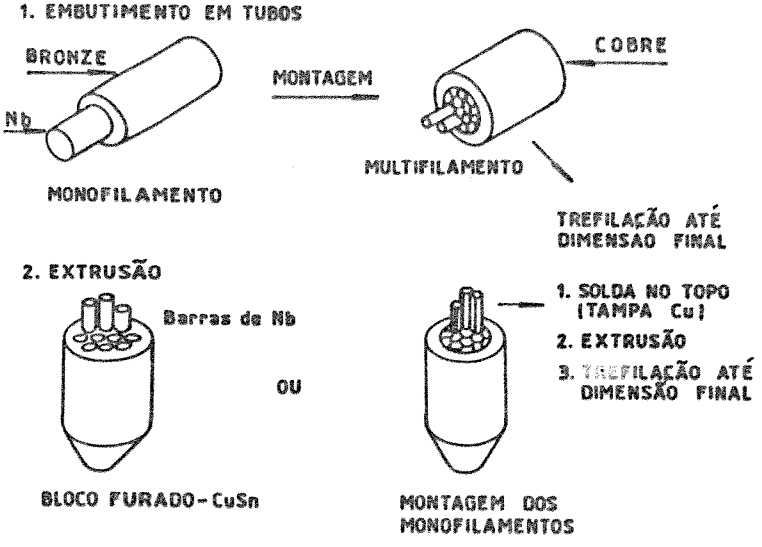


FIG. 3 - TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO POR TUBO OU EXTRUSÃO

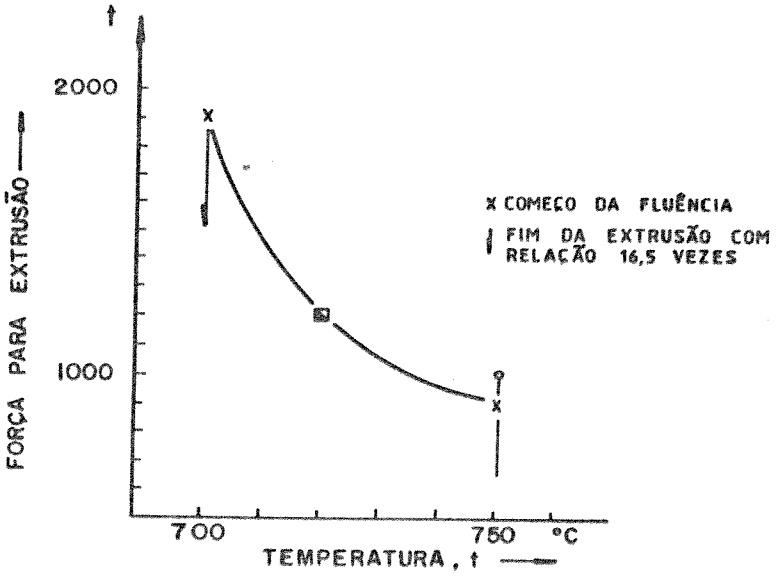


FIG. 4 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO BLOCO NA FORÇA NECESSÁRIA PARA EXTRUSÃO Nb-BRONZE /4/

papel tecnico Romilec

As camadas de Nb_3Sn formadas serão quebradas posteriormente nas deformações seguintes, porém, irão contribuir para o endurecimento do conjugado, o que não é desejável.

Para obter-se grande número de filamentos finos ($\sim$ 5μm), que permitirão a formação de 60% de Nb_3Sn do Nb disponível, o multifilamento produto da extrusão é reembutido novamente, agora adicionando o cobre estabilizador e a barreira de Ta.

Nesta etapa final as dificuldades de deformação atingem seu limite, pois somadas as forças necessárias para trefilação teremos a fragilização do bronze e dificuldade de rebobinamento na trefila. Para resolver este ponto são utilizados bancos retos de até 100m para trefilação passo a passo com redução de 10 a 15%, desde diâmetros de Ø 50 a 30 até 12mm, sempre com tratamentos térmicos intermediários abaixo de 450°C para recristalização do bronze.

A trefilação de Ø 12mm até diâmetros finais $\sim$ Ø 1mm é feita em sistema convencional de trefila monobloco e multifieiras, sempre com tratamentos térmicos intermediários a cada 40% de redução em área.

Nos dois métodos de fabricação do fio Nb_3Sn, pode-se escolher para executar o tratamento térmico para difusão do Sn e formação do Nb_3Sn, em temperatura de 700°C x $\sim$ 100 h antes ou depois do enrolamento do magneto supercondutor /5/.

No caso de primeiro formar o composto, para posterior enrolamento, apresenta a grande desvantagem que qualquer deformação ou torção durante o processo de construção do magneto pode quebrar o fio reagido, que é frágil, ou degradar suas propriedades tornando o magneto imprestável. A vantagem é que pode-se utilizar isolamentos normais pois o magneto após a construção estará pronto para o uso.

Utilizando-se o fio não reagido, as condições de execução do magneto são bem mais favoráveis no aspecto mecânico, porém, as condições de tratamento térmico à 700°C exigem emprego de materiais que resistam a esta temperatura. O fio deverá ser isolado com fibra de vidro ou quartzo, não será possível utilizar outros materiais para isolação das paredes da bobina a não ser fibra de vidro ou cerâmica /6, 7/.

Após o enrolamento do magneto, cuidados especiais devem ser tomados para projeto dos contatos elétricos que só poderão ser executados após a formação do Nb_3Sn. Neste caso, os pontos terminais do enrolamento podem causar a perda por completo do magneto pois são frágeis e necessitam serem fixados e conectados aos terminais externos, geralmente em NbTi, pois é região de baixo campo.

Nos dois processos, após o enrolamento do magneto, será impregnado com resina epóxi a vácuo, para impedir movimentação dos condutores quando o magneto for energizado, bem como suportar as tensões mecânicas nele desenvolvida. Em muitos casos há a necessidade de reforços mecânicos para suportar as altas tensões eletromagnéticas.

III.3 - DIFUSÃO LÍQUIDO-SÓLIDO

Devido às grandes dificuldades de deformação mecânica dos fios obtidos pelo método do bronze, bem como o alto custo de processamento, vários métodos alternativos foram estudados, destacando-se pelos excelentes resultados de J_c, o "processo modificado" que utiliza difusão, porém com Sn na fase líquida reagindo com o Nb.

Ao invés do bronze Cu 13%pSn, será utilizada uma liga opota Sn7%pCu que representa uma grande fonte de Sn e com excelentes propriedades de deformabilidade.

Para execução do monofilamento é utilizado um tubo de Nb onde é colocado a liga Sn7%pCu, porém, separados por um tubo concêntrico de cobre. O conjunto é deformado por laminação ou trefilação até as dimensões necessárias para o reembutimento, sempre terminando em forma hexagonal.

Vários monofilamentos Nb-Cu-Sn7%pCu são colocados em um tubo de cobre e o arranjo é trefilado até o diâmetro que permita o reembutimento em novo tubo de cobre. Neste processo são utilizados arranjos hexagonais de 19x6 monofilamentos /8/.

O conjunto de 6x19 monofilamentos é deformado até as dimensões finais, sem tratamento térmico intermediário, pois todos os materiais utilizados aceitam grande taxa de deformação.

Após a trefilação os fios são tratados termicamente para promover a difusão do Sn através do tubo de cobre formando um bron

ze com alto teor de Sn, isto é feito à temperatura de 500°C x 72h. Posteriormente a temperatura é elevada até 750°C, para a difusão do Sn no Nb e formação da película supercondutora Nb_3Sn na parte interna do tubo de Nb.

Neste processo não será necessário utilizar-se barreiras de Ta, pois a parte externa do tubo de Nb não reagida, faz esta função. Outra diferença do método do bronze é que durante todo o tratamento a liga Sn7%pCu é mantida no estado líquido, sendo necessário cuidados adicionais nas extremidades do fio para não haver perda do estanho.

O processo de formação do composto intermetálico Nb_3Sn, à partir de difusão sólido-líquido de Sn é o seguinte: primeiramente é formado $NbSn_2$ da reação entre Nb e Sn7%pCu, posteriormente transformada para Nb_6Sn_5 e finalmente obtém-se Nb_3Sn da reação entre a matriz de Nb e os compostos de Sn.

Após a difusão e formação do Nb_3Sn pode-se observar os buracos na liga Sn7%Cu devido ao efeito "Kirkendahl" da difusão do Sn para o Nb.

No caso de fios de Nb_3Sn, os principais centros de aprisionamento de fluxo (Flux Pinning Centers) são os contornos de grãodo composto intermetálico formado, portanto, quanto mais fina for a granulometria maior será J_c. A granulometria do Nb_3Sn formado depende da temperatura e tempo de formação que por sua vez, está diretamente relacionada com o tamanho de filamento para reação.

Os valores encontrados para J_c neste processo superam os do método do bronze por um fator de 2, atingindo $5 \sim 6.10^5 A/cm^2$ a 9T, para tratamentos à 700°C x 100h, conforme figura 5 /8/.

A deformação no processo de difusão líquido-sólido é a laminação e trefilação, pois para se utilizar extrusão seria necessário aquecer o "billet" à temperaturas de 700°C e a liga Sn7%Cu estaria em estado líquido, tormando o processo perigoso.

III.4 - METALURGIA DO PÓ

Devido às dificuldades de deformação encontradas no método do bronze que requer altíssimas forças para extrusão, passando pelo processo difusão líquido-sólido, que para maximizar J_c necessi-

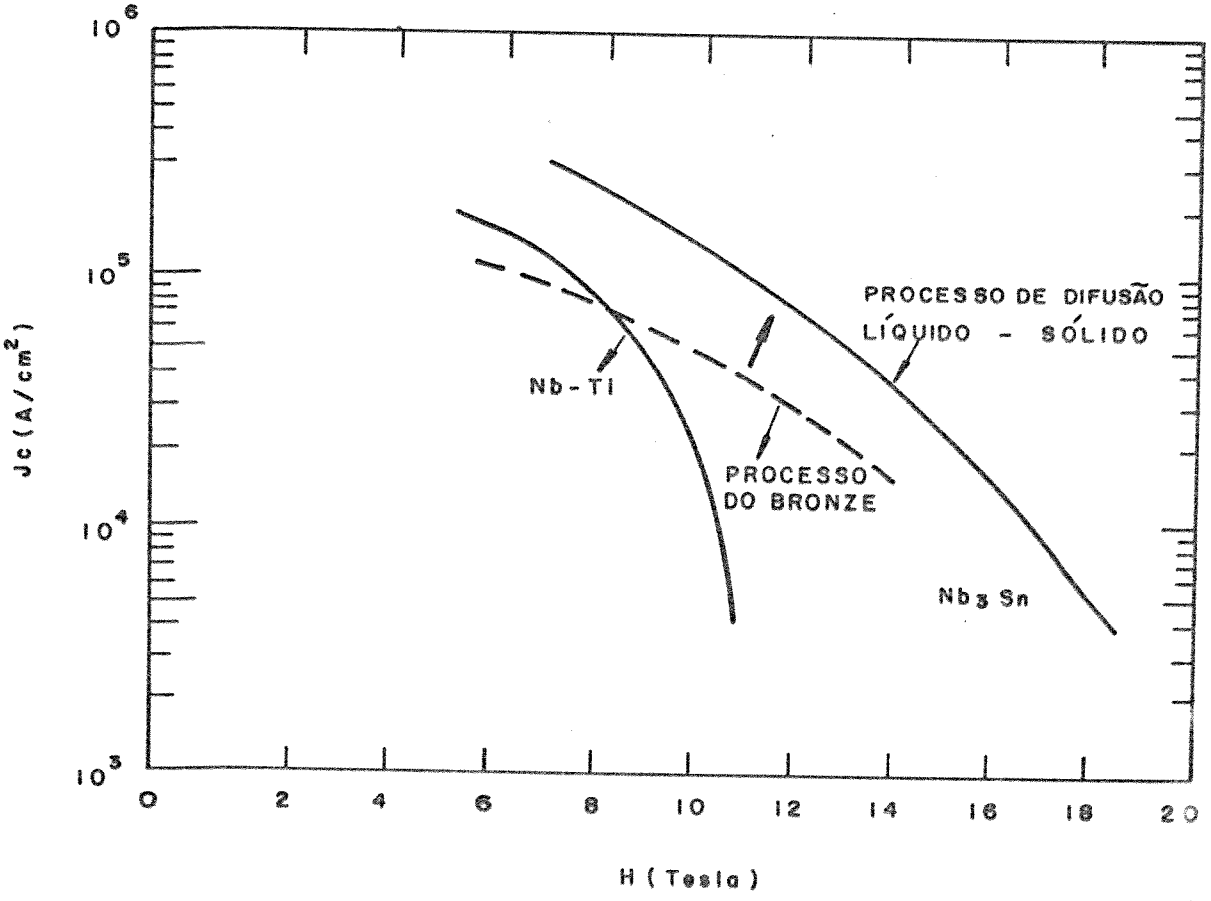


FIG. 5 - Jc x B PARA Nb_3Sn PROCESSO DE DIFUSÃO LÍQUIDO – SÓLIDO

ta de filamentos muitos finos para criar grande quantidade de centros de aprisionamento, e que nos dois processos os fios depois de reagidos podem, por esforços mecânicos, terem suas propriedades degradadas, foi procurada uma situação onde os filamentos fossem descontínuos e a supercondutividade mantida.

Como solução de todos estes problemas foi apresentada a tecnologia de processamento por metalurgia do pó, onde os filamentos passavam a ser descontínuos porém, em altíssimas quantidades para mesma secção transversal dos outros processos. Conseguia-se também filamentos com diâmetros equivalentes, na faixa de submícron que permite, durante o processo de difusão, a total transformação em Nb_3Sn e sua estrutura continuar bem fina.

Os processos utilizados para difusão foram ajustados às condições da metalurgia do pó onde a deformação é feita a frio e sem tratamentos térmicos intermediários, portanto, a difusão líquido-sólido será melhor sucedida.

Inicialmente se prepara a liga de Sn7%Cu por prensagem da mistura de pó de cobre e aparas de Sn. Posteriormente a mistura é fundida em forno de indução a vácuo, usinada e inserida em tubo de cobre. O conjunto é extrudado até diâmetro necessário para embutimento na liga Cu-Nb.

A liga Cu20 $\sim$ 30%pNb é preparada à partir da mistura dos pós (Nb100 mesh, Cu 80 mesh), prensagem e posteriormente fundida em forno de indução a vácuo até a temperatura de fusão do cobre. O produto é usinado para remoção dos defeitos de superfície e posteriormente furado para receber a liga Cu Sn7%Cu /9/.

As deformações do conjunto inicia-se por extrusão para iniciar a deformação dos grãos do pó de Nb na direção do eixo de alongamento. Em seguida é utilizado forjamento rotativo (swage) para produzir o alongamento dos filamentos de Nb. Finalmente passamos ao processo de trefilação para deformação final, sempre sem tratamentos térmicos.

Caso seja necessário, pode-se proceder o reembutimento para obter maior número de filamentos e consequentemente de menor diâmetro, aumentando-se J_c.

O fio obtido passa agora por tratamento térmico para difu

são do Sn da liga Sn7%Cu, para o Cu, formando Cu12 ∿15%Sn e posterior reação com o nióbio dispersado na matriz de cobre transformada em bronze, formando o Nb_3Sn.

A estabilização térmica com cobre pode ser feita com deposição externa de cobre por processo eletrolítico ou em caso de reembutimento colocar-se um núcleo de fios de cobre com barreira de Ta.

Apesar do processo ser metalurgicamente mais indicado pela facilidade de deformação os resultados alcançados demonstram a necessidade de implemento e otimização de parâmetros, principalmente no que se refere a homogeneidade das propriedades em grandes comprimentos. Esta variação das propriedades ao longo do fio deve-se ao problema de não-uniformidade de distribuição do pó de Nb na liga Cu20 ∿ 30 %pNb, bem como dos parâmetros críticos de difusão (temperatura e velocidade).

III.5 - ADIÇÃO DE TERCEIRO ELEMENTO

Para aplicação em geração de altíssimos campos magnéticos foram testados vários dopantes como terceiro elemento no convencional processo de obtenção de Nb_3Sn, objetivando elevar Bc_2. Os resultados são apresentados na figura 6 para os diversos processos de fabricação.

Os melhores resultados foram para o uso de Ti como dopante onde Bc_2 foi aumentado para ∿ 25T a 4,2K. A condição ótima encontrada para adição do Ti foi no processamento do bronze onde 0,4 ∿ 0,5% at permite por difusão conjunta com Sn obter-se $(NbTi)_3Sn$.

Para $(NbTi)_3Sn$ com adição do Ti no bronze obteve-se J_c = $3,8.10^4 A/cm^2$ a 15T para processamento onde o filamento termina com 4 ∿ 5μm e tratamento de difusão a temepratura de 650 ∿ 700°C./10/.

Outra forma de adição do Ti é diretamente ao Nb, que é um processo mais caro, porém, apresenta resultados na faixa de J_c = $4.10^4 A/cm^2$ a 17T possibilitando a construção de magnetos para 15T com grande "bore".

Processo equivalente com adição de Ta como dopante diretamente ao Nb, possibilita obter-se (Nb 7%Ta)$_3$Sn que apresenta o mesmo desempenho do $(NbTi)_3Sn$. Este processo é bem mais caro, pois a

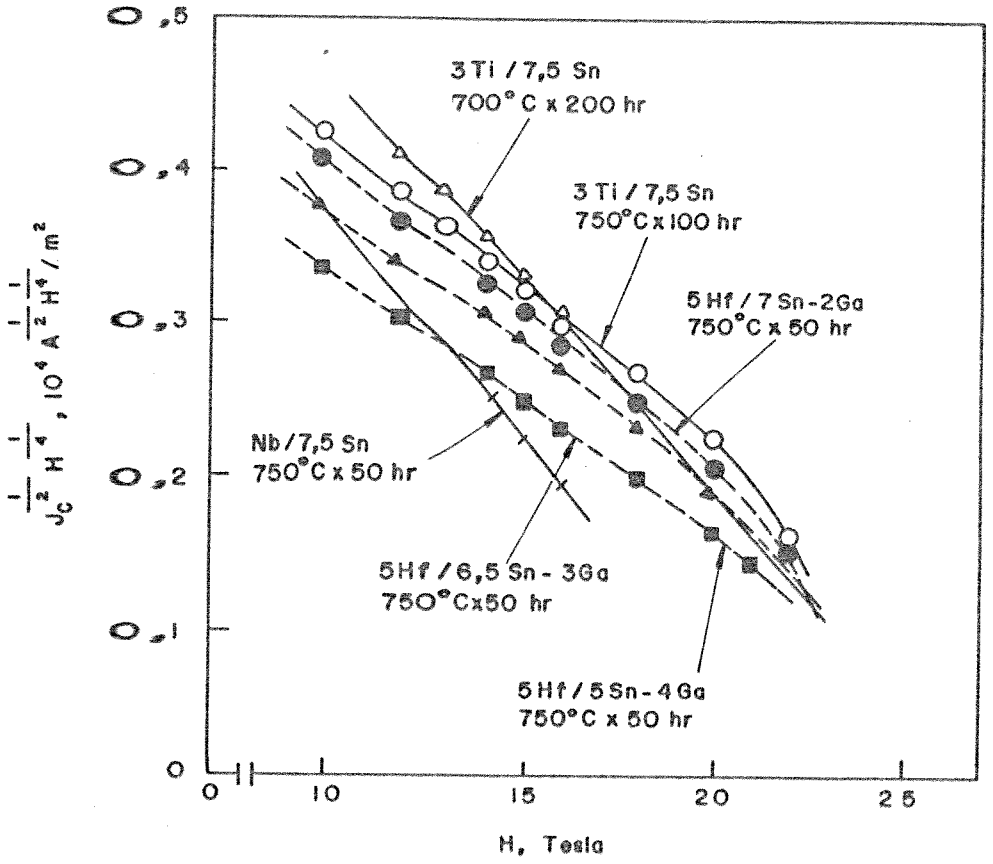


FIG. 6 - J_c (TOTAL) $\frac{1}{2}$ $H^{\frac{1}{4}}$ VERSUS H

papel tecnico Romilec

adição de 7 %pTa comparado com 0,5 %pTi e considerando o alto custo do Ta, confirma a melhor viabilidade do $(NbTi)_3Sn$.

A fig. 7 mostra alguns resultados comparativos do Nb_3Sn pelo método de bronze, para $(NbTi_3Sn$ e $(NbTa)_3Sn$ /11/.

III.6 - CONCLUSÕES

O desenvolvimento na fabricação de fios Nb_3Sn tem apresentado progressos significativos nestes últimos anos, permitindo a construção de magnetos para geração de até 20T.

Estes progressos são identificados na fig. 8 que mostra J_c x B para fios obtidos na última década até os resultados mais recentes de $(NbTi)_3Sn$ /12/

Para o dimensionamento de magnetos para altíssimos campos magnéticos, é utilizado NbTi na região de baixo campo funcionando como magneto de excitação (até 7T) ligado em série como o magneto de Nb_3Sn (até 12T), que por sua vez é ligado em série com o magneto de $(NbTi)_3Sn$ para gerar 15T ∿ 19T.

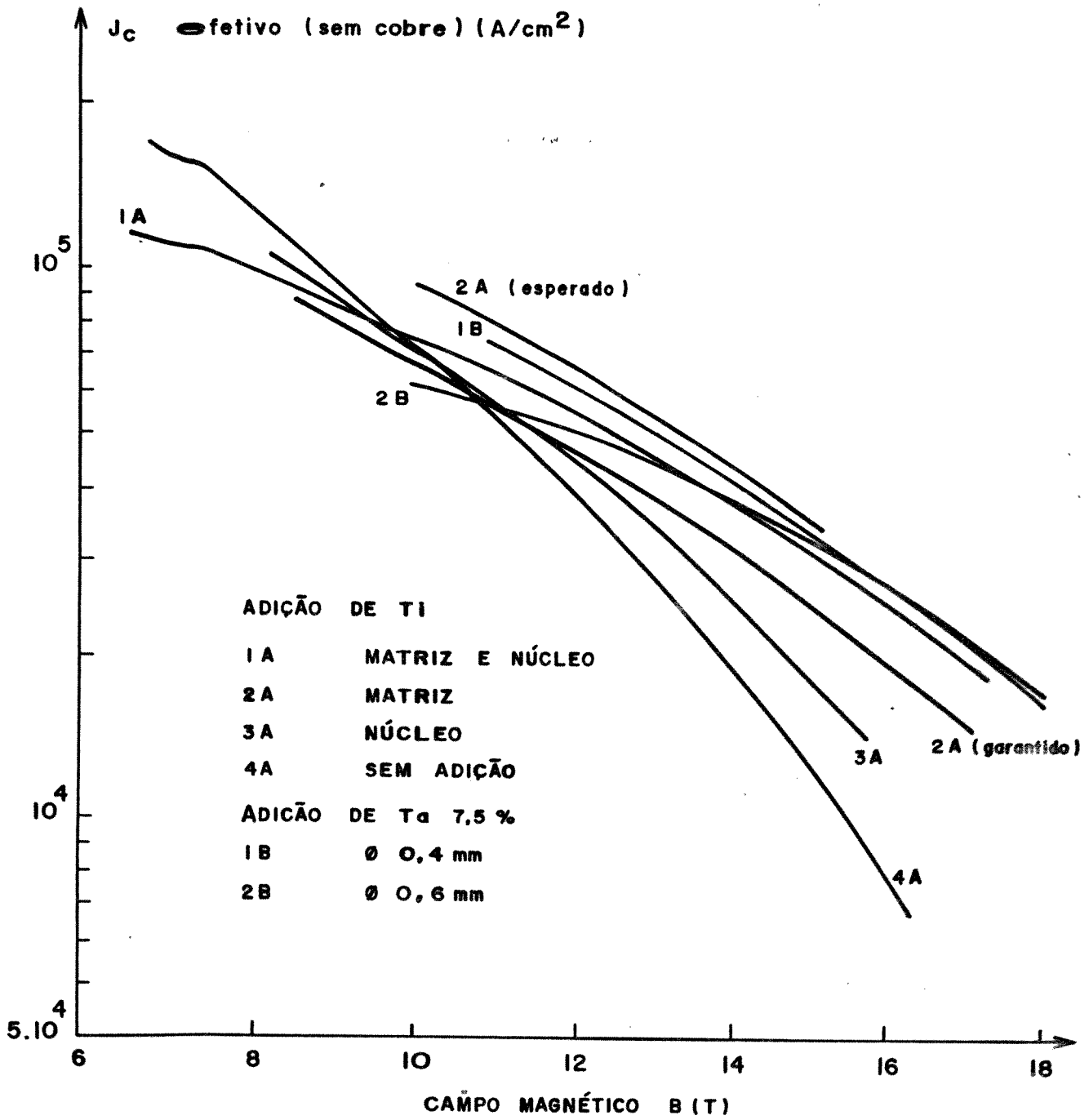


FIG. 7 - J_c VERSUS B PARA FIOS DE $(NbTi)_3Sn$ E $(NbTa)_3Sn$ /11/

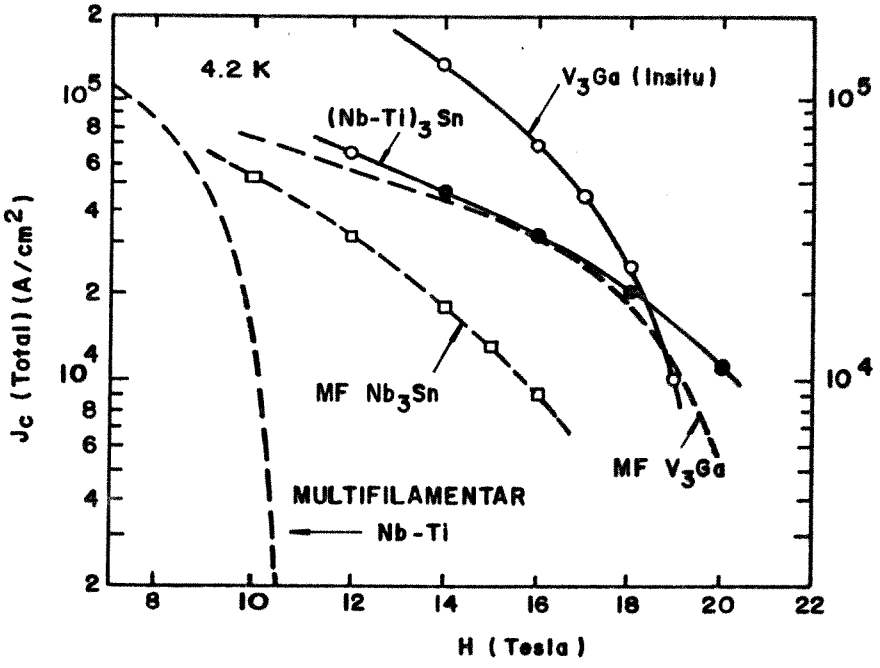


FIG.8 - J_c(TOTAL) VERSUS H PARA FIOS MULTIFILAMENTARES DE $(Nb,Ti)_3Sn$ E V_3Ga (INSITU) /12/

CAPÍTULO IV

CAMPO MAGNÉTICO - GERAÇÃO E MAPEAMENTO

IV.1 - INTRODUÇÃO

A utilização de magnetos supercondutores para geração de altos campos magnéticos está relacionada com o baixo consumo de energia (manutenção das condições para supercondutividade), estabilidade, homogeneidade e ausência de dissipação de energia, isto tanto para unidades de pequeno como de grande porte.

A geometria do enrolamento depende muito do campo magnético e de sua distribuição dentro da unidade. Para este trabalho iremos classificá-los em cilíndricos e não-cilíndricos.

No caso de enrolamentos não-cilíndricos os tipos mais utilizados são o pista-de corrida (RACE TRACK), o sela (SADDLE) e o tipo D.

No dimensionamento de um magneto supercondutor, no que se refere ao campo gerado, devem ser respeitados alguns parâmetros críticos para um bom projeto, que garantam a manutenção das propriedades supercondutoras do fio utilizado, bem como atendam o valor e a homogeneidade do campo desejado. Posteriormente deve ser minimizado o volume de condutor utilizado sem comprometer o projeto porém, reduzindo seu custo.

As propriedades básicas à serem respeitadas são: o valor do campo magnético crítico B_c, a densidade de corrente crítica J_c e a temperatura crítica T_c, todas associadas ao tipo do fio supercondutor escolhido.

Os efeitos das tensões mecânicas, da indutância e energia estocada serão tratados em capítulo à parte, porém podem exigir mudanças no dimensionamento do campo magnético, quer na geometria quer no fio supercondutor escolhido.

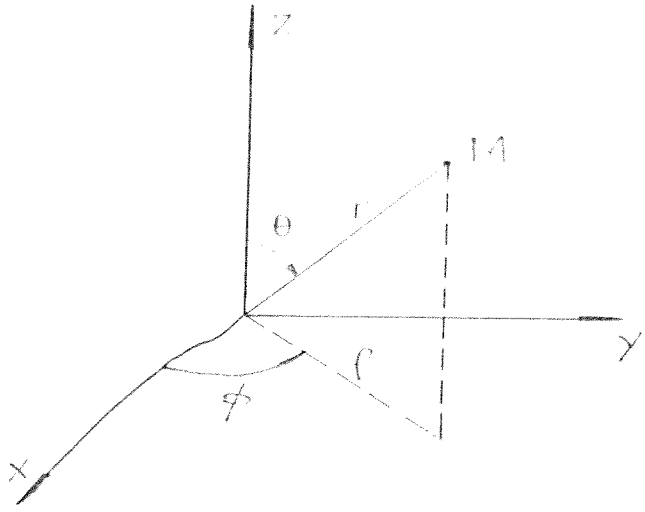
IV.2 - MAGNETOS CILÍNDRICOS - SOLENÓIDE

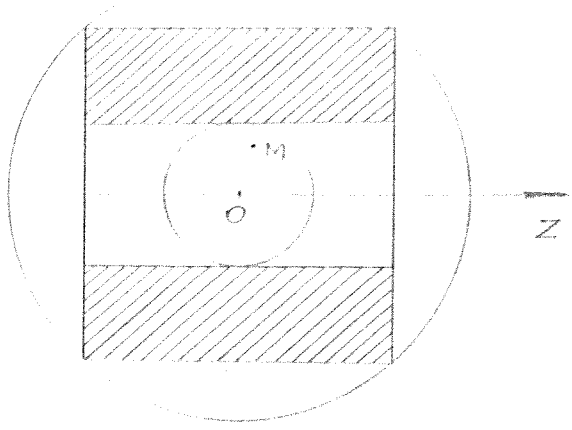
Para o cálculo do campo magnético, seu mapeamento e homogeneidade existem vários métodos desenvolvidos, sendo que os mais uti-

lizado são:

IV_2.1- Método dos Polinômios (Potencial Escalar): Este método permite obter as equações básicas do campo magnético, que posteriormente são resolvidas por equações de Laplace /1/.

Definimos à seguir o sistema de coordenadas esféricas utilizado e o domínio de validade das equações de Laplace para a solução da equação do Potencial Escalar, sendo que o ponto de cálculo M não deve estar entre as duas esferas de domínio.





As coordenadas r, θ, φ podem ser associadas a x, y, z pelas equações:

$$x = r \operatorname{sen}\theta \cos\phi$$

$$y = r \operatorname{sen}\theta \operatorname{sen}\phi$$

$$z = r \cos\theta$$

Com este sistema de coordenadas a equação de Laplace $\nabla^2 V = 0$ pode ser escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r}\right) + \frac{1}{\operatorname{sen}\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\operatorname{sen}\theta \frac{\partial V}{\partial \theta}\right) + \frac{1}{\operatorname{sen}^2\theta}\frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} = 0 \qquad \text{(IV.1)}$$

obtendo como solução: $V = R(r)\ \Theta(\theta)\ \Phi(\phi)$ onde:

$$R = Ar^{n} + Br^{-n-1}$$

$$\Phi = A'\operatorname{sen} m\phi + B'\cos m\phi$$

$$\Theta = A''\, P_n^m(\cos\theta) + B''\, Q_n^m(\cos\theta)$$

sendo m, n números inteiros; A, B, A', B', A", B" constantes arbitrárias determinadas pelas condições de contorno; $P_n^m(\cos\theta)$ e $Q_n^m(\cos\theta)$ são respectivamente as funções associadas de 1ª e 2ª espécie de Legendre.

Logo, a solução geral da equação de Laplace para coordenadas esféricas é:

$$V(r,\theta,\phi) = \sum_{n=0}^{\infty}\left(Ar^{n} + Br^{-n-1}\right)\sum_{m=0}^{m=n}\left[A''P_n^m(\cos\theta) + B''Q_n^m(\cos\theta)\right]\left[A'\operatorname{sen} m\phi + B'\cos m\phi\right] \qquad \text{(IV.2)}$$

Para uso no cálculo do campo do solenóide, a equação do potencial pode ser simplificada considerando-se:

a) O ponto M de cálculo é contínuo e interior à esfera que tangencia o enrolamento internamente.

b) O ponto M de cálculo é exterior à esfera que tangencia os contornos do enrolamento.

c) O ponto M de cálculo está situado entre as duas esferas. Neste caso a equação de Laplace não é válida, pois $\nabla^2 V \neq 0$ no interior do enrolamento.

Concentrando nosso cálculo no caso a, obtemos as equações básicas para o cálculo do campo magnético do ponto M da esfera interna ao enrolamento como descrito no Apêndice 1:

$$B_z(r,\theta) = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n-2)!}\left[B_z^{(2n-2)}(0,0)\right]r^{2n-2}P_{2n-2}(\cos\theta) \qquad \text{(IV.3)}$$

$$B_\rho(r,\theta) = -\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n-1)!}\left[B_z^{(2n-2)}(0,0)\right]r^{2n-2}P'_{2n-2}(\cos\theta) \qquad \text{(IV.4)}$$

onde:

$$B_z^{(2n-2)}(0,0) = \left[\frac{d^{2n-2} B_z(z,0)}{dz^{2n-2}} \right] \qquad \text{(IV.5)}$$

Este processo é muito utilizado para o dimensionamento de magnetos de altíssima homogeneidade (para NMR) onde pode ser ajustada a geometria do enrolamento ou usando bobinas compensadoras, para que os termos de segunda e quarta ordem sejam anulados. Neste caso, obtemos as curvas da função erro mostrada na figura 1 correspondendo a n=1, n=2, n=3 respectivamante 1%, 0,1% e 0,01%/2/.

Para o dimensionamento completo dos esforços mecânicos a que o enrolamento estará sujeito há a necessidade de se conhecer a distribuição do campo magnético no interior do enrolamento, neste caso não pode ser utilizado o método apresentado devido às condições especiais da equação de Laplace.

IV.2.2- Cálculo do Campo Magnético ao Longo do Eixo: A relação inicial entre campo e corrente é obtida através da espira elementar, onde o campo pode ser escrito pela equação básica de Biot-Savart /3, 4/.

$$d\vec{B} = kI \frac{d\vec{\ell} \times \vec{S}}{|\vec{S}|^3} \qquad \text{(IV.6)}$$

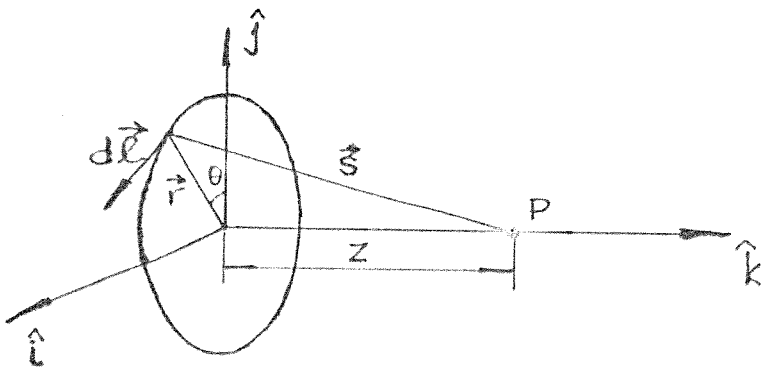
onde:

B = campo magnético no ponto P

I = corrente elétrica no elemento $d\vec{\ell}$ da espira

$\vec{S}$ = vetor posição medido do elemento $d\vec{\ell}$ ao ponto P

$$k = \frac{\mu_o}{4\pi} = 10^{-7} \frac{Wb}{A.m} = 10^{-1} \frac{G.cm}{A}$$



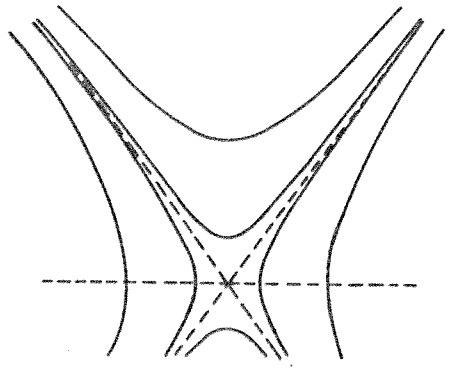


FIG. 1a - FUNÇÃO ERRO - SEGUNDA ORDEM PARA CAMPO CENTRAL E GRADIENTE

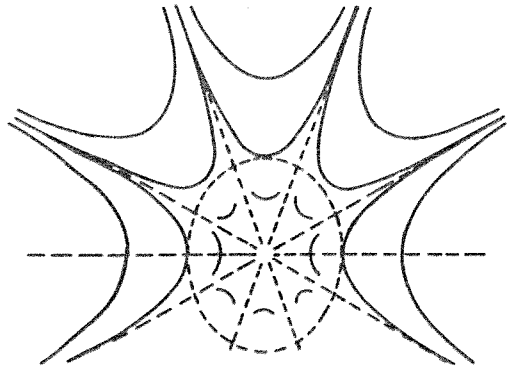


FIG. 1b - ERRO QUARTA ORDEM COM CONTORNO ESFÉRICO

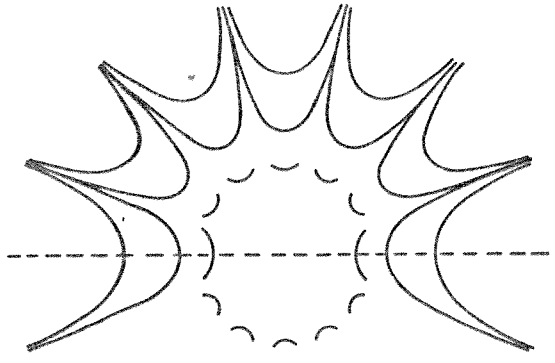


FIG. 1c - ERRO SEXTA ORDEM

papel tecnico Romitec

onde:

$$d\ell = \hat{i}dx + \hat{j}dy$$

$$dx = r\,\mathrm{sen}\theta\, d\theta$$

$$dy = r\cos\theta\, d\theta$$

$$\vec{s} = -r\cos\theta\hat{i} - r\,\mathrm{sen}\theta\hat{j} + z\hat{k}$$

$$|\vec{s}| = (r^2 + z^2)^{1/2}$$

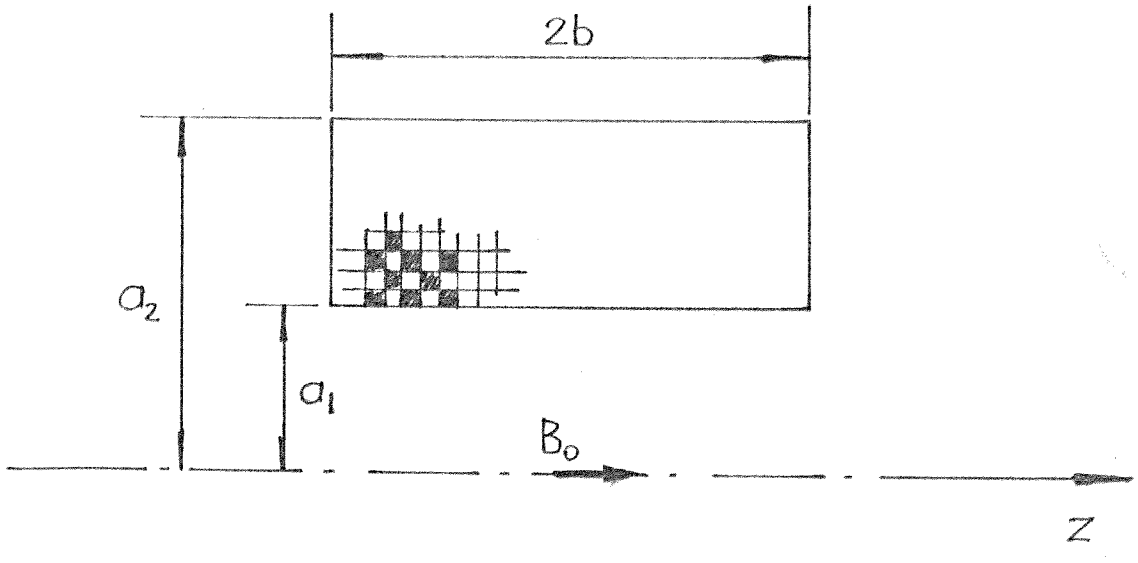
Substituindo na equação (IV.6)

$$\vec{B} = kI \int_0^{2\pi} \frac{(zr\cos\theta\,\hat{i} + zr\,\mathrm{sen}\theta\hat{j} + r^2\hat{k})}{(r^2+z^2)^{3/2}}\, d\theta \qquad \text{(IV.7)}$$

como a integral dos dois primeiros termos é nula obtemos:

$$\vec{B} = \frac{2\pi I}{10}\,\frac{r^2}{(r^2+z^2)^{3/2}}\,\hat{k} \quad (\text{Gauss}) \qquad \text{(IV.8)}$$

O campo gerado por uma bobina pode ser calculado integrando-se IV.8 sobre os eixos r e z, pois as espiras neste caso são coaxiais.



$$I' = \frac{NI}{2b}$$

$$\vec{B} = \frac{2\pi I'}{10} \int_{-b}^{b} \int_{a_1}^{a_2} \frac{r^2 \hat{k}}{(r^2+z^2)^{3/2}} \, dr.dz \qquad \text{(IV.9)}$$

$$B_o = \frac{4\pi I'}{10} \int_{a_1}^{a_2} \frac{r^2 b}{(r^2+b^2)} \, dr \qquad \text{(IV.10)}$$

$$B_o = \frac{4\pi I'}{10} \ln \frac{a_2 + (a_2^2 + b^2)^{1/2}}{a_1 + (a_1^2 + b^2)^{1/2}} \qquad \text{(IV.11)}$$

definindo: $\alpha = \frac{a_2}{a_1}$, $\beta = \frac{b}{a_1}$

$$B_o = \frac{4\pi}{10} a_1 I \beta \ln \frac{\alpha + (\alpha^2+\beta^2)^{1/2}}{1 + (1+\beta^2)^{1/2}} \qquad \text{(IV.12)}$$

definindo: $\lambda = \frac{\text{Secção ativa do enrolamento}}{\text{Secção total do enrolamento}}$

J = densidade de corrente total

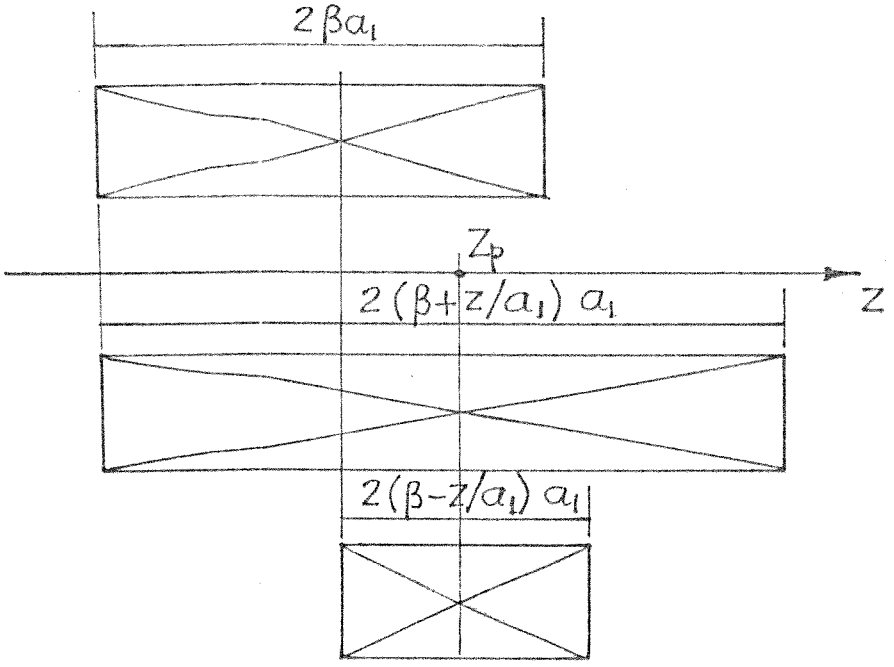
podemos utilizar λJ como densidade de corrente efetiva.

$$\lambda J = \frac{NI}{2b(a_2 - a_1)} \qquad \text{(IV.13)}$$

$$B_o = \frac{4\pi}{10} \beta \lambda J a_1 \ln \frac{\alpha + (\alpha^2+\beta^2)^{1/2}}{1 + (1+\beta^2)^{1/2}} \qquad \text{(IV.14)}$$

A eq. (IV.14) permite o cálculo do campo magnético no centro da bobina.

O cálculo do campo em diferentes pontos sobre o eixo-z utiliza o critério da superposição dos campos finais de duas sub-bobinas originadas da repartição do solenóide.



Para pontos internos à bobina temos:

$$B_z\left(\frac{z}{a_1}\right) = \frac{\lambda J a_1}{2}\left[F\left(\alpha, \beta+\frac{z}{a_1}\right) + F\left(\alpha, \beta-\frac{z}{a_1}\right)\right] \qquad \text{(IV.15)}$$

onde : $$F(\alpha, \beta) = 4\pi\beta \ln \frac{\alpha+(\alpha^2+\beta^2)^{1/2}}{1+(1+\beta^2)^{1/2}}$$

quando $z/a_1 > \beta$, ou seja, ponto externo à bobina devemos usar a relação:

$$F(\alpha, \beta - \frac{z}{a_1}) = -F(\alpha, \frac{z}{a_1} - \beta) \qquad \text{(IV.16)}$$

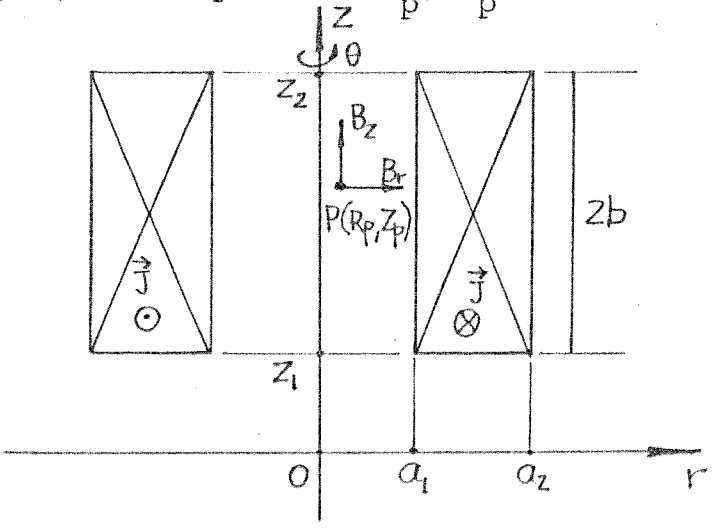
Em qualquer caso, para o cálculo de campo ao longo do eixo z podemos relacionar B_z com B_o através de:

$$B_z\left(\frac{z}{a_1}\right) = B_o\left[\frac{F(\alpha,\beta+z/a_1)+F(\alpha,\beta-z/a_1)}{2F(\alpha,\beta)}\right] \qquad \text{(IV.17)}$$

lembrando que $B_o = \lambda J a_1 F(\alpha, \beta)$ onde $F(\alpha, \beta) = 4\pi\beta\ell n \frac{\alpha+(\alpha^2+\beta^2)^{1/2}}{1+(1+\beta^2)^{1/2}}$.

A Figura 2 relaciona $F(\alpha, \beta)$ com α, β mostrando a curva de volume mínimo do enrolamento, que permite o ajuste inicial dos parâmetros geométricos com o campo magnético B_o desejado.

IV.2.3- Cálculo do Campo Fora do Eixo do Solenoide/4/ - Para o cálculo do campo magnético em qualquer ponto do espaço utilizando a Lei de Biot-Savart(IV.6) para o campo gerado pelo elemento $Id\vec{\ell}$ de coordenadas $(a, 0, z)$ no ponto $P(R_p, Z_p)$ situado no plano ZR.



$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} I \frac{d\vec{\ell} \times \vec{S}}{|\vec{S}|^3} \qquad \text{(IV.18)}$$

onde:

$$d\vec{\ell} = -a \operatorname{sen}\theta \, d\theta \, \hat{r} + a \cos\theta \, d\theta \, \hat{\theta}$$

$$\vec{S} = S_r \hat{r} + S_\theta \hat{\theta} + S_z \hat{k}$$

$$\vec{S} = (R_p - a\cos\theta)\hat{r} - a \operatorname{sen}\theta \hat{\theta} + (Z_p - Z)\hat{k}$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o I}{4\pi} \left\{ \frac{(Z_p - z) a \cos\theta \, \hat{r} + (Z_p - z) a \operatorname{sen}\theta + (a^2 - a R_p \cos\theta)\hat{k}}{[a^2 + R_p^2 + (Z_p - z)^2 - 2aR_p\cos\theta]^{3/2}} \right\} d\theta \qquad \text{(IV.19)}$$

integrando no intervalo $|0, 2\pi|$ obtemos o campo magnético devido a uma espira:

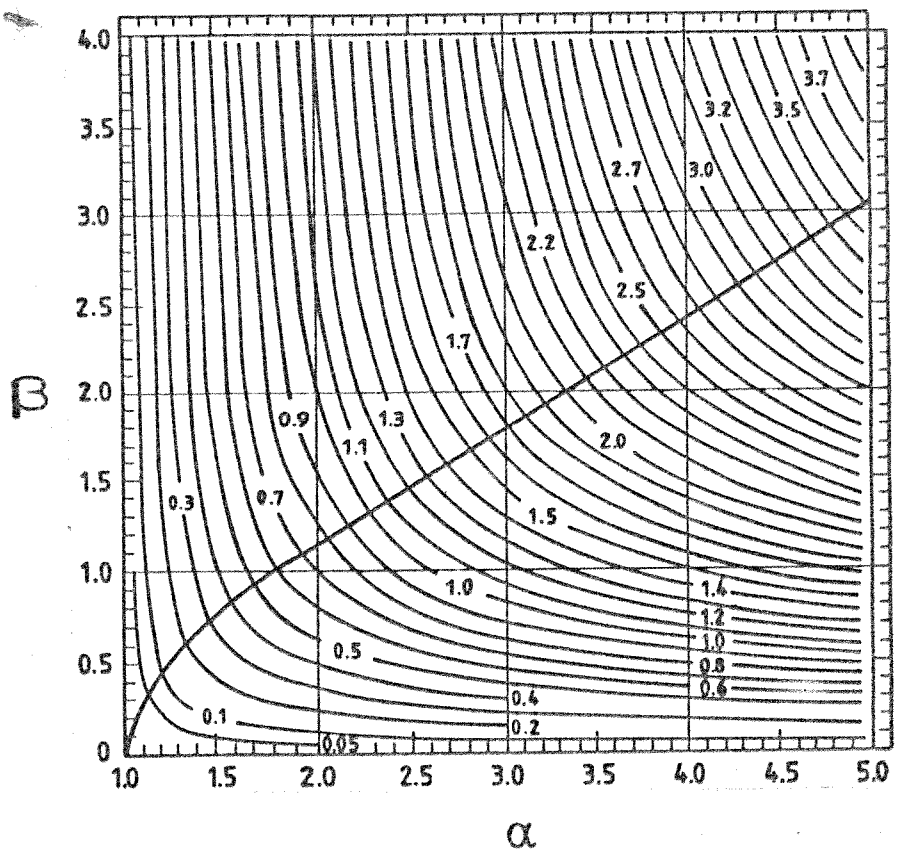


FIG. 2 - DEPENDÊNCIA GEOMÉTRICA DA FUNCÃO (α, β) EM TERMOS DE α E β /3/

papel tecnico Romilec

$$\vec{B}' = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(Z_p - z)\, a\cos\theta\, \hat{r} + (Z_p - z)\, a\,\mathrm{sen}\theta\, \hat{\theta} + (a^2 - aR_p\cos\theta)\,\hat{k}}{\left[a^2 + R_p^2 + (Z_p - z)^2 - 2aR_p\cos\theta\right]^{3/2}}\, d\theta \qquad \text{(IV.20)}$$

A componente em $\hat{\theta}$ do campo magnético é uma função ímpar cuja integral no intervalo $|0, 2\pi|$ é nula, pela simetria do sistema:

$$B'_\theta = 0$$

Para obter-se o valor do campo magnético do solenóide de raio interno a_1, raio externo a_2, e comprimento 2b devemos integrar a eq. IV.20 em a e z obtendo-se as componentes do campo B_r e B_z:

$$B_r = kJ \int_{a_1}^{a_2} \int_{z_1}^{z_2} \int_0^{2\pi} \frac{(Z_p - z)\, a\cos\theta\, d\theta\, dz\, da}{\left[a^2 + R_p^2 + (Z_p - z)^2 - 2aR_p\cos\theta\right]^{3/2}} \qquad \text{(IV.21)}$$

$$B_z = kJ \int_{a_1}^{a_2} \int_{z_1}^{z_2} \int_0^{2\pi} \frac{a^2 - aR_p\cos\theta\, d\theta\, dz\, da}{\left[a^2 + R_p^2 + (Z_p - z)^2 - 2aR_p\cos\theta\right]^{3/2}} \qquad \text{(IV.22)}$$

As integrações serão feitas de forma analítica e estão detalhadas no Apêndice 1, resultando em:

$$B_r = \left\{ B_{r_1}(a,z) + B_{r_2}(a,z) \right\} \Big]_{z_1}^{z_2} \Big]_{a_1}^{a_2} \qquad \text{(IV.23)}$$

onde:

$$B_{r_1}(a,z) = kJ \int_0^{2\pi} R\cos\theta\, d\theta \qquad \text{(IV.24)}$$

$$B_{r_2}(a,z) = kJ \int_0^{2\pi} R_p\cos^2\theta\, \ln(R + a - R_p\cos\theta)\, d\theta \qquad \text{(IV.25)}$$

sendo $R = \sqrt{a^2 + R_p^2 + (z - Z_p)^2 - 2aR_p\cos\theta}$

$$B_z = \left\{ B_{z_1}(a,z) + B_{z_2}(a,z) + B_{z_3}(a,z) \right\} \Big]_{a_1}^{a_2} \Big]_{z_1}^{z_2} \qquad \text{(IV.26)}$$

onde:

$$B_{z_1}(a,z) = kJ \int_0^{2\pi} \frac{(z-Z_p) R_p \cos\theta}{2|z-Z_p|} \ln\left(\frac{R-|z-Z_p|}{R+|z-Z_p|}\right) d\theta \qquad \text{(IV.27)}$$

$$B_{z_2}(a,z) = kJ \int_0^{2\pi} (z-Z_p) \ln(R+a-R_p\cos\theta)\, d\theta \qquad \text{(IV.28)}$$

$$B_{z_3}(a,z) = -kJ \int_0^{2\pi} R_p \operatorname{sen}\theta \cdot \operatorname{arctg}\left[\frac{a-R_p\cos\theta(z-Z_p)}{RR_p\operatorname{sen}\theta}\right] d\theta \qquad \text{(IV.29)}$$

As expressões de B_r e B_z serão avaliadas numericamente através do programa de computação para mapeamento da distribuição do campo magnético.

IV.2.4- Mapeamento do Campo Magnético Através de Computador/5/

Para a montagem do diagrama de blocos do programa, vamos determinar os pontos singulares de cálculo visando otimizar o algoritimo e eliminar possíveis indeterminações matemáticas que dificultam o processo de integração numérica.

A análise destes pontos singulares estão no Apêndice 1 resumidos a seguir /5/.

B_r — Quadro I

B_z — Quadro II e III

Seguindo o diagrama de blocos, fig. 3, os dados de entrada são preparados conforme segue:

a_1, a_2 - raio interno e externo do solenóide, respectivamente.

b_1, b_2 - Semi-altura inferior e superior, respectivamente

DR, DZ - Partição do condutor da direção R e Z, respectivamente.

RINC - Coordenada r do ponto inicial do mapeamento

ZINC - Coordenada z do ponto inicial do mapeamento

DRO - Incremento para ponto seguinte em r

DDZ - Incremento para ponto seguinte em z

Quadro I - Aplicação de Equações para o Cálculo de B_r

Valor de Z_p	$Z_p - Z_2$					$Z_p - Z_1$					Z_p Z_1 Z_2
Valor de R_p	$R_p < a_1$	$R_p = a_1$	$a_1 < R_p < a_2$	$R_p = a_2$	$R_p > a_2$	$R_p < a_1$	$R_p = a_1$	$a_1 < R_p < a_2$	$R_p = a_2$	$R_p > a_2$	Qualquer
$B_{r2}(a_1, Z_2)$	Eq.1	Eq.2	Eq.3	Eq.3	Eq.3	Eq.1	Eq.1	Eq.1	Eq.1	Eq.1	Eq.1
$B_{r2}(a_2, Z_2)$	Eq.1	Eq.1	Eq.1	Eq.2	Eq.3	Eq.1	Eq.1	Eq.1	Eq.1	Eq.1	Eq.1
$B_{r2}(a_1, Z_1)$	Eq.1	Eq.1	Eq.1	Eq.1	Eq.1	Eq.1	Eq.2	Eq.3	Eq.3	Eq.3	Eq.1
$B_{r2}(a_2, Z_1)$	Eq.1	Eq.1	Eq.1	Eq.1	Eq.1	Eq.1	Eq.1	Eq.1	Eq.2	Eq.3	Eq.4
$B_{r1}(a,Z)$	Aplique a Eq.4										

Eq. 1 $$Br_2(a,z)=\frac{J}{10}R_p\int_0^{2\pi}\cos^2\theta\,\ell n(R+a-R_p\cos\theta)\,d\theta$$

Eq. 2 $$Br_2(R_p, Z_p)=\frac{J}{10}R_p\int_0^{2\pi}\cos^2\theta\,\ell n\,R_p(\sqrt{2(1-\cos\theta}+1-\cos\theta\,d\theta$$

Eq. 3 $$Br_2(a, Z_p)=2\frac{J}{10}R_p\left\{\int_0^{\pi/2}\cos^2\theta\,\ell n\,\frac{R_p^2(1-\cos^2\theta)}{R-a+R_p\cos\theta}\,d\theta+\int_{\pi/2}^{\pi}\cos^2\theta\,\ell n(R+a-R_p\cos\theta)\,d\theta\right\}$$

Eq. 4 $$Br_1(a, Z)=\frac{J}{10}\int_0^{2\pi}R\cos\theta\,d\theta \text{ onde } R=\sqrt{a^2-2aR_p\cos\theta+R_p2+(Z-Z_p)^2}$$

Quadro II - Aplicação de Equações para o Cálculo de B_{z1}, B_{z3}

Valor de Z_p	$Z_p = Z_2$	$Z_p = Z_1$	$Z_p \neq Z_1, Z_2$
Valor de R_p	Qualquer	Qualquer	Qualquer
$B_{z2}(a_1, z_2)$	0	Eq. 5	Eq. 5
$B_{z2}(a_2, z_2)$	0	Eq. 5	Eq. 5
$B_{z2}(a_1, z_1)$	Eq. 5	0	Eq. 5
$B_{z2}(a_2, z_1)$	Eq. 5	0	Eq. 5
$B_{z3}(a_1, z_2)$	0	Eq. 6	Eq. 6
$B_{z3}(a_2, z_2)$	0	Eq. 6	Eq. 6
$B_{z3}(a_1, z_1)$	Eq. 6	0	Eq. 6
$B_{z3}(a_2, z_1)$	Eq. 6	0	Eq. 6

Eq. 5 $$B_{Z1}(a, Z) = \frac{J}{10} \int_0^{2\pi} (Z - Z_p) \ell n (R + a - R_p \cos\theta) \, d\theta$$

Eq. 6 $$B_{Z3}(a, Z) = \frac{J}{10} R_p \int_0^{2\pi} \operatorname{sen}\theta \, \tan^{-1} \left\{ \frac{a - R_p \cos\theta)(Z - Z_p)}{R_p R \operatorname{sen}\theta} \right\}$$

Quadro III - Aplicação de Equações para o Cálculo de B_{z2}

Valor de Z_p	$Z_p = Z_2$			$Z_p = Z_1$			Z_p Z_1, Z_2		
Valor de R_p	$R_p=a_1$	$R_p=a_2$	$R_p \neq a_1$ a_2	$R_p=a_1$	$R_p=a_2$	$R_p \neq a_1$ a_2	$R_p=a_1$	$R_p=a_2$	$R_p \neq a_1$ a_2
B_{z1} (a_1,Z_2)	0	0	0	Eq. 8	Eq. 7	Eq. 7	Eq. 8	Eq. 7	Eq. 7
B_{z1} (a_2,Z_2)	0	0	0	Eq. 7	Eq. 8	Eq. 7	Eq. 7	Eq. 8	Eq. 7
B_{z1} (a_1,Z_1)	Eq. 8	Eq. 7	Eq. 7	0	0	0	Eq. 8	Eq. 7	Eq. 7
B_{z1} (a_2,Z_1)	Eq. 7	Eq. 8	Eq. 7	0	0	0	Eq. 7	Eq. 8	Eq. 7

$$\text{Eq. 7} \quad B_{Z2}(a, Z) = \frac{K}{2} R_p \int_0^{2\pi} \frac{(Z-Z_p)}{|Z-Z_p|} \cos\theta \ell n \left(\frac{R-|Z-Z_p|}{R+|Z-Z_p|}\right) d\theta$$

$$\text{Eq. 8} \quad B_{Z2}(R_p, Z) = \frac{K}{2} R_p \frac{(Z-Z_p)}{|Z-Z_p|} \int_0^{2\pi} \cos\theta \ \ell n \frac{2R_p^2(1-\cos\theta)}{(R+|Z-Z_p|)^2} d\theta$$

Fig. 3 - Diagrama de Blocos para Programa de Mapeamento do Campo Magnético - "Solenóides"

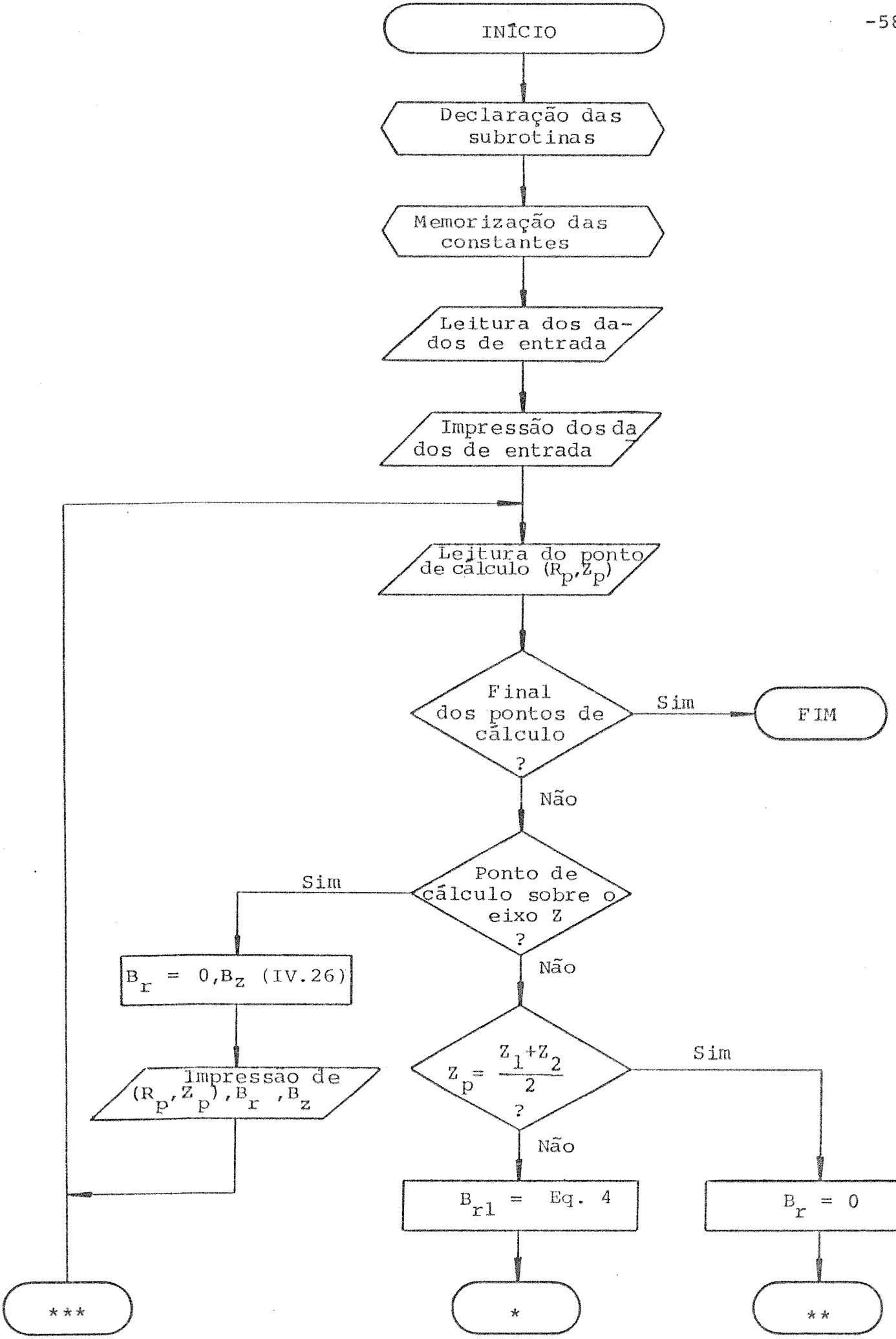
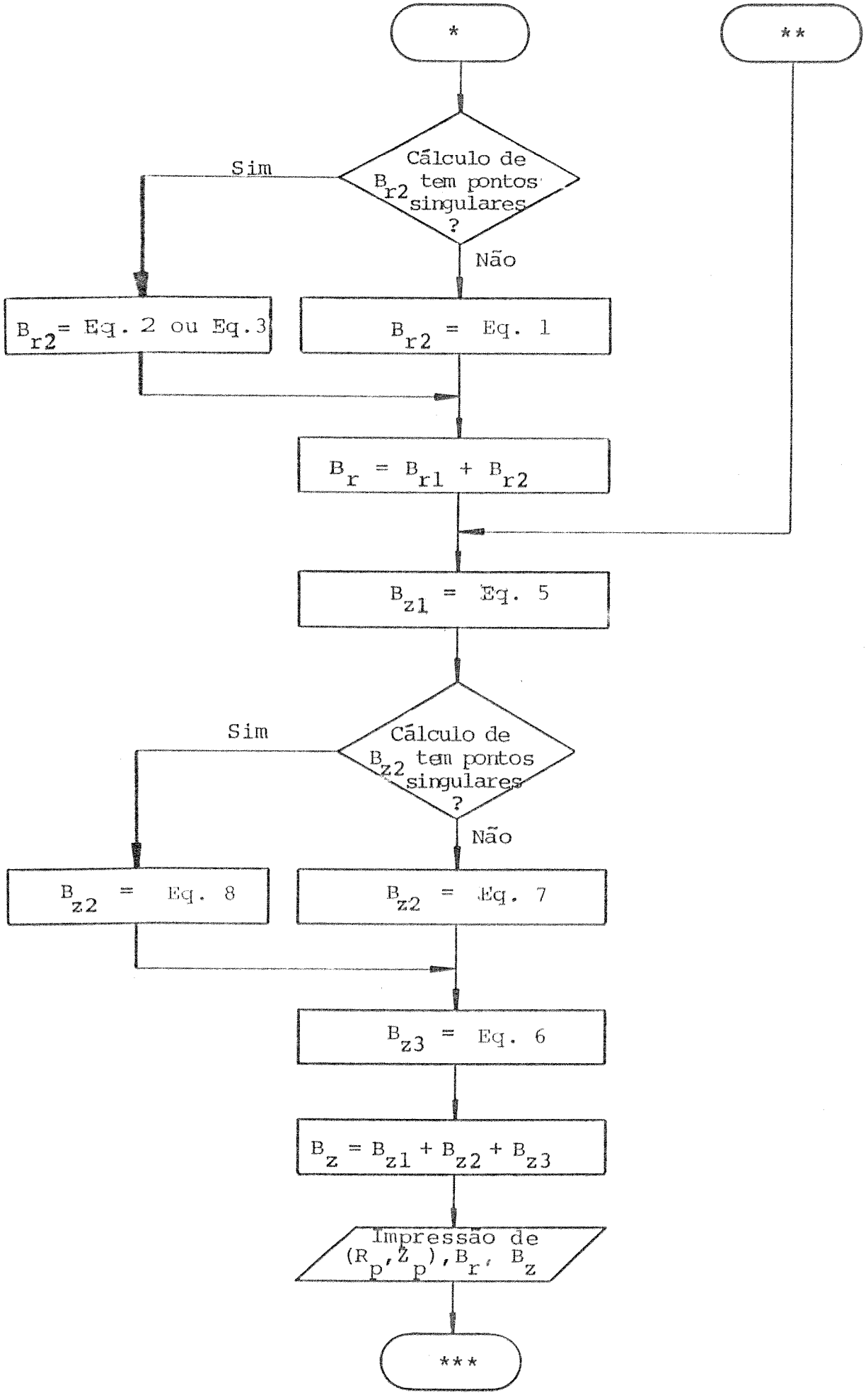


Fig. 3 - Diagrama de Blocos (Continuação)



Após a leitura dos dados o programa testa a posição de cálculo em relação aos pontos com singularidade e calcula os componentes B_r e B_z para cada ponto, gerado pelos incrementos à partir do ponto de referência.

A saída é apresentada em uma matriz LM x KM, por componente B_r e B_z e posteriormente B_{total}, sempre em (G/A). Esta saída em (G/A) permite o ajuste da corrente de operação para gerar o campo magnético desejado, além de facilitar o uso destes resultados com dados dos programas de cálculo das tensões mecânicas.

Para uso do programa em cálculo de campo magnético gerado por várias bobinas cilíndricas concêntricas basta colocar em seqüência os blocos de dados de entrada. A saída dará o mapeamento separado para cada bobina e no final o campo resultante da soma total das contribuições de cada bobina.

Este critério de dimensionamento de magnetos em vários setores é utilizado para otimizar os custos de fabricação, como por exemplo, um magneto de 12T com parte central em Nb_3Sn gerando 7T e NbTi externamente, gerando 5T.

No caso de magnetos em que desejamos homogeneidade superior a 0,01% é necessário o uso de bobinas compensadoras para se eliminar a distorção de borda causada ao campo magnético. Neste caso o cálculo será executado como se fossem 3 (três) bobinas separadamente com diferentes parâmetros de entrada.

Além do uso de bobinas compensadoras outra técnica utilizada é a redução do diâmetro do fio da bobina externa permitindo um ajuste fino no cálculo que considera as dimensões incrementais do condutor espira-a-espira, além do que permite o uso de λJ mais elevado visto o condutor estar sendo otimizado para uso em campo magnético de menor intensidade.

No Capítulo VII trataremos do dimensionamento de diferentes tipos de magnetos solenóides onde será exemplificado o procedimento ora descrito.

Com o mapeamento da distribuição do campo magnético em componentes B_z e B_r poderemos plotar para diversos valores de r e z , os perfís das componentes axiais e radiais do campo em diversas regiões: região central, região do enrolamento e região externa.

Os gráficos obtidos pelo mapeamento facilitarão a interpretação dos milhares de pontos interpolados bem como a localização dos pontos críticos do dimensionamento, onde o campo magnético é máximo.

Este procedimento será indispensável quando utilizarmos múltiplos enrolamentos com diferentes diâmetros de condutor e muitas vezes com diferentes tipos de supercondutor (NbTi, Nb_3Sn, V_3Ga).

No caso mais simples de um único enrolamento, o valor máximo do campo será encontrado no início do enrolamento $B_{max}=B(z, a_1)$; porém, em bobinas múltiplas este ponto ou região é interno e localizado apenas pelo mapeamento.

Consideramos na maioria dos casos que a relação $B_{max}/B_o=1,1$ representa um bom dimensionamento para magnetos com homogeneidade $\sim$ 0.1%. Em condições especiais, onde o volume de condutor não é minimizado, a relação $B_{max}/B_o = 1,05$ ou menor pode ser obtida.

O mapeamento de campo é fundamental para o cálculo das tensões mecânicas a que será submetido o magneto quando energizado. No Capítulo V ilustraremos o cálculo das forças atuantes em diversos tipos de magnetos supercondutores.

IV.3 - MAGNETO TIPO PISTA-DE-CORRIDA

O magneto tipo pista-de-corrida é um dispositivo eletromagnético composto de um enrolamento com duas partes retas paralelas entre si e duas partes curvas situadas nas extremidades das partes retas unindo-as. A figura 4 mostra um magneto pista-de-corrida com o sistema de coordenadas localizado no centro do magneto.

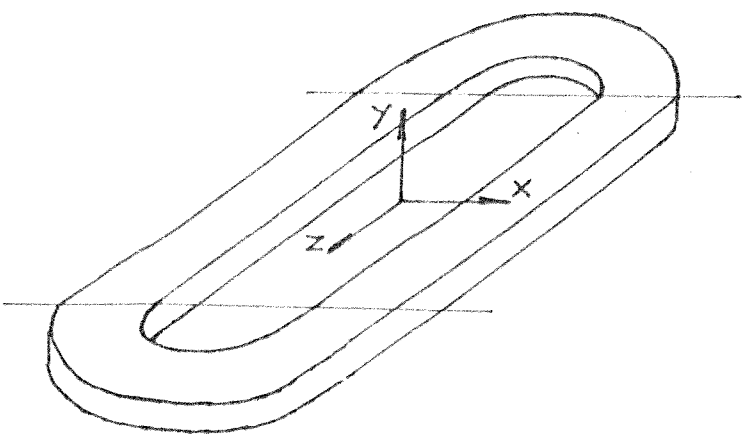


Fig. 4 - Magneto Supercondutor Tipo Pista-de-Corrida

Este tipo de configuração geométrica favorece à geração de de um campo magnético de componente B_y muito intenso tanto na direção - z como na direção - x. Às vezes são utilizadas duas bobinas sobrepostas, separadas por uma certa distância, na qual se deseja criar um campo de alta intensidade na região entre as duas bobinas. Estas características tornam o uso deste tipo de configuração bastante adequado em canais de geração de energia por MHD, em magnetos focalizadores de feixe de partículas em anéis de armazenamento e aceleração de partículas de alta energia, nos rotores de geradores elétricos supercondutores e nos atuais onduladores e "wigglers" supercondutores utilizados em anéis de radiação síncrotron /7,8/.

A tecnologia de fabricação deste tipo de magneto é mais simples do que a do magneto tipo "sela", também utilizado nas mesmas situações do que o tipo "pista-de-corrida", porém, a quantidade de fio supercondutor necessária para o "pista" é maior do que a do "sela".

O cálculo eletromagnético é baseado na equação de Biot-Savart para um condutor reto de corrente elétrica I que gera um campo magnético $\vec{B}$ num ponto situado na coordenada $\vec{r}$:

$$\vec{B} = kI \int_r \frac{d\vec{\ell} \times (\vec{r} - \vec{r}_o)}{|\vec{r} - \vec{r}_o|^3} \qquad \text{(IV.30)}$$

Calculando-se a integral acima para um sistema de eixos retangulares obtém-se:

$$B_x = \frac{kI\,(y-y_o)(z-z_o)}{\left[(x-x_o)^2+(y-y_o)^2\right]\sqrt{(x-x_o)^2+(y-y_o)^2+(z-z_o)^2}} \qquad \text{(IV.31)}$$

e

$$B_y = \frac{kI\,(x-x_o)(z-z_o)}{\left[(x-x_o)^2+(y-y_o)^2\right]\sqrt{(x-x_o)^2+(y-y_o)^2+(z-z_o)^2}} \qquad \text{(IV.32)}$$

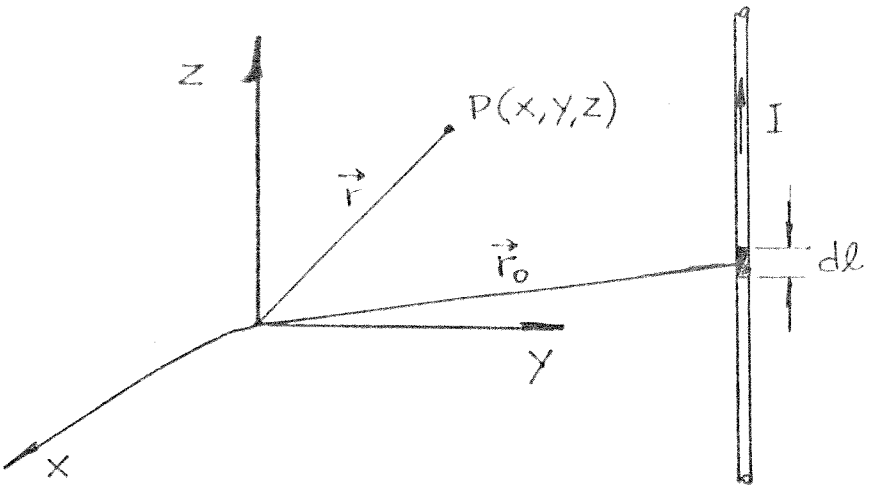


Fig. 5 - Sistema de Coordenadas e Condutor de Corrente I, que Gera um Campo Magnético no Ponto P.

Para o cálculo de um magneto pista-de-corrida composto de dois magnetos sobrepostos, deve-se dividir cada um dos magnetos em suas partes retas e curvas. O cálculo do campo devido às partes retas é feito aplicando-se diretamente as equações IV.31 e IV.32 a cada uma das espiras que compoẽm o magneto: o campo resultante é a soma da contribuição de cada espira sobre o ponto de cálculo. Para a parte curva é necessário fazer-se uma aproximação: divide-se a parte curva em N pedaços iguais de modo que cada pedaço curvo seja tão pequeno a ponto de ser aproximado por um pequeno retângulo infinitesimal, de onde pode-se aplicar as equações IV.31 e IV.32 para o cálculo do campo para cada um dos pedaços infinitesimais. Contudo algumas correções geométricas são necessárias.

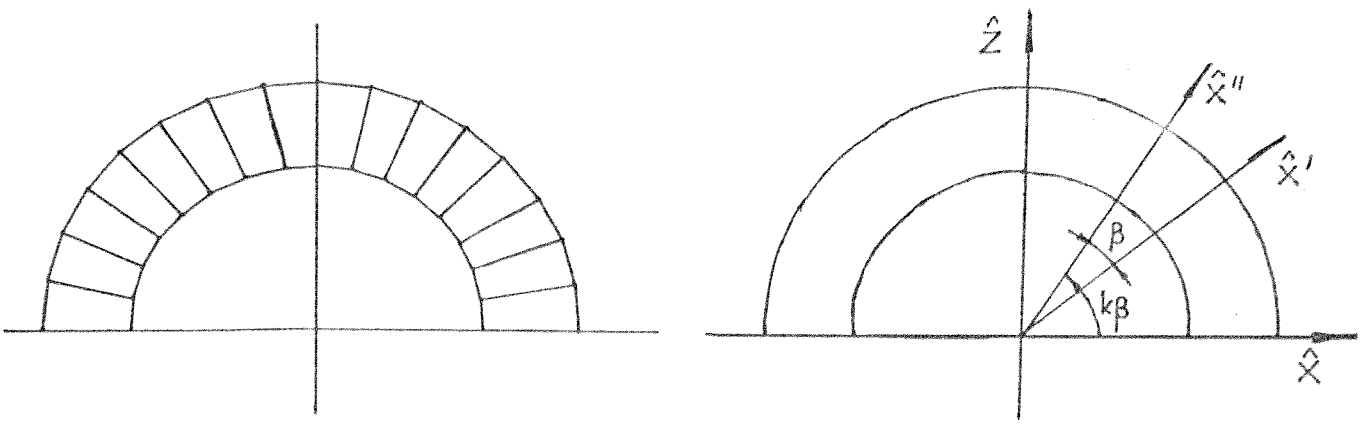


Fig. 6 - Partição do Setor e Curva do Enrolamento para Cálculo da Contribuição do Campo Magnético.

Utilizando-se da notação da fig. 6 pode-se definir os seguintes parâmetros:

$$\beta = \frac{\pi}{N} \qquad \text{(IV.33)}$$

ângulo de cada partição da secção curva subdividida em N partes.

Para uma k-ésima partição, o ângulo formado pela partição desde a origem em $\hat{x}$ é dado por:

$$k\beta = \frac{k\pi}{N} \quad (k = 0,1,2, \ldots..N) \qquad \text{(IV.34)}$$

No sistema de coordenadas da figura 6 têm-se as equações de transformação:

$$\begin{aligned} \hat{x}'' &= \cos\beta\ \hat{x}' + \operatorname{sen}\beta\ \hat{z}' \\ \hat{z}'' &= -\operatorname{sen}\beta\ \hat{x}' + \cos\beta\ \hat{z}' \end{aligned} \qquad \text{(IV.35)}$$

e

$$\begin{aligned} \hat{x}' &= \cos k\beta\hat{x} + \operatorname{sen} k\beta\ \hat{z} \\ \hat{z}' &= -\operatorname{sen} k\beta\hat{x} + \cos k\beta\ \hat{z} \end{aligned} \qquad \text{(IV.36)}$$

De IV.35 e IV.36, obtém-se:

$$\begin{aligned} \hat{x}'' &= \cos\ (k+1)\beta\hat{x} + \operatorname{sen}(k+1)\beta\hat{z} \\ \hat{z}'' &= \operatorname{sen}\ (k+1)\beta\hat{x} + \cos(k+1)\beta\hat{z} \end{aligned} \qquad \text{(IV.37)}$$

De posse das equações IV.35,36 e 37 de transformação das coordenadas deve-se agora aproximar o arco de ângulo β por um segmento de reta, como mostra a figura 7.

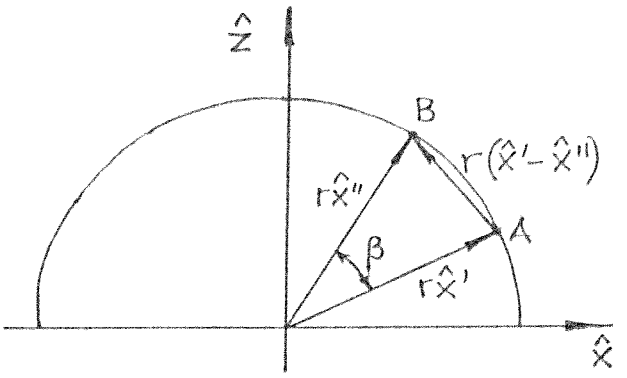


Fig. 7 - Partição do Setor Curvo com Aproximação por Segmento Reto

Para ângulo β pequeno pode-se fazer a aproximação $\overset{\frown}{AB} \approx \overline{AB}$ ou seja, o segmento de reta $\overline{AB}$ pode aproximar o arco $\overset{\frown}{AB}$:

$$\overline{AB} = r\ (\hat{x}' - \hat{x}'') \qquad \text{(IV.38)}$$

As componentes deste vetor no sistema de coordenadas $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ são:

$$\begin{aligned} r(\hat{x}' - \hat{x}'') \cdot \hat{x} &= r \cos k\beta - r \cos(k+1)\beta \\ r(\hat{x}' - \hat{x}'') \cdot \hat{z} &= r \operatorname{sen} k\beta - r \operatorname{sen}(k+1)\beta \end{aligned} \qquad \text{(IV.39)}$$

Rearranjando a equação acima obtém-se:

$$\begin{aligned} (\hat{x}' - \hat{x}'') \cdot \hat{X} &= -2 \operatorname{sen} \frac{\beta}{2} \operatorname{sen} \frac{(2k+1)}{2} \beta \\ (\hat{x}' - \hat{x}'') \cdot \hat{z} &= 2 \operatorname{sen} \frac{\beta}{2} \cos \frac{(2k+1)}{2} \beta \end{aligned} \qquad \text{(IV.40)}$$

onde $k = 1, 2, 3, \ldots, N$

Pode-se, então, calcular a contribuição do campo magnético de cada um dos segmentos infinitesimais, utilizando-se de suas posições através das equações IV.36 e IV.37 e do seu comprimento dado pela equação IV.40.

As contribuições de cada parte são somadas e obtidas as componentes do campo B_x e B_y. O valor resultante B_T é calculado à partir da seguinte equação: $B_T = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$

Com estas equações que permitem o cálculo da contribuição da parte reta e parte curva do enrolamento na geração do campo magnético no ponto P(x, y, z), podemos com ajuda de um computador montar um programa para o cálculo de todas as contribuições de cada partição do enrolamento, do campo magnético total.

A figura 8 mostra os parâmetros necessários para um dimensionamento básico, através de microcomputador, de um magneto pista-de-corrida. Neste caso somente será calculada a contribuição das partes retas do enrolamento.

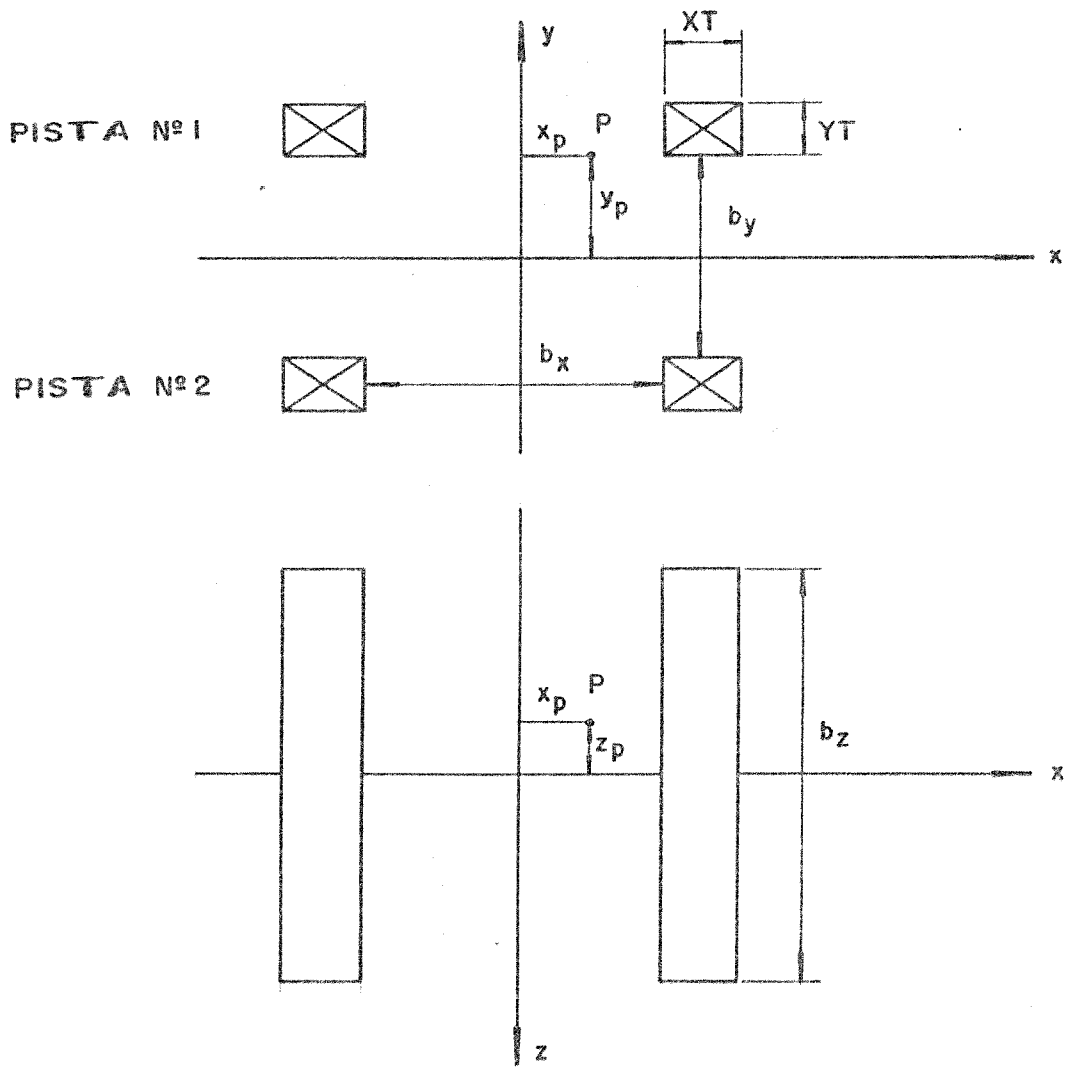


FIG. 8 - CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA PARA O CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO EM P

papel técnico Romilec

No caso de um dimensionamento completo e detalhado devemos utilizar um computador de maior porte e volocidade, pois o mapeamento completo e preciso da distribuição do campo magnético deve ser feito ponto-a-ponto em toda região, principalmente no interior do enrolamento, onde ocorrem os valores máximos, podendo aproximar-se de B_c.

No Apêndice 2 mostramos o procedimento de cálculo e os resultados do magneto "wiggler" em execução na FTI.

IV.4 - CONCLUSÕES

Os métodos desenvolvidos para cálculo da distribuição do campo magnético para as diversas geometrias de magnetos supercondutores estão baseados no uso de programas para microcomputadores tipo VAX-780.

No caso específico dos solenóides foram desenvolvidos vários programas de cálculos que permite o mapeamento em qualquer ponto do espaço, e também otimiza o volume do enrolamento em função da homogeneidade de campo magnético desejado. Foi desenvolvido um progarma específico para ajuste das bobinas corretoras para magnetos de altíssima homogeneidade utilizando o critério de cálculo polinomial.

Os magnetos supercondutores não cilíndricos são calculados em programas separados constituido geralmente de cálculos de secção retas somados aos de secção semi-cilíndricas ou elípticas. No caso específico dos magnetos pista-de-corrida (race-track) foram montados diversos programas de cálculos procurando-se diminuir o tempo de cálculo por ponto, hoje em 30s com 90% CPU do VAX-11/80.

Os trabalhos executados neste capítulo permite o dimensionamento de qualquer tipo de arranjo de magnetos cilíndricos e também alguns tipos de não cilíndricos, cujos resultados serão comparados aos protótipos já construídos ou em construção.

CAPÍTULO V

FORÇAS, INDUTÂNCIA E ENERGIA

V.1 - INTRODUÇÃO

O dimensionamento de magnetos supercondutores requer cuidados especiais para uma série de parâmetros muitas vezes relacionados entre si ou que sofrem influência de outros. Não é suficiente considerar-se somente os parâmetros físicos sem examinar os arranjos mecânicos e as possibilidades de montagem e otimização apropriada das bobinas, quer na geometria quer nos seus materiais.

É necessário o ajuste da densidade de corrente, com respeito a distribuição do campo magnético, os esforços mecânicos no que se refere ao condutor, o arranjo físico, a estrutura e os materiais utilizados /1, 2, 3/.

As forças no magneto supercondutor, especialmente no fio supercondutor, podem ser divididas em:

a) Força mecânica durante o enrolamento devido ao suporte e a pré-tensão no fio supercondutor;

b) Força termomecânica devido a contração desigual dos materiais no resfriamento à 4,2 K;

c) Força magnetomecânica quando o magneto é energizado.

O cálculo das forças como efeito separado é feito a partir do mapeamento do campo magnético no enrolamento com auxílio do programa de cálculo do campo magnético descrito no capítulo anterior. A partir destes dados podemos calcular as tensões e deformações atuantes no fio supercondutor espira a espira ou camada a camada, dependendo da precisão necessária ao cálculo.

Neste capítulo vamos também calcular a indutância própria do magneto e se for o caso de enrolamentos múltiplos, também da indutância mútua /4, 5/.

No caso de enrolamentos múltiplos ou magnetos não-cilíndricos é necessário o cálculo da indutância mútua, pois o método mais simples de cálculo das forças entre enrolamentos é através da deri-

vada da indutância mútua.

Associado ao cálculo da indutância, vamos calcular a energia armazenada no magneto, sua descarga em caso de "quench" e respectivos circuitos de proteção do magneto supercondutor

Após todos estes cálculos vamos resumir as propriedades mecânicas dos fios supercondutores de NbTi e Nb_3Sn à 4,2K, bem como dos materiais estruturais mais utilizados.

V.2 - TENSÕES E DEFORMAÇÕES NO ENROLAMENTO /6/

V.2.1 - Equações básicas

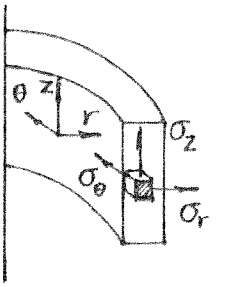
Utilizando-se as leis da macromecânica que descrevem as equações de tensão versus deformação para valores médios dos vários condutores que compõe o enrolamento e também permitem tratar os materiais como homogêneos, cujas propriedades elásticas são descritas pelos tensores S com componentes S_{ij} que compõem a matriz de relação tensão/deformação:

$$\epsilon_i(r) = \sum_{j=1}^{6} S_{ij}\,\sigma_j(r) \qquad (V.1)$$

Os materiais que compõem o magneto (estrutura, condutor etc) apresentam estrutura ortotrópica para os quais somente nove das componentes dos tensores S_{ij} são independentes.

Para o cálculo será utilizado a condição de tensão de cisalhamento nula ou, equivalente, módulo de cisalhamento igual a zero, então, a deformação por cisalhamento será nula.

Quando a tensão de cisalhamento é considerada nula o sistema de equação é reduzida a:



$$\epsilon_r = \frac{\sigma_r}{E_r} - \nu_{r\theta}\frac{\sigma_\theta}{E_\theta} - \nu_{rz}\frac{\sigma_z}{E_z} \qquad (V.2a)$$

$$\epsilon_\theta = -\nu_{\theta r}\frac{\sigma_r}{E_r} + \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} - \nu_{\theta z}\frac{\sigma_z}{E_z} \qquad (V.2b)$$

$$\epsilon_z = -\nu_{zr}\frac{\sigma_r}{E_r} - \nu_{z\theta}\frac{\sigma_\theta}{E_\theta} + \frac{\sigma_z}{E_z} \qquad (V.2c)$$

e, sendo os materiais com simetria ortotrópica: $S_{ij} = S_{ji}$ ou seja,

$$\frac{\nu_{r\theta}}{E_\theta} = \frac{\nu_{\theta r}}{E_r} \; ; \; \frac{\nu_{rz}}{E_z} = \frac{\nu_{zr}}{E_r} \; ; \; \frac{\nu_{z\theta}}{E_\theta} = \frac{\nu_{\theta z}}{E_z} \qquad (V.3)$$

recombinando as equações tensão/deformação no plano rθ obtemos:

$$\epsilon_r + \nu_{rz}\frac{\sigma_z}{E_z} = \frac{\sigma_r}{E_r} - \nu_{r\theta}\frac{\sigma_\theta}{E_\theta} \qquad (V.4)$$

ou

$$\epsilon_r + Z_r = R\sigma_r - V\sigma_\theta \qquad (V.4a)$$

$$\epsilon_\theta + \nu_{\theta z}\frac{\sigma_z}{E_z} = \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} - \nu_{\theta r}\frac{\sigma_r}{E_r} \qquad (V.5)$$

ou

$$\epsilon_\theta + Z_\theta = L\sigma_\theta - V\sigma_r \qquad (V.5a)$$

sendo que se ϵ_z é especificado:

$$Z_r = \nu_{rz}\,\epsilon_z \qquad (V.6a)$$

$$Z_\theta = \nu_{\theta z}\,\epsilon_z \qquad (V.6b)$$

$$R = (1 - \nu_{rz}\,\nu_{zr})/E_r \qquad (V.7a)$$

$$L = (1 - \nu_{\theta z}\,\nu_{z\theta})/E_\theta \qquad (V.7b)$$

$$V = (\nu_{\theta r} + \nu_{\theta z}\,\nu_{zr})/E_r = (\nu_{r\theta} + \nu_{rz}\,\nu_{z\theta})/E_\theta \qquad (V.7c)$$

ou, se σ_z é especificado:

$$Z_r = \nu_{rz}\,\sigma_z/E_z \qquad \text{(V.6a')}$$

$$Z_\theta = \nu_{\theta z}\,\sigma_z/E_z \qquad \text{(V.6b')}$$

$$R = 1/E_r \qquad \text{(V.7a')}$$

$$L = 1/E_\theta \qquad \text{(V.7b')}$$

$$V = \nu_{r\theta}/E_\theta = \nu_{\theta r}/E_r \qquad \text{(V.7c')}$$

No caso de deformação ε_r e ε_θ com simetria cilíndrica a componente radial do deslocamento u em corpo sólido é relacionada por:

$$\varepsilon_r = \frac{\delta u}{\delta r} \qquad \text{(V.8a)}$$

e

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \qquad \text{(V.8b)}$$

A deformação axial ε_z está relacionada com o deslocamento w por:

$$\varepsilon_z = \frac{\delta w}{\delta z} \qquad \text{(V.8c)}$$

que somente será considerada no cálculo das tensões durante a energização do magneto.

Usando a equação do balanço das forças atuantes em um elemento cilíndrico simétrico, sem considerar as tensões de cisalhamento, obtemos a equação fundamental:

$$\frac{\delta \sigma_r}{\delta r} + \sigma_r - \sigma_\theta = 0 \qquad \text{(V.9)}$$

na qual substituímos as expressões de σ_r e σ_θ obtidas resolvendo-se os sistemas de equações (V.4a e 5a):

$$\sigma_\theta = \left(\frac{\epsilon_r + Z_r}{RL - V^2}\right) V + \left(\frac{\epsilon_\theta + Z_\theta}{RL - V^2}\right) R$$

$$= \frac{V}{RL - V^2}\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right) + \frac{Z_r V}{RL - V^2} + \frac{R}{RL - V^2}\left(\frac{u}{r}\right) + \frac{Z_\theta R}{RL - V^2} \qquad (V.10)$$

$$\sigma_r = \frac{V}{RL - V^2}\left(\frac{u}{r}\right) + \frac{Z_\theta V}{RL - V^2} + \frac{L}{RL - V^2}\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right) + \frac{Z_r L}{RL - V^2} \qquad (V.11)$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \frac{V}{RL - V^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{u}{r}\right) + \frac{L}{RL - V^2}\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}$$

$$= \frac{V}{RL - V^2}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2}\right) + \frac{L}{RL - V^2}\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \qquad (V.12)$$

Substituindo-se (10), (11), (12) em (9) obtemos a equação diferencial:

$$ru'' + u' - k^2\frac{u}{r} = \left(k^2 - \frac{V}{L}\right)Z_\theta + \left(\frac{V}{L} - 1\right) \qquad (V.13)$$

onde:

$$k = \left(\frac{R}{L}\right)^{1/2}$$

A equação (V.13) terá seu lado direito igual a zero nas seguintes condições:

a) Quando $z_r = z_\theta = 0$, que ocorre no plano de deformação ($\varepsilon_z = 0$) e no plano de tensão ($\sigma_z = 0$);

b) Para um material isotrópico caracterizado por $k^2 = 1$ e $z_r = z_\theta$. Notar que k mede o coeficiente de anisotropia do módulo de elasticidade.

Nestes casos em que o lado direito da eq. (V.13)é nulo obtemos a solução geral para o deslocamento:

$$u = cr^k + dr^{-k} \qquad (V.14)$$

$$\sigma_r = \frac{c}{kL-V} r^{k-1} - \frac{d}{kL+V} r^{-k-1} \qquad (V.15)$$

$$\sigma_\theta = \frac{kc}{kL-V} r^{k-1} + \frac{kd}{kL+V} r^{-k-1} \qquad (V.16)$$

onde c e d são constantes arbitrárias determinadas pelas condições de contorno.

V.3 - PRÉ-TENSÃO DURANTE ENROLAMENTO /6/

A pré-tensão no fio supercondutor durante o enrolamento é praticada para compensar parte da tensão que será desenvolvida no sentido contrário quando da energização. Somado a este objetivo obtemos bons resultados de redução do espaço vazio no magneto, que é medido pelo fator de empacotamento λ, que influi diretamente no valor do campo magnético gerado.

Para o cálculo da tensão e deformação provocada somente pela aplicação de uma tensão σ_w (tensão de enrolamento) durante a fabricação do magneto devemos considerar:

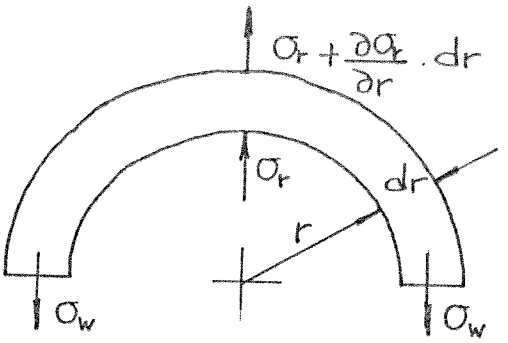
a) Quando cada espira é envolvida não há variação da tensão ou do módulo de elasticidade na direção axial.

b) A bobina enrolada sobre um carretel cilíndrico com raio externo a, pode ser caracterizada por um módulo de elasticidade efetivo:

$$B = \frac{\sigma_{r(a)}}{u(a)/a} \qquad \begin{matrix} a\text{-raio externo do} \\ \text{carretel} \end{matrix} \qquad (V.17)$$

c) Admitir que a tensão de enrolamento σ_w é uma função de r. Isto significa que σ_w é sempre inferior a tensão que está sendo aplicada ao fio supercondutor dividido pela sua secção transversal.

Com estas considerações podemos afirmar que a tensão de enrolamento σ_w em um incremento de camada dr é relacionada com um incremento de tensão radial $d\sigma_r$ na superfície de raio r por:



$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} . dr . 2r = -2\sigma_w dr$$

$$r d\sigma_r = -\sigma_w dr \qquad (V.18)$$

Agora, usando as condições de contorno (V.17 e 18) aplicadas às equações (V.14, 15 e 16), teremos os deslocamentos e tensões no enrolamento durante a execução da bobina, considerando a pré-tensão σ_w.

Para determinar as constantes c e d das equações (V.14 e 15) vamos considerar os incrementos destas constantes dc e dd que melhor representam o cálculo camada a camada.

Da eq.(V.17) podemos escrever:

$$B = \frac{\sigma_r(a)}{u(a)/a} = \frac{dc . a^{k-1} - dd . a^{-k-1}}{(dc . a^{k-1} + dd . a^{-k-1})(kL-V)(kL+V)} \qquad (V.19)$$

Da eq.(V.18) obtemos:

$$\frac{(k-1)\, dc}{kL-V} r^{k-1} - \frac{(-k-1)\, dd}{kL+V} r^{-k-1} = -\sigma_w \qquad (V.20)$$

resolvendo o sistema, obtemos:

$$dc = -\sigma_w \left[1 + B(kL+V)\right] a^{-k} (kL-V)/\Delta \qquad (V.21)$$

$$dd = -\sigma_w \left[1 - B(kL-V)\right] a^{k} (kL+V)/\Delta \qquad (V.22)$$

onde

$$\Delta = \left[1 + B(kL+V)\right] \left(\frac{r}{a}\right)^k - \left[1 - B(kL-V)\right] \left(\frac{a}{r}\right)^k$$

Para obter as constantes c e d precisamos considerar a sua dependência com o raio, isto é, camada a camada do enrolamento teremos uma contribuição portanto, vamos considerar o incremento dc e dd:

$$c(r) = \int_r^b dc(r')\,dr' \tag{V.23}$$

$$d(r) = \int_r^b dd(r')\,dr' \tag{V.24}$$

Integrando e substituindo nas equações básicas de σ_θ, σ_r, u as constantes C e D obtemos o sistema abaixo:

$$r\sigma_r = C - D \tag{V.25}$$

$$r\sigma_\theta = r\sigma_w + kC + kD \tag{V.26}$$

$$u = (kL - V)C + (kL + V)D \tag{V.27}$$

onde,

$$C = -\left[1 + B(kL - V)\right]\left(\frac{r}{a}\right)^k I$$

$$D = -\left[1 - B(kL + V)\right]\left(\frac{a}{r}\right)^k I$$

$$I = \int_{r/a}^{b/a} \frac{a\sigma_w\,dx}{\left[1 + B(kL+V)\right]x^k - \left[1 - B(kL-V)\right]x^{-k}}$$

Nos capítulos V, VI e VII são feitos o dimensionamento real dos magnetos supercondutores e poderemos analisar os níveis de tensão e deformação introduzidos no sistema pela pré-tensão σ_w constante durante o processo de fabricação.

V.4 - CONTRAÇÃO TÉRMICA /6/

V.4.1 — Formulação básica

Quando o magneto supercondutor é resfriado à 4,2K as forças devido aos diferentes coeficientes de contração térmica no fio supercondutor (diferentes materiais que o compõe), a estrutura em

que está enrolado, os diferentes comprimentos do fio nas camadas originam tensão e deformação no sistema.

Admitindo que a temperatura do magneto varia uniformemente de T_o a $T(r)$ como função de r mas não de θ e, se α_r e α_θ são os coeficientes de expansão linear dos materiais (supercondutores, isolamentos, estrutura), podemos escrever:

$$\epsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} - \int_{T_o}^{T_f(r)} \alpha_r \, dT \quad ; \quad \epsilon_\theta = \frac{u}{r} - \int_{T_o}^{T_f(r)} \alpha_\theta \, dT$$

(V.28a) (V.28b)

onde as integrais podem ser expandidas em séries de potência como:

$$\int_{T_o}^{T_f(r)} \alpha_r \, dT = \sum_{o}^{n} \ell_{ri} \, r^i \qquad (V.29)$$

$$\int_{T_o}^{T_f(r)} \alpha_\theta \, dT = \sum_{o}^{n} \ell_{\theta i} \, r^i \qquad (V.30)$$

Desta forma, com a dependência de α_r e α_θ da temperatura e esta se propagando na direção radial com $T(r)$, podemos combinar os efeitos para determinar ℓ_{ri} e $\ell_{\theta i}$.

Admitindo que o módulo de elasticidade dos materiais não variam com a temperatura e, que $Z_r = Z_\theta = 0$, pois no plano de deformação $\varepsilon_z = 0$ e no plano de tensão $\sigma_z = 0$ podemos reescrever as equações (V.7, 9, 28, 29, 30) como:

$$ru'' + u' - k^2 \frac{u}{r} = \sum_{o}^{n} \left\{ \left(1 + i - \frac{V}{L}\right) \ell_{ri} \, r^i + \left[(1+i)\frac{V}{L} - k^2 \right] \ell_{r\theta} \, r^i \right\} \qquad (V.31)$$

para a qual a solução é:

$$u = cr^k + dr^{-k} + \sum_{o}^{n} \frac{(1+i-V/L)\ell_{ri} + \left[(1+i)V/L - k^2\right] \ell_{\theta i}}{(1+i)^2 - k^2} \, r^{i+1} \qquad (V.32)$$

correspondendo às tensões:

$$\sigma_r = \frac{cr^{k-1}}{kL-V} - \frac{dr^{-k-1}}{kL+V} + \sum_0^n \frac{\ell_{ri} - (1+i)\ell_{\theta i}}{L[(1+i)^2 - k^2]} r^i \qquad (V.33)$$

$$\sigma_\theta = \frac{kcr^{k-1}}{kL-V} - \frac{kdr^{-k-1}}{kL+V} + \sum_0^n \frac{(1+i)\ell_{ri} - (1+i)\ell_{\theta i}}{L[(1+i)^2 - k^2]} \qquad (V.34)$$

Os coeficientes c e d são determinados pelas condições de contorno divididos em duas etapas:

a) Tensão interna e deslocamento para $\sigma_r(a) = \sigma_r(b) = 0$;

b) Tensão adicional para outras forças atuantes no magneto.

Este caso será tratado separadamente para pré-tensionamento e energização.

Utilizando-se as condições de contorno somente devido ao resfriamento, para r=a (início do enrolamento) e r=b (fim do enrolamento) teremos:

$$c = \frac{kL-V}{L(b^k a^{-k} - a^k b^{-k})} \sum_0^n \frac{[\ell_{ri} - (1+i)\ell_{\theta i}](a^{1+i} b^{-k} - b^{1+i} a^{-k})}{(1+i)^2 - k^2} \qquad (V.35)$$

$$d = \frac{kL+V}{L(b^k a^{-k} - a^k b^{-k})} \sum_0^n \frac{[\ell_{ri} - (1+i)\ell_{\theta i}](a^{i+1} b^k - b^{i+1} a^k)}{(1+i)^2 - k^2} \qquad (V.36)$$

O termo $(1+i)^2 - k^2$ que aparece no denominador faz divergir a expressão acima quando k se aproxima de (1+i); então usamos a relação: $\lim_{\varepsilon \to 0} \frac{r^\varepsilon - 1}{\varepsilon} = \ell n\, r$, que permite convergir a expressão para qualquer valor de r.

No caso de se considerar uniforme a variação de temperatu-

ra nas equações anteriores deve ser considerado que $\ell_{ri} = \ell_{\theta i} = 0$ para $i > 0$.

No capítulo VI com avaliação numérica das equações (V.32, 33 e 34) notamos que:

a) Máxima tensão circunferencial de compressão ocorre no raio externo do enrolamento;

b) Máxima tensão circunferencial de "estiramento" ocorre no raio interno;

c) A tensão radial de "estiramento" ocorre na estrutura do magneto, porém, quando $\alpha_r > \alpha_\theta$.

Para normalizar a tensão devido ao resfriamento podemos escrever que, para uma variação uniforme da temperatura temos:

$$\frac{(\ell_{ro} - \ell_{\theta o})}{L} = \frac{(\alpha_r - \alpha_\theta)(T_c - T_i)}{L} \equiv E.\Delta\alpha.\Delta T \qquad (V.37)$$

onde E é essencialmente E_θ.

Em casos que o enrolamento é resinado com resina epóxi pode se reduzir a zero a tensão térmica com a adição de fibras com a capacidade expansiva, que, combinando com o fio supercondutor produz: $\alpha_\theta = \alpha_r$.

V.5 - FORÇAS MAGNÉTICAS /6/

O campo magnético exerce uma força $\vec{J} \times \vec{B}$ por unidade de volume do condutor; nos magnetos supercondutores onde, ambos, campo e densidade de corrente são altos, a força torna-se muito elevada.

Atuando na direção perpendicular às linhas de campo, podemos visualizar seu efeito, considerando o enrolamento como um "container" de gás onde sobre sua parede atua uma pressão $B^2/2\mu o$. Para um campo magnético de 6T, esta pressão atinge $1{,}4 \times 10^7$ N/m^2 que equivale a 140atm.

Esta força atua tanto na direção axial como na radial do enrolamento, transferindo parte de sua tensão à estrutura do magneto.

V.5.1 - Forças no Plano rθ

Considerando-se que a análise das tensões será em duas dimensões, negligenciando a força na direção axial, que será tratada em separado, podemos escrever a equação fundamental de equilíbrio como:

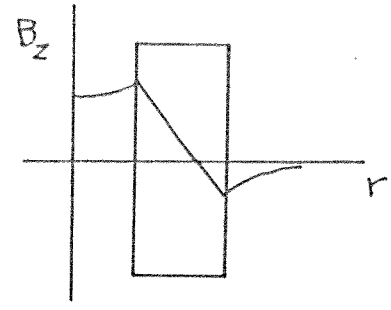
$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + F_{Lz}(r) = 0 \qquad (V.38)$$

ou seja,

$$r\frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_\theta = -rJB_z(r) \qquad (V.39)$$

onde

$$B_z = B_o\left(h_o + h_1\frac{r}{a}\right)$$



À partir da equação de equilíbrio, utilizando-se;

$$\sigma_r = \frac{L}{RL-V^2}\frac{du}{dr} + \frac{V}{RL-V^2}\frac{u}{r} \qquad (V.40)$$

$$\sigma_\theta = \frac{V}{RL-V^2}\frac{du}{dr} + \frac{R}{RL-V^2}\frac{u}{r} \qquad (V.41)$$

fazendo-se as substituições obtemos a equação diferencial completa:

$$ru'' + u' - k^2\frac{u}{r} = -\frac{(RL-V)}{L}rJB_z(r) \qquad (V.42)$$

Quando o lado direito da equação acima é nulo, a solução homogênea é : $u = cr^k + dr^{-k}$; testando como solução da equação completa $u = cr^k + dr^{-k} + c^*$ e substituindo-se na equação obtemos o valor da constante C* = solução especial:

$$c^* = u_p = \frac{RL-V}{L}\,\frac{r^2}{k^2}\,JB_o\left(C_1 h_o + C_2 h_1 \frac{r}{a}\right) \qquad (V.43)$$

Agora, voltando a equação de equilíbrio e identificando os coeficientes, podemos determinar C_1 e C_2 como:

$$C_1 = \frac{k^2}{k^2-4} \qquad C_2 = \frac{k^2}{k^2-9} \qquad (V.44)$$

A solução geral da equação de equlíbrio para o deslocamento é :

$$u(r) = cr^k + dr^{-k} + \Gamma\left[\frac{h_o}{k^2-4} r^2 + \frac{h_1}{k^2-9}\,\frac{r^3}{a}\right] \qquad (V.45)$$

onde $\Gamma = \dfrac{RL-V^2}{L}\,JB_o$

$$\sigma_r = \frac{L}{RL-V^2}\,\frac{du}{dr} + \frac{V}{RL-V^2}\,\frac{u}{r} \qquad (V.46)$$

$$\sigma_\theta = \frac{V}{RL-V^2}\,\frac{du}{dr} + \frac{R}{RL-V^2}\,\frac{u}{r} \qquad (V.47)$$

Para determinar as constantes c e d vamos utilizar as condições de contorno considerando a energização do enrolamento;

a) $\sigma_r(a) = 0$ (V.48)

b) $B = \left(\dfrac{\sigma_r}{\frac{u}{r}}\right)_{r=b}$ (V.49)

a- Raio interno do enrolamento.

b- Raio externo do enrolamento u(b) deslocamento para r=b

B - módulo de elasticidade do enrolamento.

Trabalhando primeiramente na condição de contorno (a) obtemos:

$$\frac{a^{k-1}}{kL-V}\,c - \frac{a^{-k-1}}{kL+V}\,d = -\frac{\Gamma' a f}{RL-V^2} \qquad (V.50)$$

onde $f = \left(\frac{2L+V}{k^2-4}\right)h_0 + \left(\frac{3L+V}{k^2-9}\right)h_1$

A outra equação é obtida da condição de contorno (b):

$$-b^{-k}\left[1-B(kL-V)\right](kL+V)\,c + b^{-k}\left[1+B(kL+V)\right](kL-V)\,d = \Gamma' b^2\left[f' - Bg(RL-V^2)\right] \qquad (V.51)$$

onde $f' = \left(\frac{2L+V}{k^2-4}\right)h_0 + \left(\frac{3L+V}{k^2-9}\right)h_1\,\alpha$

$$\alpha = \frac{b}{a}$$

$$g = \left(\frac{h_0}{k^2-4}\right) + \left(\frac{h_1}{k^2-9}\right)\alpha$$

Resolvendo o sistema de equação, obtemos (V.52, 53, 54):

$$u(r) = \frac{\Gamma'}{L}\left\{(kL-V)c'r^k + (kL+V)d'r^{-k} + (RL-V^2)\left[\frac{h_0}{k^2-4}r^2 - \frac{h_1}{k^2-9}\,\frac{r^3}{a}\right]\right\}$$

$$\sigma_r(r) = \frac{\Gamma'}{L}\left[c'r^{k-1} - d'r^{-k-1} + \left(\frac{2L+V}{k^2-4}\right)h_0 r + \left(\frac{3L+V}{k^2-9}\right)h_1\frac{r^2}{a}\right]$$

$$\sigma_\theta(r) = \frac{\Gamma'}{L}\left[kc'r^{k-1} - kd'r^{-k-1} + \left(\frac{2V+R}{k^2-4}\right)h_0 r + \left(\frac{3V+R}{k^2-9}\right)h_1\frac{r^2}{a}\right]$$

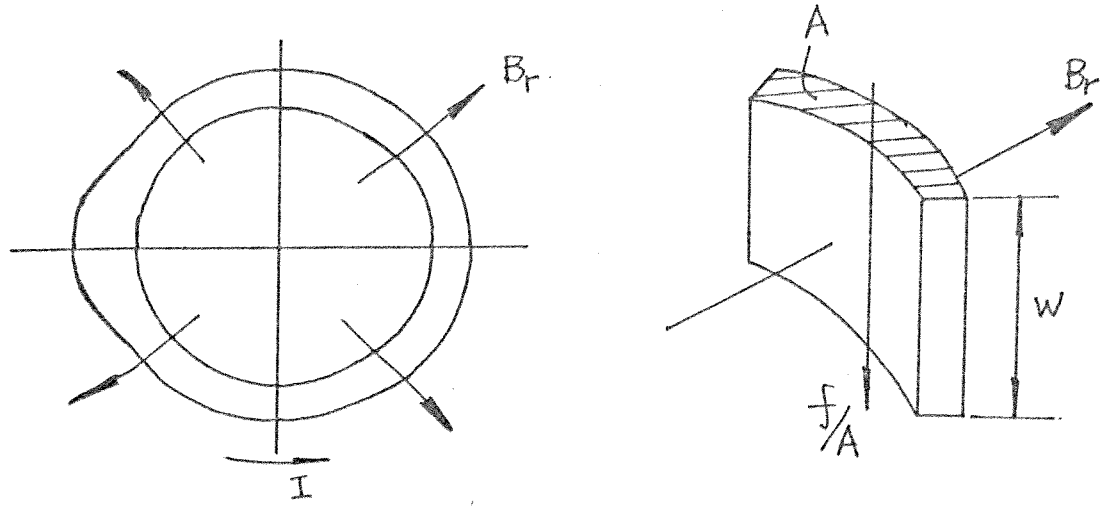
onde $\Gamma' = JB$

$$c' = \frac{a^2 b^{-k} f\left[1+B(kL+V)\right] - b^2 a^k \left[f' - Bg(RL-V^2)\right]}{\alpha^k\left[1-B(kL-V)\right] - \alpha^{-k}\left[1+B(kL+V)\right]}$$

$$d' = \frac{a b^{-k} f\left[1-B(kL-V)\right] - b^2 a^k \left[f' - Bg(RL-V^2)\right]}{\alpha^k\left[1-B(kL-V)\right] - \alpha^{-k}\left[1+B(kL+V)\right]}$$

V.4.2 - Forças Axiais /1,6/

Em algumas situações de cálculo é possível estimar a componente axial da força de Lorentz utilizando-se o valor médio do campo magnético na direção-r,



$$P_z = \frac{P_z}{A} = \bar{B}_r \, J\lambda w \cdot \frac{10^6}{9,8} \qquad \text{(V.55)}$$

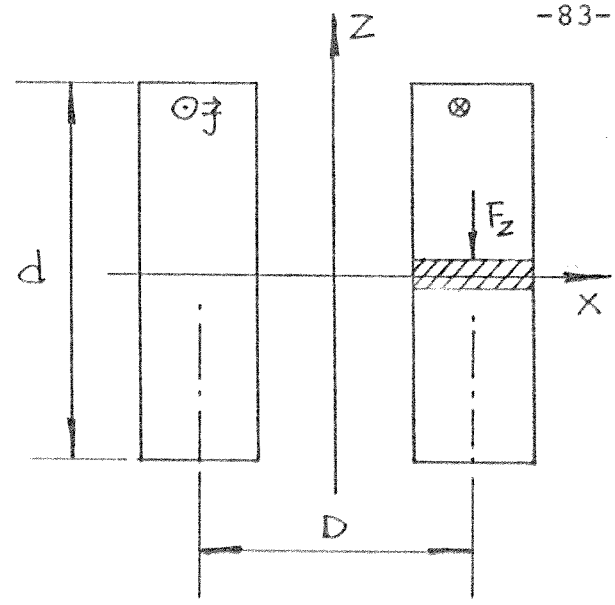
$\bar{B}_r$ = Campo magnético médio em tesla

w = Largura axial - (cm)

λJ = Densidade de corrente média (A/cm^2)

P_z = Pressão (kg/cm^2)

Outra maneira é através do cálculo da indutância, que permite a divisão imaginária do enrolamento em duas partes na direção axial e calcular a força através da variação da indutância mútua.



$$F_{12} = \frac{\delta M_{12}}{\delta z} \qquad (V.56)$$

$$F_z = \frac{N^2 I^2}{2d^2} \left[U_d - 2U_{d/2}\right] \qquad (V.57)$$

N - Número total de espiras do solenóide

I - Corrente (A)

d - Altura do enrolamento (m)

$$U = (Bx^2 \, \phi_x^2 - 2Dx \, \phi_x) \cdot \frac{10^{-7}}{9,8}$$

$$\phi_x = \frac{1}{A+B\left(\frac{x}{D} + P\beta\right)} \qquad x = \frac{d}{D}$$

α	β	A	B	P
$0 \sim 0.8$	$0 \sim 0.5$	0.038	0.118	1.02
$0.8 \sim 1.6$	$0 \sim 0.5$	0.036	0.111	1.32
$0 \sim 0.8$	$0 \sim 0.5$	0.40	0.136	0.783
$0.8 \sim 1.6$	$0 \sim 1.0$	0.019	0.140	0.900

Os métodos de variação linear do campo magnético na componente B_z não podem ser utilizados para B_r, pois, sabemos que não é uniforme. Por outro lado a utilização de valores médios permite estimar o valor da componente axial que em muitos casos, principalmente em NbTi, não afetará os parâmetros de projeto.

Após estimar a pressão máxima na direção axial podemos calcular:

$$\sigma_z = \frac{P_z}{A} \quad \text{e} \quad \varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_z} \qquad (V.58 \text{ e } 59)$$

e comparar com os valores limites de deformação que neste caso pode atingir 0,1% .

V.6 - PROPRIEDADES MECÂNICAS

V.6.1 - Supercondutores de NbTi /7,8/

Para o cálculo das tensões e deformações durante a fabricação e utilização dos magnetos supercondutores vamos calcular o módulo de elasticidade nas direções radial e tangencial, considerando-se as frações volumétricas dos materiais e seus módulos específicos à 4,2K.

Algumas condições são impostas para a formulação abaixo:

a) A deformação existe em cada componente para todas tensões;

b) os filamentos ou fibras estão alinhados paralelamente ao eixo da carga;

c) existe perfeito contato (solda mecânica) entre os componentes;

d) não há geração de tensão transversal devido a interação entre os componentes;

e) não existe pré-tensão entre os componentes antes da aplicação da carga.

$$E_c = \sum^{n} E_n V_n \quad (V.60)$$

E_c = Módulo de elasticidade do composto.

E_n = Módulo de elasticidade do componente n .

V_n = Fração volumétrica do componente n .

$$\sigma_c = \sum^{n} V_n \sigma_n \quad (V.61)$$

σ_c = tensão no composto

σ_n = tensão no elemento n

A figura 1 mostra o comportamento de cada elemento separadamente quando sujeito a deformação. O resultado da interação entre os elementos pode ser resumido nos seguintes estágios, com respectivos módulos de elasticidade:

Estágio 1 - Os filamentos e a matriz deformam elasticamente.

$$E_c = \bar{\Sigma} V_n E_n$$

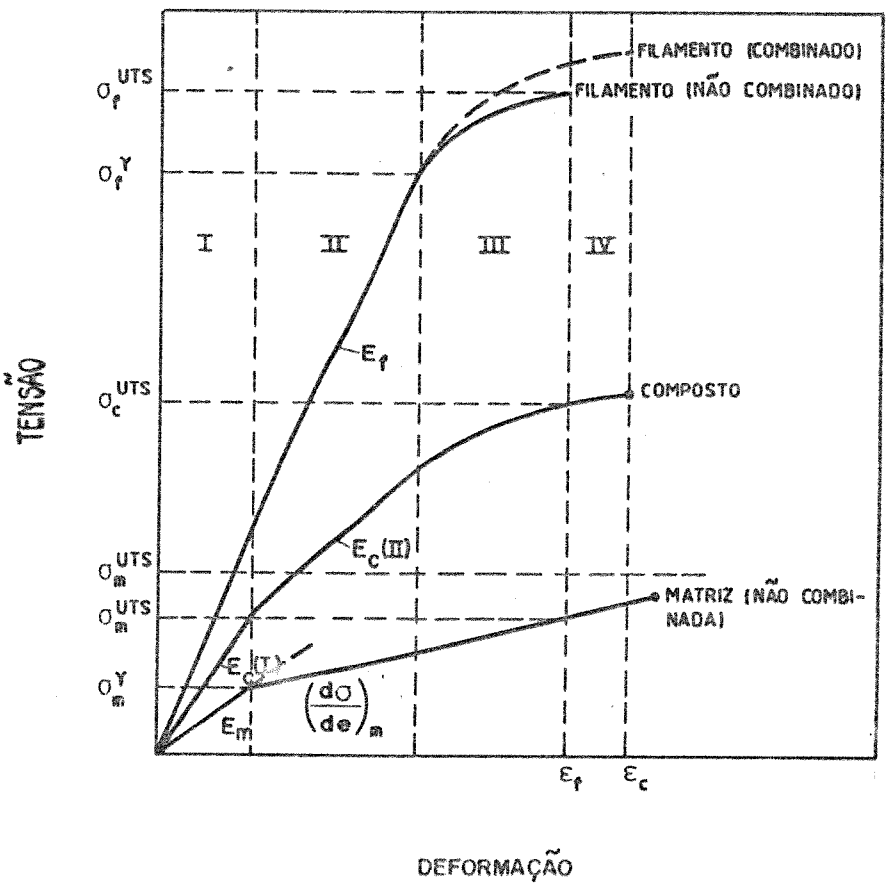


FIG. 1 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CURVA TENSÃO x DEFORMAÇÃO PARA FIBRAS CONTÍNUAS, METAL COMPOSTO. /7/

papel técnico Romilec

Estágio 2 - a matriz deforma plasticamente e os filamentos elasticamente.

Módulo de elasticidade "secundário"

$$E_c = E_f V_f + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}\right)_m (1 - V_f) \qquad \text{(V.63)}$$

onde $\left(\frac{\delta \sigma}{\delta \epsilon}\right)_m$ = inclinação da curva tensão-deformação na matriz no estado de não-combinado.

A tensão de ruptura do composto σ_c será determinada por $\sigma_c = \sigma_f V_f = \sigma'_m (1-V_f)$, onde σ'_m - tensão na matriz quando os filamentos estão na tensão de ruptura.

No caso do NbTi a fig. 2 ilustra a curva tensão x deformação para relação NbTi/Cu = 2,8:1 à temperatura ambiente. Em seguida, na fig. 3 observamos a mesma curva porém, para 4,2K.

A tabela I apresenta valores típicos do módulo de elasticidade para diferentes composições de NbTi e de cobre eletrolítico OFHC.

Outras propriedades da liga NbTi em diferentes temperaturas, para várias amostras são apresentadas na tabela II .

Se considerarmos a contribuição do isolamento com sua respectiva fração volumétrica e seu módulo de elasticidade, podemos obter o E_c com maior precisão. O isolamento deve receber um cuidado especial devido às tensões e deformações a que o fio supercondutor estará sujeito podendo surgir trincas e, conseqüentemente, ruptura do isolamento, principalmente durante o "quench" do magneto.

V.6.2 - Supercondutores A15 Nb_3Sn

No caso dos fios supercondutores de Nb_3Sn, como existem vários processos de fabricação, vamos considerar as propriedades básicas dos seus componentes em função do estado de deformação.

Como já descrito no Capítulo III, após o processamento mecânico o fio passa por tratamento térmico para difusão do Sn e formação do Nb_3Sn à 700^oC x 24~100h, o que interfere nas tensões residuais de seus componentes.

As mesmas condições do ítem anterior são utilizadas para o cálculo das propriedades mecânicas do composto, porém, considerando

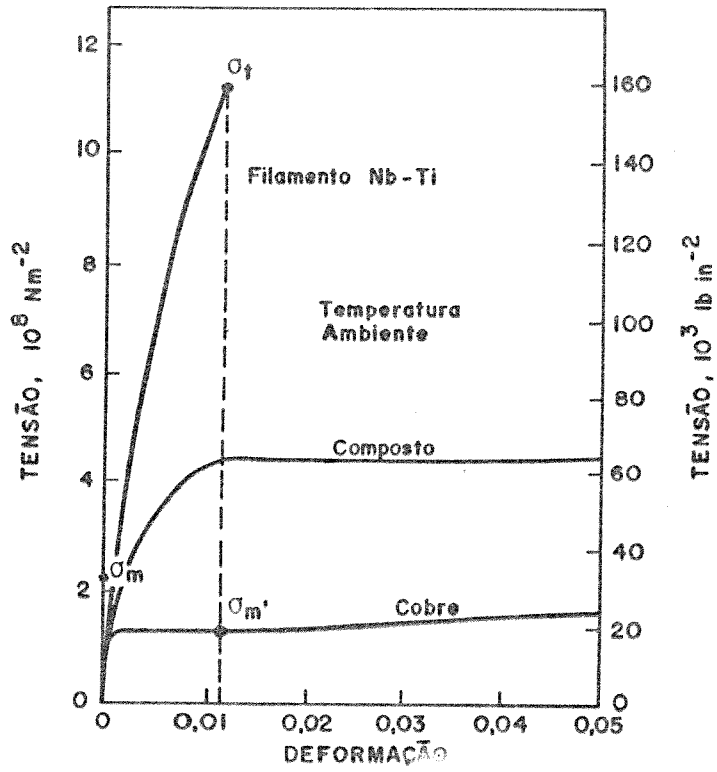


FIG. 2 - CURVA TENSÃO x DEFORMAÇÃO PARA MATRIZ, FILAMENTO E COMPOSTO PARA Cu/NbTi = 2,8:1 (Temperatura Ambiente)

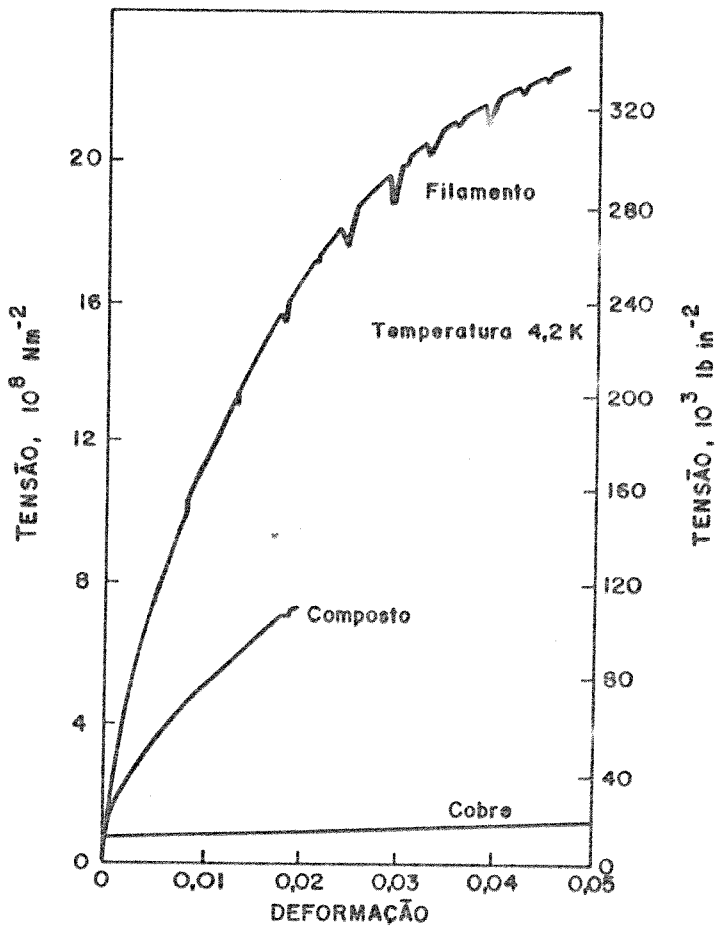


FIG. 3 - CURVA TENSÃO x DEFORMAÇÃO A 4.2 K PARA MATRIZ FILAMENTO E COMPOSTO PARA Cu/NbTi = 2,8:1

papel técnico Romilec

Tabela I - Módulo de Young para Ligas NbTi /7/

Liga NbTi (Nb % at)	E ($N\ m^{-2} \times 10^{10}$)	Referência nº	Observações
40.0	6.9	4	
38.5	5.5	5	
42.5	9.3	6	
49.0	9.7	6	
61.0	10.2	6	
74.0	10.6	6	
82.5	10.9	6	
91.0	10.9	6	
36.0	7.4	7	
38.5	7.8	7	
23.0	6.3	8	95% trabalho a frio
34.0	7.2	8	95% trabalho a frio
34.0	7.8	8	tratado 1000°C
44.0	8.1	8	95% trabalho a frio
44.0	8.8	8	tratado
36.0	8.2	9	
38.5	8.3	9	
36.0	8.6	10	
34.0	9.1	11	medido a 4.2 K
34.0	8.1	11	normalizado a RT
6.5	7.8	12	quench
8.0	6.2	12	quench
8.0	9.8	12	tratado
11.5	7.8	12	quench
18.0	9.5	12	quench
21.0	7.8	12	quench
25.5	6.6	12	quench
25.5	8.1	12	tratado
29.0	7.8	12	tratado
38.0	7.9	12	quench
43.5	8.4	12	quench
43.5	9.0	12	tratado

Tabela II - Propriedades da Liga NbTi para Várias Temperaturas /7/.

Liga NbTi -	Com Tratamento Térmico			Sem Tratamento Térmico		
Temperatura K Nb-34-wtTi	300	76	4	300	76	4
Resistência a escoamento $10^9 N\ m^{-2}$ (ksi)	41(60)	93(135)	1.11(161)	52(76)	99(143)	1.43(209)
Resistência a atração $10^9 N\ m^{-2}$ (ksi)	43(63)	95(137)	1.16(168)	54(78)	1.00(146)	1.43(207)
Elongação %	24	14	6	13	8	0
Redução de área % Nb-45-wtTi	94	71	65	86	64	0
Resistência a escoamento $10^9 N\ m^{-2}$ (ksi)	46(66)	1.10(160)	1.54(224)	70(102)	1.10(159)	1.75(254)
Resistência a atração $10^9 N\ m^{-2}$ (ksi)	46(67)	1.15(167)	1.54(224)	72(104)	1.25(182)	1.75(254)
Elongação %	23	9	3	8	8	5
Redução de área % Nb-55-wtTi	93	48	0	62	53	7
Resistência a escoamento $10^9 N\ m^{-2}$ (ksi)	45(65)	41(59)	83(120)	1.03(150)	1.58(229)	2.03(294)
Resistência a atração $10^9 N\ m^{-2}$ (ksi)	49(71)	1.03(150)	1.16(168)	1.10(159)	1.65(240)	2.03(294)
Elongação %	22	8	9	3	3	3
Redução de área %	87	56	38	48	30	13

agora seus vários componentes e seu estado de tensão residual.

No caso da fração volumétrica de Nb, vamos considerar como componentes distintos o Nb não-reagido V_{Nb}^{o} e o reagido V_{Nb}^{f}, pois possuem módulos de elasticidade bem diferentes.

A tensão residual ε_r^* atuante no composto pode ser calculada e, partindo-se da equação de equilíbrio, onde o composto não está sujeito à tensão externa:

$$\sigma_f V_f + \sigma_{Cu} V_{Cu} + \sigma_{Bz} V_{Bz} = 0 \qquad (V.64)$$

onde:

$$-\sigma_f = \frac{V_{Cu}\sigma_{Cu} + V_{Bz}\sigma_{Bz}}{V_f}$$

No passo seguinte devemos considerar as diferentes tensões introduzidas nos compostos devido ao resfriamento de 973K (700°C) da temperatura de tratamento térmico de reação para 4,2K na utilização ($\Delta T = 969K$).

O modelo utilizado para o cálculo do coeficiente de contração térmica está associada a participação volumétrica de cada componente e seu módulo de elasticidade:

$$\alpha_c = \frac{\alpha_1 E_1 V_1 + \alpha_2 E_2 V_2 + \ldots + \alpha_m E_m V_m}{E_1 V_1 + E_2 V_2 + \ldots + E_m V_m} \qquad (V.65)$$

As tabelas III e IV, apresentam os valores de α e E para os componentes normais dos fios supercondutores Nb_3Sn.

A diferença entre a contração térmica do composto e de cada elemento permite calcular a deformação devido a cada elemento como:

$$\varepsilon_i = \Delta T(\alpha_c - \alpha_i), \qquad (V.66)$$

logo a variação em termos de comprimento $\Delta L/L_o$ para cada componente será:

$$\varepsilon_{ri} = \Delta L/L_{oc} - \Delta L/L_{oci} \qquad (V.67)$$

Tabela III - Coeficiente de Expansão Térmica para Componentes dos Fios Supercondutores Nb_3Sn /9/

	$\Delta L/L_o (x10^{-2})$	$\alpha (K^{-1} - 1x10^{-6})$
Bronze (10 w/0 Sn)	-1.68	-17.3
Cu	-1.63	-16.8
Nb_3Sn	-0.74	- 7.02
Nb	-0.68	- 7.02
Ta	-0.61	- 6.3

Tabela IV - Módulo de Elasticidade para Componentes dos Fios Supercondutores Nb_3Sn /9/

Componente	Módulo de Elasticidade, GPa ($x\ 10^6$ psi)
Cu	124 (18)
Bronze	124 (18)
Ta	186 (27)
Nb	103 (15)
Nb_3Sn	165 (24)

$\Delta L/_{Loc}$ - Variação do comprimento do composto da temperatura de reação para 4,2 K

$\Delta L/_{Loci}$ - Variação do comprimento do componente da temperatura de reação para 4,2 K.

Utilizando a lei de Hooke, $\varepsilon = \sigma/E$, podemos calcular a tensão de cada componente introduzida pela variação de temperatura no composto.

Durante o processo de reação de transformação do Nb em Nb_3Sn, a concentração de Sn no bronze diminui, isto acarreta uma diminuição na tensão de escoamento, que reduz o nível de tensão residual no filamento.

Quando Nb é transformado em Nb_3Sn,36% de seu volume é aumentado, portanto, a fração Sn em peso após a reação é:

$$W_{Sn} = \frac{\text{peso do Sn no bronze depois da reação}}{\text{peso do bronze depois da reação}} = \frac{A}{B}$$

W_{Sn} - fração do peso do Sn no bronze após reação

A - peso do Sn no bronze antes da reação

B - peso do Cu + Sn

$$W_{Sn} = \frac{\left(V^o_{Bz}\,\rho_{BZ}\,W^o_{Sn} - 1{,}36\,V^o_{Nb}\,\rho_{Nb_3Sn}\,W'_{Sn}\,f\right)}{V^o_{Bz}\,\rho_{BZ}\,W^o_{Sn} - 1{,}36\,V^o_{Nb}\,\rho_{Nb_3Sn}\,W'_{Sn}\,f + V^o_{Bz}\,\rho_{BZ}\,W^o_{Cu}} \qquad (V.68)$$

V^o_{Nb} - fração volumétrica do Nb não-reagido

V^o_{BZ} - fração volumétrica do bronze não-reagido

f - fração de Nb convertido em Nb_3Sn

W^o_{Sn} - fração de peso do Sn no bronze antes da reação

W^o_{Cu} - fração de peso do Cu no bronze antes da reação

W'_{Sn} - fração de peso do Sn no Nb_3Sn = 0,299

ρ_{B8} - densidade do bronze 8,96 g/cm³ para Cu-7%at Sn

ρ_{Nb_3Sn} - densidade do Nb_3Sn 8,96g/cm³ para Cu-25%at Sn

V_{Nb_3Sn} - 1,36 V^o_{Nb}

Na figura 4 apresentamos a variação da tensão de escoamento no bronze em função da %Sn remanescente no bronze.

Agora podemos escrever que a deformação devido a tensão residual no filamento será:

$$\varepsilon_r^* = \sigma_f / E_f \qquad (V.69)$$

onde

$$-\sigma_f = \frac{V_{Cu}\sigma_{Cu} + V_{BZ}\sigma_{BZ}}{V_f} \qquad (V.70)$$

$$E_f = V_{Nb}E_{Nb} + V_{Nb_3Sn}E_{Nb_3Sn} + V_{Ta}E_{Ta} \qquad (V.71)$$

No caso de Nb_3Sn são utilizados os módulos de elasticidade calculado em função da direção, ou seja:

$$E_\theta = \Sigma V_N E_N \quad \text{e} \quad E_r = \frac{1}{\Sigma \frac{V_N}{E_N}} \qquad (V.72 \text{ e } 73)$$

V.7 - CÁLCULO DA INDUTÂNCIA

Para os magnetos supercondutores o cálculo da indutância própria e indutância mútua é um parâmetro fundamental para o dimensionamento. Entre outros aspectos, o valor da indutância está relacionado com o nível de energia do magneto e define sua velocidade de carregamento em função da fonte de alimentação:

$$\frac{di}{dt} = \frac{e}{L} \qquad (V.74)$$

$\frac{di}{dt}$ = velocidade de carregamento até corrente de trabalho (A/S).

e = tensão da fonte de alimentação (v).

L = indutância (H)

A indutância é um parâmetro puramente geométrico, independente da corrente na ausência de materiais magnéticos. A literatura

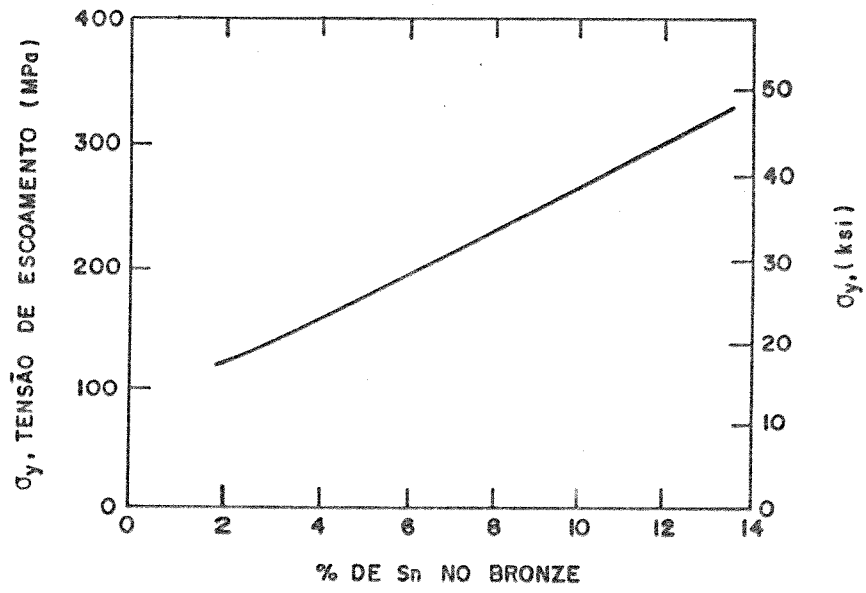


FIG. 4 – TENSÃO DE ESCOAMENTO NO BRONZE VERSUS % Sn RESIDUAL APÓS REACÃO /7/

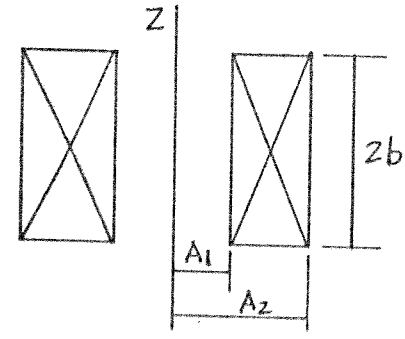
papel técnico Romilec

apresenta diversas fórmulas para os casos mais importantes, na prática porém, as rotinas de cálculo devem ser adaptadas para cada situação.

V.7.1 - Indutância em Solenóides

Utilizaremos para enrolamentos cilíndricos a formulação de HAK /4/, onde a indutância pode ser calculada por:

$$L = N^2 (A_1+A_2)\ \emptyset\ (\alpha,\beta) \times 10^{-9} \qquad (V.75)$$



$$\phi(\alpha,\beta) = \frac{1}{A+B(x+py)}$$

onde;

$$X=\frac{2\beta}{\alpha+1} \qquad Y=\frac{\alpha-1}{\alpha+1} \qquad \alpha=\frac{A_2}{A_1} \qquad \beta=\frac{b}{A_1}$$

X	Y	A	B	p
0 ∿ 0.8	0 ∿ 0.5	0.038	0.18	1.02
0.8 ∿ 1.6	0 ∿ 0.5	0.036	0.111	1.32
0 ∿ 0.8	0.5 ∿ 1.0	0.040	0.136	0.783
0.8 ∿ 1.6	0.5 ∿ 1.0	0.019	0.140	0.900

A figura 5 ilustra a variação da função $\emptyset$ para diferentes valores de x e y.

Quando o magneto for composto de vários enrolamentos concêntricos podemos através de artifícios de cálculo determinar a indutância total, mesmo para casos de secção de enrolamentos distintos.

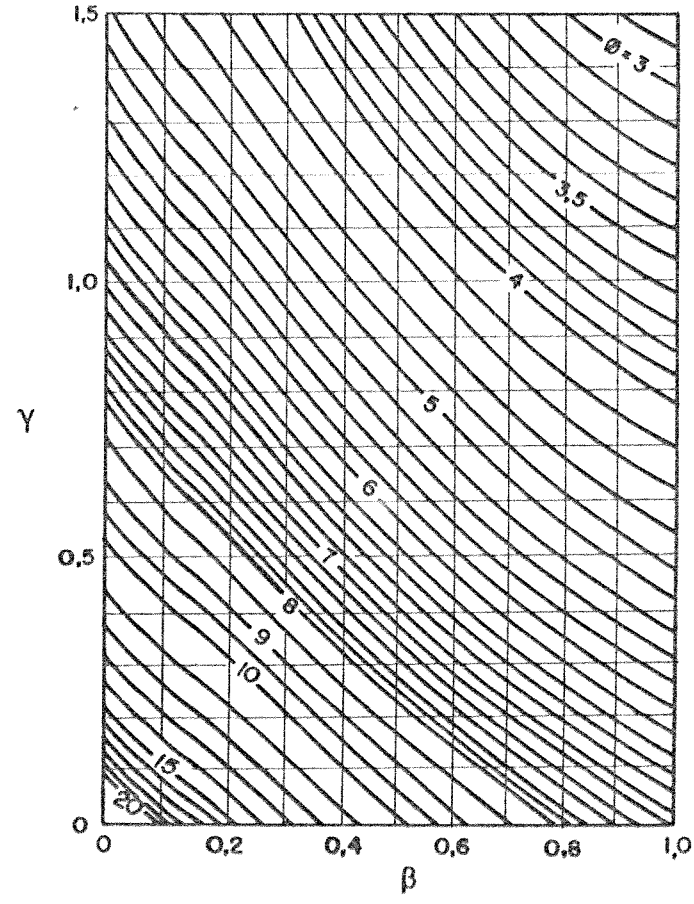
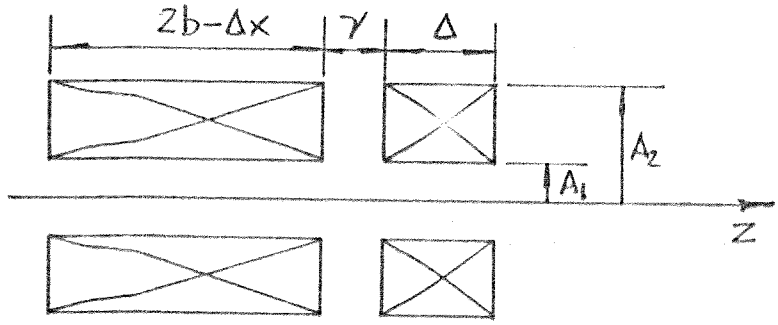


FIG. 5 - VARIAÇÃO DA FUNÇÃO Ø PARA DIFERENTES VALORES DE x E y /4/

papel tecnico Romilec

a) Enrolamentos partidos longitudinalmente



$$L_x = \frac{N^2\left(\frac{x}{2b}\right)^2 (A_2+A_1).\,10^{-9}}{A+B\left[\frac{x}{A_2+A_1}+P\left(\frac{\alpha-1}{\alpha+1}\right)\right]} \quad (H) \qquad (V.76)$$

$$L_{total} = L_1+L_2+L_3+2M_{12}+2M_{13}+2M_{23} \qquad (V.77)$$

$$L_{(1+3)} = L_1+L_3+2M_{13} \qquad (V.78)$$

$$L_{(2+3)} = L_2+L_3+2M_{23} \qquad (V.79)$$

ou

$$M_{12}=\frac{1}{2}\left[LT-L_{13}-L_{23}+L_3\right]=\frac{1}{2}\left[L_{(2b+\gamma)}-L_{(2b-\Delta+\gamma)}-L_{\Delta+\gamma}+L_{\gamma}\right] \qquad (V.80)$$

Neste caso foi introduzida uma bobina fictícia de comprimento γ com mesmo número de espiras por unidade de área.

Podemos agora calcular a força entre os enrolamentos quando energizados como sendo:

$$f_x=-\frac{\partial M_{12}}{\partial x}\,I^2=\frac{N^2I^2}{2(2b)^2}\left[U_{(2b+\gamma)}-U_{(2b-\Delta+\gamma)}-U_{(\Delta+\gamma)}+U_{\gamma}\right] \quad (kg) \qquad (V.81)$$

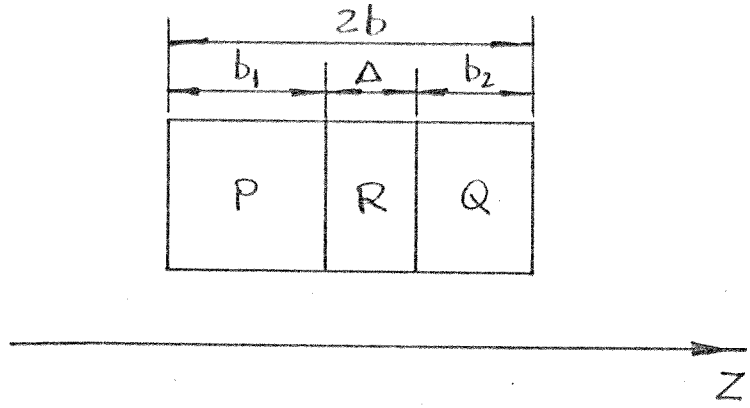
$$U_x = \left[B\times\phi_x^2-2\left(A_2+A_1\right)\times\phi_x\right]\frac{10^{-7}}{9,8} \qquad (V.82)$$

$$\phi_x = \frac{1}{A+B\left[\frac{x}{A_1+A_2}+P\,\frac{\alpha-1}{\alpha+1}\right]} \qquad (V.83)$$

A força será máxima quando $\gamma = 0$:

$$f_{max} = \frac{N^2 I^2}{2(2b)^2}\left[U_{2b} - U_{(2b-\Delta)} - U_{\Delta}\right] \quad (kg) \qquad (V.84)$$

No caso de cálculo da força axial devido ao campo magnético atuante no enrolamento podemos dividir imaginariamente o enrolamento como mostrado abaixo:



1) Vamos calcular a força axial que a parte (P) exerce sobre a parte (R):

$$f_{b_1} = \frac{N^2 I^2}{2(2b)^2}\left[U_{(b_1+\Delta)} - U_{b_1} - U_{\Delta}\right] \quad (kg) \qquad (V.85)$$

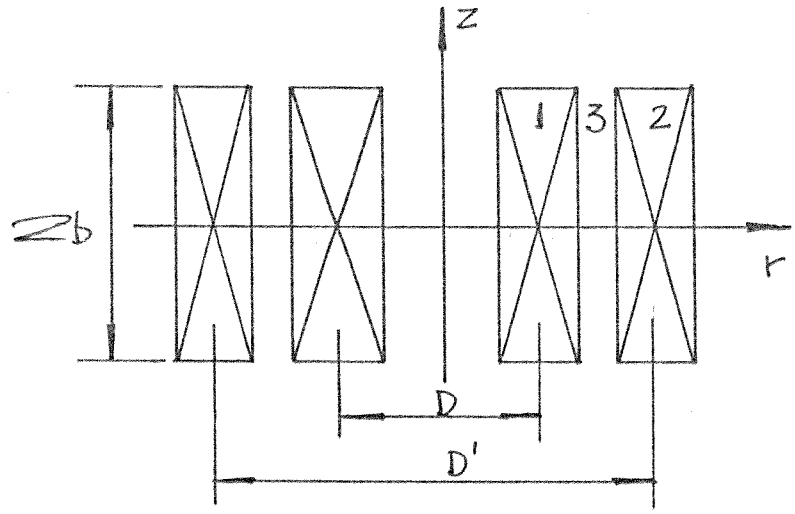
2) do caso anterior onde a parte (P) e (Q) estão separadas podemos obter:

$$f = f_{b_1} - f_{b_2} = \frac{N^2 I^2}{2(2b)^2}\left[U_{(b_1+\Delta)} - U_{b_1} - U_{(b_2+\Delta)} + U_{b_2}\right] \qquad (V.86)$$

3) a força resultante F considerando $\Delta = \frac{2b}{2}$, conseqüentemente $b_1 = b$ e $b_2 = 0$ teremos:

$$F = \frac{N^2 I^2}{2(2b)^2}\left[U_{2b} - 2U_b\right] \quad (kg) \qquad (V.87)$$

b) Enrolamentos partidos co-axiais



$$L_{123} = L_1 + L_2 + L_3 + 2M_{12} + 2M_{13} \qquad (V.88)$$

$$L_{23} = L_2 + L_3 + 2M_{23} \qquad (V.89)$$

$$L_{13} = L_1 + L_3 + 2M_{13} \qquad (V.90)$$

$$M_{12} = \frac{1}{2}\left[L_{123} - L_{13} - L_{23} - L_3\right] \qquad (V.91)$$

$$F_{r(12)} = -\frac{\partial M_{12}}{\partial D} I_1 I_2 \simeq -\frac{\Delta M_{12}}{\Delta D} I^2 \qquad (V.92)$$

$$F_{z(12)} = -\frac{\partial M_{12}}{\partial b} I_1 I_2 \simeq -\frac{\Delta M_{12}}{\Delta b} I^2 \qquad (V.93)$$

Na maioria dos casos os enrolamentos são conectados eletricamente em série, portanto $I_1 = I_2$.

Da mesma forma que no ítem anterior, pode-se obter a expressão da força eletromagnética a partir do cálculo da indutância mútua e sua variação no eixo r ou z.

V.8 - ENERGIA E PROTEÇÃO /10/

Os magnetos supercondutores não consomem energia, pois sua resistência é nula, porém, armazenam energia devido ao campo magnético;

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \qquad (V.94)$$

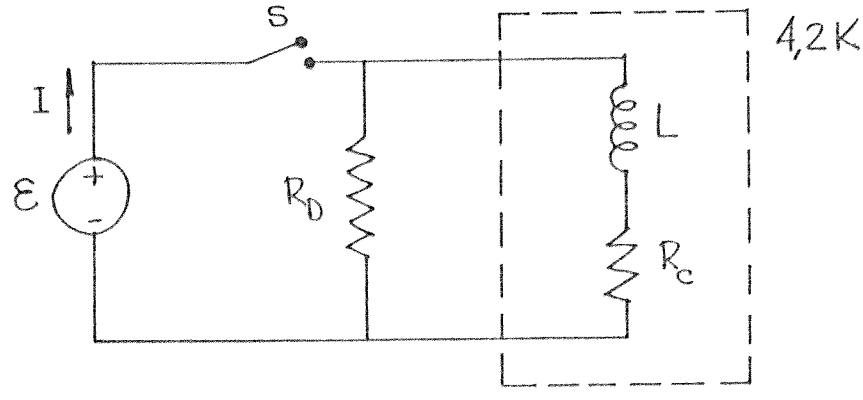
onde:

E = energia em (J)
L = indutância total (H)
I = corrente (A)

Quando no enrolamento um pequeno comprimento de fio deixa de ser supercondutor, devido a elevação local da temperatura $T > T_c$ ou devido a energia de fricção por movimentação de espiras; ou a densidade de corrente neste valor de campo excede J_c, inicia-se um processo de dissipação de energia RI^2, que se ultrapassar a capacidade térmica de refrigeração do sistema, propaga-se rapidamente induzindo o "quench" do magneto e ocasionando a evaporação parcial ou total do hélio líquido.

Quando o magneto deixa de ser supercondutor esta energia precisa ser removida do enrolamento, pois o hélio evapora rapidamente e a circulação da coerente no fio no estado normal eleva a temperatura podendo até causar a fusão do magneto.

O sistema mais utilizado para proteção do magneto é a colocação de um resistor em paralelo externo ao criostato, para dissipar o máximo da energia. Ao mesmo tempo a fonte de potência deve ser desconectada, ficando o circuito restrito ao magneto supercondutor e aoresistor de proteção.



Quando S está fechada e o magneto está no estado supercondutor, podemos considerar um circuito R-L onde $R_c = \gamma t$, sendo t o tempo após o início do "quench". Neste caso a equação de malha será:

$$L\frac{dI}{dt} + \gamma t\, I = \mathcal{E} \qquad (V.95)$$

$$; \quad I = I_0 \exp\left(-\frac{\gamma t^2}{L}\right) \qquad (V.96)$$

Resultados experimentais mostram que para os magnetos supercondutores a constante natural de decaimento τ está próximo à metade da curva gaussiana, logo:

$$I = I_o \exp(-\frac{\gamma t^2}{2L}) \qquad (V.97)$$

Após a abertura de S a equação será:

$$L\frac{dI}{dt} + (R_D + \gamma t)I = 0 \qquad (V.98)$$

$$; \quad I = I_o \exp\left(-\frac{R_D}{L}t - \frac{\gamma t^2}{2L}\right) \qquad (V.99)$$

quando $\frac{L}{R_D} << (\frac{2L}{\gamma})^{1/2}$ a corrente pode ser aproximada para $I \simeq I_o \exp(-\frac{R_D}{L}t)$ e a energia à ser dissipada do sistema $E = (R_D + \gamma t)I^2$ pode ser calculada por:

$$E_C = \int_0^\infty \gamma t\, I^2 dt = I_o^2 \gamma \int_0^\infty t \exp\left(-\frac{2R_D}{L}t\right) dt \qquad (V.100)$$

$$E_C = \frac{I_o^2 \gamma L^2}{4R_D^2} \qquad (V.101)$$

$$E_D = R_D \int_0^\infty I^2 dt = R_D I_o^2 \int_0^\infty \exp\left(-\frac{2R_D t}{L}\right) dt \qquad (V.102)$$

$$E_D = \frac{1}{2} L I_o^2 \qquad ; \qquad \frac{E_C}{E_D} = \frac{\gamma L}{2R_D^2} \qquad (V.103 \text{ e } 104)$$

substituindo $\tau_C = (\frac{2L}{\gamma})^{1/2}$ e posteriormente $\tau_D = \frac{L}{R_D}$, obtemos:

$$\frac{E_C}{E_D} = (\frac{\tau_D}{\tau_C})^2 \qquad (V.105)$$

Para um certo tempo t podemos considerar que $\gamma t = R_C$ logo $\tau_C = \frac{L}{R_C}$ e obter $\frac{E_C}{E_D} = (\frac{R_C}{R_D})^2$ que na condição de R_C máximo equi-

vale a resistência de todo o magneto no estado normal. Se o valor de $R_D = 3R_c$ obtemos $E_c = \frac{1}{9} E_D$, isto significa que 10% da energia será dissipada internamente no magneto e 90% no resistor de proteção.

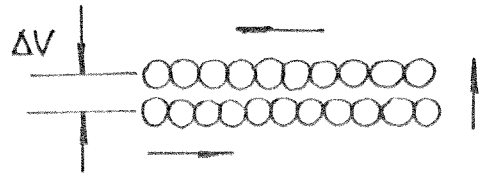
Associado ao valor da resistência de dissipação obtemos o valor da tensão elétrica que aparecerá nos terminais da bobina, que é limitado por R_D:

$$V_{máx} = I_o R_D \qquad (V.106)$$

$V_{máx}$ deve ser comparada com a tensão máxima que o isolamento suporta, que é proporcional a sua espessura e a tensão de ruptura do isolante utilizado.

A tabela V resume as propriedades dos materiais utilizados para baixa temperatura (4.2K), onde para os vernizes tipo "formvar" (poliamida) $V_{RUPT} \sim 15$ KV/mm. No caso de fios de NbTi é utilizado espessura de isolamento de 0,010 a 0,040mm, correspondendo respectivamente a $V_{isol.} = 150$ a 600V.

A tensão máxima de isolamento $V_{isol.}$ aparece nos terminais do enrolamento que, dividido pelo número de camadas, permite calcular a tensão entre camadas, que deve ser inferior a $V_{isol.}$ conforme esquema abaixo:



$$\Delta V < 2 \frac{V_{Isol.}}{\text{Nº Camadas}}$$

Atendida esta condição devemos analisar a tensão $V_{máx}$ com respeito ao arco entre os terminais de corrente quando o magneto está em "quench", comparado com a tensão de ruptura do hélio líquido. A fig. 6 apresenta resultados obtidos experimentalmente onde para distâncias de 0,2mm a tensão de ruptura é $V_R \simeq 3$KV, tanto para eletrodo x eletrodo como para eletrodo x plano.

Para retirar grande parte da energia do magneto e dissipá-la no resistor externo precisamos elevar R_D e conseqüentemente

Tabela V - Tensão de Ruptura de Vários Materiais - Baixa Temperatura (Eletrodo Planisférico Ø 30mm) /11/.

MATERIAL	ESPESSURA (μm)	TENSÃO DE RUPTURA AC (MV/cm) (PICO)						TENSÃO DE RUPTURA DE (MV/cm)					
		LAr	LN_2	N_2 GAS	LHe	He GAS	VÁCUO	LAr	LN_2	N_2 GAS	LHe	He GAS	VÁCUO
		239K	77K	77K	4,2K	4,2K	10K		77K	77K	4,2K	4,2K	
MYLAR	100	1,19	1,71	0,99	1,20	0,85	2,12		2,1	1,6	2,1	1,5	
TEFLON	100	1,13	1,14	0,97	1,34	0,99	3,20		2,0	1,7	2,3	1,4	
TEFLON FEP	100	1,27	1,37	1,12	1,44	1,145	2,54		2,1	1,7	2,2	1,6	
POLIETILENO	100	1,02	1,55	1,06	0,92	0,70	1,45		1,8	1,2	1,8	1,1	
NYLON	100	1,10	1,27	0,99	1,11	0,73	2,0		2	1,8	2,4	1,6	
PVC	100	1,12	1,09	0,97	1,05	0,75	1,82		1	-	2	1,5	
KAPTON	100	1,40	1,98	1,27	1,63	1,27	3,17		2,4	1,8	2,6	1,9	
PAPEL KRAFT	100	0,13	0,28	0,18	0,38	0,21	-		0,6	0,3	0,54	0,4	
PAPEL MICA	100	0,64	0,76	0,62	0,55	0,30	-		1,1	0,95	0,85	0,7	
KAPTON + TEFLON	100	1,34	1,51	1,4	1,47	1,17	3,34		2,4	1,7	2,5	1,8	
PTFE/VIDRO	100	0,32	0,34	0,30	0,58	0,4	-		0,50	0,36	0,45	0,3	

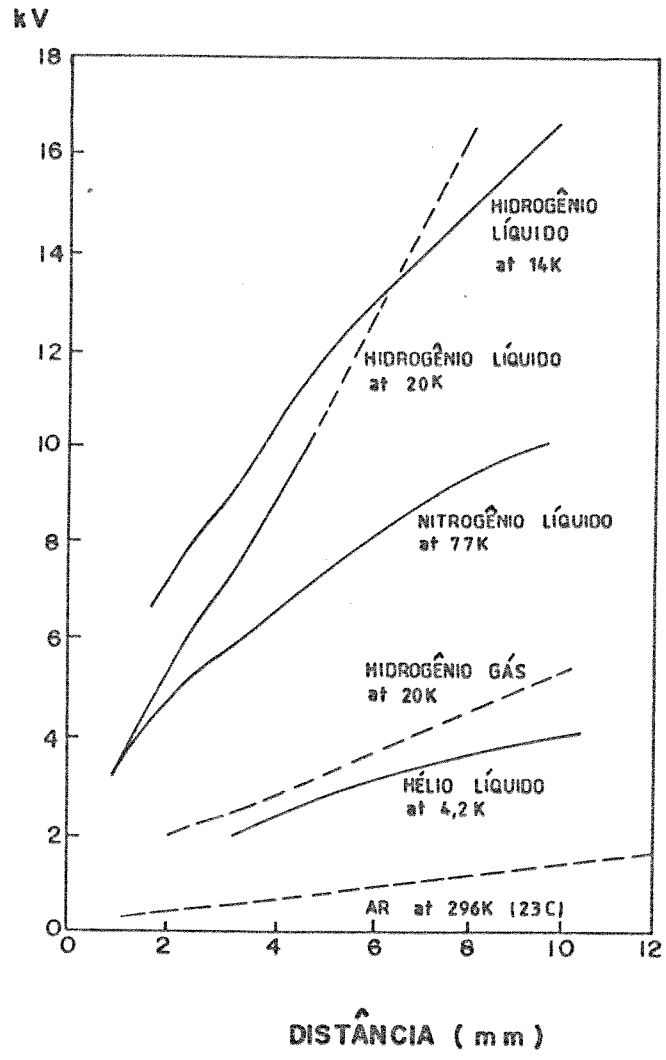


FIG. 6 - TENSÃO DE RUPTURA PARA LÍQUIDOS CRIOGÊNICOS VERSUS DISTÂNCIAS DOS ELETRODOS (ESFERAS DE AÇO ∅ 12,7 mm) /11/

papel técnico Romitec

$V_{máx}$, que é limitado pelo isolamento do fio e pelo isolamento entre terminais em meio ao hélio líquido. Por outro lado, devemos considerar que a energia que é dissipada internamente e absorvida pelo hélio líquido, que tem um calor latente de vaporização de 2,7 J/cm^3, que após evaporado, não evitará uma elevação de temperatura no enrolamento.

Devemos estabelecer um compromisso seguro entre E_c/E_D para manter $V_{máx} \cong 1 \sim 3$ KV e que o volume de hélio até o topo do magneto seja suficiente para absorver a fração de energia a ser dissipada internamente.

Outro método utilizado para diminuir a tensão elétrica de "quench" nos terminais é a subdivisão do enrolamento em setores através de "taps" intermediários, conectados a resistores de dissipação independentes.

A fig. 7 mostra este tipo de proteção onde, quando o "quench" se inicia em um dos setores, pode-se detectar e cortar a alimentação de corrente. A energia armazenada será descarregada parte em cada circuito, se o magneto entrar em "quench" total, caso seja parcial e se mantenha a temperatura $T<T_c$ o outro setor continua no estado supercondutor não havendo dissipação de energia.

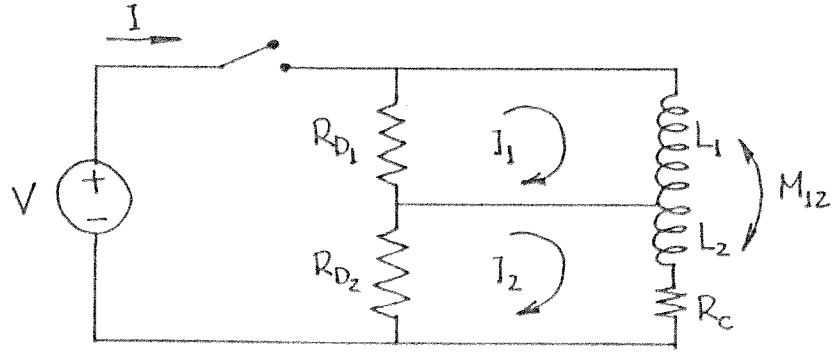


Fig. 7 - Circuito de Proteção com Taps

Além da vantagem de diminuir a tensão entre terminais, a colocação de "taps" permite uma detecção mais precisa do início de "quench" e sua localização. A técnica utilizada para detecção é a comparação das tensões entre os "taps" através de um sistema diferencial com tensões opostas onde qualquer variação pode ser notada pelo aparecimento de tensão resultante não-nula; porém os circuitos devem ser idênticos.

V.9 - CONCLUSÕES

No dimensionamento de magnetos supercondutores o cálculo das forças que devido a contração térmica de 300k para 4,2K, ou devido a energização podem interferir diretamente nos parâmetros geométricos e tipos de fios supercondutores escolhidos.

Após a análise criteriosa de forças de todas as naturezas atuando isoladamente ou em conjunto foi montado um programa de computador específico para magnetos cilíndricos. Durante a construção dos primeiros magnetos supercondutores colocamos diversos "strain gauge" para medida das deformações quer no carretel suporte quer nas primeiras camadas do enrolamento.

No caso de magnetos supercondutores não cilíndricos foram montados programas específicos para cada geometria, como no caso dos magnetos pista-de-corrida.

Os parâmetros de indutância e energia armazenada têm importância fundamental no cálculo dos tempos de carregamento e nos circuitos de proteção do magneto durante os "quenchs".

As rotinas de cálculos desenvolvidos permitem a análise de forma completa das forças, indutância e energia em magnetos de enrolamentos simples ou em combinação de vários enrolamentos como nos casos de campos magnéticos superiores a 7T.

CAPÍTULO VI

DIMENSIONAMENTO, CONSTRUÇÃO E TESTE DO MAGNETO LABORATÓRIO 6.5T - NbTi

VI.1 - INTRODUÇÃO

O dimensionamento de magnetos supercondutores se resumirá no atendimento das condições desejadas para diâmetro interno útil, campo magnético central, sempre associado ao menor custo.

A figura 1 mostra, em forma de blocos, os passos de otimização, bem como os critérios observados durante a dimensionamento. A estes fatores adicionaremos a minimização dos custos de fabricação e construção de forma compacta, visando baixo consumo de hélio líquido /1/.

Neste caso específico, o valor do campo magnético central 6.5T foi condicionado a disponibilidade do fabricante e prazo de entrega, para um comprimento de fio de 1470m.

Todos os cálculos preliminares de campo magnético, tensões mecânicas, indutância e energia serão executados utilizando uma sequência de programas para microcomputadores montados a partir das equações obtidas nos Capítulos IV e V.

VI.2 - CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO NO EIXO-Z

Para este cálculo utilizamos o programa listado na tabela I e os seguintes dados de entrada:

A_1 = 0.03m

A_2 = 0.06m

2b = 0.08m

Nºesp. = 5.106

I = 1A para obter B_o em unidades de T/A.

Os dados básicos do fio supercondutor escolhido estão re

MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO NO PROJETO DE MAGNETOS SUPERCONDUTORES

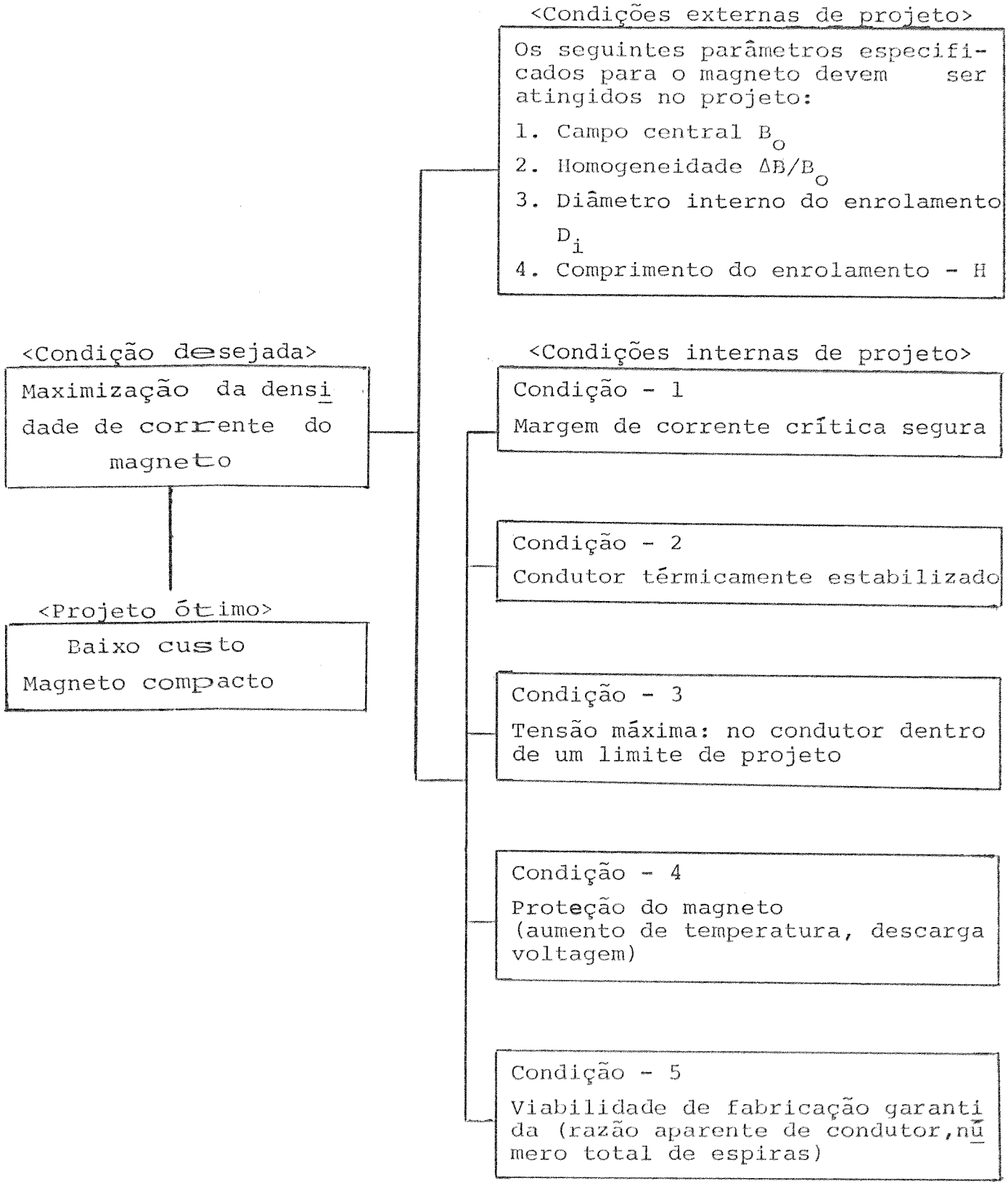


Fig. 1 - Critério Ótimo para o Projeto de Magnetos Supercondutores /1/

PROGRAMA DE CALCULO DE CAMPO MAGNETICO DE VARIAS BOBINAS CILINDRICAS

VERSAO QUICKBASIC/MICROSOFT

```
DEF FNA(A,B)=4* 3.141593*1.0E-7*LOG((A+SQR(A^2+B^2))/(1+SQR(1+B^2)))
INPUT "Numero de bobinas : ",J
DIM A1(J),A2(J) ,B1(J),B2(J),M(J),MM(J),Bz(J,11),Bt(11)
FOR N=1 TO J
   PRINT "Bobina no.",N
   INPUT "Raio  interno A1(m) : ",A1(N)
   INPUT "Raio  externo A2(m) : ",A2(N)
   INPUT "Semi- altura superior B1(m) : ",B1(N)
   INPUT "Semi- altura inferior B2(m) : ",B2(N)
   INPUT "Numero de espiras/cm**2 : ",MM(N)
   M(N)=MM(N)*1 .0E4*(A2(N)-A1(N))*ABS(B1(N)-B2(N))
   INPUT "Corrente(A) : ",I
   ALFA = A2(N) /A1(N)
   BETA = ABS(B 1(N)-B2(N))/2/A1(N)
   G = 2*B2(N)
   CF = 3.14159 3*(A1(N)+A2(N))*M(N)
   IF B2(N)>0 THEN
      CF = 2*CF
   END IF
   IF B1(N)=-B2 (N) THEN
      G = 0
   END IF
   FOR K=0 TO 1 0
      DELTA=K*0 .005
      IF G=0 THEN
        C0 = BE TA+DELTA/A1(N)
        C1 = BE TA-DELTA/A1(N)
        L = B1( N)-B2(N)
        D = A2( N)-A1(N)
        Bz(N,K)  = M(N)*I*A1(N)*(C0*FNA(ALFA,C0)+C1*FNA(ALFA,C1))/L/D/2
      ELSE
        C0 = 2* BETA+G/A1(N)/2+DELTA/A1(N)
        C1 = 2* BETA+G/2/A1(N)-DELTA/A1(N)
        F0 = G/ 2/A1(N)+DELTA/A1(N)
        F1 = G/ 2/A1(N)-DELTA/A1(N)
        L = B1( N)-B2(N)
        D = A2( N)-A1(N)
        AUX = C 0*FNA(ALFA,C0)-F0*FNA(ALFA,F0)+C1*FNA(ALFA,C1)-F1*FNA(ALFA,F
        Bz(N,K)  = M(N)*I*A1(N)*AUX/L/D/2
      END IF
      Bt(K) = B t(K)+Bz(N,K)
   NEXT K
   PRINT TAB( 10 );"z(cm)";TAB(27);"Bz(T)"
   FOR K=0 TO 1 0
      PRINT TAB (10);K*0.5;TAB(25);Bz(N,K)
   NEXT K
   PRINT:PRINT  "Comprimento de fio = ";CF
NEXT N
IF J=1 THEN END
PRINT:PRINT
PRINT TAB(10);" z(cm)";TAB(27);"Bt(t)"
FOR K=0 TO 10
   PRINT TAB( 10 );K*0.5;TAB(25);Bt(K)
NEXT K
END
```

sumidos abaixo:

Tipo – NbTi-FSW-3B	–	Fabricante: Furukawa Co-Japão
Diâmetro nú		0,685 mm
isolado		0,705 mm
nº filamentos		2.300
Diâmetro filamento		9 μm
Relação Cu/NbTi		1,62
Corrente crítica	catálogo	220A(5T); 174(6T); 132(7T)
	medida	276A(5T); 217(6T); 165(7T)
Passo torção		9,8 mm
RRR		118
Comprimento		1.470 m

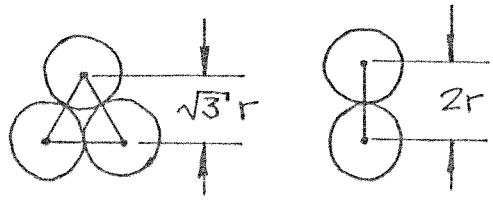
Os valores de A_1, A_2, 2b e N foram ajustados mantendo-se A_1 fixo e variando-se os demais em função do comprimento de fio supercondutor disponível.

O valor de N foi calculado em função dos testes realizados para determinar o fator de empacotamento nas direções radial e axial, chegando-se a 96% e 98% respectivamente.

$$N_1 = \frac{2b}{d} \times 0,98 = 111,2 \simeq 111 \text{ espiras/camada} \qquad \text{(VI.1)}$$

$$N_2 = \frac{A_2 - A_1}{d} \times 0,96 \times \frac{1}{0,86} = 47,5 \simeq 46 \text{ (par)} \qquad \text{(VI.2)}$$

O fator 0,86 utilizado em N_2 refere-se ao acomodamento do enrolamento entre duas camadas ocupando os espaços vazios, como mostrado abaixo:



$$\frac{\sqrt{3}\,r}{2r} = 0,86 \qquad \text{(VI.3)}$$

O fator de empacotamento total do enrolamento pode ser calculado por:

$$\lambda = \frac{N \times \frac{\pi D^2}{4}}{2b(A_2 - A_1)} = 0,83 \qquad \text{(VI.4)}$$

Com estes parâmetros e o programa já mencionado obtemos o valor de $B_o = 5,36 \times 10^{-2}$ (T/A) que permite determinar a corrente de projeto para se obter 6.5T no ponto central, ou seja $I_p = 121$ A. A margem de segurança para I_c(7T) será de 26,6%, acima da média de 25%, tabela II.

Agora podemos determinar a densidade de corrente efetiva do enrolamento como sendo:

$$J_{ef} = \lambda J_{cond} = 0,83 \cdot \frac{121}{\pi d^2/4} = 2,57 \cdot 10^4 \ A.cm^{-2} \qquad (VI.5)$$

A figura 2 mostra a linha de carregamento do magneto supercondutor, onde é plotada a característica do fio (IxB) e o campo magnético gerado. Posteriormente, a curva receberá uma informação adicional que é o valor do campo magnético B_{max}, que será calculado no ítem 6.

VI.3 - MAPEAMENTO DO CAMPO MAGNÉTICO

Com os parâmetros definidos vamos utilizar o programa descrito no Capítulo IV, que permite o mapeamento do campo em qualquer ponto do plano z x r.

Vamos definir os incrementos para integração que corresponderão às partições do enrolamento nas direções r e z, que multiplicados pela secção do enrolamento devem reproduzir o número de espiras:

$$N = \frac{1}{DR} \cdot \frac{1}{DZ} \cdot 2b \times (A_2 - A_1) \qquad (VI.6)$$

$DR = 0.0652$
$DZ = 0.0721$

onde $\frac{1}{DR} \cdot \frac{1}{DZ}$ = nº esp/cm^2 = 212,7

Os resultados estão apresentados na tabela III para pontos da região central e tabela IV para pontos internos ao enrolamento.

Agora podemos completar a figura 2 da linha de carga com o valor de $B_{max} = 5.7 \times 10^{-2}$ (T/A) correspondente a uma variação $\Delta B = B_{máx}/B_o = 1,05$.

Tabela II - Dimensionamento Básico com Cálculo do Campo Magnético ao Longo do Eixo Z

```
RAIO INTERNO A1(M)? .03
RAIO EITERNO A2(M)? .06
SEMI-ALTURA SUPERIOR B1(M)? .04
SEMI-ALTURA INFERIOR B2(M)? -.04
NUMERO DE ESPIRAS POR CM2 ? 212.75
CORRENTE(A) ? 1
A1= .03                A2= .06                B1= .04                B2=-.04
        N= 5106                    I= 1 N=              5106
         Z(CM)                BZ(T)
           0                5.36427E-02
           .5               5.33416E-02
           1                5.24343E-02
           1.5              .050912
           2                4.87691E-02
           2.5              4.60181E-02
           3                4.27093E-02
           3.5              3.89495E-02
           4                3.49076E-02
           4.5              3.07933E-02
           5                2.68143E-02
COMPRIMENTO DO FIO (M)= 1443.69

READY
```

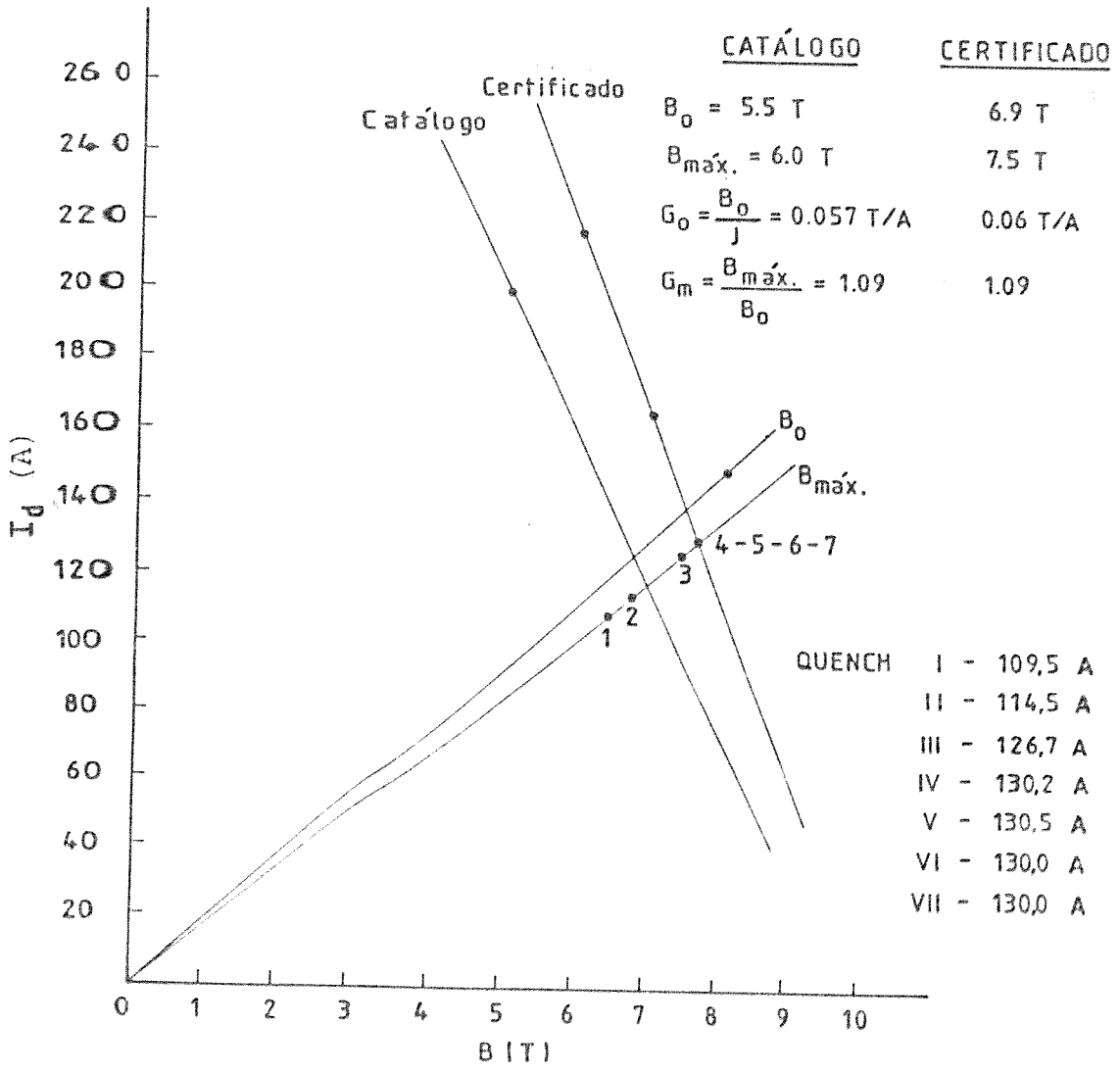


FIG. 2 - LINHA DE CARGA DO CABO FSW-3B

papel tecnico Romilec

Tabela III - Mapeamento Campo Magnético na Região Interna do Carretel

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COIL T COIL NO.=

INNER RADIUS= 3.000 (CM) OUTER RADIUS= 6.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 4.100 (CM)

AXIAL PARTITION= 0.068 (CM) RADIUS PARTITION= 0.0713 (CM)

RADIUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	0.00	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	2.10	2.40	2.70	3.00
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.41	0.000	1.387	2.768	4.136	5.483	6.797	8.065	9.270	10.392	11.411	12.306
0.82	0.000	2.789	5.567	8.324	11.043	13.703	16.278	18.733	21.029	23.120	24.960
1.23	0.000	4.214	8.416	12.590	16.739	20.809	24.769	28.569	32.144	35.420	38.318
1.64	0.000	5.661	11.320	16.969	22.593	28.162	33.627	38.920	43.949	48.599	52.746
2.05	0.000	7.112	14.239	21.389	28.561	35.733	42.858	49.853	56.595	62.917	68.622
2.46	0.000	8.522	17.088	25.736	34.494	43.366	52.325	61.294	70.120	78.569	86.327
2.87	0.000	9.821	19.725	29.794	40.102	50.711	61.653	72.900	84.315	95.594	106.227
3.28	0.000	10.910	21.947	33.243	44.935	57.171	70.097	83.840	98.434	113.631	128.626
3.69	0.000	11.684	23.530	35.714	48.430	61.915	76.469	92.488	110.502	131.068	153.649
4.10	0.000	12.059	24.294	36.895	50.081	64.130	79.417	96.509	116.376	141.103	181.028

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	0.00	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	2.10	2.40	2.70	3.00
0.00	526.144	526.651	528.169	530.691	534.204	538.687	544.112	550.437	557.611	565.513	574.206
0.41	524.249	524.759	526.285	528.823	532.359	536.878	542.350	548.739	555.994	563.995	572.806
0.82	518.543	519.060	520.610	523.190	526.793	531.410	537.020	543.593	551.086	559.383	568.550
1.23	508.974	509.500	511.079	513.715	517.410	522.167	527.983	534.841	542.715	551.497	561.258
1.64	495.479	496.011	497.610	500.289	504.068	508.969	515.014	522.219	530.582	540.019	550.611
2.05	478.022	478.548	480.135	482.808	486.607	491.587	497.812	505.345	514.240	524.458	536.108
2.46	456.652	457.152	458.664	461.227	464.907	469.799	476.026	483.732	493.067	504.093	516.989
2.87	431.577	432.019	433.360	435.650	438.977	443.473	449.331	456.810	466.230	477.867	492.095
3.28	403.234	403.580	404.632	406.440	409.092	412.736	417.605	424.065	432.680	444.185	459.544
3.69	372.340	372.553	373.202	374.318	375.958	378.224	381.292	385.484	391.441	400.510	415.704
4.10	339.872	339.930	340.106	340.397	340.800	341.313	341.930	342.646	343.457	344.328	345.327

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	0.00	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	2.10	2.40	2.70	3.00
0.00	526.144	526.651	528.169	530.691	534.204	538.687	544.112	550.437	557.611	565.513	574.206
0.41	524.249	524.760	526.292	528.839	532.388	536.921	542.410	548.817	556.091	564.110	572.939
0.82	518.543	519.068	520.640	523.256	526.909	531.586	537.266	543.915	551.487	559.860	569.097
1.23	508.974	509.518	511.149	513.869	517.681	522.582	528.563	535.604	543.666	552.633	562.564
1.64	495.479	496.043	497.739	500.577	504.574	509.747	516.111	523.667	532.399	542.202	553.132
2.05	478.022	478.601	480.346	483.281	487.444	492.884	499.653	507.799	517.345	528.219	540.482
2.46	456.652	457.232	458.982	461.944	466.185	471.796	478.893	487.600	498.028	510.179	524.147
2.87	431.577	432.130	433.809	436.668	440.804	446.363	453.541	462.590	473.793	487.335	503.430
3.28	403.234	403.727	405.227	407.797	411.552	416.677	423.447	432.273	443.736	458.489	477.205
3.69	372.340	372.736	373.943	376.018	379.065	383.258	388.885	396.424	406.739	421.411	443.191
4.10	339.872	340.144	340.972	342.390	344.460	347.285	351.031	355.978	362.638	372.118	389.899

Tabela IV - Mapeamento do Campo Magnético dentro do Enrolamento

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COIL T COIL NO.=

INNER RADIUS= 3.000 (CM) OUTER RADIUS= 6.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 4.100 (CM)

AXIAL PARTITION= 0.068 (CM) RADIUS PARTITION= 0.0713 (CM)

RADIUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.41	12.306	13.055	13.640	14.044	14.273	14.312	14.170	13.861	13.405	12.824	12.145
0.82	24.960	26.505	27.713	28.556	29.016	29.088	28.786	28.135	27.176	25.959	24.544
1.23	38.318	40.760	42.675	44.009	44.731	44.830	44.326	43.262	41.703	39.735	37.457
1.64	52.746	56.261	59.029	60.958	61.992	62.113	61.344	59.748	57.427	54.513	51.159
2.05	68.622	73.501	77.364	80.059	81.494	81.636	80.513	78.213	74.881	70.714	65.951
2.46	86.327	93.043	98.393	102.131	104.115	104.294	102.705	99.457	94.746	88.857	82.159
2.87	106.227	115.574	123.044	128.245	130.994	131.256	129.076	124.573	117.965	109.629	100.146
3.28	128.626	142.044	152.640	159.850	163.610	164.015	161.158	155.103	145.959	134.064	120.299
3.69	153.649	174.248	189.317	198.882	203.715	204.319	200.888	193.350	181.385	164.523	143.195
4.10	181.028	218.392	237.047	247.954	253.338	254.063	250.395	242.158	228.630	207.704	169.320

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.00	574.206	505.764	437.890	370.340	303.014	235.783	168.514	101.108	33.480	-35.160	-103.232
0.41	572.806	504.500	436.776	369.388	302.230	235.168	168.064	100.814	33.327	-35.190	-103.159
0.82	568.550	500.653	433.388	366.495	299.853	233.311	166.715	99.942	32.888	-35.253	-102.909
1.23	561.258	494.059	427.582	361.546	295.804	230.173	164.465	98.527	32.228	-35.260	-102.381
1.64	550.611	484.417	419.096	354.334	289.939	225.678	161.312	96.635	31.469	-35.050	-101.389
2.05	536.108	471.250	407.513	344.528	282.031	219.713	157.254	94.371	30.812	-34.350	-99.624
2.46	516.989	453.832	392.200	331.627	271.734	212.097	152.285	91.901	30.579	-32.720	-96.588
2.87	492.095	431.054	372.216	314.908	258.550	202.556	146.368	89.451	31.265	-29.445	-91.462
3.28	459.544	401.171	346.198	293.392	241.799	190.667	139.357	87.245	33.579	-23.315	-82.789
3.69	415.704	361.276	312.400	266.000	220.696	175.785	130.776	85.180	38.252	-12.182	-67.414
4.10	345.327	307.529	269.836	232.177	194.560	156.979	119.424	81.900	44.413	6.610	-30.686

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.00	574.206	505.764	437.890	370.340	303.014	235.783	168.514	101.108	33.480	35.160	103.232
0.41	572.939	504.669	436.959	369.655	302.567	235.603	168.661	101.762	35.922	37.454	103.872
0.82	569.097	501.355	434.273	367.606	301.253	235.118	169.182	103.827	42.663	43.779	105.796
1.23	562.564	495.738	429.707	364.215	299.167	234.408	170.334	107.607	52.704	53.124	109.018
1.64	553.132	487.673	423.233	359.540	296.492	234.070	172.582	113.614	65.484	64.809	113.565
2.05	540.422	476.947	414.792	353.707	293.569	234.389	176.867	122.569	80.973	78.616	119.476
2.46	524.147	463.271	404.354	346.998	290.947	236.352	183.681	135.416	99.558	94.690	126.805
2.87	503.430	446.279	392.025	340.020	289.841	241.365	195.152	153.363	122.037	113.514	135.627
3.28	477.205	425.576	378.354	334.112	291.950	251.505	213.055	177.957	149.772	136.077	146.033
3.69	443.191	401.102	365.288	332.130	300.344	269.530	239.704	211.261	185.374	164.974	158.271
4.10	389.899	377.186	359.169	339.688	319.427	298.648	277.416	255.633	232.904	207.809	172.078

As figuras 3 e 4 mostram o perfil do campo magnético devido às componentes B_z x r, B_z x z separadamente; podemos observar que $B_{máx}$ ocorre sempre na superfície interna do enrolamento.

VI.4 - DIMENSIONAMENTO MECÂNICO

Para o cálculo das tensões utilizamos inicialmente o microcomputador, que permite estimar forças F_z e F_r atuantes no enrolamento durante sua energização. Este cálculo é feito a partir da expressão obtida no Capítulo V ou seja:

$$F_z = \frac{N^2 I^2}{2(2b)^2}\left[U_{2b} - U_b\right] \quad (kg)$$

$$U_x = \left(Bx^2\phi_x^2 - 2Dx\phi_x\right)\frac{10^{-7}}{9,8}$$

$$\phi_x = \frac{1}{A + B\left(\frac{x}{D} + P\beta\right)}$$

$$F_R = \frac{N^2 I^2}{(2b)^2} W_{2b} \quad (kg)$$

$$W_x = x^2\left(2\phi_x - A\phi_x^2\right)\frac{10^{-7}}{9,8}$$

O programa da tabela Va apresenta estes cálculos a partir do valor da indutância. Os resultados são mostrados na tabela Vb, a partir do qual podemos calcular a pressão equivalente por:

$$P_z = \frac{F_z}{\pi\left(A_2^2 - A_1^2\right)} = -43 \ kg.cm^{-2}$$

$$P_R = \frac{F_R}{2\pi A_2(2b)} = 126 \ kg.cm^{-2}$$

Outro cálculo da tensão mecânica refere-se ao "Hoop Strain" que permite calcular a tensão tangencial σ_0 como:

$$\sigma_\theta = A_1 JB = 0,03.2,57.10^8.6,5 = 5.10^7 \ N.m^{-2} = 510 \ kg.cm^{-2}$$

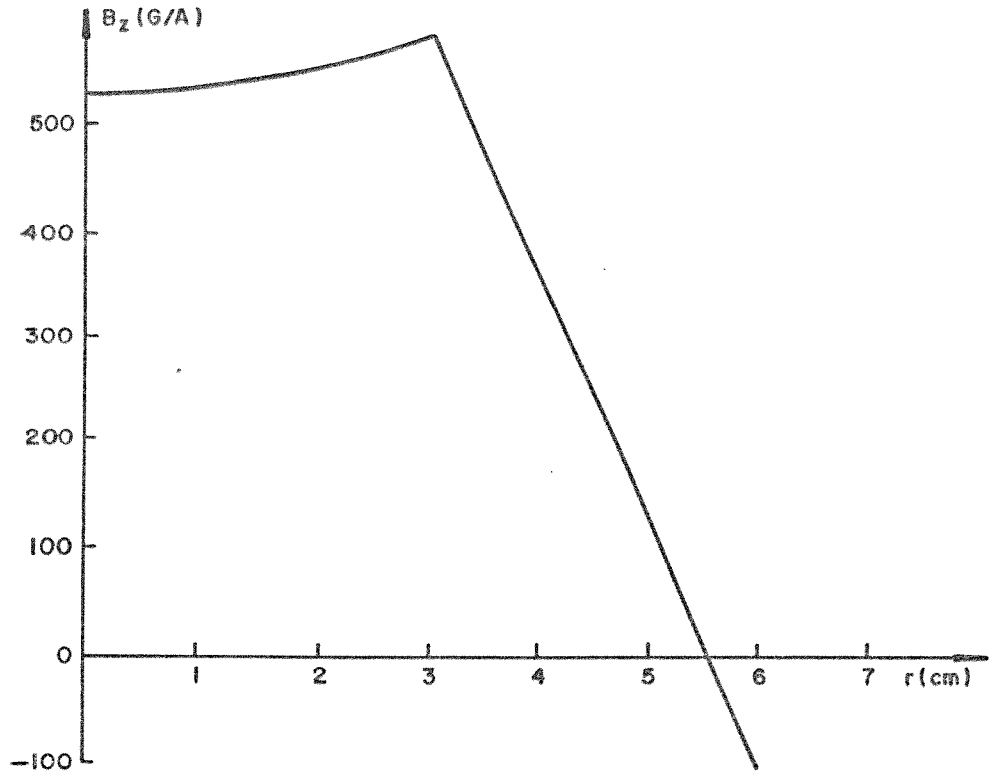


FIG. 3 - B_z VERSUS r PARA z = 0

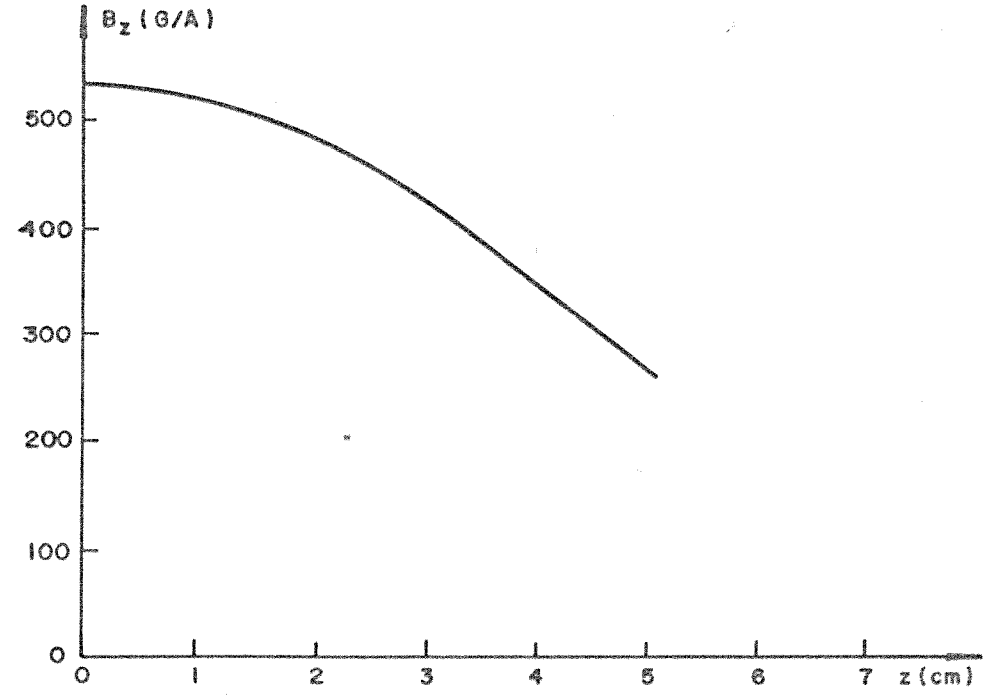


FIG. 4 - B_z VERSUS z PARA r = 0

papel tecnico Romilec

Tabela Va - Programa para Cálculo da Indutância e Forças Axiais

```
10 REM CALCULO INDUTANCIA E FORCAS E-M
20 INPUT "RAIO INTERNO  (M) A1=",A1
30 INPUT "RAIO EXTERNO  (M) A2=",A2
40 INPUT "METADE DO COMPRIMENTO (M) B=",B
50 INPUT "NUMERO TOTAL ESPIRAS N=",N
60 INPUT "CORRENTE OPERACAO (I) I=",I
70 LET A=2*B/(A2+A1):LET BB=(A2-A1)/(A2+A1)
80 LET X=2*B
90 GOSUB 1000
100 LET L=N^2*(A2+A1)*P0*1E-7
110 GOSUB 1100
120 LET U0=U:LET W0=W
130 LET X=B
140 GOSUB 1000
150 GOSUB 1100
160 LET F0=N^2*I^2/2/(2*B)^2*(U0-U)
170 LET F1=N^2*I^2*W0/(2*B)^2
180 PRINT "INDUTANCIA L=";L;"(H)"
190 PRINT "FZ=";F0/1000;"(TON)","FR=";F1/1000;"(TON)"
200 END
1000 REM SUBROTINA INDUTANCIA
1005 IF A<.8 THEN 1015
1015 IF BB<.5 THEN 1040
1020 IF BB>=.5 THEN 1050
1030 IF BB<.5 THEN 1060
1035 IF BB>=.5 THEN 1070
1040 LET X0=.038:LET Y0=.118:LET Z0=1.02
1045 GOTO 1075
1050 LET X0=.04:LET Y0=.136:LET Z0=.783
1055 GO TO 1075
1060 LET X0=.036:LET Y0=.111:LET Z0=1.32
1065 GO TO 1075
1070 LET X0=.019:LET Y0=.14:LET Z0=.9
1075 LET P1=X0+Y0*(X/(A1+A2)+Z0*BB)
1080 LET P0=1/P1
1085 RETURN
1100 REM FORCAS E-M
1105 LET U1=Y0*X^2*P0^2-2*(A1+A2)*X*P0
1110 LET U=U1/9.8E-7
1115 LET W1=X^2*(2*P0-X0*P0^2)
1120 LET W=W1/9.8E-7
1125 RETURN
```

Tabela V.b

Dados de Entrada e Resultados dos Cálculos de Indutância e Forças Eletromagnéticas

```
RAIO INTERNO  (M) A1=.03
RAIO EXTERNO  (M) A2=.05
METADE DO COMPRIMENTO (M) B=.04
NUMERO TOTAL ESPIRAS N=5105
CORRENTE OPERACAO (I) I=121
INDUTANCIA L= 1.28213 (H)
FZ=-3.67171 (TON)                    . FR= 38.147 (TON)

READY
```

$$\epsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} = \frac{510}{11855.10^2} = 0{,}043\% < 0{,}5\% \qquad \text{(VI.7)}$$

$$E_\theta = V_{Cu} E_{Cu} + V_{NbTi} E_{NbTi} + V_{isol} E_{isol.} \qquad \text{(VI.8)}$$

$$= \frac{1{,}62}{2{,}62} \cdot 13000 + \frac{1}{2{,}62} \cdot 10.000$$

$$E_\theta = 11855 \ kg.mm^{-2}$$

$$E_r = \frac{1}{\frac{V_{cu}}{E_{cu}} + \frac{V_{NbTi}}{E_{NbTi}}} = \frac{1}{\frac{0{,}62}{13000} + \frac{0{,}38}{10000}} = 11670 \ kg/mm^2 \qquad \text{(VI.9)}$$

Podemos afirmar que as tensões e deformações na direção z são muito baixas comparadas aos valores admissíveis. Porém, as solicitações na direção tangencial são elevadas mas suportáveis pelo fio supercondutor de NbTi, que possibilita em casos normais deformações de 0,1% até o valor máximo de 0,5%.

Terminando o dimensionamento mecânico no microcomputador, vamos passar ao cálculo de todas as tensões e deformações nos diferentes estados, ou seja:

a) pré-tensão no enrolamento durante a fabricação;
b) efeito da contração térmica durante o resfriamento para 4,2K;
c) energização até o valor de B_o.

Para este trabalho foi montado um programa de computador que permite o cálculo de cada efeito separadamente e também apresenta o efeito total. Este programa lê diretamente do arquivo em disco o mapeamento de campo calculado no ítem anterior, e considera os valores de B_z e B_r em cada ponto calculando as tensões e deformações locais.

As tabelas VI ,VII ,VIII, IX , respectivamente aos cálculos (a), (b) , (c) e total mostram os resultados obtidos para o cálculo deste magneto de 6.5T.

Observamos que a pré-tensão e a contração, atuam em direção oposta de forma a neutralizar parte das tensões devido a energização, isto permite que a máxima tensão no efeito combinado seja: $\sigma\theta_{máx.}$=507kg/cm², $\sigma r_{máx.}$ = 204kg/cm², correspondendo a uma deformação de 180 μm ou 0,06%.

A estrutura construída em aço inox para servir de carretel ao enrolamento é mostrada na fig. 5 , onde notamos os furos existentes para permitir a entrada do hélio líquido e nas flanges internamente foram colocados calços de fibra-de-vidro com canais intermediários para a refrigeração. A espessura das flanges estão dimensionadas no sentido de servirem de suporte aos terminais de corrente e conectores , pois, neste caso as tensões são baixas não havendo necessidade do ponto de vista mecânico desta espessura.

O corpo interno do carretel com espessura de 2mm é utilizado durante os cálculos como condição de contorno, sua deformação em função das tensões foi calculada em 0,12%.

A fig. 6 mostra a variação das tensões σ_θ, σ_r, no enrolamento executado com diferentes pré-tensões σ_w(100,200,500kg/cm²) , considerando todos efeitos combinados. Nesta figura calculamos a tensão que a parede interna da bobina estará suportando, σ_θ=1924kg/cm² correspondendo a ε_θ = 0,09% < ε_{max} = 0,2% para o aço inox à 4.2K.

Para analisar o efeito da pré-tensão devemos comparar a figura anterior com a figura 7 onde plotamos o efeito da contração devido ao resfriamento + energização do campo magnético B_o. Notamos que todo o enrolamento está sob tração e a deformação a que o fio supercondutor está sujeito na região de alto campo chega a0,04%, comparado a0,02% na mesma região, porém compressivo quando enrolado com pré-tensão.

VI.5 - CONSTRUÇÃO DO MAGNETO SUPERCONDUTOR 6.5 T

Utilizando a bobina da figura 5 iniciamos os testes para enrolamento do magneto de laboratório com fio supercondutor de NbTi.

MECHANICAL PROPERTIES OF THE IMPUT DATA N= 1

YOUNG MODULUS

--SUPERCONDUCTOR EN= 0.1000E+12 STABILIZER EC= 0.1300E+12 INSULATER OR RAINFORCER ES= 0.1300E+12 (N/M**2)--

VOLUME FRACTION

--SUPERCONDUCTOR VN= 0.2600E+00 STABILIZER VC= 0.4910E+00 INSULATER OR RAINFORCER VS= 0.2390E+00 --

THERMAL EXPANSION FROM 300K TO 4.2K

--SUPERCONDUCTOR AN= -0.1480E-02 STABILIZER AC= -0.3380E-02 INSULATER OR RAINFORCER AS= -0.3380E-02 --

FRAME YOUNG MODULUS

--INNER FRAME BI= 0.1960E+12 OUTER FRAME BO= 0.1960E+12 (N/M**2)--

--FRAME THICKNESS TI= 0.2000E+00 FRAME THICKNESS TO= 0.0 (CM)--

RAINFORCED FRAME YOUNG MODULUS

--INNER FRAME BI= 0.1307E+11 OUTER FRAME BO= 0.0 (N/M**2)--

YOUNG MODULUS TOTAL

--HOOP DERECTION ES= 0.1209E+12 RADIUS DERECTION ER= 0.1217E+12 (N/M**2)--

THERMAL EXPANSION TOTAL

--HOOP DERECTION AS= -0.2971E-02 RADIUS DERECTION AR= -0.2852E-02 --

Tabela VI.2 - Tensão/Deformação devido Pré-Tensão durante Enrolamento

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 3.000 (CM) OUTER RADIOUS= 6.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 8.200 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.00 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI/BO= 0.1333E+06 0.0 (KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR/INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.8383E-16(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8440E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.2954E-16(KG/CM**2) --

MAGNET WINDING PROCEDURE WINDING TENSION SW= 500.00 0.0 (KG/CM**2)

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	-0.0300	-0.0216	-0.0167	-0.0132	-0.0105	-0.0082	-0.0063	-0.0045	-0.0029	-0.0014	-0.0000
0.41	-0.0300	-0.0216	-0.0167	-0.0132	-0.0105	-0.0082	-0.0063	-0.0045	-0.0029	-0.0014	-0.0000
0.82	-0.0300	-0.0216	-0.0167	-0.0132	-0.0105	-0.0082	-0.0063	-0.0045	-0.0029	-0.0014	-0.0000
1.23	-0.0300	-0.0216	-0.0167	-0.0132	-0.0105	-0.0082	-0.0063	-0.0045	-0.0029	-0.0014	-0.0000
1.64	-0.0300	-0.0216	-0.0167	-0.0132	-0.0105	-0.0082	-0.0063	-0.0045	-0.0029	-0.0014	-0.0000
2.05	-0.0300	-0.0216	-0.0167	-0.0132	-0.0105	-0.0082	-0.0063	-0.0045	-0.0029	-0.0014	-0.0000
2.46	-0.0300	-0.0216	-0.0167	-0.0132	-0.0105	-0.0082	-0.0063	-0.0045	-0.0029	-0.0014	-0.0000
2.87	-0.0300	-0.0216	-0.0167	-0.0132	-0.0105	-0.0082	-0.0063	-0.0045	-0.0029	-0.0014	-0.0000
3.28	-0.0300	-0.0216	-0.0167	-0.0132	-0.0105	-0.0082	-0.0063	-0.0045	-0.0029	-0.0014	-0.0000
3.69	-0.0300	-0.0216	-0.0167	-0.0132	-0.0105	-0.0082	-0.0063	-0.0045	-0.0029	-0.0014	-0.0000
4.10	-0.0300	-0.0216	-0.0167	-0.0132	-0.0105	-0.0082	-0.0063	-0.0045	-0.0029	-0.0014	-0.0000

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	-133.36	-171.28	-177.25	-167.57	-149.61	-127.24	-102.60	-76.94	-51.02	-25.29	-0.00
0.41	-133.36	-171.28	-177.25	-167.57	-149.61	-127.24	-102.60	-76.94	-51.02	-25.29	-0.00
0.82	-133.36	-171.28	-177.25	-167.57	-149.61	-127.24	-102.60	-76.94	-51.02	-25.29	-0.00
1.23	-133.36	-171.28	-177.25	-167.57	-149.61	-127.24	-102.60	-76.94	-51.02	-25.29	-0.00
1.64	-133.36	-171.28	-177.25	-167.57	-149.61	-127.24	-102.60	-76.94	-51.02	-25.29	-0.00
2.05	-133.36	-171.28	-177.25	-167.57	-149.61	-127.24	-102.60	-76.94	-51.02	-25.29	-0.00
2.46	-133.36	-171.28	-177.25	-167.57	-149.61	-127.24	-102.60	-76.94	-51.02	-25.29	-0.00
2.87	-133.36	-171.28	-177.25	-167.57	-149.61	-127.24	-102.60	-76.94	-51.02	-25.29	-0.00
3.28	-133.36	-171.28	-177.25	-167.57	-149.61	-127.24	-102.60	-76.94	-51.02	-25.29	-0.00
3.69	-133.36	-171.28	-177.25	-167.57	-149.61	-127.24	-102.60	-76.94	-51.02	-25.29	-0.00
4.10	-133.36	-171.28	-177.25	-167.57	-149.61	-127.24	-102.60	-76.94	-51.02	-25.29	-0.00

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	-780.58	-368.48	-134.69	23.09	139.16	229.38	302.31	363.09	414.96	460.09	500.00
0.41	-780.58	-368.48	-134.69	23.09	139.16	229.38	302.31	363.09	414.96	460.09	500.00
0.82	-780.58	-368.48	-134.69	23.09	139.16	229.38	302.31	363.09	414.96	460.09	500.00
1.23	-780.58	-368.48	-134.69	23.09	139.16	229.38	302.31	363.09	414.96	460.09	500.00
1.64	-780.58	-368.48	-134.69	23.09	139.16	229.38	302.31	363.09	414.96	460.09	500.00
2.05	-780.58	-368.48	-134.69	23.09	139.16	229.38	302.31	363.09	414.96	460.09	500.00
2.46	-780.58	-368.48	-134.69	23.09	139.16	229.38	302.31	363.09	414.96	460.09	500.00

Tabela VI.3 - Continuação Tabela VI.2

2.87	-780.58	-368.48	-134.69	23.09	139.16	229.38	302.31	363.09	414.96	460.09	500.00
3.28	-780.58	-368.48	-134.69	23.09	139.16	229.38	302.31	363.09	414.96	460.09	500.00
3.69	-780.58	-368.48	-134.69	23.09	139.16	229.38	302.31	363.09	414.96	460.09	500.00
4.10	-780.58	-368.48	-134.69	23.09	139.16	229.38	302.31	363.09	414.96	460.09	500.00

Tabela VI.4 - Tensão/Deformação Devido a Pré-Tensão Durante o Enrolamento (%)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

5

INNER RADIOUS= 3.000 (CM) OUTER RADIOUS= 6.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 8.200 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.00 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI/BO= 0.1333E+06 0.0 (KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR/INSULATER AND RAINFORCER
-- . 1/ES L= 0.8383E-16(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8440E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.2954E-16(KG/CM**2) --

MAGNET WINDING PROCEDURE WINDING TENSION SW= 500.00 0.0 (KG/CM**2)

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	0.0114	-0.0033	-0.0104	-0.0141	-0.0160	-0.0168	-0.0168	-0.0165	-0.0159	-0.0151	-0.0142
0.41	0.0114	-0.0033	-0.0104	-0.0141	-0.0160	-0.0168	-0.0168	-0.0165	-0.0159	-0.0151	-0.0142
0.82	0.0114	-0.0033	-0.0104	-0.0141	-0.0160	-0.0168	-0.0168	-0.0165	-0.0159	-0.0151	-0.0142
1.23	0.0114	-0.0033	-0.0104	-0.0141	-0.0160	-0.0168	-0.0168	-0.0165	-0.0159	-0.0151	-0.0142
1.64	0.0114	-0.0033	-0.0104	-0.0141	-0.0160	-0.0168	-0.0168	-0.0165	-0.0159	-0.0151	-0.0142
2.05	0.0114	-0.0033	-0.0104	-0.0141	-0.0160	-0.0168	-0.0168	-0.0165	-0.0159	-0.0151	-0.0142
2.46	0.0114	-0.0033	-0.0104	-0.0141	-0.0160	-0.0168	-0.0168	-0.0165	-0.0159	-0.0151	-0.0142
2.87	0.0114	-0.0033	-0.0104	-0.0141	-0.0160	-0.0168	-0.0168	-0.0165	-0.0159	-0.0151	-0.0142
3.28	0.0114	-0.0033	-0.0104	-0.0141	-0.0160	-0.0168	-0.0168	-0.0165	-0.0159	-0.0151	-0.0142
3.69	0.0114	-0.0033	-0.0104	-0.0141	-0.0160	-0.0168	-0.0168	-0.0165	-0.0159	-0.0151	-0.0142
4.10	0.0114	-0.0033	-0.0104	-0.0141	-0.0160	-0.0168	-0.0168	-0.0165	-0.0159	-0.0151	-0.0142

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	-0.0595	-0.0250	-0.0059	0.0066	0.0155	0.0222	0.0274	0.0316	0.0351	0.0380	0.0405
0.41	-0.0595	-0.0250	-0.0059	0.0066	0.0155	0.0222	0.0274	0.0316	0.0351	0.0380	0.0405
0.82	-0.0595	-0.0250	-0.0059	0.0066	0.0155	0.0222	0.0274	0.0316	0.0351	0.0380	0.0405
1.23	-0.0595	-0.0250	-0.0059	0.0066	0.0155	0.0222	0.0274	0.0316	0.0351	0.0380	0.0405
1.64	-0.0595	-0.0250	-0.0059	0.0066	0.0155	0.0222	0.0274	0.0316	0.0351	0.0380	0.0405
2.05	-0.0595	-0.0250	-0.0059	0.0066	0.0155	0.0222	0.0274	0.0316	0.0351	0.0380	0.0405
2.46	-0.0595	-0.0250	-0.0059	0.0066	0.0155	0.0222	0.0274	0.0316	0.0351	0.0380	0.0405
2.87	-0.0595	-0.0250	-0.0059	0.0066	0.0155	0.0222	0.0274	0.0316	0.0351	0.0380	0.0405
3.28	-0.0595	-0.0250	-0.0059	0.0066	0.0155	0.0222	0.0274	0.0316	0.0351	0.0380	0.0405
3.69	-0.0595	-0.0250	-0.0059	0.0066	0.0155	0.0222	0.0274	0.0316	0.0351	0.0380	0.0405
4.10	-0.0595	-0.0250	-0.0059	0.0066	0.0155	0.0222	0.0274	0.0316	0.0351	0.0380	0.0405

Tabela VII.1 - Tensão/Deformação Devido Resfriamento 300K para 4,2K

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 3.000 (CM) OUTER RADIOUS= 6.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 8.200 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.00 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI/BO= 0.1333E+06 0.0 (KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.8383E-16(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8440E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.2954E-16(KG/CM**2) --

MAGNET COOLING PROCEDURE--COOL DOWN FROM 300K TO 4.2K--

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	-0.0907	-0.0992	-0.1077	-0.1163	-0.1248	-0.1334	-0.1420	-0.1506	-0.1592	-0.1678	-0.1764
0.41	-0.0907	-0.0992	-0.1077	-0.1163	-0.1248	-0.1334	-0.1420	-0.1506	-0.1592	-0.1678	-0.1764
0.82	-0.0907	-0.0992	-0.1077	-0.1163	-0.1248	-0.1334	-0.1420	-0.1506	-0.1592	-0.1678	-0.1764
1.23	-0.0907	-0.0992	-0.1077	-0.1163	-0.1248	-0.1334	-0.1420	-0.1506	-0.1592	-0.1678	-0.1764
1.64	-0.0907	-0.0992	-0.1077	-0.1163	-0.1248	-0.1334	-0.1420	-0.1506	-0.1592	-0.1678	-0.1764
2.05	-0.0907	-0.0992	-0.1077	-0.1163	-0.1248	-0.1334	-0.1420	-0.1506	-0.1592	-0.1678	-0.1764
2.46	-0.0907	-0.0992	-0.1077	-0.1163	-0.1248	-0.1334	-0.1420	-0.1506	-0.1592	-0.1678	-0.1764
2.87	-0.0907	-0.0992	-0.1077	-0.1163	-0.1248	-0.1334	-0.1420	-0.1506	-0.1592	-0.1678	-0.1764
3.28	-0.0907	-0.0992	-0.1077	-0.1163	-0.1248	-0.1334	-0.1420	-0.1506	-0.1592	-0.1678	-0.1764
3.69	-0.0907	-0.0992	-0.1077	-0.1163	-0.1248	-0.1334	-0.1420	-0.1506	-0.1592	-0.1678	-0.1764
4.10	-0.0907	-0.0992	-0.1077	-0.1163	-0.1248	-0.1334	-0.1420	-0.1506	-0.1592	-0.1678	-0.1764

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	-0.02	-4.79	-7.37	-8.46	-8.55	-7.95	-6.86	-5.44	-3.77	-1.94	-0.01
0.41	-0.02	-4.79	-7.37	-8.46	-8.55	-7.95	-6.86	-5.44	-3.77	-1.94	-0.01
0.82	-0.02	-4.79	-7.37	-8.46	-8.55	-7.95	-6.86	-5.44	-3.77	-1.94	-0.01
1.23	-0.02	-4.79	-7.37	-8.46	-8.55	-7.95	-6.86	-5.44	-3.77	-1.94	-0.01
1.64	-0.02	-4.79	-7.37	-8.46	-8.55	-7.95	-6.86	-5.44	-3.77	-1.94	-0.01
2.05	-0.02	-4.79	-7.37	-8.46	-8.55	-7.95	-6.86	-5.44	-3.77	-1.94	-0.01
2.46	-0.02	-4.79	-7.37	-8.46	-8.55	-7.95	-6.86	-5.44	-3.77	-1.94	-0.01
2.87	-0.02	-4.79	-7.37	-8.46	-8.55	-7.95	-6.86	-5.44	-3.77	-1.94	-0.01
3.28	-0.02	-4.79	-7.37	-8.46	-8.55	-7.95	-6.86	-5.44	-3.77	-1.94	-0.01
3.69	-0.02	-4.79	-7.37	-8.46	-8.55	-7.95	-6.86	-5.44	-3.77	-1.94	-0.01
4.10	-0.02	-4.79	-7.37	-8.46	-8.55	-7.95	-6.86	-5.44	-3.77	-1.94	-0.01

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	-62.41	-43.60	-28.23	-15.35	-4.35	5.18	13.59	21.07	27.82	33.95	39.55
0.41	-62.41	-43.60	-28.23	-15.35	-4.35	5.18	13.59	21.07	27.82	33.95	39.55
0.82	-62.41	-43.60	-28.23	-15.35	-4.35	5.18	13.59	21.07	27.82	33.95	39.55
1.23	-62.41	-43.60	-28.23	-15.35	-4.35	5.18	13.59	21.07	27.82	33.95	39.55
1.64	-62.41	-43.60	-28.23	-15.35	-4.35	5.18	13.59	21.07	27.82	33.95	39.55
2.05	-62.41	-43.60	-28.23	-15.35	-4.35	5.18	13.59	21.07	27.82	33.95	39.55
2.46	-62.41	-43.60	-28.23	-15.35	-4.35	5.18	13.59	21.07	27.82	33.95	39.55

Tabela VII.2 - Continuação Tabela VII.1

											7
2.87	-62.41	-43.60	-28.23	-15.35	-4.35	5.18	13.59	21.07	27.82	33.95	39.55
3.28	-62.41	-43.60	-28.23	-15.35	-4.35	5.18	13.59	21.07	27.82	33.95	39.55
3.69	-62.41	-43.60	-28.23	-15.35	-4.35	5.18	13.59	21.07	27.82	33.95	39.55
4.10	-62.41	-43.60	-28.23	-15.35	-4.35	5.18	13.59	21.07	27.82	33.95	39.55

Tabela VII.3 - Tensão/Deformação devido Resfriamento (%)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 3.000 (CM) OUTER RADIOUS= 6.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 8.200 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.00 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.1333E+06 0.0 (KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER

-- 1/ES L= 0.8383E-16(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8440E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.2956E-16(KG/CM**2) **

MAGNET COOLING PROCEDURE--COOL DOWN FROM 300K TO 4.2K--

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	0.0018	0.0009	0.0002	-0.0002	-0.0006	-0.0008	-0.0009	-0.0010	-0.0011	-0.0011	-0.0011
0.41	0.0018	0.0009	0.0002	-0.0002	-0.0006	-0.0008	-0.0009	-0.0010	-0.0011	-0.0011	-0.0011
0.82	0.0018	0.0009	0.0002	-0.0002	-0.0006	-0.0008	-0.0009	-0.0010	-0.0011	-0.0011	-0.0011
1.23	0.0018	0.0009	0.0002	-0.0002	-0.0006	-0.0008	-0.0009	-0.0010	-0.0011	-0.0011	-0.0011
1.64	0.0018	0.0009	0.0002	-0.0002	-0.0006	-0.0008	-0.0009	-0.0010	-0.0011	-0.0011	-0.0011
2.05	0.0018	0.0009	0.0002	-0.0002	-0.0006	-0.0008	-0.0009	-0.0010	-0.0011	-0.0011	-0.0011
2.46	0.0018	0.0009	0.0002	-0.0002	-0.0006	-0.0008	-0.0009	-0.0010	-0.0011	-0.0011	-0.0011
2.87	0.0018	0.0009	0.0002	-0.0002	-0.0006	-0.0008	-0.0009	-0.0010	-0.0011	-0.0011	-0.0011
3.28	0.0018	0.0009	0.0002	-0.0002	-0.0006	-0.0008	-0.0009	-0.0010	-0.0011	-0.0011	-0.0011
3.69	0.0018	0.0009	0.0002	-0.0002	-0.0006	-0.0008	-0.0009	-0.0010	-0.0011	-0.0011	-0.0011
4.10	0.0018	0.0009	0.0002	-0.0002	-0.0006	-0.0008	-0.0009	-0.0010	-0.0011	-0.0011	-0.0011

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	-.20	4.50	-.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	-0.0051	-0.0034	-0.0021	-0.0010	-0.0001	0.0006	0.0013	0.0019	0.0024	0.0028	0.0032
0.41	-0.0051	-0.0034	-0.0021	-0.0010	-0.0001	0.0006	0.0013	0.0019	0.0024	0.0028	0.0032
0.82	-0.0051	-0.0034	-0.0021	-0.0010	-0.0001	0.0006	0.0013	0.0019	0.0024	0.0028	0.0032
1.23	-0.0051	-0.0034	-0.0021	-0.0010	-0.0001	0.0006	0.0013	0.0019	0.0024	0.0028	0.0032
1.64	-0.0051	-0.0034	-0.0021	-0.0010	-0.0001	0.0006	0.0013	0.0019	0.0024	0.0028	0.0032
2.05	-0.0051	-0.0034	-0.0021	-0.0010	-0.0001	0.0006	0.0013	0.0019	0.0024	0.0028	0.0032
2.46	-0.0051	-0.0034	-0.0021	-0.0010	-0.0001	0.0006	0.0013	0.0019	0.0024	0.0028	0.0032
2.87	-0.0051	-0.0034	-0.0021	-0.0010	-0.0001	0.0006	0.0013	0.0019	0.0024	0.0028	0.0032
3.28	-0.0051	-0.0034	-0.0021	-0.0010	-0.0001	0.0006	0.0013	0.0019	0.0024	0.0028	0.0032
3.69	-0.0051	-0.0034	-0.0021	-0.0010	-0.0001	0.0006	0.0013	0.0019	0.0024	0.0028	0.0032
4.10	-0.0051	-0.0034	-0.0021	-0.0010	-0.0001	0.0006	0.0013	0.0019	0.0024	0.0028	0.0032

Compressão -0,2%

Tabela VIII.1 - Tensão/Deformação Devido Energização

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 3.000 (CM) OUTER RADIOUS= 6.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 8.200 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.00 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI/BO= 0.1333E+06 0.0 (KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.8383E-16(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8440E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.2954E-16(KG/CM**2) --

STRESS DISTRIBUTION OF THE MAGNET (E-M FORCE)

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	0.0121	0.0117	0.0113	0.0110	0.0106	0.0103	0.0100	0.0097	0.0094	0.0092	0.0090
0.41	0.0121	0.0117	0.0113	0.0109	0.0106	0.0103	0.0100	0.0097	0.0094	0.0092	0.0090
0.82	0.0120	0.0116	0.0112	0.0109	0.0105	0.0102	0.0099	0.0096	0.0093	0.0091	0.0089
1.23	0.0118	0.0114	0.0110	0.0107	0.0104	0.0100	0.0097	0.0094	0.0092	0.0090	0.0088
1.64	0.0116	0.0112	0.0108	0.0105	0.0101	0.0098	0.0095	0.0092	0.0090	0.0088	0.0086
2.05	0.0112	0.0108	0.0105	0.0102	0.0098	0.0095	0.0092	0.0090	0.0087	0.0085	0.0083
2.46	0.0108	0.0104	0.0101	0.0098	0.0095	0.0092	0.0089	0.0086	0.0084	0.0082	0.0080
2.87	0.0103	0.0100	0.0096	0.0093	0.0090	0.0087	0.0085	0.0082	0.0080	0.0078	0.0077
3.28	0.0097	0.0094	0.0091	0.0088	0.0085	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0074	0.0072
3.69	0.0090	0.0087	0.0084	0.0081	0.0079	0.0076	0.0074	0.0072	0.0070	0.0069	0.0067
4.10	0.0081	0.0079	0.0076	0.0074	0.0072	0.0070	0.0068	0.0066	0.0064	0.0063	0.0062

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	-0.00	-8.41	-18.29	-27.56	-34.83	-39.20	-40.00	-36.78	-29.20	-17.00	-0.00
0.41	-0.00	-8.41	-18.27	-27.52	-34.78	-39.13	-39.93	-36.72	-29.14	-16.97	-0.00
0.82	-0.00	-8.40	-18.23	-27.43	-34.65	-38.97	-39.75	-36.54	-29.00	-16.88	-0.00
1.23	-0.00	-8.36	-18.11	-27.22	-34.36	-38.62	-39.38	-36.19	-28.72	-16.72	-0.00
1.64	-0.00	-8.30	-17.92	-26.89	-33.91	-38.09	-38.82	-35.66	-28.29	-16.46	-0.00
2.05	-0.00	-8.17	-17.61	-26.38	-33.23	-37.30	-37.99	-34.88	-27.66	-16.09	-0.00
2.46	-0.00	-7.93	-17.05	-25.53	-32.14	-36.07	-36.73	-33.72	-26.73	-15.55	-0.00
2.87	-0.00	-7.50	-16.16	-24.21	-30.50	-34.23	-34.87	-32.02	-25.39	-14.77	-0.00
3.28	-0.00	-6.74	-14.66	-22.08	-27.90	-31.40	-32.04	-29.46	-23.38	-13.61	-0.00
3.69	-0.00	-5.37	-12.06	-18.49	-23.64	-26.81	-27.52	-25.41	-20.24	-11.82	-0.00
4.10	-0.00	-2.28	-6.41	-10.93	-14.86	-17.54	-18.52	-17.47	-14.14	-8.36	-0.00

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	498.53	435.09	382.13	337.57	300.03	268.60	242.61	221.61	205.26	193.29	185.53
0.41	497.14	433.86	381.05	336.60	299.17	267.82	241.91	220.97	204.66	192.73	185.00
0.82	492.83	430.08	377.70	333.62	296.50	265.41	239.72	218.96	202.80	190.99	183.35
1.23	485.64	423.77	372.12	328.66	292.06	261.42	236.10	215.65	199.73	188.12	180.62
1.64	475.25	414.66	364.08	321.51	285.67	255.67	230.88	210.87	195.32	183.98	176.67
2.05	461.58	402.69	353.52	312.15	277.31	248.15	224.07	204.64	189.55	178.57	171.51

Tabela VIII.2 - Continuação da tabela VIII.1

										10	
2.87	423.72	369.66	324.52	286.54	254.56	227.80	205.69	187.86	174.01	163.92	157.44
3.28	398.79	348.03	305.66	270.01	239.98	214.84	194.05	177.25	164.17	154.60	148.40
3.69	369.58	322.89	283.93	251.15	223.52	200.34	181.12	165.51	153.26	144.18	138.13
4.10	335.09	293.77	259.37	230.42	205.94	185.29	168.00	153.73	142.26	133.40	127.02

Tabela VIII.3 - Tensão/Deformação Devido Energização

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 3.000 (CM) OUTER RADIOUS= 6.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 8.200 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.00 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.1333E+06 0.0 (KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.8383E-16(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8440E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.2954E-16(KG/CM**2) --

STRESS DISTRIBUTION OF THE MAGNET (E-M FORCE)

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	-0.0141	-0.0130	-0.0123	-0.0118	-0.0113	-0.0108	-0.0101	-0.0092	-0.0082	-0.0069	-0.0053
0.41	-0.0141	-0.0130	-0.0123	-0.0118	-0.0113	-0.0107	-0.0101	-0.0092	-0.0082	-0.0068	-0.0052
0.82	-0.0140	-0.0129	-0.0122	-0.0117	-0.0112	-0.0107	-0.0100	-0.0092	-0.0081	-0.0068	-0.0052
1.23	-0.0138	-0.0127	-0.0120	-0.0115	-0.0111	-0.0105	-0.0099	-0.0090	-0.0080	-0.0067	-0.0051
1.64	-0.0135	-0.0124	-0.0118	-0.0113	-0.0108	-0.0103	-0.0097	-0.0089	-0.0078	-0.0065	-0.0050
2.05	-0.0131	-0.0121	-0.0114	-0.0110	-0.0105	-0.0100	-0.0094	-0.0086	-0.0076	-0.0064	-0.0049
2.46	-0.0126	-0.0116	-0.0110	-0.0106	-0.0102	-0.0097	-0.0091	-0.0083	-0.0073	-0.0061	-0.0047
2.87	-0.0120	-0.0111	-0.0105	-0.0101	-0.0097	-0.0092	-0.0086	-0.0079	-0.0070	-0.0058	-0.0045
3.28	-0.0113	-0.0104	-0.0099	-0.0094	-0.0091	-0.0086	-0.0081	-0.0074	-0.0065	-0.0055	-0.0042
3.69	-0.0105	-0.0096	-0.0090	-0.0086	-0.0082	-0.0078	-0.0074	-0.0067	-0.0060	-0.0050	-0.0039
4.10	-0.0095	-0.0085	-0.0079	-0.0074	-0.0070	-0.0067	-0.0063	-0.0058	-0.0052	-0.0045	-0.0036

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	0.0404	0.0355	0.0315	0.0281	0.0253	0.0229	0.0208	0.0190	0.0175	0.0162	0.0150
0.41	0.0403	0.0354	0.0314	0.0281	0.0252	0.0228	0.0207	0.0190	0.0174	0.0161	0.0150
0.82	0.0399	0.0351	0.0311	0.0278	0.0250	0.0226	0.0206	0.0188	0.0173	0.0160	0.0149
1.23	0.0394	0.0346	0.0307	0.0274	0.0246	0.0223	0.0203	0.0185	0.0170	0.0157	0.0146
1.64	0.0385	0.0338	0.0300	0.0268	0.0241	0.0218	0.0198	0.0181	0.0166	0.0154	0.0143
2.05	0.0374	0.0329	0.0292	0.0261	0.0234	0.0212	0.0192	0.0176	0.0161	0.0149	0.0139
2.46	0.0360	0.0317	0.0281	0.0251	0.0226	0.0204	0.0185	0.0169	0.0156	0.0144	0.0134
2.87	0.0343	0.0302	0.0268	0.0239	0.0215	0.0194	0.0177	0.0161	0.0148	0.0137	0.0128
3.28	0.0323	0.0284	0.0252	0.0225	0.0202	0.0183	0.0166	0.0152	0.0140	0.0129	0.0120
3.69	0.0300	0.0263	0.0234	0.0209	0.0188	0.0170	0.0155	0.0141	0.0130	0.0120	0.0112

Tabela XI.1 - Tensão/Deformação Total

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 3.000 (CM) OUTER RADIOUS= 6.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 8.200 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.00 WINDING FRAME YOUNG MODULUS 81,80= 0.1333E+06 0.0 (KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.8383E-16(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8440E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.2954E-16(KG/CM**2) --

TOTAL OF THE MAGNET STRESS AND STRAIN DISTRIBUTION --WINDING,COOL DOWN,E-M FORCE--

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	-0.1085	-0.1091	-0.1131	-0.1185	-0.1247	-0.1314	-0.1383	-0.1454	-0.1527	-0.1600	-0.1673
0.41	-0.1086	-0.1091	-0.1131	-0.1186	-0.1247	-0.1314	-0.1383	-0.1455	-0.1527	-0.1600	-0.1674
0.82	-0.1087	-0.1092	-0.1132	-0.1186	-0.1248	-0.1315	-0.1384	-0.1456	-0.1528	-0.1601	-0.1674
1.23	-0.1089	-0.1094	-0.1134	-0.1188	-0.1250	-0.1316	-0.1386	-0.1457	-0.1529	-0.1602	-0.1676
1.64	-0.1091	-0.1096	-0.1136	-0.1190	-0.1252	-0.1319	-0.1388	-0.1459	-0.1531	-0.1604	-0.1678
2.05	-0.1094	-0.1100	-0.1139	-0.1193	-0.1255	-0.1321	-0.1391	-0.1462	-0.1534	-0.1607	-0.1680
2.46	-0.1099	-0.1104	-0.1143	-0.1197	-0.1259	-0.1325	-0.1394	-0.1465	-0.1537	-0.1610	-0.1683
2.87	-0.1104	-0.1108	-0.1148	-0.1202	-0.1263	-0.1329	-0.1398	-0.1469	-0.1541	-0.1614	-0.1687
3.28	-0.1110	-0.1114	-0.1154	-0.1207	-0.1268	-0.1334	-0.1403	-0.1474	-0.1546	-0.1618	-0.1691
3.69	-0.1117	-0.1121	-0.1160	-0.1214	-0.1275	-0.1340	-0.1409	-0.1479	-0.1551	-0.1624	-0.1696
4.10	-0.1125	-0.1129	-0.1168	-0.1221	-0.1282	-0.1347	-0.1415	-0.1485	-0.1557	-0.1629	-0.1702

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	-133.38	-184.49	-202.91	-203.58	-192.99	-174.39	-149.46	-119.16	-84.00	-44.23	-0.01
0.41	-133.38	-184.48	-202.89	-203.54	-192.94	-174.33	-149.39	-119.10	-83.94	-44.20	-0.01
0.82	-133.38	-184.48	-202.85	-203.45	-192.81	-174.16	-149.21	-118.92	-83.80	-44.11	-0.01
1.23	-133.38	-184.44	-202.73	-203.24	-192.52	-173.82	-148.84	-118.57	-83.51	-43.94	-0.01
1.64	-133.38	-184.37	-202.54	-202.92	-192.07	-173.29	-148.28	-118.04	-83.08	-43.69	-0.01
2.05	-133.38	-184.25	-202.23	-202.40	-191.39	-172.49	-147.45	-117.27	-82.46	-43.32	-0.01
2.46	-133.38	-184.01	-201.67	-201.55	-190.30	-171.26	-146.19	-116.10	-81.53	-42.78	-0.01
2.87	-133.38	-183.55	-200.78	-200.23	-188.66	-169.43	-144.33	-114.40	-80.19	-42.00	-0.01
3.28	-133.38	-182.82	-199.28	-198.10	-186.07	-166.59	-141.50	-111.84	-78.18	-40.84	-0.01
3.69	-133.38	-181.45	-196.65	-194.51	-181.80	-162.00	-136.98	-107.80	-75.04	-39.05	-0.01
4.10	-133.38	-178.36	-191.03	-186.95	-173.02	-152.74	-127.98	-99.85	-68.94	-35.59	-0.01

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	-344.46	23.02	219.21	345.31	434.84	503.16	558.52	605.78	648.33	687.33	725.08
0.41	-345.86	21.79	218.12	344.35	433.98	502.38	557.81	605.13	647.63	686.77	724.55
0.82	-350.17	18.00	214.77	341.36	431.31	499.96	555.62	603.12	645.58	685.03	722.90
1.23	-357.35	11.70	209.20	336.41	426.87	495.97	552.00	599.81	642.51	682.16	720.17
1.64	-367.74	2.59	201.15	329.26	420.48	490.22	546.78	595.03	638.09	678.02	716.23
2.05	-381.41	-9.38	190.60	319.69	412.12	482.71	539.97	588.80	632.33	672.61	711.07
2.46	-398.40	-24.22	177.55	306.35	401.85	473.50	531.63	581.20	625.28	665.98	704.72

Tabela IX.2 - Continuação da Tabela IX.1

											13
											697.0
2.87	-419.28	-42.42	161.80	294.29	389.37	462.35	521.80	572.02	616.78	657.96	687.9
3.28	-444.21	-64.04	142.74	277.75	374.79	449.39	509.95	561.41	606.94	648.84	677.6
3.69	-473.41	-89.19	121.01	258.90	358.33	434.89	497.02	549.67	596.04	638.22	666.5
4.10	-507.90	-118.31	96.44	238.16	340.75	419.84	483.90	537.89	585.03	627.44	

Tabela IX.3 - Tensão/Deformação Total (%)

T

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 3.000 (CM) OUTER RADIOUS= 6.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 8.200 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.00 WINDING FRAME YOUNG MODULUS B1,B0= 0.1333E+06 0.0 (KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.8383E-16(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8440E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.2954E-16(KG/CM**2) --

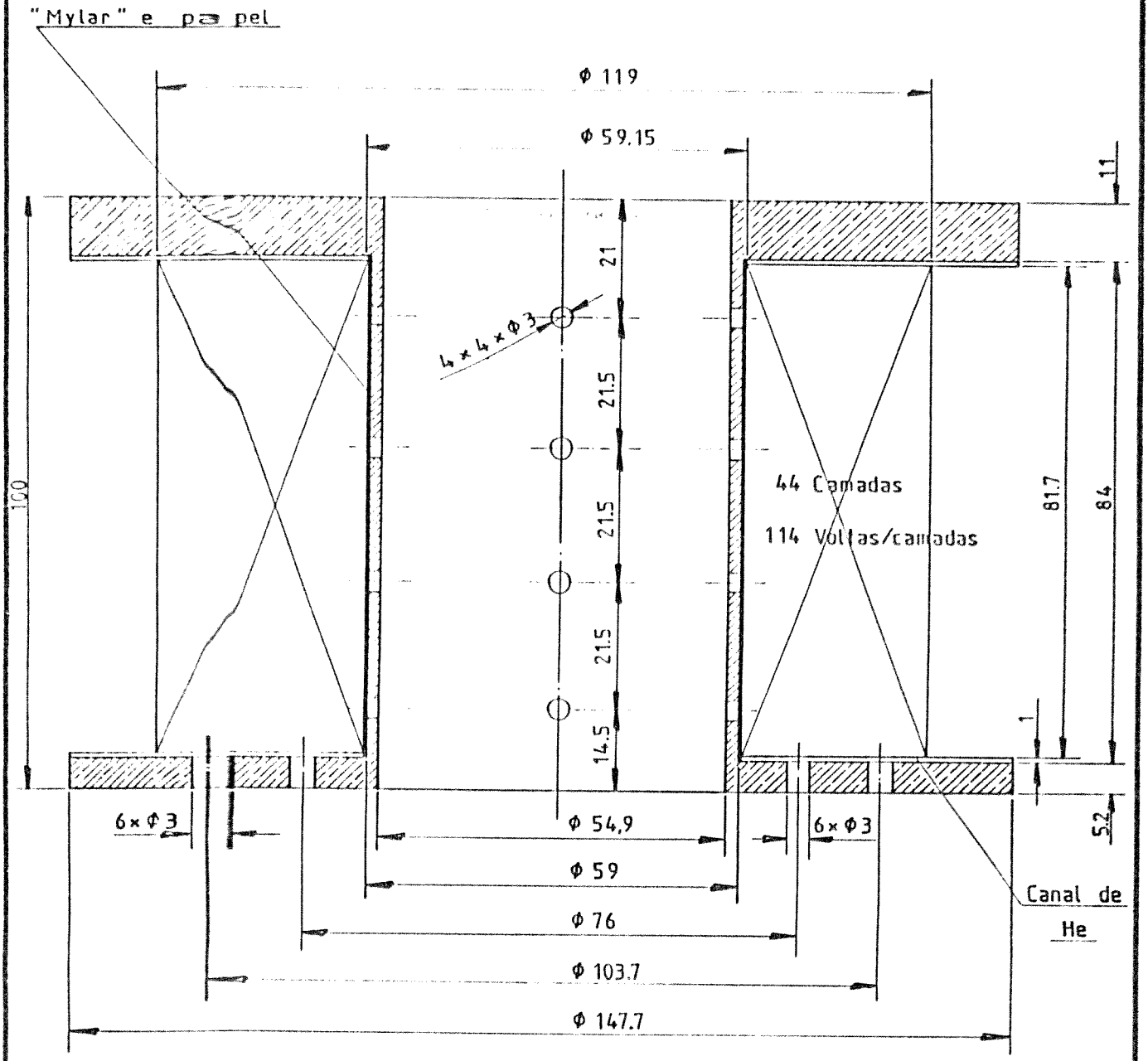
TOTAL OF THE MAGNET STRESS AND STRAIN DISTRIBUTION --WINDING,COOL DOWN,E-M FORCE--

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	-0.0010	-0.0155	-0.0226	-0.0262	-0.0279	-0.0283	-0.0279	-0.0268	-0.0251	-0.0231	-0.0206
0.41	-0.0009	-0.0155	-0.0225	-0.0262	-0.0278	-0.0283	-0.0279	-0.0268	-0.0251	-0.0230	-0.0206
0.82	-0.0008	-0.0154	-0.0224	-0.0261	-0.0278	-0.0282	-0.0278	-0.0267	-0.0251	-0.0230	-0.0205
1.23	-0.0006	-0.0152	-0.0223	-0.0259	-0.0276	-0.0281	-0.0276	-0.0266	-0.0250	-0.0229	-0.0204
1.64	-0.0003	-0.0149	-0.0220	-0.0257	-0.0274	-0.0279	-0.0275	-0.0264	-0.0248	-0.0228	-0.0203
2.05	0.0001	-0.0146	-0.0217	-0.0254	-0.0271	-0.0276	-0.0272	-0.0261	-0.0246	-0.0226	-0.0202
2.46	0.0006	-0.0141	-0.0213	-0.0250	-0.0267	-0.0272	-0.0269	-0.0258	-0.0243	-0.0223	-0.0200
2.87	0.0012	-0.0136	-0.0207	-0.0245	-0.0262	-0.0268	-0.0264	-0.0254	-0.0240	-0.0220	-0.0198
3.28	0.0019	-0.0129	-0.0201	-0.0238	-0.0256	-0.0262	-0.0259	-0.0249	-0.0235	-0.0217	-0.0195
3.69	0.0027	-0.0121	-0.0193	-0.0230	-0.0248	-0.0254	-0.0251	-0.0243	-0.0230	-0.0213	-0.0192
4.10	0.0037	-0.0110	-0.0181	-0.0218	-0.0236	-0.0242	-0.0240	-0.0233	-0.0221	-0.0207	-0.0189

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	3.00	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.00
0.0	-0.0241	0.0071	0.0235	0.0338	0.0407	0.0457	0.0495	0.0525	0.0549	0.0570	0.0588
0.41	-0.0243	0.0070	0.0234	0.0337	0.0407	0.0457	0.0495	0.0524	0.0549	0.0569	0.0587
0.82	-0.0246	0.0067	0.0232	0.0334	0.0404	0.0455	0.0493	0.0523	0.0547	0.0568	0.0586
1.23	-0.0252	0.0062	0.0227	0.0330	0.0401	0.0451	0.0490	0.0520	0.0545	0.0565	0.0584
1.64	-0.0260	0.0054	0.0221	0.0324	0.0395	0.0447	0.0485	0.0516	0.0541	0.0562	0.0581
2.05	-0.0271	0.0045	0.0212	0.0317	0.0388	0.0440	0.0480	0.0511	0.0536	0.0557	0.0576
2.46	-0.0285	0.0033	0.0201	0.0307	0.0380	0.0432	0.0472	0.0504	0.0530	0.0552	0.0571
2.87	-0.0302	0.0018	0.0188	0.0295	0.0369	0.0423	0.0466	0.0496	0.0523	0.0545	0.0565
3.28	-0.0322	-0.0000	0.0172	0.0281	0.0357	0.0412	0.0454	0.0487	0.0514	0.0537	0.0558
3.69	-0.0346	-0.0021	0.0154	0.0265	0.0342	0.0398	0.0442	0.0476	0.0504	0.0528	0.0549
4.10	-0.0374	-0.0045	0.0132	0.0246	0.0325	0.0384	0.0429	0.0464	0.0494	0.0519	0.0540



MATERIAL : AÇO INOX

Fig. 5

DESENHO FINAL - MAGNETO SOLENÓIDE

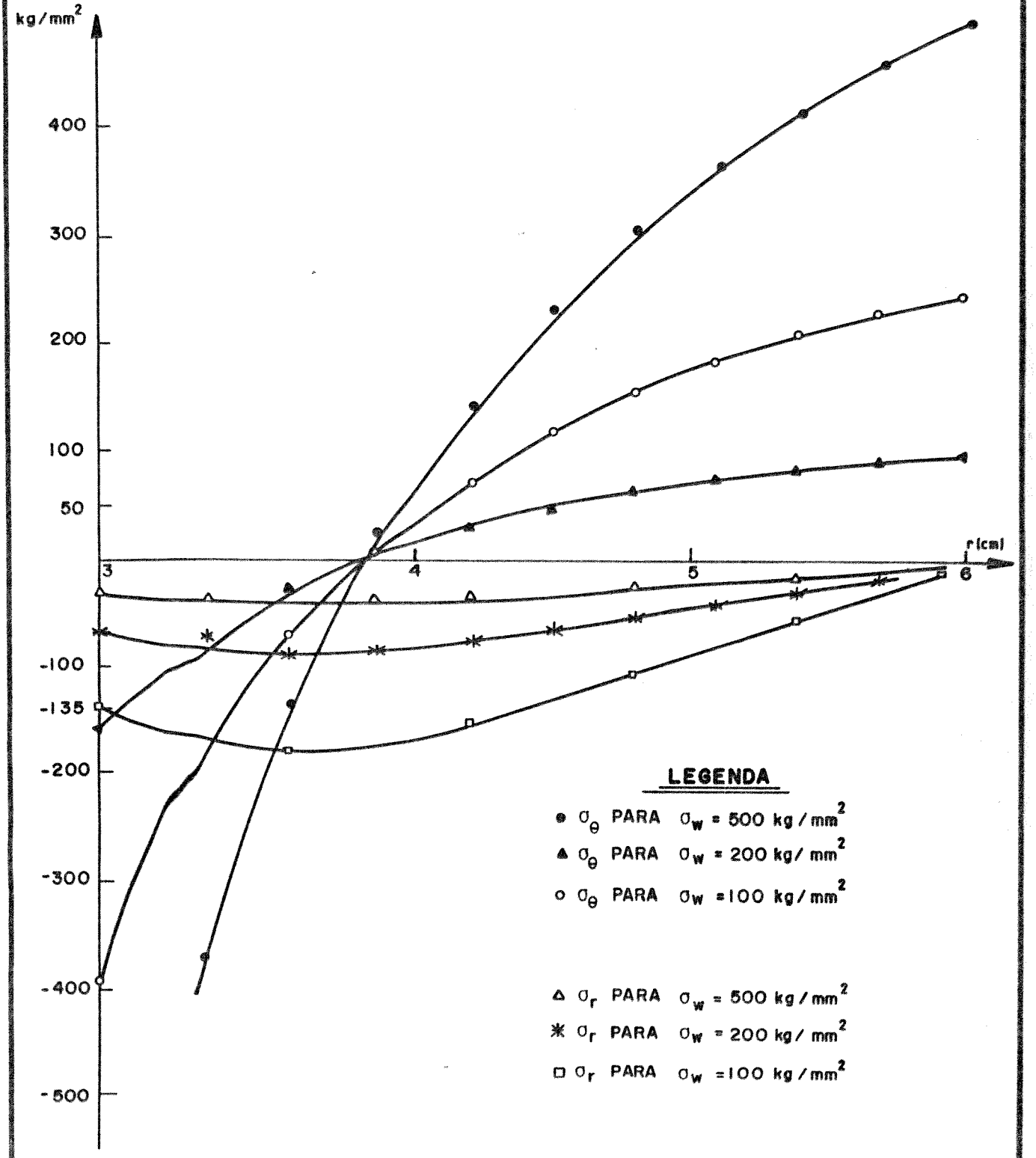


FIG. 6 - VARIAÇÃO DE σ_θ E σ_r PARA DIFERENTE σ_w

papel tecnico Romilec

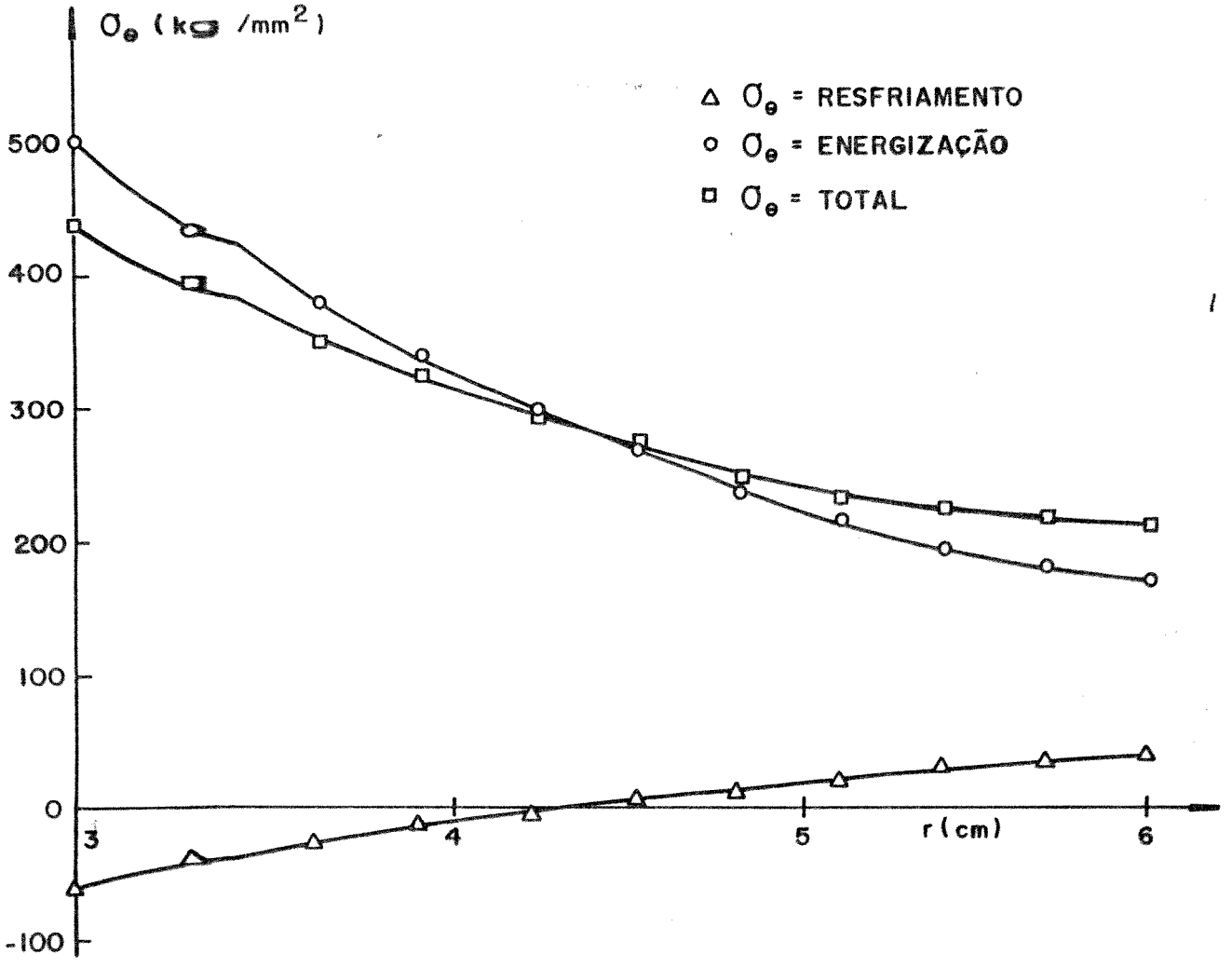


FIG. 7 - σ_θ PARA RESFRIAMENTO, ENERGIZAÇÃO E TOTAL

papel tecnico Romilec

Para testes iniciais de velocidade de enrolamento, pré-tensão, alimentação e medida de empacotamento foi utilizado fio de cobre esmaltado de diâmetro equivalente ao supercondutor. Devido a dificuldade de se acompanhar a olho nú a acomodação das espiras,bem como evitar movimentação das mesmas durante o enrolamento, colocamos folhas de papel vegetal de 10 μm de espessura, perfuradas para permitir a passagem do hélio entre as camadas /3/.

Após os ajustes iniciamos o enrolamento com uma pré-tensão de 250kg/cm^2 , que equivale a uma carga de 0,975kg /4/.

No término de cada camada, para evitar desmoronamento do enrolamento nas bordas, foi colocado nos espaços vazios pedaços de fios de cobre esmaltados de forma a completar a camada. Deste modo evita-se movimentação durante a energização.

As figuras 8 e 9 mostram o trabalho executado durante o enrolamento. Notar que, devido à máquina utilizada para o enrolamento ser universal, há a necessidade de se acompanhar cada espira, pressionando-a no sentido de mantê-la encostada na anterior. Este trabalho foi executado com um bastão de celerom /5,6/.

Devido ao empacotamento real ser superior ao calculado,após 45 camadas o número médio de espiras por camada foi de 113,84 que comparado aos 111 calculado representam um acréscimo de 25%. Com este acréscimo não foi possível terminar a 46ª camada totalmente , consequentemente o enrolamento foi finalizado com 45 3/4 camadas com 5.215 espiras , 2,13% a mais do que o teórico.

O circuito de proteção foi montado com um resistor paralelo de $R_D = 0,5\Omega$. Neste caso a tensão máxima durante o "quench" ficou limitada a $V_{máx} \simeq R_D I_c \simeq 80V$.

As medidas do campo magnético foram executadas primeiramente a temperatura ambiente, utilizando um "Gaussmeter", onde B_o=553 G/A.

O magneto foi resfriado a 4,2K e iniciamos o processo de treinamento, onde a corrente foi elevada até a indução do "quench".

Esta variação foi devido à diferença no comprimento interno da bobina após a colagem dos calços laterais , que por serem setorizados fizeram com que a distância 2b = 80mm não fosse mantida constante.

O valor do campo magnético é proporcional ao quadrado do

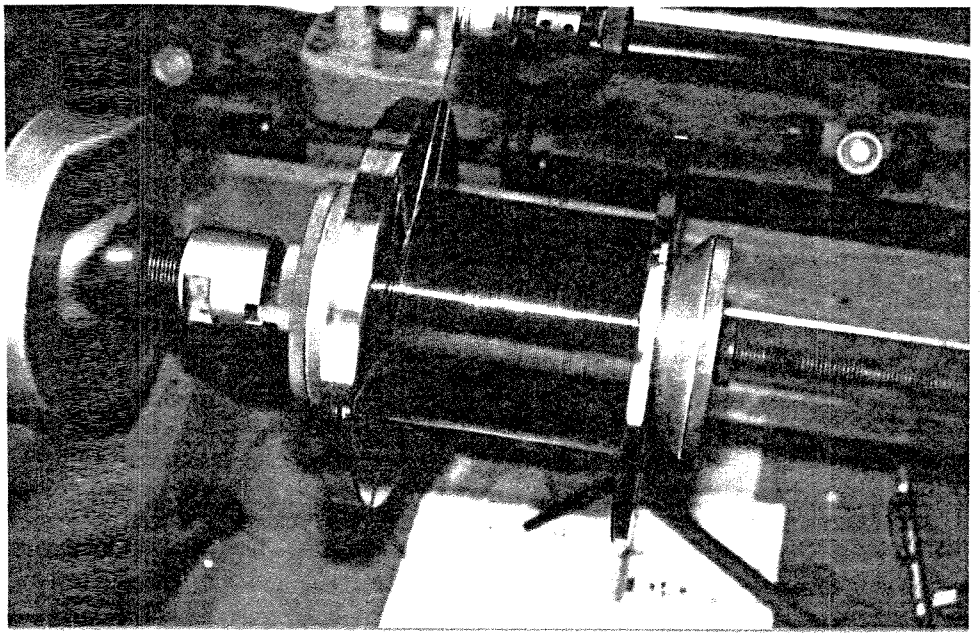


Fig. 8

Camada intermediária durante o enrolamento

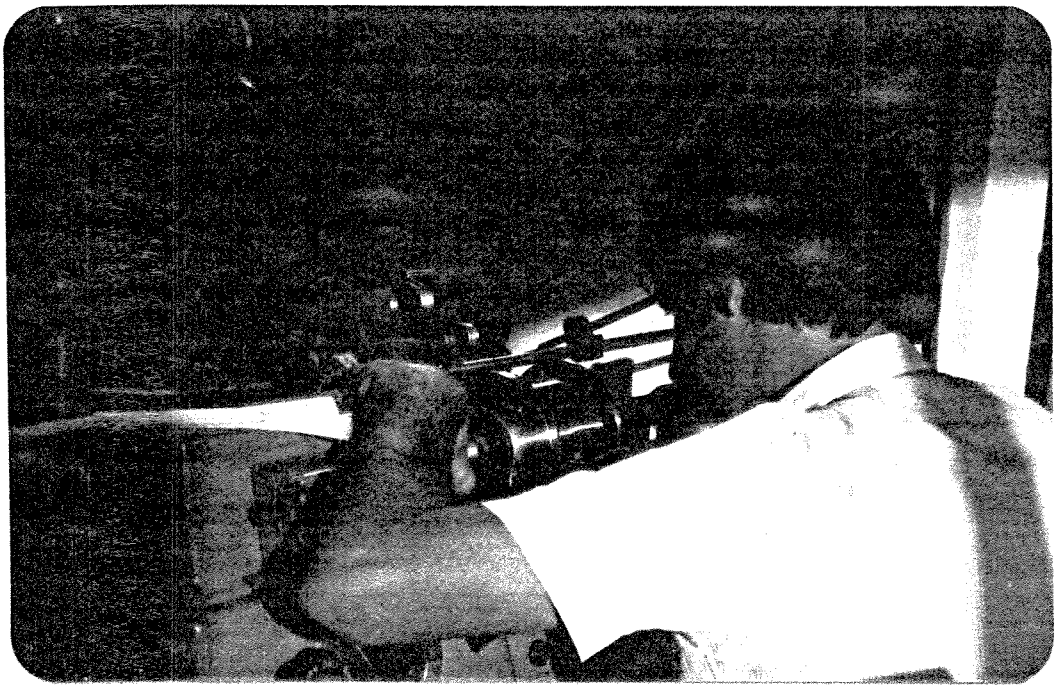


Fig. 9

Executando calço lateral após término da camada

número de espiras, conseqüentemente B_o aumentou de 4% ou seja B_o=6,78T.

Devido a esta variação bem como pequenas variações nos diâmetros interno e externo foi executado um novo mapeamento que está nas tabelas X e XI, mostrando B_o = 541 G/A.

Após o término do enrolamento foi colocado uma camada detecido de algodão e sobre esta foram enroladas duas camadas de fio de cobre Ø 0,8mm para proteger a camada externa do fio supercondutor de impactos durante sua montagem e utilização.

Os terminais de corrente foram executados com a soldagem direta do fio supercondutor em uma placa de cobre e esta posteriormente soldada ao alimentador de corrente.

VI.6 - TESTES E MEDIDAS

O magneto foi fixado a um suporte existente, conforme figura 10.. Para acompanhar seu resfriamento e temperatura após o "quench", foram colocados dois resistores de carbono, um no topo e outro na base.

Inicialmente medimos a resistência do enrolamento na temperatura ambiente $R_{(300K)}$= 116,5Ω. Agora utilizando o valor de RRR fornecido pelo fabricante podemos calcular a resistência R_c caso todo magneto entre em "quench" /7/.

$$R_c = \frac{R_{(300K)}}{RRR} = 0,987\Omega \qquad \text{(VI.10)}$$

As figuras 11.I à 11.VII mostram o carregamento do magneto com diferentes velocidades $(\frac{di}{dt})$ e verificamos o crescimentode I_c, até o valor máximo de I_c= 130A. Neste momento B_o=7.098T e $B_{máx}$= 7,46(T) o que coincide exatamente com o ponto da "linha de carga" da figura 2.

Podemos calcular o valor da indutância em função da tensão medida nos terminais durante o carregamento do magneto como:

Tabela X - Mapeamento do Campo Magnético na Região Central

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COIL T COIL NO.=

INNER RADIUS= 2.990 (CM) OUTER RADIUS= 6.150 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 4.080 (CM)

AXIAL PARTITION= 0.068 (CM) RADIOUS PARTITION= 0.0745 (CM)

RADIOUS FIELD HP (G/A)

(CM)	0.00	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	2.10	2.40	2.70	2.99
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.41	0.000	1.402	2.798	4.192	5.546	6.879	8.169	9.398	10.548	11.598	12.498
0.82	0.000	2.817	5.624	8.411	11.164	13.862	16.479	18.982	21.332	23.485	25.334
1.23	0.000	4.253	8.497	12.722	16.909	21.037	25.054	28.923	32.578	35.945	38.852
1.64	0.000	5.708	11.414	17.115	22.797	28.431	33.972	39.353	44.464	49.253	53.403
2.05	0.000	7.161	14.338	21.544	28.778	36.023	43.234	50.330	57.192	63.656	69.344
2.46	0.000	8.568	17.182	25.884	34.701	43.646	52.692	61.767	70.724	79.332	87.030
2.87	0.000	9.858	19.801	29.914	40.273	50.945	61.965	73.312	84.858	96.302	106.795
3.28	0.000	10.933	21.995	33.318	45.043	57.319	70.300	84.121	98.828	114.189	128.903
3.69	0.000	11.691	23.544	35.734	48.456	61.969	76.515	92.558	110.630	131.344	153.441
4.10	0.000	12.050	24.274	36.860	50.025	64.044	79.287	96.313	116.084	140.674	177.071

AXIAL FIELD HZ (G/A)

(CM)	0.00	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	2.10	2.40	2.70	2.99
0.00	529.127	529.640	531.174	533.724	537.277	541.814	547.307	553.718	560.997	569.026	577.565
0.41	527.212	527.727	529.269	531.833	535.409	539.979	545.518	551.989	559.346	567.471	576.121
0.82	521.448	521.970	523.533	526.136	529.774	534.436	540.105	546.753	554.339	562.751	571.734
1.23	511.788	512.317	513.907	516.560	520.282	525.075	530.937	537.857	545.807	554.687	564.225
1.64	498.177	498.710	500.315	503.004	506.798	511.721	517.796	525.041	533.457	542.966	553.278
2.05	480.590	481.116	482.703	485.376	489.176	494.159	500.391	507.937	516.853	527.106	538.397
2.46	459.091	459.588	461.094	463.646	467.311	472.184	478.389	486.073	495.388	506.400	518.836
2.87	433.901	434.339	435.668	437.936	441.231	445.655	451.489	458.903	468.251	479.815	493.461
3.28	405.475	405.815	406.850	408.628	411.234	414.814	419.597	425.945	434.424	445.781	460.422
3.69	374.540	374.747	375.377	376.459	378.047	380.237	383.197	387.235	392.975	401.766	416.104
4.10	342.075	342.129	342.267	342.549	342.907	343.352	343.870	344.435	344.996	345.377	343.273

TOTAL FIELD (G/A)

(CM)	0.00	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	2.10	2.40	2.70	2.99
0.00	529.127	529.640	531.174	533.724	537.277	541.814	547.307	553.718	560.997	569.026	577.565
0.41	527.212	527.729	529.276	531.850	535.438	540.023	545.579	552.069	559.446	567.590	576.257
0.82	521.448	521.977	523.563	526.203	529.892	534.616	540.357	547.083	554.750	563.241	572.295
1.23	511.788	512.335	513.977	516.717	520.556	525.496	531.528	538.634	546.779	555.851	565.561
1.64	498.177	498.743	500.445	503.295	507.311	512.510	518.909	526.513	535.309	545.195	555.849
2.05	480.590	481.169	482.916	485.854	490.022	495.471	502.255	510.424	520.008	530.935	542.844
2.46	459.091	459.668	461.414	464.368	468.598	474.147	481.283	489.982	500.411	512.576	526.085
2.87	433.901	434.451	436.118	438.957	443.065	448.587	455.722	464.722	475.878	489.384	504.885
3.28	405.475	405.963	407.445	409.984	413.694	418.755	425.445	434.172	445.524	460.173	478.126
3.69	374.540	374.929	376.115	378.151	381.140	385.251	390.762	398.143	408.250	422.690	443.493
4.10	342.075	342.341	343.147	344.526	346.536	349.274	352.892	357.647	364.003	372.927	386.252

Tabela XI - Mapeamento do Campo Magnético no Enrolamento

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COIL T COIL NO.=

INNER RADIUS= 2.990 (CM) OUTER RADIUS= 5.150 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 4.080 (CM)

AXIAL PARTITION= 0.068 (CM) RADIUS PARTITION= 0.0745 (CM)

RADIUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	2.99	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.15
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.41	12.498	13.313	13.938	14.389	14.655	14.735	14.632	14.357	13.928	13.367	12.333
0.82	25.334	27.013	28.303	29.237	29.779	29.938	29.717	29.139	28.239	27.064	24.910
1.23	38.852	41.501	43.542	45.011	45.872	46.112	45.742	44.798	43.339	41.442	37.981
1.64	53.403	57.206	60.147	62.255	63.501	63.830	63.265	61.956	59.692	56.890	51.811
2.05	69.344	74.601	78.686	81.634	83.346	83.783	82.960	80.944	77.856	73.868	66.681
2.46	87.030	94.226	99.846	103.902	106.251	106.840	105.687	102.773	98.551	92.956	82.900
2.87	106.795	116.735	124.510	130.087	133.298	134.111	132.559	128.728	122.766	114.947	100.805
3.28	128.903	143.056	153.949	161.559	165.862	166.972	164.991	159.969	151.944	141.067	120.750
3.69	153.441	174.996	190.234	200.140	205.550	206.992	204.698	198.669	188.588	174.028	143.329
4.10	177.071	212.525	230.607	241.425	247.074	248.396	245.703	238.931	227.626	210.591	164.395

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	2.99	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.15
0.00	577.565	509.851	444.927	380.354	316.038	251.847	187.646	123.318	58.789	-6.210	-104.495
0.41	576.121	508.544	443.768	379.355	315.207	251.186	187.152	122.983	58.600	-6.270	-104.398
0.82	571.734	504.570	440.245	376.321	312.685	249.186	185.666	121.986	58.050	-6.423	-104.074
1.23	564.225	497.763	434.210	371.132	308.388	245.799	183.176	120.349	57.196	-6.590	-103.421
1.64	553.278	487.822	425.398	363.571	302.158	240.934	179.659	118.118	56.140	-6.620	-102.252
2.05	538.397	474.273	413.389	353.299	293.750	234.448	175.082	115.362	55.049	-6.268	-100.258
2.46	518.836	456.390	397.554	339.805	282.797	226.125	169.384	112.184	54.182	-5.142	-96.942
2.87	493.461	433.115	376.969	322.375	268.783	215.646	162.449	108.698	53.910	-2.625	-91.489
3.28	460.422	402.723	350.321	300.061	251.034	202.545	154.027	104.942	54.685	2.247	-82.451
3.69	416.104	362.419	315.982	271.874	228.819	186.140	143.570	100.577	56.708	10.817	-66.627
4.10	343.273	305.875	273.227	237.428	201.608	165.802	130.025	94.294	58.656	23.105	-26.317

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	2.99	3.30	3.60	3.90	4.20	4.50	4.80	5.10	5.40	5.70	6.15
0.00	577.565	509.851	444.927	380.354	316.038	251.847	187.646	123.318	58.789	6.210	104.495
0.41	576.257	508.718	443.987	379.555	315.547	251.618	187.723	123.819	60.232	14.764	105.124
0.82	572.295	505.293	441.154	377.455	314.100	250.978	188.029	125.418	64.554	27.816	107.013
1.23	565.561	499.490	436.388	373.951	311.781	250.087	188.801	128.417	71.761	41.962	110.175
1.64	555.849	491.165	429.629	368.864	308.759	249.245	190.473	133.334	81.944	57.274	114.629
2.05	542.844	480.104	420.812	362.205	305.345	248.969	193.742	140.927	95.352	74.133	120.407
2.46	526.085	466.024	409.901	355.338	302.098	250.095	199.651	152.211	112.464	93.098	127.554
2.87	504.885	448.571	396.990	347.033	300.021	253.946	209.670	168.482	134.081	114.977	136.132
3.28	478.126	427.376	382.655	340.796	300.479	262.496	225.713	191.319	161.486	141.085	146.214
3.69	443.493	402.456	368.827	337.547	307.586	278.411	250.028	222.659	196.930	174.364	158.058
4.10	386.252	374.927	357.537	338.013	318.891	298.649	277.986	256.865	235.062	211.854	166.488

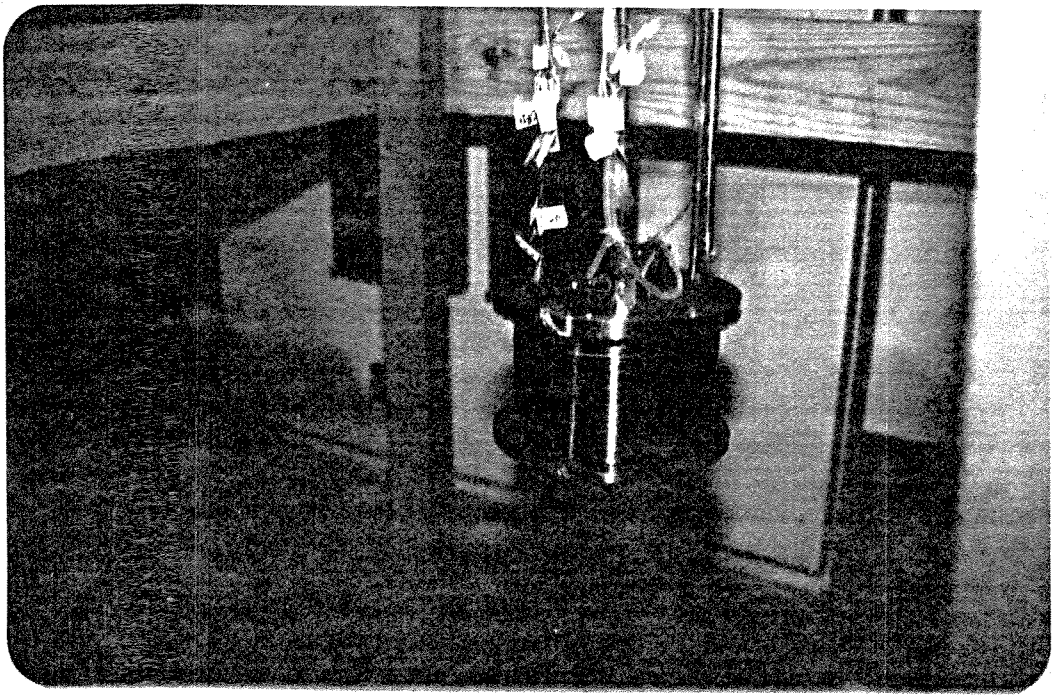


Fig. 10

Magneto supercondutor montado para testes de energização em hélio líquido (4,2K)

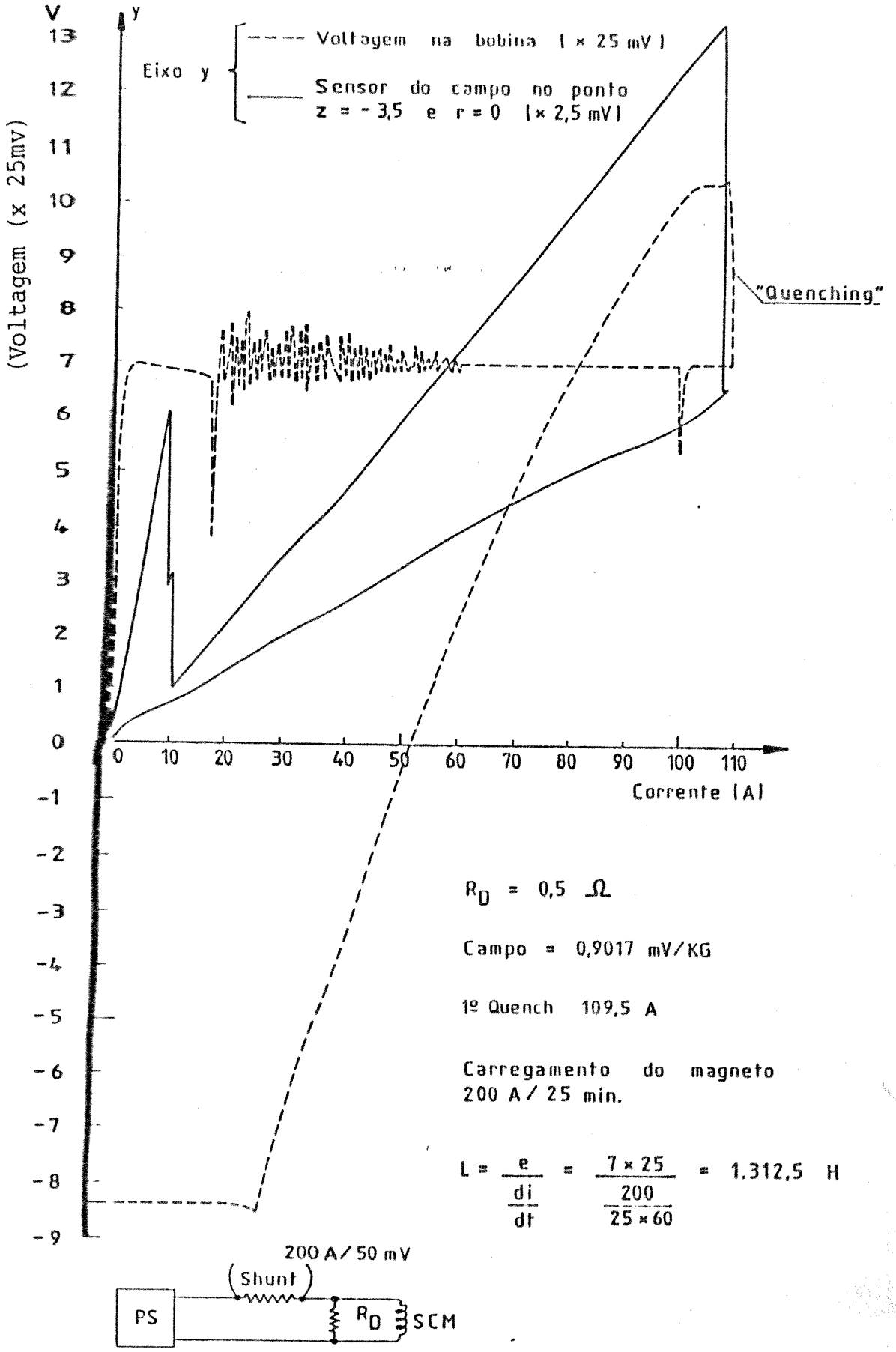


FIG. 11.I - 1º CARREGAMENTO DO MAGNETO

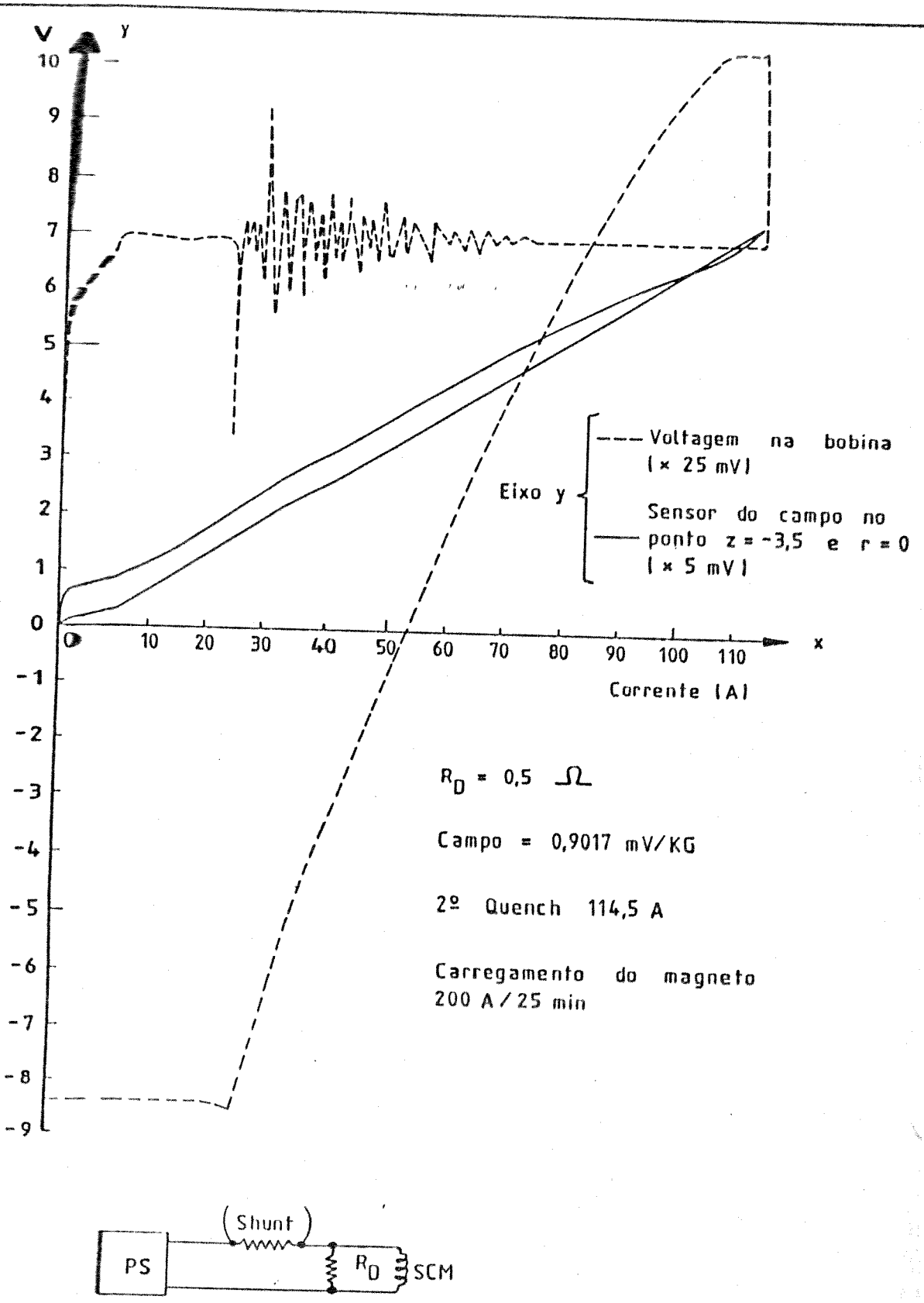


FIG. 11.II - 2º CARREGAMENTO DO MAGNETO

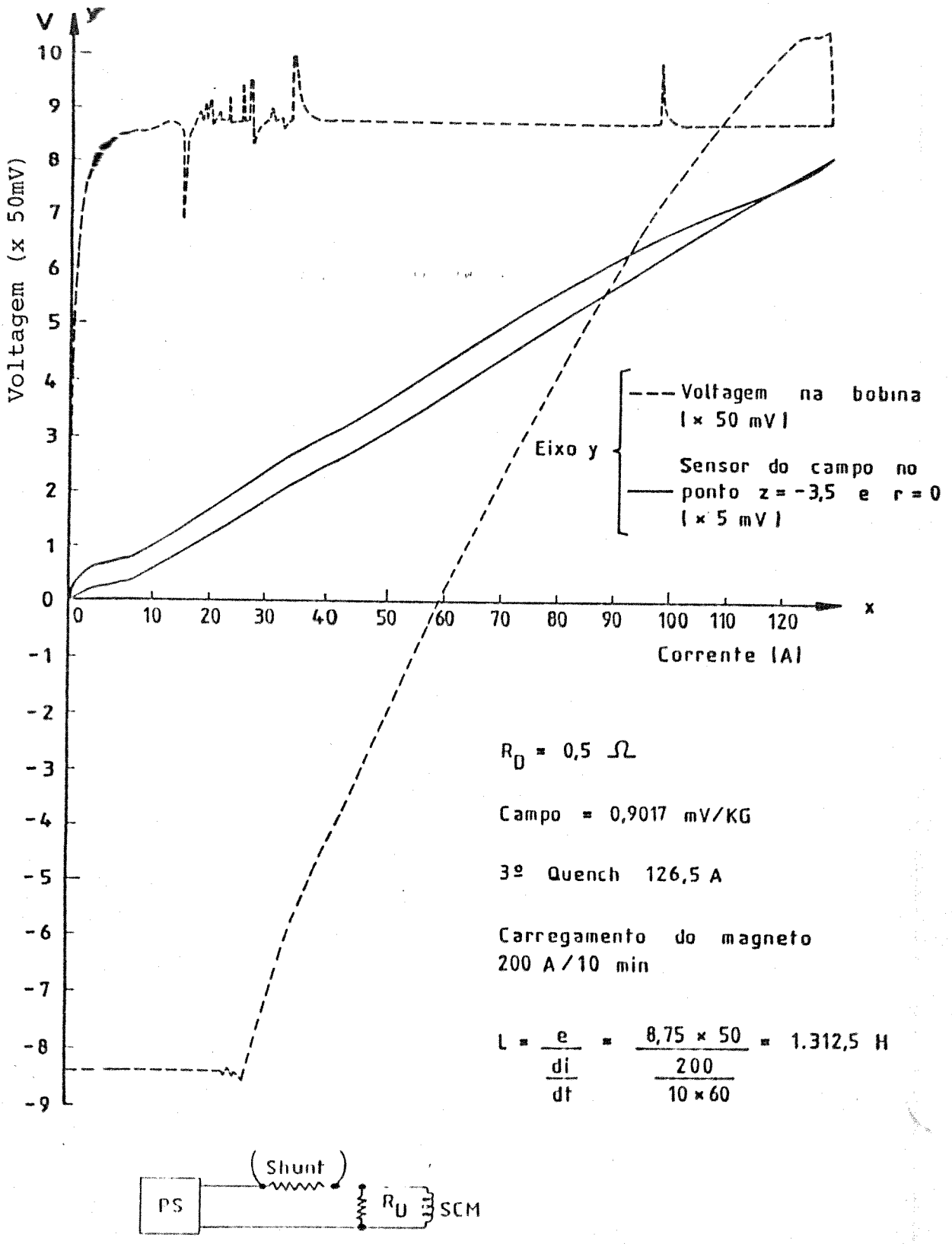
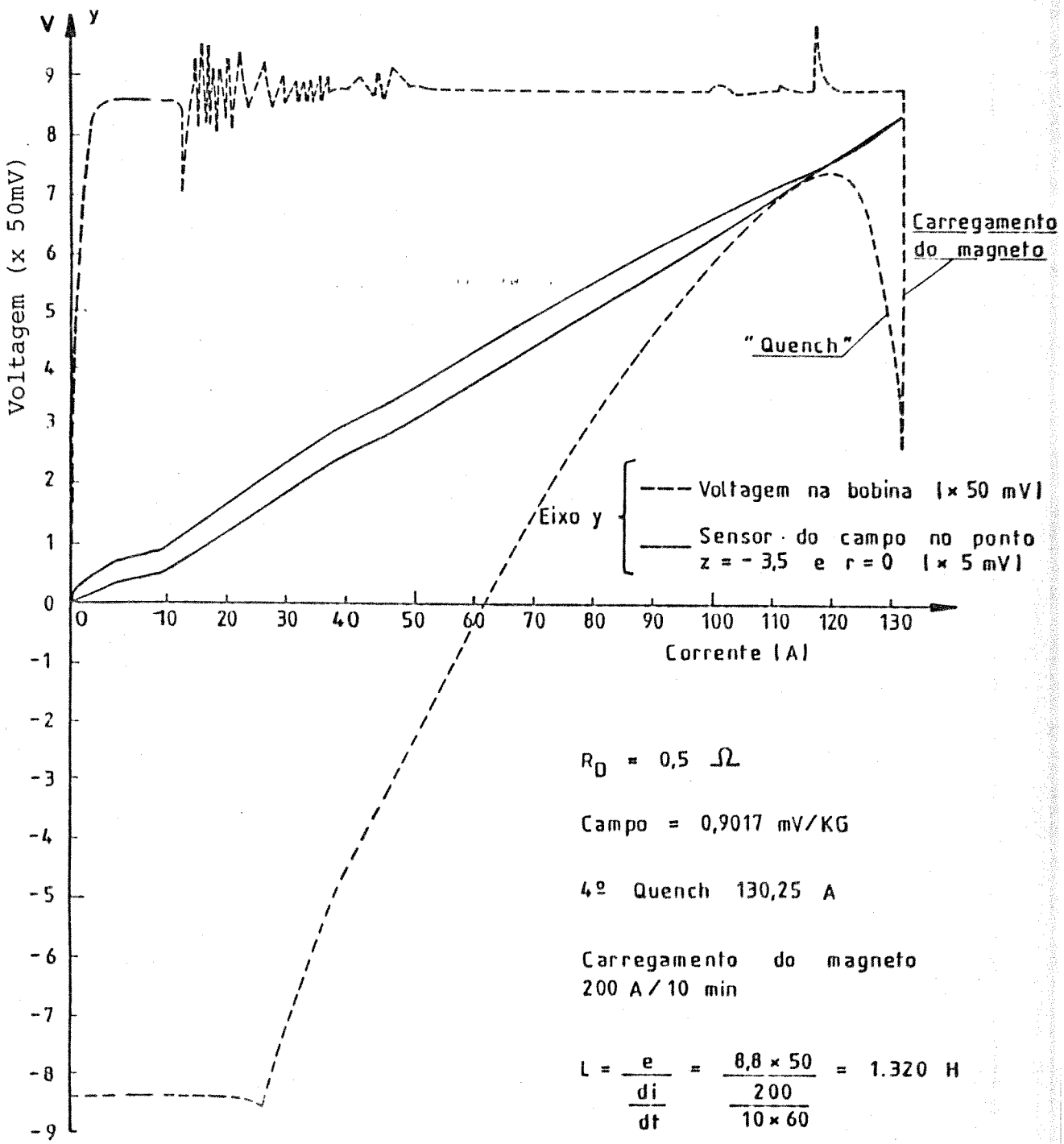


FIG. 11.III - 3º CARREGAMENTO DO MAGNETO



R_D = 0,5 Ω

Campo = 0,9017 mV/KG

4º Quench 130,25 A

Carregamento do magneto
200 A / 10 min

$$L = \frac{e}{\frac{di}{dt}} = \frac{8,8 \times 50}{\frac{200}{10 \times 60}} = 1.320 \text{ H}$$

$$I_{RD} = \frac{880 \text{ mV}}{0,5 \Omega} = 1.76 \text{ A}$$

I_{CMAG} = 132 - 1.8 ≅ 130 A

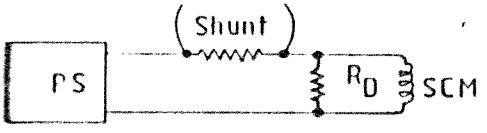
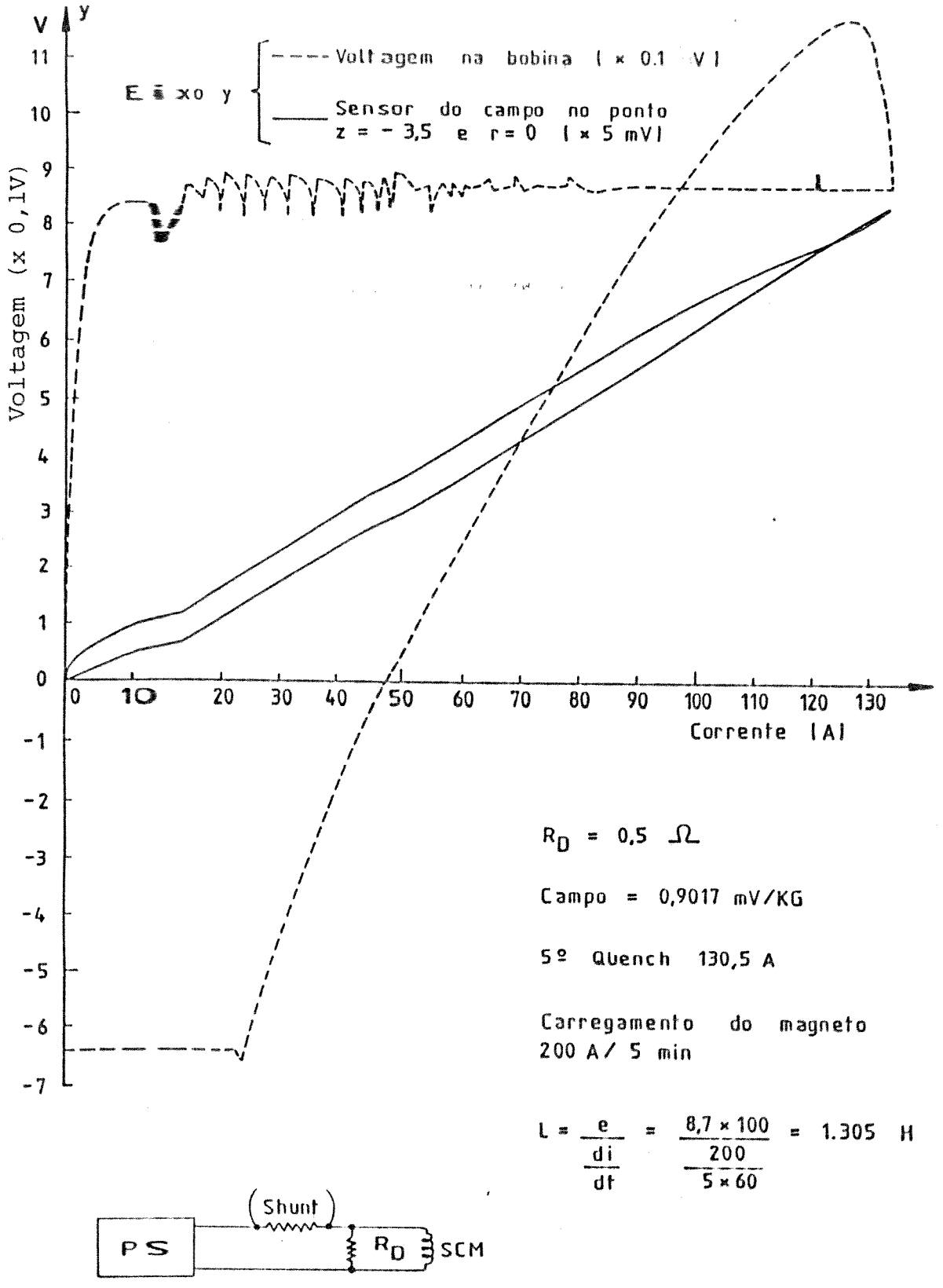


FIG. 11.IV - 4º CARREGAMENTO DO MAGNETO



$R_D = 0{,}5\ \Omega$

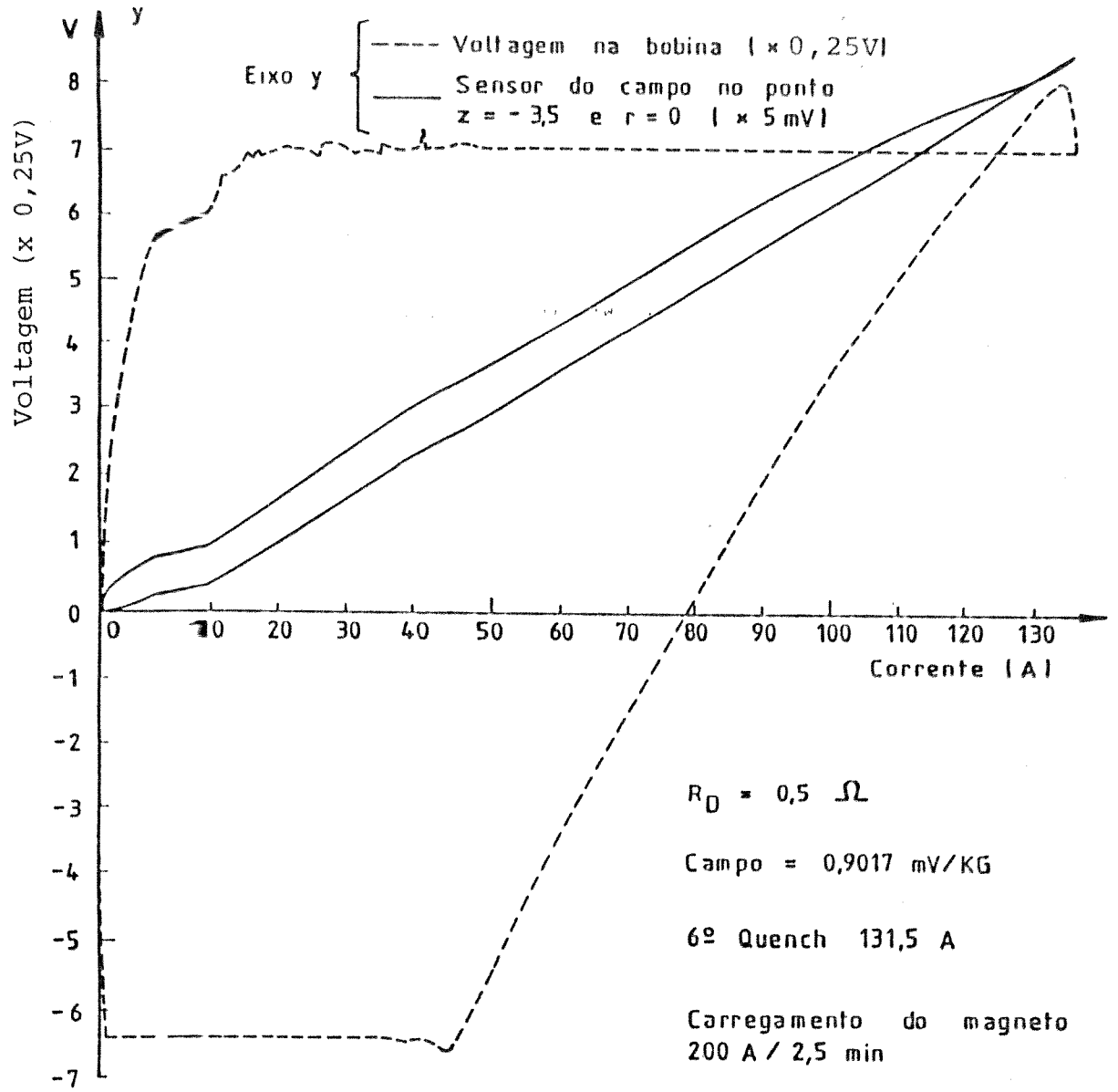
Campo = 0,9017 mV/KG

5º Quench 130,5 A

Carregamento do magneto
200 A / 5 min

$$L = \frac{e}{\frac{di}{dt}} = \frac{8{,}7 \times 100}{\frac{200}{5 \times 60}} = 1.305\ H$$

FIG. 11.V - 5º CARREGAMENTO DO MAGNETO



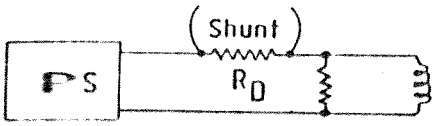
R_D = 0,5 Ω

Campo = 0,9017 mV/KG

6º Quench 131,5 A

Carregamento do magneto
200 A / 2,5 min

$$L = \frac{e}{\frac{di}{dt}} = \frac{7 \times 250}{\frac{200}{2.5 \times 60}} = 1.312,5 \text{ H}$$



I_{MAG} = 130 A

I_{RD} = 5 A

FIG. 11.VI - 6º CARREGAMENTO DO MAGNETO

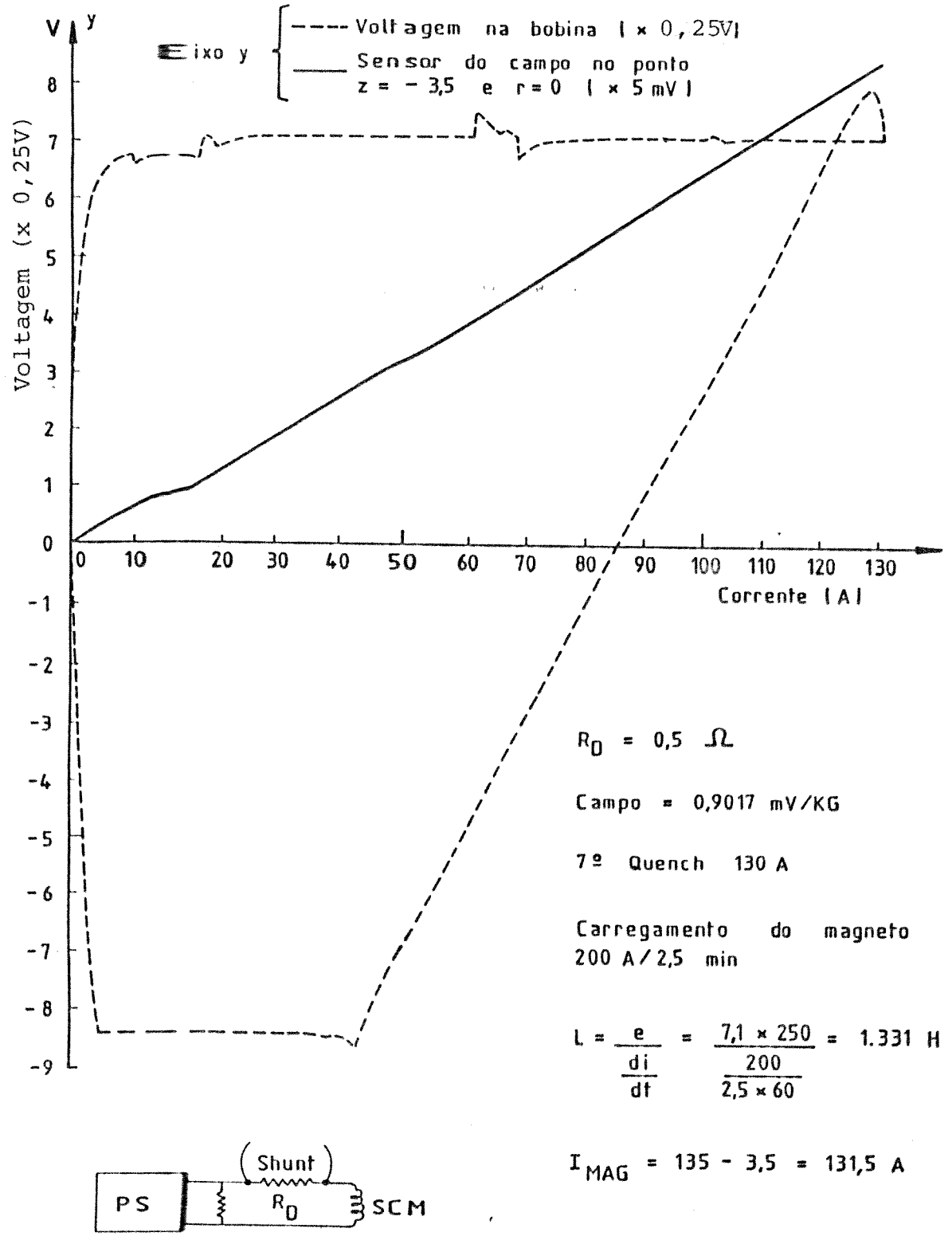


FIG. 11.VII- 7º CARREGAMENTO DO MAGNETO

$$L = \frac{V}{di/dt} = \frac{1,75}{\frac{200}{150}} = 1,3125 \quad (H) \qquad \text{(VI.11)}$$

$$E = \frac{1}{2} L I^2 = 11090 \quad (J) \qquad \text{(VI.12)}$$

$$\frac{E_c}{E_{R_D}} = \left(\frac{R_c}{R_D}\right)^2 = \left(\frac{0,987}{0,5}\right)^2 = 3,89 \qquad \text{(VI.13)}$$

$E_c = 3 - 89\ E_{RD} \quad \therefore \quad E_{RD} = 2268\ (J), \quad E_c = 8822\ (J)$

Posteriormente a R_D foi substituída por $R_D = 1,4\Omega$ e a energia passou a ser dissipada na seguinte razão:

$E_c = 3682(J) \qquad E_{RD} = 7408(J)$

Após o treinamento do magneto passamos aos testes de operação para determinar qual a corrente máxima de trabalho, para isto fizemos vários carregamentos e descarregamentos sucessivos em diferentes velocidades. Os resultados permitem assegurar $I_{op} = 125A$ correspondendo a $B_o = 6,8T$ e $B_{máx} = 7,15T$.

VI. 7 - CONCLUSÕES

O primeiro magneto supercondutor construído e testado atingiu o objetivo básico de se desenvolver a tecnologia de fabricação, e detalhamento de sistema de enrolamento para este fim.

Os cálculos executados foram precisos e tiveram seus resultados confirmados pelas medidas realizadas. O valor exato do campo magnético será comparado com o valor teórico somente após a aquisição de um "Gaussmeter" de alto campo e alta precisão, pois nas medidas realizadas foram introduzidos erros devido à grande diferença do valor medido de 5GAUSS para o valor real de 70.000 GAUSS.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

CAPÍTULO VII

DIMENSIONAMENTO, CONSTRUÇÃO E TESTE DO MAGNETO "SPLIT-PAIR" DE NbTi

VII.1 - INTRODUÇÃO

A construção do magneto "split-pair" permitiu escalonar a técnica de dimensionamento, aplicada ao magneto de laboratórios, a uma situação de dificuldade superior /1,2/

Primeiramente, o volume de enrolamento foi elevado de um fator de 12 vezes, seguido da energia armazenada de um fator de 30.

O magneto de "par separado" permite a operação em dois modos:

a) Correntes no mesmo sentido;

b) correntes opostas.

No caso de correntes no mesmo sentido o campo magnético central B_o= 7T e o nível de forças atuante na estrutura são normais de um solenóide convencional.

Para correntes em oposição, o campo magnético central B_o=0 e as forças na estrutura são elevadas devido à repulsão entre os enrolamentos chegando a 300t.

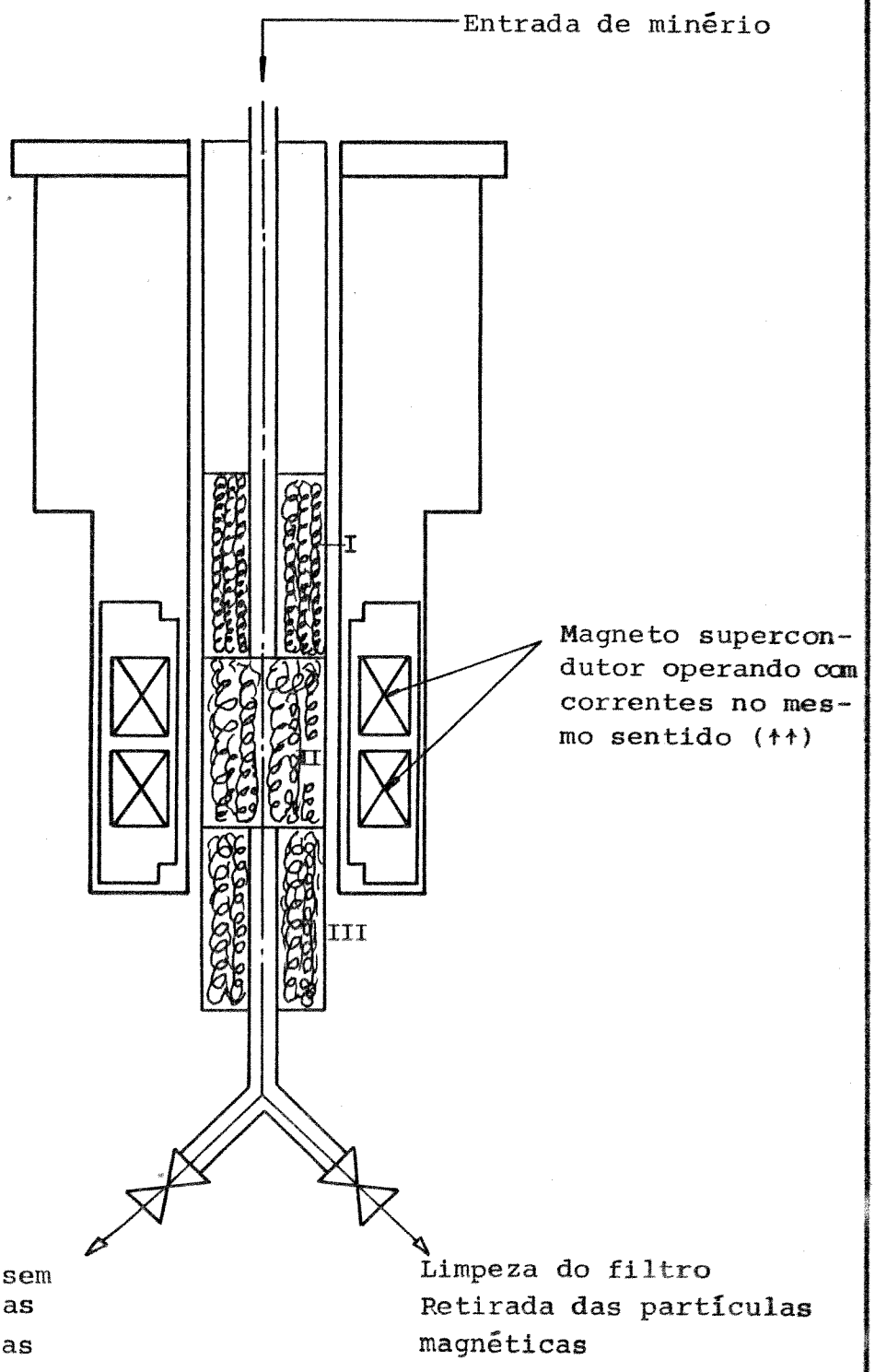
Somado a estes fatores, necessitamos de um grande diâmetro interno para viabilizar a posterior inserção de enrolamento de Nb_3Sn para geração de 12T.

O objetivo principal da construção deste magneto está relacionado àsua aplicação na unidade de separação magnética de minérios.

No modo de operação com correntes no mesmo sentido podemos utilizar a técnica de HGMS-"High Gradient Magnetic Separation" com "canisters" como mostrado na fig. 1. /3,4/.

Com correntes opostas poderemos usar o campo magnético no exterior do criostato com separador tipo helicoidal, que difere do anterior pois é um sistema contínuo como mostrado na fig.2.

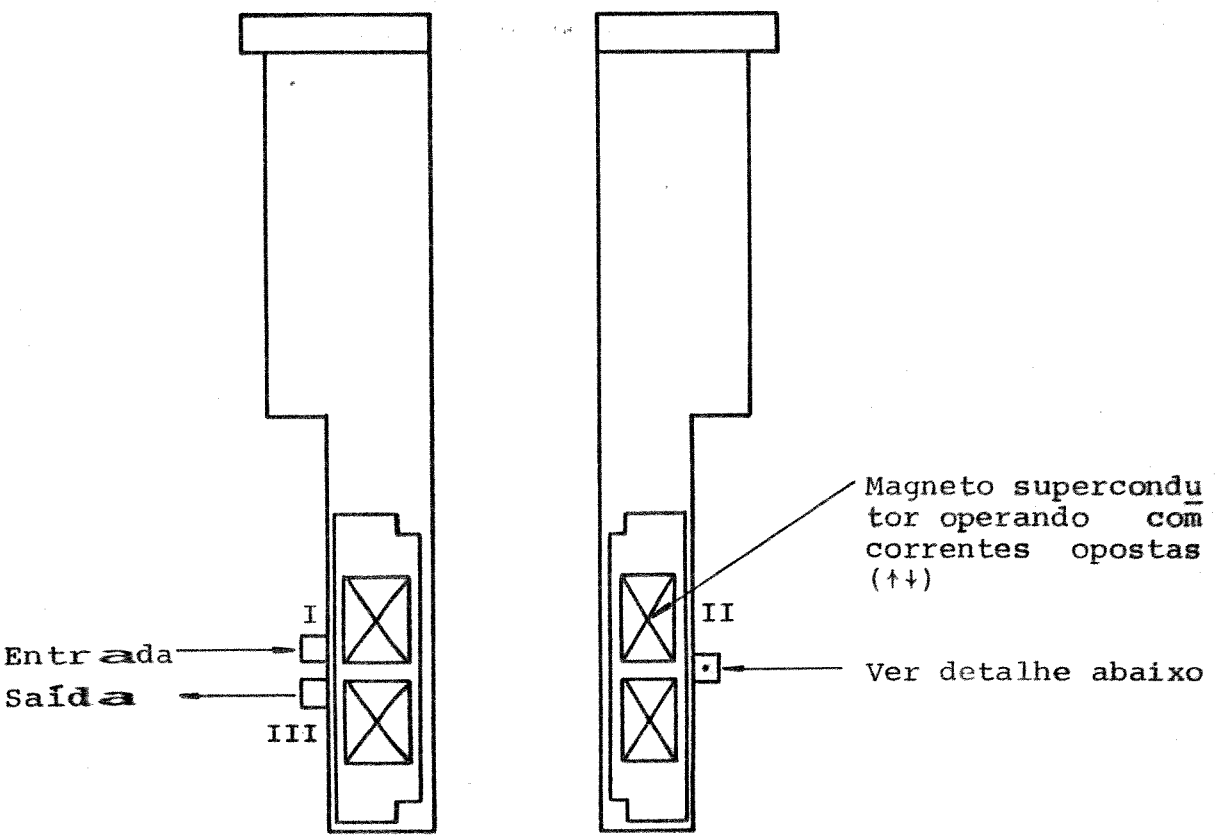
Fig. 1 - Unidade de Separação Magnética de Minério Operando no Sistema **HGMS - High Gradient Magnetic Separation**



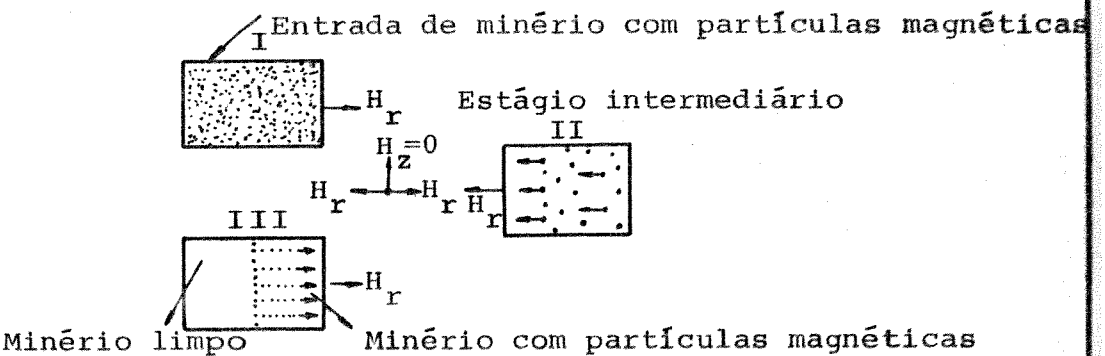
I e III — Canisters falsos para minimizar esforços mecânicos durante limpeza do canister II, que será movimentado para fora do campo magnético.

II — Canister de separação com mesh de inox.

Fig. 2 - Unidade de Separação Magnética de Minério Operando com Canal Aberto



Região I - Entrada de Minério com Partículas Magnéticas



O Apêndice 3 mostra os cálculos básicos dos separadores e uma comparação entre as suas eficiências para o mesmo mineral /5,6/.

VII.2 - DIMENSIONAMENTO DO CAMPO MAGNÉTICO

Utilizando-se o procedimento de otimização da fig.1 do capítulo VI iniciamos os cálculos em microcomputador, que foi adaptado para o caso de enrolamento partido na direção -Z.

Na tabela I apresentamos o programa montado para possibilitar o cálculo do campo magnético nos dois modos de operação.

A escolha do fio supercondutor foi baseada no menor custo US$/A.m dos diversos fabricantes, conforme tabela II. Outro parâmetro fundamental foi a escolha de um fio que mantivesse baixo o valor da indutância total e que também demandasse para seu uso fonte de potência com corrente máxima de 500A.

As fontes de potência para magnetos supercondutores são de fabricação especial, pois demandam alta corrente e baixa tensão, porém com grande estabilidade e repetitibilidade. Os projetos desenvolvidos foram divididos em fontes de 10V (0 a 300A) e 8V (0 a 500A) a partir destes valores 10V (0 a 5000A).

Os parâmetros de entrada para o mapeamento nas diversas regiões para os diferentes modos de operação estão na tabela III.

Os resultados do mapeamento em (G/A) estão nas tabelas IV e V para correntes no mesmo sentido e VI a VIII para correntes em sentido oposto. As figuras 3 a 5 mostram o perfil do campo B_r x r e B_zx r até a região externa do criostato.

Para o caso das correntes opostas a fig. 5 permite o cálculo do gradiente de campo fora do criostato que varia de 0,12 a 0,04 (T/cm) . Este valor será considerado no Apêndice 3 que calcula a eficiência do processo de separação magnética de minérios.

Com os valores de B_o e $B_{máx}$ para os dois modos de operação podemos obter os valores máximos das correntes de operação através da linha de carga do magneto.

a) Modo de Corrente no mesmo sentido:

B_o = 304,1 G/A

$B_{máx}$ = 365,8 G/A

$$\frac{B_{máx}}{B_o} = 1,20$$

Tabela I

Programa para Cálculo Campo Magnético no Eixo z

```
100 REM ****SPLIT PAIR*****
110 INPUT "INNER RADIUS A1(M)";A1
120 INPUT "OUTER RADIUS A2(M)";A2
130 INPUT "A HALF OF COIL LENGTH B(M)";B
140 INPUT "A HALF OF COIL GAP G(M)";G
150 INPUT "TOTAL TURNS OF COIL N(TURN)";N
160 INPUT "MAGNET CURRENT I(A)";I
161 LET   PI=3.141596
170 FOR   K=1 TO 11
180 LET   Y=(K-1)*.01
190 LET   A=A2/A1:LET C=B/A1:LET D=G/A1:LET Y=Y/A1
200 LET   H1=2*C+D+Y:LET H2=D+Y
210 LET   H3=Y-D:LET H4=Y-2*C-D
220 LET   B1=H1*LOG((A+SQR(A^2+H1^2))/(1+SQR(1+H1^2)))
230 LET   B2=H2*LOG((A+SQR(A^2+H2^2))/(1+SQR(1+H2^2)))
240 LET   B3=H3*LOG((A+SQR(A^2+H3^2))/(1+SQR(1+H3^2)))
250 LET   B4=H4*LOG((A+SQR(A^2+H4^2))/(1+SQR(1+H4^2)))
260 LET   B0=(B1-B2+B3-B4)*4.*PI*1.E-7*N*I/(A2-A1)/2./B/2*A1
270 IF K> 1 THEN 400
280 PRINT "INNER RADIUS A1(M)=";A1
290 PRINT "OUTER RADIUS A2(M)=";A2
300 PRINT "A HALF OF COIL LENGTH B(M)=";B
310 PRINT "A HALF OF COIL GAP G(M)=";G
320 PRINT "TOTAL TURNS OF COIL N(TURN)=";N
330 PRINT "MAGNET CURRENT I(A)=";I
340 PRINT "Y(M)                B0(T)"
400 PRINT Y,B0
410 NEXT   K
420 END
```

Tabela II - Comparação dos fios supercondutores NbTi para magnetos de médio porte

FABRICANTE	TIPO	DIMENSÕES (mm)	*** CORRENTE B=7 T	DENSIDADE $(\frac{I}{\frac{\pi d^2}{4}})$ A/mm^2 B=7 T	US$/A.M. x 10^{-3}
VAC - 160	Vacryflux	0,75 x 1,2	362	402	5,8
FURUKAWA**	MCIK-A	0,8 x 1,8	700	486	5,86
SUMITOMO**		1,0 x 2,0	375	187	-
HITACHI **	1060 NF-2	1,2 x 2,6	900	288	-
IGC *	NbTi - 1,3	0,98 x 1,47	725	503,3	5,98

* Empresas americanas inclui no custo imposto de exportação de 55%

** Empresas japonesas apresentam hoje acréscimo de 30 a 40% devido relação US$/Yene

*** Considerar classes de fonte de potência 0-300 A, 0-500 A e 0-1000 A que representam variação de 30 a 60% respectivamente no custo final da unidade.

Tabela III - Parâmetros para Mapeamento do Campo Magnético

a)	Correntes↑↑	Correntes↓↓
A_1 (m)	0,0941	0,941
A_2 (m)	0,1465	0,1465
B_1 (m)	0,0998 -0,01	0,0998 -0,0998
B_2 (m)	0,01 -0,0998	0,01 -0,01
DR (m)	$9,03 \times 10^{-4}$	$9,03 \times 10^{-4}$
DZ (m)	$1,29 \times 10^{-3}$	$1,29 \times 10^{-3}$
N (esp)	58x69	58x69
I (A)	224	268
J_{COND} (A/cm^2)	$2,3 \times 10^4$	$2,8 \times 10^4$
λ	0,82	0,82
J_{enr} (A/cm^2)	$1,9 \times 10^4$	$2,3 \times 10^4$

b) Fio Supercondutor - Frações Volumétricas

V(Cu) = 0,51 V(NbTi) = 0,39 V(Isol.+Ref.)=0,1

Tabela IV - Mapeamento do Campo Magnético na Parte Central da Bobina (↑↑)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF TOTAL COIL

INNER RADIUS= 9.410 (CM) OUTER RADIUS= 14.651 (CM) A HALF OF COIL LANGTH= 4.490 (CM)

RADIOUS FIELD HP (G/A)

Z(CM)	0.00	0.94	1.88	2.82	3.76	4.70	5.65	6.59	7.53	8.47	9.41
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.00	0.000	0.734	1.430	2.039	2.484	2.658	2.327	1.057	-2.101	-10.106	-35.371
2.00	0.000	1.523	2.962	4.248	5.353	5.960	5.808	4.349	0.605	-7.074	-19.720
2.99	0.000	2.402	4.736	6.817	8.522	10.267	10.970	10.523	8.398	4.185	-1.625
3.99	0.000	3.378	6.706	9.819	12.423	15.580	17.093	19.010	19.261	18.421	16.739
4.99	0.000	4.426	8.836	13.211	17.004	21.045	25.526	29.001	31.910	34.127	35.623
5.99	0.000	5.492	11.019	16.809	22.286	28.059	33.911	39.761	45.536	50.916	55.519
6.99	0.000	6.507	13.100	19.871	26.413	34.328	42.214	50.639	59.553	68.521	77.014
7.98	0.000	7.392	14.920	22.728	30.484	39.888	49.662	60.050	73.045	86.793	100.694
8.98	0.000	8.078	16.326	24.931	34.116	44.161	55.449	68.532	84.235	103.717	126.987
9.98	0.000	8.511	17.209	26.295	36.013	46.678	58.732	72.855	90.244	113.517	153.965

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	0.00	0.94	1.88	2.82	3.76	4.70	5.65	6.59	7.53	8.47	9.41
0.00	314.045	314.438	315.448	317.065	319.167	321.536	323.784	325.150	324.208	317.161	294.365
1.00	313.314	313.672	314.725	316.425	318.573	321.296	323.996	326.267	327.232	325.390	318.843
2.00	310.916	311.308	312.477	314.394	317.030	320.301	324.115	328.384	333.203	339.446	351.507
2.99	306.749	307.186	308.503	310.709	313.424	317.568	322.982	329.297	337.264	347.838	362.631
3.99	300.613	301.092	302.543	305.005	308.055	313.313	319.471	327.323	337.310	349.930	365.854
4.99	292.334	292.835	294.360	296.972	300.785	305.974	312.792	321.576	332.731	346.560	363.417
5.99	281.816	282.310	283.816	286.415	290.236	295.491	302.477	311.566	323.282	337.915	355.859
6.99	269.045	269.547	270.927	273.311	276.939	281.729	288.307	297.042	308.567	323.550	342.745
7.98	254.364	254.737	255.878	257.850	260.771	264.834	270.345	277.801	288.031	302.316	322.575
8.98	237.970	238.236	239.045	240.437	242.481	245.247	249.061	254.167	261.335	272.245	291.833
9.98	220.392	220.532	220.955	221.665	222.669	223.974	225.587	227.508	229.732	232.201	232.926

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	0.00	0.94	1.88	2.82	3.76	4.70	5.65	6.59	7.53	8.47	9.41
0.	314.045	314.438	315.448	317.065	319.167	321.536	323.784	325.150	324.208	317.161	294.365
1.	313.314	313.672	314.728	316.431	318.583	321.307	324.005	326.269	327.240	325.547	318.811
2.	310.916	311.312	312.491	314.428	317.075	320.356	324.167	328.413	333.204	339.569	352.060
3.	306.749	307.196	308.539	310.788	313.548	318.054	323.169	329.465	337.388	347.883	362.635
4.	300.613	301.111	302.617	305.167	308.425	313.700	319.960	327.874	337.861	350.414	366.236
5.	292.334	292.859	294.443	297.266	301.244	306.738	313.832	322.862	334.258	348.236	365.159
6.	281.816	282.363	284.032	286.846	291.090	296.820	304.372	314.116	326.473	341.730	360.164
7.	269.045	269.625	271.243	274.037	278.144	283.812	291.381	301.327	314.261	330.747	351.291
8.	254.364	254.944	256.313	258.850	262.806	267.821	274.872	284.345	297.144	314.529	337.926
9.	237.970	238.373	239.602	241.726	244.870	249.240	255.178	263.263	274.578	291.332	318.264
10.	220.392	220.696	221.624	223.219	225.562	228.787	233.107	238.869	246.821	258.464	279.213

Tabela V - Mapeamento do Campo Magnético no Enrolamento (↑↑)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF TOTAL COIL

INNER RADIUS= 9.410 (CM) OUTER RADIUS= 14.651 (CM) A HALF OF COIL LANGTH= 4.490 (CM)

RADIOUS FIELD HP (G/A)

Z(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.00	-35.371	-52.742	-50.196	-63.760	-65.261	-65.367	-64.244	-61.699	-57.013	-48.210	-31.213
2.00	-19.720	-26.491	-32.493	-35.988	-37.766	-38.086	-37.038	-34.538	-30.354	-24.242	-16.543
2.99	-1.625	-4.841	-7.527	-9.431	-10.664	-10.613	-9.891	-8.309	-5.913	-2.843	0.607
3.99	16.739	15.707	14.787	14.069	13.687	13.602	13.853	14.420	15.257	16.260	17.371
4.99	35.623	36.166	36.527	36.724	36.772	36.683	36.464	36.123	35.662	35.079	34.367
5.99	55.519	57.565	59.139	60.176	60.637	60.504	59.789	58.525	56.771	54.506	52.124
6.99	77.014	80.933	84.028	86.127	87.121	86.965	85.672	83.306	79.985	75.667	71.241
7.98	100.554	107.485	112.908	116.509	118.025	118.323	116.330	112.520	107.040	100.185	92.352
8.98	126.967	139.134	148.456	154.517	157.485	157.567	154.873	149.398	141.056	129.816	116.286
9.98	153.965	178.676	191.966	199.496	202.927	202.868	199.578	192.887	182.256	166.003	140.525

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	294.365	270.463	240.123	206.099	170.277	133.746	97.495	62.232	29.167	0.164	-22.000
1.00	316.843	294.416	268.665	211.960	174.338	136.420	98.621	61.337	24.890	-10.671	-40.327
2.00	351.007	306.475	263.411	221.958	181.010	140.233	99.464	58.511	16.810	-27.153	-71.701
2.99	367.831	315.765	271.665	227.867	184.811	141.570	98.465	55.001	10.643	-35.740	-81.519
3.99	365.854	314.587	274.213	229.534	185.235	141.070	96.810	52.213	6.842	-40.273	-86.337
4.99	363.417	317.762	272.252	227.819	183.287	139.042	94.665	50.002	4.596	-42.461	-88.342
5.99	365.854	316.923	266.201	222.405	178.941	135.572	92.074	48.212	3.508	-42.864	-88.087
6.99	342.745	298.473	255.719	213.629	172.023	130.580	88.994	46.946	3.935	-41.065	-85.296
7.98	322.575	280.492	239.628	200.415	161.968	123.804	85.497	46.662	6.451	-36.198	-78.790
8.98	291.533	252.361	215.703	181.313	147.846	114.709	81.471	47.681	12.530	-25.705	-65.491
9.98	252.926	208.499	181.791	155.269	128.796	102.304	75.815	49.321	22.714	-4.396	-27.349

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.	294.365	270.463	240.123	206.099	170.277	133.746	97.495	62.232	29.167	0.164	22.000
1.	316.811	294.656	268.861	221.350	186.152	151.272	117.700	87.000	62.209	49.377	50.996
2.	352.060	307.661	265.408	224.857	184.908	145.313	106.136	67.444	34.698	36.400	73.585
3.	362.835	316.802	271.769	228.062	184.908	141.967	98.960	55.625	12.175	35.853	81.521
4.	366.238	320.272	274.612	229.966	185.139	141.724	97.797	54.167	10.721	43.434	88.067
5.	365.159	314.813	274.691	230.563	186.939	143.800	101.464	61.685	35.957	55.077	94.791
6.	360.164	316.207	272.691	230.403	188.636	148.461	109.784	75.826	56.883	69.383	102.354
7.	351.241	309.734	269.171	230.337	192.726	156.889	123.530	95.623	80.081	86.265	111.133
8.	337.926	300.381	264.896	231.671	200.144	171.254	144.369	121.789	107.234	106.505	121.395
9.	318.264	288.174	261.853	238.222	216.009	194.899	174.995	156.823	141.612	132.336	133.460
10.	294.314	274.595	264.354	253.511	238.159	227.233	213.403	198.853	183.153	166.551	144.169

Tabela VI - Mapeamento do Campo Magnético na Parte Central da Bobina (↑↓)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF TOTAL COIL

INNER RADIUS= 9.410 (CM) OUTER RADIUS= 14.650 (CM) A HALF OF COIL LANGTH= -4.490 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A).

Z(CM)	0.00	0.94	1.88	2.82	3.76	4.70	5.65	6.59	7.53	8.47	9.41
0.00	0.000	-12.316	-25.044	-38.629	-53.581	-70.528	-90.292	-114.012	-143.359	-180.639	-225.829
1.00	0.000	-12.011	-24.415	-37.681	-52.139	-68.522	-87.522	-110.150	-137.874	-173.235	-226.293
2.00	0.000	-11.127	-22.590	-34.743	-47.982	-62.767	-79.645	-99.279	-122.457	-149.969	-180.920
2.99	0.000	-9.746	-19.745	-30.258	-41.566	-53.972	-67.792	-83.315	-100.672	-119.466	-137.940
3.99	0.000	-7.990	-16.135	-24.594	-33.524	-43.076	-53.374	-64.463	-76.196	-88.039	-98.865
4.99	0.000	-6.000	-12.057	-18.223	-24.541	-31.033	-37.690	-44.440	-51.111	-57.381	-62.753
5.99	0.000	-3.924	-7.812	-11.617	-15.278	-18.708	-21.795	-24.404	-26.411	-27.755	-28.498
6.99	0.000	-1.901	-3.683	-5.214	-6.338	-6.867	-6.578	-5.243	-2.712	0.904	5.000
7.98	0.000	-0.053	0.079	0.597	1.738	3.788	7.101	12.091	19.162	28.398	38.752
8.98	0.000	1.523	3.274	5.501	8.497	12.623	18.359	26.360	37.567	53.252	73.526
9.98	0.000	2.763	5.771	9.289	13.626	19.172	26.447	36.218	49.769	69.800	107.674

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	0.00	0.94	1.88	2.82	3.76	4.70	5.65	6.59	7.53	8.47	9.41
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.00	25.766	26.050	26.918	28.430	30.694	33.887	38.295	44.392	52.981	65.360	81.269
2.00	50.275	50.815	52.467	55.337	59.616	65.612	73.806	84.967	100.392	122.492	156.768
2.99	72.388	73.134	75.417	79.370	85.230	93.365	104.322	118.897	136.259	163.992	198.129
3.99	91.180	92.071	94.790	99.460	106.390	115.894	128.505	144.897	165.891	192.256	224.678
4.99	106.008	106.974	109.917	114.978	122.395	132.515	145.794	162.781	184.052	209.979	240.800
5.99	116.533	117.506	120.467	125.543	132.952	143.008	156.120	172.764	193.515	218.637	248.371
6.99	122.718	123.636	126.426	131.196	138.131	147.506	159.700	175.215	194.676	218.679	247.829
7.98	124.803	125.615	128.075	132.264	138.321	146.463	157.010	170.452	187.581	209.592	238.265
8.98	123.262	123.929	125.941	129.345	134.215	140.673	148.906	159.243	172.354	189.865	216.579
9.98	118.737	119.237	120.738	123.243	126.756	131.273	136.780	143.241	150.595	158.706	165.481

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	0.00	0.94	1.88	2.82	3.76	4.70	5.65	6.59	7.53	8.47	9.41
0.	0.000	12.316	25.044	38.629	53.581	70.528	90.292	114.012	143.359	180.639	225.829
1.	25.766	28.686	36.341	47.163	60.503	76.443	95.534	118.756	147.703	185.155	240.444
2.	50.275	52.019	57.123	65.340	76.527	90.800	108.585	130.674	158.349	193.636	239.391
3.	72.388	73.781	77.959	84.942	94.825	107.843	124.414	145.182	171.027	202.893	241.418
4.	91.180	92.417	96.153	102.475	111.547	123.640	139.149	158.590	182.553	211.455	245.468
5.	106.008	107.142	110.577	116.413	124.831	136.100	150.587	168.739	191.017	217.678	248.843
6.	116.533	117.571	120.720	126.060	133.827	144.226	157.634	174.499	195.309	220.392	250.001
7.	122.718	123.651	126.480	131.300	138.276	147.666	159.836	175.293	194.695	218.681	247.879
8.	124.803	125.615	128.075	132.265	138.332	146.512	157.170	170.881	188.557	211.507	241.396
9.	123.262	123.938	125.984	129.462	134.484	141.238	150.034	161.410	176.401	197.191	228.720
10.	118.737	119.269	120.876	123.593	127.486	132.666	139.313	147.749	158.605	173.377	197.428

Tabela VII - Mapeamento do Campo Magnético no Enrolamento (↑↓)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF TOTAL COIL

INNER RADIUS= 9.410 (CM) OUTER RADIUS= 14.650 (CM) A HALF OF COIL LANGTH= -4.490 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	-225.829	-249.511	-267.647	-279.357	-284.965	-284.882	-279.321	-268.276	-251.575	-229.160	-202.257
1.00	-226.293	-257.221	-275.454	-286.241	-291.125	-290.844	-285.371	-274.771	-258.634	-235.555	-202.341
2.00	-169.520	-196.867	-208.643	-216.765	-220.500	-220.205	-215.998	-207.945	-196.083	-180.570	-162.258
2.99	-137.940	-146.811	-153.827	-154.536	-160.714	-160.295	-157.315	-151.892	-144.251	-134.774	-124.049
3.99	-98.865	-103.864	-107.771	-110.306	-111.515	-111.155	-109.306	-106.054	-101.559	-96.052	-89.826
4.99	-62.753	-65.136	-66.960	-68.148	-68.651	-68.449	-67.553	-66.005	-63.877	-61.263	-58.277
5.99	-28.498	-28.712	-28.828	-28.879	-28.886	-28.866	-28.826	-28.764	-28.671	-28.528	-28.310
6.99	5.000	7.102	8.827	10.017	10.574	10.451	9.646	8.199	6.196	3.774	1.115
7.98	38.752	44.033	46.299	51.205	52.594	52.427	50.721	47.533	42.987	37.329	30.984
8.98	73.526	84.365	92.701	98.045	100.586	100.528	97.970	92.898	85.206	74.844	62.398
9.98	107.674	131.262	143.659	150.529	153.533	153.296	150.011	143.558	133.367	117.738	93.056

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.00	81.269	68.045	54.179	41.732	30.024	18.590	7.004	-5.165	-16.471	-33.756	-46.738
2.00	156.758	127.009	101.002	77.973	56.303	35.100	13.639	-6.826	-33.376	-61.974	-93.268
2.99	198.129	164.750	133.163	103.651	75.148	46.961	18.522	-10.867	-42.030	-76.354	-111.392
3.99	224.674	188.907	154.162	120.799	88.065	55.500	22.653	-10.931	-45.878	-83.318	-120.573
4.99	240.800	203.811	166.946	131.427	96.340	61.336	26.070	-9.805	-46.811	-85.979	-124.562
5.99	246.371	210.462	173.010	136.649	100.692	64.809	28.062	-8.016	-45.765	-85.640	-124.823
6.99	247.329	209.919	172.640	136.731	101.296	66.002	30.474	-5.608	-42.961	-82.541	-121.632
7.98	238.265	201.096	165.262	131.151	97.827	64.767	31.496	-2.477	-37.659	-75.928	-114.160
8.98	216.579	181.247	148.812	118.697	89.522	60.658	31.642	1.991	-29.135	-63.486	-99.552
9.98	165.441	144.555	121.412	98.515	75.040	52.753	29.830	6.841	-16.345	-40.141	-59.903

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.	225.829	249.511	267.647	279.357	284.965	284.882	279.321	268.276	251.575	229.160	202.257
1.	240.444	266.869	280.732	289.317	292.769	291.437	285.457	274.820	259.293	237.961	207.718
2.	239.341	234.130	231.985	230.362	227.574	222.985	216.428	208.132	198.903	190.909	187.152
3.	241.418	220.671	203.457	189.413	177.416	167.038	158.401	152.280	150.249	154.900	166.722
4.	245.468	215.630	188.098	163.626	142.095	124.241	111.628	106.615	111.440	127.153	150.355
5.	248.843	213.776	179.676	148.045	118.998	91.909	72.409	66.730	79.193	105.572	137.521
6.	250.001	212.411	175.395	139.667	104.753	76.447	60.664	59.860	54.021	90.267	127.493
7.	247.879	210.039	172.916	137.097	101.847	66.824	51.964	9.967	43.425	82.628	121.837
8.	241.396	205.861	172.175	140.792	111.069	83.327	59.704	47.597	57.261	84.608	118.290
9.	226.720	199.928	175.324	153.954	134.654	117.410	102.953	92.919	90.049	98.143	117.491
10.	165.438	144.555	121.412	98.515	75.040	52.753	29.830	6.841	-16.345	-40.141	-59.903

Tabela VIII - Mapeamento do Campo Magnético na Região Externa do Criostato (↑↓)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF TOTAL COIL

INNER RADIOS= 9.410 (CM) OUTER RADIUS= 14.050 (CM) A HALF OF COIL LANGTH= -4.490 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	15.00	15.50	16.00	16.50	17.00	17.50	18.00	18.50	19.00	19.50	20.00
0.00	-163.646	-159.018	-137.907	-120.152	-105.200	-92.533	-81.736	-72.472	-64.484	-57.564	-51.541
1.00	-175.974	-152.882	-132.544	-115.791	-101.654	-89.678	-79.393	-70.532	-62.861	-56.198	-50.383
2.00	-149.536	-132.298	-116.935	-103.503	-91.806	-81.822	-72.745	-64.994	-58.211	-52.265	-47.037
2.99	-116.551	-105.462	-95.629	-86.135	-77.496	-69.722	-62.774	-56.565	-51.060	-46.187	-41.835
3.99	-85.428	-79.024	-72.689	-66.600	-60.869	-55.556	-50.679	-46.254	-42.200	-38.549	-35.248
4.49	-56.137	-52.957	-49.720	-46.505	-43.373	-40.366	-37.511	-34.823	-32.307	-29.965	-27.789
5.99	-24.110	-27.732	-27.232	-26.606	-25.803	-25.016	-24.086	-23.095	-22.065	-21.016	-19.964
6.99	-0.691	-3.179	-5.437	-7.376	-8.958	-10.185	-11.084	-11.696	-12.000	-12.235	-12.243
7.98	26.839	20.852	15.233	10.548	6.823	3.406	0.813	-1.249	-2.805	-4.112	-5.056
8.98	53.843	42.700	33.408	25.862	19.765	14.836	10.850	7.625	5.019	2.918	1.228
9.98	75.574	57.929	45.048	36.346	29.013	23.116	18.327	14.405	11.181	8.526	6.338

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	15.00	15.50	16.00	16.50	17.00	17.50	18.00	18.50	19.00	19.50	20.00
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.00	-44.016	-35.870	-29.528	-24.659	-20.799	-17.881	-15.131	-13.024	-11.267	-9.791	-8.543
2.00	-81.504	-66.167	-54.706	-46.024	-39.105	-33.457	-28.784	-24.884	-21.605	-18.831	-16.471
2.99	-100.607	-84.960	-72.168	-61.823	-53.223	-45.992	-39.879	-34.694	-30.278	-26.505	-23.269
3.99	-110.717	-95.692	-82.877	-72.093	-62.826	-54.828	-47.928	-41.979	-36.848	-32.417	-28.585
4.99	-115.357	-100.951	-88.435	-77.703	-68.314	-60.083	-52.886	-46.611	-41.144	-36.363	-32.235
5.49	-115.966	-101.983	-89.805	-79.331	-70.128	-62.021	-54.895	-48.646	-43.171	-38.376	-34.174
5.99	-112.434	-99.084	-87.272	-77.241	-68.502	-60.842	-54.120	-48.220	-43.038	-38.479	-34.403
6.99	-105.163	-91.664	-80.493	-71.312	-63.480	-56.669	-50.753	-45.539	-40.941	-36.871	-33.259
7.98	-90.405	-78.010	-68.643	-61.324	-55.180	-49.846	-45.140	-40.953	-37.207	-33.844	-30.617
8.98	-60.617	-55.969	-51.786	-47.993	-44.444	-41.104	-37.973	-35.051	-32.334	-29.814	-27.482

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	15.00	15.50	16.00	16.50	17.00	17.50	18.00	18.50	19.00	19.50	20.00
0.	163.646	159.018	137.907	120.152	105.200	92.533	81.736	72.472	64.484	57.564	51.541
1.	164.307	157.053	135.793	118.388	103.764	91.464	80.822	71.724	63.863	57.044	51.102
2.	170.307	147.922	129.100	113.274	99.788	88.213	78.233	69.594	62.091	55.554	49.838
3.	153.967	135.739	119.805	106.026	94.0 2	83.525	74.371	66.374	59.380	53.252	47.871
4.	139.843	124.104	110.238	98.148	87.4 6	78.054	69.753	62.449	56.024	50.307	45.382
5.	128.291	113.498	101.453	90.557	80.9 9	72.383	64.839	58.182	52.313	47.134	42.560
6.	119.324	105.666	93.843	83.674	74.745	66.876	59.946	53.850	48.483	43.754	39.578
7.	112.836	99.135	87.441	77.592	69.085	61.686	55.243	49.619	44.697	40.377	36.573
8.	108.503	93.962	81.922	72.088	63.824	56.741	50.760	45.556	41.041	37.099	33.641
9.	105.224	88.932	76.341	66.555	58.613	52.007	46.426	41.657	37.544	33.964	30.841
10.	98.881	80.564	69.033	60.203	53.075	47.158	42.164	37.896	34.212	31.009	28.204

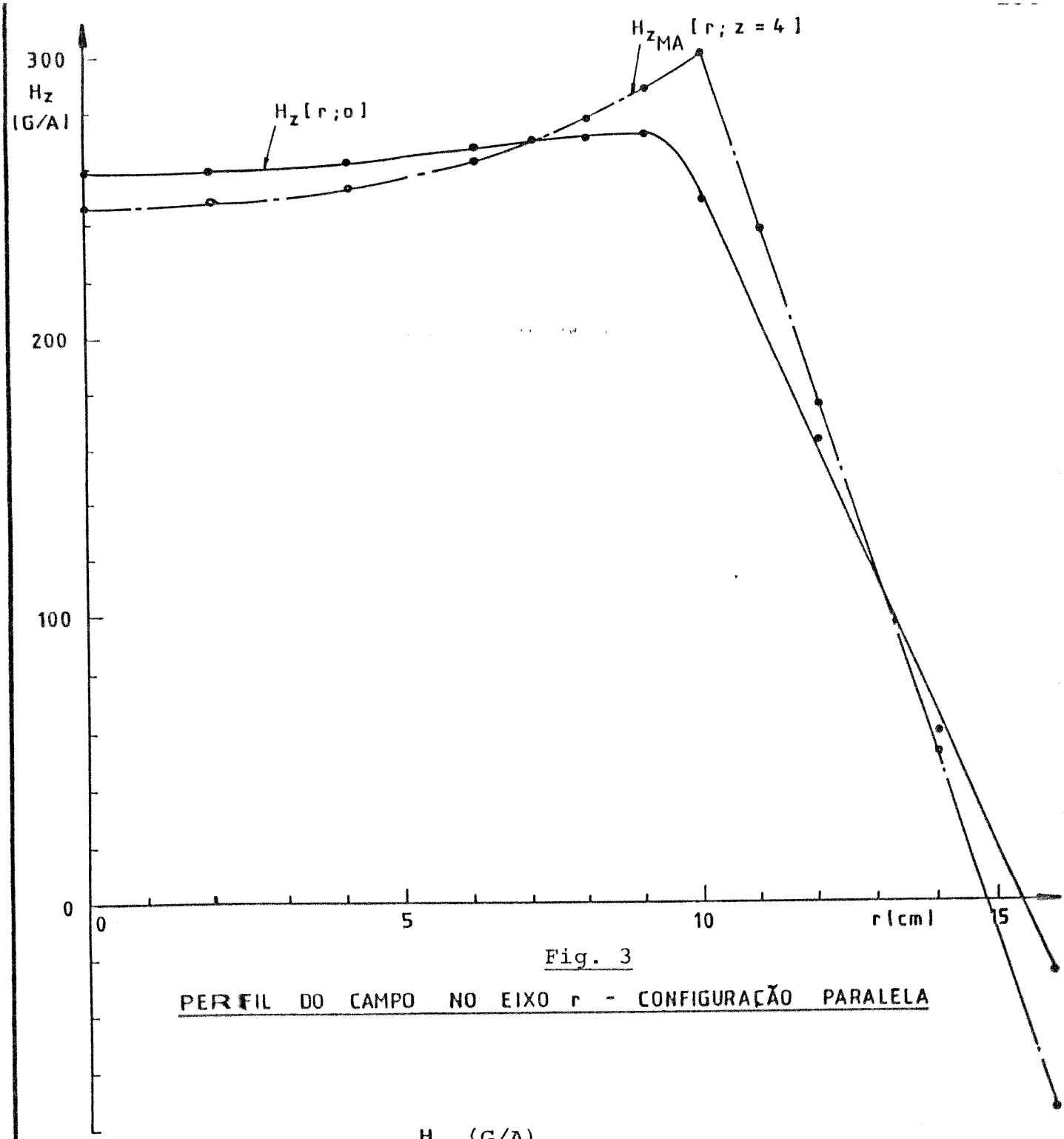


Fig. 3

PERFIL DO CAMPO NO EIXO r - CONFIGURAÇÃO PARALELA

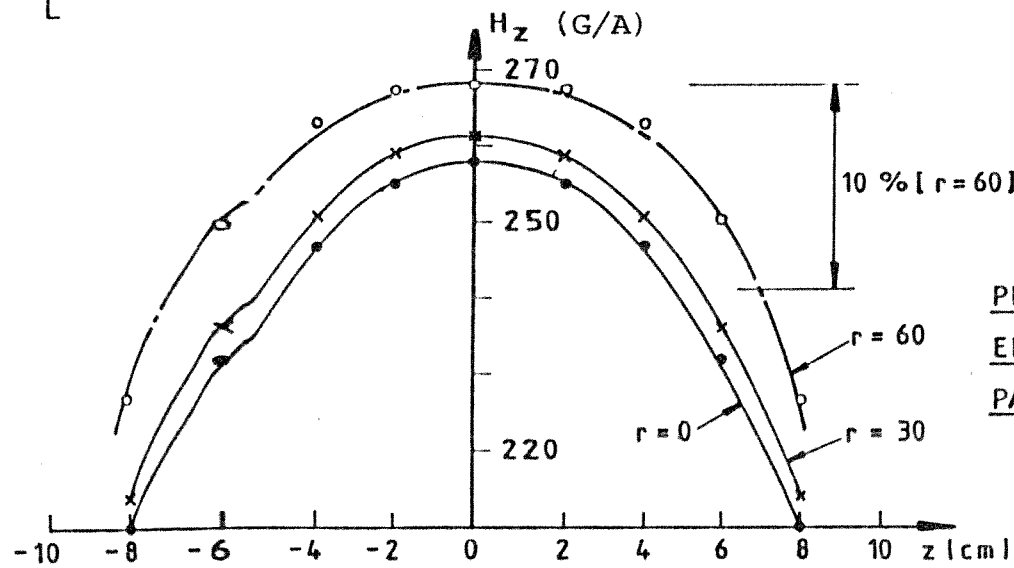


Fig. 4

PERFIL DO CAMPO NO EIXO z - CONFIGURAÇÃO PARALELA

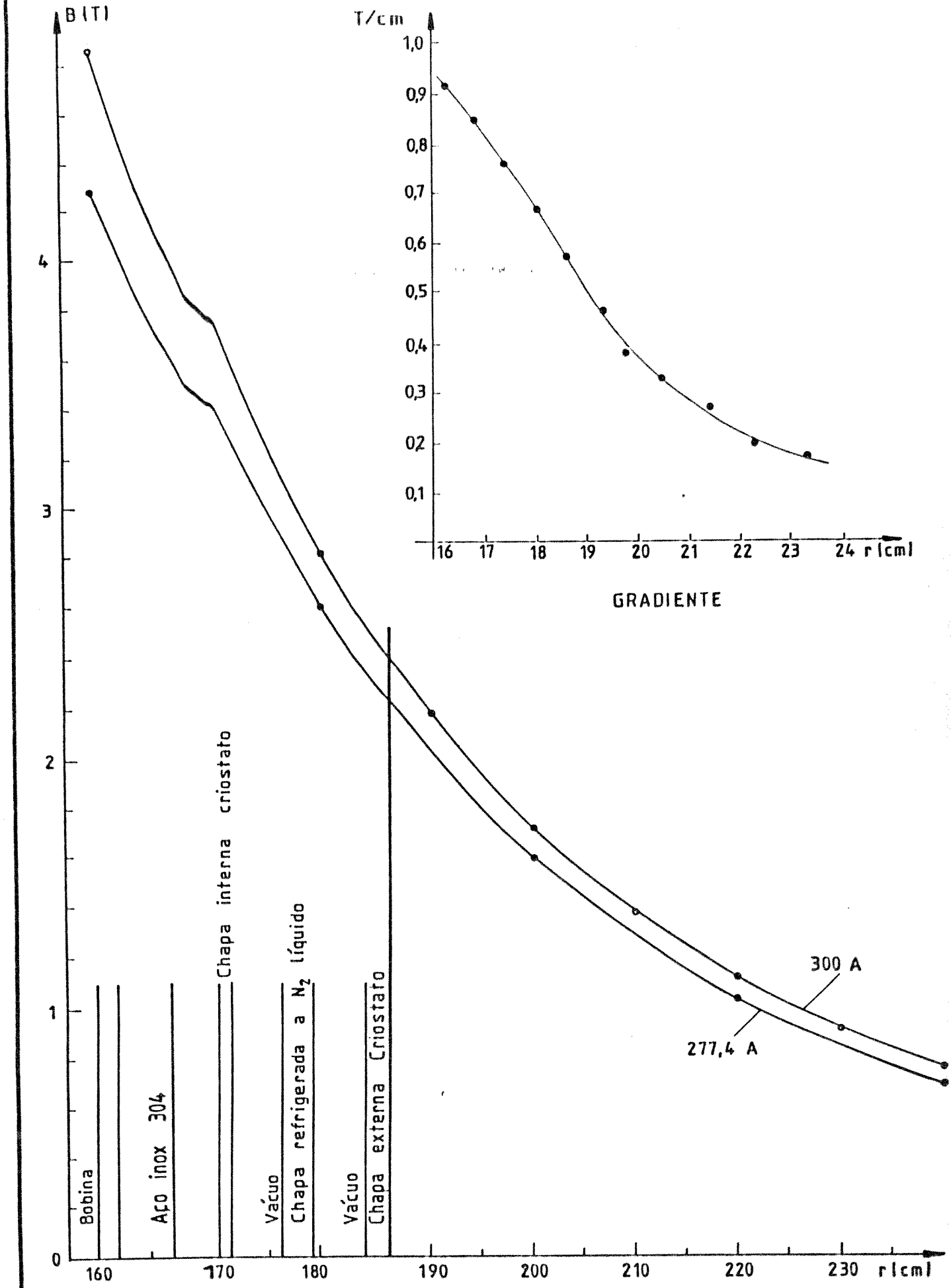


FIG. 5 - PERFIL E GRADIENTE DO CAMPO FORA DO CRIOSTATO

Para se obter a corrente de operação vamos na primeira hipótese fixar $B_{máx}$ = 8T logo, I_{op} = 224A e por conseguinte B_o=6,8(T), resultando uma margem de corrente ($\frac{I_{op}}{I_c(8T)}$ = 62,5) de 37,5%.

Na segunda hipótese vamos considerar B_o = 7T logo I'_{op} = 230A e $B_{máx}$ = 8,5(T), mas neste caso mesmo com a margem de corrente ($\frac{I_{op}}{I_c(8T)}$) = 35%, não podemos afirmar que o magneto não vai entrar em "quench" devido ao alto campo magnético no seu enrolamento.

b) Modo de Corrente Oposta:

$B_o = 0$

$B_{máx} = 250$ (G/A)

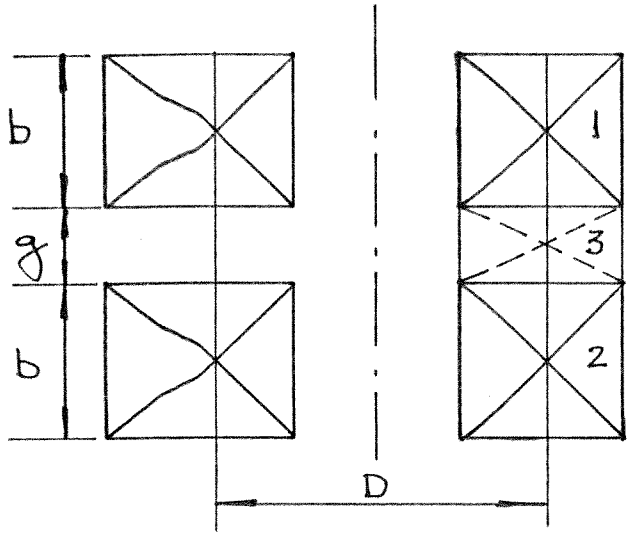
Usando-se como limite $B_{máx}$ =8T obtém-se I_{op}= 320A, porém, será reduzida pelo critério de margem de corrente para I'_{op}= 0,75 . $I_{c(8T)}$= 268,5 (A).

VII.3 - DIMENSIONAMENTO MECÂNICO

A estrutura suporte do enrolamento foi dimensionada considerando-se os dois modos de operação, para isto utilizamos um programa montado no microcomputador onde as forças F_z e F_r foram calculadas pela expressão /8/:

$$F_r = -\frac{\delta M_{12}}{\delta_r} \qquad F_z = -\frac{\delta M_{12}}{\delta_z} \tag{VII.1}$$

A expressão de M_{12} foi obtida usando-se o artifício descrito no Capítulo V, sendo que o "gap" de 20mm no enrolamento foi considerado como uma partição imaginária /9/.



$$L_{123} = L_1 + L_2 + L_3 + 2(M_{12} + M_{13} + M_{23}) \tag{VII.2}$$

$$M_{12} = \frac{1}{2}(L_{123} - L_{13} - L_{23} - L_3) \tag{VII.3}$$

$$L = N^2 D^2 \phi \cdot 10^{-3} \qquad \phi = \frac{1}{A + B(\alpha + p\beta)} \; ; \quad D = A_1 + A_2$$

$$\alpha = \frac{b}{A_1 + A_2} \; ; \quad \beta = \frac{A_2 - A_1}{A_2 + A_1}$$

(VII.4)

$$L_{123} = N^2 (A_1 + A_2) \frac{1}{A + B\left(\frac{2b+g}{A_1+A_2} + p\frac{A_2 - A_1}{A_2 + A_1}\right)}$$

(VII.5)

$$L_{23} = L_{13} = N^2 \left(\frac{b+g}{2b+g}\right)^2 (A_1 + A_2) \frac{1}{A + B\left(\frac{b+g}{A_1+A_2} + p\frac{A_2 - A_1}{A_2 + A_1}\right)}$$

(VII.6)

$$L_3 = N^2 \left(\frac{g}{2b+g}\right)^2 (A_1 + A_2) \frac{1}{A + B\left(\frac{g}{A_1+A_2} + p\frac{A_2 - A_1}{A_2 + A_1}\right)}$$

(VII.7)

$$M_{12} = \frac{1}{2} N^2 (A_1 + A_2) \left[\frac{1}{A + B\left(\frac{2b+g}{A_1+A_2} + p\frac{A_2 - A_1}{A_2 + A_1}\right)} + \right.$$

(VII.8)

$$\left. \frac{\left(\frac{g}{2b+g}\right)^2}{A + B\left(\frac{g}{A_1+A_2} + p\frac{A_2 - A_1}{A_2 + A_1}\right)} - \frac{2\left(\frac{b+g}{2b+g}\right)^2}{A + B\left(\frac{b+g}{2b+g} + p\frac{A_2 - A_1}{A_2 + A_1}\right)} \right]$$

$$F_{z(12)} = -\frac{\partial M_{12}}{\partial g} I_1 I_2 = -I_1 I_2 \frac{\partial}{\partial g}\left(\phi_{123} + \phi_3 - 2\phi_{13}\right)$$

(VII.9)

Substituindo-se os valores calculados nas derivadas de cada função Ø, obtemos:

$$F_{z(12)} = -\frac{I_1 I_2 N^2 (A_1 + A_2)}{2}\left(P_7 + P_8 + P_6\right) \qquad \text{(VII.10)}$$

onde

$$P_7 = \frac{\partial \phi_{123}}{\partial g} = \frac{\frac{-B}{A_1 + A_2}}{\left[A + B\left(\frac{2b+g}{A_1+A_2} + p\frac{A_2 - A_1}{A_2 + A_1}\right]\right.} \qquad \text{(VII.11)}$$

$$P_8 = \frac{\partial \phi_3}{\partial g} = \frac{\dfrac{4bg}{(2b+g)^3}\left[A+B\left(\dfrac{g}{A_1+A_2}+p\dfrac{A_2-A_1}{A_2+A_1}\right)\right]-\left[\dfrac{B}{A_1+A_2}\left(\dfrac{g}{2b+g}\right)^2\right]}{\left[A+B\left(\dfrac{g}{A_1+A_2}+p\dfrac{A_2-A_1}{A_2+A_1}\right)\right]^2} \qquad \text{(VII.12)}$$

$$P_6 = 2\frac{\partial \phi_{13}}{\partial g} = \frac{\dfrac{b(b+g)}{(2b+g)^3}\left[A+B\left(\dfrac{b+g}{2b+g}+p\dfrac{A_2-A_1}{A_2+A_1}\right)\right]-\left[\dfrac{B}{A_1+A_2}\left(\dfrac{b+g}{2b+g}\right)^2\right]}{\left[A+B\left(\dfrac{b+g}{A_1+A_2}+p\dfrac{A_2-A_1}{A_2+A_1}\right)\right]^2} \qquad \text{(VII.13)}$$

Da mesma forma, poderemos obter a expressão de F_r como sendo:

$$F_{r(12)} = -\frac{I_1 I_2 N^2}{2}\left\{\frac{A+B\left(\dfrac{2b+g}{D}+p\dfrac{A_2-A_1}{D}\right)+\dfrac{B(2b+g)}{D}+\dfrac{Bp(A_2-A_1)}{D}}{\left[A+B\left(\dfrac{2b+g}{D}+p\dfrac{A_2-A_1}{D}\right)\right]^2}\right.$$

$$-\frac{2\left(\dfrac{b+g}{2b+g}\right)^2\left[A+B\left(\dfrac{b+g}{D}+p\dfrac{A_2-A_1}{D}\right)+\dfrac{B(b+g)}{D}+\dfrac{Bp(A_2-A_1)}{D}\right]}{\left[A+B\left(\dfrac{b+g}{D}+p\dfrac{A_2-A_1}{D}\right)\right]^2}$$

$$\left.+\frac{\left(\dfrac{g}{2b+g}\right)^2\left[\left(A+B\dfrac{g}{D}+p\dfrac{A_2-A_1}{D}\right)+\dfrac{Bg}{D}+\dfrac{Bp(A_2-A_1)}{D}\right]}{\left[A+B\left(\dfrac{g}{D}+p\dfrac{A_2-A_1}{D}\right)\right]^2}\right\} \qquad \text{(VII.14)}$$

Com estas expressões montadas no microcomputador obtemos para a corrente de operação os valores abaixo, tabela IX.

Modo a - Corrente de mesmo sentido $I_{op} = 224A$

$F_R = 444t$ $\qquad P_R = \dfrac{F_R}{(2\pi A_2 \times 2b)} \cong 240 kg/cm^2$ (VII.15)

$F_Z = 134t$ (Atrativa) $\qquad P_Z = \dfrac{F_Z}{\pi(A_2^2 - A_1^2)} \cong 338 kg/cm^2$ (VII.16)

Tabela IX - Resultados dos Cálculos das Correntes de Operação

```
INNER RADIUS                    9.41              (CM)
OUTER RADIUS                    14.65             (CM)
A HALF OF COIL LENGTH                8.98                  (CM)
TOTAL WINDING NUMBER(COIL+CAP)            8928                  (TURN)
CAP OF COIL                2                 (CM)
MAGNET CURRENT                  224               (A)
INDUTANCE L 1=L2                3.58583               (H)
MUTUAL INDUTANCE                1.20783               (H)
TOTAL INDUTANCE                 9.58732               (H)
ATRATIVE FORCE                  .134674               (KG)

READY
```

```
INNER RADIUS                    9.41              (CM)
OUTER RADIUS                    14.65             (CM)
A HALF OF COIL LENGTH                8.98                  (CM)
TOTAL WINDING NUMBER(COIL+CAP)            8928                  (TURN)
CAP OF COIL                2                 (CM)
MAGNET CURRENT                  268               (A)
INDUTANCE L 1=L2                3.58583               (H)
MUTUAL INDUTANCE                1.20783               (H)
TOTAL INDUTANCE                 9.58732               (H)
ATRATIVE FORCE                  192778                (KG)

READY
```

```
RAIO INTERNO  (M) A1=.0941
RAIO EXTERNO  (M) A2=.1465
METADE DO COMPRIMENTO (M)  B=.0998
NUMERO TOTAL ESPIRAS N=8928
CORRENTE OPERACAO (I) I=268
INDUTANCIA  L= 11.8306 (H)
                                FR= 536.274 (TON)

READY
```

Modo b - Corrente Oposta $I_{op} = 268A$

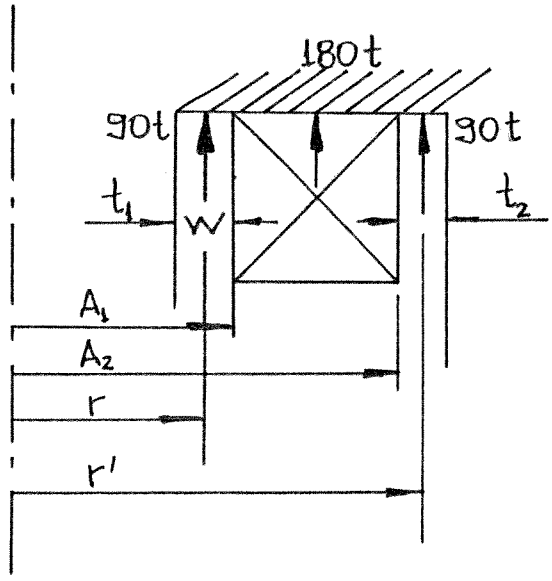
$F_R = 636t$ $P_R = 343kg/cm^2$

$F_Z = 193t$ (Repulsiva) $P_Z = 486kg/cm^2$

Observar que todos os valores são inferiores à tensão de escoamento do fio de NbTi (1,35:1) $\simeq 650kg/cm^2$.

Atenção especial deve ser dada a força de repulsão no modo b, pois, neste caso, a estrutura do magneto através da flange superior e inferior devem suportar este esforço e não permitir a deformação acima de alguns mícrons, para evitar deslocamento das espiras e geração de energia por fricção entre elas.

Para o cálculo da estrutura vamos considerar primeiramente o corpo interno e o reforço externo para suportar F $\sim$ 180t /10/.



Vamos considerar, para efeito de segurança:

a) na parede interna de espessura t_1 $\sigma_{máx} = \frac{\sigma_{inox}}{3}$, devido aos canais de refrigeração.

b) na parede externa, $\sigma_{máx} = \sigma_{inox}$

Caso a)

$$\sigma_{máx} = \frac{\sigma_{inox}}{3} = \frac{2000}{3} (kg/cm^2) \qquad (VII.17)$$

$$\frac{W}{S} = \frac{\sigma_{inox}}{3} \therefore 135cm^2 \qquad (VII.18)$$

$$S = 2\pi(A_1 - t_{1/2}).t_1 = -\pi t_1^2 + 2\pi A_1 t = 135$$

$$\therefore\ t \simeq 2{,}5cm$$

Diâmetro interno da estrutura = $|2A_1 - 5|cm$

Caso b)

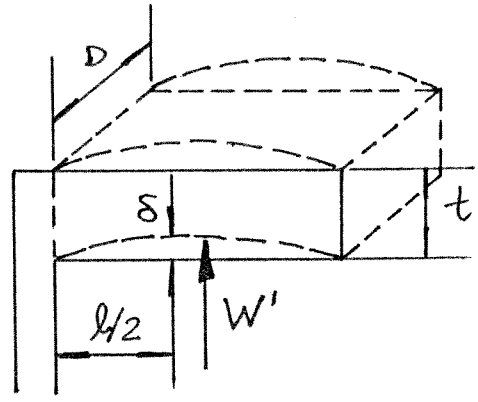
$\sigma_{máx} = 2000kg/cm^2$

Vamos considerar o reforço externo executado em 24 tirantes independentes com largura de 4cm e espessura calculada por:

$$\sigma_{inox} = \frac{W}{S} \quad \therefore \quad S = 45cm^2$$

$$S = 24 \times 4 \times t \quad \therefore\ t = 0{,}46cm \simeq 0{,}5cm$$

Agora passamos a dimensionar as flanges quanto ao problema de curvamento com os extremos fixos /10/:



$$\delta_{máx} = \frac{5W'\ell^3}{384E.I} \qquad \text{(VII.19)}$$

onde $I = \frac{1}{12} Dt^3$

$$\varepsilon_{máx} = \frac{t}{2\rho} = \frac{W'\ell^2 t}{8E.I} = \qquad \text{(VII.20)}$$

$$W' = \frac{PxDx\ell}{\ell} = \frac{180000}{6} = 30000kg/cm^2 \qquad \text{(VII.21)}$$

para calcular t obtemos as relações:

$$\delta_{máx} = \frac{7{,}031x10^{-3}}{I} \quad ; \quad \varepsilon b_{máx} = 6.75x10^{-2}\ \frac{t}{I} \qquad \text{(VII.22)}$$

$$I = 8.33 \times 10^{-2} t^3$$

Se fixarmos t, podemos obter δ e ε como:

t = 0,5cm	$\delta_{máx}$ = 0,675cm	ε_b = 2,24% > 0,2%
t = 1,0cm	$\delta_{máx}$ = 0,084cm	ε_b = 0,81% > 0,2%
t = 1,5cm	$\delta_{máx}$ = 0,025cm	ε_b = 0,36% > 0,2%
t = 2,0cm	$\delta_{máx}$ = 0,010cm	ε_b = 0,2 $\simeq$ 0,2%
t = 2,5cm	$\delta_{máx}$ = 0,0054	ε_b = 0,129 < 0,2%

O valor ε = 0,2%, refere-se a deformação máxima para o aço inox à 4.2K.

Agora vamos utilizar o programa para cálculo das tensões atuantes no enrolamento devido à pré-tensão σ_w = 250kg/cm^2, resfriamento 300K $\sim$ 4.2K, energização nos dois modos $I_{op}(\uparrow\uparrow)$ = 224A e $I_{op}(\uparrow\downarrow)$ = 268A.

Para cada caso foi calculado o mapeamento do campo magnético no enrolamento que serviu como dado de entrada para o programa força.

A tabela X dá o resultado obtido para cada efeito separadamente e o resultado final.

A partir destes valores, podemos verificar que:

$\sigma_{\theta máx}$ = 830 kg/cm^2 $\qquad$ ε_θ = 0,07%

$\sigma_{rmáx}$ = 120 kg/cm^2 $\qquad$ ε_r = - 0,03%

Considerando-se que as deformações estão bem abaixo do limite para NbTi $\varepsilon \simeq$ 0,5%, e que os cálculos anteriores através da variação da indutância mútua apresentam valores superiores e, podemos definir a estrutura (bobina) baseado nestes cálculos.

Tabela X - Cálculo de Tensões/Deformações para Operação em Correntes Opostas

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF TOTAL COIL

INNER RADIOUS= 9.410 (CM) OUTER RADIOUS= 14.650 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 4.490 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	-37.44	-57.14	-64.77	-68.58	-70.31	-70.64	-69.75	-67.43	-62.97	-54.39	-34.42
1.00	-21.49	-29.40	-35.25	-38.90	-40.75	-41.09	-40.04	-37.50	-33.17	-26.69	-18.31
2.00	-5.23	-9.04	-12.18	-14.37	-15.55	-15.73	-14.91	-13.12	-10.37	-6.80	-2.73
2.99	11.22	9.83	8.26	7.24	6.67	6.58	6.97	7.83	9.09	10.66	12.36
3.99	28.00	27.45	27.63	27.69	27.57	27.49	27.46	27.48	27.52	27.55	27.53
4.99	45.43	46.71	47.66	48.27	48.52	48.41	47.95	47.16	46.07	44.71	43.13
5.99	63.91	66.63	68.76	70.18	70.83	70.68	69.74	68.07	65.74	62.86	59.59
6.99	83.68	88.51	92.26	94.70	95.91	95.76	94.27	91.51	87.52	82.80	77.35
7.98	105.75	113.33	119.38	123.49	125.52	125.44	123.29	119.15	113.14	105.55	96.88
8.98	129.78	142.76	152.59	158.92	162.01	162.12	159.38	153.76	145.13	133.34	118.92
9.98	153.97	176.68	191.97	199.50	202.93	202.89	199.58	192.89	182.26	166.00	140.53

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	315.46	284.87	248.92	211.94	174.35	136.43	98.53	61.33	24.87	-10.71	-43.59
1.00	349.76	304.94	262.24	221.13	180.48	139.98	99.50	58.87	17.57	-25.95	-70.24
2.00	361.18	315.39	270.53	227.05	184.15	141.47	98.73	55.64	11.65	-34.45	-80.09
2.99	365.54	319.56	273.96	229.44	185.33	141.39	97.35	52.47	7.78	-39.21	-85.24
3.99	365.01	319.15	273.53	228.78	184.35	140.02	95.59	50.83	5.34	-41.82	-87.82
4.99	360.28	314.93	269.74	225.42	181.41	137.49	93.44	49.05	3.93	-42.86	-88.50
5.99	351.33	306.80	262.56	219.35	176.50	133.76	90.89	47.63	3.52	-42.39	-87.31
6.99	337.53	294.20	251.55	210.18	169.37	128.75	87.98	46.72	4.41	-40.01	-83.82
7.98	317.44	275.77	235.55	197.11	159.50	122.19	84.75	46.69	7.33	-34.67	-76.83
8.98	287.69	248.80	212.76	179.02	146.17	113.64	81.01	47.66	13.40	-24.16	-63.50
9.98	232.93	208.50	181.79	155.29	128.80	102.30	75.81	49.32	22.71	-4.40	-27.35

Tabela X - (Continuação)


```
                MECHANICAL PROPERTIES OF THE INPUT DATA N= 1

                YOUNG MODULUS
--SUPERCONDUCTOR ES=  0.1480E+12     STABILIZER EC=  0.1300E+12     INSULATER OR RAINFORCER EI=  0.2940E+11     (N/M**2)--

                VOLUME FRACTION
--SUPERCONDUCTOR VS=  0.3900E+00     STABILIZER VC=  0.5100E+00     ISULATER OR RAINFORCER VI=,  0.1000E+00     --

                THERMAL EXPANSION FROM 300K TO 4.2K
--SUPERCONDUCTOR AS= -0.1290E-02     STABILIZER AC= -0.3380E-02     INSULATER OR RAINFORCER AI= -0.2700E-02     --

          FRAME YOUNG MODULUS
--INNER FRAME EI=  0.1960E+12          OUTER FRAME EO=  0.1960E+12     (N/M**2)--
--FRAME THICKNESS TI=  0.1000E+01          FRAME THICKNESS TO=  0.2000E+00     (CM)--

          RAINFORCED FRAME YOUNG MODULUS
--INNER FRAME EI=  0.2083E+11          OUTER FRAME EO=  0.2676E+10     (N/M**2)--

          YOUNG MODULUS TOTAL
--HOOP DERECTION ES=  0.1270E+12          RADIUS DEFECTION ER=  0.1004E+12     (N/M**2)--

          THERMAL EXPANSION TOTAL
--HOOP DERECTION AS= -0.2414E-02          RADIUS DEFECTION AR= -0.2497E-02     --
```

Tabela X - (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 9.410 (CM) OUTER RADIOUS= 14.650 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 4.490 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.12 WINDING FRAME YOUNG MODULUS EI,EO= 0.2125E+06 0.2730E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND REINFORCER
-- 1/ES E= 0.1016E-15(KG/CM**2) 1/ER E= 0.8037E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.2813E-16(KG/CM**2)

MAGNET WINDING PROCEDURE WINDING TENSION SW= 250.00 0.00 (KG/CM**2)

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	-0.0273	-0.0218	-0.0177	-0.0144	-0.0117	-0.0092	-0.0071	-0.0051	-0.0033	-0.0016	0.0000
1.00	-0.0273	-0.0218	-0.0177	-0.0144	-0.0117	-0.0092	-0.0071	-0.0051	-0.0033	-0.0016	0.0000
2.00	-0.0273	-0.0218	-0.0177	-0.0144	-0.0117	-0.0092	-0.0071	-0.0051	-0.0033	-0.0016	0.0000
2.99	-0.0273	-0.0218	-0.0177	-0.0144	-0.0117	-0.0092	-0.0071	-0.0051	-0.0033	-0.0016	0.0000
3.99	-0.0273	-0.0218	-0.0177	-0.0144	-0.0117	-0.0092	-0.0071	-0.0051	-0.0033	-0.0016	0.0000
4.99	-0.0273	-0.0218	-0.0177	-0.0144	-0.0117	-0.0092	-0.0071	-0.0051	-0.0033	-0.0016	0.0000
5.99	-0.0273	-0.0218	-0.0177	-0.0144	-0.0117	-0.0092	-0.0071	-0.0051	-0.0033	-0.0016	0.0000
6.99	-0.0273	-0.0218	-0.0177	-0.0144	-0.0117	-0.0092	-0.0071	-0.0051	-0.0033	-0.0016	0.0000
7.98	-0.0273	-0.0218	-0.0177	-0.0144	-0.0117	-0.0092	-0.0071	-0.0051	-0.0033	-0.0016	0.0000
8.98	-0.0273	-0.0218	-0.0177	-0.0144	-0.0117	-0.0092	-0.0071	-0.0051	-0.0033	-0.0016	0.0000
9.98	-0.0273	-0.0218	-0.0177	-0.0144	-0.0117	-0.0092	-0.0071	-0.0051	-0.0033	-0.0016	0.0000

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	-61.57	-63.56	-61.50	-56.89	-50.60	-43.23	-35.15	-26.63	-17.85	-8.95	0.00
1.00	-61.57	-63.56	-61.50	-56.89	-50.60	-43.23	-35.15	-26.63	-17.85	-8.95	0.00
2.00	-61.57	-63.56	-61.50	-56.89	-50.60	-43.23	-35.15	-26.63	-17.85	-8.95	0.00
2.99	-61.57	-63.56	-61.50	-56.89	-50.60	-43.23	-35.15	-26.63	-17.85	-8.95	0.00
3.99	-61.57	-63.56	-61.50	-56.89	-50.60	-43.23	-35.15	-26.63	-17.85	-8.95	0.00
4.99	-61.57	-63.56	-61.50	-56.89	-50.60	-43.23	-35.15	-26.63	-17.85	-8.95	0.00
5.99	-61.57	-63.56	-61.50	-56.89	-50.60	-43.23	-35.15	-26.63	-17.85	-8.95	0.00
6.99	-61.57	-63.56	-61.50	-56.89	-50.60	-43.23	-35.15	-26.63	-17.85	-8.95	0.00
7.98	-61.57	-63.56	-61.50	-56.89	-50.60	-43.23	-35.15	-26.63	-17.85	-8.95	0.00
8.98	-61.57	-63.56	-61.50	-56.89	-50.60	-43.23	-35.15	-26.63	-17.85	-8.95	0.00
9.98	-61.57	-63.56	-61.50	-56.89	-50.60	-43.23	-35.15	-26.63	-17.85	-8.95	0.00

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	-146.85	-56.94	8.80	59.82	101.04	135.34	164.53	189.85	212.14	232.04	250.00
1.00	-146.85	-56.94	8.80	59.82	101.04	135.34	164.53	189.85	212.14	232.04	250.00
2.00	-146.85	-56.94	8.80	59.82	101.04	135.34	164.53	189.85	212.14	232.04	250.00
2.99	-146.85	-56.94	8.80	59.82	101.04	135.34	164.53	189.85	212.14	232.04	250.00
3.99	-146.85	-56.94	8.80	59.82	101.04	135.34	164.53	189.85	212.14	232.04	250.00
4.99	-146.85	-56.94	8.80	59.82	101.04	135.34	164.53	189.85	212.14	232.04	250.00
5.99	-146.85	-56.94	8.80	59.82	101.04	135.34	164.53	189.85	212.14	232.04	250.00
6.99	-146.85	-56.94	8.80	59.82	101.04	135.34	164.53	189.85	212.14	232.04	250.00
7.98	-146.85	-56.94	8.80	59.82	101.04	135.34	164.53	189.85	212.14	232.04	250.00
8.98	-146.85	-56.94	8.80	59.82	101.04	135.34	164.53	189.85	212.14	232.04	250.00
9.98	-146.85	-56.94	8.80	59.82	101.04	135.34	164.53	189.85	212.14	232.04	250.00

Tabela X - (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 9.410 (CM) : OUTER RADIOUS= 14.550 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 4.490 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.12 WINDING FRAME YOUNG MODULUS RI,RO= 0.2125E+06 0.2730E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1016E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8037E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.2813E-16(KG/CM**2)

MAGNET WINDING PROCEDURE WINDING TENSION SR= 250.00 0.00 (KG/CM**2)

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	-0.0020	-0.0047	-0.0062	-0.0072	-0.0077	-0.0079	-0.0079	-0.0077	-0.0075	-0.0071	-0.0068
1.00	-0.0020	-0.0047	-0.0062	-0.0072	-0.0077	-0.0079	-0.0079	-0.0077	-0.0075	-0.0071	-0.0068
2.00	-0.0020	-0.0047	-0.0062	-0.0072	-0.0077	-0.0079	-0.0079	-0.0077	-0.0075	-0.0071	-0.0068
2.99	-0.0020	-0.0047	-0.0062	-0.0072	-0.0077	-0.0079	-0.0079	-0.0077	-0.0075	-0.0071	-0.0068
3.99	-0.0020	-0.0047	-0.0062	-0.0072	-0.0077	-0.0079	-0.0079	-0.0077	-0.0075	-0.0071	-0.0068
4.99	-0.0020	-0.0047	-0.0062	-0.0072	-0.0077	-0.0079	-0.0079	-0.0077	-0.0075	-0.0071	-0.0068
5.99	-0.0020	-0.0047	-0.0062	-0.0072	-0.0077	-0.0079	-0.0079	-0.0077	-0.0075	-0.0071	-0.0068
6.99	-0.0020	-0.0047	-0.0062	-0.0072	-0.0077	-0.0079	-0.0079	-0.0077	-0.0075	-0.0071	-0.0068
7.98	-0.0020	-0.0047	-0.0062	-0.0072	-0.0077	-0.0079	-0.0079	-0.0077	-0.0075	-0.0071	-0.0068
8.98	-0.0020	-0.0047	-0.0062	-0.0072	-0.0077	-0.0079	-0.0079	-0.0077	-0.0075	-0.0071	-0.0068
9.98	-0.0020	-0.0047	-0.0062	-0.0072	-0.0077	-0.0079	-0.0079	-0.0077	-0.0075	-0.0071	-0.0068

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	-0.0097	-0.0027	0.0023	0.0062	0.0092	0.0116	0.0136	0.0154	0.0169	0.0182	0.0193
1.00	-0.0097	-0.0027	0.0023	0.0062	0.0092	0.0116	0.0136	0.0154	0.0169	0.0182	0.0193
2.00	-0.0097	-0.0027	0.0023	0.0062	0.0092	0.0116	0.0136	0.0154	0.0169	0.0182	0.0193
2.99	-0.0097	-0.0027	0.0023	0.0062	0.0092	0.0116	0.0136	0.0154	0.0169	0.0182	0.0193
3.99	-0.0097	-0.0027	0.0023	0.0062	0.0092	0.0116	0.0136	0.0154	0.0169	0.0182	0.0193
4.99	-0.0097	-0.0027	0.0023	0.0062	0.0092	0.0116	0.0136	0.0154	0.0169	0.0182	0.0193
5.99	-0.0097	-0.0027	0.0023	0.0062	0.0092	0.0116	0.0136	0.0154	0.0169	0.0182	0.0193
6.99	-0.0097	-0.0027	0.0023	0.0062	0.0092	0.0116	0.0136	0.0154	0.0169	0.0182	0.0193
7.98	-0.0097	-0.0027	0.0023	0.0062	0.0092	0.0116	0.0136	0.0154	0.0169	0.0182	0.0193
8.98	-0.0097	-0.0027	0.0023	0.0062	0.0092	0.0116	0.0136	0.0154	0.0169	0.0182	0.0193
9.98	-0.0097	-0.0027	0.0023	0.0062	0.0092	0.0116	0.0136	0.0154	0.0169	0.0182	0.0193

Tabela X - (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 9.410 (CM) OUTER RADIOUS= 14.650 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 4.490 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY E= 1.12 WINDING FRAME YOUNG MODULUS ET,ER= 0.2125E+06 0.2730E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND REINFORCER
-- 1/ES U= 0.1016E-15(KG/CM**2) 1/ES E= 0.6037E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.2813E-16(KG/CM**2) --

MAGNET COOLING PROCEDURE--COOL DOWN FROM 300K TO 4.2K--

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	-0.2252	-0.2383	-0.2514	-0.2645	-0.2776	-0.2906	-0.3037	-0.3168	-0.3298	-0.3429	-0.3559
1.00	-0.2252	-0.2383	-0.2514	-0.2645	-0.2776	-0.2906	-0.3037	-0.3168	-0.3298	-0.3429	-0.3559
2.00	-0.2252	-0.2383	-0.2514	-0.2645	-0.2776	-0.2906	-0.3037	-0.3168	-0.3298	-0.3429	-0.3559
2.99	-0.2252	-0.2383	-0.2514	-0.2645	-0.2776	-0.2906	-0.3037	-0.3168	-0.3298	-0.3429	-0.3559
3.99	-0.2252	-0.2383	-0.2514	-0.2645	-0.2776	-0.2906	-0.3037	-0.3168	-0.3298	-0.3429	-0.3559
4.99	-0.2252	-0.2383	-0.2514	-0.2645	-0.2776	-0.2906	-0.3037	-0.3168	-0.3298	-0.3429	-0.3559
5.99	-0.2252	-0.2383	-0.2514	-0.2645	-0.2776	-0.2906	-0.3037	-0.3168	-0.3298	-0.3429	-0.3559
6.99	-0.2252	-0.2383	-0.2514	-0.2645	-0.2776	-0.2906	-0.3037	-0.3168	-0.3298	-0.3429	-0.3559
7.98	-0.2252	-0.2383	-0.2514	-0.2645	-0.2776	-0.2906	-0.3037	-0.3168	-0.3298	-0.3429	-0.3559
8.98	-0.2252	-0.2383	-0.2514	-0.2645	-0.2776	-0.2906	-0.3037	-0.3168	-0.3298	-0.3429	-0.3559
9.98	-0.2252	-0.2383	-0.2514	-0.2645	-0.2776	-0.2906	-0.3037	-0.3168	-0.3298	-0.3429	-0.3559

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	0.00	1.24	2.02	2.44	2.59	2.50	2.24	1.83	1.31	0.69	0.00
1.00	0.00	1.24	2.02	2.44	2.59	2.50	2.24	1.83	1.31	0.69	0.00
2.00	0.00	1.24	2.02	2.44	2.59	2.50	2.24	1.83	1.31	0.69	0.00
2.99	0.00	1.24	2.02	2.44	2.59	2.50	2.24	1.83	1.31	0.69	0.00
3.99	0.00	1.24	2.02	2.44	2.59	2.50	2.24	1.83	1.31	0.69	0.00
4.99	0.00	1.24	2.02	2.44	2.59	2.50	2.24	1.83	1.31	0.69	0.00
5.99	0.00	1.24	2.02	2.44	2.59	2.50	2.24	1.83	1.31	0.69	0.00
6.99	0.00	1.24	2.02	2.44	2.59	2.50	2.24	1.83	1.31	0.69	0.00
7.98	0.00	1.24	2.02	2.44	2.59	2.50	2.24	1.83	1.31	0.69	0.00
8.98	0.00	1.24	2.02	2.44	2.59	2.50	2.24	1.83	1.31	0.69	0.00
9.98	0.00	1.24	2.02	2.44	2.59	2.50	2.24	1.83	1.31	0.69	0.00

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	27.09	20.04	13.77	8.13	3.02	-1.65	-5.93	-9.89	-13.57	-17.00	-20.21
1.00	27.09	20.04	13.77	8.13	3.02	-1.65	-5.93	-9.89	-13.57	-17.00	-20.21
2.00	27.09	20.04	13.77	8.13	3.02	-1.65	-5.93	-9.89	-13.57	-17.00	-20.21
2.99	27.09	20.04	13.77	8.13	3.02	-1.65	-5.93	-9.89	-13.57	-17.00	-20.21
3.99	27.09	20.04	13.77	8.13	3.02	-1.65	-5.93	-9.89	-13.57	-17.00	-20.21
4.99	27.09	20.04	13.77	8.13	3.02	-1.65	-5.93	-9.89	-13.57	-17.00	-20.21
5.99	27.09	20.04	13.77	8.13	3.02	-1.65	-5.93	-9.89	-13.57	-17.00	-20.21
6.99	27.09	20.04	13.77	8.13	3.02	-1.65	-5.93	-9.89	-13.57	-17.00	-20.21
7.98	27.09	20.04	13.77	8.13	3.02	-1.65	-5.93	-9.89	-13.57	-17.00	-20.21
8.98	27.09	20.04	13.77	8.13	3.02	-1.65	-5.93	-9.89	-13.57	-17.00	-20.21

Tabela X - (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 9.410 (CM) OUTER RADIOUS= 14.650 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 4.490 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.12 WINDING FRAME YOUNG MODULUS RI,RO= 0.2125E+06) 0.2730E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1016E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8037E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.2813E-16(KG/CM**2)

MAGNET COOLING PROCEDURE--COOL DOWN FROM 300K TO 4.2K--

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	-0.0007	-0.0004	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005
1.00	-0.0007	-0.0004	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005
2.00	-0.0007	-0.0004	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005
2.99	-0.0007	-0.0004	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005
3.99	-0.0007	-0.0004	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005
4.99	-0.0007	-0.0004	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005
5.99	-0.0007	-0.0004	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005
6.99	-0.0007	-0.0004	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005
7.98	-0.0007	-0.0004	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005
8.98	-0.0007	-0.0004	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005
9.98	-0.0007	-0.0004	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	0.0021	0.0015	0.0010	0.0006	0.0002	-0.0002	-0.0005	-0.0008	-0.0011	-0.0013	-0.0016
1.00	0.0021	0.0015	0.0010	0.0006	0.0002	-0.0002	-0.0005	-0.0008	-0.0011	-0.0013	-0.0016
2.00	0.0021	0.0015	0.0010	0.0006	0.0002	-0.0002	-0.0005	-0.0008	-0.0011	-0.0013	-0.0016
2.99	0.0021	0.0015	0.0010	0.0006	0.0002	-0.0002	-0.0005	-0.0008	-0.0011	-0.0013	-0.0016
3.99	0.0021	0.0015	0.0010	0.0006	0.0002	-0.0002	-0.0005	-0.0008	-0.0011	-0.0013	-0.0016
4.99	0.0021	0.0015	0.0010	0.0006	0.0002	-0.0002	-0.0005	-0.0008	-0.0011	-0.0013	-0.0016
5.99	0.0021	0.0015	0.0010	0.0006	0.0002	-0.0002	-0.0005	-0.0008	-0.0011	-0.0013	-0.0016
6.99	0.0021	0.0015	0.0010	0.0006	0.0002	-0.0002	-0.0005	-0.0008	-0.0011	-0.0013	-0.0016
7.98	0.0021	0.0015	0.0010	0.0006	0.0002	-0.0002	-0.0005	-0.0008	-0.0011	-0.0013	-0.0016
8.98	0.0021	0.0015	0.0010	0.0006	0.0002	-0.0002	-0.0005	-0.0008	-0.0011	-0.0013	-0.0016
9.98	0.0021	0.0015	0.0010	0.0006	0.0002	-0.0002	-0.0005	-0.0008	-0.0011	-0.0013	-0.0016

Tabela X - (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 9.410 (CM) OUTER RADIOUS= 14.650 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 4.490 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.12 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.2125E+06 0.2730E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1016E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8037E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.2813E-16(KG/CM**2) --

STRESS DISTRIBUTION OF THE MAGNET (F-M FORCE)

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	0.0686	0.0673	0.0660	0.0647	0.0634	0.0622	0.0610	0.0599	0.0589	0.0580	0.0573
1.00	0.0692	0.0678	0.0665	0.0651	0.0638	0.0625	0.0612	0.0600	0.0590	0.0581	0.0573
2.00	0.0694	0.0681	0.0667	0.0653	0.0639	0.0626	0.0613	0.0601	0.0590	0.0581	0.0573
2.99	0.0691	0.0678	0.0664	0.0650	0.0636	0.0623	0.0610	0.0598	0.0587	0.0578	0.0570
3.99	0.0683	0.0670	0.0656	0.0642	0.0628	0.0615	0.0602	0.0590	0.0579	0.0570	0.0563
4.99	0.0669	0.0656	0.0643	0.0629	0.0615	0.0602	0.0590	0.0578	0.0567	0.0558	0.0551
5.99	0.0650	0.0637	0.0624	0.0611	0.0598	0.0585	0.0573	0.0561	0.0551	0.0542	0.0535
6.99	0.0625	0.0612	0.0600	0.0587	0.0574	0.0562	0.0550	0.0539	0.0529	0.0521	0.0514
7.98	0.0593	0.0581	0.0569	0.0557	0.0545	0.0534	0.0522	0.0512	0.0503	0.0495	0.0488
8.98	0.0554	0.0543	0.0532	0.0521	0.0510	0.0500	0.0489	0.0480	0.0471	0.0464	0.0458
9.98	0.0513	0.0503	0.0493	0.0484	0.0474	0.0465	0.0457	0.0449	0.0441	0.0435	0.0429

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	0.00	-18.26	-33.60	-45.29	-52.78	-55.60	-53.40	-45.89	-32.83	-14.03	10.67
1.00	0.00	-24.05	-43.78	-58.52	-67.77	-71.09	-68.17	-58.74	-42.57	-19.48	10.68
2.00	0.00	-26.19	-47.54	-63.41	-73.31	-76.82	-73.64	-63.49	-46.17	-21.49	10.69
2.99	0.00	-27.25	-49.40	-65.83	-76.04	-79.64	-76.32	-65.83	-47.95	-22.51	10.63
3.99	0.00	-27.70	-50.17	-66.80	-77.12	-80.74	-77.37	-66.75	-48.67	-22.97	10.49
4.99	0.00	-27.66	-50.08	-66.65	-76.92	-80.52	-77.15	-66.56	-48.57	-23.01	10.27
5.99	0.00	-27.16	-49.15	-65.39	-75.46	-78.97	-75.66	-65.29	-47.66	-22.62	9.97
6.99	0.00	-26.08	-47.20	-62.80	-72.46	-75.84	-72.66	-62.70	-45.77	-21.72	9.58
7.98	0.00	-24.17	-43.77	-58.27	-67.27	-70.43	-67.48	-58.22	-42.46	-20.06	9.10
8.98	0.00	-20.81	-37.79	-50.41	-58.28	-61.08	-58.55	-50.48	-36.70	-17.07	8.53
9.98	0.00	-12.53	-23.15	-31.31	-36.56	-38.57	-37.07	-31.83	-22.66	-9.43	8.00

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	944.68	871.09	805.41	746.97	695.28	649.95	610.68	577.23	549.41	527.08	510.12
1.00	952.66	876.30	808.13	747.59	694.23	647.72	607.80	574.27	546.97	525.77	510.57
2.00	955.68	876.29	809.20	747.87	693.89	646.94	606.78	573.22	546.11	525.32	510.77
2.99	951.71	874.19	804.99	743.58	689.56	642.64	602.58	569.20	542.36	521.93	507.85
3.99	940.30	863.42	794.79	733.89	680.36	633.89	594.26	561.31	534.89	514.89	501.23
4.99	921.38	845.84	778.41	718.59	666.02	620.41	581.56	549.28	523.46	503.99	490.74
5.99	894.75	821.29	755.70	697.53	646.41	602.08	564.33	533.00	507.97	489.13	476.40
6.99	859.83	789.24	726.22	670.32	621.20	578.60	542.33	512.22	488.16	470.05	457.82
7.98	816.07	749.30	689.68	636.80	590.30	549.96	515.56	486.97	464.05	446.73	434.92
8.98	763.01	701.26	646.13	597.19	554.12	516.65	484.59	457.79	436.13	419.51	407.86

Tabela X - (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 9.410 (CM) OUTER RADIOUS= 14.650 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 4.490 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.12 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BT,BO= 0.2125E+06 0.2730E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1016E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8037E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.2813E-16(KG/CM**2)

STRESS DISTRIBUTION OF THE MAGNET (E-M FORCE)

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	-0.0255	-0.0253	-0.0250	-0.0246	-0.0239	-0.0230	-0.0217	-0.0201	-0.0180	-0.0156	-0.0127
1.00	-0.0257	-0.0260	-0.0261	-0.0259	-0.0254	-0.0244	-0.0231	-0.0212	-0.0189	-0.0161	-0.0128
2.00	-0.0256	-0.0263	-0.0265	-0.0264	-0.0259	-0.0250	-0.0236	-0.0217	-0.0193	-0.0163	-0.0128
2.99	-0.0257	-0.0263	-0.0266	-0.0265	-0.0261	-0.0251	-0.0237	-0.0218	-0.0193	-0.0163	-0.0127
3.99	-0.0254	-0.0260	-0.0264	-0.0263	-0.0259	-0.0250	-0.0236	-0.0217	-0.0192	-0.0162	-0.0125
4.99	-0.0249	-0.0256	-0.0259	-0.0259	-0.0255	-0.0246	-0.0232	-0.0213	-0.0189	-0.0159	-0.0123
5.99	-0.0242	-0.0248	-0.0252	-0.0252	-0.0248	-0.0240	-0.0226	-0.0208	-0.0184	-0.0154	-0.0119
6.99	-0.0232	-0.0239	-0.0242	-0.0242	-0.0239	-0.0230	-0.0217	-0.0200	-0.0177	-0.0148	-0.0114
7.98	-0.0220	-0.0226	-0.0229	-0.0229	-0.0225	-0.0217	-0.0205	-0.0188	-0.0167	-0.0140	-0.0109
8.98	-0.0206	-0.0210	-0.0211	-0.0211	-0.0207	-0.0199	-0.0188	-0.0173	-0.0154	-0.0130	-0.0102
9.98	-0.0191	-0.0188	-0.0186	-0.0182	-0.0177	-0.0169	-0.0160	-0.0148	-0.0133	-0.0116	-0.0095

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	0.0729	0.0677	0.0631	0.0589	0.0551	0.0517	0.0486	0.0458	0.0433	0.0411	0.0391
1.00	0.0735	0.0683	0.0636	0.0593	0.0554	0.0519	0.0488	0.0459	0.0434	0.0411	0.0391
2.00	0.0738	0.0685	0.0637	0.0594	0.0555	0.0520	0.0488	0.0460	0.0434	0.0411	0.0391
2.99	0.0735	0.0682	0.0635	0.0592	0.0553	0.0518	0.0486	0.0457	0.0432	0.0409	0.0389
3.99	0.0726	0.0674	0.0627	0.0585	0.0546	0.0511	0.0480	0.0451	0.0426	0.0404	0.0384
4.99	0.0711	0.0660	0.0614	0.0573	0.0535	0.0501	0.0470	0.0442	0.0417	0.0395	0.0376
5.99	0.0691	0.0641	0.0597	0.0556	0.0519	0.0486	0.0456	0.0429	0.0405	0.0384	0.0365
6.99	0.0664	0.0616	0.0573	0.0534	0.0499	0.0467	0.0438	0.0412	0.0389	0.0369	0.0351
7.98	0.0630	0.0585	0.0544	0.0507	0.0471	0.0444	0.0416	0.0392	0.0370	0.0350	0.0333
8.98	0.0589	0.0547	0.0509	0.0475	0.0443	0.0415	0.0390	0.0367	0.0347	0.0328	0.0313
9.98	0.0545	0.0507	0.0472	0.0440	0.0412	0.0387	0.0364	0.0343	0.0324	0.0308	0.0293

Tabela X - (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 9.410 (CM) OUTER RADIOUS= 14.650 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 4.490 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.12 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.2125E+06 0.2730E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1016E-15(KG/CM**2) .1/ER R= 0.8037E-16(KG/CM**2) VRS/FS OR VSR/ER V= 0.2813E-16(KG/CM**2) --

TOTAL OF THE MAGNET STRESS AND STRAIN DISTRIBUTION --WINDING,COOL DOWN,E-M FORCE--

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	-0.1838	-0.1929	-0.2032	-0.2143	-0.2258	-0.2377	-0.2498	-0.2620	-0.2743	-0.2865	-0.2987
1.00	-0.1833	-0.1923	-0.2027	-0.2139	-0.2255	-0.2374	-0.2496	-0.2619	-0.2742	-0.2864	-0.2986
2.00	-0.1830	-0.1921	-0.2025	-0.2137	-0.2253	-0.2373	-0.2495	-0.2618	-0.2741	-0.2864	-0.2986
2.99	-0.1833	-0.1924	-0.2028	-0.2139	-0.2256	-0.2376	-0.2498	-0.2621	-0.2744	-0.2867	-0.2989
3.99	-0.1842	-0.1932	-0.2036	-0.2147	-0.2264	-0.2384	-0.2506	-0.2629	-0.2752	-0.2875	-0.2997
4.99	-0.1855	-0.1945	-0.2049	-0.2160	-0.2277	-0.2397	-0.2518	-0.2641	-0.2764	-0.2887	-0.3009
5.99	-0.1875	-0.1964	-0.2063	-0.2179	-0.2295	-0.2414	-0.2536	-0.2658	-0.2781	-0.2903	-0.3025
6.99	-0.1900	-0.1989	-0.2092	-0.2202	-0.2318	-0.2437	-0.2558	-0.2680	-0.2802	-0.2924	-0.3046
7.98	-0.1932	-0.2020	-0.2122	-0.2232	-0.2347	-0.2465	-0.2586	-0.2707	-0.2829	-0.2950	-0.3071
8.98	-0.1970	-0.2058	-0.2159	-0.2268	-0.2382	-0.2499	-0.2619	-0.2739	-0.2860	-0.2981	-0.3102
9.98	-0.2011	-0.2098	-0.2198	-0.2306	-0.2418	-0.2534	-0.2651	-0.2771	-0.2890	-0.3010	-0.3130

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	-61.57	-80.58	-98.08	-89.73	-100.79	-96.32	-86.31	-70.69	-49.38	-22.20	10.67
1.00	-61.57	-80.37	-103.26	-112.46	-115.78	-111.82	-101.09	-83.54	-59.12	-27.73	10.68
2.00	-61.57	-80.51	-107.02	-117.85	-121.32	-117.55	-106.55	-88.29	-62.72	-29.75	10.69
2.99	-61.57	-80.57	-108.54	-120.27	-124.05	-120.37	-109.23	-90.63	-64.50	-30.77	10.63
3.99	-61.57	-80.02	-109.05	-121.24	-125.13	-121.47	-110.28	-91.55	-65.22	-31.23	10.49
4.99	-61.57	-79.68	-109.56	-121.09	-124.94	-121.25	-110.06	-91.37	-65.12	-31.26	10.27
5.99	-61.57	-79.48	-108.63	-119.84	-123.47	-119.70	-108.58	-90.09	-64.21	-30.88	9.97
6.99	-61.57	-80.40	-106.66	-117.24	-120.48	-116.57	-105.58	-87.50	-62.32	-29.97	9.58
7.98	-61.57	-80.49	-103.25	-112.72	-115.29	-111.15	-100.39	-83.02	-59.01	-28.32	9.10
8.98	-61.57	-83.13	-97.27	-104.85	-106.30	-101.81	-91.46	-75.28	-53.25	-25.32	8.53
9.98	-61.57	-74.85	-82.64	-85.75	-64.58	-79.30	-69.98	-56.63	-39.21	-17.69	8.00

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	824.92	834.19	827.97	814.92	799.34	783.64	769.28	757.18	747.99	742.13	739.91
1.00	832.90	839.40	830.70	815.54	798.29	781.41	766.40	754.23	745.54	740.81	740.36
2.00	835.92	841.39	831.77	815.83	797.95	780.63	765.38	753.18	744.68	740.37	740.56
2.99	831.95	837.24	827.56	811.53	793.63	776.33	761.18	749.16	740.93	736.98	737.64
3.99	820.54	826.53	817.35	801.84	784.42	767.58	752.86	741.27	733.47	729.94	731.02
4.99	801.62	808.95	800.98	786.54	770.08	754.10	740.15	729.24	722.04	719.04	720.58
5.99	774.99	784.39	778.27	765.48	750.47	735.77	722.93	712.96	706.54	704.17	706.19
6.99	740.07	752.34	748.79	738.27	725.26	712.29	700.93	692.18	686.74	685.10	687.61
7.98	696.31	712.40	712.25	704.75	694.37	683.65	674.16	666.92	662.63	661.77	664.71
8.98	643.25	664.36	668.70	665.15	658.18	650.34	643.19	637.74	634.70	634.56	637.65
9.98	586.67	614.93	625.66	627.67	625.37	621.26	616.86	613.17	610.84	610.35	612.02

Tabela X - (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 9.410 (CM) OUTER RADIOUS= 14.650 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 4.490 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.12 WINDING FRAME YOUNG MODULUS ET,RG= 0.2125E+06 0.2730E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND REINFORCER
-- 1/ES E= 0.1016E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8037E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.2813E-16(KG/CM**2)

TOTAL OF THE MAGNET STRESS AND STRAIN DISTRIBUTION --WINDING,COOL DOWN,E-M FORCE--

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	-0.0283	-0.0304	-0.0315	-0.0318	-0.0314	-0.0306	-0.0292	-0.0274	-0.0250	-0.0222	-0.0189
1.00	-0.0285	-0.0311	-0.0325	-0.0331	-0.0329	-0.0320	-0.0306	-0.0285	-0.0259	-0.0227	-0.0190
2.00	-0.0286	-0.0314	-0.0329	-0.0335	-0.0334	-0.0326	-0.0311	-0.0290	-0.0262	-0.0229	-0.0190
2.99	-0.0285	-0.0314	-0.0330	-0.0337	-0.0335	-0.0327	-0.0312	-0.0291	-0.0263	-0.0229	-0.0189
3.99	-0.0282	-0.0311	-0.0328	-0.0335	-0.0334	-0.0326	-0.0311	-0.0290	-0.0262	-0.0228	-0.0187
4.99	-0.0277	-0.0306	-0.0323	-0.0331	-0.0330	-0.0322	-0.0307	-0.0286	-0.0259	-0.0225	-0.0185
5.99	-0.0269	-0.0299	-0.0316	-0.0324	-0.0323	-0.0316	-0.0301	-0.0281	-0.0254	-0.0220	-0.0181
6.99	-0.0260	-0.0290	-0.0306	-0.0314	-0.0314	-0.0306	-0.0292	-0.0272	-0.0246	-0.0214	-0.0176
7.98	-0.0248	-0.0277	-0.0293	-0.0300	-0.0300	-0.0293	-0.0280	-0.0261	-0.0237	-0.0206	-0.0171
8.98	-0.0234	-0.0261	-0.0276	-0.0282	-0.0282	-0.0275	-0.0263	-0.0246	-0.0223	-0.0196	-0.0164
9.98	-0.0219	-0.0239	-0.0250	-0.0253	-0.0252	-0.0245	-0.0235	-0.0221	-0.0203	-0.0182	-0.0158

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	9.41	9.93	10.46	10.98	11.51	12.03	12.55	13.08	13.60	14.13	14.65
0.00	0.0653	0.0666	0.0664	0.0656	0.0644	0.0631	0.0617	0.0604	0.0591	0.0579	0.0568
1.00	0.0660	0.0671	0.0669	0.0660	0.0647	0.0633	0.0619	0.0605	0.0591	0.0579	0.0569
2.00	0.0662	0.0673	0.0671	0.0662	0.0649	0.0634	0.0620	0.0605	0.0592	0.0580	0.0569
2.99	0.0659	0.0671	0.0668	0.0659	0.0646	0.0632	0.0617	0.0603	0.0589	0.0577	0.0567
3.99	0.0650	0.0662	0.0661	0.0652	0.0639	0.0625	0.0611	0.0597	0.0584	0.0572	0.0561
4.99	0.0635	0.0649	0.0648	0.0640	0.0628	0.0615	0.0601	0.0588	0.0575	0.0563	0.0553
5.99	0.0615	0.0630	0.0630	0.0623	0.0613	0.0600	0.0587	0.0575	0.0563	0.0552	0.0542
6.99	0.0588	0.0605	0.0607	0.0602	0.0592	0.0581	0.0570	0.0558	0.0547	0.0537	0.0528
7.98	0.0554	0.0573	0.0578	0.0574	0.0567	0.0558	0.0548	0.0537	0.0527	0.0518	0.0511
8.98	0.0513	0.0535	0.0542	0.0542	0.0537	0.0529	0.0521	0.0513	0.0504	0.0497	0.0490
9.98	0.0469	0.0495	0.0505	0.0508	0.0506	0.0501	0.0495	0.0489	0.0482	0.0476	0.0470

Após estas considerações as figuras 6 e 7 apresentam a bobina final para enrolamento do magneto supercondutor.

VII.4 - CÁLCULO, INDUTÂNCIA, ENERGIA E CIRCUITO DE PROTEÇÃO

O cálculo da indutância já feito no tópico VII.3 deste capítulo resultou em:

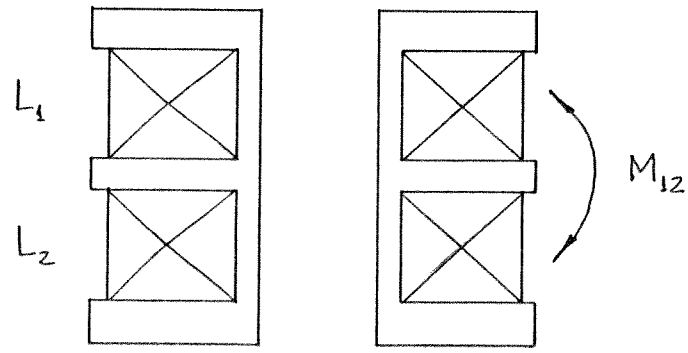
$$L_1 = L = 3,58 \text{ (H)}$$

$$M_{12} = 1,20 \text{ (H)}$$

$$L = L + L + 2M_{12} = 9,56 \text{ H}$$

$$E_{\uparrow\uparrow} = \frac{1}{2} L (I_{op})^2 = \frac{1}{2} \; 9,56 \; 224^2 \simeq 240\text{KJ}$$

$$E_{\uparrow\downarrow} = \frac{1}{2} L (I_{op})^2 = \frac{1}{2} \; 9,56 \; 268^2 \simeq 345\text{KJ}$$



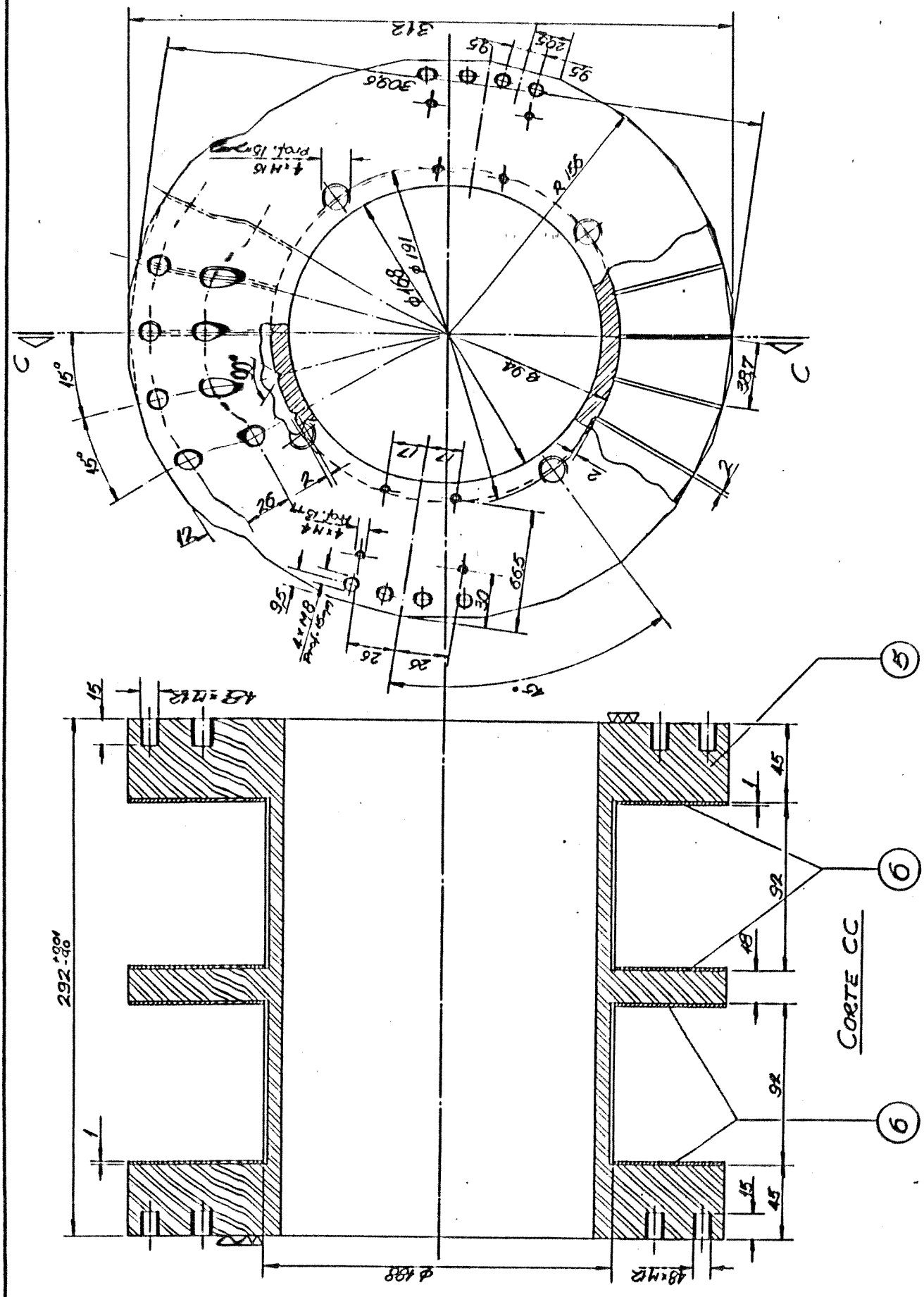


Fig. 6 - Suporte do Magneto "Split-Pair"

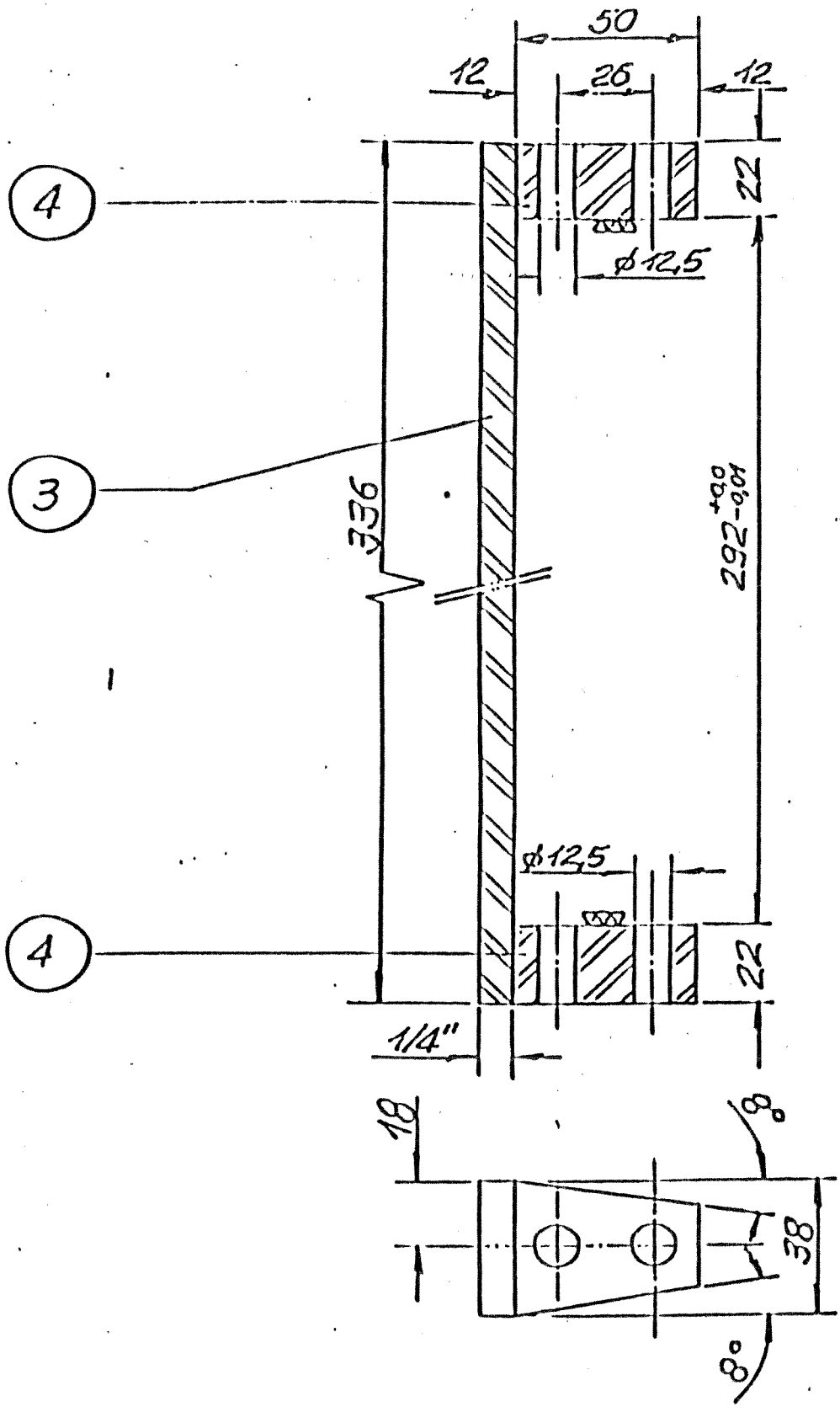
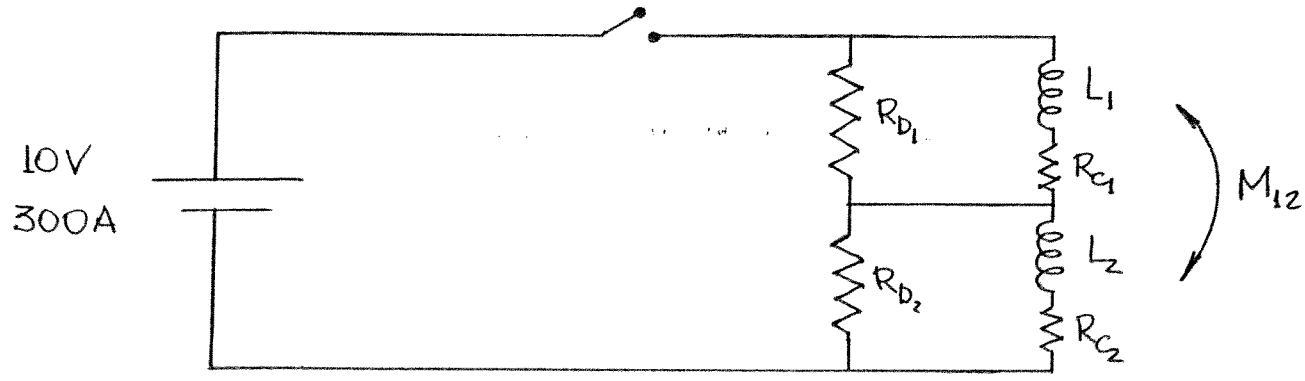


Fig. 7 - Suporte do Magneto Split-Pair

Considerando-se o nível maior de energia armazenada podemos calcular os resistores de proteção conforme abaixo /11/:



$$\frac{E_C}{E_D} = \left(\frac{R_{C1} + R_{C2}}{R_{D1} + R_{D2}}\right)^2 \text{ no pior caso } R_{C1} = R_{C2} \qquad \text{(VII.23)}$$

$$R_C = \rho \frac{\ell}{A_{cu}} = 10^{-8} \times \frac{3046 \times 10^2}{5{,}51 \times 10^{-3}} = 0{,}552 \simeq 0{,}5\Omega \qquad \text{(VII.24)}$$

Vamos usar a relação $R_D = 3R_C$ para permitir que somente 10% da energia seja dissipada internamente:

$$R_{D1} = R_{D2} = 1{,}5\ \Omega \qquad R_{C1} = R_{C2} = 0{,}5\ \Omega \qquad \text{(VII.25)}$$

$$\frac{E_C}{E_D} = \left(\frac{2R_{C1}}{2R_{D1}}\right)^2 = \frac{1}{9}$$

$$E_C = 34{,}5\ kJ \quad ; \quad E_D = 310{,}5\ kJ$$

$$V_{máx} = I R_D = 268 \cdot 1{,}5 = 402V$$

$$\text{Volt/Camada} = \frac{402}{45} \simeq 10V$$

Tensão máxima do isolamento = 145V >> 10V

Nesta condição o uso de $R_D = 1{,}5\Omega$ permite um alto coeficiente de segurança para o isolamento entre camadas.

A quantidade de hélio evaporado durante o "quench" devido a dissipação de energia no magneto será:

$$\ell_{He} = \frac{34{,}5}{2{,}7} \simeq 13\ell$$

VII.5 - CONSTRUÇÃO DO MAGNETO "SPLIT-PAIR"

Após os cálculos do mapeamento do campo magnético, associado ao cálculo das tensões e deformações no enrolamento e considerando-se as forças F_R e F_Z nos dois modos de operação, iniciamos os trabalhos de construção do magneto a partir da bobina da fig. 6 deste Capítulo.

O sistema de enrolamento foi projetado e executado como mostram as figs. 8 e 9 utilizando-se para acionamento mecânico um torno mecânico, com motor DC e controlador de velocidade. O tensionamento feito na parte central se mantém constante sobre a ação da gravidade equivalendo a $\sigma_w = 500 kg/cm^2$ ou seja uma massa de 4,8kg.

Este sistema ainda permite sob tensão desenrolar 6m de fio sem a necessidade de se redobrar o carretel alimentador.

O guia-fio foi projetado com sistema de rosca sem fim com passo ajustado à largura do fio (1,2mm), que permitiu-se manter constante o ângulo de alimentação em relação à bobina.

As figuras 10 e 11 mostram o carretel quando da colagem dos "strain—gauge" para se medir as deformações calculadas através dos defeitos de resfriamento e energização.

Para o isolamento entre a bobina de inox e o enrolamento foram colocadas duas camadas de "mylar" de 0,1mm, que, com orifícios na posição dos canais de refrigeração, também foi usado entre camadas posteriores.

A figura 12 mostra parte da execução do enrolamento em uma das partes, onde observamos a manutenção da superfície plana pois foi utilizada a técnica de calçamento lateral com fio de cobre iso-

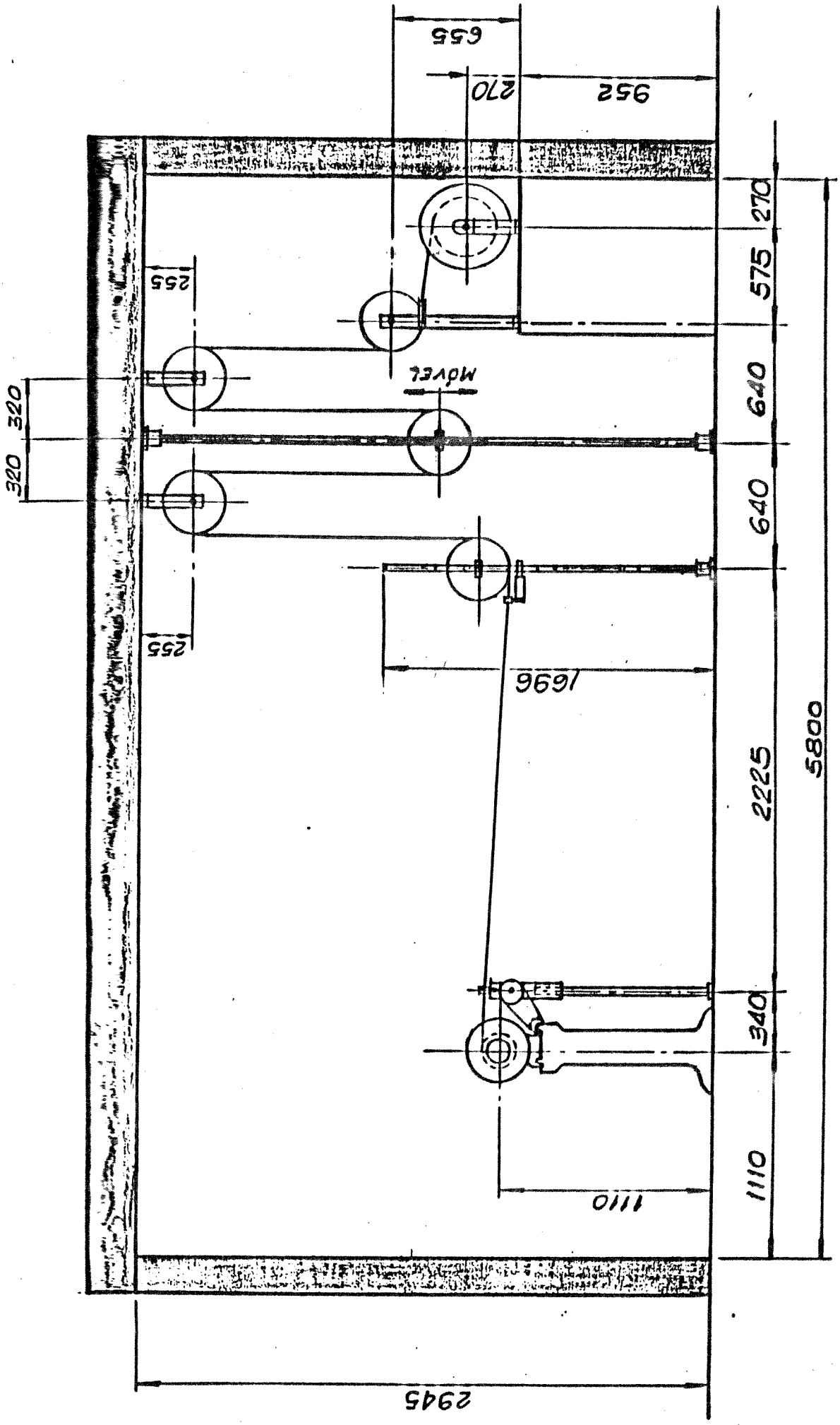


Fig. 8 - Sistema de Tensionamento para Enrolamento do Magneto Supercondutor

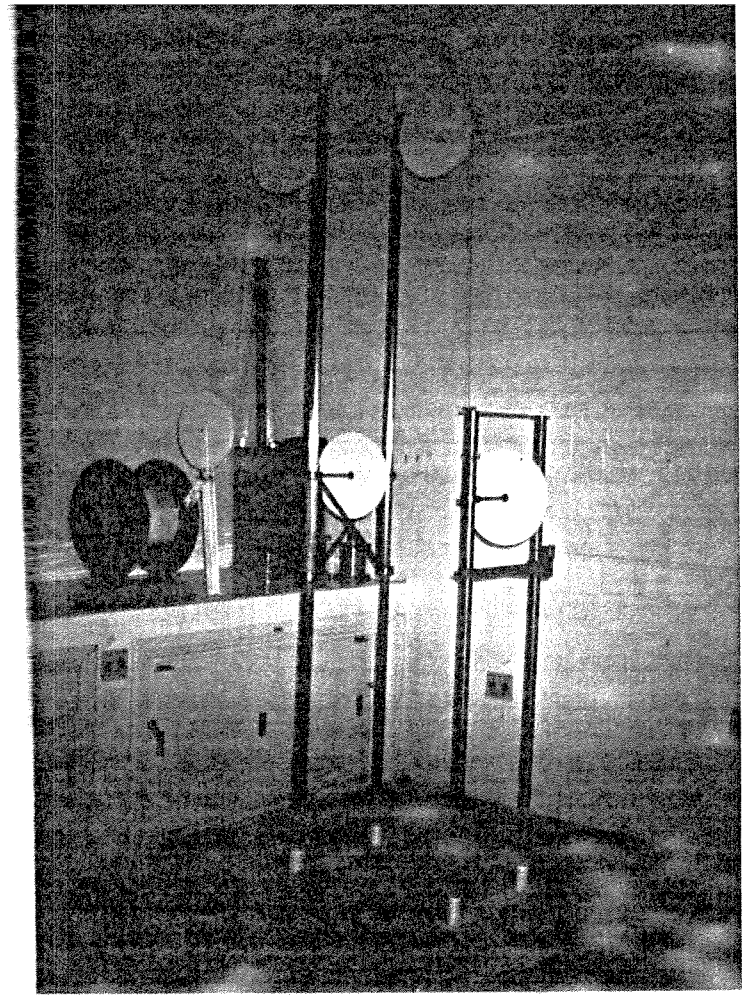


Fig. 9

Sistema móvel de tensionamento para possibilitar o desenrolamento de parte da camada

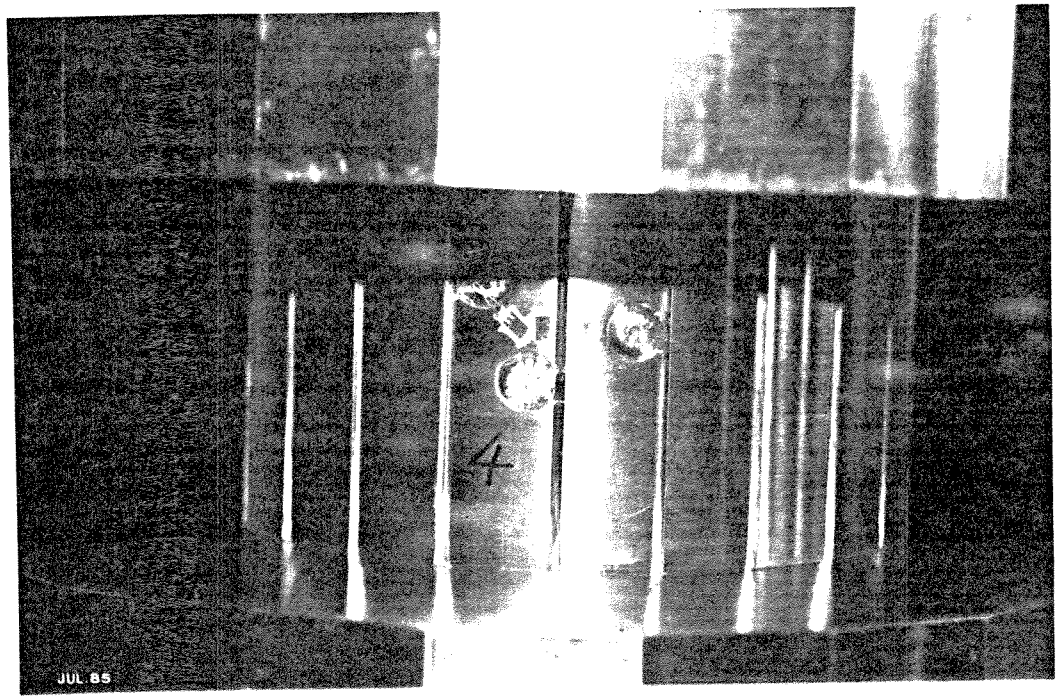


Fig. 10

Canais de refrigeração "strain gauge" colocados no carretel

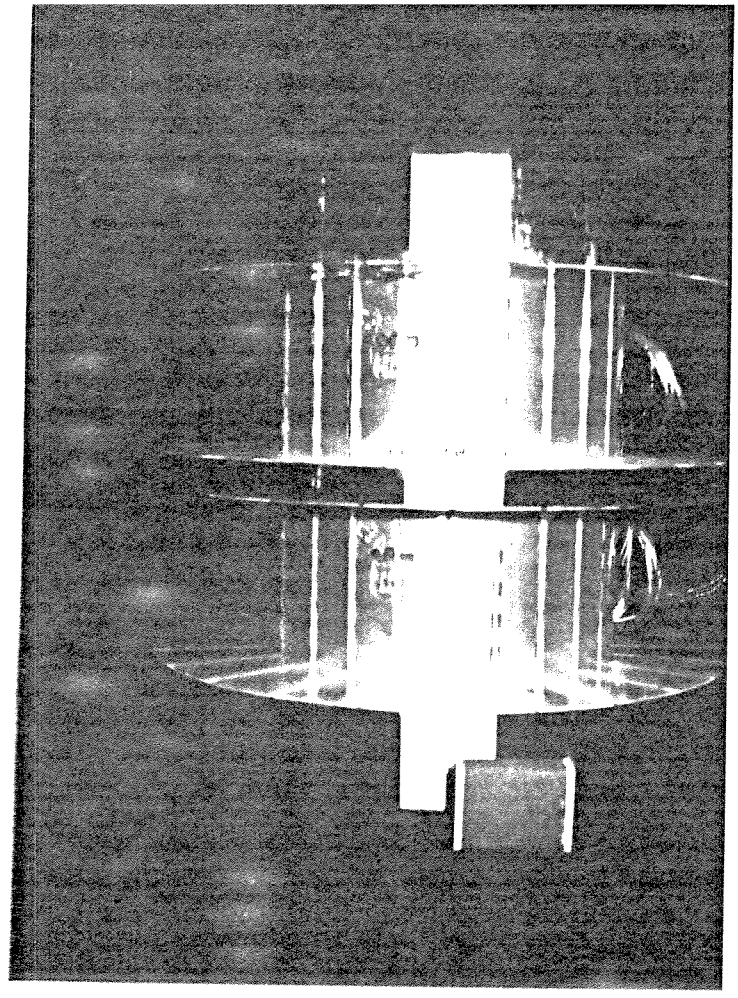


Fig. 11

Vista do suporte completo



Fig. 12

Vista do enrolamento de uma das bobinas

lado para preenchimento dos espaços vazios.

Para montagem de um sistema de detecção de "quench" foi colocado um "tap" central para leitura de tensão e compará-la com o sinal da outra parte no segundo enrolamento. Esta técnica permitirá analisar-se as regiões onde o "quench" ocorre com maior freqüência.

Após o término do enrolamento mostrado na fig. 13 , procederemos a colocação do "mylar" em duas camadas e sobre esta foi enrolado duas camadas de arame de inox recozido para servir de proteção e reforço externo. Este procedimento aumenta o coeficiente de segurança no dimensionamento mecânico.

Para montagem do suporte externo de travamento a bobina + enrolamento foram resfriados a temperatura de 77K(LN_2) onde a contração axial foi de 0,2mm e os suportes foram colocados sob pressão para garantir seu efeito mesmo quando todo conjunto for resfriado à 4,2K.

A fig. 14 mostra o magneto já montado no sistema para uso, ao lado do criostato e executado conforme esquema da fig. 15.

Os contatos para corrente foram feitos independentes para cada setor, possibilitando ligação em série ou em paralelo através de uma simples inversão de "jumps".

VII.6 - TESTES E MEDIDAS DA DISTRIBUIÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO

Os testes do magneto supercondutor "split-pair" iniciou-se pela sua montagem no suporte e posterior inserção no criostato especialmente construído conforme descrito no tópico anterior.

Durante os testes de vácuo e resfriamento foi detectado um vazamento entre a câmara de nitrogênio e hélio que, para seu reparo será necessário trabalho de várias semanas, pois este inclui a substituição de parte do corpo interno.

Diante da impossibilidade de teste do magneto em hélio líquido a medida de distribuição de campo magnético foi executada à temperatura de nitrogênio líquido onde a resistividade do cobre é baixa e possibilitou a passagem de corrente de 1A. Notar que, a esta temperatura o fio não está no estado supercondutor, onde a

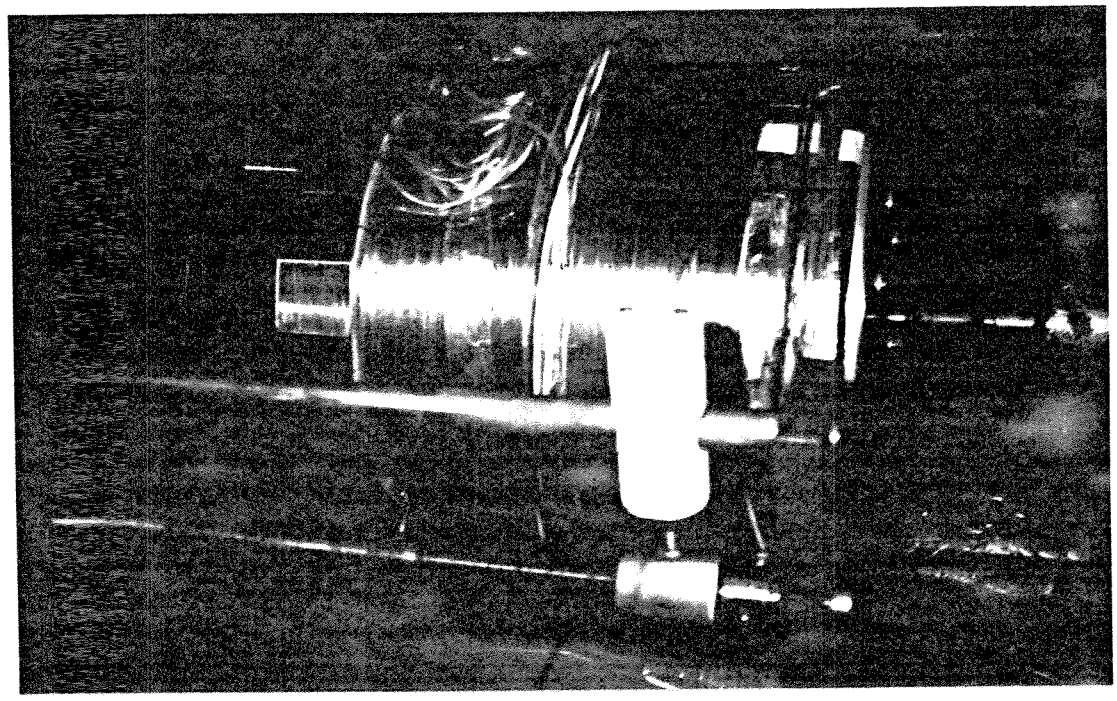


Fig. 13

Magneto "split-pair" terminado, já com uma camada de fio de inox para reforço

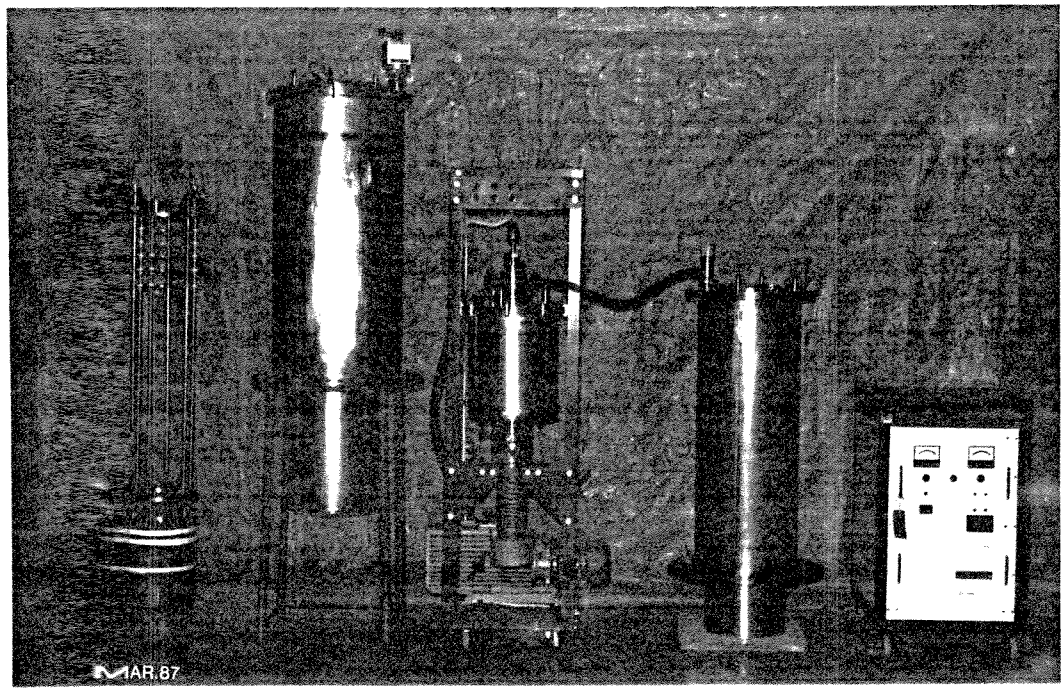


Fig. 14

Sistema completo com magneto supercondutor, criostato, sistema de vácuo e fonte de potência

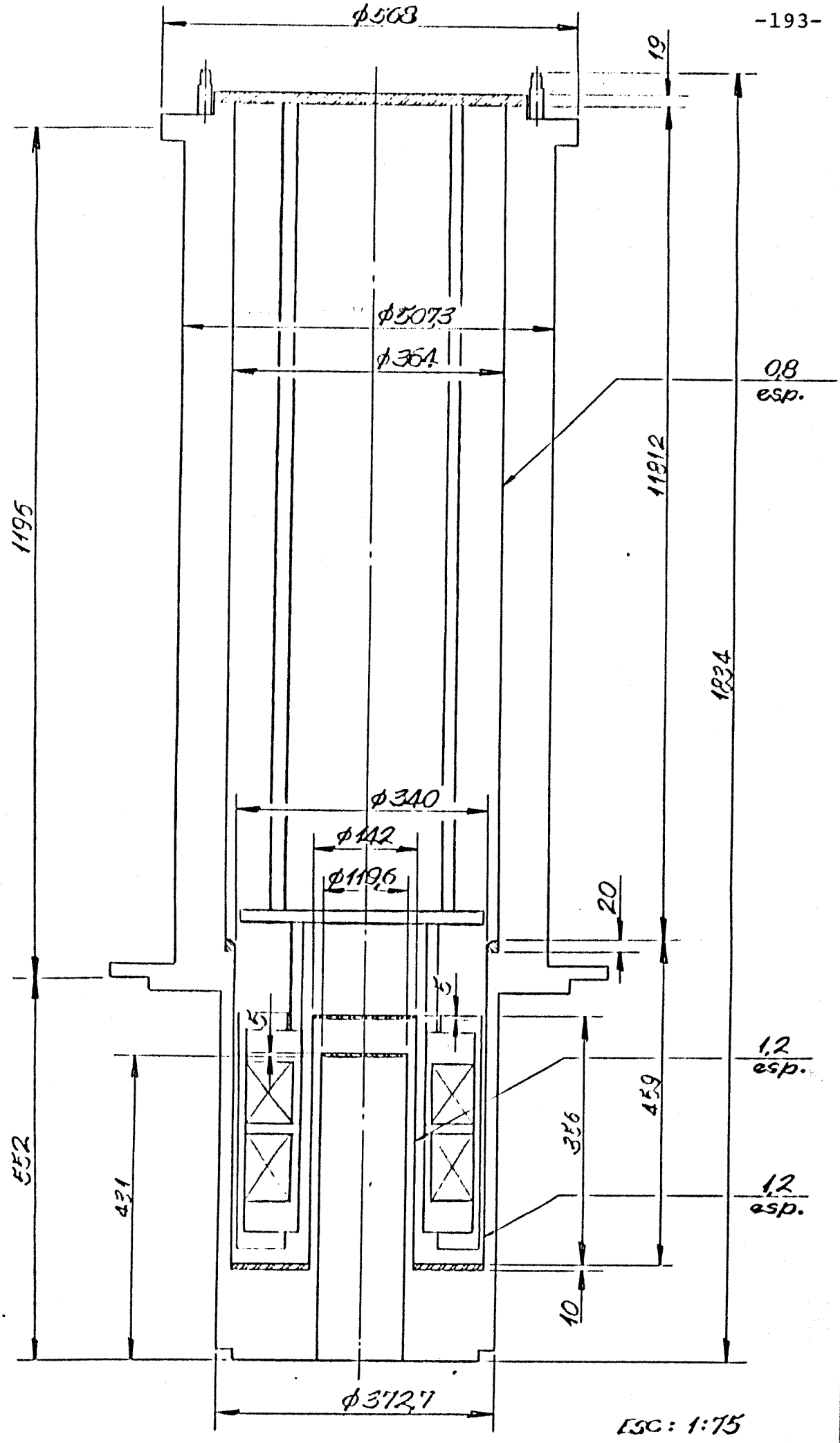


Fig. 15 - Corte do Criostato para Magneto Split-Pair

corrente permissível seria de 224 A, porém, a distribuição de campo não depende da corrente e sim de fatores geométricos.

Para o mapeamento foi utilizado um sensor de efeito "Hall" modelo LHGA 321 número de série 2390 de 17/02/86 fabricado pela "Lake Shore Cryotronics, (USA)" com sensibilidade de 0,702mV/KG.

Foi montado um suporte para o sensor que permitiu o mapeamento conforme tabela abaixo.

	Campo Magnético (G/A)		
Z(cm) /	R = 0	Z/R = 1,65	Z/R = 3,3
0	332	326	300
1	330	324	328
2	326	319	324
3	322	313	318
4	315	304	308
5	303	292	295
6	291	278	280
7	276	262	261
8	256	243	241
9	238	223	221

Comparando-se os valores teóricos de B(0,0)=314 G/A observamos uma variação de 5,4% que associamos ao problema de medida em baixa corrente que obriga a que o sinal medido na ponta "Hall" esteja na faixa de 20μV.

VII.7 - CONCLUSÕES

A construção do magneto supercondutor "split-pair" permitiu desenvolver e assimilar a tecnologia de fabricação de magnetos de médio porte, porém, com elevados esforços mecânicos.

O dimensionamento básico foi obedecido porém, devido aos probelmas no teste do criostato não foi possível a medida da distribuição de campo a 7T.

Os resultados obtidos com corrente de 1A, podem ser considerados como satisfatórios devido ao baixo sinal gerado no sensor "Hall".

CAPÍTULO VIII

DIMENSIONAMENTO DE MAGNETO SUPERCONDUTOR - 12T

VIII.1 - INTRODUÇÃO

Para geração de campo magnético de 12T o fio supercondutor mais utilizado é Nb_3Sn. Devido ao seu alto custo e sua fragilidade foi adotada a técnica de se utilizar na região de baixo campo um enrolamento de NbTi.

Neste caso vamos utilizar NbTi no magneto de excitação que vai gerar 5T, e na parte central um enrolamento de Nb_3Sn para gerar outros 7T, totalizando B_o = 12T /1,2/.

Da mesma forma que nos casos anteriores o fio supercondutor de Nb_3Sn foi escolhido visando minimizar os custos atendendo às necessidades de projeto.

O processo de fabricação do magneto de Nb_3Sn é bem mais complicado que os enrolamentos de NbTi já executados. Suas propriedades mecânicas após a formação do composto Nb_3Sn não permitem deformação ou trabalho sob tensão mecânica elevada, que podem degradarem suas propriedades (B_{c_2}, J_c etc), até mesmo quebrar os filamentos /3,4/.

Devido à sua fragilidade e a impossibilidade de se garantir durante o enrolamento ausência de deformação ou solicitação mecânica, optamos pelo uso de fio não reagido. Neste caso o fio utilizado composto (Cu, bronze, Nb, Ta) possui excelentes propriedades mecânicas e somente após o término do enrolamento será feito tratamento térmico para formação do Nb_3Sn /5/

Por outro lado introduzimos fatores complicadores como por exemplo, todos materiais utilizados na isolação ou na estrutura e que devem manter suas propriedades após o tratamento térmico a 700^oC x 64 $\sim$ 100h. Agora o problema da fragilidade do material ficará restrito à conexão dos contatos que será aboradado neste capítulo.

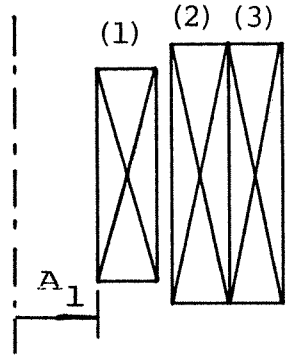
No caso dos magnetos de Nb_3Sn há necessidade de após a for

mação do composto, para evitar possibilidade de degradação das propriedades supercondutoras a impregnação do enrolamento. Este procedimento garante a distribuição e absorção das tensões e deformação durante a energização de forma homogênea e distribuída.

Será tratado nos tópicos seguintes o mapeamento do campo , o cálculo mecânico, e a técnica de fabricação a ser utilizada neste caso, tabela I.

VIII.2 - MAPEAMENTO DO CAMPO MAGNÉTICO

Inicialmente realizamos cálculos preliminares em microcomputador para ajustar os parâmetros geométricos objetivando o sistema abaixo/6/ :



$A_1 \simeq 5cm$

1) Enrolamento em Nb_3Sn - $B_o' = 7T$

2) Enrolamento em NbTi - $B_o'' = 2T$

3) Enrolamento em NbTi - $B_o''' = 3T$

12T

Visando minimizar os custos de fabricação vamos utilizar nos enrolamentos 2 e 3 fios supercondutores de NbTi produzidos em larga escala mundialmente para magnetos de imagem por NMR. Devido a esta aplicação específica os custos destes fios produzidos possibilitam baixo US$/A.m.

No caso do Nb_3Sn também foi escolhido o fio da VAC-RFA, devido ao menor custo US$/A.m.

As propriedades e características dos fios selecionados estão na tabela II, e suas secções transversais nas figs. 1 e 3.

Os cálculos preliminares da distribuição do campo magnético ao longo do eixo z estão na tabela II.

A curva de carregamento do magneto é mostrado na fig. 4,

Tabela I - Parâmetros Utilizados no Dimensionamento do Magneto Supercondutor 12T.

1. Características desejadas
   a. campo central 12T
   b. diâmetro interno útil 75mm
   c. homogeneidade 10^{-1}% em raio 25mm

2. Componentes de custo
   a. utilizar NbTi na região externa para gerar 5T
   b. minimizar uso Nb_3Sn para gerar 7T
   c. escolha de fios supercondutores que atendem necessidades de projeto e com menor preço US$/A.M.

3. Dimensionamento básico
   a. campo magnético gerado Nb_3Sn
   b. campo magnético gerado NbTi
   c. bobinas resinadas com epoxy para evitar movimentação de condutor
   d. margem de segurança para corrente 75% IC = I_{op} = 160A
   e. margem de segurança para temperatura ΔT = 0,5K
   f. $\frac{B_{max}}{B_o}$ < minimização volume de condutor
   g. tensões mecânicas σ_θ, σ_r, ε_r, ε_θ
   h. indutância 22,4H, energia estocada 286KJ
   i. tempo de carregamento 368 s
   j. resistores de proteção 1Ω, energia dissipada externamente 170KJ

Tabela II - Características dos Fios Supercondutores e Medidas em Amostras Curtas.

1. Fio Supercondutor Nb_3Sn

Tipo/Fabricante	NS 10000 Ta-I/Vacuumschmelse
Diâmetro Nú (mm)	1,04
Diâmetro isolado (mm)	1,15
Nº filamentos	9600
Diâmetro do filamento (μm)	5
Relação bronze**/Nb	3:1
RRR	80
Preço US$/A.M. (12T)	0,0306

B (T)	7	8	9	10	11	12
Ic(A)	805*	661*	541*	449*	261	198

* Valores medidos, demais de catálogos

** Ver figs. 2 e 3 para detalhes.

2. Fio Supercondutor NbTi

Tipo/Fabricante	F54/Vacuumschmelze
Diâmetro nú (mm)	0,85/0,6
Diâmetro isolado (mm)	0,9/0,64
Nº Filamentos	54
Diâmetro do filamento (μm)	75/53
Relação * Cu:NbTi	1,35
RRR	80
Preço US$/A.M. (8T)	0.0046/0.0052

B(T) – Ø 0,85mm	8	9	9,5	10
Ic(A)	227	124	76	36

B(T) – Ø 0,6mm	5	6	7	8
Ic(A)	294	242	188	132

* Ver detalhes Fig. 1

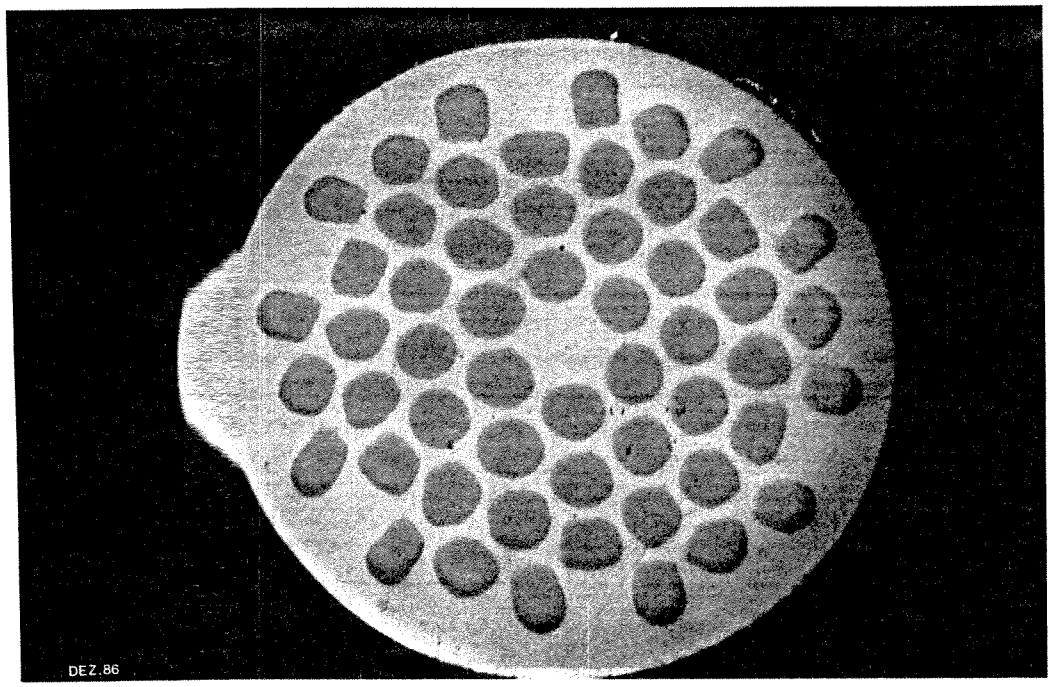


Fig. 1

NbTi-F54
Vacuumschmelze

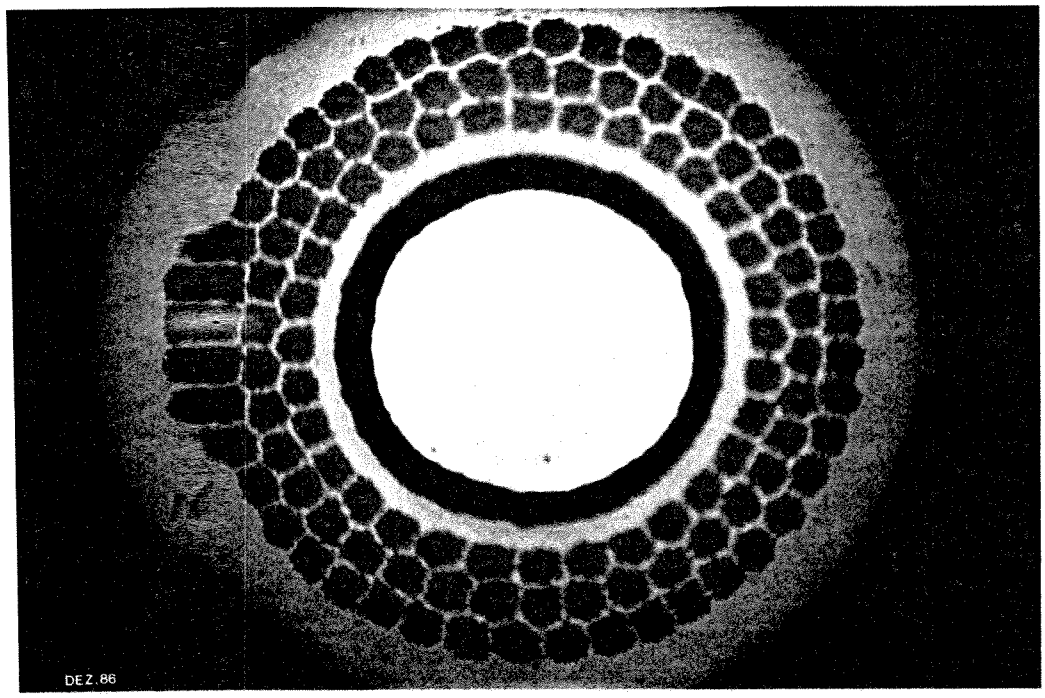


Fig. 2

Nb_3Sn

NS-10000 Ta-I
Vacuumschmelze

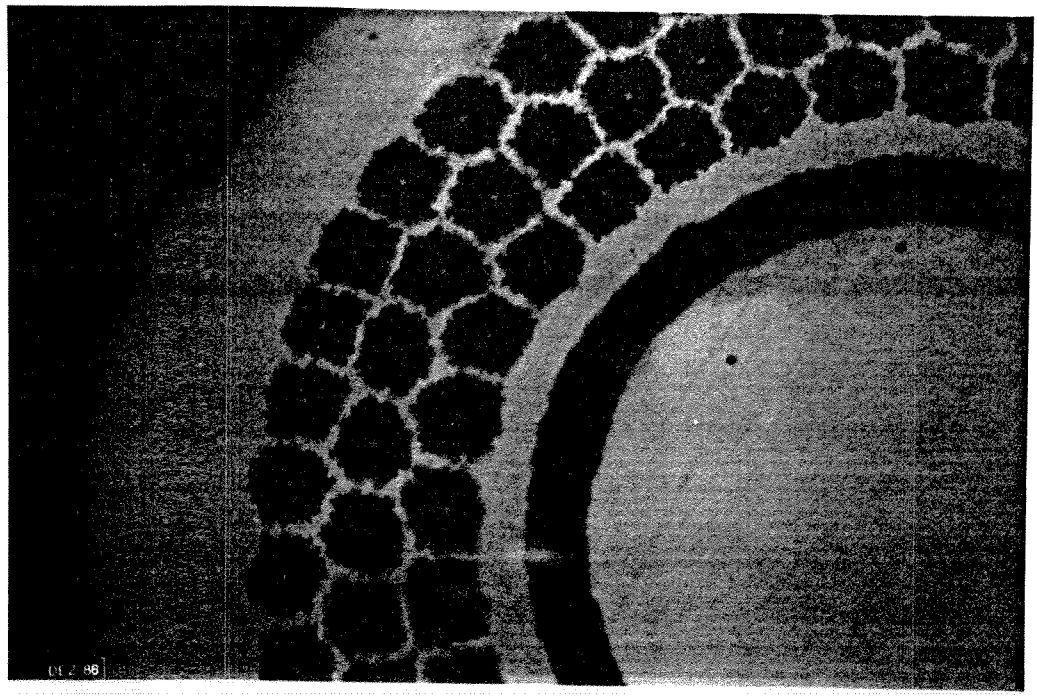


Fig. 3

Nb_3Sn

NS-10000

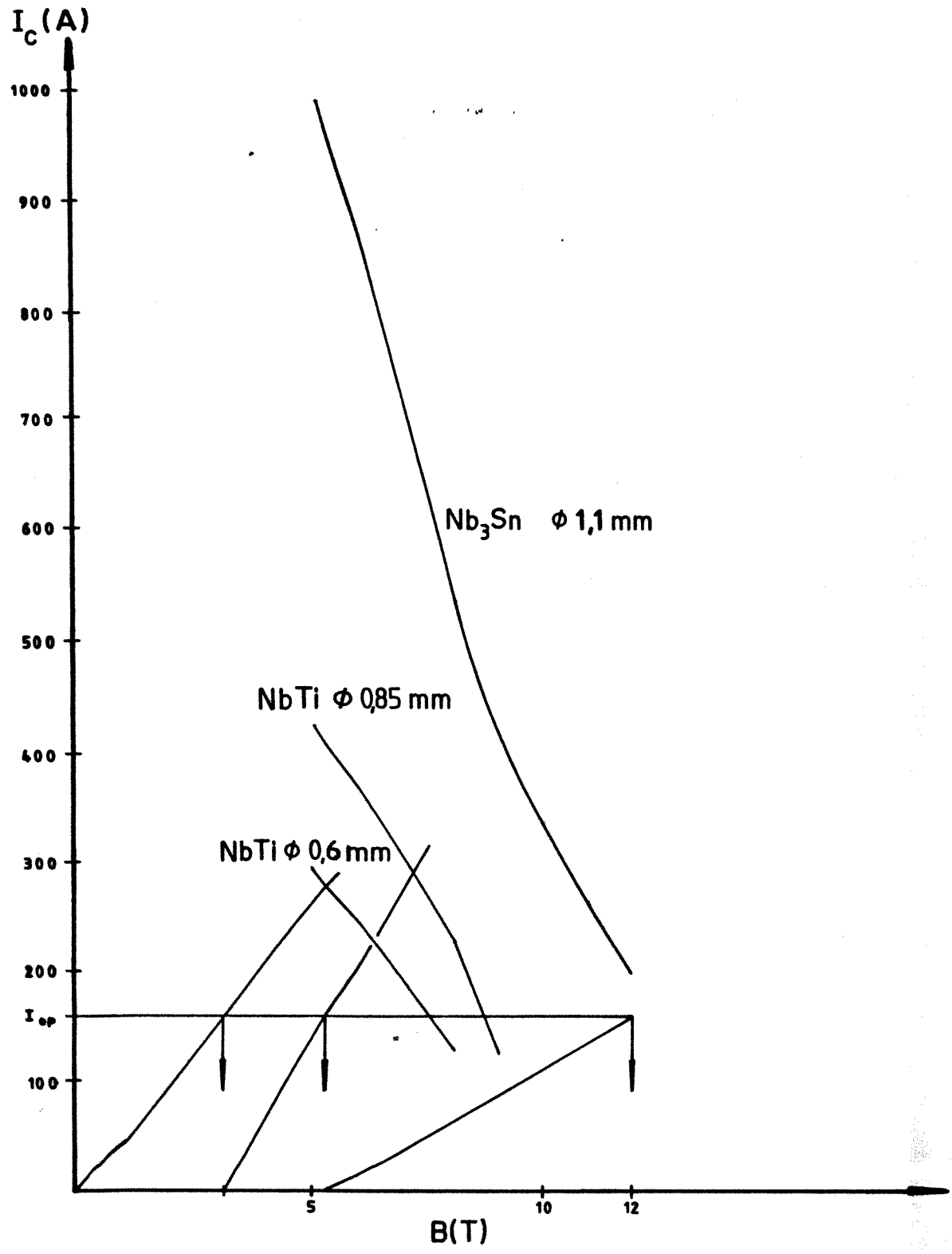
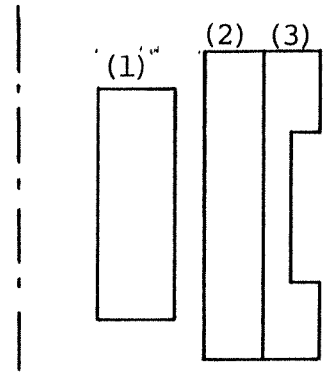


FIG. 4 - LINHA DE CARGA DO MAGNETO 12 T

onde observamos que para os enrolamentos de NbTi a margem é bem superior a 25%, porém no caso Nb_3Sn, $\Delta I_c \tilde{-} 20\%$, para $I_{op} \tilde{-} 160A$.

Para o mapeamento do campo magnético foram preparados os parâmetros de entrada conforme tabela III , que resume também os fatores de segurança para ΔI_c.



	(1) Nb_3Sn	(2) NbTi(0,85)	(3) NbTi(0,6)	NbTi(0,6)
A_1(m)	0,0425	0,097	0,107	0,107
A_2(m)	0,09	0,107	0,12	0,12
B_1(m)	0,115	0,15	0,15	- 0,04
B_2(m)	- 0,115	- 015	0,04	- 0,15
DR(m)	$1,03\times10^{-4}$	$8,7\times10^{-5}$	$6,15\times10^{-5}$	$6,15\times10^{-5}$
DZ(m)	1.16×10^{-4}	$9,0\times10^{-5}$	$6,44\times10^{-5}$	$6,44\times10^{-5}$
N(esp)	46x198	12x344	22x488	22x488
I(A)	160	160	160	160
λ	0,7	0,7	0,77	0,77
J(A/cm^2)	2×10^4	$2,8\times10^4$	$5,6\times10^4$	$5,6\times10^4$
d_N(m)	$1,02\times10^{-3}$	$8,5\times10^{-4}$	6×10^{-4}	6×10^{-4}
d_{Isol}(m)	$1,13\times10^{-3}$	$9,03\times10^{-4}$	$6,44\times10^{-4}$	$6,44\times10^{-4}$

O mapeamento é mostrado nas tabelas IV a VII onde o valor da contribuição de cada parte do enrolamento é expressa em (G/A).Os valores máximos para cada enrolamento são /7/:

Nb_3Sn $\quad B_{máx} = 759 \times 160 = 12,14T$

$$\Delta I = \frac{I_{op}}{I_{c(12)}} = \frac{160}{198} = 0,8 \therefore \text{ Margem } I_{op} = 20\%$$

Tabela III - Mapeamento do Campo Magnético ao Longo do Eixo Z

**** DADOS DE ENTRADA E DE SAIDA ****

BOBINA # 1

A1= .0425 A2= .09
B1= .115 B2=-.115
N= 9040.44 I(A)= 165
L(M)= 3763.18

Z(CM)	BZ(T)
0	7.0520E+00
.5	7.0494E+00
1	7.0376E+00
1.5	7.0133E+00
2	6.9934E+00
2.5	6.9594E+00
3	6.9167E+00
3.5	6.8647E+00
4	6.8027E+00
4.5	6.7296E+00
5	6.6443E+00

BOBINA # 2

A1= .097 A2= .107
B1= .15 B2=-.15
N= 3774 I(A)= 165
L(M)= 2419.7

Z(CM)	BZ(T)
0	2.1569E+00
.5	2.1562E+00
1	2.1538E+00
1.5	2.1499E+00
2	2.1444E+00
2.5	2.1373E+00
3	2.1284E+00
3.5	2.1178E+00
4	2.1055E+00
4.5	2.0912E+00
5	2.0749E+00

BOBINA # 3

A1= .107 A2= .12
B1= .15 B2= .04
N= 7071.35 I(A)= 165
L(M)= 5042.87

Z(CM)	BZ(T)	BT(T)
0	3.0977E+00	1.2307E+01
.5	3.1008E+00	1.2305E+01
1	3.1099E+00	1.2301E+01
1.5	3.1246E+00	1.2294E+01
2	3.1446E+00	1.2282E+01
2.5	3.1690E+00	1.2265E+01
3	3.1970E+00	1.2242E+01
3.5	3.2276E+00	1.2210E+01
4	3.2596E+00	1.2169E+01
4.5	3.2919E+00	1.2113E+01
5	3.3232E+00	1.2042E+01

READY

Tabela IV - Mapeamento do Campo Magnético da Região Central

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COIL COIL NO.=

INNER RADIUOS= 4.250 (CM) OUTER RADIOUS= 9.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 11.500 (CM)

AXIAL PARTITION= 0.103 (CM) RADIOUS PARTITION= 0.1162 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	0.00	0.43	0.85	1.28	1.70	2.13	2.55	2.98	3.40	3.83	4.25
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.50	0.000	0.571	1.137	1.694	2.237	2.761	3.261	3.735	4.178	4.586	4.958
3.00	0.000	1.223	2.436	3.628	4.790	5.911	6.982	7.995	8.940	9.811	10.599
4.50	0.000	2.047	4.077	6.074	8.021	9.901	11.699	13.397	14.981	16.435	17.747
6.00	0.000	3.146	6.270	9.349	12.359	15.277	18.074	20.726	23.202	25.477	27.523
7.50	0.000	4.603	9.186	13.729	18.206	22.588	26.838	30.912	34.759	38.321	41.539
9.00	0.000	6.339	12.689	19.059	25.450	31.854	38.241	44.558	50.716	56.589	62.015
10.50	0.000	7.825	15.727	23.785	32.086	40.727	49.816	59.462	69.743	80.578	91.467
12.00	0.000	8.116	16.325	24.727	33.437	42.594	52.381	63.047	74.949	88.544	103.719
13.50	0.000	6.990	14.011	21.090	28.253	35.512	42.861	50.262	57.624	64.785	71.507
15.00	0.000	5.316	10.619	15.890	21.110	26.248	31.266	36.114	40.726	45.030	48.944

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	0.00	0.43	0.85	1.28	1.70	2.13	2.55	2.98	3.40	3.83	4.25
0.00	430.598	430.677	430.914	431.306	431.850	432.543	433.377	434.346	435.444	436.631	437.961
1.50	428.603	428.687	428.941	429.361	429.944	430.685	431.577	432.615	433.789	435.059	436.500
3.00	422.334	422.437	422.743	423.250	423.954	424.849	425.928	427.180	428.598	430.136	431.868
4.50	410.909	411.043	411.443	412.108	413.031	414.207	415.626	417.276	419.146	421.187	423.465
6.00	392.750	392.930	393.470	394.367	395.620	397.222	399.167	401.442	404.035	406.894	410.077
7.50	365.594	365.825	366.522	367.688	369.332	371.463	374.088	377.212	380.832	384.904	389.486
9.00	327.044	327.292	328.042	329.317	331.154	333.607	336.740	340.631	345.355	350.939	357.484
10.50	276.687	276.833	277.281	278.057	279.214	280.834	283.056	286.102	290.338	296.298	304.743
12.00	219.609	219.538	219.320	218.937	218.360	217.533	216.362	214.675	212.122	207.862	200.014
13.50	165.740	165.519	164.845	163.690	162.005	159.717	156.726	152.907	148.116	142.218	135.131
15.00	122.271	122.037	121.332	120.146	118.463	116.263	113.527	110.234	106.375	101.952	96.987

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	0.00	0.43	0.85	1.28	1.70	2.13	2.55	2.98	3.40	3.83	4.25
0.00	430.598	430.677	430.914	431.306	431.850	432.543	433.377	434.346	435.444	436.631	437.961
1.50	428.603	428.688	428.942	429.364	429.949	430.693	431.590	432.631	433.809	435.083	436.528
3.00	422.334	422.439	422.750	423.265	423.981	424.890	425.985	427.255	428.691	430.248	431.998
4.50	410.909	411.048	411.464	412.153	413.109	414.325	415.791	417.491	419.414	421.507	423.837
6.00	392.750	392.943	393.520	394.478	395.813	397.516	399.576	401.977	404.701	407.691	411.000
7.50	365.594	365.854	366.637	367.944	369.781	372.149	375.050	378.477	382.415	386.807	391.694
9.00	327.044	327.353	328.288	329.868	332.131	335.124	338.905	343.533	349.059	355.472	362.823
10.50	276.687	276.944	277.727	279.073	281.051	283.772	287.406	292.216	298.597	307.059	318.174
12.00	219.609	219.688	219.926	220.329	220.905	221.663	222.612	223.741	224.973	225.954	225.307
13.50	165.740	165.666	165.439	165.043	164.450	163.617	162.482	160.956	158.931	156.278	152.884
15.00	122.271	122.153	121.796	121.192	120.329	119.190	117.754	115.999	113.904	111.453	108.637

Tabela IV (Continuação)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COIL NO.=

INNER RADIUOS= 9.700 (CM) OUTER RADIOUS= 10.700 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

AXIAL PARTITION= 0.087 (CM) RADIOUS PARTITION= 0.0903 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	0.00	0.43	0.85	1.28	1.70	2.13	2.55	2.98	3.40	3.83	4.25
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.50	0.000	0.123	0.245	0.366	0.486	0.604	0.719	0.833	0.943	1.049	1.151
3.00	0.000	0.252	0.504	0.754	1.001	1.244	1.483	1.717	1.945	2.165	2.377
4.50	0.000	0.397	0.793	1.186	1.575	1.959	2.336	2.706	3.066	3.415	3.752
6.00	0.000	0.562	1.123	1.681	2.234	2.781	3.320	3.849	4.366	4.869	5.356
7.50	0.000	0.753	1.504	2.253	2.997	3.734	4.464	5.184	5.891	6.583	7.257
9.00	0.000	0.966	1.932	2.895	3.857	4.815	5.768	6.714	7.652	8.579	9.490
10.50	0.000	1.190	2.381	3.574	4.769	5.967	7.168	8.373	9.580	10.788	11.995
12.00	0.000	1.398	2.799	4.207	5.624	7.055	8.502	9.969	11.459	12.973	14.516
13.50	0.000	1.551	3.107	4.675	6.260	7.869	9.508	11.185	12.906	14.682	16.522
15.00	0.000	1.612	3.231	4.863	6.515	8.196	9.913	11.675	13.494	15.380	17.347

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	0.00	0.43	0.85	1.28	1.70	2.13	2.55	2.98	3.40	3.83	4.25
0.00	132.180	132.198	132.249	132.335	132.454	132.607	132.793	133.010	133.259	133.538	133.847
1.50	131.750	131.768	131.821	131.909	132.032	132.190	132.381	132.605	132.862	133.150	133.469
3.00	130.432	130.452	130.510	130.606	130.740	130.911	131.120	131.365	131.646	131.961	132.309
4.50	128.150	128.172	128.237	128.346	128.498	128.693	128.931	129.210	129.530	129.890	130.290
6.00	124.776	124.802	124.877	125.003	125.179	125.405	125.680	126.005	126.380	126.802	127.272
7.50	120.148	120.176	120.263	120.407	120.608	120.868	121.187	121.564	122.001	122.497	123.053
9.00	114.091	114.122	114.217	114.374	114.597	114.884	115.238	115.661	116.154	116.719	117.359
10.50	106.481	106.512	106.607	106.765	106.989	107.280	107.641	108.077	108.590	109.186	109.870
12.00	97.330	97.356	97.436	97.571	97.761	98.011	98.324	98.704	99.158	99.692	100.316
13.50	86.884	86.900	86.948	87.028	87.143	87.294	87.484	87.717	87.997	88.331	88.727
15.00	75.667	75.668	75.671	75.676	75.684	75.693	75.705	75.718	75.734	75.751	75.771

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	0.00	0.43	0.85	1.28	1.70	2.13	2.55	2.98	3.40	3.83	4.25
0.00	132.180	132.198	132.249	132.335	132.454	132.607	132.793	133.010	133.259	133.538	133.847
1.50	131.750	131.768	131.821	131.910	132.033	132.191	132.383	132.608	132.866	133.155	133.474
3.00	130.432	130.452	130.510	130.608	130.744	130.917	131.128	131.376	131.660	131.979	132.331
4.50	128.150	128.173	128.240	128.352	128.508	128.708	128.952	129.238	129.566	129.935	130.344
6.00	124.776	124.803	124.882	125.014	125.199	125.435	125.724	126.064	126.455	126.895	127.385
7.50	120.148	120.179	120.272	120.428	120.646	120.926	121.269	121.675	122.143	122.674	123.267
9.00	114.091	114.126	114.233	114.411	114.662	114.985	115.383	115.856	116.406	117.034	117.742
10.50	106.481	106.519	106.633	106.825	107.095	107.446	107.880	108.400	109.011	109.717	110.522
12.00	97.330	97.366	97.477	97.661	97.923	98.265	98.691	99.206	99.817	100.532	101.361
13.50	86.884	86.914	87.003	87.154	87.368	87.648	87.999	88.427	88.939	89.543	90.252
15.00	75.667	75.685	75.740	75.833	75.964	76.136	76.351	76.613	76.927	77.297	77.731

Tabela IV (Continuação)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COIL P COIL NO.=

INNER RADIUOS= 10.700 (CM) OUTER RADIOUS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 5.500 (CM)

AXIAL PARTITION= 0.062 (CM) RADIOUS PARTITION= 0.0644 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	0.00	0.43	0.85	1.28	1.70	2.13	2.55	2.98	3.40	3.83	4.25
0.00	0.000	-2.394	-4.794	-7.206	-9.606	-12.091	-14.575	-17.094	-19.653	-22.256	-24.905
1.50	0.000	-2.573	-5.156	-7.762	-10.401	-13.084	-15.824	-18.631	-21.519	-24.500	-27.588
3.00	0.000	-2.571	-5.158	-7.773	-10.404	-13.155	-15.953	-18.847	-21.856	-25.001	-28.305
4.50	0.000	-2.331	-4.677	-7.055	-9.480	-11.970	-14.543	-17.217	-20.015	-22.959	-26.076
6.00	0.000	-1.838	-3.688	-5.565	-7.481	-9.452	-11.490	-13.613	-15.837	-18.179	-20.658
7.50	0.000	-1.131	-2.271	-3.426	-4.607	-5.820	-7.075	-8.380	-9.746	-11.180	-12.694
9.00	0.000	-0.292	-0.587	-0.885	-1.190	-1.503	-1.827	-2.164	-2.515	-2.884	-3.272
10.50	0.000	0.581	1.166	1.759	2.365	2.987	3.631	4.300	4.999	5.733	6.505
12.00	0.000	1.386	2.782	4.198	5.644	7.130	8.668	10.269	11.944	13.706	15.567
13.50	0.000	2.029	4.071	6.143	8.258	10.431	12.680	15.021	17.473	20.057	22.794
15.00	0.000	2.440	4.895	7.382	9.916	12.516	15.199	17.984	20.893	23.950	27.181

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	0.00	0.43	0.85	1.28	1.70	2.13	2.55	2.98	3.40	3.83	4.25
0.00	95.858	95.824	95.720	95.544	95.294	94.964	94.547	94.037	93.423	92.693	91.833
1.50	113.460	113.446	113.402	113.328	113.218	113.070	112.875	112.627	112.314	111.923	111.439
3.00	131.728	131.744	131.792	131.871	131.980	132.114	132.272	132.448	132.635	132.827	133.014
4.50	149.163	149.215	149.372	149.634	150.002	150.477	151.059	151.751	152.555	153.472	154.507
6.00	164.000	164.087	164.346	164.782	165.395	166.190	167.173	168.350	169.731	171.327	173.150
7.50	174.570	174.682	175.018	175.579	176.372	177.401	178.673	180.199	181.989	184.058	186.422
9.00	179.639	179.763	180.135	180.757	181.635	182.774	184.183	185.871	187.850	190.134	192.738
10.50	178.612	178.733	179.098	179.708	180.569	181.686	183.067	184.722	186.664	188.905	191.462
12.00	171.609	171.714	172.028	172.554	173.297	174.260	175.452	176.881	178.558	180.498	182.714
13.50	159.452	159.528	159.756	160.137	160.673	161.369	162.227	163.254	164.456	165.842	167.424
15.00	143.551	143.591	143.711	143.911	144.191	144.551	144.989	145.506	146.101	146.772	147.518

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	0.00	0.43	0.85	1.28	1.70	2.13	2.55	2.98	3.40	3.83	4.25
0.00	95.858	95.853	95.840	95.815	95.780	95.730	95.664	95.578	95.467	95.327	95.150
1.50	113.460	113.475	113.520	113.593	113.695	113.824	113.979	114.158	114.357	114.574	114.803
3.00	131.728	131.769	131.893	132.100	132.392	132.768	133.231	133.782	134.424	135.159	135.992
4.50	149.163	149.233	149.445	149.801	150.302	150.952	151.758	152.725	153.862	155.180	156.692
6.00	164.000	164.097	164.388	164.875	165.564	166.458	167.567	168.900	170.469	172.288	174.378
7.50	174.570	174.686	175.032	175.613	176.432	177.496	178.813	180.393	182.250	184.398	186.854
9.00	179.639	179.763	180.136	180.759	181.639	182.780	184.192	185.883	187.867	190.156	192.766
10.50	178.612	178.734	179.102	179.717	180.584	181.710	183.103	184.772	186.731	188.992	191.572
12.00	171.609	171.719	172.050	172.605	173.388	174.406	175.666	177.179	178.957	181.017	183.376
13.50	159.452	159.541	159.808	160.255	160.885	161.705	162.722	163.943	165.382	167.051	168.968
15.00	143.551	143.612	143.794	144.101	144.532	145.092	145.784	146.613	147.587	148.713	150.001

Tabela IV (Continuação)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COI 7 COIL NO.=

INNER RADIUOS= 10.700 (CM) OUTER RADIOUS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 5.500 (CM)

AXIAL PARTITION= 0.062 (CM) RADIOUS PARTITION= 0.0644 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	0.00	0.43	0.85	1.28	1.70	2.13	2.55	2.98	3.40	3.83	4.25
0.00	0.000	2.394	4.794	7.206	9.636	12.091	14.575	17.094	19.653	22.255	24.905
1.50	0.000	2.111	4.225	6.342	8.465	10.595	12.733	14.879	17.032	19.193	21.357
3.00	0.000	1.794	3.587	5.379	7.167	8.952	10.731	12.503	14.263	16.010	17.738
4.50	0.000	1.487	2.972	4.452	5.925	7.390	8.842	10.280	11.698	13.094	14.464
6.00	0.000	1.214	2.426	3.632	4.830	6.018	7.192	8.349	9.486	10.600	11.687
7.50	0.000	0.984	1.966	2.942	3.910	4.869	5.815	6.745	7.656	8.546	9.412
9.00	0.000	0.795	1.589	2.377	3.159	3.933	4.695	5.443	6.176	6.891	7.586
10.50	0.000	0.644	1.285	1.923	2.556	3.181	3.797	4.402	4.994	5.571	6.133
12.00	0.000	0.522	1.043	1.561	2.074	2.582	3.082	3.574	4.055	4.524	4.981
13.50	0.000	0.426	0.851	1.273	1.692	2.106	2.514	2.916	3.309	3.694	4.068
15.00	0.000	0.349	0.698	1.044	1.388	1.728	2.063	2.393	2.717	3.033	3.342

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	0.00	0.43	0.85	1.28	1.70	2.13	2.55	2.98	3.40	3.83	4.25
0.00	95.858	95.824	95.720	95.544	95.294	94.964	94.547	94.037	93.423	92.693	91.833
1.50	79.923	79.880	79.748	79.526	79.212	78.803	78.294	77.676	76.951	76.104	75.128
3.00	66.136	66.091	65.956	65.729	65.410	64.996	64.486	63.875	63.161	62.340	61.408
4.50	54.570	54.529	54.405	54.197	53.906	53.530	53.068	52.520	51.884	51.159	50.344
6.00	45.059	45.022	44.916	44.737	44.487	44.166	43.773	43.308	42.771	42.163	41.485
7.50	37.322	37.293	37.204	37.056	36.850	36.584	36.261	35.880	35.441	34.947	34.396
9.00	31.063	31.039	30.967	30.847	30.680	30.466	30.205	29.898	29.546	29.149	28.710
10.50	26.002	25.982	25.925	25.829	25.695	25.524	25.316	25.071	24.791	24.475	24.126
12.00	21.901	21.886	21.840	21.764	21.657	21.521	21.356	21.161	20.939	20.689	20.412
13.50	18.566	18.553	18.517	18.456	18.372	18.264	18.132	17.978	17.801	17.602	17.382
15.00	15.838	15.829	15.800	15.752	15.684	15.598	15.493	15.370	15.230	15.071	14.896

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	0.00	0.43	0.85	1.28	1.70	2.13	2.55	2.98	3.40	3.83	4.25
0.00	95.858	95.853	95.840	95.815	95.780	95.730	95.664	95.578	95.467	95.327	95.150
1.50	79.923	79.907	79.859	79.779	79.663	79.512	79.322	79.091	78.813	78.486	78.104
3.00	66.136	66.115	66.053	65.949	65.801	65.610	65.372	65.087	64.752	64.363	63.919
4.50	54.570	54.549	54.486	54.380	54.230	54.037	53.800	53.516	53.186	52.808	52.381
6.00	45.059	45.039	44.981	44.884	44.748	44.574	44.359	44.105	43.811	43.475	43.099
7.50	37.322	37.306	37.256	37.173	37.057	36.907	36.724	36.508	36.259	35.976	35.661
9.00	31.063	31.049	31.007	30.939	30.842	30.718	30.568	30.389	30.184	29.953	29.695
10.50	26.002	25.990	25.957	25.901	25.822	25.722	25.599	25.455	25.289	25.101	24.894
12.00	21.901	21.892	21.865	21.820	21.756	21.675	21.577	21.461	21.328	21.178	21.011
13.50	18.566	18.558	18.537	18.500	18.449	18.385	18.306	18.213	18.106	17.986	17.852
15.00	15.838	15.833	15.815	15.786	15.745	15.693	15.630	15.556	15.470	15.374	15.267

Tabela IV (Continuação)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF TOTAL COIL

INNER RADIUS= 10.700 (CM) OUTER RADIOS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LANGTH= 5.500 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	0.00	0.43	0.85	1.28	1.70	2.13	2.55	2.98	3.40	3.83	4.25
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.50	0.000	0.232	0.450	0.640	0.786	0.875	0.890	0.815	0.634	0.328	-0.122
3.00	0.000	0.698	1.369	1.987	2.524	2.953	3.244	3.368	3.292	2.985	2.409
4.50	0.000	1.600	3.164	4.656	6.041	7.280	8.335	9.165	9.730	9.985	9.887
6.00	0.000	3.085	6.131	9.098	11.943	14.624	17.096	19.311	21.218	22.768	23.908
7.50	0.000	5.206	10.385	15.497	20.507	25.372	30.042	34.460	38.560	42.270	45.514
9.00	0.000	7.808	15.622	23.446	31.276	39.098	46.876	54.551	62.029	69.174	75.819
10.50	0.000	10.240	20.559	31.041	41.776	52.863	64.412	76.537	89.316	102.670	116.100
12.00	0.000	11.422	22.949	34.692	46.779	59.361	72.633	86.859	102.407	119.748	138.784
13.50	0.000	10.996	22.040	33.182	44.463	55.919	67.564	79.384	91.313	103.217	114.890
15.00	0.000	9.717	19.442	29.179	38.929	48.668	58.441	68.166	77.830	87.393	96.814

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	0.00	0.43	0.85	1.28	1.70	2.13	2.55	2.98	3.40	3.83	4.25
0.00	754.494	754.522	754.602	754.729	754.892	755.077	755.264	755.430	755.549	755.554	755.494
1.50	753.736	753.780	753.911	754.123	754.406	754.747	755.127	755.525	755.916	756.236	756.536
3.00	750.630	750.723	751.000	751.456	752.083	752.871	753.805	754.868	756.040	757.264	758.599
4.50	742.792	742.959	743.458	744.285	745.438	746.907	748.684	750.758	753.115	755.708	758.606
6.00	726.586	726.841	727.609	728.889	730.680	732.982	735.792	739.106	742.918	747.186	751.984
7.50	697.634	697.976	699.006	700.730	703.162	706.316	710.209	714.855	720.264	726.407	733.357
9.00	651.837	652.216	653.360	655.296	658.066	661.731	666.367	672.061	678.905	686.941	696.291
10.50	587.782	588.062	588.910	590.360	592.466	595.324	599.081	603.972	610.382	618.865	630.201
12.00	510.450	510.494	510.624	510.826	511.075	511.325	511.493	511.421	510.776	508.760	503.456
13.50	430.642	430.500	430.065	429.311	428.193	426.643	424.570	421.856	418.370	413.994	408.664
15.00	357.327	357.125	356.514	355.485	354.022	352.106	349.714	346.829	343.439	339.546	335.172

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	0.00	0.43	0.85	1.28	1.70	2.13	2.55	2.98	3.40	3.83	4.25
0.00	754.494	754.522	754.602	754.729	754.892	755.077	755.264	755.430	755.549	755.554	755.494
1.50	753.736	753.780	753.911	754.124	754.407	754.748	755.128	755.526	755.916	756.237	756.536
3.00	750.630	750.724	751.001	751.459	752.088	752.877	753.812	754.875	756.047	757.270	758.603
4.50	742.792	742.961	743.464	744.300	745.462	746.942	748.731	750.813	753.178	755.774	758.671
6.00	726.586	726.848	727.635	728.946	730.778	733.128	735.991	739.358	743.221	747.533	752.364
7.50	697.634	697.996	699.083	700.902	703.461	706.772	710.845	715.685	721.296	727.635	734.768
9.00	651.837	652.263	653.547	655.715	658.809	662.885	668.013	674.271	681.733	690.416	700.407
10.50	587.782	588.151	589.269	591.175	593.937	597.666	602.533	608.803	616.883	627.323	640.806
12.00	510.450	510.622	511.139	512.003	513.212	514.759	516.625	518.745	520.941	522.663	522.235
13.50	430.642	430.640	430.629	430.591	430.495	430.292	429.912	429.260	428.219	426.667	424.507
15.00	357.327	357.257	357.044	356.681	356.156	355.456	354.564	353.464	352.148	350.612	348.874

Tabela V - Mapeamento do Campo Magnético no Enrolamento de Nb_3Sn

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COIL COIL NO.=

INNER RADIUOS= 4.250 (CM) OUTER RADIOUS= 9.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 11.500 (CM)

AXIAL PARTITION= 0.103 (CM) RADIOUS PARTITION= 0.1162 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.50	4.958	5.326	5.643	5.906	6.114	6.269	6.371	6.422	6.426	6.385	6.305
3.00	10.599	11.377	12.040	12.583	13.006	13.308	13.493	13.567	13.536	13.409	13.197
4.50	17.747	19.030	20.109	20.975	21.624	22.057	22.280	22.304	22.143	21.818	21.347
6.00	27.523	29.510	31.153	32.432	33.337	33.866	34.031	33.855	33.366	32.606	31.617
7.50	41.539	44.657	47.201	49.115	50.365	50.942	50.865	50.175	48.939	47.245	45.192
9.00	62.015	67.336	71.658	74.814	76.711	77.318	76.661	74.814	71.910	68.143	63.770
10.50	91.467	102.453	111.032	116.877	120.103	120.865	119.249	115.260	108.869	100.167	89.764
12.00	103.719	119.151	130.090	137.047	140.768	141.649	139.826	135.227	127.558	116.262	101.116
13.50	71.507	78.158	83.560	87.477	89.794	90.490	89.593	87.182	83.398	78.483	72.797
15.00	48.944	52.755	55.875	58.221	59.745	60.432	60.301	59.405	57.830	55.690	53.120

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	437.981	389.785	341.748	293.775	245.876	198.034	150.232	102.466	54.750	6.699	-40.858
1.50	436.500	388.412	340.488	292.632	244.852	197.128	149.443	101.790	54.181	6.232	-41.230
3.00	431.868	384.126	336.565	289.085	241.686	194.343	147.032	99.741	52.477	4.851	-42.312
4.50	423.465	376.380	329.513	282.752	236.083	189.471	142.875	96.273	49.661	2.639	-43.974
6.00	410.077	364.094	318.408	272.883	227.479	182.132	136.774	91.354	45.847	-0.169	-45.886
7.50	389.486	345.268	301.531	258.091	214.853	171.689	128.466	85.073	41.425	-2.942	-47.251
9.00	357.484	315.997	275.488	235.654	196.256	157.016	117.657	77.921	37.577	-3.972	-46.048
10.50	304.743	267.538	233.000	199.974	167.721	135.746	103.666	71.097	37.537	1.817	-36.253
12.00	200.014	185.043	166.269	146.065	125.296	104.342	83.456	62.903	43.113	25.005	10.980
13.50	135.131	125.837	115.295	103.834	91.821	79.610	67.542	55.956	45.198	35.602	27.429
15.00	96.987	90.854	84.200	77.155	69.871	62.512	55.243	48.226	41.605	35.499	29.993

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	437.981	389.785	341.748	293.775	245.876	198.034	150.232	102.466	54.750	6.699	40.858
1.50	436.528	388.449	340.535	292.692	244.928	197.228	149.578	101.992	54.561	8.922	41.710
3.00	431.998	384.294	336.780	289.359	242.035	194.798	147.650	100.659	54.195	14.260	44.323
4.50	423.837	376.861	330.126	283.529	237.072	190.750	144.602	98.823	54.374	21.977	48.882
6.00	411.000	365.288	319.929	274.803	229.909	185.253	140.944	97.426	56.703	32.606	55.724
7.50	391.694	348.144	305.203	262.723	220.677	179.087	138.170	98.767	64.118	47.337	65.383
9.00	362.823	323.091	284.655	247.245	210.715	175.020	140.428	108.022	81.136	68.259	78.658
10.50	318.174	286.484	258.103	231.624	206.288	181.757	158.010	135.424	115.159	100.184	96.808
12.00	225.307	220.087	211.113	200.293	188.454	175.931	162.838	149.141	134.647	118.921	101.711
13.50	152.884	148.134	142.391	135.771	128.429	120.524	112.200	103.595	94.859	86.181	77.793
15.00	108.637	105.060	101.053	96.657	91.932	86.947	81.780	76.516	71.241	66.042	61.003

Tabela V (Continuação)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COIL NO.=

INNER RADIUOS= 9.700 (CM) OUTER RADIOUS= 10.700 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

AXIAL PARTITION= 0.087 (CM) RADIOUS PARTITION= 0.0903 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.50	1.151	1.261	1.364	1.460	1.549	1.631	1.704	1.770	1.826	1.874	1.912
3.00	2.377	2.603	2.817	3.017	3.202	3.371	3.523	3.658	3.774	3.872	3.950
4.50	3.752	4.113	4.454	4.773	5.068	5.339	5.582	5.796	5.980	6.133	6.254
6.00	5.356	5.878	6.375	6.841	7.274	7.671	8.027	8.341	8.608	8.828	8.999
7.50	7.257	7.985	8.682	9.342	9.960	10.528	11.041	11.492	11.876	12.188	12.425
9.00	9.490	10.487	11.454	12.383	13.265	14.088	14.840	15.509	16.062	16.545	16.890
10.50	11.995	13.340	14.673	15.985	17.263	18.491	19.648	20.706	21.636	22.405	22.980
12.00	14.516	16.275	18.071	19.902	21.762	23.636	25.501	27.317	29.024	30.538	31.751
13.50	16.522	18.667	20.924	23.312	25.855	28.580	31.511	34.669	38.051	41.586	45.045
15.00	17.347	19.664	22.133	24.792	27.691	30.899	34.515	38.691	43.672	49.900	58.377

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	133.847	134.225	134.636	135.078	135.550	136.048	136.572	137.119	137.674	138.191	138.863
1.50	133.469	133.859	134.284	134.741	135.228	135.743	136.284	136.849	137.423	137.959	138.650
3.00	132.309	132.737	133.203	133.704	134.239	134.805	135.401	136.022	136.654	137.250	138.002
4.50	130.290	130.780	131.317	131.895	132.514	133.170	133.860	134.582	135.318	136.021	136.881
6.00	127.272	127.853	128.490	129.181	129.923	130.713	131.548	132.423	133.320	134.191	135.223
7.50	123.053	123.745	124.510	125.347	126.255	127.229	128.268	129.364	130.499	131.620	132.913
9.00	117.359	118.165	119.069	120.073	121.178	122.385	123.691	125.092	126.565	128.056	129.745
10.50	109.870	110.746	111.751	112.893	114.184	115.633	117.248	119.033	120.971	123.006	125.311
12.00	100.316	101.134	102.096	103.227	104.554	106.110	107.936	110.073	112.543	115.328	118.617
13.50	88.727	89.256	89.894	90.669	91.616	92.791	94.269	96.163	98.528	101.863	106.375
15.00	75.771	75.795	75.821	75.850	75.880	75.913	75.948	75.986	76.021	76.030	76.110

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	133.847	134.225	134.636	135.078	135.550	136.048	136.572	137.119	137.674	138.191	138.863
1.50	133.474	133.865	134.291	134.749	135.237	135.752	136.295	136.861	137.435	137.972	138.664
3.00	132.331	132.762	133.232	133.738	134.277	134.847	135.446	136.071	136.706	137.304	138.058
4.50	130.344	130.845	131.392	131.982	132.611	133.277	133.977	134.707	135.450	136.159	137.024
6.00	127.385	127.988	128.648	129.362	130.126	130.938	131.793	132.686	133.598	134.481	135.522
7.50	123.267	124.002	124.812	125.695	126.647	127.664	128.742	129.874	131.038	132.183	133.492
9.00	117.742	118.629	119.618	120.710	121.902	123.193	124.578	126.050	127.583	129.121	130.840
10.50	110.522	111.547	112.710	114.019	115.482	117.102	118.883	120.820	122.890	125.030	127.401
12.00	101.361	102.435	103.683	105.128	106.794	108.711	110.908	113.412	116.225	119.303	122.793
13.50	90.252	91.187	92.297	93.617	95.195	97.092	99.396	102.222	105.713	110.025	115.519
15.00	77.731	78.304	78.986	79.799	80.775	81.961	83.423	85.270	87.672	90.943	95.919

Tabela V (Continuação)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COI F COIL NO.=

INNER RADIUOS= 10.700 (CM) OUTER RADIOUS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 5.500 (CM)

AXIAL PARTITION= 0.062 (CM) RADIOUS PARTITION= 0.0644 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	-24.905	-27.923	-31.002	-34.137	-37.319	-40.531	-43.746	-46.926	-50.015	-52.939	-55.604
1.50	-27.588	-31.181	-34.943	-38.893	-43.046	-47.418	-52.015	-56.831	-61.837	-66.965	-72.083
3.00	-28.305	-32.219	-36.408	-40.921	-45.818	-51.172	-57.071	-63.627	-70.982	-79.315	-88.837
4.50	-26.076	-29.801	-33.827	-38.213	-43.029	-48.362	-54.326	-61.069	-68.798	-77.804	-88.518
6.00	-20.658	-23.618	-26.808	-30.261	-34.015	-38.107	-42.576	-47.453	-52.756	-58.469	-64.506
7.50	-12.694	-14.490	-16.408	-18.459	-20.649	-22.979	-25.442	-28.016	-30.659	-33.305	-35.853
9.00	-3.272	-3.730	-4.216	-4.732	-5.277	-5.849	-6.442	-7.048	-7.654	-8.241	-8.785
10.50	6.505	7.418	8.388	9.419	10.510	11.659	12.856	14.084	15.319	16.522	17.646
12.00	15.567	17.780	20.151	22.696	25.430	28.361	31.489	34.801	38.259	41.791	45.275
13.50	22.794	26.065	29.598	33.435	37.628	42.234	47.316	52.948	59.204	66.150	73.810
15.00	27.181	31.036	35.195	39.719	44.680	50.171	56.311	63.264	71.256	80.628	91.912

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	91.833	90.699	89.356	87.773	85.914	83.741	81.209	78.272	74.888	71.017	66.638
1.50	111.439	110.764	109.914	108.846	107.538	105.833	103.734	101.106	97.815	93.699	88.576
3.00	133.014	133.202	133.346	133.418	133.380	133.181	132.746	131.972	130.701	128.686	125.515
4.50	154.507	155.808	157.268	158.899	160.714	162.738	165.001	167.558	170.493	173.949	178.165
6.00	173.150	175.478	178.139	181.171	184.622	188.554	193.049	198.221	204.221	211.249	219.530
7.50	186.422	189.436	192.872	196.765	201.136	206.092	211.624	217.809	224.705	232.360	240.770
9.00	192.738	196.049	199.808	204.042	208.730	214.050	219.876	226.278	233.268	240.833	248.909
10.50	191.462	194.715	198.411	202.580	207.254	212.464	218.241	224.612	231.597	239.195	247.350
12.00	182.714	185.543	188.775	192.445	196.601	201.296	206.595	212.576	219.326	226.936	235.452
13.50	167.424	169.439	171.739	174.355	177.329	180.719	184.604	189.098	194.367	200.649	208.269
15.00	147.518	148.439	149.450	150.548	151.729	152.988	154.321	155.722	157.186	158.705	160.249

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	95.150	94.900	94.581	94.177	93.669	93.034	92.242	91.261	90.054	88.578	86.790
1.50	114.803	115.069	115.335	115.586	115.806	115.970	116.045	115.984	115.722	115.169	114.200
3.00	135.992	137.043	138.227	139.553	141.031	142.673	144.494	146.509	148.732	151.165	153.773
4.50	156.692	158.632	160.865	163.429	166.375	169.772	173.715	178.340	183.851	190.556	198.943
6.00	174.378	177.060	180.145	183.681	187.730	192.366	197.669	203.821	210.925	219.191	228.811
7.50	186.854	189.989	193.568	197.629	202.213	207.369	213.148	219.603	226.787	234.735	243.425
9.00	192.766	196.085	199.852	204.097	208.847	214.129	219.970	226.388	233.393	240.974	249.064
10.50	191.572	194.856	198.588	202.799	207.520	212.784	218.619	225.053	232.103	239.765	247.978
12.00	183.376	186.393	189.847	193.779	198.239	203.284	208.981	215.406	222.638	230.752	239.766
13.50	168.968	171.432	174.270	177.531	181.277	185.588	190.571	196.370	203.183	211.272	220.901
15.00	150.001	151.649	153.539	155.700	158.171	161.004	164.274	168.082	172.583	178.011	184.736

Tabela V (Continuação)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COIL NO.=

INNER RADIUOS= 10.700 (CM) OUTER RADIOUS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 5.500 (CM)

AXIAL PARTITION= 0.062 (CM) RADIOUS PARTITION= 0.0644 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	24.905	27.923	31.002	34.137	37.319	40.530	43.746	46.926	50.015	52.939	55.604
1.50	21.357	23.776	26.186	28.577	30.933	33.234	35.455	37.565	39.529	41.304	42.848
3.00	17.738	19.640	21.504	23.318	25.069	26.742	28.321	29.787	31.120	32.299	33.305
4.50	14.464	15.957	17.403	18.793	20.119	21.370	22.537	23.608	24.573	25.422	26.144
6.00	11.687	12.864	13.996	15.078	16.104	17.066	17.959	18.776	19.511	20.160	20.717
7.50	9.412	10.348	11.245	12.100	12.908	13.665	14.368	15.012	15.593	16.110	16.559
9.00	7.586	8.336	9.054	9.738	10.385	10.992	11.557	12.076	12.548	12.971	13.344
10.50	6.133	6.739	7.319	7.873	8.396	8.892	9.352	9.778	10.168	10.521	10.836
12.00	4.981	5.474	5.948	6.401	6.831	7.237	7.617	7.971	8.297	8.594	8.863
13.50	4.068	4.472	4.862	5.235	5.591	5.927	6.244	6.540	6.816	7.069	7.300
15.00	3.342	3.676	3.999	4.309	4.605	4.886	5.152	5.402	5.636	5.853	6.052

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	91.833	90.699	89.356	87.773	85.914	83.741	81.209	78.272	74.888	71.017	66.638
1.50	75.128	73.873	72.432	70.788	68.926	66.832	64.490	61.892	59.031	55.911	52.543
3.00	61.408	60.231	58.904	57.423	55.783	53.983	52.021	49.899	47.625	45.206	42.659
4.50	50.344	49.326	48.194	46.948	45.589	44.118	42.541	40.861	39.087	37.228	35.296
6.00	41.485	40.643	39.715	38.703	37.608	36.436	35.189	33.874	32.497	31.066	29.588
7.50	34.396	33.717	32.972	32.164	31.295	30.370	29.391	28.364	27.294	26.186	25.047
9.00	28.710	28.168	27.577	26.937	26.251	25.523	24.755	23.952	23.117	22.255	21.369
10.50	24.126	23.697	23.229	22.724	22.183	21.610	21.006	20.376	19.721	19.045	18.351
12.00	20.412	20.072	19.701	19.302	18.875	18.422	17.946	17.448	16.932	16.398	15.850
13.50	17.382	17.113	16.819	16.502	16.163	15.804	15.427	15.032	14.622	14.198	13.763
15.00	14.896	14.682	14.447	14.195	13.925	13.639	13.338	13.023	12.695	12.356	12.007

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	95.150	94.900	94.581	94.177	93.669	93.033	92.242	91.261	90.054	88.578	86.790
1.50	78.104	77.605	77.020	76.339	75.549	74.639	73.594	72.400	71.043	69.513	67.799
3.00	63.919	63.352	62.706	61.977	61.157	60.244	59.231	58.114	56.891	55.559	54.121
4.50	52.381	51.843	51.240	50.570	49.831	49.022	48.142	47.191	46.170	45.080	43.924
6.00	43.099	42.630	42.109	41.536	40.911	40.234	39.507	38.730	37.905	37.034	36.120
7.50	35.601	35.269	34.837	34.365	33.853	33.303	32.715	32.092	31.434	30.745	30.026
9.00	29.695	29.376	29.025	28.643	28.231	27.789	27.320	26.824	26.303	25.759	25.193
10.50	24.894	24.637	24.355	24.049	23.719	23.368	22.994	22.601	22.188	21.758	21.311
12.00	21.011	20.805	20.580	20.335	20.073	19.793	19.495	19.183	18.855	18.514	18.160
13.50	17.852	17.688	17.508	17.313	17.103	16.879	16.643	16.393	16.132	15.860	15.579
15.00	15.267	15.135	14.991	14.834	14.667	14.488	14.298	14.099	13.890	13.672	13.446

Tabela V (Continuação)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF TOTAL COIL

INNER RADIOS= 10.700 (CM) OUTER RADIOS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LANGTH= 5.500 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.50	-0.122	-0.819	-1.751	-2.950	-4.450	-6.285	-8.485	-11.074	-14.057	-17.402	-21.018
3.00	2.409	1.402	-0.048	-2.004	-4.543	-7.751	-11.733	-16.615	-22.552	-29.735	-38.385
4.50	9.887	9.299	8.138	6.328	3.783	0.404	-3.927	-9.362	-16.102	-24.432	-34.773
6.00	23.908	24.634	24.717	24.091	22.700	20.496	17.441	13.518	8.730	3.124	-3.174
7.50	45.514	48.501	50.721	52.099	52.584	52.157	50.832	48.663	45.750	42.239	38.323
9.00	75.819	82.429	87.950	92.204	95.084	96.550	96.616	95.351	92.885	89.419	85.219
10.50	116.100	129.949	141.412	150.154	156.275	159.908	161.105	159.829	155.993	149.616	141.225
12.00	138.784	158.681	174.260	186.046	194.790	200.882	204.433	205.316	203.138	197.185	187.005
13.50	114.890	127.363	138.944	149.459	158.869	167.230	174.665	181.340	187.469	193.268	198.951
15.00	96.814	107.132	117.202	127.041	136.722	146.388	156.280	166.762	178.394	192.071	209.460

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	755.494	705.408	655.095	604.399	553.255	501.564	449.222	396.130	342.199	286.924	231.282
1.50	756.536	706.909	657.117	607.008	556.514	505.535	453.951	401.637	348.450	293.801	238.539
3.00	758.599	710.295	662.017	613.630	565.088	516.312	467.199	417.634	367.457	315.993	263.864
4.50	758.606	712.294	666.292	620.494	574.901	529.497	484.278	439.275	394.560	349.837	306.368
6.00	751.984	708.068	664.752	621.938	579.633	537.834	496.560	455.872	415.885	376.336	338.455
7.50	733.357	692.166	651.884	612.367	573.559	535.380	497.749	460.610	423.922	387.225	351.479
9.00	696.291	658.379	621.941	586.706	552.465	518.973	485.979	453.243	420.527	387.172	353.974
10.50	630.201	596.697	566.391	538.171	511.342	485.453	460.161	435.117	409.825	383.063	354.759
12.00	503.456	491.792	476.841	461.039	445.325	430.171	415.933	403.000	391.914	383.607	380.899
13.50	408.664	401.644	393.746	385.359	376.929	368.923	361.841	356.249	352.814	352.312	355.836
15.00	335.172	329.770	323.919	317.748	311.405	305.051	298.850	292.957	287.507	282.590	278.359

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	755.494	705.408	655.095	604.399	553.255	501.564	449.222	396.130	342.199	286.924	231.282
1.50	756.536	706.909	657.120	607.015	556.582	505.574	454.030	401.789	348.733	294.316	239.463
3.00	758.603	710.296	662.017	613.633	565.107	516.370	467.346	417.965	368.148	317.389	266.641
4.50	758.671	712.355	666.342	620.526	574.913	529.497	484.294	439.375	394.888	350.689	308.335
6.00	752.364	708.496	665.212	622.404	580.077	538.225	496.866	456.073	415.977	376.349	338.470
7.50	734.768	693.863	653.855	614.579	575.965	537.915	500.338	463.174	426.384	389.521	353.562
9.00	700.407	663.519	628.129	593.907	560.588	527.878	495.490	463.164	430.663	397.364	364.088
10.50	640.806	610.683	583.777	558.726	534.689	511.111	487.548	463.543	438.509	411.245	381.835
12.00	522.235	516.758	507.685	497.162	486.003	474.763	463.458	452.267	441.431	431.373	424.329
13.50	424.507	421.354	417.542	413.328	409.041	405.056	401.792	399.747	399.528	401.851	407.677
15.00	348.874	346.736	344.471	342.204	340.097	338.358	337.246	337.095	338.356	341.684	348.364

Tabela VI - Mapeamento do Campo Magnético no Enrolamento de NbTi

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COI F COIL NO.=

INNER RADIUOS= 4.250 (CM) OUTER RADIOUS= 9.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 11.500 (CM)

AXIAL PARTITION= 0.103 (CM) RADIOUS PARTITION= 0.1162 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.50	6.124	6.092	6.060	6.026	5.991	5.956	5.919	5.881	5.842	5.802	5.762
3.00	12.751	12.676	12.599	12.519	12.438	12.354	12.268	12.180	12.090	11.999	11.906
4.50	20.438	20.291	20.140	19.986	19.828	19.667	19.503	19.337	19.168	18.997	18.824
6.00	29.841	29.564	29.282	28.996	28.706	28.413	28.117	27.817	27.516	27.212	26.907
7.50	41.732	41.212	40.687	40.160	39.630	39.099	38.567	38.035	37.502	36.971	36.442
9.00	56.823	55.824	54.829	53.841	52.861	51.890	50.929	49.980	49.044	48.121	47.212
10.50	74.335	72.324	70.378	68.498	66.682	64.930	63.240	61.611	60.042	58.529	57.070
12.00	79.574	77.070	74.698	72.449	70.313	68.281	66.346	64.502	62.742	61.060	59.450
13.50	63.932	62.683	61.446	60.225	59.021	57.836	56.671	55.526	54.404	53.304	52.228
15.00	48.849	48.213	47.575	46.934	46.293	45.651	45.010	44.371	43.735	43.101	42.471

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	-38.002	-37.559	-37.142	-36.742	-36.352	-35.967	-35.585	-35.205	-34.826	-34.447	-34.070
1.50	-38.250	-37.790	-37.357	-36.942	-36.537	-36.137	-35.741	-35.348	-34.953	-34.562	-34.172
3.00	-38.942	-38.431	-37.950	-37.486	-37.034	-36.589	-36.149	-35.711	-35.277	-34.845	-34.416
4.50	-39.900	-39.299	-38.730	-38.182	-37.648	-37.124	-36.607	-36.096	-35.590	-35.090	-34.595
6.00	-40.708	-39.971	-39.271	-38.597	-37.943	-37.302	-36.675	-36.058	-35.451	-34.854	-34.267
7.50	-40.456	-39.531	-38.654	-37.813	-37.002	-36.214	-35.449	-34.703	-33.976	-33.267	-32.577
9.00	-37.070	-35.933	-34.866	-33.856	-32.895	-31.978	-31.100	-30.258	-29.451	-28.676	-27.933
10.50	-25.417	-24.308	-23.315	-22.417	-21.600	-20.850	-20.159	-19.519	-18.925	-18.371	-17.854
12.00	1.654	0.981	0.392	-0.125	-0.583	-0.990	-1.354	-1.680	-1.973	-2.238	-2.478
13.50	18.137	17.061	16.043	15.079	14.167	13.305	12.489	11.719	10.990	10.302	9.651
15.00	23.052	22.175	21.325	20.503	19.707	18.938	18.195	17.477	16.784	16.116	15.470

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	38.002	37.559	37.142	36.742	36.352	35.967	35.585	35.205	34.826	34.447	34.070
1.50	38.737	38.278	37.846	37.430	37.025	36.624	36.228	35.832	35.438	35.046	34.654
3.00	40.976	40.468	39.986	39.522	39.067	38.618	38.174	37.731	37.291	36.853	36.417
4.50	44.830	44.228	43.654	43.096	42.551	42.012	41.479	40.949	40.424	39.902	39.384
6.00	50.474	49.717	48.987	48.276	47.578	46.891	46.212	45.541	44.876	44.219	43.569
7.50	58.122	57.106	56.121	55.160	54.219	53.294	52.383	51.487	50.604	49.735	48.880
9.00	67.845	66.389	64.976	63.601	62.260	60.952	59.674	58.426	57.207	56.017	54.856
10.50	78.560	76.300	74.140	72.073	70.093	68.195	66.375	64.629	62.953	61.344	59.797
12.00	79.591	77.076	74.699	72.449	70.315	68.289	66.360	64.524	62.773	61.101	59.501
13.50	66.455	64.963	63.506	62.084	60.698	59.346	58.030	56.750	55.503	54.291	53.112
15.00	54.015	53.068	52.135	51.217	50.313	49.423	48.549	47.689	46.845	46.015	45.201

Tabela VI (Continuação)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COI : COIL NO.=

INNER RADIUOS= 9.700 (CM) OUTER RADIOUS= 10.700 (CM) ½ HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

AXIAL PARTITION= 0.087 (CM) RADIOUS PARTITION= 0.0903 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.50	1.953	1.958	1.962	1.965	1.968	1.971	1.973	1.975	1.977	1.978	1.979
3.00	4.031	4.040	4.047	4.054	4.059	4.064	4.069	4.072	4.075	4.077	4.078
4.50	6.374	6.386	6.396	6.405	6.413	6.419	6.424	6.427	6.430	6.430	6.430
6.00	9.159	9.173	9.185	9.195	9.202	9.208	9.211	9.213	9.212	9.209	9.204
7.50	12.630	12.646	12.658	12.666	12.671	12.673	12.671	12.666	12.658	12.647	12.632
9.00	17.165	17.181	17.191	17.196	17.195	17.188	17.176	17.158	17.134	17.106	17.071
10.50	23.419	23.439	23.449	23.448	23.436	23.413	23.380	23.336	23.282	23.218	23.144
12.00	32.749	32.799	32.824	32.824	32.800	32.750	32.675	32.576	32.452	32.306	32.137
13.50	48.841	49.128	49.328	49.437	49.451	49.366	49.186	48.910	48.544	48.093	47.565
15.00	86.732	94.577	98.892	101.484	102.765	102.925	102.021	100.031	96.909	92.695	84.238

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	139.852	123.167	109.052	93.231	76.850	60.328	43.813	27.485	11.857	-1.879	-18.894
1.50	139.668	122.987	108.876	93.059	76.682	60.164	43.653	27.329	11.706	-2.027	-19.038
3.00	139.109	122.441	108.342	92.538	76.174	59.668	43.169	26.858	11.247	-2.474	-19.472
4.50	138.150	121.505	107.430	91.648	75.307	58.823	42.347	26.058	10.470	-3.229	-20.205
6.00	136.748	120.140	106.101	90.356	74.050	57.603	41.163	24.910	9.357	-4.306	-21.248
7.50	134.831	118.279	104.296	88.607	72.357	55.966	39.581	23.383	7.885	-5.724	-22.612
9.00	132.274	115.810	101.915	86.315	70.153	53.849	37.552	21.440	6.028	-7.496	-24.299
10.50	128.841	112.525	98.780	83.327	67.314	51.158	35.008	19.043	3.775	-9.605	-26.267
12.00	123.969	107.938	94.481	79.319	63.598	47.733	31.873	16.195	1.211	-11.891	-28.281
13.50	115.537	100.242	87.554	73.187	58.276	43.229	28.183	13.305	-0.903	-13.260	-28.945
15.00	76.223	67.827	60.717	52.743	44.503	36.183	27.874	19.651	11.783	4.863	-3.703

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	139.852	123.167	109.052	93.231	76.850	60.328	43.813	27.485	11.857	1.879	18.894
1.50	139.682	123.003	108.894	93.080	76.708	60.196	43.698	27.400	11.871	2.832	19.141
3.00	139.167	122.507	108.418	92.627	76.282	59.806	43.360	27.165	11.962	4.769	19.895
4.50	138.297	121.673	107.620	91.872	75.579	59.172	42.832	26.839	12.286	7.195	21.203
6.00	137.055	120.490	106.498	90.822	74.620	58.334	42.181	26.559	13.130	10.166	23.155
7.50	135.421	118.953	105.061	89.508	73.458	57.383	41.560	26.593	14.913	13.882	25.901
9.00	133.383	117.077	103.355	88.011	72.250	56.526	41.293	27.460	18.164	18.676	29.696
10.50	130.952	114.941	101.525	86.564	71.217	56.261	42.097	30.120	23.586	25.126	35.008
12.00	128.221	112.811	100.020	85.843	71.558	57.888	45.646	36.379	32.475	34.425	42.809
13.50	125.436	111.633	100.493	88.319	76.429	65.619	56.688	50.687	48.552	49.887	55.679
15.00	115.466	116.384	116.044	114.372	111.987	109.100	105.760	101.942	97.623	92.823	84.320

Tabela VI (Continuação)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COIL F COIL NO.=

INNER RADIUOS= 10.700 (CM) OUTER RADIUOS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 5.500 (CM)

AXIAL PARTITION= 0.062 (CM) RADIOUS PARTITION= 0.0644 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	-58.817	-59.187	-59.531	-59.849	-60.138	-60.398	-60.629	-60.829	-60.997	-61.133	-61.236
1.50	-79.098	-79.992	-80.847	-81.658	-82.420	-83.128	-83.777	-84.363	-84.881	-85.326	-85.694
3.00	-105.414	-108.025	-110.683	-113.377	-116.091	-118.806	-121.493	-124.120	-126.646	-129.023	-131.200
4.50	-108.929	-112.474	-116.221	-120.190	-124.399	-128.862	-133.579	-138.530	-143.651	-148.820	-153.853
6.00	-73.484	-74.704	-75.890	-77.034	-78.128	-79.164	-80.133	-81.025	-81.831	-82.543	-83.152
7.50	-39.131	-39.527	-39.899	-40.246	-40.567	-40.859	-41.122	-41.353	-41.552	-41.716	-41.846
9.00	-9.449	-9.525	-9.596	-9.662	-9.721	-9.775	-9.822	-9.863	-9.897	-9.924	-9.944
10.50	19.030	19.191	19.341	19.479	19.606	19.720	19.821	19.908	19.981	20.040	20.085
12.00	49.923	50.500	51.047	51.562	52.042	52.483	52.884	53.241	53.553	53.816	54.029
13.50	86.105	87.891	89.661	91.403	93.105	94.752	96.327	97.813	99.190	100.438	101.538
15.00	114.212	118.278	122.679	127.488	132.800	138.746	145.499	153.274	162.270	172.480	190.211

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	59.275	58.142	56.990	55.820	54.635	53.434	52.219	50.991	49.753	48.505	47.248
1.50	78.816	77.187	75.498	73.750	71.944	70.083	68.167	66.200	64.185	62.126	60.029
3.00	117.092	115.321	113.355	111.176	108.759	106.084	103.128	99.872	96.304	92.415	88.209
4.50	187.065	188.889	190.984	193.437	196.347	199.816	203.868	208.270	212.081	213.018	221.392
6.00	234.636	237.211	239.963	242.942	246.199	249.771	253.594	257.327	259.899	258.897	264.533
7.50	254.462	256.620	258.891	261.323	263.965	266.854	269.924	272.835	274.521	272.569	277.196
9.00	261.551	263.500	265.547	267.741	270.131	272.754	275.546	278.166	279.550	277.286	281.592
10.50	260.209	262.199	264.290	266.530	268.968	271.642	274.486	277.161	278.601	276.394	280.759
12.00	249.701	251.985	254.395	256.978	259.782	262.846	266.104	269.213	271.108	269.375	274.230
13.50	223.045	225.700	228.579	231.738	235.232	239.104	243.296	247.467	250.551	250.134	256.427
15.00	162.521	162.886	163.293	163.767	164.334	165.012	165.770	166.438	166.484	164.704	166.206

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	83.505	82.967	82.412	81.840	81.250	80.642	80.017	79.374	78.715	78.038	77.345
1.50	111.662	111.160	110.617	110.032	109.403	108.728	108.006	107.236	106.416	105.547	104.627
3.00	157.552	158.013	158.430	158.791	159.078	159.276	159.361	159.312	159.102	158.705	158.096
4.50	216.469	219.840	223.567	227.736	232.438	237.765	243.733	250.134	256.152	259.854	269.602
6.00	245.873	248.696	251.677	254.863	258.298	262.016	265.954	269.781	272.477	271.737	277.294
7.50	257.454	259.647	261.948	264.404	267.064	269.964	273.038	275.951	277.648	275.743	280.337
9.00	261.721	263.672	265.720	267.915	270.306	272.929	275.721	278.341	279.725	277.463	281.767
10.50	260.904	262.901	264.997	267.241	269.682	272.356	275.200	277.875	279.316	277.120	281.477
12.00	254.643	256.996	259.466	262.100	264.944	268.035	271.308	274.428	276.346	274.698	279.502
13.50	239.089	242.210	245.535	249.112	252.987	257.194	261.671	266.096	269.471	269.546	275.798
15.00	198.639	201.299	204.242	207.540	211.285	215.591	220.567	226.262	232.483	238.489	252.596

Tabela VI (Continuação)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COI T COIL NO.=
INNER RADIUOS= 10.700 (CM) OUTER RADIOUS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 5.500 (CM)
AXIAL PARTITION= 0.062 (CM) RADIOUS PARTITION= 0.0644 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	58.817	59.187	59.531	59.849	60.138	60.398	60.629	60.829	60.997	61.133	61.236
1.50	44.603	44.797	44.975	45.138	45.285	45.415	45.529	45.627	45.708	45.772	45.819
3.00	34.432	34.556	34.671	34.776	34.871	34.956	35.031	35.096	35.152	35.197	35.232
4.50	26.963	27.055	27.141	27.220	27.293	27.360	27.420	27.474	27.521	27.562	27.596
6.00	21.362	21.437	21.508	21.574	21.635	21.693	21.746	21.794	21.838	21.878	21.913
7.50	17.094	17.158	17.219	17.276	17.331	17.382	17.430	17.475	17.517	17.556	17.592
9.00	13.800	13.855	13.909	13.960	14.009	14.056	14.100	14.142	14.181	14.219	14.254
10.50	11.229	11.278	11.326	11.372	11.416	11.458	11.498	11.537	11.574	11.610	11.644
12.00	9.205	9.249	9.291	9.332	9.372	9.410	9.447	9.483	9.517	9.550	9.582
13.50	7.599	7.637	7.675	7.711	7.747	7.781	7.815	7.847	7.879	7.909	7.939
15.00	6.313	6.348	6.381	6.414	6.446	6.477	6.507	6.536	6.565	6.593	6.620

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	59.275	58.142	56.990	55.820	54.635	53.434	52.219	50.991	49.753	48.505	47.248
1.50	47.185	46.387	45.583	44.772	43.956	43.135	42.309	41.479	40.647	39.811	38.974
3.00	38.715	38.137	37.556	36.973	36.387	35.800	35.210	34.619	34.028	33.435	32.842
4.50	32.345	31.916	31.485	31.053	30.620	30.186	29.752	29.316	28.881	28.445	28.010
6.00	27.348	27.023	26.698	26.371	26.044	25.717	25.389	25.061	24.733	24.405	24.076
7.50	23.325	23.076	22.826	22.576	22.325	22.074	21.823	21.571	21.319	21.068	20.816
9.00	20.031	19.838	19.644	19.450	19.255	19.060	18.865	18.669	18.474	18.278	18.082
10.50	17.303	17.151	16.999	16.847	16.694	16.541	16.387	16.234	16.080	15.926	15.772
12.00	15.022	14.902	14.782	14.661	14.540	14.419	14.298	14.176	14.054	13.932	13.810
13.50	13.103	13.007	12.911	12.815	12.719	12.622	12.525	12.428	12.330	12.233	12.135
15.00	11.479	11.402	11.325	11.248	11.170	11.092	11.014	10.936	10.857	10.779	10.700

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	83.505	82.967	82.412	81.840	81.250	80.642	80.017	79.374	78.715	78.038	77.345
1.50	64.930	64.487	64.036	63.577	63.110	62.635	62.153	61.663	61.167	60.663	60.152
3.00	51.812	51.465	51.113	50.758	50.398	50.035	49.668	49.298	48.924	48.546	48.165
4.50	42.109	41.840	41.568	41.295	41.018	40.740	40.460	40.178	39.894	39.608	39.320
6.00	34.702	34.493	34.283	34.072	33.859	33.644	33.429	33.212	32.994	32.775	32.555
7.50	28.918	28.756	28.592	28.428	28.263	28.097	27.929	27.762	27.593	27.424	27.254
9.00	24.325	24.197	24.070	23.941	23.812	23.682	23.552	23.421	23.289	23.157	23.025
10.50	20.627	20.527	20.427	20.325	20.224	20.122	20.019	19.916	19.813	19.709	19.605
12.00	17.618	17.539	17.460	17.379	17.299	17.218	17.137	17.055	16.973	16.891	16.809
13.50	15.147	15.084	15.020	14.956	14.892	14.828	14.763	14.698	14.633	14.567	14.501
15.00	13.100	13.050	12.999	12.948	12.896	12.845	12.792	12.740	12.688	12.635	12.582

Tabela VI (Continuação)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF TOTAL COIL

INNER RADIOS= 10.700 (CM) OUTER RADIOS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LANGTH= 5.500 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.50	-26.418	-27.145	-27.851	-28.529	-29.176	-29.786	-30.356	-30.880	-31.354	-31.773	-32.134
3.00	-54.199	-56.753	-59.366	-62.029	-64.724	-67.433	-70.126	-72.772	-75.329	-77.751	-79.985
4.50	-55.154	-58.742	-62.544	-66.579	-70.865	-75.416	-80.232	-85.292	-90.532	-95.831	-101.003
6.00	-13.121	-14.529	-15.914	-17.269	-18.584	-19.850	-21.059	-22.201	-23.266	-24.244	-25.128
7.50	32.325	31.488	30.665	29.856	29.066	28.295	27.547	26.823	26.126	25.458	24.820
9.00	78.339	77.335	76.333	75.335	74.343	73.358	72.382	71.417	70.462	69.521	68.592
10.50	128.013	126.233	124.494	122.796	121.139	119.520	117.939	116.393	114.879	113.397	111.942
12.00	171.451	169.617	167.860	166.167	164.526	162.925	161.352	159.802	158.264	156.732	155.197
13.50	206.477	207.339	208.110	208.777	209.324	209.736	209.998	210.097	210.016	209.745	209.270
15.00	256.106	267.415	275.527	282.320	288.303	293.799	299.037	304.212	309.478	314.870	323.541

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	220.400	201.892	185.889	168.129	149.767	131.227	112.664	94.263	76.537	60.682	41.532
1.50	227.419	208.772	192.600	174.640	156.046	137.244	118.388	99.662	81.584	65.348	45.793
3.00	255.975	237.467	221.305	203.201	184.286	164.962	145.358	125.638	106.301	88.531	67.163
4.50	317.660	303.011	291.169	277.956	264.625	251.702	239.360	227.549	215.841	203.145	194.601
6.00	358.023	344.403	333.491	321.072	308.351	295.789	283.472	271.240	258.538	244.142	233.095
7.50	372.163	358.444	347.359	334.693	321.646	308.680	295.880	283.087	269.749	254.645	242.823
9.00	376.786	363.215	352.241	339.649	326.693	313.685	300.862	288.017	274.600	259.391	247.442
10.50	380.936	367.568	356.754	344.287	331.376	318.491	305.722	292.919	279.531	264.345	252.411
12.00	390.346	375.807	364.050	350.833	337.387	324.008	310.921	297.904	284.399	269.177	257.281
13.50	369.823	356.011	345.087	332.818	320.393	308.260	296.493	284.918	272.969	259.409	249.268
15.00	273.275	264.289	256.660	248.261	239.744	231.225	222.854	214.502	205.909	196.461	188.674

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	220.400	201.892	185.889	168.129	149.767	131.227	112.664	94.263	76.537	60.682	41.532
1.50	228.948	210.529	194.603	176.955	158.750	140.439	122.218	104.336	87.401	72.663	55.943
3.00	261.650	244.155	229.129	212.457	195.322	178.212	161.390	145.192	130.286	117.826	104.443
4.50	322.412	308.652	297.810	285.819	273.949	262.757	252.449	243.009	234.059	224.614	219.252
6.00	358.264	344.709	333.870	321.536	308.911	296.454	284.253	272.147	259.583	245.343	234.446
7.50	373.564	359.824	348.710	336.022	322.957	309.974	297.159	284.355	271.012	255.915	244.088
9.00	384.844	371.356	360.417	347.904	334.947	322.148	309.447	296.740	283.496	268.546	256.773
10.50	401.870	388.640	377.852	365.530	352.824	340.179	327.682	315.196	302.217	287.640	276.120
12.00	426.340	412.311	400.886	388.195	375.320	362.665	350.294	338.059	325.469	311.482	300.466
13.50	423.558	411.987	402.962	392.882	382.712	372.845	363.328	354.004	344.411	333.595	325.466
15.00	374.526	375.978	376.549	375.950	374.942	373.875	372.944	372.231	371.720	371.133	374.535

Tabela VII - Mapeamento do Campo Magnético no Enrolamento NbTi

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COI F COIL NO.=
INNER RADIUOS= 4.250 (CM) OUTER RADIOUS= 9.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 11.500 (CM)
AXIAL PARTITION= 0.103 (CM) RADIOUS PARTITION= 0.1162 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.50	5.762	5.708	5.653	5.596	5.539	5.481	5.421	5.361	5.300	5.239	5.177
3.00	11.906	11.782	11.657	11.529	11.399	11.268	11.135	11.000	10.865	10.728	10.590
4.50	18.824	18.596	18.365	18.131	17.896	17.658	17.420	17.180	16.939	16.697	16.456
6.00	26.907	26.508	26.108	25.706	25.304	24.902	24.501	24.100	23.702	23.305	22.911
7.50	36.442	35.757	35.076	34.401	33.732	33.070	32.416	31.770	31.133	30.505	29.887
9.00	47.212	46.052	44.918	43.809	42.728	41.674	40.647	39.647	38.674	37.727	36.806
10.50	57.070	55.251	53.515	51.857	50.273	48.759	47.310	45.923	44.594	43.320	42.097
12.00	59.450	57.458	55.571	53.781	52.082	50.465	48.924	47.457	46.055	44.714	43.432
13.50	52.228	50.862	49.537	48.250	47.003	45.795	44.624	43.490	42.392	41.328	40.299
15.00	42.471	41.659	40.855	40.061	39.277	38.504	37.743	36.994	36.258	35.535	34.826

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	-34.070	-33.583	-33.098	-32.617	-32.140	-31.667	-31.198	-30.735	-30.277	-29.823	-29.375
1.50	-34.172	-33.668	-33.168	-32.672	-32.181	-31.694	-31.213	-30.737	-30.267	-29.802	-29.343
3.00	-34.416	-33.864	-33.316	-32.776	-32.242	-31.714	-31.195	-30.682	-30.177	-29.679	-29.189
4.50	-34.595	-33.960	-33.335	-32.720	-32.116	-31.522	-30.940	-30.368	-29.808	-29.258	-28.720
6.00	-34.267	-33.519	-32.789	-32.076	-31.381	-30.703	-30.042	-29.399	-28.772	-28.162	-27.569
7.50	-32.577	-31.707	-30.866	-30.055	-29.273	-28.518	-27.791	-27.089	-26.414	-25.762	-25.134
9.00	-27.933	-27.012	-26.139	-25.312	-24.527	-23.763	-23.078	-22.408	-21.771	-21.166	-20.591
10.50	-17.854	-17.231	-16.657	-16.127	-15.636	-15.180	-14.755	-14.358	-13.987	-13.638	-13.310
12.00	-2.478	-2.757	-3.004	-3.224	-3.420	-3.595	-3.751	-3.892	-4.018	-4.131	-4.232
13.50	9.651	8.857	8.119	7.432	6.792	6.195	5.639	5.120	4.635	4.182	3.758
15.00	15.470	14.665	13.897	13.165	12.467	11.802	11.168	10.564	9.989	9.441	8.919

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	34.070	33.583	33.098	32.617	32.140	31.667	31.198	30.735	30.277	29.823	29.375
1.50	34.654	34.149	33.646	33.148	32.654	32.164	31.680	31.201	30.727	30.259	29.797
3.00	36.417	35.855	35.297	34.744	34.197	33.657	33.122	32.594	32.073	31.559	31.051
4.50	39.384	38.718	38.059	37.408	36.765	36.131	35.506	34.891	34.284	33.688	33.100
6.00	43.569	42.735	41.913	41.106	40.312	39.532	38.766	38.015	37.278	36.555	35.846
7.50	48.880	47.790	46.723	45.681	44.662	43.668	42.698	41.751	40.828	39.928	39.051
9.00	54.856	53.389	51.970	50.596	49.268	47.983	46.741	45.541	44.381	43.259	42.174
10.50	59.797	57.875	56.047	54.306	52.649	51.067	49.557	48.115	46.736	45.416	44.151
12.00	59.501	57.524	55.652	53.877	52.194	50.593	49.068	47.616	46.230	44.904	43.638
13.50	53.112	51.628	50.198	48.819	47.491	46.212	44.978	43.790	42.644	41.539	40.474
15.00	45.201	44.165	43.154	42.169	41.208	40.272	39.361	38.473	37.609	36.768	35.950

Tabela VII (Continuação)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COI F COIL NO.=
INNER RADIUOS= 9.700 (CM) OUTER RADIOUS= 10.700 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)
AXIAL PARTITION= 0.087 (CM) RADIOUS PARTITION= 0.0903 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.50	1.979	1.980	1.980	1.979	1.978	1.976	1.974	1.971	1.968	1.964	1.959
3.00	4.078	4.078	4.077	4.075	4.071	4.066	4.060	4.053	4.045	4.036	4.025
4.50	6.430	6.428	6.423	6.416	6.408	6.397	6.384	6.369	6.353	6.334	6.314
6.00	9.204	9.195	9.182	9.166	9.147	9.125	9.099	9.071	9.040	9.006	8.969
7.50	12.632	12.608	12.579	12.545	12.506	12.462	12.414	12.361	12.303	12.242	12.176
9.00	17.071	17.019	16.959	16.890	16.813	16.728	16.636	16.536	16.430	16.318	16.199
10.50	23.144	23.033	22.908	22.767	22.612	22.443	22.262	22.069	21.866	21.652	21.429
12.00	32.137	31.885	31.600	31.283	30.938	30.567	30.174	29.760	29.330	28.886	28.430
13.50	47.565	46.777	45.893	44.933	43.917	42.864	41.788	40.704	39.623	38.552	37.499
15.00	84.238	74.014	67.685	62.889	58.990	55.676	52.786	50.222	47.919	45.831	43.926

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	-18.894	-18.408	-19.810	-19.454	-18.809	-18.264	-17.865	-17.577	-17.357	-17.177	-17.016
1.50	-19.038	-18.547	-19.944	-19.583	-18.933	-18.383	-17.980	-17.686	-17.462	-17.277	-17.112
3.00	-19.472	-18.966	-20.347	-19.971	-19.305	-18.740	-18.322	-18.013	-17.775	-17.575	-17.396
4.50	-20.205	-19.670	-21.023	-20.619	-19.926	-19.334	-18.888	-18.553	-18.289	-18.063	-17.859
6.00	-21.248	-20.667	-21.975	-21.527	-20.791	-20.156	-19.668	-19.292	-18.986	-18.721	-18.477
7.50	-22.612	-21.962	-23.202	-22.666	-21.884	-21.183	-20.631	-20.192	-19.825	-19.500	-19.198
9.00	-24.299	-23.541	-24.674	-24.054	-23.149	-22.349	-21.699	-21.165	-20.705	-20.290	-19.901
10.50	-26.267	-25.328	-26.285	-25.494	-24.422	-23.460	-22.655	-21.972	-21.369	-20.818	-20.299
12.00	-28.281	-26.999	-27.626	-26.519	-25.149	-23.907	-22.839	-21.911	-21.083	-20.324	-19.616
13.50	-28.945	-26.815	-26.679	-24.900	-22.948	-21.212	-19.734	-18.472	-17.377	-16.413	-15.552
15.00	-3.703	-3.533	-4.306	-4.198	-3.949	-3.745	-3.619	-3.545	-3.508	-3.466	-3.477

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	18.894	18.408	19.810	19.454	18.809	18.264	17.865	17.577	17.357	17.177	17.016
1.50	19.141	18.652	20.042	19.683	19.036	18.489	18.088	17.796	17.573	17.388	17.224
3.00	19.895	19.399	20.751	20.382	19.730	19.176	18.766	18.464	18.229	18.032	17.856
4.50	21.203	20.693	21.982	21.594	20.931	20.364	19.938	19.616	19.361	19.142	18.942
6.00	23.155	22.620	23.816	23.397	22.714	22.125	21.671	21.318	21.028	20.774	20.539
7.50	25.901	25.324	26.392	25.924	25.205	24.577	24.078	23.675	23.333	23.024	22.733
9.00	29.696	29.049	29.940	29.392	28.610	27.916	27.342	26.859	26.432	26.038	25.660
10.50	35.008	34.235	34.866	34.180	33.282	32.467	31.763	31.142	30.574	30.036	29.517
12.00	42.809	41.780	41.973	41.011	39.870	38.806	37.843	36.956	36.122	35.320	34.541
13.50	55.679	53.918	53.084	51.371	49.551	47.825	46.214	44.699	43.266	41.901	40.596
15.00	84.320	74.098	67.822	63.029	59.122	55.802	52.910	50.347	48.047	45.964	44.063

Tabela VII (Continuação)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COIL F COIL NO.=

INNER RADIUOS= 10.700 (CM) OUTER RADIOUS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 5.500 (CM)

AXIAL PARTITION= 0.062 (CM) RADIOUS PARTITION= 0.0644 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	-61.236	-61.320	-61.347	-61.317	-61.229	-61.083	-60.880	-60.622	-60.309	-59.943	-59.526
1.50	-85.694	-86.051	-86.267	-86.334	-86.250	-86.015	-85.628	-85.094	-84.419	-83.608	-82.672
3.00	-131.200	-133.643	-135.547	-136.815	-137.375	-137.186	-136.242	-134.567	-132.217	-129.279	-125.864
4.50	-153.853	-159.824	-164.713	-168.177	-170.033	-170.208	-168.693	-165.519	-160.783	-154.696	-147.638
6.00	-83.152	-83.775	-84.195	-84.399	-84.379	-84.132	-83.656	-82.904	-82.059	-80.959	-79.680
7.50	-41.846	-41.961	-42.013	-42.003	-41.928	-41.789	-41.587	-41.323	-40.999	-40.617	-40.180
9.00	-9.944	-9.960	-9.963	-9.954	-9.933	-9.900	-9.855	-9.797	-9.728	-9.648	-9.557
10.50	20.085	20.120	20.131	20.115	20.073	20.006	19.913	19.796	19.654	19.488	19.300
12.00	54.029	54.227	54.335	54.348	54.267	54.091	53.820	53.457	53.004	52.467	51.849
13.50	101.538	102.716	103.573	104.077	104.206	103.948	103.303	102.281	100.906	99.209	97.233
15.00	190.211	210.431	221.468	227.994	231.205	231.586	229.248	224.075	215.820	204.406	182.904

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	47.248	45.606	43.956	42.304	40.652	39.005	37.367	35.742	34.133	32.544	30.980
1.50	60.029	57.252	54.431	51.580	48.714	45.847	42.996	40.177	37.403	34.689	32.048
3.00	88.209	82.291	75.924	69.200	62.235	55.161	48.119	41.247	34.674	28.511	22.843
4.50	221.392	188.764	161.197	131.056	100.799	70.756	40.653	10.308	-19.645	-46.433	-80.036
6.00	264.533	227.115	193.504	156.367	118.506	80.571	42.580	4.649	-32.266	-65.040	-103.361
7.50	277.196	238.387	203.312	164.654	125.236	85.729	46.176	6.712	-31.683	-65.868	-105.514
9.00	281.592	242.353	206.838	167.734	127.864	87.906	47.903	7.995	-30.834	-65.441	-105.494
10.50	280.759	241.600	206.165	167.141	127.354	87.477	47.556	7.729	-31.022	-65.552	-105.530
12.00	274.230	235.729	200.971	162.640	123.553	84.379	45.156	6.017	-32.061	-65.940	-105.293
13.50	256.427	219.961	187.402	151.396	114.720	77.994	41.207	4.444	-31.365	-63.120	-100.527
15.00	166.206	145.738	127.133	106.732	85.950	65.126	44.286	23.499	3.257	-14.862	-35.696

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	77.345	76.420	75.470	74.494	73.495	72.474	71.433	70.374	69.298	68.207	67.105
1.50	104.627	103.357	102.003	100.569	99.056	97.470	95.817	94.102	92.334	90.519	88.666
3.00	158.096	156.947	155.363	153.320	150.814	147.861	144.490	140.746	136.688	132.385	127.920
4.50	269.602	247.337	230.466	213.211	197.665	184.329	173.523	165.839	161.979	161.514	167.937
6.00	277.294	242.073	211.027	177.690	145.477	116.489	93.871	83.094	88.175	103.849	130.509
7.50	280.337	242.052	207.607	169.927	132.068	95.372	62.142	41.865	51.815	77.385	112.905
9.00	281.767	242.558	207.078	168.029	128.250	88.461	48.906	12.646	32.332	66.148	105.926
10.50	281.477	242.436	207.145	168.347	128.926	89.736	51.557	21.251	36.724	68.387	107.280
12.00	279.502	241.885	208.187	171.481	134.945	100.227	70.254	53.794	61.947	84.267	117.366
13.50	275.798	242.762	214.119	183.720	154.983	129.955	111.218	102.377	105.668	117.587	139.857
15.00	252.596	255.970	255.364	251.740	246.664	240.569	233.487	225.303	215.844	204.945	186.355

Tabela VII (Continuação)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF COI T COIL NO.=

INNER RADIUOS= 10.700 (CM) OUTER RADIOUS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 5.500 (CM)

AXIAL PARTITION= 0.062 (CM) RADIOUS PARTITION= 0.0644 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	61.236	61.320	61.347	61.317	61.229	61.083	60.880	60.622	60.309	59.943	59.526
1.50	45.819	45.854	45.860	45.838	45.787	45.707	45.598	45.462	45.299	45.109	44.893
3.00	35.232	35.263	35.277	35.274	35.255	35.218	35.166	35.097	35.013	34.913	34.797
4.50	27.596	27.631	27.655	27.669	27.672	27.664	27.646	27.617	27.578	27.530	27.471
6.00	21.913	21.952	21.984	22.009	22.026	22.036	22.039	22.035	22.024	22.006	21.982
7.50	17.592	17.633	17.670	17.701	17.727	17.748	17.764	17.775	17.781	17.782	17.778
9.00	14.254	14.296	14.334	14.369	14.400	14.427	14.450	14.469	14.485	14.498	14.506
10.50	11.644	11.685	11.723	11.759	11.791	11.821	11.848	11.872	11.894	11.913	11.929
12.00	9.582	9.621	9.658	9.693	9.726	9.757	9.785	9.811	9.836	9.858	9.878
13.50	7.939	7.976	8.011	8.044	8.076	8.106	8.135	8.161	8.186	8.210	8.232
15.00	6.620	6.654	6.687	6.718	6.748	6.777	6.804	6.831	6.855	6.879	6.901

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	47.248	45.606	43.956	42.304	40.652	39.005	37.367	35.742	34.133	32.544	30.980
1.50	38.974	37.883	36.792	35.702	34.614	33.531	32.452	31.380	30.317	29.264	28.221
3.00	32.842	32.071	31.301	30.532	29.765	29.000	28.239	27.482	26.730	25.984	25.243
4.50	28.010	27.443	26.877	26.313	25.749	25.188	24.628	24.072	23.517	22.967	22.419
6.00	24.076	23.649	23.223	22.797	22.373	21.949	21.527	21.106	20.686	20.269	19.854
7.50	20.816	20.488	20.161	19.834	19.508	19.182	18.857	18.533	18.210	17.888	17.567
9.00	18.082	17.827	17.573	17.318	17.064	16.810	16.556	16.303	16.050	15.799	15.547
10.50	15.772	15.572	15.371	15.171	14.971	14.770	14.570	14.370	14.170	13.972	13.773
12.00	13.810	13.651	13.492	13.332	13.173	13.013	12.854	12.695	12.536	12.376	12.217
13.50	12.135	12.008	11.880	11.753	11.625	11.497	11.369	11.241	11.113	10.985	10.857
15.00	10.700	10.598	10.495	10.392	10.288	10.185	10.081	9.978	9.874	9.770	9.667

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	77.345	76.420	75.470	74.494	73.495	72.474	71.433	70.374	69.298	68.207	67.105
1.50	60.152	59.479	58.795	58.101	57.398	56.687	55.967	55.241	54.508	53.770	53.026
3.00	48.165	47.666	47.162	46.653	46.139	45.622	45.101	44.577	44.050	43.521	42.989
4.50	39.320	38.943	38.564	38.183	37.799	37.413	37.025	36.635	36.244	35.852	35.458
6.00	32.555	32.268	31.978	31.688	31.396	31.102	30.808	30.512	30.216	29.919	29.621
7.50	27.254	27.032	26.808	26.584	26.359	26.133	25.906	25.679	25.451	25.222	24.993
9.00	23.025	22.851	22.677	22.503	22.328	22.152	21.975	21.798	21.620	21.442	21.264
10.50	19.605	19.468	19.332	19.195	19.057	18.918	18.780	18.640	18.501	18.361	18.220
12.00	16.809	16.701	16.592	16.484	16.375	16.265	16.155	16.044	15.934	15.823	15.711
13.50	14.501	14.415	14.329	14.242	14.155	14.067	13.979	13.891	13.803	13.714	13.625
15.00	12.582	12.513	12.444	12.374	12.304	12.234	12.163	12.092	12.021	11.949	11.877

Tabela VII (Continuação)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF TOTAL COIL

INNER RADIOS= 10.700 (CM) OUTER RADIOS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LANGTH= 5.500 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.50	-32.134	-32.510	-32.774	-32.920	-32.947	-32.851	-32.635	-32.300	-31.852	-31.297	-30.643
3.00	-79.985	-82.520	-84.537	-85.937	-86.650	-86.634	-85.881	-84.416	-82.295	-79.603	-76.452
4.50	-101.003	-107.169	-112.270	-115.960	-118.058	-118.489	-117.244	-114.353	-109.913	-104.135	-97.397
6.00	-25.128	-26.120	-26.921	-27.518	-27.902	-28.069	-28.019	-27.758	-27.294	-26.641	-25.819
7.50	24.820	24.038	23.312	22.644	22.037	21.491	21.006	20.582	20.218	19.911	19.660
9.00	68.592	67.407	66.247	65.114	64.007	62.929	61.878	60.855	59.861	58.894	57.954
10.50	111.942	110.089	108.276	106.497	104.749	103.030	101.334	99.661	98.008	96.373	94.756
12.00	155.197	153.191	151.164	149.106	147.013	144.880	142.703	140.485	138.225	135.925	133.589
13.50	209.270	208.331	207.013	205.305	203.203	200.713	197.849	194.636	191.106	187.300	183.263
15.00	323.541	332.757	336.695	337.662	336.220	332.543	326.582	318.121	306.852	292.651	268.557

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	41.532	39.221	35.005	32.536	30.355	28.079	25.670	23.172	20.632	18.089	15.568
1.50	45.793	42.920	38.112	35.027	32.215	29.300	26.256	23.134	19.991	16.874	13.814
3.00	67.163	61.534	53.562	46.985	40.453	33.707	26.843	20.035	13.453	7.240	1.501
4.50	194.601	162.578	133.717	104.030	74.507	45.088	15.453	-14.542	-44.224	-70.788	-104.196
6.00	233.095	196.578	161.962	125.561	88.707	51.661	14.396	-22.936	-59.338	-91.654	-129.553
7.50	242.823	205.207	169.405	131.747	93.587	55.210	16.610	-22.037	-59.713	-93.243	-132.278
9.00	247.442	209.628	173.597	135.686	97.252	58.584	19.682	-19.274	-57.260	-91.099	-130.438
10.50	252.411	214.612	178.594	140.692	102.267	63.607	24.715	-14.231	-52.207	-86.036	-125.366
12.00	257.281	219.624	183.833	146.229	108.157	69.891	31.419	-7.091	-44.626	-78.019	-116.924
13.50	249.268	214.012	180.722	145.681	110.188	74.474	38.481	2.333	-32.994	-64.366	-101.464
15.00	188.674	167.468	147.218	126.091	104.757	83.368	61.916	40.496	19.613	0.863	-20.588

TOTAL FIELD (G/A)

Z(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	41.532	39.221	35.005	32.536	30.355	28.079	25.670	23.172	20.632	18.089	15.568
1.50	55.943	53.843	50.266	48.069	46.079	44.019	41.885	39.730	37.606	35.556	33.613
3.00	104.443	102.937	100.077	97.943	95.628	92.960	89.978	86.761	83.387	79.931	76.466
4.50	219.252	194.722	174.599	155.785	139.603	126.777	118.258	115.274	118.477	125.917	142.629
6.00	234.446	198.305	164.184	128.541	92.992	58.794	31.501	36.008	65.314	95.447	132.100
7.50	244.088	206.610	171.001	133.679	96.147	59.245	26.780	30.154	63.042	95.345	133.731
9.00	256.773	220.199	185.808	150.501	116.425	85.977	64.933	63.835	82.837	108.478	142.733
10.50	276.120	241.202	208.853	176.453	146.393	121.083	104.304	100.672	111.046	129.189	157.147
12.00	300.466	267.773	238.003	208.843	182.512	160.856	146.121	140.664	145.251	156.724	177.531
13.50	325.466	298.668	274.800	251.740	231.156	214.084	201.557	194.650	193.934	198.051	209.476
15.00	374.535	372.522	367.473	360.437	352.162	342.834	332.399	320.688	307.478	292.653	269.345

NbTi (Ø,85mm) $\quad B_{máx} = 427 \times 160 = 6,8T$

$$\Delta I = \frac{I_{op}}{I_c(8T)} = \frac{160}{227} = 0,7 \therefore \text{Margem } I_{op} = 30\%$$

NbTi (Ø,6mm) $\quad B_{máx} = 375 \times 160 = 6,0T$

$$\Delta I = \frac{I_{op}}{I_c(6T)} \times \frac{160}{242} = 0,66 \therefore \text{Margem } I_{op} = 34\%$$

$$\Delta B = \frac{B_{máx}}{B_o} = \frac{12,14}{12} = 1,011$$

Com o valor de $B_{máx} \tilde{=} B_o$ podemos afirmar que o volume de supercondutor está otimizado e que as propriedades básicas e margem de segurança para o dimensionamento estão satisfeitos.

Para melhor analisar a distribuição de campo no enrolamento, a saída do mapeamento foi interpolada para uma matriz 100x100 e posteriormente plotada como mostra a fig.5. Notamos uma região central no enrolamento de NbTi, onde o $B_{máx} = 8T$, isto deve-se ao sistema de intervalo adotado 0,5T e conseqüentemente $B = 7,6T \tilde{=} 8T$. Posteriormente reduziremos ainda mais I_{op} de 165A para 160A, chegando ao valor $B_{máx} = 6,8T$.

VIII.3 - DIMENSIONAMENTO MECÂNICO

VIII.3.1 - Enrolamento Nb_3Sn

Para cálculo das tensões e deformação no enrolamento vamos utilizar as expressões do cálculo do módulo de elasticidade conforme já descrito em Capítulos anteriores. A fig. 6 mostra a secção transversal do fio supercondutor Nb_3Sn, e a tabela VIII mostra o volume fracionado e as propriedades de cada componente/8/.

$$E_{CON}\theta = \sum_i V_i E_i = 13508 \text{ kg/mm}^2$$

$$E_{CON}\text{-}r = \frac{1}{\sum_i \frac{V_i}{E_i}} = 13224 \text{ kg/mm}^2$$

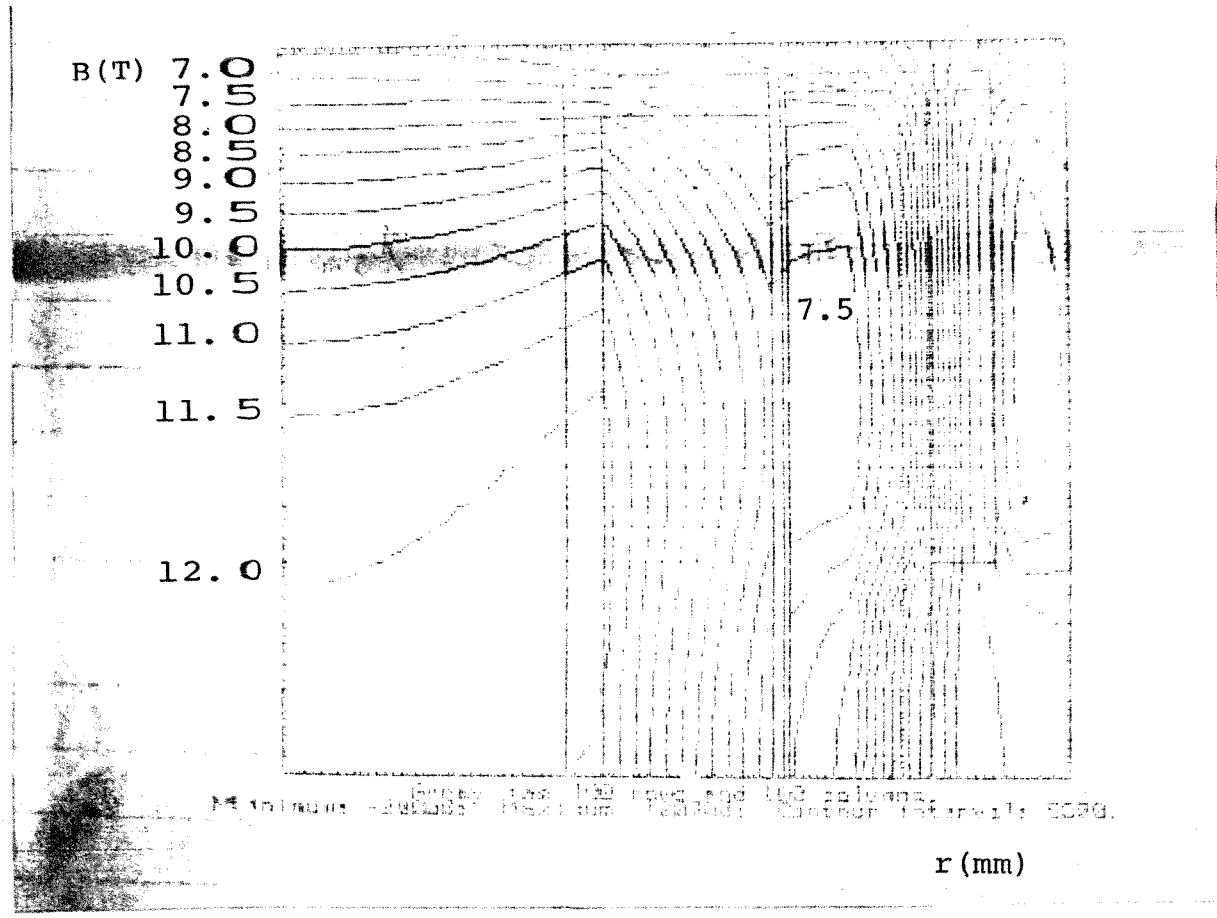


Fig. 5 - B_z x r - I_{op} 167A - Intervalo (0,5T)

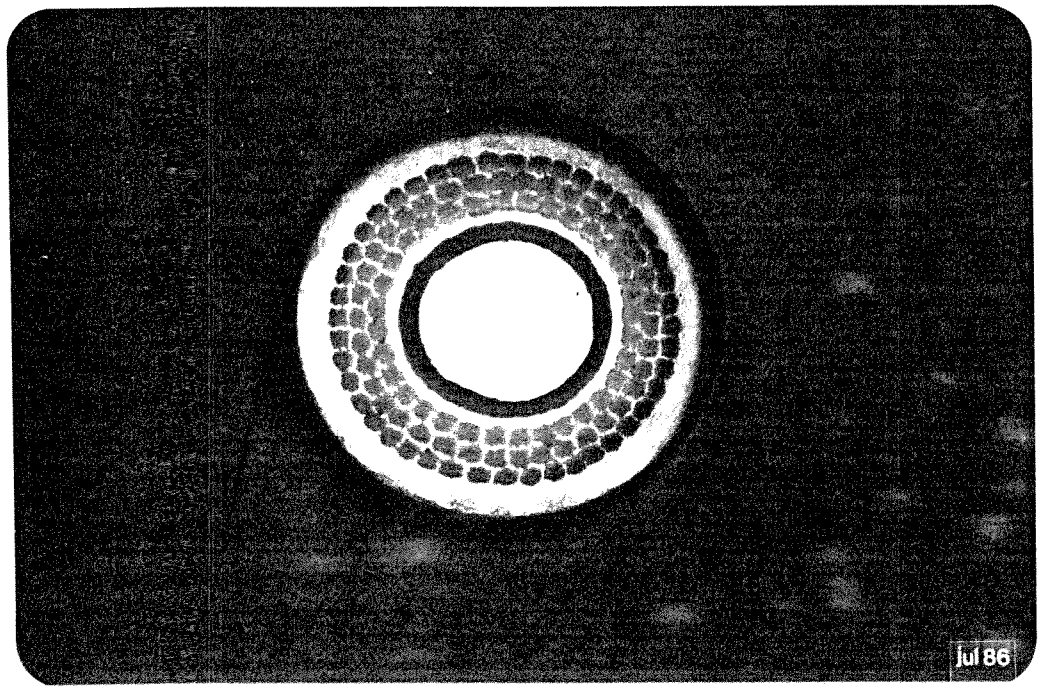
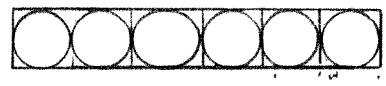


Fig. 6 - Metalografia Fio Supercondutor Nb_3Sn com 10.000 Filamentos

Fração Volume		Módulo Elasticidade (kg/mm^2)
Cu	0,16	12.650
Bronze	0,58	12.650
Ta	0,07	18.980
Nb	0,06	10.500
Nb_3Sn	0,13	16.840
Epóxi	-	2.000

Tabela VIII - Frações Volumétricas de Fio Supercondutor Nb_3Sn

Ainda será necessário calcular os módulos de elasticidade do enrolamento como um todo devido o uso de impregnação com epoxi. Para este cálculo vamos assumir uma relação de área conforme figura abaixo:



$V_{CON} = 0,785$

$V_{ex} = 0,315$

$$E_{ENR}-\theta = V_{CON}E_{CON} + V_{ex}E_{ex} = 11234 kg/mm^2$$

$$E_{enr}-r = \frac{1}{\frac{V_{CON}}{E_{CON}} + \frac{V_{ex}}{E_{ex}}} = 4613 kg/mm^2$$

A estrutura de enrolamento está detalhada na fig. 7 , onde vamos considerar uma montagem por partes do enrolamento de Nb_3Sn e NbTi impregnados em bobinas de inox separadamente. Como já calculado no Capítulo VI as forças F_R e F_Z atuantes no enrolamento são de nível suportável pelos seus componentes.

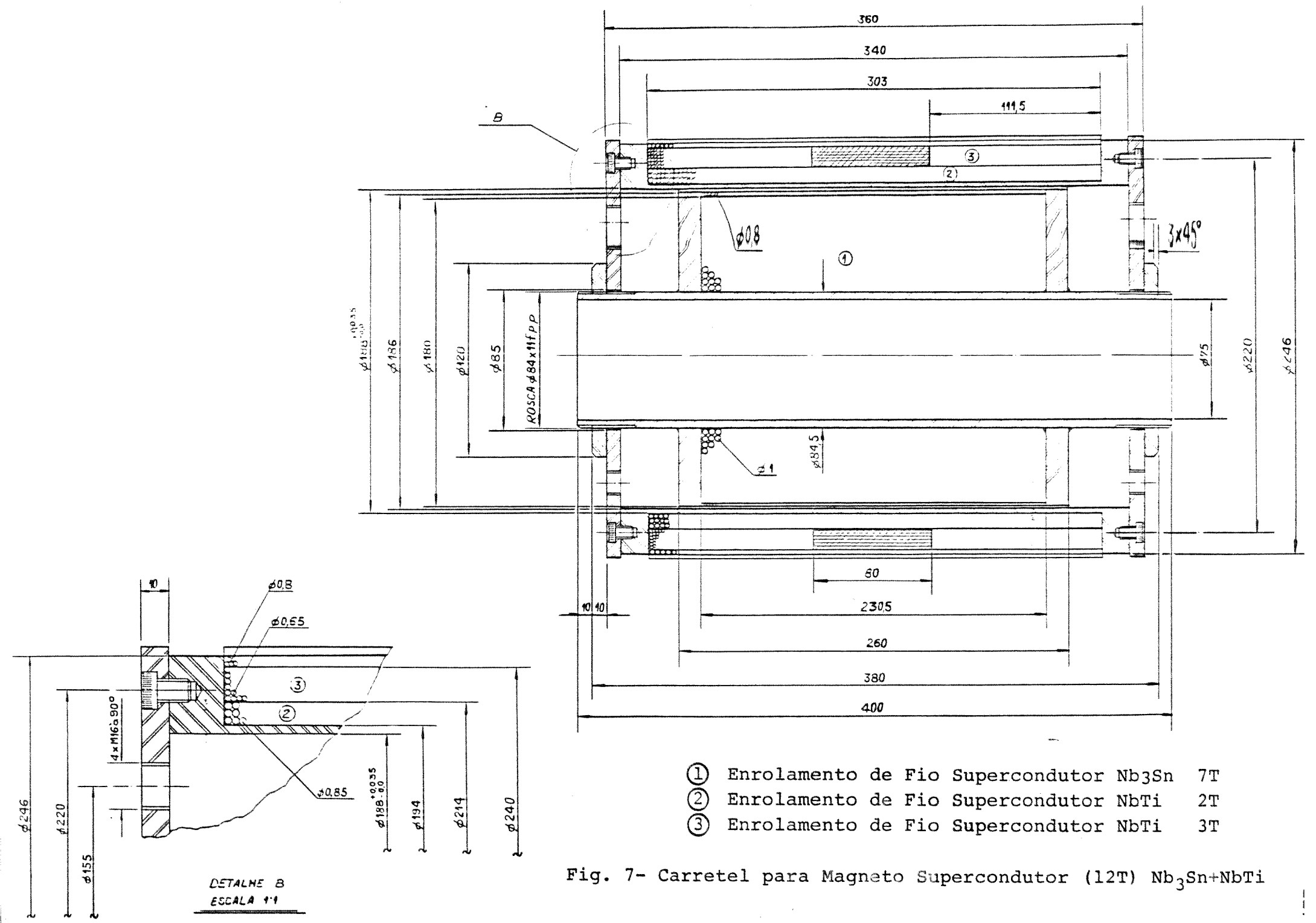
Devido o enrolamento ser composto de vários setores vamos analisar o cálculo das tensões e deformações de maneira integrada , ou seja, o valor do campo magnético em cada enrolamento considerando o sistema completo. Desta forma poderemos calcular as forças no enrolamento de Nb_3Sn considerando o campo próprio e o campo gerado pelas bobinas externas de NbTi.

A tabela IX resume os resultados de tensão e deformação no enrolamento de Nb_3Sn. Plotando estes resultados obtemos as figuras 8 e 9 que mostram a distribuição das tensões de todos os efeitos separadamente e somados (pré-tensão, resfriamento, energização)

Os valores máximos encontrados podem ser resumidos por:

$\sigma_{\theta máx} = 1002 kg/cm^2 \rightarrow \varepsilon_\theta = 0,085\ \%$

$\sigma_{r máx} = 94 kg/cm^2 \rightarrow \varepsilon_r = 0,042\ \%$



① Enrolamento de Fio Supercondutor Nb_3Sn 7T
② Enrolamento de Fio Supercondutor NbTi 2T
③ Enrolamento de Fio Supercondutor NbTi 3T

Fig. 7- Carretel para Magneto Supercondutor (12T) Nb_3Sn+NbTi

Tabela IX - Resultados dos Cálculos de Tensões/Deformações para Enrolamento Nb_3Sn

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF TOTAL COIL

INNER RADIOUS= 4.250 (CM) OUTER RADIOUS= 9.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 11.500 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.15	-0.24	-0.79	-1.53	-2.47	-3.64	-5.06	-6.76	-8.75	-11.01	-13.51	-16.18
2.30	0.74	-0.20	-1.48	-3.19	-5.32	-7.96	-11.25	-15.17	-19.81	-25.23	-31.40
3.45	4.05	3.07	1.61	-0.41	-3.08	-6.49	-10.78	-16.08	-22.62	-30.67	-40.65
4.60	10.60	10.08	8.97	7.21	4.71	1.37	-2.92	-8.30	-14.97	-23.19	-33.34
5.75	21.07	21.51	21.33	20.44	18.79	16.33	12.99	8.75	3.57	-2.53	-9.49
6.90	35.90	37.86	39.11	39.60	39.28	38.12	36.12	33.32	29.79	25.67	21.13
8.05	55.55	59.65	62.91	65.21	66.50	66.76	66.00	64.28	61.72	58.49	54.77
9.20	80.59	87.86	93.97	98.70	101.96	103.69	103.91	102.69	100.15	96.50	92.04
10.35	111.61	124.37	135.04	143.26	149.07	152.47	153.49	152.22	148.58	142.68	135.05
11.50	148.28	176.68	193.17	204.81	213.00	218.28	220.78	220.32	216.34	207.39	186.80

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	755.49	705.41	655.10	604.40	553.25	501.56	449.22	396.13	342.20	286.92	231.28
1.15	756.13	706.31	656.31	605.96	555.19	503.92	452.01	399.37	345.66	290.92	235.47
2.30	757.66	708.64	659.54	610.22	560.61	510.62	460.13	409.00	357.05	303.61	249.37
3.45	759.00	711.24	663.58	615.90	568.17	520.32	472.28	423.96	375.27	325.59	275.64
4.60	758.43	712.27	666.43	620.83	575.45	530.29	485.34	440.66	396.32	352.05	309.15
5.75	753.77	709.43	665.65	622.32	579.46	537.08	495.18	453.85	413.22	373.05	334.62
6.90	742.62	700.29	658.74	617.84	577.57	537.90	498.79	460.24	422.28	384.52	348.01
8.05	722.32	682.25	643.24	605.12	567.79	531.11	494.97	459.24	423.81	388.16	353.19
9.20	689.49	652.08	616.26	581.75	548.28	515.59	483.39	451.43	419.42	386.67	353.94
10.35	638.67	604.62	573.47	544.32	516.55	489.72	463.47	437.42	411.09	383.36	354.36
11.50	550.94	529.65	508.92	488.78	469.29	450.53	432.58	415.53	399.46	384.18	370.29

Tabela IX (Continuação)

MECHANICAL PROPERTIES OF THE INPUT DATA N= 1

YOUNG MODULUS

--SUPERCONDUCTOR ES= 0.1480E+12 STABILIZER EC= 0.1300E+12 INSULATER OR RAINFORCER EI= 0.2940E+11 (N/M**2)--

VOLUME FRACTION

--SUPERCONDUCTOR VS= 0.2080E+00 STABILIZER VC= 0.5920E+00 ISULATER OR RAINFORCER VI=, 0.2000E+00 --

THERMAL EXPANSION FROM 300K TO 4.2K

--SUPERCONDUCTOR AS= -0.1290E-02 STABILIZER AC= -0.3380E-02 INSULATER OR RAINFORCER AI= -0.2700E-02 --

FRAME YOUNG MODULUS

--INNER FRAME BI= 0.1960E+12 OUTER FRAME BO= 0.1960E+12 (N/M**2)--

--FRAME THICKNESS TI= 0.4750E+00 FRAME THICKNESS TO= 0.2000E+00 (CM)--

RAINFORCED FRAME YOUNG MODULUS

--INNER FRAME BI= 0.2191E+11 OUTER FRAME BO= 0.4356E+10 (N/M**2)--

YOUNG MODULUS TOTAL

--HOOP DERECTION ES= 0.1136E+12 RADIUS DEFECTION ER= 0.7836E+11 (N/M**2)--

THERMAL EXPANSION TOTAL

--HOOP DERECTION AS= -0.2779E-02 RADIUS DEFECTION AR= -0.2809E-02 --

Tabela IX (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 4.250 (CM) OUTER RADIOUS= 9.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 11.500 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.20 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.2235E+06 0.4444E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1302E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8981E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.3143E-16(KG/CM**2) --

MAGNET WINDING PROCEDURE WINDING TENSION SW= 250.00 0.00 (KG/CM**2)

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	-0.0180	-0.0138	-0.0111	-0.0091	-0.0075	-0.0060	-0.0047	-0.0035	-0.0023	-0.0012	0.0000
1.15	-0.0180	-0.0138	-0.0111	-0.0091	-0.0075	-0.0060	-0.0047	-0.0035	-0.0023	-0.0012	0.0000
2.30	-0.0180	-0.0138	-0.0111	-0.0091	-0.0075	-0.0060	-0.0047	-0.0035	-0.0023	-0.0012	0.0000
3.45	-0.0180	-0.0138	-0.0111	-0.0091	-0.0075	-0.0060	-0.0047	-0.0035	-0.0023	-0.0012	0.0000
4.60	-0.0180	-0.0138	-0.0111	-0.0091	-0.0075	-0.0060	-0.0047	-0.0035	-0.0023	-0.0012	0.0000
5.75	-0.0180	-0.0138	-0.0111	-0.0091	-0.0075	-0.0060	-0.0047	-0.0035	-0.0023	-0.0012	0.0000
6.90	-0.0180	-0.0138	-0.0111	-0.0091	-0.0075	-0.0060	-0.0047	-0.0035	-0.0023	-0.0012	0.0000
8.05	-0.0180	-0.0138	-0.0111	-0.0091	-0.0075	-0.0060	-0.0047	-0.0035	-0.0023	-0.0012	0.0000
9.20	-0.0180	-0.0138	-0.0111	-0.0091	-0.0075	-0.0060	-0.0047	-0.0035	-0.0023	-0.0012	0.0000
10.35	-0.0180	-0.0138	-0.0111	-0.0091	-0.0075	-0.0060	-0.0047	-0.0035	-0.0023	-0.0012	0.0000
11.50	-0.0180	-0.0138	-0.0111	-0.0091	-0.0075	-0.0060	-0.0047	-0.0035	-0.0023	-0.0012	0.0000

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	-94.70	-104.61	-102.06	-93.47	-81.85	-68.72	-54.93	-40.95	-27.05	-13.37	0.00
1.15	-94.70	-104.61	-102.06	-93.47	-81.85	-68.72	-54.93	-40.95	-27.05	-13.37	0.00
2.30	-94.70	-104.61	-102.06	-93.47	-81.85	-68.72	-54.93	-40.95	-27.05	-13.37	0.00
3.45	-94.70	-104.61	-102.06	-93.47	-81.85	-68.72	-54.93	-40.95	-27.05	-13.37	0.00
4.60	-94.70	-104.61	-102.06	-93.47	-81.85	-68.72	-54.93	-40.95	-27.05	-13.37	0.00
5.75	-94.70	-104.61	-102.06	-93.47	-81.85	-68.72	-54.93	-40.95	-27.05	-13.37	0.00
6.90	-94.70	-104.61	-102.06	-93.47	-81.85	-68.72	-54.93	-40.95	-27.05	-13.37	0.00
8.05	-94.70	-104.61	-102.06	-93.47	-81.85	-68.72	-54.93	-40.95	-27.05	-13.37	0.00
9.20	-94.70	-104.61	-102.06	-93.47	-81.85	-68.72	-54.93	-40.95	-27.05	-13.37	0.00
10.35	-94.70	-104.61	-102.06	-93.47	-81.85	-68.72	-54.93	-40.95	-27.05	-13.37	0.00
11.50	-94.70	-104.61	-102.06	-93.47	-81.85	-68.72	-54.93	-40.95	-27.05	-13.37	0.00

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	-274.37	-125.87	-33.63	31.35	80.76	120.39	153.47	181.93	207.00	229.50	250.00
1.15	-274.37	-125.87	-33.63	31.35	80.76	120.39	153.47	181.93	207.00	229.50	250.00
2.30	-274.37	-125.87	-33.63	31.35	80.76	120.39	153.47	181.93	207.00	229.50	250.00
3.45	-274.37	-125.87	-33.63	31.35	80.76	120.39	153.47	181.93	207.00	229.50	250.00
4.60	-274.37	-125.87	-33.63	31.35	80.76	120.39	153.47	181.93	207.00	229.50	250.00
5.75	-274.37	-125.87	-33.63	31.35	80.76	120.39	153.47	181.93	207.00	229.50	250.00
6.90	-274.37	-125.87	-33.63	31.35	80.76	120.39	153.47	181.93	207.00	229.50	250.00
8.05	-274.37	-125.87	-33.63	31.35	80.76	120.39	153.47	181.93	207.00	229.50	250.00
9.20	-274.37	-125.87	-33.63	31.35	80.76	120.39	153.47	181.93	207.00	229.50	250.00
10.35	-274.37	-125.87	-33.63	31.35	80.76	120.39	153.47	181.93	207.00	229.50	250.00
11.50	-274.37	-125.87	-33.63	31.35	80.76	120.39	153.47	181.93	207.00	229.50	250.00

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 4.250 (CM) OUTER RADIOUS= 9.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 11.500 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.20 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.2235E+06 0.4444E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1302E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8981E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.3143E-16(KG/CM**2) --

MAGNET WINDING PROCEDURE WINDING TENSION SW= 250.00 0.00 (KG/CM**2)

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	-0.0036	-0.0093	-0.0117	-0.0126	-0.0127	-0.0122	-0.0115	-0.0106	-0.0096	-0.0086	-0.0075
1.15	-0.0036	-0.0093	-0.0117	-0.0126	-0.0127	-0.0122	-0.0115	-0.0106	-0.0096	-0.0086	-0.0075
2.30	-0.0036	-0.0093	-0.0117	-0.0126	-0.0127	-0.0122	-0.0115	-0.0106	-0.0096	-0.0086	-0.0075
3.45	-0.0036	-0.0093	-0.0117	-0.0126	-0.0127	-0.0122	-0.0115	-0.0106	-0.0096	-0.0086	-0.0075
4.60	-0.0036	-0.0093	-0.0117	-0.0126	-0.0127	-0.0122	-0.0115	-0.0106	-0.0096	-0.0086	-0.0075
5.75	-0.0036	-0.0093	-0.0117	-0.0126	-0.0127	-0.0122	-0.0115	-0.0106	-0.0096	-0.0086	-0.0075
6.90	-0.0036	-0.0093	-0.0117	-0.0126	-0.0127	-0.0122	-0.0115	-0.0106	-0.0096	-0.0086	-0.0075
8.05	-0.0036	-0.0093	-0.0117	-0.0126	-0.0127	-0.0122	-0.0115	-0.0106	-0.0096	-0.0086	-0.0075
9.20	-0.0036	-0.0093	-0.0117	-0.0126	-0.0127	-0.0122	-0.0115	-0.0106	-0.0096	-0.0086	-0.0075
10.35	-0.0036	-0.0093	-0.0117	-0.0126	-0.0127	-0.0122	-0.0115	-0.0106	-0.0096	-0.0086	-0.0075
11.50	-0.0036	-0.0093	-0.0117	-0.0126	-0.0127	-0.0122	-0.0115	-0.0106	-0.0096	-0.0086	-0.0075

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	-0.0208	-0.0077	0.0002	0.0055	0.0094	0.0125	0.0149	0.0169	0.0187	0.0202	0.0216
1.15	-0.0208	-0.0077	0.0002	0.0055	0.0094	0.0125	0.0149	0.0169	0.0187	0.0202	0.0216
2.30	-0.0208	-0.0077	0.0002	0.0055	0.0094	0.0125	0.0149	0.0169	0.0187	0.0202	0.0216
3.45	-0.0208	-0.0077	0.0002	0.0055	0.0094	0.0125	0.0149	0.0169	0.0187	0.0202	0.0216
4.60	-0.0208	-0.0077	0.0002	0.0055	0.0094	0.0125	0.0149	0.0169	0.0187	0.0202	0.0216
5.75	-0.0208	-0.0077	0.0002	0.0055	0.0094	0.0125	0.0149	0.0169	0.0187	0.0202	0.0216
6.90	-0.0208	-0.0077	0.0002	0.0055	0.0094	0.0125	0.0149	0.0169	0.0187	0.0202	0.0216
8.05	-0.0208	-0.0077	0.0002	0.0055	0.0094	0.0125	0.0149	0.0169	0.0187	0.0202	0.0216
9.20	-0.0208	-0.0077	0.0002	0.0055	0.0094	0.0125	0.0149	0.0169	0.0187	0.0202	0.0216
10.35	-0.0208	-0.0077	0.0002	0.0055	0.0094	0.0125	0.0149	0.0169	0.0187	0.0202	0.0216
11.50	-0.0208	-0.0077	0.0002	0.0055	0.0094	0.0125	0.0149	0.0169	0.0187	0.0202	0.0216

Tabela IX (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 4.250 (CM) OUTER RADIOUS= 9.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 11.500 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.20 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BT,BO= 0.2235E+06 0.4444E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1302E-15(KG/CM**2) 1/ER K= 0.8981E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.3143E-16(KG/CM**2) --

MAGNET COOLING PROCEDURE--COOL DOWN FROM 300K TO 4.2K--

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	-0.1175	-0.1309	-0.1442	-0.1575	-0.1709	-0.1842	-0.1975	-0.2109	-0.2242	-0.2375	-0.2508
1.15	-0.1175	-0.1309	-0.1442	-0.1575	-0.1709	-0.1842	-0.1975	-0.2109	-0.2242	-0.2375	-0.2508
2.30	-0.1175	-0.1309	-0.1442	-0.1575	-0.1709	-0.1842	-0.1975	-0.2109	-0.2242	-0.2375	-0.2508
3.45	-0.1175	-0.1309	-0.1442	-0.1575	-0.1709	-0.1842	-0.1975	-0.2109	-0.2242	-0.2375	-0.2508
4.60	-0.1175	-0.1309	-0.1442	-0.1575	-0.1709	-0.1842	-0.1975	-0.2109	-0.2242	-0.2375	-0.2508
5.75	-0.1175	-0.1309	-0.1442	-0.1575	-0.1709	-0.1842	-0.1975	-0.2109	-0.2242	-0.2375	-0.2508
6.90	-0.1175	-0.1309	-0.1442	-0.1575	-0.1709	-0.1842	-0.1975	-0.2109	-0.2242	-0.2375	-0.2508
8.05	-0.1175	-0.1309	-0.1442	-0.1575	-0.1709	-0.1842	-0.1975	-0.2109	-0.2242	-0.2375	-0.2508
9.20	-0.1175	-0.1309	-0.1442	-0.1575	-0.1709	-0.1842	-0.1975	-0.2109	-0.2242	-0.2375	-0.2508
10.35	-0.1175	-0.1309	-0.1442	-0.1575	-0.1709	-0.1842	-0.1975	-0.2109	-0.2242	-0.2375	-0.2508
11.50	-0.1175	-0.1309	-0.1442	-0.1575	-0.1709	-0.1842	-0.1975	-0.2109	-0.2242	-0.2375	-0.2508

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	0.00	1.36	2.06	2.34	2.34	2.16	1.85	1.46	1.01	0.52	0.00
1.15	0.00	1.36	2.06	2.34	2.34	2.16	1.85	1.46	1.01	0.52	0.00
2.30	0.00	1.36	2.06	2.34	2.34	2.16	1.85	1.46	1.01	0.52	0.00
3.45	0.00	1.36	2.06	2.34	2.34	2.16	1.85	1.46	1.01	0.52	0.00
4.60	0.00	1.36	2.06	2.34	2.34	2.16	1.85	1.46	1.01	0.52	0.00
5.75	0.00	1.36	2.06	2.34	2.34	2.16	1.85	1.46	1.01	0.52	0.00
6.90	0.00	1.36	2.06	2.34	2.34	2.16	1.85	1.46	1.01	0.52	0.00
8.05	0.00	1.36	2.06	2.34	2.34	2.16	1.85	1.46	1.01	0.52	0.00
9.20	0.00	1.36	2.06	2.34	2.34	2.16	1.85	1.46	1.01	0.52	0.00
10.35	0.00	1.36	2.06	2.34	2.34	2.16	1.85	1.46	1.01	0.52	0.00
11.50	0.00	1.36	2.06	2.34	2.34	2.16	1.85	1.46	1.01	0.52	0.00

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	16.23	11.12	7.09	3.79	1.01	-1.38	-3.48	-5.34	-7.02	-8.55	-9.96
1.15	16.23	11.12	7.09	3.79	1.01	-1.38	-3.48	-5.34	-7.02	-8.55	-9.96
2.30	16.23	11.12	7.09	3.79	1.01	-1.38	-3.48	-5.34	-7.02	-8.55	-9.96
3.45	16.23	11.12	7.09	3.79	1.01	-1.38	-3.48	-5.34	-7.02	-8.55	-9.96
4.60	16.23	11.12	7.09	3.79	1.01	-1.38	-3.48	-5.34	-7.02	-8.55	-9.96
5.75	16.23	11.12	7.09	3.79	1.01	-1.38	-3.48	-5.34	-7.02	-8.55	-9.96
6.90	16.23	11.12	7.09	3.79	1.01	-1.38	-3.48	-5.34	-7.02	-8.55	-9.96
8.05	16.23	11.12	7.09	3.79	1.01	-1.38	-3.48	-5.34	-7.02	-8.55	-9.96
9.20	16.23	11.12	7.09	3.79	1.01	-1.38	-3.48	-5.34	-7.02	-8.55	-9.96
10.35	16.23	11.12	7.09	3.79	1.01	-1.38	-3.48	-5.34	-7.02	-8.55	-9.96
11.50	16.23	11.12	7.09	3.79	1.01	-1.38	-3.48	-5.34	-7.02	-8.55	-9.96

Tabela IX (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 4.250 (CM) OUTER RADIOUS= 9.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 11.500 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.20 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BX,BO= 0.2235E+06 0.4444E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1302E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.898[illegible]E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.3143E-16(KG/CM**2) --

MAGNET COOLING PROCEDURE--COOL DOWN FROM 300K TO 4.2K--

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	-0.0005	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
1.15	-0.0005	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
2.30	-0.0005	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
3.45	-0.0005	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
4.60	-0.0005	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
5.75	-0.0005	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
6.90	-0.0005	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
8.05	-0.0005	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
9.20	-0.0005	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
10.35	-0.0005	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
11.50	-0.0005	-0.0002	0.0000	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	0.0014	0.0009	0.0005	0.0003	0.0000	-0.0002	-0.0004	-0.0005	-0.0006	-0.0008	-0.0009
1.15	0.0014	0.0009	0.0005	0.0003	0.0000	-0.0002	-0.0004	-0.0005	-0.0006	-0.0008	-0.0009
2.30	0.0014	0.0009	0.0005	0.0003	0.0000	-0.0002	-0.0004	-0.0005	-0.0006	-0.0008	-0.0009
3.45	0.0014	0.0009	0.0005	0.0003	0.0000	-0.0002	-0.0004	-0.0005	-0.0006	-0.0008	-0.0009
4.60	0.0014	0.0009	0.0005	0.0003	0.0000	-0.0002	-0.0004	-0.0005	-0.0006	-0.0008	-0.0009
5.75	0.0014	0.0009	0.0005	0.0003	0.0000	-0.0002	-0.0004	-0.0005	-0.0006	-0.0008	-0.0009
6.90	0.0014	0.0009	0.0005	0.0003	0.0000	-0.0002	-0.0004	-0.0005	-0.0006	-0.0008	-0.0009
8.05	0.0014	0.0009	0.0005	0.0003	0.0000	-0.0002	-0.0004	-0.0005	-0.0006	-0.0008	-0.0009
9.20	0.0014	0.0009	0.0005	0.0003	0.0000	-0.0002	-0.0004	-0.0005	-0.0006	-0.0008	-0.0009
10.35	0.0014	0.0009	0.0005	0.0003	0.0000	-0.0002	-0.0004	-0.0005	-0.0006	-0.0008	-0.0009
11.50	0.0014	0.0009	0.0005	0.0003	0.0000	-0.0002	-0.0004	-0.0005	-0.0006	-0.0008	-0.0009

Tabela IX (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 4.250 (CM) OUTER RADIOUS= 9.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 11.500 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.20 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.2235E+06 0.4444E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES U= 0.1302E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8981E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.3143E-16(KG/CM**2) --

STRESS DISTRIBUTION OF THE MAGNET (E-M FORCE)

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	0.0415	0.0401	0.0390	0.0382	0.0374	0.0367	0.0361	0.0354	0.0348	0.0343	0.0337
1.15	0.0417	0.0403	0.0392	0.0384	0.0376	0.0369	0.0363	0.0356	0.0350	0.0345	0.0339
2.30	0.0424	0.0410	0.0399	0.0390	0.0382	0.0376	0.0369	0.0363	0.0357	0.0351	0.0346
3.45	0.0437	0.0422	0.0411	0.0402	0.0394	0.0387	0.0381	0.0375	0.0369	0.0363	0.0357
4.60	0.0451	0.0436	0.0425	0.0416	0.0408	0.0401	0.0395	0.0389	0.0383	0.0377	0.0371
5.75	0.0461	0.0445	0.0434	0.0425	0.0417	0.0411	0.0404	0.0398	0.0393	0.0387	0.0381
6.90	0.0462	0.0447	0.0435	0.0426	0.0419	0.0412	0.0406	0.0400	0.0395	0.0389	0.0383
8.05	0.0456	0.0441	0.0430	0.0421	0.0414	0.0407	0.0402	0.0396	0.0390	0.0384	0.0379
9.20	0.0443	0.0428	0.0417	0.0409	0.0402	0.0396	0.0391	0.0385	0.0380	0.0374	0.0368
10.35	0.0422	0.0408	0.0398	0.0390	0.0384	0.0378	0.0373	0.0368	0.0363	0.0358	0.0353
11.50	0.0393	0.0380	0.0371	0.0364	0.0359	0.0354	0.0350	0.0346	0.0341	0.0337	0.0332

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	0.00	35.19	51.14	55.51	53.08	46.98	39.30	31.51	24.66	19.52	16.65
1.15	0.00	35.66	51.91	56.45	54.10	47.99	40.24	32.31	25.28	19.90	16.75
2.30	0.00	37.23	54.47	59.58	57.48	51.35	43.35	34.98	27.32	21.15	17.07
3.45	0.00	40.17	59.29	65.50	63.87	57.71	49.25	40.04	31.20	23.53	17.64
4.60	0.00	43.89	65.41	73.03	72.03	65.85	56.82	46.54	36.18	26.56	18.33
5.75	0.00	46.67	70.01	78.73	78.25	72.09	62.64	51.56	40.01	28.88	18.80
6.90	0.00	48.02	72.33	81.69	81.55	75.48	65.85	54.35	42.14	30.11	18.90
8.05	0.00	48.34	73.04	82.76	82.90	76.98	67.37	55.71	43.17	30.62	18.70
9.20	0.00	48.02	72.79	82.77	83.22	77.56	68.10	56.43	43.70	30.75	18.20
10.35	0.00	47.43	72.27	82.63	83.54	78.28	69.06	57.40	44.41	30.88	17.41
11.50	0.00	48.10	74.16	85.81	87.79	83.21	74.15	62.03	47.90	32.49	16.38

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	1133.12	997.00	888.44	798.99	723.51	658.73	602.51	553.41	510.43	472.86	440.20
1.15	1138.94	1002.25	893.25	803.45	727.67	662.62	606.15	556.79	513.55	475.72	442.79
2.30	1157.59	1019.08	908.70	817.79	741.07	675.16	617.87	567.71	523.65	484.97	451.14
3.45	1191.10	1049.35	936.56	843.72	765.33	697.91	639.17	587.56	542.01	501.77	466.29
4.60	1231.27	1085.74	970.12	875.03	794.72	725.53	665.07	611.72	564.36	522.20	484.66
5.75	1257.04	1109.24	991.98	895.59	814.15	743.91	682.40	627.93	579.37	535.88	496.88
6.90	1260.78	1113.05	995.95	899.72	818.41	748.22	686.65	632.03	583.17	539.27	499.72
8.05	1244.71	1098.82	983.65	889.05	809.09	740.03	679.38	625.47	577.15	533.60	494.22
9.20	1208.12	1067.40	956.02	864.56	787.25	720.41	661.64	609.30	562.26	519.71	481.09
10.35	1151.36	1017.95	912.50	825.96	752.78	689.44	633.61	583.73	538.71	497.76	460.35
11.50	1071.89	949.34	852.82	773.72	706.78	648.65	597.12	550.69	508.31	469.26	433.00

Tabela IX (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 4.250 (CM) OUTER RADIOUS= 9.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 11.500 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.20 WINDING FRAME YOUNG MODULUS B1,B0= 0.2235E+06 0.4444E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/FS L= 0.1302E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8981E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.3143E-16(KG/CM**2) --

STRESS DISTRIBUTION OF THE MAGNET (E-M FORCE)

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	-0.0342	-0.0257	-0.0204	-0.0172	-0.0152	-0.0140	-0.0133	-0.0128	-0.0123	-0.0118	-0.0112
1.15	-0.0344	-0.0258	-0.0205	-0.0172	-0.0152	-0.0140	-0.0133	-0.0128	-0.0123	-0.0119	-0.0113
2.30	-0.0349	-0.0261	-0.0206	-0.0172	-0.0152	-0.0140	-0.0132	-0.0128	-0.0124	-0.0120	-0.0115
3.45	-0.0360	-0.0267	-0.0209	-0.0173	-0.0151	-0.0139	-0.0131	-0.0127	-0.0125	-0.0122	-0.0119
4.60	-0.0372	-0.0273	-0.0211	-0.0173	-0.0150	-0.0137	-0.0130	-0.0126	-0.0125	-0.0124	-0.0123
5.75	-0.0379	-0.0276	-0.0212	-0.0172	-0.0148	-0.0134	-0.0128	-0.0125	-0.0125	-0.0126	-0.0126
6.90	-0.0381	-0.0276	-0.0210	-0.0169	-0.0145	-0.0131	-0.0125	-0.0123	-0.0123	-0.0125	-0.0127
8.05	-0.0376	-0.0271	-0.0206	-0.0165	-0.0141	-0.0127	-0.0121	-0.0119	-0.0120	-0.0123	-0.0126
9.20	-0.0365	-0.0262	-0.0198	-0.0157	-0.0134	-0.0120	-0.0115	-0.0113	-0.0115	-0.0118	-0.0122
10.35	-0.0348	-0.0248	-0.0185	-0.0146	-0.0123	-0.0110	-0.0105	-0.0104	-0.0107	-0.0112	-0.0117
11.50	-0.0324	-0.0226	-0.0165	-0.0126	-0.0104	-0.0092	-0.0088	-0.0089	-0.0094	-0.0101	-0.0110

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	0.0977	0.0849	0.0751	0.0672	0.0608	0.0554	0.0508	0.0468	0.0433	0.0402	0.0375
1.15	0.0982	0.0854	0.0755	0.0676	0.0611	0.0557	0.0511	0.0470	0.0435	0.0404	0.0377
2.30	0.0998	0.0868	0.0767	0.0687	0.0622	0.0567	0.0520	0.0479	0.0443	0.0412	0.0384
3.45	0.1027	0.0893	0.0790	0.0708	0.0641	0.0585	0.0536	0.0495	0.0458	0.0426	0.0397
4.60	0.1062	0.0923	0.0817	0.0733	0.0664	0.0606	0.0556	0.0514	0.0476	0.0442	0.0412
5.75	0.1084	0.0943	0.0834	0.0749	0.0679	0.0620	0.0570	0.0526	0.0488	0.0453	0.0423
6.90	0.1087	0.0945	0.0837	0.0751	0.0681	0.0623	0.0572	0.0529	0.0490	0.0456	0.0425
8.05	0.1073	0.0933	0.0826	0.0742	0.0673	0.0615	0.0566	0.0523	0.0485	0.0451	0.0421
9.20	0.1042	0.0906	0.0803	0.0721	0.0654	0.0598	0.0550	0.0508	0.0472	0.0439	0.0409
10.35	0.0993	0.0864	0.0765	0.0687	0.0624	0.0571	0.0526	0.0486	0.0451	0.0420	0.0392
11.50	0.0924	0.0804	0.0713	0.0641	0.0583	0.0534	0.0493	0.0456	0.0424	0.0395	0.0369

Tabela IX (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 4.250 (CM) OUTER RADIOUS= 9.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 11.500 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.20 WINDING FRAME YOUNG MODULUS B1,B0= 0.2235E+06 0.4444E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1302E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8981E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.3143E-16(KG/CM**2) --

TOTAL OF THE MAGNET STRESS AND STRAIN DISTRIBUTION --WINDING,COOL DOWN,E-M FORCE--

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	-0.0940	-0.1046	-0.1163	-0.1285	-0.1409	-0.1535	-0.1662	-0.1789	-0.1917	-0.2044	-0.2171
1.15	-0.0938	-0.1043	-0.1161	-0.1283	-0.1407	-0.1533	-0.1660	-0.1787	-0.1915	-0.2042	-0.2169
2.30	-0.0931	-0.1037	-0.1154	-0.1276	-0.1401	-0.1527	-0.1654	-0.1781	-0.1908	-0.2036	-0.2163
3.45	-0.0918	-0.1025	-0.1142	-0.1265	-0.1389	-0.1515	-0.1642	-0.1769	-0.1896	-0.2024	-0.2151
4.60	-0.0904	-0.1011	-0.1128	-0.1251	-0.1375	-0.1501	-0.1628	-0.1755	-0.1882	-0.2010	-0.2137
5.75	-0.0894	-0.1001	-0.1119	-0.1242	-0.1366	-0.1492	-0.1618	-0.1745	-0.1873	-0.2000	-0.2128
6.90	-0.0893	-0.1000	-0.1118	-0.1240	-0.1364	-0.1490	-0.1616	-0.1743	-0.1870	-0.1998	-0.2126
8.05	-0.0899	-0.1006	-0.1123	-0.1245	-0.1370	-0.1495	-0.1621	-0.1748	-0.1875	-0.2002	-0.2130
9.20	-0.0912	-0.1019	-0.1136	-0.1257	-0.1381	-0.1506	-0.1632	-0.1759	-0.1885	-0.2013	-0.2140
10.35	-0.0933	-0.1039	-0.1155	-0.1276	-0.1400	-0.1524	-0.1649	-0.1775	-0.1902	-0.2029	-0.2156
11.50	-0.0962	-0.1067	-0.1182	-0.1302	-0.1425	-0.1548	-0.1673	-0.1798	-0.1924	-0.2050	-0.2177

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	-94.70	-68.06	-48.86	-35.62	-26.42	-19.58	-13.78	-7.98	-1.37	5.67	16.65
1.15	-94.70	-67.58	-48.08	-34.68	-25.40	-18.57	-12.84	-7.18	-0.76	7.05	16.75
2.30	-94.70	-66.01	-45.52	-31.55	-22.02	-15.21	-9.73	-4.51	-1.28	8.30	17.07
3.45	-94.70	-63.07	-40.70	-25.63	-15.63	-8.85	-3.83	0.55	5.16	10.68	17.64
4.60	-94.70	-59.35	-34.58	-18.10	-7.48	-0.71	3.74	7.05	10.14	13.71	18.33
5.75	-94.70	-56.57	-29.98	-12.40	-1.26	5.53	9.56	12.07	13.98	16.03	18.80
6.90	-94.70	-55.22	-27.66	-9.44	2.05	8.92	12.77	14.85	16.11	17.26	18.90
8.05	-94.70	-54.90	-26.95	-8.37	3.40	10.42	14.29	16.21	17.13	17.77	18.70
9.20	-94.70	-55.23	-27.20	-8.36	3.72	11.00	15.02	16.94	17.66	17.90	18.20
10.35	-94.70	-55.81	-27.72	-8.50	4.04	11.72	15.98	17.91	18.37	18.03	17.41
11.50	-94.70	-55.14	-25.83	-5.32	8.29	16.65	21.07	22.54	21.86	19.64	16.38

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	874.97	882.26	861.90	834.12	805.27	777.74	752.51	730.00	710.41	693.81	680.24
1.15	880.79	887.51	866.71	838.58	809.43	781.63	756.14	733.38	713.54	696.68	682.83
2.30	899.45	904.33	882.16	852.93	822.83	794.17	767.87	744.31	723.64	705.92	691.18
3.45	932.95	934.61	910.02	878.85	847.09	816.92	789.17	764.16	742.00	722.72	706.33
4.60	973.12	970.99	943.58	910.16	876.48	844.54	815.07	788.31	764.34	743.15	724.70
5.75	998.89	994.49	965.44	930.72	895.92	862.92	832.39	804.53	779.35	756.83	736.93
6.90	1002.63	998.30	969.40	934.85	900.17	867.22	836.65	808.62	783.16	760.22	739.76
8.05	986.06	984.07	957.11	924.18	890.86	859.03	829.37	802.06	777.13	754.55	734.26
9.20	949.97	952.65	929.48	899.69	869.01	839.42	811.64	785.89	762.24	740.67	721.13
10.35	893.21	903.20	885.96	861.09	834.54	808.45	783.61	760.32	738.69	718.72	700.39
11.50	813.74	834.59	826.28	808.85	788.55	767.66	747.12	727.28	708.30	690.21	673.04

Tabela IX (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 4.250 (CM) OUTER RADIOUS= 9.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 11.500 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.20 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.2235E+06 0.4444E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1302E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.8981E-16(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.3143E-16(KG/CM**2) --

TOTAL OF THE MAGNET STRESS AND STRAIN DISTRIBUTION --WINDING,COOL DOWN,E-M FORCE--

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	-0.0383	-0.0351	-0.0321	-0.0296	-0.0276	-0.0259	-0.0244	-0.0230	-0.0216	-0.0201	-0.0185
1.15	-0.0384	-0.0352	-0.0322	-0.0297	-0.0276	-0.0259	-0.0244	-0.0230	-0.0216	-0.0201	-0.0185
2.30	-0.0390	-0.0356	-0.0323	-0.0297	-0.0276	-0.0259	-0.0244	-0.0230	-0.0217	-0.0203	-0.0187
3.45	-0.0400	-0.0361	-0.0326	-0.0297	-0.0275	-0.0258	-0.0243	-0.0230	-0.0218	-0.0205	-0.0191
4.60	-0.0412	-0.0367	-0.0328	-0.0297	-0.0274	-0.0256	-0.0241	-0.0229	-0.0218	-0.0207	-0.0196
5.75	-0.0420	-0.0371	-0.0329	-0.0296	-0.0272	-0.0254	-0.0239	-0.0228	-0.0218	-0.0208	-0.0199
6.90	-0.0421	-0.0370	-0.0327	-0.0294	-0.0269	-0.0251	-0.0237	-0.0226	-0.0216	-0.0208	-0.0200
8.05	-0.0416	-0.0366	-0.0323	-0.0289	-0.0265	-0.0246	-0.0232	-0.0222	-0.0213	-0.0206	-0.0198
9.20	-0.0405	-0.0357	-0.0315	-0.0282	-0.0258	-0.0240	-0.0226	-0.0216	-0.0208	-0.0201	-0.0195
10.35	-0.0388	-0.0342	-0.0302	-0.0271	-0.0247	-0.0229	-0.0217	-0.0207	-0.0200	-0.0194	-0.0190
11.50	-0.0364	-0.0321	-0.0282	-0.0251	-0.0228	-0.0211	-0.0199	-0.0191	-0.0186	-0.0184	-0.0183

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	4.25	4.72	5.20	5.68	6.15	6.63	7.10	7.58	8.05	8.53	9.00
0.00	0.0783	0.0781	0.0758	0.0730	0.0703	0.0677	0.0653	0.0632	0.0613	0.0596	0.0582
1.15	0.0788	0.0786	0.0762	0.0734	0.0706	0.0680	0.0656	0.0635	0.0616	0.0599	0.0584
2.30	0.0804	0.0800	0.0775	0.0745	0.0716	0.0690	0.0665	0.0643	0.0624	0.0606	0.0591
3.45	0.0833	0.0825	0.0797	0.0766	0.0735	0.0707	0.0682	0.0659	0.0638	0.0620	0.0604
4.60	0.0868	0.0855	0.0824	0.0790	0.0758	0.0729	0.0702	0.0678	0.0656	0.0637	0.0620
5.75	0.0890	0.0875	0.0842	0.0806	0.0773	0.0743	0.0715	0.0690	0.0668	0.0648	0.0630
6.90	0.0893	0.0878	0.0844	0.0809	0.0776	0.0745	0.0718	0.0693	0.0671	0.0650	0.0632
8.05	0.0879	0.0865	0.0834	0.0800	0.0767	0.0738	0.0711	0.0687	0.0665	0.0645	0.0628
9.20	0.0848	0.0838	0.0810	0.0779	0.0748	0.0721	0.0695	0.0673	0.0652	0.0633	0.0616
10.35	0.0799	0.0796	0.0773	0.0745	0.0719	0.0694	0.0671	0.0650	0.0632	0.0614	0.0599
11.50	0.0730	0.0736	0.0720	0.0699	0.0678	0.0657	0.0638	0.0620	0.0604	0.0589	0.0577

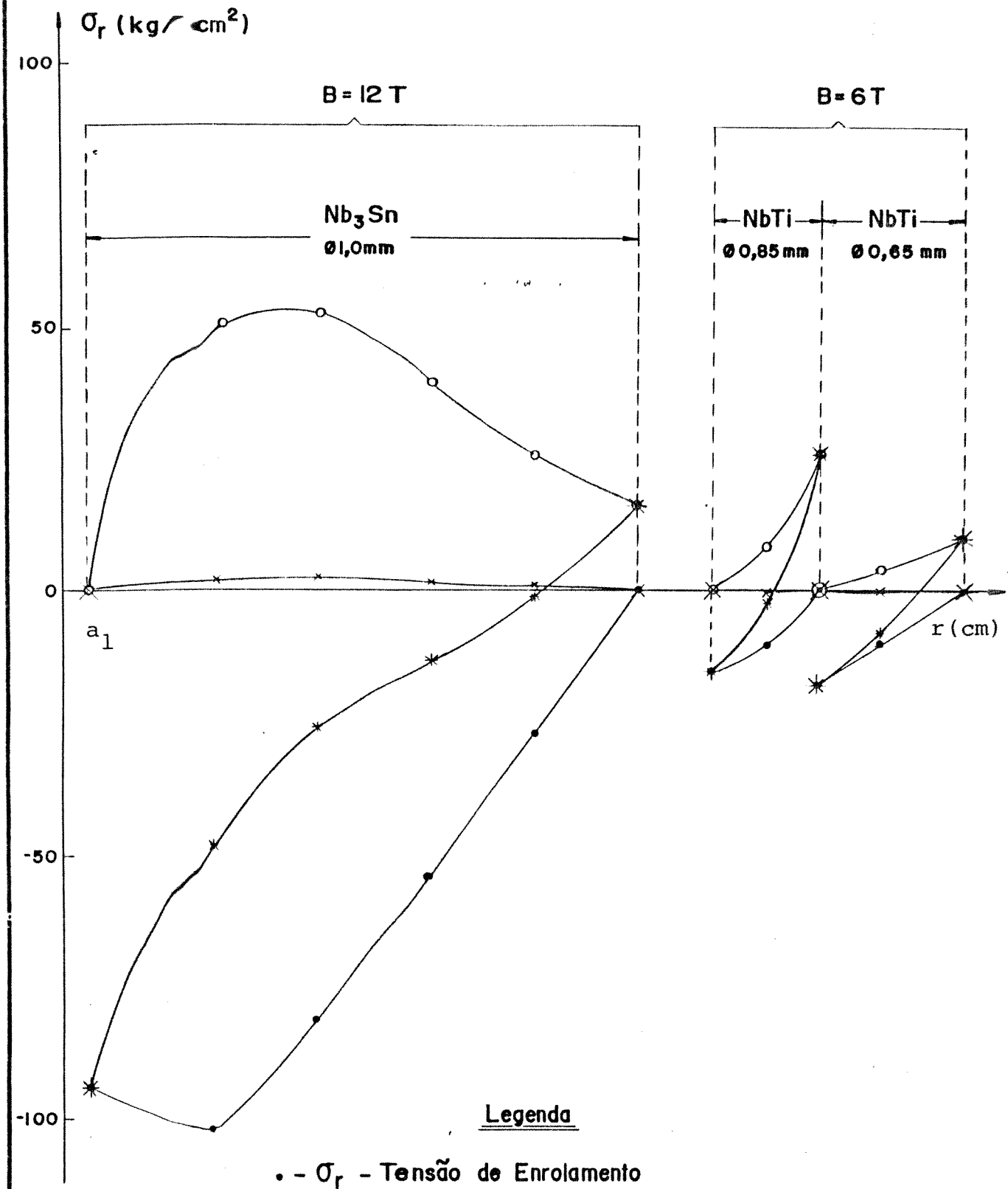


Fig. 8

DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES MECÂNICAS RADIAIS

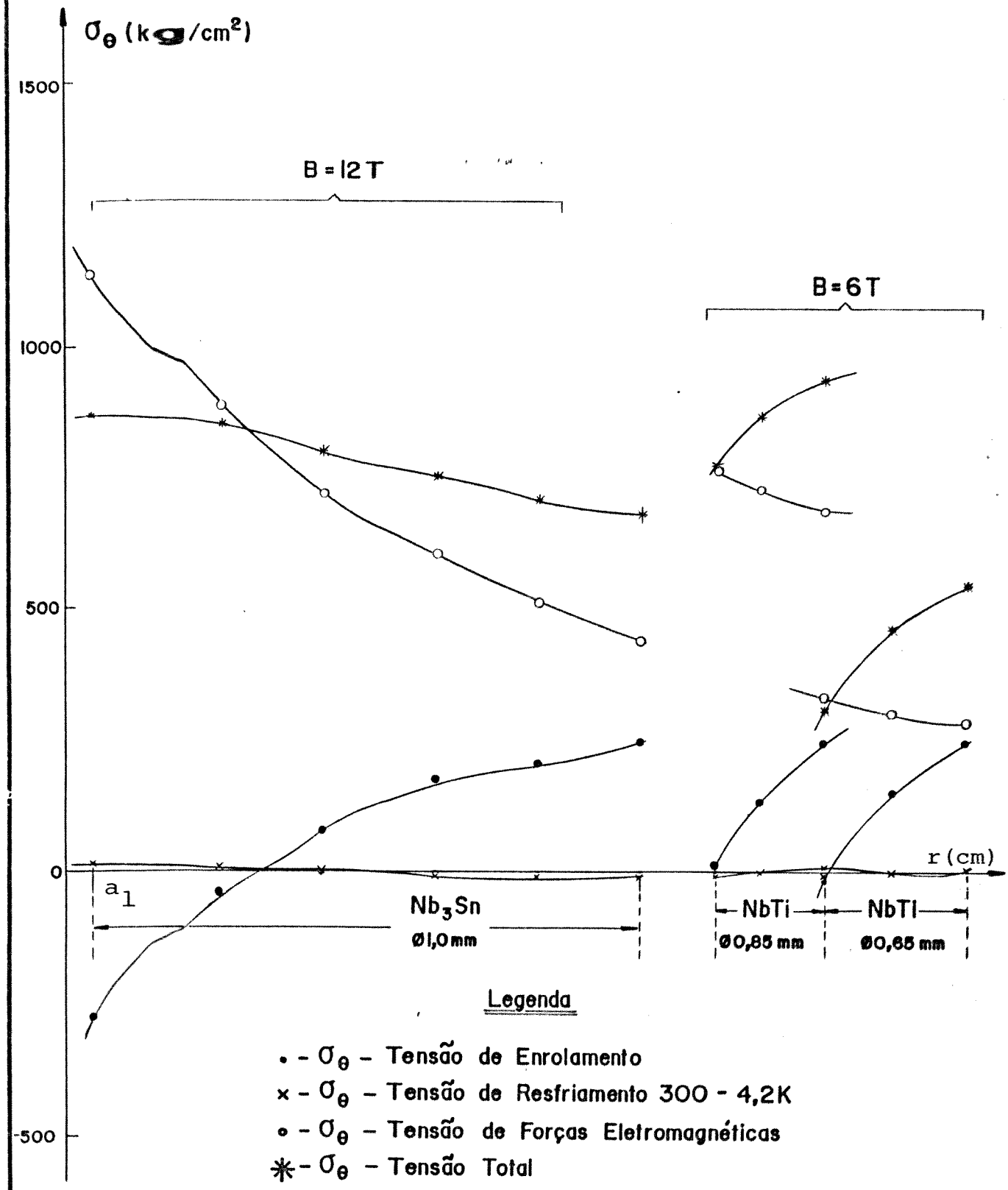


Fig. 9

DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES MECÂNICAS AXIAIS

que estão bem abaixo dos valores máximos para "strain" em Nb_3Sn $\varepsilon \simeq 0{,}2\%$.

VIII -3.2 - Enrolamento NbTi

Análogo ao feito no ítem anterior, a fig.10 e tabela X mostram a determinação dos componentes Cu e NbTi nos dois fios supercondutores utilizados, bem como as frações volumétricas e seus módulos de elasticidade permitindo calcular:

		Ø 0,85mm	Ø 0,6mm
$E_{COND}^{-\theta} = \sum_i V_i E_i$	=	10470 (kg/mm^2)	10285kg/mm^2
$E_{COND}^{-r} = \dfrac{1}{\sum_i \frac{V_i}{E_i}}$	=	7500 (kg/mm^2)	7065 (kg/mm^2)

A mesma relação de fração volumétrica de epóxi foi utilizada para os condutores de NbTi, porém neste caso foi considerada a fração volumétrica do isolamento no cálculo de E_{COND}

		Ø 0,85	Ø 0,6
$E_{ENR}^{-\theta} = V_{CON}E_{CON} + V_{ex}E_{ex}$	=	8850	8700
$E_{ENR}^{-r} = \dfrac{1}{\frac{V_{COND}}{E_{CON}} + \frac{V_{ex}}{E_{ex}}}$	=	4300	4276

Como os valores encontrados tanto para o condutor ou enrolamento são próximos poderemos considerar, que para todo enrolamento de NbTi (2) + (3)

$E_{CON}^{-\theta}$ = 10470 (kg/mm^2) $\quad E_{ENR}^{-\theta}$ = 8850 (kg/mm^2)

E_{CON}^{-r} = 7500 (kg/mm^2) $\quad E_{ENR}^{-r}$ = 4300 (kg/mm^2)

Utilizando estes parâmetros como entrada no programa de cálculo de forças obtemos os resultados da tabela XI para fio supercondutor Ø 0,85, e tabela XII para Ø 0,6. Lembramos que as tensões e deformações foram calculadas considerando o mapea-

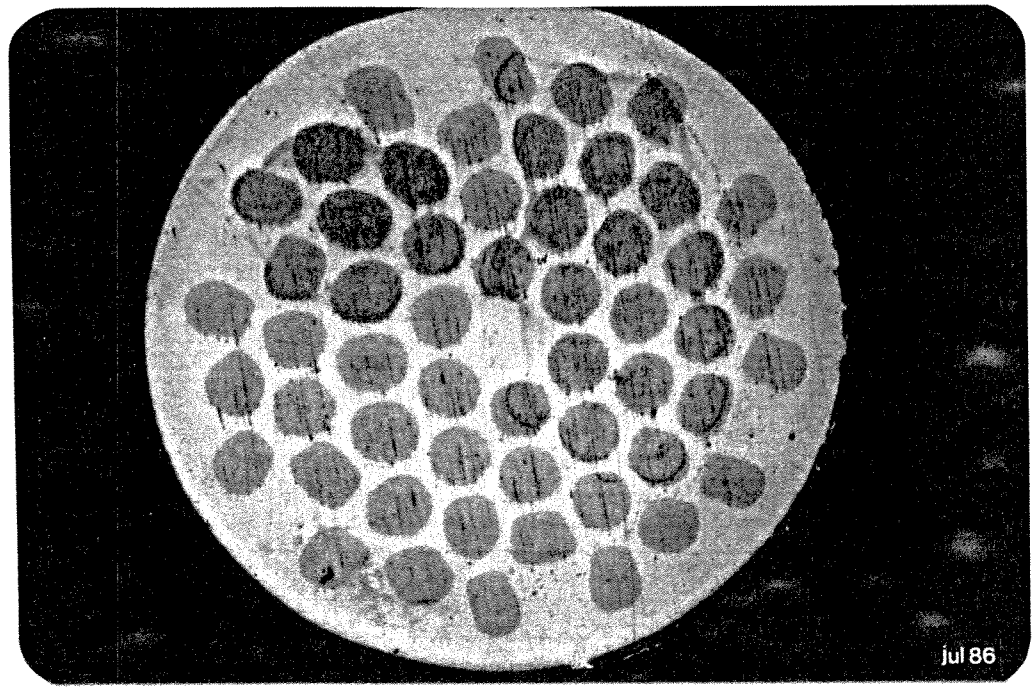


Fig. 10 - Metalografia de Fio Supercondutor NbTi

	Fração Volumétrica		Módulo Elasticidade
	Ø 0,85mm	Ø 0,6mm	
Cu	0,51	0,50	12.650
NbTi	0,38	0,37	10.000
Isolamento	0,11	0,13	2.000

Tabela X - Frações Volumétricas dos Fios Supercondutores NbTi

Tabela XI - Resultados de Cálculos de Tensões/Deformações para NbTi (0,8mm)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF TOTAL COIL

INNER RADIOUS= 9.700 (CM) OUTER RADIOUS= 10.700 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.50	-26.42	-27.15	-27.85	-28.53	-29.18	-29.79	-30.36	-30.88	-31.35	-31.77	-32.13
3.00	-54.20	-56.75	-59.37	-62.03	-64.72	-67.43	-70.13	-72.77	-75.33	-77.75	-79.98
4.50	-55.15	-58.74	-62.54	-66.58	-70.86	-75.42	-80.23	-85.29	-90.53	-95.83	-101.00
6.00	-13.12	-14.53	-15.91	-17.27	-18.58	-19.85	-21.06	-22.20	-23.27	-24.24	-25.13
7.50	32.32	31.49	30.66	29.80	29.07	28.29	27.55	26.82	26.13	25.46	24.82
9.00	78.34	77.34	76.33	75.34	74.34	73.36	72.38	71.42	70.46	69.52	68.59
10.50	126.01	126.23	124.49	122.80	121.14	119.52	117.94	116.39	114.88	113.40	111.94
12.00	171.45	169.62	167.86	166.17	164.53	162.92	161.35	159.80	158.26	156.73	155.20
13.50	206.48	207.34	208.11	208.78	209.32	209.74	210.00	210.10	210.02	209.74	209.27
15.00	256.11	267.42	275.53	282.32	288.30	293.80	299.04	304.21	309.48	314.87	323.54

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	220.40	201.89	185.89	168.13	149.77	131.23	112.66	94.26	76.54	60.68	41.53
1.50	227.42	208.77	192.60	174.64	156.05	137.24	118.39	99.66	81.58	65.35	45.79
3.00	255.97	237.47	221.30	203.20	184.29	164.96	145.36	125.64	106.30	88.53	67.16
4.50	317.66	303.01	291.17	277.96	264.62	251.70	239.36	227.55	215.84	203.15	194.60
6.00	356.02	344.40	333.49	321.07	308.35	295.79	283.47	271.24	258.54	244.14	233.10
7.50	372.16	358.44	347.36	334.69	321.65	308.68	295.88	283.09	269.75	254.65	242.82
9.00	376.79	363.21	352.24	339.65	326.64	313.68	300.86	288.02	274.60	259.39	247.44
10.50	380.94	367.57	356.75	344.29	331.38	318.49	305.72	292.92	279.53	264.34	252.41
12.00	390.35	375.81	364.05	350.83	337.34	324.01	310.92	297.90	284.40	269.18	257.28
13.50	369.82	356.01	345.09	332.82	320.39	308.26	296.49	284.92	272.97	259.41	249.27
15.00	273.27	264.29	256.66	248.26	239.71	231.23	222.85	214.50	205.91	196.46	188.67

Tabela XI (Continuação)

```
                MECHANICAL PROPERTIES OF THE INPUT DATA N= 1

                YOUNG MODULUS
--SUPERCONDUCTOR ES=  0.1000E+12     STABILIZER EC=  0.1300E+12     INSULATER DR RAINFORCER EI=  0.2940E+11     (N/M**2)--

                VOLUME FRACTION
--SUPERCONDUCTOR VS=  0.3070E+00     STABILIZER VC=  0.4140E+00     ISULATER OR RAINFORCER VI=,  0.2790E+00     --

                THERMAL EXPANSION FROM 300K TO 4.2K
--SUPERCONDUCTOR AS= -0.3380E-02     STABILIZER AC= -0.3380E-02     INSULATER OR RAINFORCER AI= -0.2700E-02     --

          FRAME YOUNG MODULUS
--INNER FRAME BI=  0.1960E+12          OUTER FRAME BO=  0.1960E+12     (N/M**2)--
--FRAME THICKNESS TI=  0.3000E+00          FRAME THICKNESS TO=  0.2000E+00     (CM)--

          RAINFORCED FRAME YOUNG MODULUS
--INNER FRAME BI=  0.6062E+10          OUTER FRAME BO=  0.3664E+10     (N/M**2)--

          YOUNG MODULUS TOTAL
--HOOP DERECTION ES=  0.9272E+11          RADIUS DEFECTION ER=  0.6351E+11     (N/M**2)--

          THERMAL EXPANSION TOTAL
--HOOP DERECTION AS= -0.3320E-02          RADIUS DEFECTION AR= -0.3190E-02     --
```

Tabela IX (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 9.700 (CM) OUTER RADIOUS= 10.700 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.21 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.6186E+05 0.3738E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1607E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.1100E-15(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.3852E-16(KG/CM**2) --

TOTAL OF THE MAGNET STRESS AND STRAIN DISTRIBUTION --WINDING,COOL DOWN,E-M FORCE--

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	-0.2679	-0.2676	-0.2678	-0.2683	-0.2692	-0.2703	-0.2715	-0.2730	-0.2746	-0.2763	-0.2781
1.50	-0.2645	-0.2642	-0.2644	-0.2649	-0.2658	-0.2669	-0.2682	-0.2697	-0.2712	-0.2730	-0.2748
3.00	-0.2494	-0.2491	-0.2493	-0.2499	-0.2509	-0.2520	-0.2534	-0.2549	-0.2565	-0.2583	-0.2601
4.50	-0.1917	-0.1916	-0.1921	-0.1929	-0.1940	-0.1953	-0.1968	-0.1985	-0.2003	-0.2022	-0.2042
6.00	-0.1677	-0.1678	-0.1683	-0.1692	-0.1703	-0.1717	-0.1733	-0.1751	-0.1769	-0.1789	-0.1810
7.50	-0.1605	-0.1606	-0.1611	-0.1620	-0.1632	-0.1646	-0.1662	-0.1680	-0.1699	-0.1719	-0.1740
9.00	-0.1577	-0.1578	-0.1583	-0.1592	-0.1604	-0.1619	-0.1635	-0.1653	-0.1672	-0.1692	-0.1713
10.50	-0.1549	-0.1550	-0.1556	-0.1565	-0.1577	-0.1591	-0.1608	-0.1625	-0.1645	-0.1665	-0.1686
12.00	-0.1506	-0.1507	-0.1513	-0.1522	-0.1534	-0.1549	-0.1565	-0.1583	-0.1602	-0.1623	-0.1644
13.50	-0.1592	-0.1593	-0.1598	-0.1607	-0.1619	-0.1634	-0.1650	-0.1668	-0.1686	-0.1707	-0.1728
15.00	-0.2069	-0.2068	-0.2071	-0.2079	-0.2089	-0.2102	-0.2117	-0.2133	-0.2150	-0.2169	-0.2189

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	-15.48	-14.27	-12.29	-9.59	-6.21	-2.19	2.44	7.67	13.47	19.82	26.72
1.50	-15.48	-14.16	-12.07	-9.25	-5.76	-1.63	3.12	8.46	14.38	20.86	27.88
3.00	-15.48	-13.59	-10.95	-7.60	-3.59	1.06	6.31	12.15	18.55	25.51	33.01
4.50	-15.48	-10.04	-4.21	1.95	8.42	15.17	22.17	29.42	36.90	44.61	52.53
6.00	-15.48	-9.00	-2.19	4.90	12.24	19.82	27.60	35.58	43.75	52.11	60.64
7.50	-15.48	-8.74	-1.69	5.65	13.24	21.06	29.08	37.31	45.72	54.31	63.09
9.00	-15.48	-8.62	-1.44	6.01	13.70	21.61	29.73	38.04	46.53	55.20	64.04
10.50	-15.48	-8.48	-1.18	6.39	14.18	22.19	30.40	38.79	47.35	56.08	64.98
12.00	-15.48	-8.36	-0.93	6.77	14.71	22.86	31.21	39.76	48.48	57.38	66.44
13.50	-15.48	-8.55	-1.34	6.12	13.80	21.68	29.73	37.95	46.32	54.85	63.52
15.00	-15.48	-10.13	-4.49	1.39	7.49	13.77	20.22	26.82	33.55	40.42	47.40

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	772.24	802.52	827.69	849.03	867.39	883.41	897.56	910.18	921.57	931.93	941.46
1.50	805.58	835.45	860.21	881.15	899.13	914.78	928.57	940.84	951.89	961.93	971.14
3.00	953.29	981.32	1004.31	1023.52	1039.82	1053.83	1066.02	1076.75	1086.29	1094.86	1102.64
4.50	1515.77	1537.34	1553.96	1566.89	1576.98	1584.86	1590.98	1595.68	1599.24	1601.87	1603.74
6.00	1749.41	1768.14	1781.99	1792.21	1799.66	1804.96	1808.56	1810.79	1811.95	1812.22	1811.78
7.50	1819.98	1837.83	1850.82	1860.21	1866.86	1871.37	1874.21	1875.71	1876.14	1875.72	1874.61
9.00	1847.39	1864.91	1877.57	1886.65	1892.98	1897.20	1899.74	1900.95	1901.10	1900.40	1899.01
10.50	1874.44	1891.64	1903.99	1912.75	1918.78	1922.70	1924.95	1925.87	1925.74	1924.76	1923.11
12.00	1916.62	1933.28	1945.11	1953.37	1958.92	1962.36	1964.16	1964.64	1964.09	1962.70	1960.65
13.50	1832.44	1850.18	1863.06	1872.34	1878.86	1883.25	1885.95	1887.31	1887.59	1887.01	1885.73
15.00	1367.85	1391.42	1409.96	1424.72	1436.57	1446.12	1453.83	1460.04	1465.03	1469.01	1472.15

Tabela XI (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 9.700 (CM) OUTER RADIOUS= 10.700 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.21 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.6186E+05 0.3738E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1607E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.1100E-15(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.3852E-16(KG/CM**2) --

TOTAL OF THE MAGNET STRESS AND STRAIN DISTRIBUTION --WINDING,COOL DOWN,E-M FORCE--

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	-0.0310	-0.0319	-0.0325	-0.0329	-0.0330	-0.0330	-0.0328	-0.0325	-0.0320	-0.0314	-0.0307
1.50	-0.0322	-0.0331	-0.0337	-0.0340	-0.0342	-0.0341	-0.0339	-0.0335	-0.0330	-0.0324	-0.0316
3.00	-0.0377	-0.0384	-0.0388	-0.0390	-0.0390	-0.0388	-0.0385	-0.0380	-0.0373	-0.0366	-0.0357
4.50	-0.0585	-0.0584	-0.0581	-0.0577	-0.0570	-0.0563	-0.0554	-0.0545	-0.0535	-0.0524	-0.0512
6.00	-0.0671	-0.0668	-0.0663	-0.0655	-0.0647	-0.0637	-0.0626	-0.0615	-0.0603	-0.0590	-0.0577
7.50	-0.0697	-0.0693	-0.0687	-0.0679	-0.0670	-0.0660	-0.0648	-0.0636	-0.0623	-0.0610	-0.0596
9.00	-0.0707	-0.0703	-0.0697	-0.0689	-0.0679	-0.0668	-0.0657	-0.0645	-0.0631	-0.0618	-0.0604
10.50	-0.0717	-0.0713	-0.0706	-0.0698	-0.0688	-0.0677	-0.0665	-0.0653	-0.0639	-0.0625	-0.0611
12.00	-0.0733	-0.0728	-0.0721	-0.0712	-0.0702	-0.0691	-0.0678	-0.0665	-0.0652	-0.0638	-0.0623
13.50	-0.0702	-0.0698	-0.0691	-0.0683	-0.0674	-0.0663	-0.0652	-0.0640	-0.0627	-0.0613	-0.0600
15.00	-0.0530	-0.0530	-0.0529	-0.0525	-0.0520	-0.0514	-0.0507	-0.0499	-0.0490	-0.0481	-0.0471

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	0.0822	0.0853	0.0879	0.0901	0.0919	0.0935	0.0948	0.0959	0.0969	0.0978	0.0985
1.50	0.0857	0.0888	0.0914	0.0935	0.0952	0.0967	0.0980	0.0991	0.1001	0.1009	0.1016
3.00	0.1013	0.1042	0.1066	0.1085	0.1100	0.1113	0.1124	0.1134	0.1141	0.1148	0.1153
4.50	0.1608	0.1629	0.1644	0.1655	0.1664	0.1669	0.1673	0.1676	0.1677	0.1677	0.1676
6.00	0.1855	0.1872	0.1884	0.1892	0.1898	0.1900	0.1901	0.1901	0.1899	0.1896	0.1892
7.50	0.1929	0.1946	0.1957	0.1964	0.1968	0.1970	0.1970	0.1969	0.1966	0.1962	0.1958
9.00	0.1958	0.1974	0.1985	0.1992	0.1996	0.1997	0.1997	0.1995	0.1992	0.1988	0.1983
10.50	0.1987	0.2002	0.2013	0.2019	0.2023	0.2024	0.2023	0.2021	0.2018	0.2014	0.2009
12.00	0.2031	0.2046	0.2056	0.2062	0.2065	0.2066	0.2064	0.2062	0.2058	0.2053	0.2048
13.50	0.1942	0.1959	0.1970	0.1977	0.1981	0.1982	0.1982	0.1981	0.1978	0.1974	0.1970
15.00	0.1451	0.1474	0.1492	0.1505	0.1516	0.1523	0.1529	0.1533	0.1536	0.1538	0.1538

Tabela IX (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 9.700 (CM) OUTER RADIOUS= 10.700 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.21 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.6186E+05 0.3738E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1607E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.1100E-15(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.3852E-16(KG/CM**2)

MAGNET COOLING PROCEDURE--COOL DOWN FROM 300K TO 4.2K--

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	-0.3227	-0.3258	-0.3290	-0.3322	-0.3354	-0.3386	-0.3418	-0.3450	-0.3482	-0.3514	-0.3546
1.50	-0.3227	-0.3258	-0.3290	-0.3322	-0.3354	-0.3386	-0.3418	-0.3450	-0.3482	-0.3514	-0.3546
3.00	-0.3227	-0.3258	-0.3290	-0.3322	-0.3354	-0.3386	-0.3418	-0.3450	-0.3482	-0.3514	-0.3546
4.50	-0.3227	-0.3258	-0.3290	-0.3322	-0.3354	-0.3386	-0.3418	-0.3450	-0.3482	-0.3514	-0.3546
6.00	-0.3227	-0.3258	-0.3290	-0.3322	-0.3354	-0.3386	-0.3418	-0.3450	-0.3482	-0.3514	-0.3546
7.50	-0.3227	-0.3258	-0.3290	-0.3322	-0.3354	-0.3386	-0.3418	-0.3450	-0.3482	-0.3514	-0.3546
9.00	-0.3227	-0.3258	-0.3290	-0.3322	-0.3354	-0.3386	-0.3418	-0.3450	-0.3482	-0.3514	-0.3546
10.50	-0.3227	-0.3258	-0.3290	-0.3322	-0.3354	-0.3386	-0.3418	-0.3450	-0.3482	-0.3514	-0.3546
12.00	-0.3227	-0.3258	-0.3290	-0.3322	-0.3354	-0.3386	-0.3418	-0.3450	-0.3482	-0.3514	-0.3546
13.50	-0.3227	-0.3258	-0.3290	-0.3322	-0.3354	-0.3386	-0.3418	-0.3450	-0.3482	-0.3514	-0.3546
15.00	-0.3227	-0.3258	-0.3290	-0.3322	-0.3354	-0.3386	-0.3418	-0.3450	-0.3482	-0.3514	-0.3546

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	0.00	-0.06	-0.10	-0.13	-0.14	-0.15	-0.14	-0.12	-0.09	-0.05	0.00
1.50	0.00	-0.06	-0.10	-0.13	-0.14	-0.15	-0.14	-0.12	-0.09	-0.05	0.00
3.00	0.00	-0.06	-0.10	-0.13	-0.14	-0.15	-0.14	-0.12	-0.09	-0.05	0.00
4.50	0.00	-0.06	-0.10	-0.13	-0.14	-0.15	-0.14	-0.12	-0.09	-0.05	0.00
6.00	0.00	-0.06	-0.10	-0.13	-0.14	-0.15	-0.14	-0.12	-0.09	-0.05	0.00
7.50	0.00	-0.06	-0.10	-0.13	-0.14	-0.15	-0.14	-0.12	-0.09	-0.05	0.00
9.00	0.00	-0.06	-0.10	-0.13	-0.14	-0.15	-0.14	-0.12	-0.09	-0.05	0.00
10.50	0.00	-0.06	-0.10	-0.13	-0.14	-0.15	-0.14	-0.12	-0.09	-0.05	0.00
12.00	0.00	-0.06	-0.10	-0.13	-0.14	-0.15	-0.14	-0.12	-0.09	-0.05	0.00
13.50	0.00	-0.06	-0.10	-0.13	-0.14	-0.15	-0.14	-0.12	-0.09	-0.05	0.00
15.00	0.00	-0.06	-0.10	-0.13	-0.14	-0.15	-0.14	-0.12	-0.09	-0.05	0.00

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	-6.21	-4.89	-3.61	-2.35	-1.11	0.10	1.29	2.45	3.59	4.71	5.82
1.50	-6.21	-4.89	-3.61	-2.35	-1.11	0.10	1.29	2.45	3.59	4.71	5.82
3.00	-6.21	-4.89	-3.61	-2.35	-1.11	0.10	1.29	2.45	3.59	4.71	5.82
4.50	-6.21	-4.89	-3.61	-2.35	-1.11	0.10	1.29	2.45	3.59	4.71	5.82
6.00	-6.21	-4.89	-3.61	-2.35	-1.11	0.10	1.29	2.45	3.59	4.71	5.82
7.50	-6.21	-4.89	-3.61	-2.35	-1.11	0.10	1.29	2.45	3.59	4.71	5.82
9.00	-6.21	-4.89	-3.61	-2.35	-1.11	0.10	1.29	2.45	3.59	4.71	5.82
10.50	-6.21	-4.89	-3.61	-2.35	-1.11	0.10	1.29	2.45	3.59	4.71	5.82
12.00	-6.21	-4.89	-3.61	-2.35	-1.11	0.10	1.29	2.45	3.59	4.71	5.82
13.50	-6.21	-4.89	-3.61	-2.35	-1.11	0.10	1.29	2.45	3.59	4.71	5.82
15.00	-6.21	-4.89	-3.61	-2.35	-1.11	0.10	1.29	2.45	3.59	4.71	5.82

Tabela IX (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 9.700 (CM) OUTER RADIOUS= 10.700 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.21 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.6186E+05 0.3738E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1607E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.1100E-15(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.3852E-16(KG/CM**2)

MAGNET COOLING PROCEDURE--COOL DOWN FROM 300K TO 4.2K--

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002
1.50	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002
3.00	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002
4.50	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002
6.00	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002
7.50	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002
9.00	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002
10.50	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002
12.00	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002
13.50	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002
15.00	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	-0.0007	-0.0005	-0.0004	-0.0002	-0.0001	0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006
1.50	-0.0007	-0.0005	-0.0004	-0.0002	-0.0001	0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006
3.00	-0.0007	-0.0005	-0.0004	-0.0002	-0.0001	0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006
4.50	-0.0007	-0.0005	-0.0004	-0.0002	-0.0001	0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006
6.00	-0.0007	-0.0005	-0.0004	-0.0002	-0.0001	0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006
7.50	-0.0007	-0.0005	-0.0004	-0.0002	-0.0001	0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006
9.00	-0.0007	-0.0005	-0.0004	-0.0002	-0.0001	0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006
10.50	-0.0007	-0.0005	-0.0004	-0.0002	-0.0001	0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006
12.00	-0.0007	-0.0005	-0.0004	-0.0002	-0.0001	0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006
13.50	-0.0007	-0.0005	-0.0004	-0.0002	-0.0001	0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006
15.00	-0.0007	-0.0005	-0.0004	-0.0002	-0.0001	0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006

Tabela XI (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 9.700 (CM) OUTER RADIOUS= 10.700 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.21 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.6186E+05 0.3738E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1607E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.1100E-15(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.3852E-16(KG/CM**2) --

STRESS DISTRIBUTION OF THE MAGNET (E-M FORCE)

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	-0.0285	-0.0280	-0.0274	-0.0268	-0.0262	-0.0255	-0.0247	-0.0239	-0.0231	-0.0222	-0.0212
1.50	-0.0297	-0.0292	-0.0286	-0.0280	-0.0273	-0.0266	-0.0258	-0.0250	-0.0241	-0.0231	-0.0222
3.00	-0.0352	-0.0345	-0.0338	-0.0330	-0.0322	-0.0313	-0.0304	-0.0294	-0.0284	-0.0273	-0.0262
4.50	-0.0560	-0.0545	-0.0531	-0.0516	-0.0502	-0.0488	-0.0474	-0.0459	-0.0445	-0.0432	-0.0418
6.00	-0.0647	-0.0629	-0.0612	-0.0595	-0.0578	-0.0562	-0.0546	-0.0530	-0.0514	-0.0498	-0.0482
7.50	-0.0673	-0.0654	-0.0637	-0.0619	-0.0602	-0.0585	-0.0568	-0.0551	-0.0534	-0.0518	-0.0501
9.00	-0.0683	-0.0664	-0.0646	-0.0628	-0.0611	-0.0593	-0.0576	-0.0559	-0.0542	-0.0526	-0.0509
10.50	-0.0693	-0.0674	-0.0655	-0.0637	-0.0619	-0.0602	-0.0584	-0.0567	-0.0550	-0.0533	-0.0517
12.00	-0.0708	-0.0689	-0.0670	-0.0652	-0.0633	-0.0615	-0.0598	-0.0580	-0.0563	-0.0545	-0.0528
13.50	-0.0677	-0.0659	-0.0641	-0.0623	-0.0605	-0.0588	-0.0571	-0.0554	-0.0538	-0.0521	-0.0505
15.00	-0.0505	-0.0491	-0.0478	-0.0464	-0.0451	-0.0438	-0.0426	-0.0413	-0.0401	-0.0389	-0.0377

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	0.0815	0.0803	0.0792	0.0782	0.0771	0.0761	0.0751	0.0742	0.0733	0.0724	0.0715
1.50	0.0850	0.0838	0.0827	0.0816	0.0805	0.0794	0.0784	0.0774	0.0764	0.0755	0.0746
3.00	0.1006	0.0992	0.0979	0.0965	0.0953	0.0940	0.0928	0.0916	0.0905	0.0894	0.0883
4.50	0.1600	0.1578	0.1557	0.1536	0.1516	0.1496	0.1477	0.1458	0.1440	0.1422	0.1405
6.00	0.1847	0.1822	0.1797	0.1773	0.1750	0.1727	0.1705	0.1683	0.1662	0.1642	0.1622
7.50	0.1922	0.1896	0.1870	0.1845	0.1821	0.1797	0.1774	0.1751	0.1730	0.1708	0.1688
9.00	0.1951	0.1924	0.1898	0.1873	0.1848	0.1824	0.1801	0.1778	0.1756	0.1734	0.1713
10.50	0.1979	0.1952	0.1926	0.1900	0.1875	0.1851	0.1827	0.1804	0.1781	0.1759	0.1738
12.00	0.2024	0.1996	0.1969	0.1943	0.1917	0.1892	0.1868	0.1845	0.1822	0.1799	0.1777
13.50	0.1935	0.1909	0.1883	0.1858	0.1833	0.1809	0.1786	0.1763	0.1741	0.1720	0.1699
15.00	0.1444	0.1424	0.1405	0.1386	0.1368	0.1350	0.1333	0.1316	0.1300	0.1284	0.1268

Tabela XI (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 9.700 (CM) OUTER RADIOUS= 10.700 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.21 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.6186E+05 0.3738E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1607E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.1100E-15(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.3852E-16(KG/CM**2) --

STRESS DISTRIBUTION OF THE MAGNET (E-M FORCE)

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	0.0790	0.0787	0.0785	0.0782	0.0779	0.0777	0.0774	0.0772	0.0769	0.0767	0.0765
1.50	0.0824	0.0821	0.0818	0.0816	0.0813	0.0810	0.0808	0.0805	0.0803	0.0800	0.0798
3.00	0.0976	0.0972	0.0969	0.0965	0.0962	0.0959	0.0956	0.0953	0.0950	0.0947	0.0945
4.50	0.1552	0.1547	0.1541	0.1536	0.1531	0.1526	0.1521	0.1517	0.1512	0.1508	0.1504
6.00	0.1792	0.1786	0.1779	0.1773	0.1767	0.1762	0.1756	0.1751	0.1746	0.1741	0.1736
7.50	0.1864	0.1858	0.1851	0.1845	0.1839	0.1833	0.1827	0.1822	0.1816	0.1811	0.1806
9.00	0.1892	0.1886	0.1879	0.1873	0.1867	0.1860	0.1855	0.1849	0.1843	0.1838	0.1833
10.50	0.1920	0.1913	0.1907	0.1900	0.1894	0.1888	0.1882	0.1876	0.1870	0.1865	0.1860
12.00	0.1963	0.1956	0.1950	0.1943	0.1937	0.1930	0.1924	0.1918	0.1913	0.1907	0.1902
13.50	0.1877	0.1870	0.1864	0.1858	0.1851	0.1845	0.1840	0.1834	0.1829	0.1823	0.1818
15.00	0.1401	0.1396	0.1391	0.1386	0.1382	0.1377	0.1373	0.1369	0.1365	0.1361	0.1357

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	0.00	0.82	2.04	3.67	5.71	8.16	11.03	14.31	18.02	22.16	26.72
1.50	0.00	0.93	2.27	4.01	6.16	8.72	11.71	15.11	18.94	23.19	27.88
3.00	0.00	1.50	3.38	5.66	8.34	11.41	14.90	18.80	23.11	27.85	33.01
4.50	0.00	5.06	10.12	15.21	20.34	25.52	30.76	36.07	41.46	46.95	52.53
6.00	0.00	6.10	12.14	18.16	24.17	30.17	36.19	42.23	48.31	54.45	60.64
7.50	0.00	6.35	12.65	18.92	25.17	31.41	37.67	43.96	50.28	56.65	63.09
9.00	0.00	6.48	12.89	19.27	25.62	31.97	38.32	44.69	51.09	57.54	64.04
10.50	0.00	6.61	13.16	19.65	26.11	32.55	38.99	45.44	51.91	58.42	64.98
12.00	0.00	6.74	13.41	20.04	26.63	33.22	39.80	46.40	53.04	59.71	66.44
13.50	0.00	6.54	13.00	19.39	25.73	32.03	38.32	44.60	50.88	57.19	63.52
15.00	0.00	4.96	9.84	14.65	19.41	24.13	28.81	33.47	38.11	42.75	47.40

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	770.68	760.37	750.47	740.97	731.88	723.18	714.89	706.98	699.48	692.36	685.64
1.50	804.02	793.29	782.99	773.10	763.62	754.55	745.90	737.65	729.80	722.36	715.32
3.00	951.73	939.17	927.09	915.47	904.31	893.60	883.35	873.55	864.20	855.29	846.83
4.50	1514.21	1495.19	1476.74	1458.84	1441.47	1424.63	1408.31	1392.48	1377.15	1362.30	1347.93
6.00	1747.85	1725.99	1704.76	1684.16	1664.15	1644.73	1625.88	1607.60	1589.86	1572.65	1555.97
7.50	1818.42	1795.68	1773.60	1752.16	1731.35	1711.15	1691.54	1672.51	1654.05	1636.15	1618.79
9.00	1845.83	1822.75	1800.35	1778.60	1757.47	1736.97	1717.07	1697.75	1679.01	1660.83	1643.20
10.50	1872.88	1849.48	1826.76	1804.70	1783.27	1762.47	1742.28	1722.67	1703.65	1685.19	1667.29
12.00	1915.05	1891.12	1867.88	1845.32	1823.41	1802.13	1781.48	1761.44	1742.00	1723.13	1704.83
13.50	1830.87	1808.03	1785.84	1764.29	1743.35	1723.02	1703.28	1684.11	1665.50	1647.44	1629.91
15.00	1366.28	1349.27	1332.73	1316.67	1301.06	1285.89	1271.16	1256.85	1242.95	1229.45	1216.34

Tabela XI (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 9.700 (CM) OUTER RADIOUS= 10.700 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.21 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.6186E+05 0.3738E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1607E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.1100E-15(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.3852E-16(KG/CM**2) --

TOTAL OF THE MAGNET STRESS AND STRAIN DISTRIBUTION --WINDING,COOL DOWN,E-M FORCE--

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	-0.2679	-0.2676	-0.2678	-0.2683	-0.2692	-0.2703	-0.2715	-0.2730	-0.2746	-0.2763	-0.2781
1.50	-0.2645	-0.2642	-0.2644	-0.2649	-0.2658	-0.2669	-0.2682	-0.2697	-0.2712	-0.2730	-0.2748
3.00	-0.2494	-0.2491	-0.2493	-0.2499	-0.2509	-0.2520	-0.2534	-0.2549	-0.2565	-0.2583	-0.2601
4.50	-0.1917	-0.1916	-0.1921	-0.1929	-0.1940	-0.1953	-0.1968	-0.1985	-0.2003	-0.2022	-0.2042
6.00	-0.1677	-0.1678	-0.1683	-0.1692	-0.1703	-0.1717	-0.1733	-0.1751	-0.1769	-0.1789	-0.1810
7.50	-0.1605	-0.1606	-0.1611	-0.1620	-0.1632	-0.1646	-0.1662	-0.1680	-0.1699	-0.1719	-0.1740
9.00	-0.1577	-0.1578	-0.1583	-0.1592	-0.1604	-0.1619	-0.1635	-0.1653	-0.1672	-0.1692	-0.1713
10.50	-0.1549	-0.1550	-0.1556	-0.1565	-0.1577	-0.1591	-0.1608	-0.1625	-0.1645	-0.1665	-0.1686
12.00	-0.1506	-0.1507	-0.1513	-0.1522	-0.1534	-0.1549	-0.1565	-0.1583	-0.1602	-0.1623	-0.1644
13.50	-0.1592	-0.1593	-0.1598	-0.1607	-0.1619	-0.1634	-0.1650	-0.1668	-0.1686	-0.1707	-0.1728
15.00	-0.2069	-0.2068	-0.2071	-0.2079	-0.2089	-0.2102	-0.2117	-0.2133	-0.2150	-0.2169	-0.2189

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	-15.48	-14.27	-12.29	-9.59	-6.21	-2.19	2.44	7.67	13.47	19.82	26.72
1.50	-15.48	-14.16	-12.07	-9.25	-5.76	-1.63	3.12	8.46	14.38	20.86	27.88
3.00	-15.48	-13.59	-10.95	-7.60	-3.59	1.06	6.31	12.15	18.55	25.51	33.01
4.50	-15.48	-10.04	-4.21	1.95	8.42	15.17	22.17	29.42	36.90	44.61	52.53
6.00	-15.48	-9.00	-2.19	4.90	12.24	19.82	27.60	35.58	43.75	52.11	60.64
7.50	-15.48	-8.74	-1.69	5.65	13.24	21.06	29.08	37.31	45.72	54.31	63.09
9.00	-15.48	-8.62	-1.44	6.01	13.70	21.61	29.73	38.04	46.53	55.20	64.04
10.50	-15.48	-8.48	-1.18	6.39	14.18	22.19	30.40	38.79	47.35	56.08	64.98
12.00	-15.48	-8.36	-0.93	6.77	14.71	22.86	31.21	39.76	48.48	57.38	66.44
13.50	-15.48	-8.55	-1.34	6.12	13.80	21.68	29.73	37.95	46.32	54.85	63.52
15.00	-15.48	-10.13	-4.49	1.39	7.49	13.77	20.22	26.82	33.55	40.42	47.40

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	772.24	802.52	827.69	849.03	867.39	883.41	897.56	910.18	921.57	931.93	941.46
1.50	805.58	835.45	860.21	881.15	899.13	914.78	928.57	940.84	951.89	961.93	971.14
3.00	953.29	981.32	1004.31	1023.52	1039.82	1053.83	1066.02	1076.75	1086.29	1094.86	1102.64
4.50	1515.77	1537.34	1553.96	1566.89	1576.98	1584.86	1590.98	1595.68	1599.24	1601.87	1603.74
6.00	1749.41	1768.14	1781.99	1792.21	1799.66	1804.96	1808.56	1810.79	1811.95	1812.22	1811.78
7.50	1819.98	1837.83	1850.82	1860.21	1866.86	1871.37	1874.21	1875.71	1876.14	1875.72	1874.61
9.00	1847.39	1864.91	1877.57	1886.65	1892.98	1897.20	1899.74	1900.95	1901.10	1900.40	1899.01
10.50	1874.44	1891.64	1903.99	1912.75	1918.78	1922.70	1924.95	1925.87	1925.74	1924.76	1923.11
12.00	1916.62	1933.28	1945.11	1953.37	1958.92	1962.36	1964.16	1964.64	1964.09	1962.70	1960.65
13.50	1832.44	1850.18	1863.06	1872.34	1878.86	1883.25	1885.95	1887.31	1887.59	1887.01	1885.73
15.00	1367.85	1391.42	1409.96	1424.72	1436.57	1446.12	1453.83	1460.04	1465.23	1469.41	1472.75

Tabela XI (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 9.700 (CM) OUTER RADIOUS= 10.700 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.21 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.6186E+05 0.3738E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1607E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.1100E-15(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.3852E-16(KG/CM**2) --

TOTAL OF THE MAGNET STRESS AND STRAIN DISTRIBUTION --WINDING,COOL DOWN,E-M FORCE--

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	-0.0310	-0.0319	-0.0325	-0.0329	-0.0330	-0.0330	-0.0328	-0.0325	-0.0320	-0.0314	-0.0307
1.50	-0.0322	-0.0331	-0.0337	-0.0340	-0.0342	-0.0341	-0.0339	-0.0335	-0.0330	-0.0324	-0.0316
3.00	-0.0377	-0.0384	-0.0388	-0.0390	-0.0390	-0.0388	-0.0385	-0.0380	-0.0373	-0.0366	-0.0357
4.50	-0.0585	-0.0584	-0.0581	-0.0577	-0.0570	-0.0563	-0.0554	-0.0545	-0.0535	-0.0524	-0.0512
6.00	-0.0671	-0.0668	-0.0663	-0.0655	-0.0647	-0.0637	-0.0626	-0.0615	-0.0603	-0.0590	-0.0577
7.50	-0.0697	-0.0693	-0.0687	-0.0679	-0.0670	-0.0660	-0.0648	-0.0636	-0.0623	-0.0610	-0.0596
9.00	-0.0707	-0.0703	-0.0697	-0.0689	-0.0679	-0.0668	-0.0657	-0.0645	-0.0631	-0.0618	-0.0604
10.50	-0.0717	-0.0713	-0.0706	-0.0698	-0.0688	-0.0677	-0.0665	-0.0653	-0.0639	-0.0625	-0.0611
12.00	-0.0733	-0.0728	-0.0721	-0.0712	-0.0702	-0.0691	-0.0678	-0.0665	-0.0652	-0.0638	-0.0623
13.50	-0.0702	-0.0698	-0.0691	-0.0683	-0.0674	-0.0663	-0.0652	-0.0640	-0.0627	-0.0613	-0.0600
15.00	-0.0530	-0.0530	-0.0529	-0.0525	-0.0520	-0.0514	-0.0507	-0.0499	-0.0490	-0.0481	-0.0471

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	9.70	9.80	9.90	10.00	10.10	10.20	10.30	10.40	10.50	10.60	10.70
0.00	0.0822	0.0853	0.0879	0.0901	0.0919	0.0935	0.0948	0.0959	0.0969	0.0978	0.0985
1.50	0.0857	0.0888	0.0914	0.0935	0.0952	0.0967	0.0980	0.0991	0.1001	0.1009	0.1016
3.00	0.1013	0.1042	0.1066	0.1085	0.1100	0.1113	0.1124	0.1134	0.1141	0.1148	0.1153
4.50	0.1608	0.1629	0.1644	0.1655	0.1664	0.1669	0.1673	0.1676	0.1677	0.1677	0.1676
6.00	0.1855	0.1872	0.1884	0.1892	0.1898	0.1900	0.1901	0.1901	0.1899	0.1896	0.1892
7.50	0.1929	0.1946	0.1957	0.1964	0.1968	0.1970	0.1970	0.1969	0.1966	0.1962	0.1958
9.00	0.1958	0.1974	0.1985	0.1992	0.1996	0.1997	0.1997	0.1995	0.1992	0.1988	0.1983
10.50	0.1987	0.2002	0.2013	0.2019	0.2023	0.2024	0.2023	0.2021	0.2018	0.2014	0.2009
12.00	0.2031	0.2046	0.2056	0.2062	0.2065	0.2066	0.2064	0.2062	0.2058	0.2053	0.2048
13.50	0.1942	0.1959	0.1970	0.1977	0.1981	0.1982	0.1982	0.1981	0.1978	0.1974	0.1970
15.00	0.1451	0.1474	0.1492	0.1505	0.1516	0.1523	0.1529	0.1533	0.1536	0.1538	0.1538

Tabela XII - Resultados dos Cálculos de Tensões/Deformações para Enrolamento NbTi (0,65mm)

MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION OF TOTAL COIL

INNER RADIOUS= 10.700 (CM) OUTER RADIOUS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

RADIOUS FIELD HR (G/A)

Z(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.50	-32.13	-32.51	-32.77	-32.92	-32.95	-32.85	-32.63	-32.30	-31.85	-31.30	-30.64
3.00	-79.98	-82.52	-84.54	-85.94	-86.65	-86.63	-85.88	-84.42	-82.29	-79.60	-76.45
4.50	-101.00	-107.17	-112.27	-115.96	-118.06	-118.49	-117.24	-114.35	-109.91	-104.13	-97.40
6.00	-25.13	-26.12	-26.92	-27.52	-27.90	-28.07	-28.02	-27.76	-27.29	-26.64	-25.82
7.50	24.82	24.04	23.31	22.64	22.04	21.49	21.01	20.58	20.22	19.91	19.66
9.00	68.59	67.41	66.25	65.11	64.01	62.93	61.88	60.86	59.86	58.89	57.95
10.50	111.94	110.09	108.28	106.50	104.75	103.03	101.33	99.66	98.01	96.37	94.76
12.00	155.20	153.19	151.16	149.11	147.01	144.88	142.70	140.49	138.23	135.92	133.59
13.50	209.27	208.33	207.01	205.30	203.20	200.71	197.85	194.64	191.11	187.30	183.26
15.00	323.54	332.76	336.69	337.66	336.22	332.54	326.58	318.12	306.85	292.65	268.56

AXIAL FIELD HZ (G/A)

Z(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	41.53	39.22	35.01	32.54	30.36	28.08	25.67	23.17	20.63	18.09	15.57
1.50	45.79	42.92	38.11	35.03	32.21	29.30	26.26	23.13	19.99	16.87	13.81
3.00	67.16	61.53	53.56	46.99	40.45	33.71	26.84	20.03	13.45	7.24	1.50
4.50	194.60	162.58	133.72	104.03	74.51	45.09	15.45	-14.54	-44.22	-70.79	-104.20
6.00	233.10	196.58	161.96	125.56	88.71	51.86	14.40	-22.94	-59.34	-91.65	-129.55
7.50	242.82	205.21	169.40	131.75	93.59	55.21	16.61	-22.04	-59.71	-93.24	-132.28
9.00	247.44	209.63	173.60	135.69	97.25	58.58	19.68	-19.27	-57.26	-91.10	-130.44
10.50	252.41	214.61	178.59	140.69	102.27	63.61	24.72	-14.23	-52.21	-86.04	-125.37
12.00	257.28	219.62	183.83	146.23	108.16	69.89	31.42	-7.09	-44.63	-78.02	-116.92
13.50	249.27	214.01	180.72	145.68	110.19	74.47	38.48	2.33	-32.99	-64.37	-101.46
15.00	188.67	167.47	147.22	126.09	104.76	83.37	61.92	43.50	19.61	0.66	-20.59

Tabela XII (Continuação)

MECHANICAL PROPERTIES OF THE INPUT DATA N= 1

YOUNG MODULUS

--SUPERCONDUCTOR ES= 0.1000E+12 STABILIZER EC= 0.1300E+12 INSULATER OR RAINFORCER EI= 0.2940E+11 (N/

VOLUME FRACTION

--SUPERCONDUCTOR VS= 0.4090E+00 STABILIZER VC= 0.3030E+00 ISULATER OR RAINFORCER VI=, 0.2880E+00 --

THERMAL EXPANSION FROM 300K TO 4.2K

--SUPERCONDUCTOR AS= -0.3380E-02 STABILIZER AC= -0.3380E-02 INSULATER OR RAINFORCER AI= -0.2700E-02 --

FRAME YOUNG MODULUS

--INNER FRAME BI= 0.1300E+12 OUTER FRAME BO= 0.1960E+12 (N/M**2)--
--FRAME THICKNESS TI= 0.5000E+00 FRAME THICKNESS TO= 0.2000E+00 (CM)--

RAINFORCED FRAME YOUNG MODULUS

--INNER FRAME BI= 0.6075E+10 OUTER FRAME BO= 0.3267E+10 (N/M**2)--

YOUNG MODULUS TOTAL

--HOOP DERECTION ES= 0.8876E+11 RADIUS DEFECTION ER= 0.6166E+11 (N/M**2)--

THERMAL EXPANSION TOTAL

--HOOP DERECTION AS= -0.3315E-02 RADIUS DEFECTION AR= -0.3184E-02 --

Tabela XII (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 10.700 (CM) OUTER RADIOUS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY F= 1.20 WINDING FRAME YOUNG MODULUS ET,EO= 0.6199E+05 0.3333E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1655E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.1150E-15(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.4024E-16(KG/CM**2)

MAGNET WINDING PROCEDURE WINDING TENSION SW= 250.00 0.00 (KG/CM**2)

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	-0.0302	-0.0253	-0.0211	-0.0175	-0.0142	-0.0113	-0.0087	-0.0063	-0.0040	-0.0019	0.0000
1.50	-0.0302	-0.0253	-0.0211	-0.0175	-0.0142	-0.0113	-0.0087	-0.0063	-0.0040	-0.0019	0.0000
3.00	-0.0302	-0.0253	-0.0211	-0.0175	-0.0142	-0.0113	-0.0087	-0.0063	-0.0040	-0.0019	0.0000
4.50	-0.0302	-0.0253	-0.0211	-0.0175	-0.0142	-0.0113	-0.0087	-0.0063	-0.0040	-0.0019	0.0000
6.00	-0.0302	-0.0253	-0.0211	-0.0175	-0.0142	-0.0113	-0.0087	-0.0063	-0.0040	-0.0019	0.0000
7.50	-0.0302	-0.0253	-0.0211	-0.0175	-0.0142	-0.0113	-0.0087	-0.0063	-0.0040	-0.0019	0.0000
9.00	-0.0302	-0.0253	-0.0211	-0.0175	-0.0142	-0.0113	-0.0087	-0.0063	-0.0040	-0.0019	0.0000
10.50	-0.0302	-0.0253	-0.0211	-0.0175	-0.0142	-0.0113	-0.0087	-0.0063	-0.0040	-0.0019	0.0000
12.00	-0.0302	-0.0253	-0.0211	-0.0175	-0.0142	-0.0113	-0.0087	-0.0063	-0.0040	-0.0019	0.0000
13.50	-0.0302	-0.0253	-0.0211	-0.0175	-0.0142	-0.0113	-0.0087	-0.0063	-0.0040	-0.0019	0.0000
15.00	-0.0302	-0.0253	-0.0211	-0.0175	-0.0142	-0.0113	-0.0087	-0.0063	-0.0040	-0.0019	0.0000

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	-17.49	-17.15	-16.34	-15.13	-13.61	-11.81	-9.79	-7.57	-5.18	-2.65	0.00
1.50	-17.49	-17.15	-16.34	-15.13	-13.61	-11.81	-9.79	-7.57	-5.18	-2.65	0.00
3.00	-17.49	-17.15	-16.34	-15.13	-13.61	-11.81	-9.79	-7.57	-5.18	-2.65	0.00
4.50	-17.49	-17.15	-16.34	-15.13	-13.61	-11.81	-9.79	-7.57	-5.18	-2.65	0.00
6.00	-17.49	-17.15	-16.34	-15.13	-13.61	-11.81	-9.79	-7.57	-5.18	-2.65	0.00
7.50	-17.49	-17.15	-16.34	-15.13	-13.61	-11.81	-9.79	-7.57	-5.18	-2.65	0.00
9.00	-17.49	-17.15	-16.34	-15.13	-13.61	-11.81	-9.79	-7.57	-5.18	-2.65	0.00
10.50	-17.49	-17.15	-16.34	-15.13	-13.61	-11.81	-9.79	-7.57	-5.18	-2.65	0.00
12.00	-17.49	-17.15	-16.34	-15.13	-13.61	-11.81	-9.79	-7.57	-5.18	-2.65	0.00
13.50	-17.49	-17.15	-16.34	-15.13	-13.61	-11.81	-9.79	-7.57	-5.18	-2.65	0.00
15.00	-17.49	-17.15	-16.34	-15.13	-13.61	-11.81	-9.79	-7.57	-5.18	-2.65	0.00

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	-11.72	32.40	69.75	102.01	130.33	155.49	178.08	198.52	217.16	234.25	250.00
1.50	-11.72	32.40	69.75	102.01	130.33	155.49	178.08	198.52	217.16	234.25	250.00
3.00	-11.72	32.40	69.75	102.01	130.33	155.49	178.08	198.52	217.16	234.25	250.00
4.50	-11.72	32.40	69.75	102.01	130.33	155.49	178.08	198.52	217.16	234.25	250.00
6.00	-11.72	32.40	69.75	102.01	130.33	155.49	178.08	198.52	217.16	234.25	250.00
7.50	-11.72	32.40	69.75	102.01	130.33	155.49	178.08	198.52	217.16	234.25	250.00
9.00	-11.72	32.40	69.75	102.01	130.33	155.49	178.08	198.52	217.16	234.25	250.00
10.50	-11.72	32.40	69.75	102.01	130.33	155.49	178.08	198.52	217.16	234.25	250.00
12.00	-11.72	32.40	69.75	102.01	130.33	155.49	178.08	198.52	217.16	234.25	250.00
13.50	-11.72	32.40	69.75	102.01	130.33	155.49	178.08	198.52	217.16	234.25	250.00
15.00	-11.72	32.40	69.75	102.01	130.33	155.49	178.08	198.52	217.16	234.25	250.00

Tabela XII (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL .

INNER RADIOUS= 10.700 (CM) OUTER RADIOUS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.20 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.6199E+05 0.3333E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1655E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.1150E-15(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.4024E-16(KG/CM**2) --

MAGNET WINDING PROCEDURE WINDING TENSION SW= 250.00 0.00 (KG/CM**2)

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	-0.0023	-0.0040	-0.0053	-0.0063	-0.0072	-0.0079	-0.0084	-0.0089	-0.0092	-0.0095	-0.0097
1.50	-0.0023	-0.0040	-0.0053	-0.0063	-0.0072	-0.0079	-0.0084	-0.0089	-0.0092	-0.0095	-0.0097
3.00	-0.0023	-0.0040	-0.0053	-0.0063	-0.0072	-0.0079	-0.0084	-0.0089	-0.0092	-0.0095	-0.0097
4.50	-0.0023	-0.0040	-0.0053	-0.0063	-0.0072	-0.0079	-0.0084	-0.0089	-0.0092	-0.0095	-0.0097
6.00	-0.0023	-0.0040	-0.0053	-0.0063	-0.0072	-0.0079	-0.0084	-0.0089	-0.0092	-0.0095	-0.0097
7.50	-0.0023	-0.0040	-0.0053	-0.0063	-0.0072	-0.0079	-0.0084	-0.0089	-0.0092	-0.0095	-0.0097
9.00	-0.0023	-0.0040	-0.0053	-0.0063	-0.0072	-0.0079	-0.0084	-0.0089	-0.0092	-0.0095	-0.0097
10.50	-0.0023	-0.0040	-0.0053	-0.0063	-0.0072	-0.0079	-0.0084	-0.0089	-0.0092	-0.0095	-0.0097
12.00	-0.0023	-0.0040	-0.0053	-0.0063	-0.0072	-0.0079	-0.0084	-0.0089	-0.0092	-0.0095	-0.0097
13.50	-0.0023	-0.0040	-0.0053	-0.0063	-0.0072	-0.0079	-0.0084	-0.0089	-0.0092	-0.0095	-0.0097
15.00	-0.0023	-0.0040	-0.0053	-0.0063	-0.0072	-0.0079	-0.0084	-0.0089	-0.0092	-0.0095	-0.0097

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	-0.0006	0.0042	0.0083	0.0118	0.0149	0.0176	0.0200	0.0222	0.0242	0.0260	0.0276
1.50	-0.0006	0.0042	0.0083	0.0118	0.0149	0.0176	0.0200	0.0222	0.0242	0.0260	0.0276
3.00	-0.0006	0.0042	0.0083	0.0118	0.0149	0.0176	0.0200	0.0222	0.0242	0.0260	0.0276
4.50	-0.0006	0.0042	0.0083	0.0118	0.0149	0.0176	0.0200	0.0222	0.0242	0.0260	0.0276
6.00	-0.0006	0.0042	0.0083	0.0118	0.0149	0.0176	0.0200	0.0222	0.0242	0.0260	0.0276
7.50	-0.0006	0.0042	0.0083	0.0118	0.0149	0.0176	0.0200	0.0222	0.0242	0.0260	0.0276
9.00	-0.0006	0.0042	0.0083	0.0118	0.0149	0.0176	0.0200	0.0222	0.0242	0.0260	0.0276
10.50	-0.0006	0.0042	0.0083	0.0118	0.0149	0.0176	0.0200	0.0222	0.0242	0.0260	0.0276
12.00	-0.0006	0.0042	0.0083	0.0118	0.0149	0.0176	0.0200	0.0222	0.0242	0.0260	0.0276
13.50	-0.0006	0.0042	0.0083	0.0118	0.0149	0.0176	0.0200	0.0222	0.0242	0.0260	0.0276
15.00	-0.0006	0.0042	0.0083	0.0118	0.0149	0.0176	0.0200	0.0222	0.0242	0.0260	0.0276

Tabela XII (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 10.700 (CM) OUTER RADIOUS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.20 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.6199E+05 0.3333E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1655E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.1150E-15(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.4024E-16(KG/CM**2) --

MAGNET COOLING PROCEDURE--COOL DOWN FROM 300K TO 4.2K--

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	-0.3556	-0.3597	-0.3638	-0.3680	-0.3721	-0.3762	-0.3804	-0.3845	-0.3887	-0.3928	-0.3969
1.50	-0.3556	-0.3597	-0.3638	-0.3680	-0.3721	-0.3762	-0.3804	-0.3845	-0.3887	-0.3928	-0.3969
3.00	-0.3556	-0.3597	-0.3638	-0.3680	-0.3721	-0.3762	-0.3804	-0.3845	-0.3887	-0.3928	-0.3969
4.50	-0.3556	-0.3597	-0.3638	-0.3680	-0.3721	-0.3762	-0.3804	-0.3845	-0.3887	-0.3928	-0.3969
6.00	-0.3556	-0.3597	-0.3638	-0.3680	-0.3721	-0.3762	-0.3804	-0.3845	-0.3887	-0.3928	-0.3969
7.50	-0.3556	-0.3597	-0.3638	-0.3680	-0.3721	-0.3762	-0.3804	-0.3845	-0.3887	-0.3928	-0.3969
9.00	-0.3556	-0.3597	-0.3638	-0.3680	-0.3721	-0.3762	-0.3804	-0.3845	-0.3887	-0.3928	-0.3969
10.50	-0.3556	-0.3597	-0.3638	-0.3680	-0.3721	-0.3762	-0.3804	-0.3845	-0.3887	-0.3928	-0.3969
12.00	-0.3556	-0.3597	-0.3638	-0.3680	-0.3721	-0.3762	-0.3804	-0.3845	-0.3887	-0.3928	-0.3969
13.50	-0.3556	-0.3597	-0.3638	-0.3680	-0.3721	-0.3762	-0.3804	-0.3845	-0.3887	-0.3928	-0.3969
15.00	-0.3556	-0.3597	-0.3638	-0.3680	-0.3721	-0.3762	-0.3804	-0.3845	-0.3887	-0.3928	-0.3969

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	0.00	-0.08	-0.13	-0.17	-0.19	-0.19	-0.18	-0.16	-0.12	-0.07	0.00
1.50	0.00	-0.08	-0.13	-0.17	-0.19	-0.19	-0.18	-0.16	-0.12	-0.07	0.00
3.00	0.00	-0.08	-0.13	-0.17	-0.19	-0.19	-0.18	-0.16	-0.12	-0.07	0.00
4.50	0.00	-0.08	-0.13	-0.17	-0.19	-0.19	-0.18	-0.16	-0.12	-0.07	0.00
6.00	0.00	-0.08	-0.13	-0.17	-0.19	-0.19	-0.18	-0.16	-0.12	-0.07	0.00
7.50	0.00	-0.08	-0.13	-0.17	-0.19	-0.19	-0.18	-0.16	-0.12	-0.07	0.00
9.00	0.00	-0.08	-0.13	-0.17	-0.19	-0.19	-0.18	-0.16	-0.12	-0.07	0.00
10.50	0.00	-0.08	-0.13	-0.17	-0.19	-0.19	-0.18	-0.16	-0.12	-0.07	0.00
12.00	0.00	-0.08	-0.13	-0.17	-0.19	-0.19	-0.18	-0.16	-0.12	-0.07	0.00
13.50	0.00	-0.08	-0.13	-0.17	-0.19	-0.19	-0.18	-0.16	-0.12	-0.07	0.00
15.00	0.00	-0.08	-0.13	-0.17	-0.19	-0.19	-0.18	-0.16	-0.12	-0.07	0.00

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	-7.06	-5.55	-4.08	-2.64	-1.24	0.13	1.47	2.78	4.06	5.31	6.54
1.50	-7.06	-5.55	-4.08	-2.64	-1.24	0.13	1.47	2.78	4.06	5.31	6.54
3.00	-7.06	-5.55	-4.08	-2.64	-1.24	0.13	1.47	2.78	4.06	5.31	6.54
4.50	-7.06	-5.55	-4.08	-2.64	-1.24	0.13	1.47	2.78	4.06	5.31	6.54
6.00	-7.06	-5.55	-4.08	-2.64	-1.24	0.13	1.47	2.78	4.06	5.31	6.54
7.50	-7.06	-5.55	-4.08	-2.64	-1.24	0.13	1.47	2.78	4.06	5.31	6.54
9.00	-7.06	-5.55	-4.08	-2.64	-1.24	0.13	1.47	2.78	4.06	5.31	6.54
10.50	-7.06	-5.55	-4.08	-2.64	-1.24	0.13	1.47	2.78	4.06	5.31	6.54
12.00	-7.06	-5.55	-4.08	-2.64	-1.24	0.13	1.47	2.78	4.06	5.31	6.54
13.50	-7.06	-5.55	-4.08	-2.64	-1.24	0.13	1.47	2.78	4.06	5.31	6.54
15.00	-7.06	-5.55	-4.08	-2.64	-1.24	0.13	1.47	2.78	4.06	5.31	6.54

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 10.700 (CM) OUTER RADIOUS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.20 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.6199E+05 0.3333E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPEPCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1655E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.1150E-15(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.4024E-16(KG/CM**2) --

MAGNET COOLING PROCEDURE--COOL DOWN FROM 300K TO 4.2K--

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0003
1.50	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0003
3.00	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0003
4.50	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0003
6.00	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0003
7.50	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0003
9.00	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0003
10.50	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0003
12.00	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0003
13.50	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0003
15.00	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0003

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	-0.0008	-0.0006	-0.0004	-0.0003	-0.0001	0.0000	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006	0.0007
1.50	-0.0008	-0.0006	-0.0004	-0.0003	-0.0001	0.0000	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006	0.0007
3.00	-0.0008	-0.0006	-0.0004	-0.0003	-0.0001	0.0000	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006	0.0007
4.50	-0.0008	-0.0006	-0.0004	-0.0003	-0.0001	0.0000	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006	0.0007
6.00	-0.0008	-0.0006	-0.0004	-0.0003	-0.0001	0.0000	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006	0.0007
7.50	-0.0008	-0.0006	-0.0004	-0.0003	-0.0001	0.0000	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006	0.0007
9.00	-0.0008	-0.0006	-0.0004	-0.0003	-0.0001	0.0000	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006	0.0007
10.50	-0.0008	-0.0006	-0.0004	-0.0003	-0.0001	0.0000	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006	0.0007
12.00	-0.0008	-0.0006	-0.0004	-0.0003	-0.0001	0.0000	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006	0.0007
13.50	-0.0008	-0.0006	-0.0004	-0.0003	-0.0001	0.0000	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006	0.0007
15.00	-0.0008	-0.0006	-0.0004	-0.0003	-0.0001	0.0000	0.0002	0.0003	0.0005	0.0006	0.0007

Tabela XII (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 10.700 (CM) OUTER RADIOUS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.20 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.6199E+05 0.3333E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR, INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1655E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.1150E-15(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.4024E-16(KG/CM**2)

STRESS DISTRIBUTION OF THE MAGNET (E-M FORCE)

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	0.0392	0.0390	0.0389	0.0387	0.0386	0.0384	0.0383	0.0381	0.0380	0.0379	0.0377
1.50	0.0409	0.0407	0.0405	0.0404	0.0402	0.0401	0.0399	0.0398	0.0396	0.0395	0.0393
3.00	0.0469	0.0467	0.0465	0.0463	0.0461	0.0459	0.0457	0.0455	0.0454	0.0452	0.0451
4.50	0.0599	0.0597	0.0594	0.0591	0.0589	0.0586	0.0583	0.0580	0.0578	0.0576	0.0574
6.00	0.0685	0.0682	0.0679	0.0676	0.0672	0.0669	0.0666	0.0663	0.0660	0.0658	0.0655
7.50	0.0732	0.0729	0.0726	0.0722	0.0719	0.0715	0.0712	0.0709	0.0706	0.0703	0.0701
9.00	0.0777	0.0773	0.0770	0.0766	0.0762	0.0759	0.0755	0.0752	0.0749	0.0746	0.0743
10.50	0.0846	0.0842	0.0838	0.0835	0.0831	0.0827	0.0823	0.0819	0.0816	0.0813	0.0810
12.00	0.0938	0.0934	0.0930	0.0926	0.0921	0.0917	0.0913	0.0909	0.0906	0.0902	0.0899
13.50	0.0992	0.0987	0.0983	0.0978	0.0974	0.0970	0.0966	0.0961	0.0958	0.0954	0.0951
15.00	0.1143	0.1138	0.1133	0.1129	0.1124	0.1119	0.1115	0.1110	0.1106	0.1102	0.1099

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	0.00	0.52	1.15	1.90	2.75	3.73	4.83	6.05	7.39	8.87	10.48
1.50	0.00	0.35	0.86	1.53	2.36	3.36	4.53	5.86	7.37	9.06	10.93
3.00	-0.01	-0.73	-1.02	-0.87	-0.28	0.74	2.21	4.12	6.47	9.27	12.51
4.50	-0.03	-9.32	-16.15	-20.55	-22.52	-22.08	-19.24	-14.01	-6.40	3.57	15.91
6.00	-0.03	-11.47	-19.92	-25.39	-27.92	-27.50	-24.16	-17.91	-8.76	3.27	18.18
7.50	-0.03	-11.77	-20.42	-26.01	-28.54	-28.05	-24.53	-18.01	-8.50	3.99	19.44
9.00	-0.02	-11.70	-20.27	-25.77	-28.21	-27.60	-23.97	-17.31	-7.65	5.00	20.63
10.50	-0.02	-11.42	-19.75	-25.02	-27.24	-26.44	-22.63	-15.62	-6.03	6.74	22.48
12.00	-0.02	-10.92	-18.81	-23.70	-25.60	-24.53	-20.50	-13.53	-3.63	9.20	24.95
13.50	-0.02	-9.80	-16.78	-20.99	-22.43	-21.12	-17.07	-10.28	-0.77	11.46	26.39
15.00	-0.02	-3.69	-5.87	-6.56	-5.75	-3.45	0.35	5.64	12.43	20.72	30.50

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	331.84	326.66	321.68	316.89	312.29	307.87	303.64	299.60	295.73	292.04	288.52
1.50	346.03	340.56	335.31	330.27	325.45	320.83	316.42	312.21	308.21	304.41	300.81
3.00	396.63	389.95	383.60	377.58	371.87	366.50	361.44	356.71	352.31	348.24	344.49
4.50	507.42	496.89	485.32	475.74	467.18	459.66	453.22	447.86	443.62	440.50	438.55
6.00	579.82	566.34	554.03	542.90	532.99	524.34	516.98	510.92	506.21	502.86	500.91
7.50	619.80	605.57	592.55	580.76	570.24	561.03	553.16	546.65	541.53	537.83	535.57
9.00	657.35	642.54	628.95	616.62	605.58	595.88	587.52	580.55	575.00	570.88	568.22
10.50	716.01	700.35	685.93	672.80	660.98	650.50	641.40	633.70	627.43	622.61	619.27
12.00	794.10	777.35	761.87	747.69	734.85	723.36	713.27	704.58	697.34	691.56	687.26
13.50	839.27	822.19	806.34	791.75	778.44	766.43	755.76	746.43	738.49	731.94	726.81
15.00	967.56	950.60	934.55	919.42	905.22	891.95	879.63	868.26	857.81		

Tabela XII (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 10.700 (CM) OUTER RADIOUS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.20 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.6199E+05 0.3333E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1655E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.1150E-15(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.4024E-16(KG/CM**2)

STRESS DISTRIBUTION OF THE MAGNET (E-M FORCE)

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	-0.0128	-0.0125	-0.0122	-0.0119	-0.0116	-0.0113	-0.0110	-0.0106	-0.0103	-0.0099	-0.0095
1.50	-0.0134	-0.0131	-0.0128	-0.0125	-0.0122	-0.0119	-0.0115	-0.0111	-0.0107	-0.0103	-0.0099
3.00	-0.0153	-0.0152	-0.0150	-0.0147	-0.0144	-0.0140	-0.0136	-0.0131	-0.0126	-0.0120	-0.0113
4.50	-0.0196	-0.0206	-0.0213	-0.0217	-0.0216	-0.0213	-0.0206	-0.0195	-0.0182	-0.0165	-0.0144
6.00	-0.0224	-0.0237	-0.0246	-0.0250	-0.0250	-0.0246	-0.0238	-0.0226	-0.0210	-0.0189	-0.0165
7.50	-0.0240	-0.0253	-0.0261	-0.0266	-0.0266	-0.0261	-0.0253	-0.0240	-0.0223	-0.0202	-0.0176
9.00	-0.0254	-0.0267	-0.0275	-0.0279	-0.0279	-0.0274	-0.0265	-0.0252	-0.0234	-0.0213	-0.0187
10.50	-0.0277	-0.0289	-0.0296	-0.0300	-0.0299	-0.0293	-0.0284	-0.0270	-0.0252	-0.0230	-0.0204
12.00	-0.0307	-0.0318	-0.0324	-0.0327	-0.0325	-0.0319	-0.0308	-0.0294	-0.0275	-0.0253	-0.0226
13.50	-0.0324	-0.0333	-0.0338	-0.0339	-0.0336	-0.0330	-0.0319	-0.0305	-0.0287	-0.0265	-0.0239
15.00	-0.0374	-0.0373	-0.0370	-0.0366	-0.0359	-0.0350	-0.0339	-0.0327	-0.0312	-0.0295	-0.0276

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	0.0366	0.0360	0.0355	0.0349	0.0344	0.0338	0.0333	0.0328	0.0324	0.0319	0.0315
1.50	0.0382	0.0376	0.0370	0.0364	0.0358	0.0353	0.0348	0.0342	0.0337	0.0333	0.0328
3.00	0.0438	0.0431	0.0424	0.0417	0.0411	0.0404	0.0398	0.0392	0.0387	0.0381	0.0376
4.50	0.0560	0.0551	0.0542	0.0533	0.0525	0.0516	0.0508	0.0500	0.0492	0.0485	0.0478
6.00	0.0640	0.0630	0.0619	0.0609	0.0599	0.0590	0.0580	0.0571	0.0562	0.0554	0.0546
7.50	0.0684	0.0673	0.0662	0.0651	0.0641	0.0630	0.0620	0.0611	0.0601	0.0592	0.0584
9.00	0.0726	0.0714	0.0702	0.0691	0.0680	0.0669	0.0658	0.0648	0.0638	0.0628	0.0619
10.50	0.0791	0.0778	0.0765	0.0753	0.0740	0.0728	0.0717	0.0706	0.0695	0.0685	0.0675
12.00	0.0877	0.0863	0.0848	0.0835	0.0821	0.0808	0.0795	0.0783	0.0771	0.0760	0.0749
13.50	0.0927	0.0912	0.0897	0.0882	0.0868	0.0854	0.0841	0.0828	0.0816	0.0804	0.0792
15.00	0.1068	0.1051	0.1034	0.1018	0.1002	0.0986	0.0971	0.0956	0.0942	0.0929	0.0916

Tabela XII (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 10.700 (CM) OUTER RADIOUS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.20 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.6199E+05 0.3333E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1655E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.1150E-15(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.4024E-16(KG/CM**2) --

TOTAL OF THE MAGNET STRESS AND STRAIN DISTRIBUTION --WINDING,COOL DOWN,E-M FORCE--

DISPLACEMENT U(MM)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	-0.3465	-0.3460	-0.3461	-0.3467	-0.3478	-0.3491	-0.3508	-0.3526	-0.3547	-0.3569	-0.3592
1.50	-0.3449	-0.3443	-0.3444	-0.3451	-0.3461	-0.3475	-0.3492	-0.3510	-0.3531	-0.3553	-0.3576
3.00	-0.3389	-0.3383	-0.3385	-0.3392	-0.3403	-0.3417	-0.3433	-0.3452	-0.3473	-0.3495	-0.3519
4.50	-0.3258	-0.3253	-0.3255	-0.3263	-0.3275	-0.3290	-0.3308	-0.3327	-0.3349	-0.3372	-0.3396
6.00	-0.3172	-0.3168	-0.3171	-0.3179	-0.3191	-0.3207	-0.3225	-0.3245	-0.3267	-0.3290	-0.3314
7.50	-0.3125	-0.3121	-0.3124	-0.3132	-0.3145	-0.3160	-0.3179	-0.3199	-0.3221	-0.3244	-0.3269
9.00	-0.3081	-0.3077	-0.3080	-0.3088	-0.3101	-0.3117	-0.3135	-0.3156	-0.3178	-0.3202	-0.3226
10.50	-0.3012	-0.3008	-0.3011	-0.3020	-0.3033	-0.3049	-0.3068	-0.3088	-0.3111	-0.3135	-0.3159
12.00	-0.2919	-0.2916	-0.2920	-0.2929	-0.2942	-0.2958	-0.2977	-0.2999	-0.3021	-0.3045	-0.3070
13.50	-0.2866	-0.2863	-0.2867	-0.2876	-0.2889	-0.2906	-0.2925	-0.2946	-0.2969	-0.2993	-0.3019
15.00	-0.2714	-0.2712	-0.2716	-0.2726	-0.2739	-0.2756	-0.2776	-0.2797	-0.2821	-0.2845	-0.2871

RADIUS STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	-17.50	-16.71	-15.32	-13.41	-11.05	-8.28	-5.15	-1.68	2.09	6.15	10.48
1.50	-17.50	-16.88	-15.61	-13.77	-11.41	-8.65	-5.45	-1.86	2.07	6.34	10.93
3.00	-17.50	-17.96	-17.49	-16.17	-14.03	-11.27	-7.76	-3.61	1.17	6.55	12.51
4.50	-17.52	-26.54	-32.62	-35.85	-36.32	-34.09	-29.21	-21.74	-11.70	0.86	15.91
6.00	-17.52	-28.70	-36.39	-40.70	-41.72	-39.51	-34.13	-25.64	-14.06	0.55	18.18
7.50	-17.52	-28.99	-36.89	-41.31	-42.34	-40.06	-34.50	-25.74	-13.80	1.27	19.44
9.00	-17.52	-28.93	-36.74	-41.08	-42.01	-39.61	-33.94	-25.04	-12.95	2.28	20.63
10.50	-17.52	-28.65	-36.22	-40.32	-41.04	-38.45	-32.61	-23.55	-11.33	4.03	22.48
12.00	-17.52	-28.15	-35.27	-39.00	-39.40	-36.54	-30.48	-21.26	-8.93	6.49	24.95
13.50	-17.51	-27.02	-33.25	-36.29	-36.23	-33.13	-27.04	-18.01	-6.07	8.74	26.39
15.00	-17.51	-20.92	-22.34	-21.86	-19.55	-15.46	-9.63	-2.09	7.13	18.00	30.50

HOOP STRESS (KG/CM**2)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	313.06	353.52	387.35	416.26	441.33	463.50	483.19	500.90	516.94	531.59	545.06
1.50	327.25	367.42	400.98	429.64	454.53	476.45	495.97	513.51	529.43	543.97	557.34
3.00	377.84	416.81	449.27	476.94	500.95	522.12	540.99	558.02	573.53	587.80	601.03
4.50	488.64	522.74	550.99	575.11	596.27	615.28	632.76	649.16	664.83	680.06	695.08
6.00	561.04	593.20	619.69	642.26	662.03	679.96	696.52	712.22	727.43	742.42	757.44
7.50	601.02	632.43	658.22	680.13	699.33	716.66	732.71	747.95	762.75	777.39	792.11
9.00	638.57	669.39	694.62	715.99	734.67	751.50	767.07	781.86	796.21	810.44	824.76
10.50	697.23	727.20	751.60	772.17	790.05	806.12	820.95	835.00	848.65	862.17	875.81
12.00	775.31	804.20	827.54	847.06	863.93	878.98	892.81	905.88	918.55	931.11	943.80
13.50	820.49	849.05	872.01	891.12	907.52	922.05	935.30	947.73	959.71	971.50	983.35
15.00	948.78	977.46	1000.22	1018.79	1034.31	1047.57	1059.18	1069.56	1079.05	1087.94	1096.43

Tabela XII (Continuação)

MAGNET STRESS STRAIN DISTRIBUTION OF COIL

INNER RADIOUS= 10.700 (CM) OUTER RADIOUS= 12.000 (CM) A HALF OF COIL LENGTH= 15.000 (CM)

INPUT MECHNICAL PROPERTIES

ANISOTROPY K= 1.20 WINDING FRAME YOUNG MODULUS BI,BO= 0.6199E+05 0.3333E+05(KG/CM**2)

YOUNG MODULUS OF THE SUPERCONDUCTOR,INSULATER AND RAINFORCER
-- 1/ES L= 0.1655E-15(KG/CM**2) 1/ER R= 0.1150E-15(KG/CM**2) VRS/ES OR VSR/ER V= 0.4024E-16(KG/CM**2) --

TOTAL OF THE MAGNET STRESS AND STRAIN DISTRIBUTION --WINDING,COOL DOWN,E-M FORCE--

RADIUS STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	-0.0149	-0.0163	-0.0174	-0.0182	-0.0188	-0.0192	-0.0195	-0.0196	-0.0196	-0.0196	-0.0194
1.50	-0.0154	-0.0169	-0.0180	-0.0188	-0.0194	-0.0198	-0.0200	-0.0201	-0.0201	-0.0200	-0.0198
3.00	-0.0174	-0.0190	-0.0201	-0.0210	-0.0216	-0.0220	-0.0221	-0.0221	-0.0220	-0.0217	-0.0212
4.50	-0.0217	-0.0244	-0.0265	-0.0279	-0.0288	-0.0292	-0.0291	-0.0285	-0.0276	-0.0261	-0.0243
6.00	-0.0245	-0.0275	-0.0297	-0.0313	-0.0322	-0.0326	-0.0323	-0.0316	-0.0303	-0.0286	-0.0264
7.50	-0.0260	-0.0290	-0.0313	-0.0328	-0.0338	-0.0341	-0.0338	-0.0330	-0.0317	-0.0298	-0.0275
9.00	-0.0275	-0.0305	-0.0327	-0.0342	-0.0351	-0.0353	-0.0350	-0.0342	-0.0328	-0.0310	-0.0286
10.50	-0.0297	-0.0327	-0.0348	-0.0362	-0.0371	-0.0373	-0.0369	-0.0360	-0.0346	-0.0327	-0.0303
12.00	-0.0327	-0.0356	-0.0376	-0.0389	-0.0396	-0.0398	-0.0393	-0.0384	-0.0369	-0.0350	-0.0325
13.50	-0.0345	-0.0371	-0.0390	-0.0402	-0.0408	-0.0409	-0.0404	-0.0395	-0.0381	-0.0362	-0.0338
15.00	-0.0394	-0.0411	-0.0422	-0.0428	-0.0431	-0.0429	-0.0425	-0.0417	-0.0406	-0.039.	-0.0375

HOOP STRAIN (PERCENT)

Z/R(CM)	10.70	10.83	10.96	11.09	11.22	11.35	11.48	11.61	11.74	11.87	12.00
0.00	0.0352	0.0397	0.0434	0.0465	0.0492	0.0515	0.0535	0.0554	0.0570	0.0585	0.0598
1.50	0.0368	0.0412	0.0449	0.0480	0.0506	0.0529	0.0550	0.0568	0.0584	0.0598	0.0611
3.00	0.0424	0.0467	0.0503	0.0533	0.0559	0.0581	0.0600	0.0618	0.0633	0.0646	0.0659
4.50	0.0546	0.0587	0.0621	0.0649	0.0672	0.0693	0.0710	0.0725	0.0739	0.0751	0.0761
6.00	0.0626	0.0666	0.0698	0.0725	0.0747	0.0766	0.0782	0.0796	0.0809	0.0820	0.0829
7.50	0.0670	0.0709	0.0741	0.0767	0.0789	0.0807	0.0822	0.0836	0.0848	0.0858	0.0867
9.00	0.0712	0.0750	0.0781	0.0806	0.0827	0.0845	0.0860	0.0873	0.0884	0.0894	0.0903
10.50	0.0777	0.0814	0.0844	0.0868	0.0888	0.0905	0.0919	0.0931	0.0941	0.0950	0.0958
12.00	0.0863	0.0899	0.0927	0.0950	0.0969	0.0985	0.0998	0.1008	0.1018	0.1026	0.1032
13.50	0.0913	0.0948	0.0976	0.0998	0.1016	0.1031	0.1043	0.1053	0.1062	0.1069	0.1076
15.00	0.1054	0.1087	0.1113	0.1133	0.1150	0.1163	0.1173	0.1182	0.1189	0.1194	0.1199

mento do campo total nestas bobinas e não somente o gerado dividindo seu próprio enrolamento.

Os valores máximos encontrados são:

Ø (mm)	0,85	0,6	0,85	0,6
$\sigma_{\theta máx}$ =	1964kg/cm^2	1096kg/cm^2	ε_θ =	0,2 %	0,12 %
$\sigma_{rmáx}$ =	66kg/cm^2	41kg/cm^2	ε_r =	0,07%	0,04 %

que estão bem abaixo dos valores $\varepsilon \simeq 0,5\%$ admissível para fios supercondutores NbTi.

VIII - 3.3 - Mapeamento das Tensões

Para melhor observar a distribuição das tensões nos enrolamentos vamos calcular sua interação com todos os setores do enrolamento, para tanto vamos utilizar /10/:

$$E_m{}^{-\theta} = V_1E_1 + V_2E_2 + V_3E_3 + V_4E_4 = 8358 \ (kg/mm^2)$$

$$E_m{}^{-r} = \frac{1}{\frac{V_1}{E_1} + \frac{V_2}{E_2} + \frac{V_3}{E_3} + \frac{V_4}{E_4}} = 3501 (kg/mm^2)$$

(kg/mm^2)

E_1, V_1 - enrolamento Nb_3Sn - $V_1 = 0,19$ E_θ=11234 E_r=4613

E_3, V_3 - estrutura em inox - $V_3 = 0,09$ E_θ=E_r= 18900

E_4, V_4 - resina epóxi - $V_4 = 0,27$ E_θ=E_r= 2000

Com estas considerações podemos mapear as tensões e deformações, calculadas a partir da matriz 100 x 100 da distribuição do campo magnético em todo sistema.

As figuras 11 e 12 respectivamente mostram a tensão tangencial (Hoop Stress) σ_θ e tensão radial σ_r onde os valores máximos são: $\sigma_\theta máx$ = 936(kg/cm^2), $\sigma_{rmáx}$ = 26kg/cm^2 no enrolamento de Nb_3Sn.

A figura 13 mostra o deslocamento em mícrons considerando as tensões e deformações calculadas anteriormente e os módulos de elasticidade do enrolamento como um todo. O valor máximo do "displacement" μ = 0,067mm ou 67μm.

```
**Which field contour do you select?***

******Press the select key**************
 HOOP STRESS BACKUP SCM CONTOUR
 BACKUP-SCM CURRENT(A)
 Ib=  167(A)
 MAX=  936   MIN=  187(kg/cm**2)
 HOOP STRESS CONTOUR INTERVAL (kg/cm**2)
 HOOP STRESS INTERVAL=  100.00(kg/cm**2)
613.7338 7264    804.935527768      995.937178672      613.933877264
801.843845417    992.111876533      611.575814301      0          0
0          0     0        40.7717209534      231.039752069
421.307783185
```

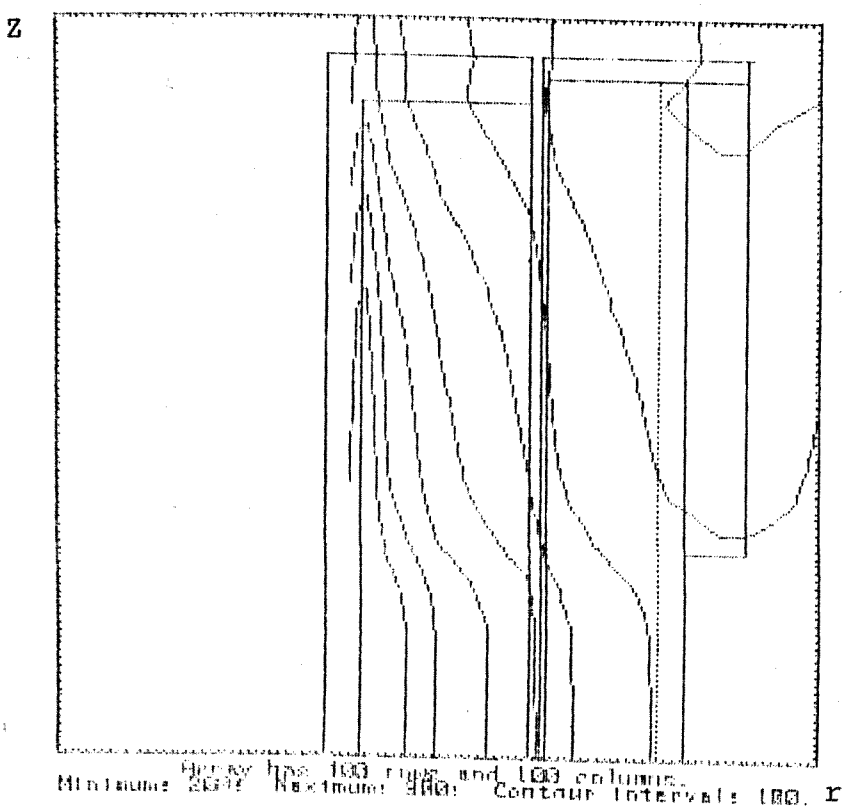


Fig. 11

Mapeamento da Tensão Tangencial no Enrolamento

```
**Which field contour do you select?***

******Press the select key**************
 RADIAL STRESS BACKUP-SCM CONTOUR
 BACKUP-SCM CURRENT(A)
 MAX=   -25.7    MIN=    19.3(kg/cm**2)
 Ib=   167(A)
 CONTOUR INTERVAL(kg/cm**2)
 BT-INTERVAL=    -5.00(kg/cm**2)
-38.537411452
-46.94701762?2
-37.7663686996
-46.1530012202
-40.0794965568
-48.534890441
 -40.6398129958          -42.7422145396          -44.8446160834
 -39.8630468297          -41.9597249599          -44.0564030901
 -42.1933453279          -44.3071936989          -46.42104207
```

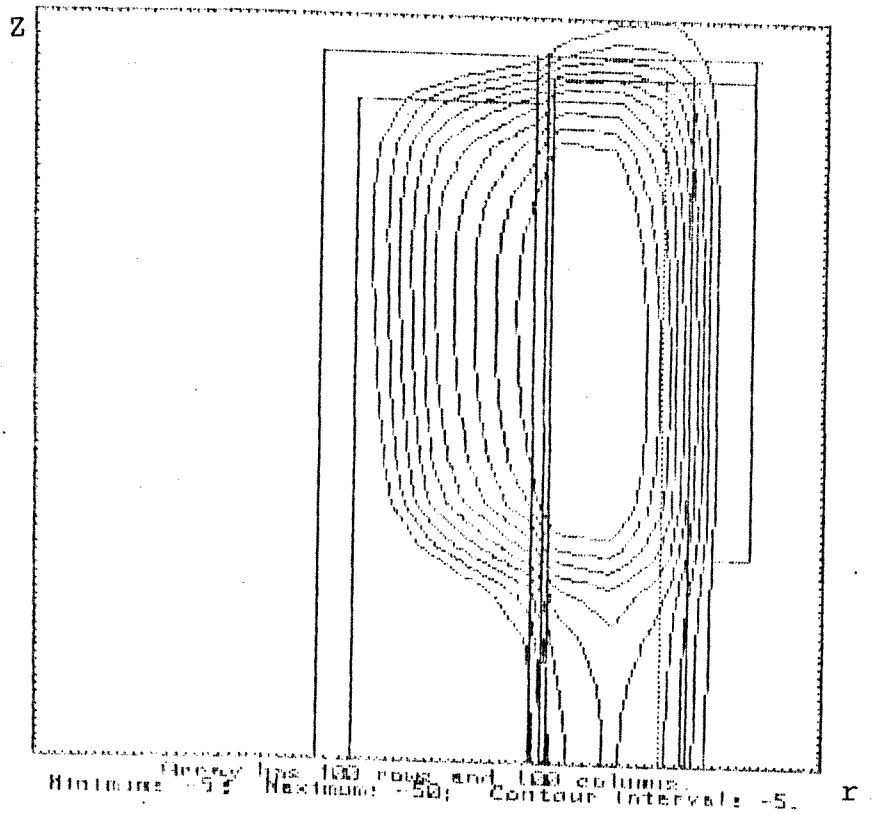


Fig. 12

Distribuição da Tensão Radial

Which field contour do you select?*

******Press the select key**********
DISPLACEMENT BACK UP CONTOUR
BACKUP-SCM CURRENT (A)
Ib= 167(A)
MAX= .0666 MIN= .0285(mm)
CONTOUR INTERVAL (mm)
DISPLACEMENT-INTERVAL= .0050(mm)

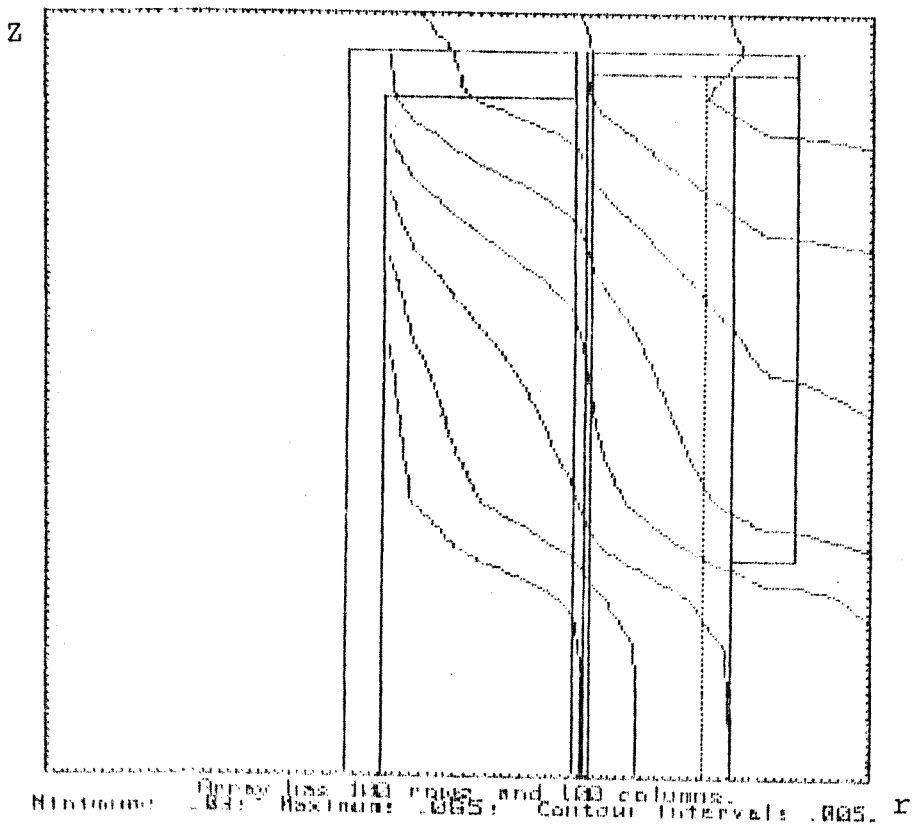


Fig. 13

Distribuição da deformação nas diversas camadas do enrolamento

VIII.4 - CONCLUSÕES

O dimensionamento de magnetos supercondutores de Nb_3Sn apresenta um fator complicador, em relação aos magnetos de NbTi, que é a fragilidade do fio após o tratamento de difusão e formação do composto Nb_3Sn.

Os cálculos executados neste capítulo permitem um dimensionamento seguro para operação do magneto quer em relação ao campo magnético crítico ou em relação à corrente crítica. Foram considerados todos os efeitos de tensões ou deformações de naturezas térmicas ou devido a energização do magneto.

Após todas estas considerações devemos analisar o processo de fabricação do magneto que deve eliminar todas as possibilidades de solicitação mecânica do fio, após formação do Nb_3Sn, quer na execução dos contatos elétricos ou durante o processo de impregnação do magneto supercondutor.

A construção e teste do magneto supercondutor de Nb_3Sn serão objeto de asunto de tese de doutoramento.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CAPÍTULO I

/1/ ONNES , H.K. - Akad. Van Wetenschappen (Amsterdan): 14, 113, 818 (1911)

/2/ MATTHIAS, B.T. - Phys. Rev. 92 (874): 1953; 97, (74): 1955; Phys. Today 24 (8), 23: 1971

/3/ VONSOVSKY, S.V.; IZYUMOV, Yu.A. and KURMAEV, E.Z. - Superconductivity of Transition Metals: their alloys compounds. New York, Springer-Verlag Berlin, 1982, p. 03

/4/ WILSON, M.N. - Superconducting Magnets, Oxford, Claredon Press Oxford, 1983, 335 p.

/5/ PINATTI, D.G. - Geração de Energia por Magnetohidrodinâmica Projeto Básico MHD, NT-EMAJ-85/05, FTI/CEMAR, Lorena, 28 de Agosto de 1985, 56 p.

/6/ WATSON, I.H.P. - Proc. 6th Int. Cryogenic Engineering Conf. Bratislava. Ed. M. Polak, I. Kovakovsky, L. Krempasky and S. Takacs. ALFA, Bratislava, 1976, p. 303

/7/ KYOTANI, Y. - Magnetic Transport System Development in Japan IN: — Proc. 9th International Conference on Magnet Technology, Zurich, Switzerland, 1985, p. 327

CAPÍTULO II

/1/ BEAN, C.P. - Magnetization of Hard Superconductors, Phys. Rev. Lett., 8 (250): 1962

/2/ PINATTI, D.G.; PIMENTA NETO, J.A. and BALDAN, C.A - Electron beam melted NbTi alloy and its superconductor

cable, FTI, Lorena, SP, Centro de Materiais Refratários, 1987

/3/ HILLMANN, H. - Filamentary Al5 Superconductors. Superconductor Material Science. Fabrication Technology of Superconducting Material, Plenum Press, N.Y., 1981, p. 275

/4/ HILLMANN, H. - Electron beam melting of superconductor base materials processing and properties. Vacuumschmelze GmbH, D-6450 - Hanau, Grüner Weg 37, Federal Republic of Germany, private communication

/5/ WILSON, M.N. - Superconducting Magnets, Oxford, Clarendon Press, 1983, 335 p.

/6/ IWATA, Y. - Electrical properties of insulating materials at cryogenic temperature. Furukawa Electric Review, 54, 1973, p. 51-73

/7/ Advanced Research Projects Agency. Handbook on Materials for Superconducting Machinery: mechanical, thermal, electrical and magnetic properties of structural materials, section 11.0 and section 12.0, Battelle, Metals and Ceramics Information Center, 1974

CAPÍTULO III

/1/ FONER, S. - Superconductor materials science: Metallurgy, Fabrication and Applications, New York, Plenum Press, 1981, p. 38

/2/ FONER, S. - Superconductor materials science: Metallurgy, Fabrication and Applications, New York, Plenum Press, 1981, p. 201

/3/ FONER, S. - Superconductor materials science: Metallurgy,

Fabrication and Applications, New York, Plenum Press, 1981, p. 389

/4/ SUENAGA, M. and CLARK, A.F. - Filamentary A15 Superconductors, New York, Plenum Press, 1980, p. 17.

/5/ MEYERHOFF, R.W. - Manufacture of superconducting materials. Proc. of an International Conference, 8.10 Nov., 1976, New York, American Society for Metals, 1977.

/6/ BEST, K.J. - An alternative winding technique for the production of A15 magnets. IEEE Trans. of Magnetics, vol. MAG 17, nº 1, January, 1981.

/7/ KIMURA, Y. and YAMASAKI, H. - Fabrication of Nb_3Sn superconductors by the solid-liquid diffusion method using Sn rich CuSn alloy. Cryogenics, February, 1982, p. 89-93

/8/ WATANABE, M. et alli - Proc. of Japan-US Workshop on high-field superconducting materials for fusion, Dec. 10-12,1984, Tsukuba Center for Institutes, Ibaraki, Japan, 1984, p. 186

/9/ HIRASAWA, T. and KIMURA, Y. - Proc. of Japan-US Workshop on high-field superconducting materials for fusion, Dec. 10-12, 1984, Tsukuba Center for Institutes, Ibaraki, Japan, p. 61

/10/ BALDAN, C.A. - Relatório de Viagem ao ETL - Electrotechnical Laboratory - Japan, FTI-CEMAR, Restrito, 1986.

/11/ SPRINGER, E. et alli - Properties of $(NbTa)_3Sn$ - Filamentary conductors. Presented at the ICM, Colorado Springs, August 1983

/12/ TACHIKAWA, K. - Proc. of Japan-US Workshop on high-field superconducting materials for fusion, Dec. 10-12, 1984, Tsukuba Center for Institutes, Ibaraki, Japan, 1984, p. 1

CAPÍTULO IV

/1/ GARRETT, M.W. - Calculation of fields, forces and mutual inductances of current systems. Journal of Applied Physics 34 (9): Sept., 1963

/2/ GARRETT, M.W. - Axially symmetric systems for generating and measuring magnetic fields. Part I. Journal of Applied Phys. 22 (9): Sept., 1951

/3/ MONTGOMERY, D.B. - The magnetic and mechanical aspects of resistive and superconducting systems, New York, Wiley - Interscience, 1969, p. 312

/4/ BRECHNA, H. - Superconducting magnet systems, New York, Springer-Verlag Berlim, 1973, p. 590

/5/ NAMBA, T. et alli - Program for calculation of the magnetic field of an air-core cylindrical and magnet by computer. Bul. Electrotech. Lab., 41 (2,3): 1977, p. 99-112

/6/ FUJIOKA, T. et alli - The optimization method of superconducting magnet design. Journal of Phys., Suppl. nº 1, (45) Jan, 1984, p. 885

/7/ CUNLIFFE, N.H. et alli - A superconducting 2-6T high accuracy magnet. Private communication, Rutherford Laboratory, Chilton, Didcot, Oxon, England, p. 443-447

/8/ GRANT, W.J.C. and STRANDBERG, W.P. - Magnetic field of non-cylindrical coils. Review of Scientific Instruments, 36 (3): March 1965, p. 343

/9/ BAYNHAM, D.E. and WYBORN, B.E. - A 5 Tesla superconducting wiggler magnet. IEEE Trans. on Magnetics, MAG-17, (5): Sept 1981, p. 1595-1598

CAPÍTULO V

/1/ MONTGOMERY, D.B. - Solenoid magnet design: The magnetic and mechanical aspects of resistive and superconducting systems New York, Wiley-Interscience, 1969, p. 312

/2/ BRECHNA, H. - Superconducting magnet systems, New York, Springer-Verlag, 1973, p. 590

/3/ WILSON, M.N. - Superconducting magnets, New York, Claredon Press, Oxford, 1983, p. 335

/4/ HAK, J. - Elektrotech. u. Maschinenbau (E.u.M.) 51, (477): 1933

/5/ HAYASHI, I. - Formulas for use in calculating electromagnetic forces on the cylindrical air core coils and its applications for the power reactors. IEEE Review, 81 (876): Sept 1961

/6/ ARP, V. - Stresses in superconducting solenoids. Journal of Applied Physics, 48 (5): May, 1977, p. 2026-2036

/7/ KOCH, C.C. and EASTON, D.S. - A review of mechanical behavior and stress effects in hard superconductors. Cryogenics, July, 1977, p. 391-413

/8/ READ, D.T. - Metallurgical effects in niobium-titanium alloys. Cryogenics, October, 1978, p. 579-584

/9/ EASTON, D.S. et alli - A prediction of the stress state in Nb_3Sn superconducting composites. J. Appl. Phys. 51 (5): May, 1980, p. 2748-2757

/10/ DOWLEY, M.W. - Field energy removal from a superconducting solenoid. Cryogenics, June, 1964, p. 153-165

/11/ IWATA, Y. - Electrical properties of insulating materials at cryogenic temperature. Furukawa Electric Review, 54, 1973, p. 51-75

CAPÍTULO VI

/1/ FUJIOKA, T. et alli - The optimization method of superconducting magnet design. Journal de Physique, 1 (45): Jan., 1984, p. 885-888

/2/ NAMBA, T. et alli - Program for calculation of the magnetic field of an air-core cylindrical and multilayer magnet computer. Bul. Electrotech. Lab., 41 (2,3): 1977, p. 179-191

/3/ BALDAN, C.A. et alli - Magneto Supercondutor de Laboratório NT-EMAJ-83/02, FTI-CEMAR, Lorena, 07 Nov. 1985

/4/ ARP, V. - Stresses in superconducting solenoids. Journal of Applied Physics, 48 (5): May 1977, p. 2026-2036

/5/ UMEDA, M. et alli - 90 mm Ø Nb_3Sn Superconducting Magnet I. Design. Bul. Electrotech. Lab., 42 (4): 1978, p. 37-80

/6/ MONTGOMERY, D.B. - Solenoid Magnet Design: The magnetic and mechanical aspects of resistive and superconducting systems. New York, Wiley-Interscience, 1969, p. 312

/7/ DOWLEY, M.W. - Field energy removal from a superconducting solenoid. Cryogenics, June, 1964, p. 153-165

CAPÍTULO VII

/1/ HITCHCOCK, H.C. - The design of volume-minimized-split solenoid systems. In: - Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology, edited by Brechna, H., Califórnia

Sept. 8-10, 1965, p. 111-125

/2/ KABAT, D. and TSESNAK, L. - The optimization of superconducting Helmholtz coils taking into account the dependence of critical current on magnetic induction. Cryogenics, March, 1979, p. 151-152

/3/ GOOD, J.A. - A superconducting magnet system for a very high intensity magnetic mineral separator. IEEE Trans. on Mag., MAG-12 (5): Sept. 1976, p. 493-497

/4/ COHEN, E. - The application of a superconducting magnet system to the cleaning and desulphurization of coal. IEEE Trans. on Mag., MAG-12 (5): Sept. 1976, p. 503-506

/5/ ODER, R.R. - High gradient magnetic separation theory and applications. IEEE Trans. on Mag., MAG-12 (5): Sept. 1976, p. 428-435

/6/ KOYAMA, K. - Theoretical and experimental studies on magnetic instability in a hard superconductor, Japan, Electrotechnical Laboratory, nº 741, Dec. 1973, p. 62

/7/ PINATTI, D.G. and BALDAN, C.A. - Planta piloto de separação magnética de minério, NT-EMAJ-83/03, FTI-CEMAR, Lorena, SP, 1983

/8/ ARP, V. - Stresses in superconducting solenoids. Journal of Applied Physics, 48 (5): May, 1977, p. 2026-2036

/9/ HAK, J. - Elektrotech. u. Maschinenbau (E.u.M.) 51 (477), 1933

/10/ JONES, R.M. - Mechanics of composite materials, New York, McGraw-Hill, 1975, p. 355

/11/ DOWLEY, M.W. - Field energy removal from a superconducting

solenoid. Cryogenics, June, 1964

CAPÍTULO VIII

/1/ OISHI , K. et alli - An additional technique of "Wind and react" method. In: Proceedings of the 9th International Cryogenic Engineering Conference, Japan, 11-14 May 1982, p. 637

/2/ UMEDA , M. and WATANABE, M. - Development of a large scale high field superconducting magnet by Nb_3Sn superconductor. In: Proceedings of the 9th International Cryogenic Engineering Conference, Japan, 11-14 May 1982, p. 646

/3/ EASTON, D.S. et alli - A prediction of the stress state in Nb_3Sn superconducting composites. Journal Appl. Phys., 51 (5): May 1980, p. 2748-2757

/4/ LUHMAN, T. et alli - Degradation mechanism of Nb_3Sn composite wires under tensile strain at 4.2 K. IEEE Trans. on Mag., MAG-15 (1): Jan. 1979, p. 699-702

/5/ BEST, K.J. - An alternative winding technique for the production of A15 magnets. IEEE Trans. on Mag., MAG-17 (1): Jan. 1981, p. 478-481

/6/ MONTGOMERY, D.B. - Solenoid magnet design: the magnetic and mechanical aspects of resistive and superconducting systems New York, Wiley-Interscience, 1969, p. 312

/7/ NAMBA , T. et alli. - Program for calculation of the magnetic field of an air-core cylindrical and magnet by computer. Bul. Electrotech. Lab., 41 (2,3): 1977, p. 99-112

/8/ ARP , V. - Stresses in superconducting solenoids. Journal of

Applied Physics, 48 (5): May 1977

/9/ UMEDA, M. et alli. - 90 mm Ø Nb_3Sn superconducting Magnet I. Design. Bul. Electrotech. Lab., 42 (4): 1978, p. 37-79

/10/ WILSON, M.N. - Superconducting magnets, New York, Claredon Press, Oxford, 1983, p. 335

/11/ LANDWEHR, G. - Problems connected with the generation of continuous magnetic fields above 15 Tesla. IEEE Trans. on Mag., MAG-17 (5): Sept. 1981, p. 1768-1774

APÊNDICE 1

CÁLCULO DE CAMPO MAGNÉTICO DE SOLENÓIDE

I. MÉTODO DOS POLINÔMIOS

Definimos um sistema de coordenadas esféricas e vamos obter a equação de Laplace $\nabla^2 V = 0$

Utilizando-se do método de separação de variáveis, obtém-se:

$$V(r,\theta,\phi) = \sum_{n=0}^{\infty} (Ar^n + Br^{-n-1}) \sum_{m=0}^{n} [A'' P_n^m(\cos\theta) + B'' Q_n^m(\cos\theta)] \cdot$$

$$[A' \operatorname{sen} m\phi + B' \cos m\phi] \qquad (1)$$

Aplicamos agora as seguintes simplificações:

1) O potencial é finito sobre o eixo de revolução Z, portanto B"=0 de modo a excluir a função de Legendre de 2ª espécie $Q_n^m(\cos\theta)$, pois para $\cos\theta=1$, $Q_n^m(1) = \infty$.

2) O sistema possui uma simetria de revolução em torno do eixo-Z, de modo que o potencial não depende de m. Nos limitaremos ao caso m = 0 e utilizaremos os polinômios de Legendre $P_n(\cos\theta)$.

3) O campo é central e finito na origem e o desenvolvimento do campo, portanto, contém somente potências positivas de r.

Fazendo-se todas estas simplificações, a expressão (1) se torna:

$$V(r,\theta) = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{h_n}{n} r^n P_n(\cos\theta) \qquad (2)$$

A constante $\frac{h_n}{n}$ foi escolhida de modo a coincidir a equação (2) com o desenvolvimento em séries de Taylor do potencial em torno do eixo-Z:

$$V = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} V^{(n)}(0,0) Z^n \qquad (3)$$

onde $V^{(n)}(0, 0)$ é a n-ésima derivada em Z do potencial na origem.

Sobre o eixo-Z $\cos\theta = \pm 1$ e $Pn(\pm 1) = (\pm 1)^n$. Identificando-se os termos em Z de mesma potência, obtém-se:

$$h_n = \frac{B_Z^{(n-1)}(0,0)}{(n-1)!} \qquad (4)$$

sendo que $$B_Z^{(n-1)}(0,0) = \left[\frac{d^{n-1} B_Z(Z,0)}{dZ^{n-1}}\right]_{Z=0} \qquad (5)$$

O desenvolvimento das potências cruzadas de r do potencial num ponto M definido pelas coordenadas (r,θ) permitem calcular as componentes axial B_Z e radial B_ρ do campo magnético.

Utilizaremos as relações:

$$\frac{\partial}{\partial Z}(r^n P_n) = n r^{(n-1)} P_{n-1} \qquad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial \rho}(r^n P_n) = - \operatorname{sen}\theta \; r^{n-1} P'_{n-1} \qquad (7)$$

onde P' representa a derivada primeira do polinômio de Legendre.

Portanto, as expressões das componentes axial e radial do campo de um solenóide se escrevem como:

$$B_Z(r,\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n-1)!} \left[B_Z^{(n-1)}(0,0)\right] r^{n-1} P_{n-1}(\cos\theta) \qquad (8)$$

$$B_\rho(r,\theta) = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \left[B_Z^{(n-1)}(0,0)\right] r^{n-1} P'_{n-1}(\cos\theta) \qquad (9)$$

Como a origem é no centro do solenóide, as expressões con

têm somente termos pares:

$$B_Z(r,\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-2)!}\left[B_Z^{(2n-2)}(0,0)\right] r^{2n-2} P_{2n-2}(\cos\theta) \qquad (10)$$

$$B_\rho(r,\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)!}\left[B_Z^{(2n-2)}(0,0)\right] r^{2n-2} P_{2n-2}(\cos\theta) \qquad (11)$$

Para se determinar a homogeneidade espacial do campo magnético é necessário o conhecimento da contribuição de cada termo do desenvolvimento em função de r e θ. As curvas de erro constante em termos de 2ª ordem correspondendo a B_Z e B_ρ são respectivamente:

$$r^{2n} P_{2n}(\cos\theta) = \text{constante} \qquad (12)$$

$$r^{2n} \operatorname{sen}\theta\, P_{2n}'(\cos\theta) = \text{constante} \qquad (13)$$

II. MÉTODO DA INTEGRAL DA EQUAÇÃO DE BIOT-SAVART

A partir da Lei de Biot-Savart

$$\vec{B} = \frac{\mu o}{4\pi} \frac{d\vec{\ell} \times \vec{S}}{|\vec{S}|^3} \qquad (1)$$

podemos, por meio de um processo de integração analítico e numérico obter expressões para o cálculo do campo magnético de um solenóide em qualquer ponto do espaço. Para isso, utilizaremos as seguintes expressões:

$$d\vec{\ell} = -a \operatorname{sen}\theta\, d\theta\, \hat{r} + a \cos\theta\, do\, \hat{\theta} \qquad (2)$$

$$\vec{S} = (R_p - a\cos\theta)\hat{r} - a \operatorname{sen}\hat{\theta} + (Z_p - Z) \qquad (3)$$

obtidas à partir da fig. 1.

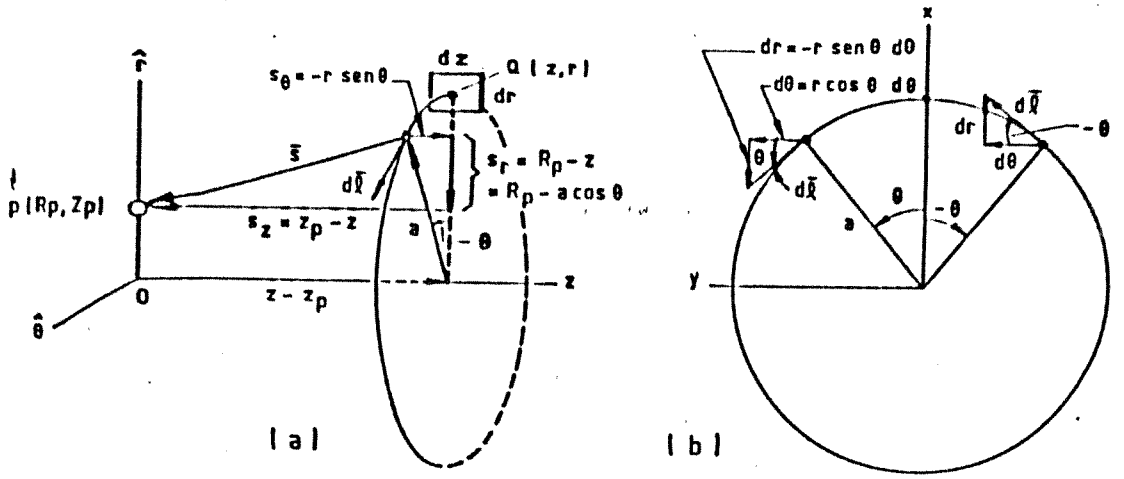


Fig. 1 - Relações Geométricas Básicas para Cálculo do Campo.

Substituindo-se (2) e (3) em (1) obtém-se após um rearranjo:

$$B_r = kJ \int_{a_1}^{a_2} \int_{Z_1}^{Z_2} \int_{0}^{2\pi} \frac{(Z_p - z)\, a \cos\theta \, d\theta \, dz \, da}{\left[a^2 + R_p^2 + (Z_p - z)^2 - 2aR_p \cos\theta\right]^{3/2}} \tag{4}$$

$$B_z = kJ \int_{a_1}^{a_2} \int_{Z_1}^{Z_2} \int_{0}^{2\pi} \frac{(a^2 - aR_p \cos\theta)\, d\theta \, dz \, da}{\left[a^2 + R_p^2 + (Z_p - z)^2 - 2aR_p \cos\theta\right]^{3/2}} \tag{5}$$

$B_\theta = 0$ devido a simetria do sistema em relação ao eixo de revolução Z.

$$I = J \, dr \, dZ \tag{6}$$

$$K = \frac{\mu o}{4\pi} = 10^{-7} \frac{Wb}{A.m.} = 10^{-1} \frac{G.cm}{A}$$

(i). Integração Analítica de B_r

Fazendo-se $u=(Z-Z_p)^2$, $du=2(Z-Z_p)dz$ e substituindo-se em (4), obtém-se:

$$B_r = kJ \int_0^{2\pi} \int_{a_1}^{a_2} \frac{-a\cos\theta \, da \, d\theta \, du}{[a^2+R_p^2-2aR_p\cos\theta+u]^{3/2}} \qquad (4.1)$$

Integrando-se a expressão (1) e substituindo os valores de u, tem-se:

$$B_r = kJ \int_0^{2\pi} \int_{a_1}^{a_2} \frac{a\cos\theta \, da \, d\theta}{[a^2+R_p^2+(z-Z_p)^2-2aR_p\cos\theta]^{1/2}} \Bigg|_{Z_1}^{Z_2} \qquad (4.2)$$

Usando-se a troca de variáveis

$A^2 = R_p^2 \operatorname{sen}^2\theta + (Z-Z_p)^2$ e $V = a - R_p\cos\theta$

e integrando a equação (4.2), obtém-se

$$B_r = kJ \int_0^{2\pi} \cos\theta \left\{ \sqrt{V^2+A^2} + R_p\cos\theta \cdot \ln\left(V+\sqrt{V^2+A^2}\right) \right\} d\theta \qquad (4.3)$$

definindo-se

$$R = \sqrt{a^2+R_p^2+(Z-Z_p)^2-2aR_p\cos\theta} \qquad (7)$$

e substituindo-se v e A na equação (4.3), tem-se:

$$B_r = kJ \int_0^{2\pi} \left\{ R\cos\theta + R_p\cos^2\theta \cdot \ln\left(R+a-R_p\cos\theta\right) \right\} d\theta \Bigg|_{Z_1}^{Z_2} \Bigg|_{a_1}^{a_2} \qquad (4.4)$$

ou

$$B_{r_1}(a,z) = kJ \int_0^{2\pi} R\cos\theta \, d\theta \qquad (8)$$

e

$$Br_2(a,z) = kJ\int_0^{2\pi} R_p\cos^2\theta.\ln\left(R+a-R_p\cos\theta\right)d\theta \qquad (9)$$

onde $$Br = \left[B_{r_1}(a,z) + B_{r_2}(a,z)\right]_{a_1}^{a_2}\Big]_{z_1}^{z_2} \qquad (10)$$

As expressões (8) e (9) serão integradas numericamente.

(ii). Integração Analítica de B_z

Integrando-se a equação (5) em Z:

$$B_z = kJ\int_{a_1}^{a_2}\int_0^{2\pi}\frac{(z-Z_p)(a^2-aR_p\cos\theta)\,da\,d\theta}{(a^2+R_p^2-2aR_p\cos\theta)\left[a^2+R_p^2+(z-Z_p)^2-2aR_p\cos\theta\right]^{1/2}}\Bigg|_{z_1}^{z_2} \qquad (5.1)$$

Tomando-se a equação (7) podemos obter:

$$RdR = (a - R_p\cos\theta)\,da \qquad (11)$$

Substituindo-se (7) e (11) em (5.1):

$$B_z = kJ\int_0^{2\pi}\int_{a_1}^{a_2}\frac{a(z-Z_p)\,d\theta}{R^2-(z-Z_p)^2}\,dR\Bigg|_{z_1}^{z_2} \qquad (5.2)$$

Rearranjando-se a equação (5.2) obtêm-se

$$B_z = kJ(z-Z_p)\int_0^{2\pi}\int_{a_1}^{a_2}\frac{R_p\cos\theta+\sqrt{R_p^2\cos^2\theta-\left[R_p^2+(z-Z_p)^2-R^2\right]}\,dR\,d\theta}{R^2-(z-Z_p)^2}\Bigg|_{z_1}^{z_2} \qquad (5.3)$$

Da expressão (5.3) tem-se duas integrais a serem resolvidas:

$$I_1 = \int_{a_1}^{a_2}\frac{dR}{R^2-(z-Z_p)^2} \qquad (12)$$

e

$$I_2 = \int_{a_1}^{a_2} \frac{\sqrt{R_p^2 \cos^2\theta - \left[R_p^2 + (z-Z_p)^2 - R^2\right]}}{R^2 - (z-Z_p)^2} \qquad (13)$$

A integral I_1 resolve-se pela técnica de separação por frações parciais:

$$I_1 = \frac{1}{2|z-Z_p|}\left\{\int_{a_1}^{a_2} \frac{dR}{R-|z-Z_p|} - \int_{a_1}^{a_2} \frac{dR}{R+|z-Z_p|}\right\}$$

$$= \frac{1}{2|z-Z_p|} \ln\left(\frac{R-|z-Z_p|}{R+|z-Z_p|}\right)\Bigg|_{a_1}^{a_2} \qquad (12.1)$$

A integral I_2 resolve-se fazendo-se as seguintes substituições:

$$R_p^2\,(\cos^2\theta - 1) = -R_p^2 \operatorname{sen}^2\theta \qquad (15)$$

$$u = R + \sqrt{R^2 - (Z-Z_p)^2 - R_p^2 \operatorname{sen}^2\theta} \qquad (16)$$

Portanto,

$$I_2 = \int_{u_1}^{u_2} \frac{\left[u^2 - (z-Z_p)^2 - R_p^2 \operatorname{sen}^2\theta\right]^2 du}{u\left\{u^4 - 2u^2\left[(z-Z_p)^2 - R_p^2 \operatorname{sen}^2\theta\right] + \left[(z-Z_p)^2 - R_p^2 \operatorname{sen}^2\theta\right]\right\}} \qquad (17)$$

Aplicando-se a técnica de separação por frações parciais, obtém-se:

$$I_2 = \int_{u_1}^{u_2} \frac{du}{u} - R_p^2 \operatorname{sen}^2\theta \left\{\int_{u_1}^{u_2} \frac{du}{\left[u - (z-Z_p)\right]^2 + R_p^2 \operatorname{sen}^2\theta}\right.$$

$$\left. + \int_{u_1}^{u_2} \frac{du}{\left[u + (z-Z_p)\right]^2 + R_p^2 \operatorname{sen}^2\theta}\right\} \qquad (17.1)$$

Integrando-se (17.1) e usando-se a relação trigonométrica:

$$\text{arctg } x - \text{arctg } y = \text{arctg } \left(\frac{x-y}{1-xy}\right)$$

obtém-se:

$$I_z = \left\{ \ln\left(R+a-R_p\cos\theta\right) - \frac{R_p \operatorname{sen}\theta}{(z-Z_p)} \operatorname{arctg}\left[\frac{(a-R_p\cos\theta)(z-Z_p)}{RR_p \operatorname{sen}\theta}\right] \right\} \Bigg|_{a_1}^{a_2} \tag{18}$$

Substituindo-se I_1 e I_2 na integral definida por (5.3), obtemos a solução de B_z:

$$B_z = kJ \left\{ \int_0^{2\pi} \frac{(z-Z_p)R_p\cos\theta}{2|z-Z_p|} \ln\left(\frac{R-|z-Z_p|}{R+|z-Z_p|}\right) d\theta + \right.$$

$$+ (z-Z_p)\ln\left(R+a-R_p\cos\theta\right) d\theta$$

$$\left. - \int_0^{2\pi} R_p \operatorname{sen}\theta \cdot \operatorname{arctg}\left[\frac{(a-R_p\cos\theta)(z-Z_p)}{RR_p\operatorname{sen}\theta}\right] d\theta \right\} \Bigg|_{a_1}^{a_2} \Bigg|_{z_1}^{z_2} \tag{5.4}$$

ou, na forma separada:

$$B_{z_1}(a,z) = kJ \int_0^{2\pi} \frac{(z-Z_p)R_p\cos\theta}{2|z-Z_p|} \ln\left(\frac{R-|z-Z_p|}{R+|z-Z_p|}\right) d\theta \tag{19}$$

$$B_{z_2}(a,z) = kJ \int_0^{2\pi} (z-Z_p)\ln\left(R+a-R_p\cos\theta\right) d\theta \tag{20}$$

$$B_{z_3}(a,z) = -kJ \int_0^{2\pi} R_p \operatorname{sen}\theta \cdot \operatorname{arctg}\left[\frac{(a-R_p\cos\theta)(z-Z_p)}{RR_p\operatorname{sen}\theta}\right] d\theta \tag{21}$$

As expressões acima serão calculadas numericamente por computador.

(iii). Determinação dos Pontos Singulares de Campo Magnético

Nas relações obtidas analiticamente para o cálculo de B_r e B_z existem pontos de singularidade que dificultam ou até impossibilitam a integração numérica dessas expressões. Para contornar essas dificuldades, vamos resolver as expressões de B_r e B_z analiticamente nos pontos de singularidades.

$$\text{(a)}\quad B_{r_2}(a,z) = kJ\int_0^{2\pi} R_p \cos^2\theta \cdot \ln\left(R + a - R_p\cos\theta\right)d\theta \tag{9}$$

Esta integral apresenta singularidade quando:

$$R + a - R_p\cos\theta < 0 \tag{22}$$

onde

$$R = \sqrt{a^2 + R_p^2 + (Z-Z_p)^2 - 2aR_p\cos\theta} \tag{7}$$

Para $R_p>0$, a desigualdade (22) só se verifica quando $a-R_p\cos\theta<0$, pois $R\geq 0$, para $\cos\theta=1$ e $z=Z_p$. Assim, a condição para a singularidade de Br_z é:

$$z = Z_p \quad e \quad R_p \geq a$$

Dividiremos o cálculo em dois casos:

1º Caso: $z = Z_p$ e $a = R_p$

Este caso corresponde ao ponto de cálculo situado num dos quatro cantos da secção do enrolamento.

$$B_{r_2}(R_p,Z_p) = kJ\,R_p\left\{\int_0^{2\pi}\cos^2\theta.\ln R_p\,d\theta + \frac{1}{2}\int_0^{2\pi}\cos^2\theta.\ln(1-\cos\theta)\,d\theta + \int_0^{2\pi}\cos^2\theta.\ln\left(\sqrt{2}+\sqrt{1-\cos\theta}\right)d\theta\right\}$$

Calculando-se numericamente as integrais, obtém-se:

$$Br_z(R_p, Z_p) = kJR_p\left(\pi \ln R_p + 0{,}582147\right) \qquad (23)$$

2º Caso: $z = Z_p$, $R_p > a$

Neste caso, vamos substituir o intervalo de integração $[0, 2\pi]$ por $[0, \pi]$ por se tratar o integrando de uma função par.

Subdividiremos $[0, \pi]$ por $[0, \pi/2]$ e $[\pi/2, \pi]$:

$$Br_z(a, Z_p) = 2kJR_p\left\{\int_0^{2\pi/4} \cos^2\theta \cdot \ln\left(R + a - R_p\cos\theta\right) d\theta + \int_{\pi/2}^{\pi} \cos^2\theta \cdot \ln\left(R + a - R_p\cos\theta\right) d\theta\right\}$$

Utilizando-se o artifício de dividir e multiplicar por $(R - a + R_p\cos\theta)$ o logarítmo da primeira integral da equação acima, evitamos o problema da singularidade do logarítmo para $\cos\theta > 0$ em $\theta \varepsilon |0, \pi/2|$:

$$Br_z(a, Z_p) = 2kJR_p\left\{\int_0^{\pi/2} \cos^2\theta \cdot \ln \frac{R_p^2(1 - \cos^2\theta)}{R - a + R_p\cos\theta} d\theta + \int_{\pi/2}^{\pi} \cos^2\theta \cdot \ln\left(R + a - R_p\cos\theta\right) d\theta\right\}$$

Avaliando-se numericamente a primeira integral:

$$Br_z(a, Z_p) = 2kJR_p\left\{\frac{\pi}{2}\ln R_p - 1{,}8741908 - \int_0^{\pi/2} \cos^2\theta \cdot \ln\left(R - a + R_p\cos\theta\right) d\theta + \int_{\pi/2}^{\pi} \cos^2\theta \cdot \ln\left(R + a - R_p\cos\theta\right) d\theta\right\} \qquad (24)$$

$$\text{(b)}\quad B_{z_1}(a,z) = \frac{kJ(z-Z_p)}{2|z-Z_p|}\int_0^{2\pi} R_p\cos\theta.\ln\left(\frac{R-|z-Z_p|}{R+|z-Z_p|}\right)d\theta \qquad (19)$$

Esta integral apresenta singularidades em dois casos:

1º Caso: $z = Z_p$

$$\lim_{z\to Z_p}\frac{(z-Z_p)}{|z-Z_p|}\ln\left(\frac{R-|z-Z_p|}{R+|z-Z_p|}\right) = \lim_{z\to Z_p}\frac{(z-Z_p)}{|z-Z_p|}\ln 1 = 0$$

portanto, $B_{z1}(a,Z_p) = 0$

2º Caso: $z \neq Z_p$, $\quad R-|z-Z_p| = 0$, $\cos\theta = 1$ e $a = R_p$

Utilizamos o artifício de se multiplicar e dividir o logaritmando por $(R+|z-Z_p|)$:

$$B_{z_1}(R_p,z) = \frac{kJ}{2}R_p\frac{(z-Z_p)}{|z-Z_p|}\int_0^{2\pi}\cos\theta.\ln\frac{2R_p^2(1-\cos\theta)}{(R+|z-Z_p|)^2}d\theta$$

Calculando a integral, obtém-se

$$B_{z_1}(R_p,z) = \frac{kJ}{2}R_p\frac{(z-Z_p)}{|z-Z_p|}\left\{\pi+\int_0^{2\pi}\cos\theta.\ln(R+|z-Z_p|)d\theta\right\} \qquad (25)$$

$$\text{(c)}\quad B_{z_2}(a,z) = kJ\int_0^{2\pi}(z-Z_p)\ln(R+a-R_p\cos\theta)\,d\theta \qquad (20)$$

1º Caso: $z \neq Z_p$

A integral $B_{Z2}(a,z)$ pode ser avaliada numericamente.

2º Caso: $z = Z_p$

$B_{Z2}(a, Z_p) = 0$

(d) $$B_{Z3}(a,z) = -kJ\int_0^{2\pi} R_p \operatorname{sen}\theta \cdot \operatorname{arctg}\left[\frac{(a-R_p\cos\theta)(z-Z_p)}{RR_p\operatorname{sen}\theta}\right] d\theta \qquad (21)$$

1º Caso: $z = Z_p$

$B_{Z3}(a, Z_p) = 0$

2º Caso: $RR_p \operatorname{sen}\theta = 0$

$$\operatorname{arctg}\left[\frac{(a-R_p\cos\theta)(z-Z_p)}{RR_p\operatorname{sen}\theta}\right] = \frac{\pi}{2}$$

Neste caso

$B_{Z3}(a,z) = KJ\pi R_p$

APÊNDICE 2

CÁLCULO BÁSICO DO "WIGGLER" SUPERCONDUTOR 5T

O magneto "wiggler" supercondutor do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) é um equipamento constituído de cinco bobinas do tipo pista-de-corrida, dispostas lado a lado e alinhadas com o canal do feixe de elétrons. A função do magneto "wiggler" é a obtenção de radiação sincrotrônica de alta intensidade de fótons sobre um largo espectro de energia a partir de um feixe de elétrons circulando um anel de armazenamento de partículas. O "wiggler" é colocado ao longo dos trechos retos do anel (comprimento típico 6m), e são projetados de modo a não interferirem nas características do feixe de elétrons e produzem um campo magnético estático alternado transversal ao feixe /1, 2/.

O "wiggler" projetado para o LNLS produz um campo central de 5T (50kG) e possui cinco pólos, sendo que as bobinas que constituem os pólos mais externos possuem dimensões menores do que as bobinas centrais.

O cálculo do perfil de campo gerado pelo "wiggler" é feito através de um programa de computador que calcula as componentes B_x e B_y do campo em unidades de G/A. De modo a minimizar a interferência do "wiggler" nas características do feixe eletrônico deve-se restringir o campo às seguintes condições:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} B\,dx < 10^{-4} \quad T.m \qquad (1$$

e

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |B|\,dx < 2 \quad T.m \qquad (2$$

Para tanto utiliza-se o seguinte procedimento de cálculo

1) Cálculo do perfil de campo para cada bobina sobre o c

nal.

2) Somatório do campo de cada bobina sobre todo o comprimento do setor reto do canal.
3) Integração numérica do campo total de todas as bobinas
4) Cálculo da corrente requerida nas bobinas de modo a satisfazer as condições exigidas pelas equações (1) e (2).

As figuras 1 e 2 mostram o arranjo das bobinas do "wiggler" supercondutor 5T e as figuras 3, 4 e 5 mostram o perfil de campo do "wiggler" para uma corrente de 307,47A para a bobina central e as duas laterais externas e uma corrente de 258,71A para as duas bobinas laterais centrais. Com estas correntes satisfaz-se os critérios dados pelas equações (1) e (2).

Com a finalidade de se testar o cálculo do magneto pista-de-corrida bem como o processo de fabricação, a bobina mostrada na figura 6 será executada utilizando-se um carretel de aço carbono ferrítico, que será introduzida dentro de um "C" constituído de um material magnético (Alnico). As figuras 7 e 8 mostram o perfil de campo para esta bobina sem a contribuição de campo do carretel de aço doce bem como do "C" em Alnico, para uma corrente de 396,7A.

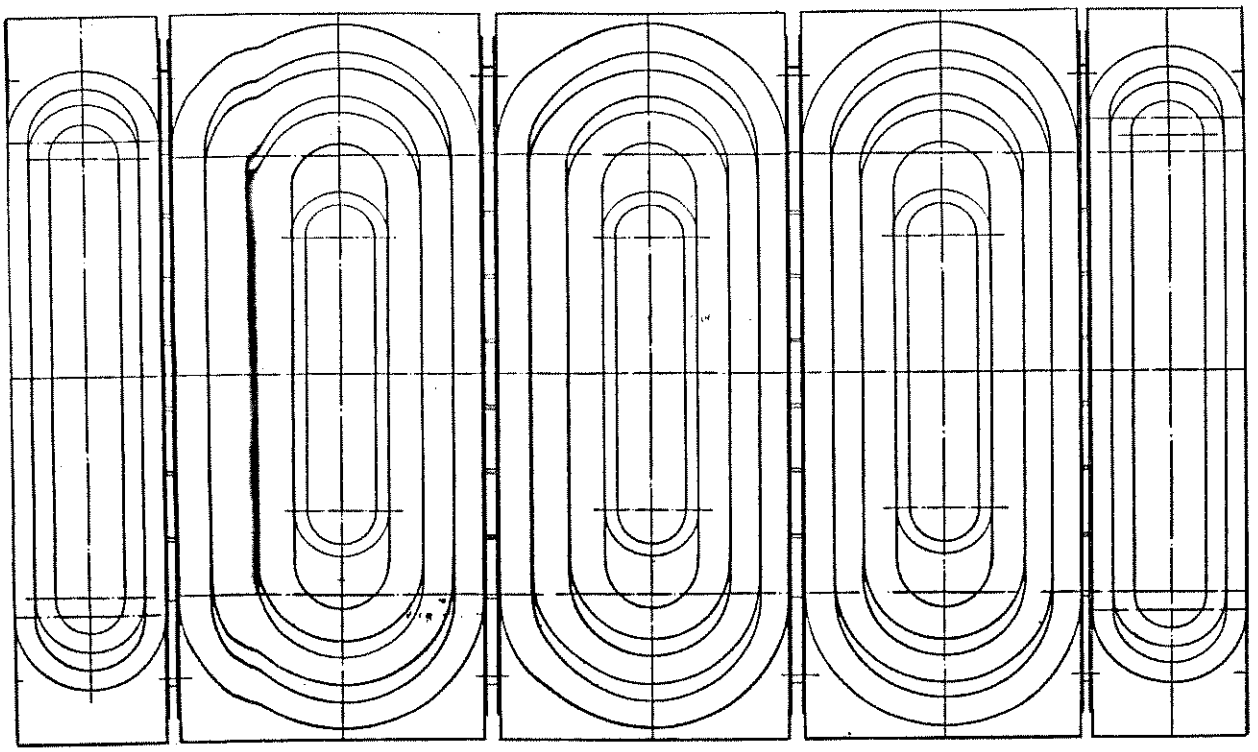


Fig. 1 - "Wiggler" supercondutor de cinco pólos - vista da planta

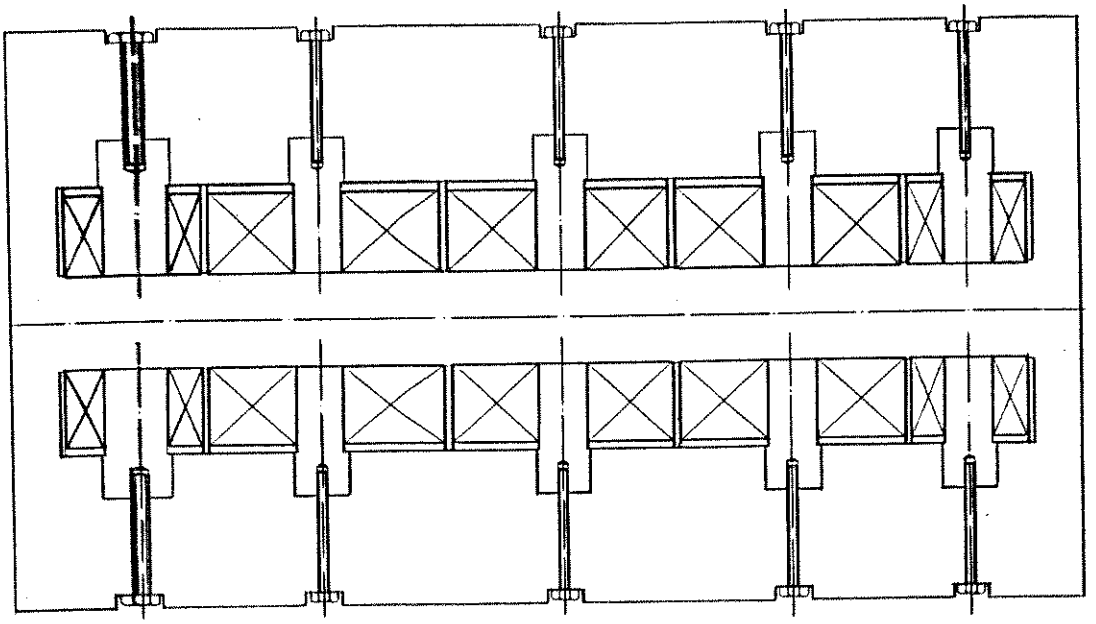


Fig. 2 - "Wiggler" supercondutor de cinco pólos - corte transversal

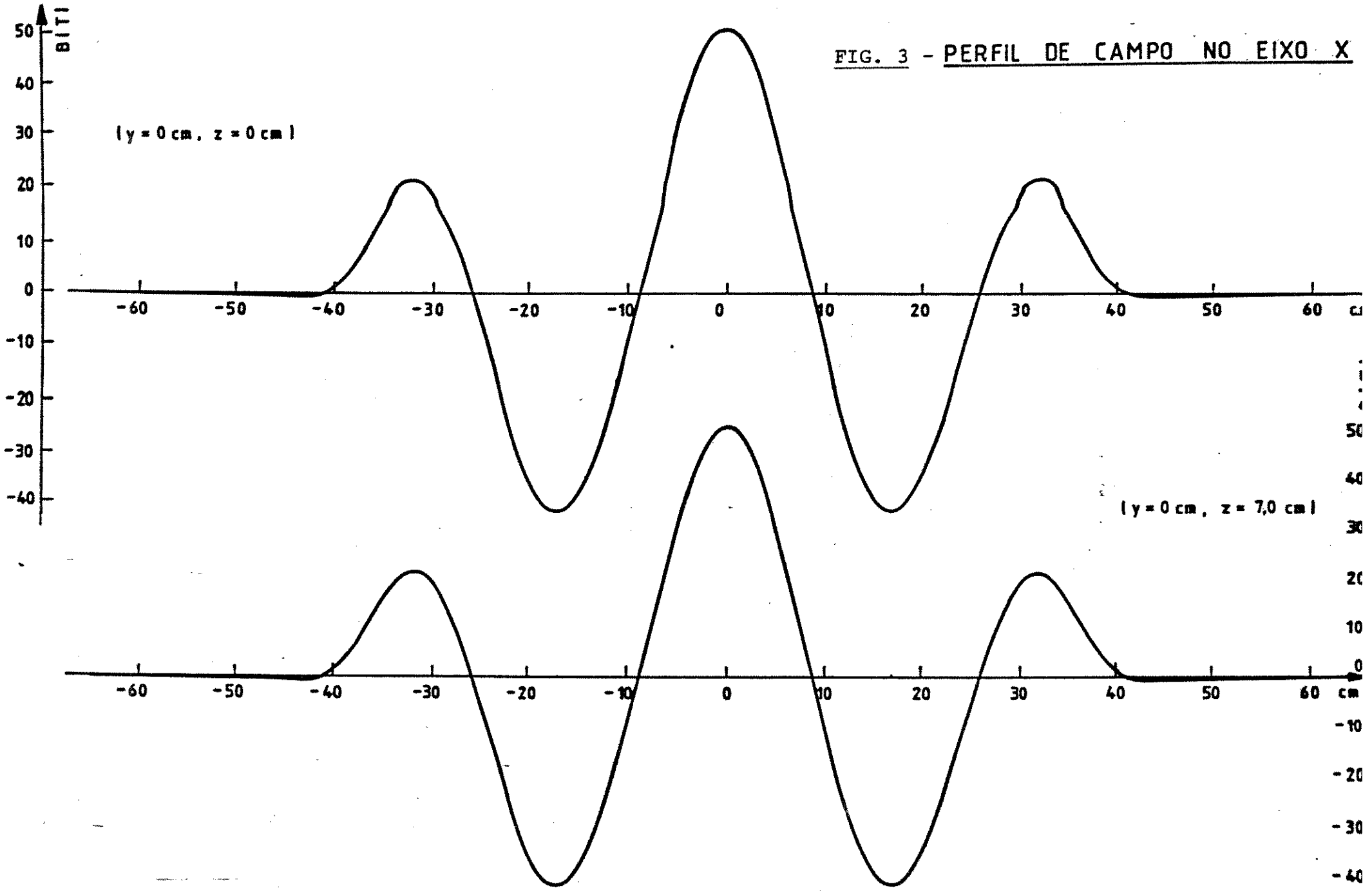


FIG. 3 - PERFIL DE CAMPO NO EIXO X

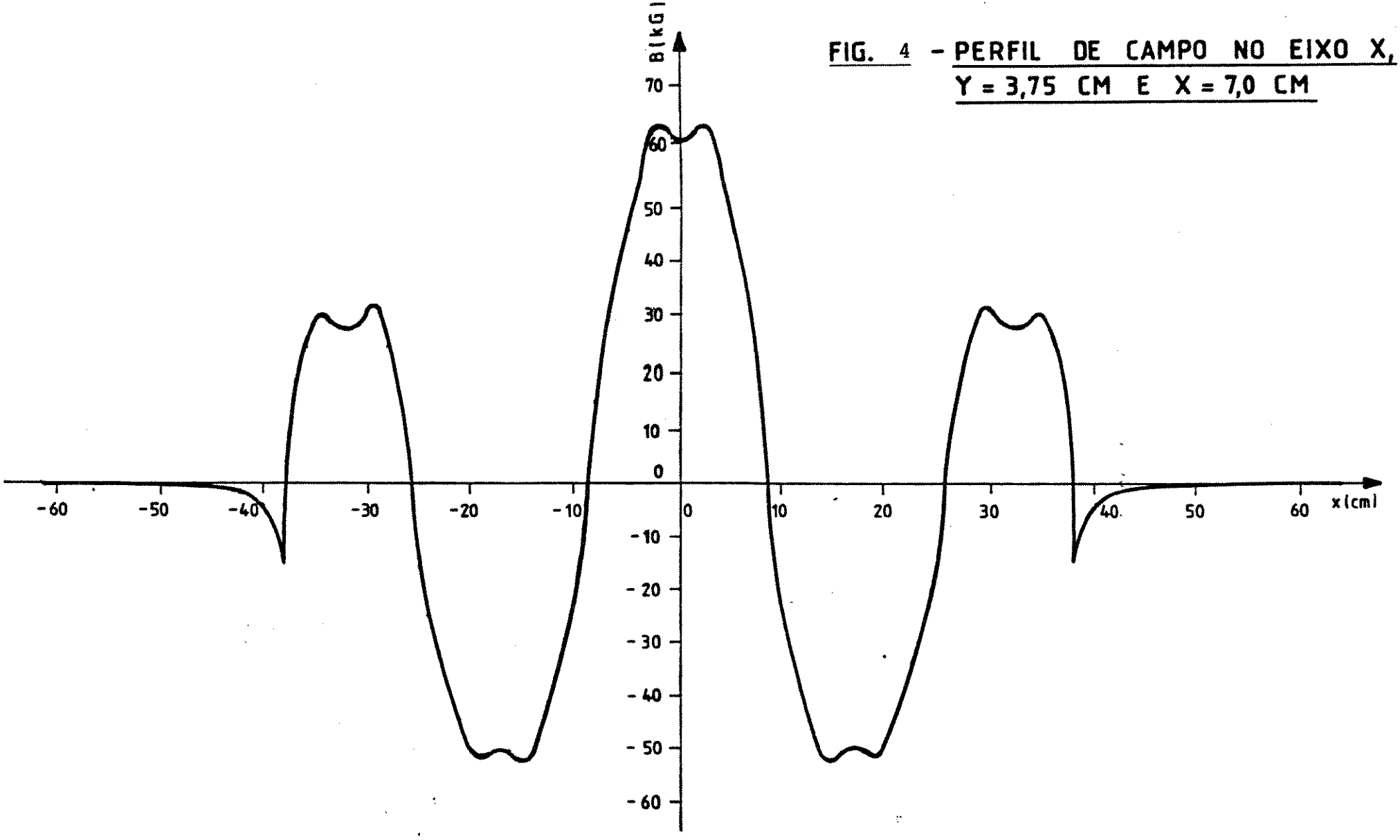


FIG. 4 - PERFIL DE CAMPO NO EIXO X, Y = 3,75 CM E X = 7,0 CM

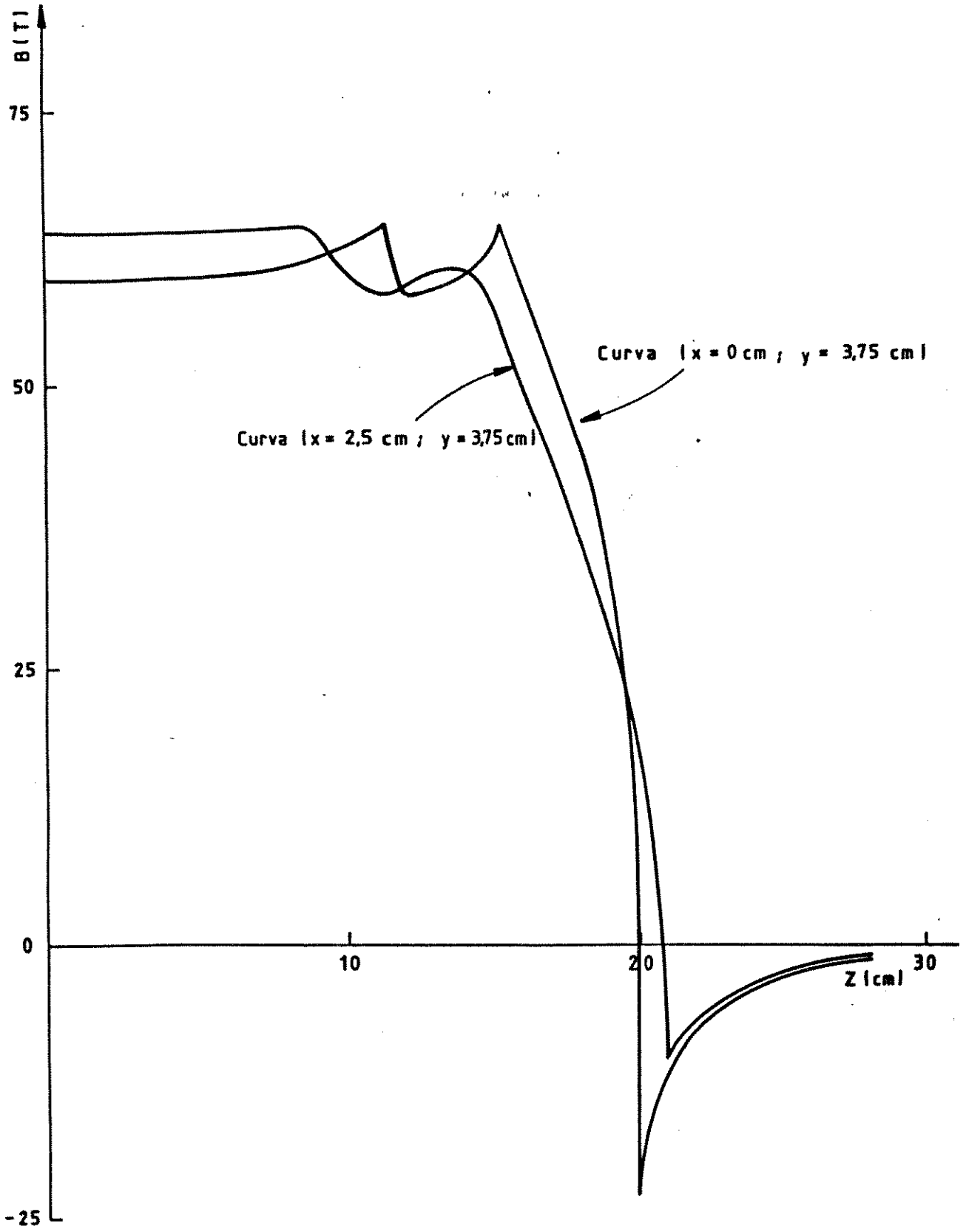


FIG. 5 - PERFIL DE CAMPO NO EIXO Z

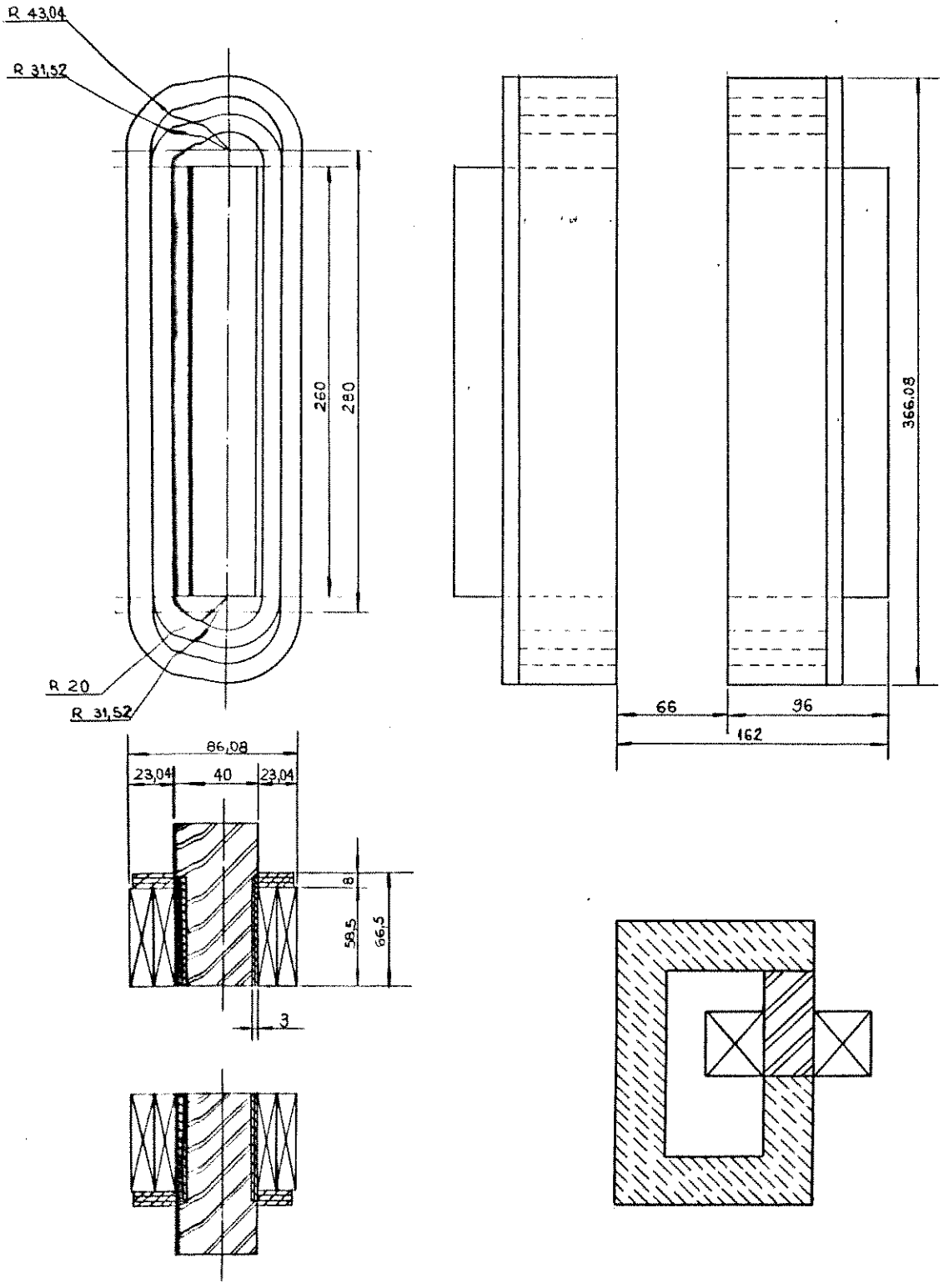


Fig. 6 - Magneto pista-de-corrida do pólo externo do "wiggler" supercondutor

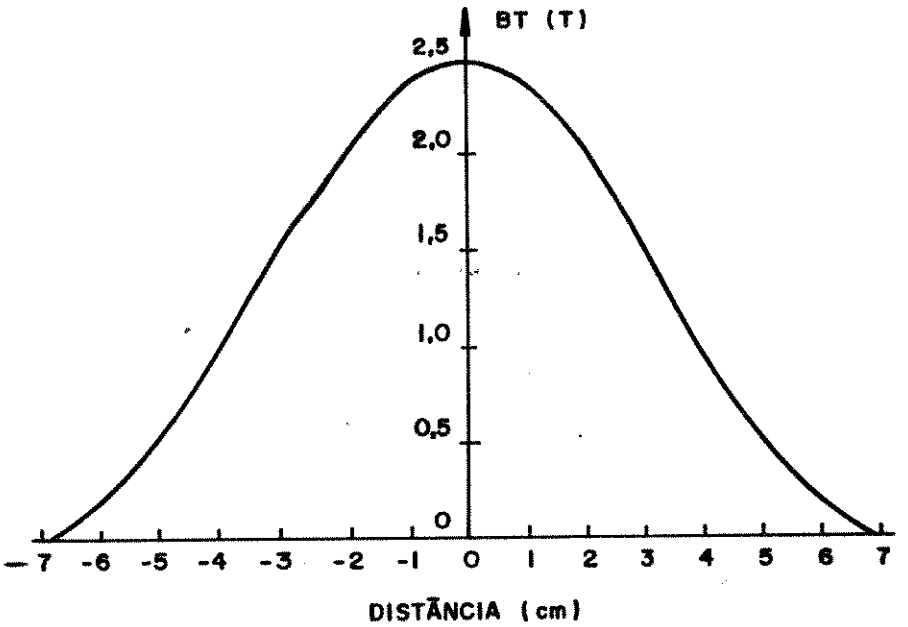


FIG. 7 - PERFIL DE CAMPO AO LONGO DO EIXO-x PARA O MAGNETO PISTA-DE-CORRIDA

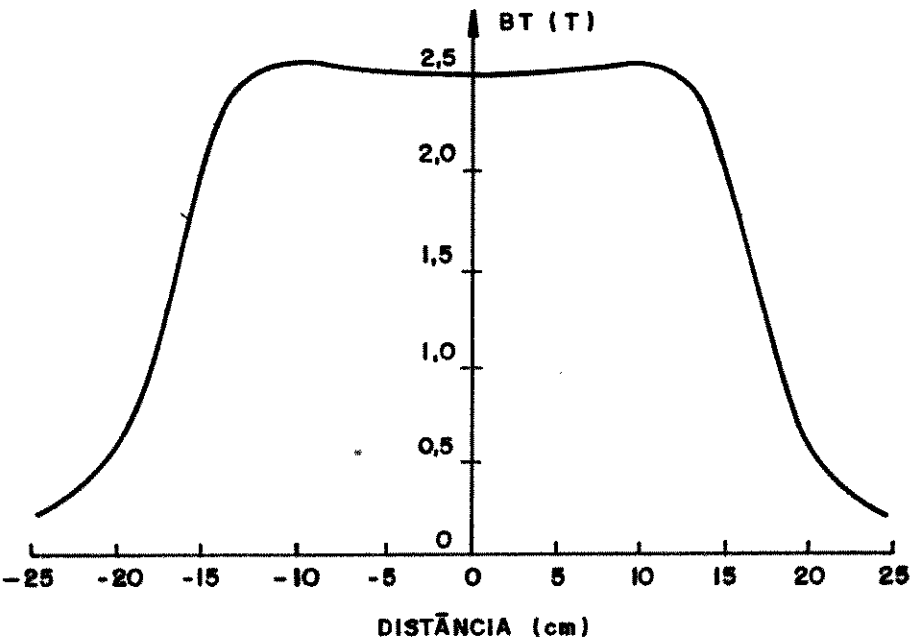


FIG. 8 - PERFIL DE CAMPO AO LONGO DO EIXO-z PARA O MAGNETO PISTA-DE-CORRIDA

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

/1/ WINICK, H. et. allii. Wiggler and Undulator Magnets.Physics Today - (May 1981), p. 50.

/2/ BAYNHAM, D. E. e WYBORN, B. E., A 5 Tesla Superconducting Wiggler Magnet. IEEE Trans. on May. MAG - 17 nº 5, (September 1981) p. 1595.

APÊNDICE 3

SEPARAÇÃO MAGNÉTICA DE MINÉRIOS

INTRODUÇÃO

A separação magnética de minérios é utilizada em vári estágios de processamento dos minerais e em outras áreas para pu ficação de água ou outros líquidos removendo as partículas com b xa ou elevada susceptibilidade magnética.

Os tipos de sistemas utilizados são de diversas form trabalhando a seco ou com fluído de arraste e para cada caso ter mos sua performance medida pela relação de partículas capturad comparadas com a quantidade existente no meio. Na maioria dos c sos estamos interessados em retirar as impurezas (partículas par magnéticas) do meio.

Além da variação dos tipos de separadores podemos tambe variar a forma dos filtros ou até da geometria dos fios que compõ a matriz.

Vamos analisar o caso mais simples que são as equações b sicas de interação entre partícula e filtro (fio simples) para c ter o raio de captura R_e.

Posteriormente consideraremos a separação a seco utiliz do magneto supercondutor onde as partículas estão em queda livre.

Finalmente mostraremos os resultados iniciais da compar ção entre dois sistemas de separação com magnetos supercondutor o sistema de matriz central e o sistema de canal helicoidal na p te externa do criostato.

Caso I - Fio Simples

Os filtros de separação magnética de minérios são cor truídos para extrair micro partículas paramagnéticas dos fluíd que passam através do filtro.

Para obtermos as equações básicas vamos considerar um fi

fino sob ação de um campo magnético Ho e estudar as interações entre este fio e uma partícula paramagnética movendo-se com velocidade Vo, conforme fig. 1.

A partir da equação de Stoke e usando as relações geométricas:

$$F_V = -6\pi\eta\, RV \quad (1) \qquad x/a = \sigma_a \cos\theta \quad (2) \qquad Y/a = \sigma_a \operatorname{sen}\theta \quad (3)$$

obtemos:

$$F_r = 6\pi\eta\, bV_m (K/r_a^5 + \cos 2\theta / r_a^3) \text{ onde } r_a = r/a \qquad (4)$$

$$F_\theta = 6\pi\eta\, bV_m \operatorname{sen} 2\theta / r_a^3 \qquad (5)$$

$$V_m = \frac{2}{9} (\mu o\, \chi b^2 \frac{M_s}{a} \frac{H_o}{\eta}) : \text{Velocidade magnética} \qquad (6)$$

$$K = M_s/2H_o : \text{força de curto efeito} \qquad (7)$$

onde:

a = raio do fio
b = raio da partícula
η = viscosidade do fluído
V_m = velocidade magnética
$\chi = \chi_p - \chi_L$ = susceptibilidade relativa
M_s = magnetização de saturação

Podemos escrever a equação de equilíbrio das forças atuantes no sistema como sendo $F_m + F_s = 0$, onde F_m é a força magnética F_v a força viscosa atuando ambas na partícula a ser capturada. força gravitacional pode ser desprezada pois $F_m/F_g \tilde{=} 2000$ vezes.

Agora vamos calcular a equação da trajetória da partícul para analisar o raio de captura, ou seja a região a partir da qua a partícula será capturada pelo fio.

$$V_r = V_o (1 - 1/r_a^2) \cos\theta \quad (8$$

$$V_\theta = V_o (1 + 1/r_a^2) \operatorname{sen}\theta \quad (9$$

$$(F_V)_r = 6\pi\eta\, b \left(a\frac{dr_a}{dt} - V_r\right) \quad (10$$

$$(F_V)_\theta = 6\pi\eta\, b \left(ar_a \frac{d\theta}{dt} - V_\theta\right) \quad (11$$

Combinando estas equações com as equações básicas obtida a partir da fig. 1 teremos:

$$a\frac{dr_a}{dt} = V_o(1-1/r_a^2)\cos\theta - V_m(K/r_a^5 + \cos 2\theta/r_a^3) \quad (12$$

$$ar_a \frac{d\theta}{dt} = -V_o(1+1/r_a^2)\operatorname{sen}\theta - V_m \operatorname{sen} 2\theta/r_a^3) \quad (13$$

A fig. 2 ilustra a trajetória da partícula e vamos escrever $R_c = f(V_m/V_o, K)$, que desprezando os termos de pequena duraçã teremos:

$$R_c = \begin{cases} V_m/2V_o \quad \text{para } V_m/V_o < \sqrt{2} \\ \frac{3\sqrt{3}}{4} \left(\frac{V_m}{V_o}\right)^{1/3} \quad \text{para } V_m/V_o > 1 \end{cases} \quad (14$$

Observar que as equações aqui obtidas são válidas par $V_o // H_o$ e perpendiculares ao fio, outros arranjos ou configuraçõe darão origem a outra formulação.

Caso II - Separação Magnética a Seco no Ar

O sistema consiste em um magneto supercondutor split-pai idêntico ao que foi projetado e construído conforme descrito n capítulo VI, instalado em um criostato especial para permitir máximo de campo magnético e gradiente atuando nas partículas. Quando energizamos as bobinas com correntes em oposição teremos componente máxima do campo radial que pode ser plotada como n fig. 3.

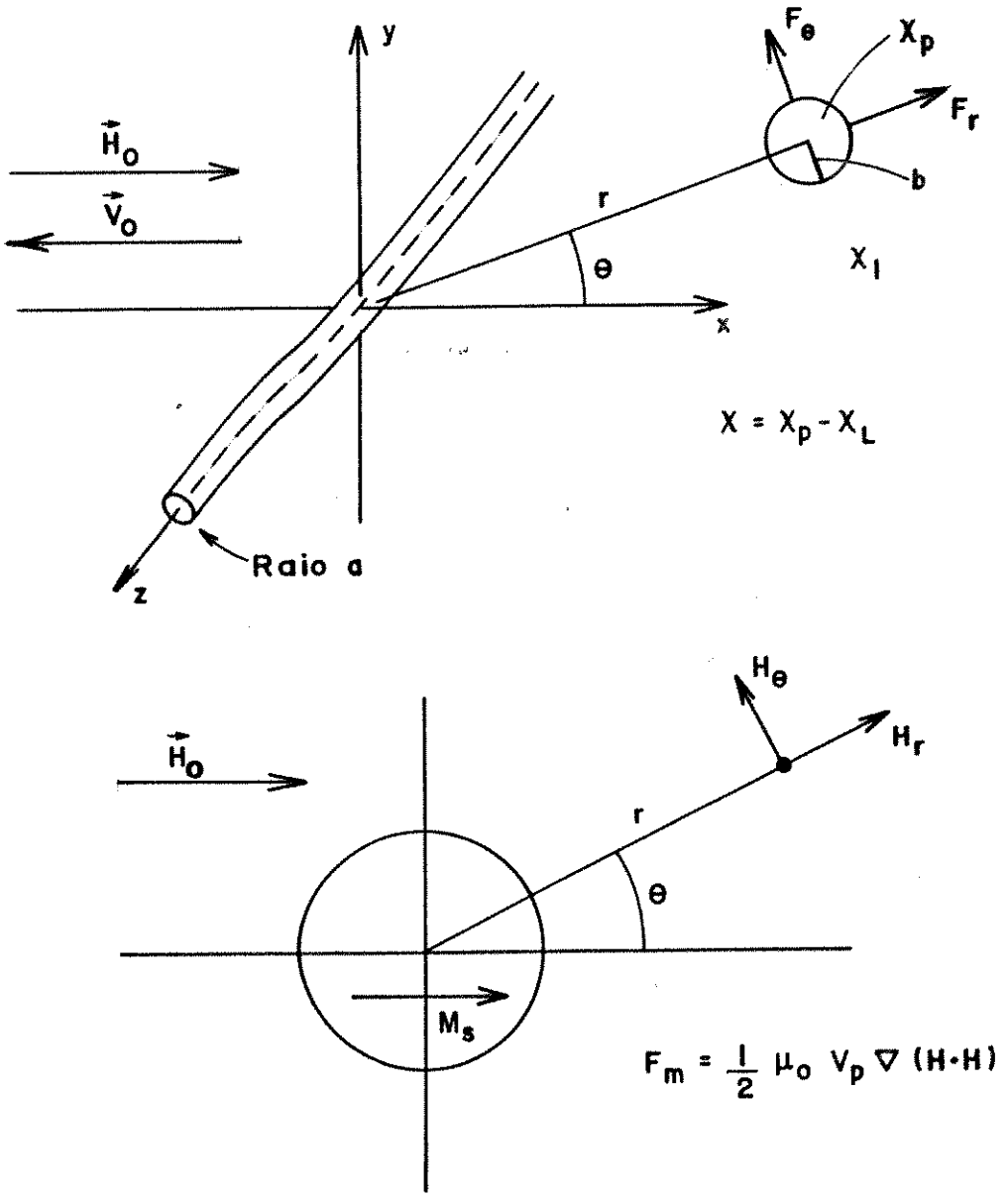


FIG. 1 - INTERAÇÕES FIO SIMPLES E PARTÍCULA

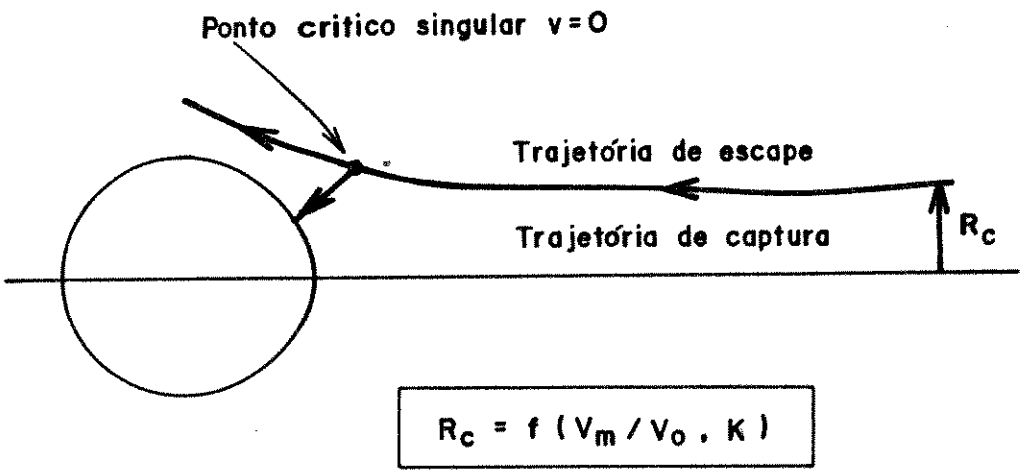


FIG. 2 - TRAJETÓRIA DA PARTÍCULA

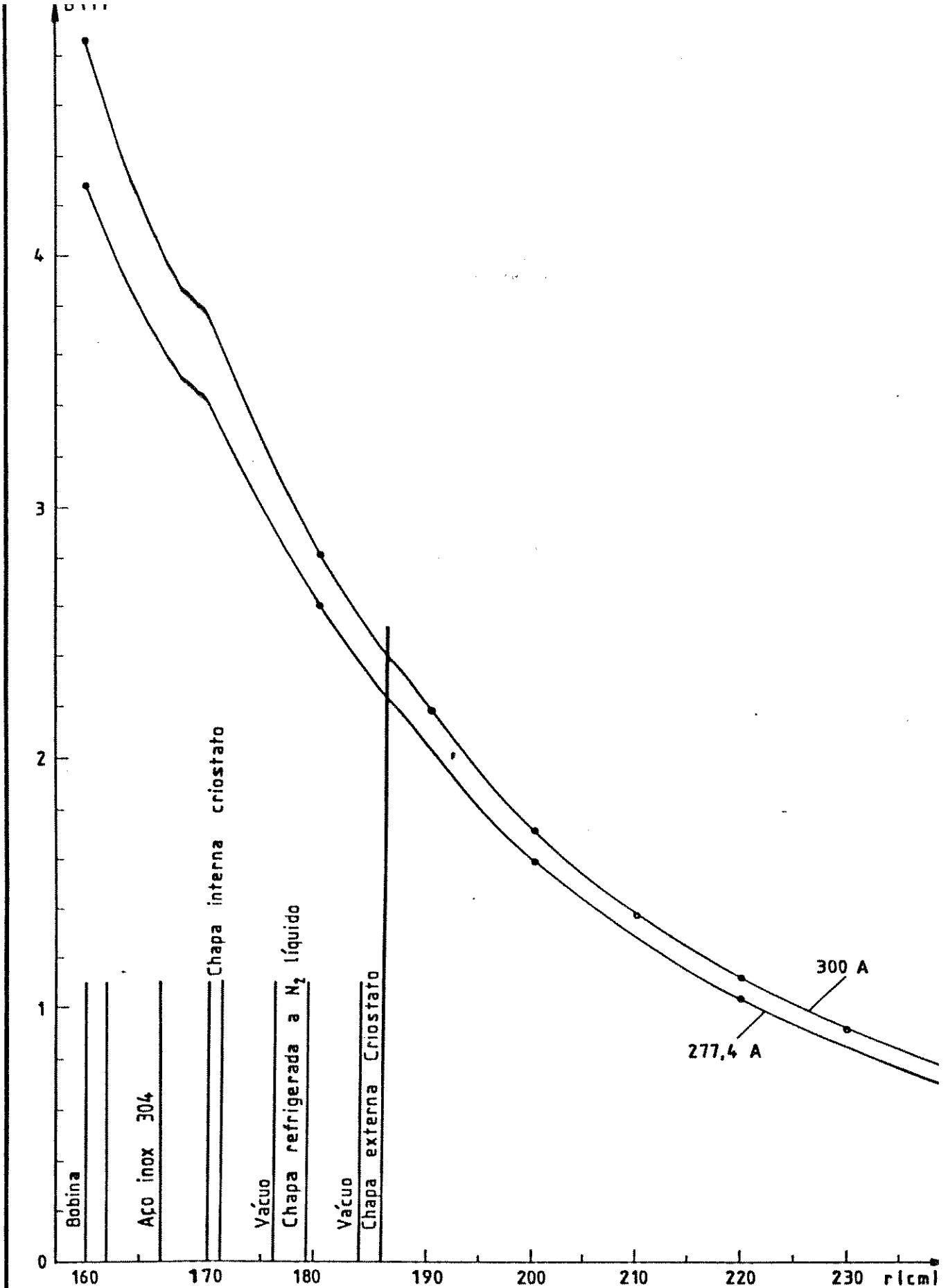


FIG. 3 - PERFIL E GRADIENTE DO CAMPO FORA DO CRIOSTATO

Formato A4 x 210x

A Força magnética que atua numa partícula de massa M susceptibilidade por unidade de massa χ será:

$$F_m = \frac{1}{2} \mu o (\chi - \chi') M \nabla(H^2) \qquad (1$$

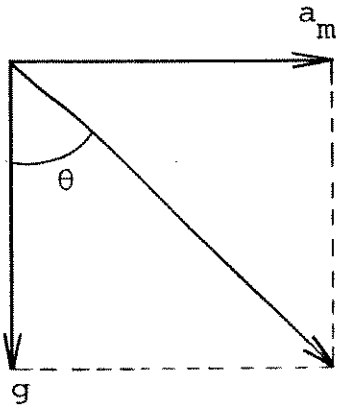
onde χ' é a susceptibilidade do meio e H o campo magnético na região.

Considerando o caso em que o meio utilizado é o ar pode mos desprezar χ', e então escrevemos a aceleração magnética como sendo:

$$a_m = \frac{F_m}{M} = \frac{1/2\mu o \ \chi \ H\nabla H}{M} = 1/2\mu o \ \chi \ H\nabla H \qquad (1$$

que no sistema de unidade e.m.u. pode ser simplificado para a χ H∇H.

A intensidade de H∇H normalmente é 10^8G/cm que permite termos valores elevados de aceleração magnética a_m para partícul com susceptibilidade da ordem $\chi = 10^{-5}$ e.m.u/gm onde resulta a_m (aceleração gravitacional). Neste caso temos a partícula acel rada pela relação $\theta = tg^{-1}(am/g)$ conforme fig. 4.



a_m/g

Fig. 4

Vamos considerar a montagem da fig.5 onde estão atuand força magnética F_m, a força gravitacional F_g e a força viscosa A equação de Stokes permite escrever que $Fd=6\pi r \eta V$ onde $\eta=2 \times 1($ poise, e agora relacionando F_d para M_g obtemos a velocidade ter nal de:

$$V_t = \frac{2}{9} \frac{r^2 \rho g}{\eta} \qquad (1$$

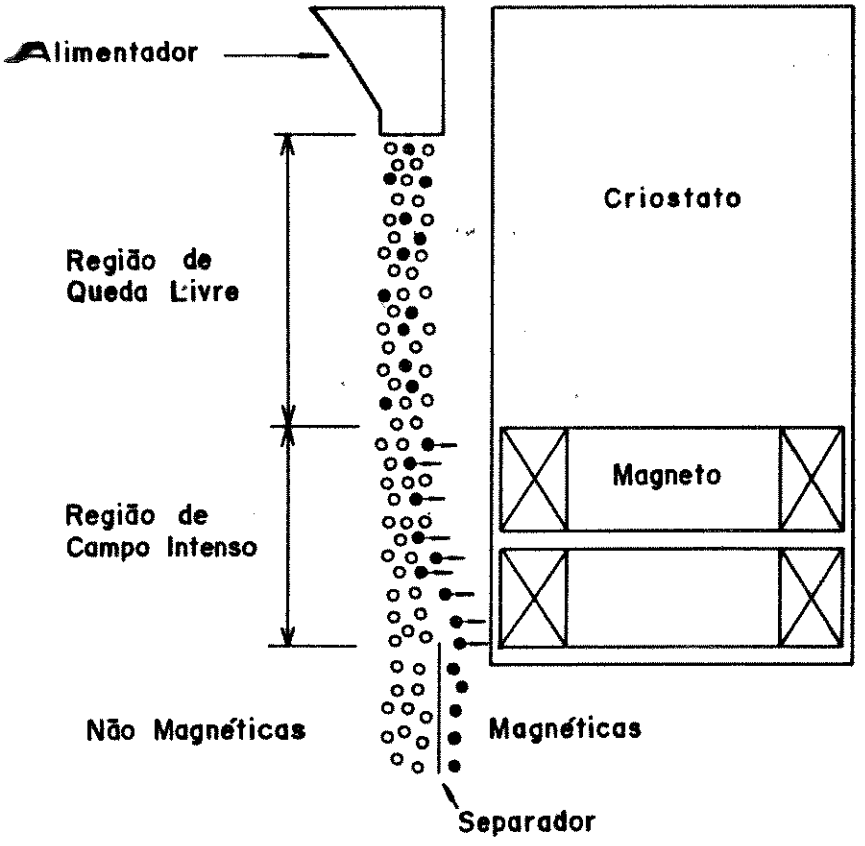


FIG. 5 - SEPARADOR MAGNÉTICO A SECO

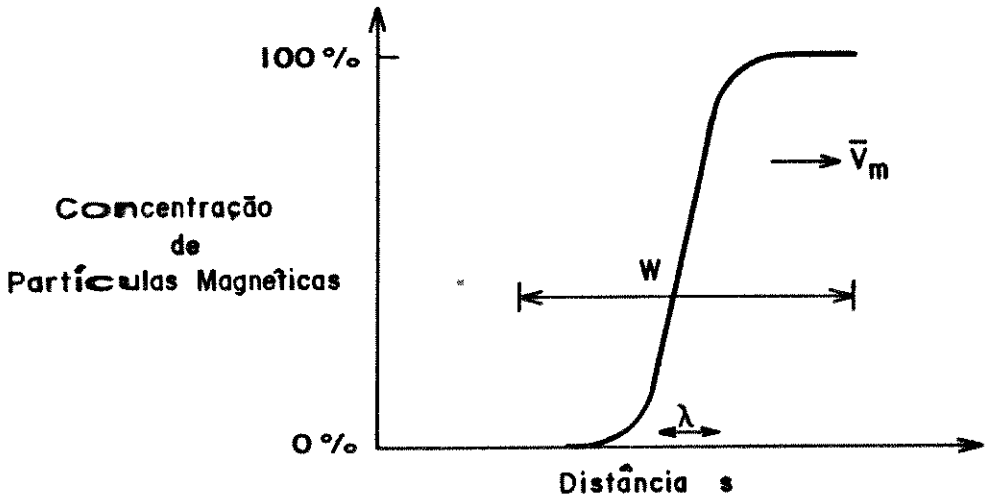


FIG. 6 - PERFIL DA DENSIDADE DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

onde ρ é a densidade de partícula.

Quando a partícula entra na região de alto campo magnético temos uma velocidade terminal magnética V_{tm} que rege o movimento nesta região.

$$V_{tm} = \frac{2}{9} \frac{r^3 \rho}{\eta}(a_m+g) \qquad (18$$

A equação de movimento, desprezando as possíveis colisões das partículas, na direção da aceleração resultante para uma distância s do magneto será:

$$s = \ell \, tg\theta = \ell \frac{a_m}{g} = \frac{\ell \chi \, H\nabla H}{g} \qquad (19$$

onde ℓ é o comprimento da região de alto campo magnético.

Considerando que η partículas por cm^3 chegam a velocidade terminal média $\bar{V}$ antes da região de alto campo podemos definir o caminho livre médio, sem colisão como:

$$\lambda = \frac{1}{\eta\sigma} \qquad (20$$

onde $\sigma = 4\pi r^2$ seção transversal da partícula ou o fator de alimentação f como função da densidade de partículas como:

$$f = \frac{4\pi \, \eta \, r^3}{3} \rightarrow \lambda = \frac{r}{3f} \qquad (21$$

Desta forma podemos calcular a eficiência do separador como:

$$Q \tilde{-} W \, p \, \bar{\rho} \, f \, \bar{V}[g/s] \qquad (22$$

onde W é a largura do fluxo de partículas alimentadas ao redor do magneto de perímetro p.

Para obtermos o ponto ótimo de eficiência podemos ajustar W ao ℓ que é a região de alto campo magnético ou seja

$$Q_o = \ell p \bar{\rho} \, f \, \bar{V}_m = \ell p \bar{\rho} \sqrt{\chi H \nabla H \, rf/6} \qquad (23$$

Caso III - Tipo Helicoidal

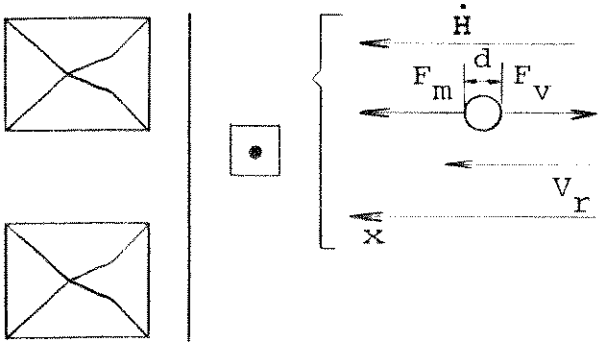
O sistema mostrado na fig.7 opera opcionalmente com "HGMS High Gradient Magnetic Separator" ou ""HCMS-Helical Channel Magnetic Separator" e está sendo montado com o magneto supercondutor "split-pair" executado no capítulo VI.

No caso "HCMS" podemos escrever:

$$F_m + F_v = 0 \qquad \text{ou seja} \tag{24}$$

$$F_m = V_p M^p \dot{H} \tag{25}$$

$$F_v = -6\pi\,\eta\,\frac{d}{2}\,V_r \rightarrow \bar{V}_r = \frac{d^2 M^p \dot{H}}{18\eta} \tag{26}$$



como $\vec{V}_r = \frac{d\vec{x}}{dt}$ e $\dot{H} = \dot{H}_o + \alpha x$ gradiente do campo magnético dentro do canal, teremos a equação de movimento da partícula como sendo:

$$X_{out} = \frac{\dot{H}o}{\alpha}\left[\exp\left(\frac{\alpha d^2 M^p}{18\eta}\cdot\frac{L}{Vf}\right)-1\right] \tag{27}$$

L = Comprimento de uma volta do canal
V_f = Velocidade de escoamento do fluído
η = Coeficiente de viscosidade do fluído
d = Diâmetro da partícula
M^p = Magnetização da partícula

Se instalarmos na saída do canal, após a partícula ter viajado uma volta completa no helicoidal, uma divisão conforme fig 8 , podemos calcular a razão de captura das partículas em suspensão como sendo:

$$R = \frac{X_{out}}{\beta w_o} = (\exp \frac{\alpha}{D_m} - 1)\frac{\dot{H}o}{\alpha\beta w_o} \qquad (2$$

onde

$$D_m = \frac{18\eta Vo}{d^2 M P_L} \qquad (2$$

Wo : largura do canal

β : fração do canal com separador

D_m : densidade magnética

A fig. 9 apresenta em termos comparativos a relação (captura entre "HGMS" e "HCMS" que mostra melhores resultados pa: o HGMS de duas ordens de grandeza, porém estudos continuarão sen feitos para melhorar a performance do HCMS. Um dos primeiros plementos será a colocação de uma matriz dentro do canal permit: do o aumento do gradiente do campo magnético que influi diretame: te no X_{out} permitindo uma captura de maior número de partículas.

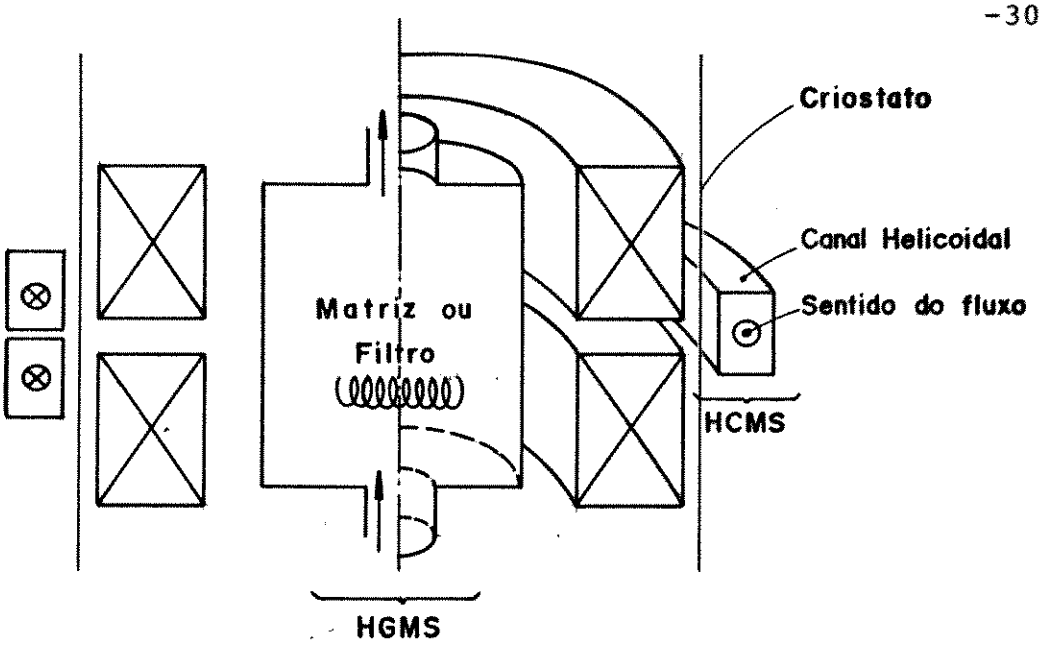


FIG. 7 - SEPARADOR "HGMS" OU "HCMS"

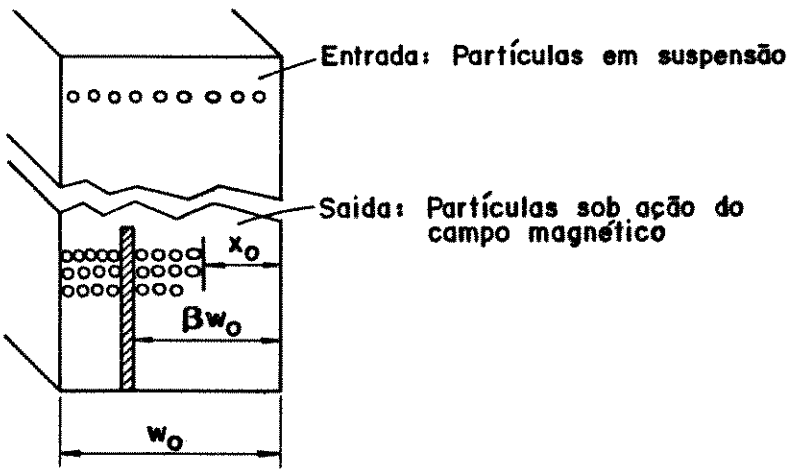


FIG. 8 - CANAL HELICOIDAL DE SEPARAÇÃO

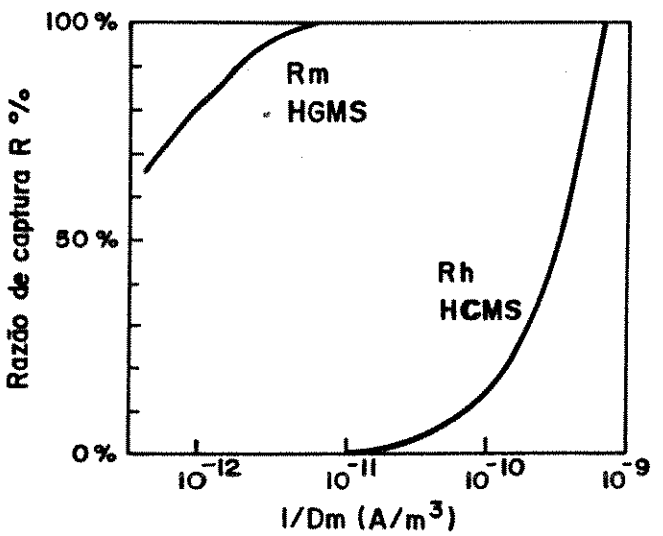


FIG. 9 - COMPARACÃO ENTRE RAZÃO DE CAPTURA HGMS E HCMS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

/1/ WATSON, J.H.P.; Magnetic Filtration, J. Appl. Phys., 44 (9): Sept. 1973, p. 4209-4213.

/2/ KOPP, J. and GOOD, J.A. The Physics of high intensity dry Magnetic Separation. IEEE Trans. on Magnetics, MAG-18 (3): May 1982. p.833-835

/3/ OHARA, T., BALDAN, C.A. et alli ; Comparação da Eficiência do Equipamento Supercondutor de Separação Magnética. JIEE / Annual Meeting, trabalho apresentado no Congresso da Sociedade de Eletrotécnica do Japão, 1983.

/4/ Theory and Practice of Modern Magnetic Separation. Private Note, Institute of Cryogenics, University of Southampton, Sept. 23-25, 1985.