

3

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE COBRE NOS
FERROS FUNDIDOS NODULARES HIPERÉU
TÉTICOS SOBRE A USINABILIDADE E
PROPRIEDADES MECÂNICAS

118/84

*Este exemplar corresponde
a redação final da Tese
defendida por Hamartine
Bezerra de Lima e apro-
vada pela Comissão Julga-
dora em 23/01/85*

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'A. B. Bezerra de Lima', enclosed within a circular scribble.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Lamartine Bezerra da Cunha

Trabalho apresentado à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Campinas da UNICAMP, como parte dos requisitos para obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Nivaldo Lemos Cupini
Orientador

CAMPINAS
- DEZEMBRO DE 1984 -

UNICAMP
BIBLIOTECA



UNICAMP

D E C L A R A Ç Ã O

Declaro, para os devidos fins, que o Sr. Lamartine Bezerra da Cunha defendeu Tese de Doutorado e recebeu o título de "Doutor em Engenharia Mecânica", área de Materiais e Processos, no dia 23 de janeiro de 1985, com o trabalho intitulado: "INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE COBRE NOS FERROS FUNDIDOS NODULARES HIPEREUTÉTICOS SOBRE A USINABILIDADE E PROPRIEDADES MECÂNICAS" obtendo o grau " A " (Excelente).

A banca examinadora foi constituída pelos Professores Doutores: Nivaldo Lemos Cupini (FEC/UNICAMP-Orientador), Ricardo Henrique Medrano (IF/UNICAMP), Maurício Prates de Campos Filho (FEC/UNICAMP), Maria Helena Robert (FEC/UNICAMP) e Abelardo Alves de Queiroz (UFSC/Florianópolis).

Campinas, 23 de janeiro de 1985.

Prof. Dr. Nivaldo Lemos Cupini
Orientador

À minha querida esposa LURDINHA, companheira
incansável de todas as horas.

Aos meus filhos queridos, DANIEL e ANDRÉ.

À minha querida mãe ROSA que sempre me incen-
tivou.

À memória de meu pai, DAVID.

À memória do Prof. Dr. JAROSLAV KOZEL, meu
orientador do mestrado que tanto me ensi-
nou.

Eu dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. NIVALDO LEMOS CUPINI, pela orientação e valiosos estímulos recebidos durante a realização deste trabalho, também pelas lições recebidas através dos seus comentários e sugestões sempre oportunos, pela amizade tão espontânea surgida nestes anos de tão proveitoso convívio, minha sincera gratidão.

À CAPES, a UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO e a FINEP, pelo apoio financeiro.

À FUNDIÇÃO TUPY S/A (JOINVILLE SC), pelos materiais fornecidos, apoio técnico e bibliográfico.

À AÇOS VILLARES - SP e SIDERÚRGICA NOSSA SENHORA APARECIDA - Sorocaba-SP pelas ferramentas gentilmente cedidas.

Ao CENTRO DE TECNOLOGIA DA UNICAMP, SENAI - Campinas SP e ao GEPROM - UNICAMP, pelo apoio técnico e instrumental.

Com o intuito de deixar gravada a sua gratidão, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho, o autor deseja expressar seu reconhecimento aos Engenheiros da Fundação Tupy S/A: CARLOS H. CASTELLO BRANCO e EDMUNDO BECKER; aos laboratoristas e técnicos do DEM/UNICAMP; WALMIR, CARLOS, WANDERLEY, LAERTE E RITA; aos fotógrafos: DONADON e MARIO WALTER; ao desenhista WILTON, e aos colegas: ANSELMO, JAIR, SEVERINO, GILBERTO e JOSÉ ALDO, e a todos que de uma forma ou de outra contribuíram para a execução deste trabalho.

Registro também meu agradecimento sincero a DEUS, por me ter dado condições de vencer todos os obstáculos e conseguir concluir este trabalho.

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE COBRE NOS FERROS FUNDIDOS NODULARES HIPEREUTÉTICOS SOBRE A USINABILIDADE E PROPRIEDADES MECÂNICAS

R E S U M O

Neste trabalho é estudada a usinabilidade e propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares hipereutéticos em vários estados de tratamento térmico em função da influência de adições de teores crescentes de cobre desde zero até 1,04%. Verificou-se os efeitos destas adições na microestrutura de materiais provenientes de diversas corridas e nos estados brutos de fusão, recozidos e normalizados. Dentro de um rigoroso controle estatístico foram realizados ensaios mecânicos e determinadas as propriedades: dureza Brinell, limite de resistência à tração e alongamento. Com o mesmo controle foram realizados ensaios de usinabilidade envolvendo operações de torneamento cilíndrico e de faceamento segundo vários critérios onde, alguns ensaios foram executados segundo a norma francesa "AFNOR A03-654", realizou-se uma determinação indireta segundo a fórmula proposta por DATSKO e também, o ensaio segundo a medida da temperatura de usinagem, cuja metodologia de ensaio e índice de usinabilidade são aqui propostos. Calculados os índices de usinabilidade estes foram correlacionados com as propriedades citadas e entre si, observando-se boas correlações em todos os casos e uma tendência geral de redução da usinabilidade com os teores crescentes de cobre dentro de um nível de confiança de 95% de probabilidade.

INFLUENCE OF COPPER ADDITIONS ON THE HYPEREUTECTIC DUCTILE
IRON MACHINABILITY AND MECHANICAL PROPERTIES

A B S T R A C T

A study of the influence of copper additions up to 1.04 per cent on the hypereutectic ductile iron machinability and mechanical properties is presented for ductile irons in as-cast, annealed and normalized conditions, coming of different mould pourings. Through the statistical accurate control the following properties were determined: Brinell hardness, ultimate tensile strength and elongation. The machinability tests were conducted with the same accuracy, in cylindrical and facing turning in accordance with several criterias where, some tests were executed in accordance with: the french norm "AFNOR A03-654" and the DATSKO equation of machinability, and also was made a test with measure of machining temperature, whose methodology and manner to compute the index are proposed in this work. all machinability indexes were computed and correlated with properties mentioned above and with themselves, giving very good correlations. On the other hand, the increase of copper additions decreases the machinability with the reliance level of 95 per cent of probability.

LISTA DE SÍMBOLOS UTILIZADOS

RELATIVOS AS PROPRIEDADES MECÂNICAS:

- HB - dureza Brinell (N/mm^2)
- σ_r - limite de resistência à tração (N/mm^2)
- P - carga aplicada na ruptura (N)
- S - área (mm)
- E - alongamento (%)
- L_0 - comprimento antes da deformação (mm)
- L_1 - comprimento após a deformação (mm)
- Rf - proporção de área na ruptura
- S_0 - área antes da deformação (mm^2)
- S_f - área após a deformação (mm^2)
- d_1 - diâmetro do núcleo do corpo de prova de tração (mm)
- d_2 - diâmetro da cabeça do corpo de prova de tração com rosca M12 (mm)
- L_c - comprimento da cabeça do corpo de prova de tração (mm)
- L_m - comprimento de medida do corpo de prova de tração (mm)
- L_t - comprimento total do corpo de prova de tração (mm)
- r - raio de arredondamento do corpo de prova de tração (mm)

RELATIVOS AOS ENSAIOS DE USINABILIDADE

- I.U - Índice de usinabilidade (%)
- T.C - torneamento cilíndrico
- θ_v - temperatura de usinagem para uma dada velocidade de corte (mV)

- t_m - temperatura de usinagem obtida através de média ponderada em relação aos tempos de corte (mV).
- a - avanço (mm/volta)
- v - velocidade de corte (m/min)
- t_c - tempo de corte (min)
- p - profundidade de corte (mm)
- D_0 - diâmetro externo do corpo de prova no ensaio T.C (mm)
- ℓ_0 - comprimento de avanço em cada anel (mm)
- v_{comp} - velocidade de corte comparativa (m/min)
- v_n - velocidade de corte do enésimo anel (m/min)
- v_{n-1} - velocidade de corte do anel número (n-1) (m/min)
- ℓ - comprimento de avanço no anel em que ocorre a destruição da aresta cortante da ferramenta (mm)
- θ_i - temperatura da usinagem do iésimo anel (mV)
- t_{ci} - tempo de corte do iésimo anel (min)
- v_i - velocidade de corte do iésimo anel (m/min)
- v_r - velocidade de corte equivalente do ensaio Brandsma (m/min)
- D_1 - diâmetro do furo do corpo de prova na operação de faceamento (mm)
- D - diâmetro onde ocorre a destruição da aresta cortante no 1º ensaio (mm)
- D_3 - diâmetro onde ocorre a destruição da aresta cortante no 2º ensaio (mm)
- X - expoente da equação de Taylor
- T - vida da ferramenta (min)
- N, n - rotação (rpm)
- m - expoente da rotação no ensaio Mathon
- v_{LF} - velocidade limite de faceamento (m/min)
- L - representa o percurso de corte no registro da temperatura de usinagem (mm)

- V_p - velocidade do papel do registrador
- L_a - percurso de avanço (mm)
- v_{60} - velocidade de corte para uma vida de 60 minutos (m/min)
- $D_{0,2}$ - diâmetro correspondente a um recuo efetivo de 0,2 mm na ponta da ferramenta no ensaio Mathon (mm)
- q - comprimento característico no índice Datsko e envolve uma relação entre o avanço e a profundidade de corte
- m - expoente do avanço no cálculo de q
- y - parâmetro que é função do encruamento no cálculo de q
- σ - tensão (N/mm²)
- K - condutibilidade térmica (BTU/hr.ft.°F)
- n - coeficiente de encruamento
- K' - tensão real de ensaio
- γ - ângulo de saída
- ϕ - ângulo do plano de cisalhamento
- ρ - ângulo de atrito do material
- cp - profundidade da cratera
- cd - distância do centro da cratera à aresta de corte

ÍNDICE

Pág.

RESUMO

ABSTRACT

NOMENCLATURA

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO 1

CAPÍTULO 2

OS FERROS FUNDIDOS NODULARES 4

2.1. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS 4

2.2. INFLUÊNCIAS DO COBRE NOS FERROS FUNDIDOS NODULARES . 7

2.3. USINABILIDADE DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES 11

2.3.1. Influência da microestrutura 11

2.3.2. Influência da adição de elementos de liga, con-
dições de corte e propriedades dos ferros fun-
didos nodulares na usinabilidade 14

CAPÍTULO 3

USINABILIDADE 19

3.1. CONCEITUAÇÃO 19

3.2. PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUEM NA DETERMINAÇÃO DO ÍN-
DICE DE USINABILIDADE 20

3.3. CRITÉRIOS EMPREGADOS NOS ENSAIOS DE USINABILIDADE .. 20

3.4. COMENTÁRIOS SOBRE OS CRITÉRIOS E PARÂMETROS UTILIZA-
DOS NA AVALIAÇÃO DOS MESMOS 21

| | Pág. |
|---|------|
| 3.4.1. Parâmetros utilizados na avaliação dos critérios de usinabilidade | 21 |
| 3.4.2. Comentários sobre os critérios utilizados nos ensaios de usinabilidade | 26 |
| 3.4.3. Métodos indiretos para medida de usinabilidade | 37 |
| 3.5. OS ENSAIOS DE USINABILIDADE DO PONTO DE VISTA PRÁTICO | 39 |

CAPÍTULO 4

| | |
|--|----|
| METODOLOGIA DOS ENSAIOS | 40 |
| 4.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL | 40 |
| 4.2. FERROS FUNDIDOS ENSAIADOS | 42 |
| 4.2.1. Obtenção dos corpos de prova | 42 |
| 4.2.2. Composição química | 43 |
| 4.2.3. Tratamentos térmicos | 45 |
| 4.2.4. Análises metalográficas | 46 |
| 4.2.5. Ensaios de dureza | 59 |
| 4.2.6. Ensaios de tração | 59 |
| 4.3. ENSAIOS DE USINABILIDADE | 61 |
| 4.3.1. Parâmetros dos ensaios utilizados | 61 |
| 4.3.2. Equipamentos utilizados nos ensaios | 63 |
| 4.3.3. Procedimentos e descrição dos ensaios | 66 |
| 4.3.3.1. Ensaio T.C. | 66 |
| 4.3.3.2. Ensaios baseados na temperatura de usinagem | 72 |
| 4.3.3.2.1. Ensaio θ_v | 75 |
| 4.3.3.2.2. Ensaio θ_m | 77 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 4.3.3.3. Ensaio Mathon | 81 |
| 4.3.3.4. Ensaio v_{LF} | 86 |
| 4.3.3.5. Ensaio Datsko | 90 |

CAPÍTULO 5

| | |
|--|-----|
| RESULTADOS E DISCUSSÃO | 96 |
| 5.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS FERROS FUNDIDOS | 96 |
| 5.1.1. Microestruturas | 96 |
| 5.1.1.1. Resultados | 96 |
| 5.1.1.2. Discussão | 97 |
| 5.1.2. Ensaio de dureza | 98 |
| 5.1.2.1. Resultados | 98 |
| 5.1.2.2. Discussão | 100 |
| 5.1.3. Ensaio de tração | 102 |
| 5.1.3.1. Resultados | 102 |
| 5.1.3.2. Discussão | 105 |
| 5.1.4. Correlação entre HB e σ_r | 108 |
| 5.1.4.1. Resultados | 108 |
| 5.1.4.2. Discussão | 108 |
| 5.2. ENSAIO DE TORNEAMENTO CILÍNDRICO | 112 |
| 5.2.1. Índices de usinabilidade | 112 |
| 5.2.1.1. Resultados | 112 |
| 5.2.2. Discussão | 113 |
| 5.2.2.1. Correlação da usinabilidade com o teor de cobre | 114 |
| 5.2.2.2. Correlação da Usinabilidade com a Dureza .. | 118 |
| 5.2.2.3. Correlação da usinabilidade com o limite de resistência à tração | 121 |

| | Pág. |
|--|------|
| 5.2.3. Discussão conclusiva - Torneamento Cilíndrico | 123 |
| 5.3. ENSAIO θ_v - MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DE USINAGEM PARA UMA DADA VELOCIDADE | 125 |
| 5.3.1. Resultados | 126 |
| 5.3.2. Discussão | 127 |
| 5.3.2.1. Correlação da usinabilidade com o teor de cobre | 128 |
| 5.3.2.2. Correlação da usinabilidade com a dureza Brinell | 130 |
| 5.3.2.3. Correlação da usinabilidade com o limite de resistência à tração | 132 |
| 5.4. ENSAIO θ_m - CÁLCULO DA TEMPERATURA DE USINAGEM MÉDIA | 134 |
| 5.4.1. Resultados | 134 |
| 5.4.2. Discussão | 135 |
| 5.4.2.1. Correlação da usinabilidade com o teor de cobre | 135 |
| 5.4.2.2. Correlação da usinabilidade com a dureza Brinell | 137 |
| 5.4.2.3. Correlação da usinabilidade com o limite de resistência à tração | 139 |
| 5.4.2.4. Precisão do Ensaio " θ_m " | 141 |
| 5.5. COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES DE USINABILIDADE DOS ENSAIOS θ_v E θ_m | 141 |
| 5.6. ENSAIOS MATHON | 142 |
| 5.6.1. Ensaio com ferramenta 1 (Aço rápido VK10N) | 142 |
| 5.6.1.1. Resultados | 142 |

| | Pág. |
|---|------|
| 5.6.1.2. Discussão | 146 |
| 5.6.1.2.1. Precisão dos resultados | 146 |
| 5.6.1.2.2. Correlação da usinabilidade com o teor de cobre | 147 |
| 5.6.1.2.3. Correlação entre a usinabilidade e as propriedades dureza e limite de resistên- cia à tração | 149 |
| 5.6.2. Ensaio com ferramenta 2 (Aço ferramenta 52100) | 152 |
| 5.6.2.1. Resultados | 152 |
| 5.6.2.2. Discussão | 154 |
| 5.6.2.2.1. Precisão dos resultados | 154 |
| 5.6.2.2.2. Correlação da usinabilidade com o teor de cobre | 154 |
| 5.6.2.2.3. Correlações da usinabilidade com as pro- priedades dureza e limite de resistência à tração | 156 |
| 5.6.3. Influência do material da ferramenta no índi- ce de usinabilidade obtido no ensaio Mathon. | 158 |
| 5.7. ENSAIO v_{LF} - CÁLCULO DA VELOCIDADE LIMITE DE FACEA- MENTO | 162 |
| 5.7.1. Ensaio com ferramenta 1 | 162 |
| 5.7.1.1. Resultados | 162 |
| 5.7.1.2. Discussão | 163 |
| 5.7.2. Ensaio com ferramenta 2 | 168 |
| 5.7.2.1. Resultados | 168 |
| 5.7.2.2. Discussão | 169 |
| 5.7.2.2.1. A determinação do índice de usinabilida- de v_{LF} | 169 |

| | |
|---|-----|
| 5.7.2.2.2. Correlação entre a usinabilidade " v_{LF} 800" e o teor de cobre | 173 |
| 5.7.2.2.3. Correlação entre a usinabilidade " v_{LF} 800" e as propriedades dureza e limite de <u>re</u> sistência à tração | 174 |
| 5.7.3. Influência do material de ferramenta no "Ensaio v_{LF} " | 176 |
| 5.8. ENSAIO DATSKO | 176 |
| 5.8.1. Resultados | 176 |
| 5.8.2. Discussão | 177 |
| 5.8.2.1. Correlação da usinabilidade com o teor de cobre | 177 |
| 5.8.2.2. Correlação entre a usinabilidade e a dureza Brinell | 179 |
| 5.8.2.3. Correlação entre a usinabilidade e o limite de resistência à tração..... | 182 |
| 5.8.2.4. Discussão conclusiva - Ensaio DATSKO | 184 |
| 5.9. COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES DE USINABILIDADE | 186 |
| 5.9.1. Resultados | 186 |
| 5.9.2. Discussão | 186 |
| 5.9.2.1. Comparação dos resultados e correlações .. | 186 |
| 5.9.2.2. Comparação dos índices de usinabilidade em função da variação do teor de cobre | 191 |
| 5.9.2.3. Comparação dos índices de usinabilidade em função da dureza Brinell | 197 |

| | |
|--|-----|
| CAPÍTULO 6 | |
| CONCLUSÕES | 204 |
| CAPÍTULO 7 | |
| SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 209 |
| BIBLIOGRAFIA | 211 |
| APÊNDICE I | |
| RESULTADOS DOS ENSAIOS RELATIVOS AS PROPRIEDADES MECANICAS | 219 |
| APÊNDICE II | |
| FORMULÁRIO ESTATÍSTICO | 225 |
| APÊNDICE III | |
| ENSAIOS TC..... | 229 |
| APÊNDICE IV | |
| ENSAIOS DE TEMPERATURA | 231 |
| APÊNDICE V | |
| ENSAIOS MATHON E v_{LF} | 235 |
| APÊNDICE VI | |
| ENSAIOS DATSKO | 247 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os ferros fundidos nodulares foram produzidos pela primeira vez em 1946 [1] e devido a semelhança das suas propriedades mecânicas com os aços fundidos, os nodulares conquistaram logo uma boa posição no mercado dos manufaturados fundidos.

A produção mundial dos nodulares cresceu significativamente, paralelamente ocorreu o desenvolvimento e aperfeiçoamento das técnicas metalúrgicas de inoculação de substâncias químicas visando melhorar as propriedades mecânicas dos fundidos em geral. Com isto, surgiram pesquisas mostrando um sensível acréscimo conseguido nas propriedades mecânicas dos nodulares através da inoculação de elementos tais como: cobre, titânio, molibdênio, níquel, cromo, etc. [1, 2, 3].

O resultado destas inoculações é o surgimento de uma matriz perlítica no ferro fundido nodular quando este encontra-se no estado bruto de fusão e como consequência têm-se um sensível aumento das propriedades mecânicas, dureza e limite de resistência a tração e uma redução no alongamento [1].

O ferro fundido nodular com inoculações de elementos de liga perlitizantes encontra uma vasta aplicação na indústria manufatureira e como exemplos de peças pode-se citar: anéis de pistão, cilindros de motores e compressores, peças para indústria ferroviária, peças para implementos agrícolas, peças para máquinas ferramenta, etc.

A adição de cobre é preferida por apresentar várias vantagens [4,5,6] e que serão citadas no capítulo dois. O cobre pode ser combinado a outros elementos que produzem efeitos semelhantes.

Apesar de serem conhecidos os efeitos da adição do cobre nos ferros fundidos nodulares no que diz respeito as propriedades mecânicas, do ponto de vista da usinabilidade não se têm informações concretas. Existem especulações quanto a influência

do cobre na usinabilidade dos nodulares pois, já foram efetuados estudos com ferros fundidos cinzentos [7,8] e maleáveis pretos [1] onde a adição de cobre melhora a usinabilidade devido ao seu efeito grafitizante.

Disto se verifica que o cobre possui influências distintas nos ferros fundidos. Nos nodulares ele atua como elemento perlitizante, enquanto, nos cinzentos e maleáveis ele atua como elemento grafitizante.

Só uma pesquisa foi publicada sobre a usinabilidade de nodulares com adição de cobre e contudo, suas conclusões são incompreensíveis como será analisado no capítulo dois.

Em razão do aumento da dureza e do limite de resistência à tração seria lógico se obter uma redução na usinabilidade quando se adiciona cobre aos nodulares.

Para a indústria manufatureira o que interessa são informações práticas e objetivas que levem a realização de operações de usinagem onde se tenha um menor consumo de tempo, se utilize um ferramental de preço inferior e que no conjunto o custo da operação seja menor.

Por outro lado, a indústria de fundição se interessa também em melhorar passo a passo as propriedades mecânicas dos seus produtos sem, no entanto, comprometer a usinabilidade destes.

Este trabalho tem três objetivos:

Primeiro: Estudar a usinabilidade dos ferros fundidos nodulares com adições de cobre em três estados de tratamento térmico e segundo três critérios de usinabilidade.

Segundo: Sugerir uma forma para o cálculo do índice de usinabilidade baseado na temperatura de usinagem bem como a metodologia de ensaio para medida desta pelo termopar peça-ferramenta.

Terceiro: Estabelecer correlações entre os diversos índices de usinabilidade resultantes.

Foram utilizados ferros fundidos nodulares hipereutéticos com as seguintes situações:

três composições químicas;
três teores de cobre;
três tratamentos térmicos.

Os índices de usinabilidade foram levantados com base nos seguintes ensaios:

- a) variação da velocidade de corte por incrementos no torneamento cilíndrico;
- b) variação contínua da velocidade de corte na operação de faceamento de RENAULT-MATHON;
- c) critério baseado na medida da temperatura de usinagem.

Obs.: (a) e (b) segundo a norma "AFNOR AO3-654" [9].

A partir dos ensaios citados foram calculados os índices de usinabilidade segundo cinco formas diferentes, quais sejam:

- Índice de usinabilidade baseado na variação da velocidade de corte por incrementos no torneamento cilíndrico.
- Índice de usinabilidade baseado no ensaio MATHON.
- Índice de usinabilidade baseado na velocidade limite de faceamento.
- Índice de usinabilidade baseado na temperatura de usinagem para uma dada velocidade de corte.
- Índice de usinabilidade baseado na temperatura média de usinagem durante o ensaio (a).

Além destes, usou-se o índice de usinabilidade determinado pelo método indireto segundo DATSKO [10].

CAPÍTULO 2

OS FERROS FUNDIDOS NODULARES

2.1. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

Os ferros fundidos nodulares surgiram em 1946 [1] e esta denominação deve-se a forma pela qual a grafita se apresenta, nódulos de grafita ou grafita esferoidal. São também chamados de ferros fundidos dúcteis devido as suas propriedades mecânicas.

Apresentam excelente resistência mecânica, tenacidade e ductilidade, seu limite de escoamento é mais elevado que nos ferros fundidos cinzentos e maleáveis e mesmo do que nos aços carbono sem elementos de liga. Possuem uma boa resistência ao impacto e boa capacidade de absorver vibrações.

São obtidos a partir de um ferro fundido com composição química semelhante ao ferro fundido cinzento ao qual se aplica um tratamento de nodularização. A exemplo dos cinzentos, pode-se dizer que são compostos por uma liga ternária Fe-C-Si, de modo que os fenômenos da transformação da austenita, no resfriamento lento são mais complexos.

O processo de nodularização consiste em adicionar ao metal líquido determinadas ligas contendo cério, magnésio, cálcio, lítio, sódio ou bário, cuja reação ocorre violentamente causando a fervura do banho de metal.

O resultado desta adição é uma inibição na formação da grafita durante um tempo relativamente curto. Inicialmente ocorre a solidificação da cementita que depois se decompõe ao cessar a reação de nodularização.

Com a decomposição da cementita origina-se o carbono livre, a grafita que cresce em todas as direções, adquirindo uma forma próxima da esférica. Esta teoria entretanto já é antiga, modernamente é aceita a teoria de que a grafita se forma no meio líquido.

Esta teoria já foi comprovada segundo citações que CASTELO BRANCO e SOUZA SANTOS fazem em seu trabalho [6]. Há inclusive, modelos para nucleação da grafita.

A forma esferoidal da grafita é mais favorável que a nodular, própria dos ferros fundidos maleáveis e por isso afeta menos a continuidade da matriz.

Como a reação de nodularização é rápida, torna-se necessário controlar a composição química, o tempo até o vazamento e a velocidade de resfriamento no molde [11,12].

O processo de nodularização sofreu aperfeiçoamento e modernamente se utiliza na inoculação o magnésio por ser de menor custo. A nodularização é feita em uma panela própria para a qual o material é transferido após a fusão e nela se faz a inoculação de uma liga Fe-Si-Mg.

Depois da reação, retira-se a escória e transfere-se o metal líquido para uma segunda panela onde se efetua inoculação com uma liga Fe-Si. Durante todo o processo há um rigoroso controle de tempo e temperatura até o vazamento [4].

O ferro fundido nodular possui ductilidade comparável ao do maleável e resistência a tração um pouco superior, podendo atingir valores maiores que 580 N/mm² [11].

Quanto à microestrutura podem apresentar matrizes ferríticas, perlíticas, mistas, martensíticas e austeníticas.

As matrizes austeníticas são obtidas pela adição de níquel 18 a 24%, cromo 1 a 3,5% e manganês 0,50 a 2,4%. Apresentam alta resistência mecânica e a corrosão.

Os ferros fundidos nodulares assim como os aços, podem ser submetidos aos tratamentos térmicos de recozimento, normalização e têmpera. Podem ser soldados por vários processos com resistência muito boa, citam-se os processos à arco elétrico convencional usando eletrodos a base de Ni-Fe, o processo MIG e arco submerso [13].

Nas últimas duas décadas pesquisou-se muito sobre a adição de elementos químicos aos fundidos por inoculação. Isto fez

com que vários pesquisadores estudassem os efeitos da adição de alguns elementos químicos nos ferros fundidos cinzentos, maleáveis e nodulares principalmente, motivados pela notável expansão da produção mundial dos fundidos.

As propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares dependem da estrutura da matriz e da grafita presente, levando-se em conta a morfologia, quantidade, tamanho e distribuição desta.

As matrizes perlíticas conferem uma maior resistência mecânica à secção considerada. Uma matriz ferrítica por outro lado, apresenta maior ductilidade e menor dureza.

A obtenção dessas matrizes depende de uma série de fatores. No estado bruto de fusão, após a reação de nodularização, começa a nucleação da grafita segundo [6] e a grafita começa a nuclear no líquido eutético. Dependendo da velocidade de resfriamento e da retirada de calor do molde resultará então o tipo de estrutura na matriz, ferrítica ou perlítica.

Uma velocidade de resfriamento grande propiciaria uma maior formação de cementita que não teria tempo de decompor-se e surgiria a matriz perlítica. No caso de uma baixa velocidade a matriz ferrítica é que predominaria.

Na obtenção dessas matrizes é importante ressaltar a influência que exerce certos elementos de liga tais como: cobre, manganês, estanho, níquel e outros. Estes elementos alteram as condições de equilíbrio entre as fases, deve-se relatar também a influência que o silício exerce pois, é o elemento mais importante depois do carbono pela quantidade em que aparece.

Os elementos de liga citados acima possibilitam a obtenção de matrizes perlíticas e são usados quando se deseja obter ferros fundidos nodulares de alta resistência mecânica no estado bruto de fusão, principalmente quando se tem peças de secção espessa onde se tem as seguintes aplicações:

- Lingoteiras para indústrias siderúrgicas;
- cilindros de laminação;
- peças estruturais para máquinas agrícolas e ferroviárias;

- cabeçotes de máquinas ferramentas;
- carcaças de bombas e turbinas;
- prensas de grande porte para indústrias de plásticos;
- polias de tração para guinchos, pontes rolantes e tra^utores;
- rodas para vagões;
- sapatas de freio;
- cilindros e pistões para compressores
- etc. [14].

Resistências mecânicas elevadas nos nodulares poderiam ser conseguidas também com tratamentos térmicos que, dependem da presença de elementos de liga e que podem causar problemas como, flutuação e degeneração da grafita ou ainda, surgimento de carbonetos eutéticos [14,15].

Dentre os elementos de liga perlitizantes citados o cobre é preferido por apresentar uma série de vantagens e que se estendem aos ferros fundidos cinzentos, e maleáveis. Estas vantagens serão citadas no item 2.2.

2.2. INFLUÊNCIAS DO COBRE NOS FERROS FUNDIDOS NODULARES

Os teores usuais de cobre são limitados pelos efeitos nocivos que os teores elevados podem causar. Em função disto, os teores usados para peças de secções pequenas e médias vão até 2,0% enquanto, em peças de secções espessas pode-se chegar aos 3,0%.

Esta limitação é imposta pelos efeitos nocivos que teores maiores podem causar, quais sejam: degeneração da grafita e formação de precipitados [6].

A degeneração da grafita ocorre com uma mudança na morfologia ou seja, mudança da grafita esferoidal para grafita do tipo explodida e mesmo para veios tipo B (grafita tipo roseta).

8

A formação de precipitados de cobre tende a ocorrer com teores superiores a 3,0% deste e no estado bruto de fusão.

O teor de cobre a ser utilizado é limitado também em função dos efeitos desejados pois a alteração que ocorre na matriz é função das dimensões da peça solidificada. Uma secção grande resfria mais lentamente e propicia uma maior decomposição da cementita e necessita de mais cobre para garantir a perlitização.

Os efeitos principais do cobre são:

- Grafitizante;
- Perlitizante.

O efeito grafitizante do cobre é bem menor que o do silício, comparativamente, necessita-se para uma mesma quantidade de grafita de um teor de cobre igual a 4 vezes o de silício. Por sua vez, para cada 1,0% de cobre acrescentado pode-se reduzir o teor de silício de 0,25% [16].

Segundo CASTELO BRANCO e SOUZA SANTOS [6] e DE SY [8] o cobre atua como elemento grafitizante porque favorece a solidificação segundo o diagrama de equilíbrio estável. Para DE SY [8] o comportamento grafitizante do cobre também pode ser devido, pelo menos em parte a arranjos de átomos pré-formados no banho metálico e que atuariam como centros efetivos para nucleação da grafita.

Quanto ao efeito perlitizante e que é amplamente ressaltado na literatura [1,2,3,4,5,6,7,8] pode ser atribuído ao fato de que o cobre retarda ou evita a formação da ferrita nas transformações do estado sólido. Este efeito está sujeito a algumas hipóteses; pode estar ligado à redução na velocidade de difusão do carbono da austenita [8] ou uma diminuição da temperatura do eutóide e da velocidade de transformação [1,6,8] uma vez que o cobre é estabilizador da austenita [6].

Com relação a estes efeitos podem ser feitas algumas observações:

- O efeito perlitizante do cobre já foi amplamente comprovado pela literatura em ferros fundidos nodulares eutéticos e hipereutéticos [1,2,3,4,5,6,7,8] e inclusive em teores de cobre

de 0,18% já há um acréscimo da porcentagem de perlita [6]. Com 1,4% de cobre a matriz já apresenta 90% de perlita numa espessura do corpo de prova de 25,0 mm [6].

A quantidade de perlita presente é função também do teor de silício. Elevados teores de silício se usados, resulta numa oposição a ação do cobre. Isto porque o cobre não é um estabilizador da cementita, ele atua como promotor da perlita na reação eutetóide [6].

- O efeito grafitizante nem sempre é observado e isto se deve ao seu valor inferior quando comparado ao silício. Por exemplo, CASTELO BRANCO e SOUZA SANTOS [6] não comprovaram em seu trabalho, qualquer efeito grafitizante do cobre.

As vantagens da utilização do cobre são:

- O cobre quando utilizado em teores inferiores a 3,0%, por si só não causa nenhum efeito prejudicial à morfologia da grafita, exceção feita à presença de impurezas, notadamente o titânio. Todavia, este efeito pode ser neutralizado com pequenas adições de cério.

- O cobre permite a obtenção de matrizes perlíticas isentas de carbonetos eutéticos [17].

- Não há formação de precipitados ricos em cobre em teores de até 1,5% [5,6].

A solubilidade máxima do cobre na ferrita pura é de 1,8% para linha eutetóide a 835°C e 0,35% para a temperatura ambiente [1,17].

Considerando-se que nos casos dos ferros fundidos nodulares a ferrita é uma solução sólida ferro-silício a solubilidade do cobre aumenta [6]. Com teores de até 1,5 de cobre não se detectou a presença de cobre livre na matriz [5,6] todavia, não há qualquer citação na literatura quanto ao valor da solubilidade nestes casos, estima-se que seja bem mais elevado.

Poder-se-ia questionar a respeito do paradeiro do cobre não solúvel na ferrita e que não aparece na forma de precipitados e a resposta que a lógica nos permite oferecer é que o va-

lor da solubilidade da ferrita neste caso deve ser mais elevada pois em [6] os precipitados foram procurados com auxílio de uma microsonda e não foram encontrados.

CASTELO BRANCO e SOUZA SANTOS [6] referem-se a uma citação onde comprovou-se a existência de precipitados quando se submetiam os ferros fundidos nodulares com teores de cobre superiores a 0,5% ao tratamento térmico de recozimento ou ferritização. Também, verificou-se um endurecimento da ferrita e um aumento na resistência a tração para os quais se atribuiu duas hipóteses: presença de precipitados ricos em cobre ou endurecimento por solução sólida [6,8].

BARUCH [5] observou que adições de cobre inferiores a 1,0% produzem nódulos de grafita menores e mais compactos com relação a área ocupada, isto comparando ao material sem cobre.

Outro efeito do cobre é o de provocar alteração do ponto eutetóide baixando a temperatura de transformação, elevando a concentração de carbono e conseqüentemente o desenvolvimento de uma perlita mais refinada [18].

As propriedades mecânicas variam da seguinte forma:

- Com o aumento do teor de cobre e o conseqüente aumento da quantidade de perlita na matriz, há um aumento da resistência a tração e da dureza, fato amplamente comprovado [1,2,3,4,5,6,8,17,18]. Por outro lado, há uma sensível redução no alongamento.

Esta redução no alongamento se desejada poderá ser alterada pela inoculação de outros elementos junto com o cobre como por exemplo: cromo, molibdênio, etc.

A resistência ao desgaste é melhorada com adições de 1,0 a 1,2% de cobre no ferro fundido nodular com estrutura perlítica [3].

2.3. USINABILIDADE DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES

2.3.1. Influência da microestrutura

Os ferros fundidos nodulares, como já foi descrito anteriormente se caracterizam por apresentarem grafita na forma esferoidal ou nódulos e uma matriz que pode apresentar uma estrutura de diversos tipos.

A matriz pode ser ferrítica ou perlítica mas, em função de tratamentos térmicos como a têmpera ou adição no banho de fusão de elementos de liga como o níquel, podem-se ser obtidas matrizes martensíticas e austeníticas.

Como nos ferros fundidos nodulares o principal indicativo da usinabilidade é a dureza [19], são relatadas em seguida as influências dos elementos que podem estar presentes na matriz destes onde os elementos aqui apresentados estão em ordem crescente de dureza [19].

- *Grafita*. É um elemento benéfico a usinabilidade pois atuando como lubrificante e alterando o tipo de cavaco durante a usinagem, interfere no sentido de beneficiar o processo e a ferramenta.

- *Ferrita*. Trata-se de uma solução sólida ferro-silício no caso de ferros fundidos cinzentos e nodulares. Apresenta uma grande tenacidade e baixa dureza sendo portanto fácil de ser usinada.

- *Perlita*. É composta de uma mistura de ferrita e cementita onde a cementita é constituída de carbonetos de ferro e manganês onde, há predominância dos carbonetos de ferro. A perlita se apresenta com a disposição de lamelas de cementitas justapostas e espaçadas por lamelas de ferrita.

Dependendo do espaçamento apresentado entre as lamelas e da sua espessura, a perlita pode ser grosseira ou fina. A perlita fina é mais resistente e mais difícil de usinar porque apresenta uma dureza mais elevada.

A perlita grosseira torna-se mais fácil de usinar por-

que apresenta lamelas de ferritas mais espessas e esta protege a ferramenta contra a abrasão.

- *Bainita*. É resultante da transformação da austenita no resfriamento isotérmico, entre 550 e 200°C (curvas C no diagrama TTT onde o resfriamento ocorre ao mesmo tempo em toda a secção da peça). Seu aspecto varia desde um agregado fino para temperaturas da ordem de 450°C até um constituinte em forma de agulhas com coloração escura, em torno dos 200°C. Trata-se de uma mistura de ferrita e carbonetos com dureza elevada, 40 a 60 Rc, é muito difícil de ser usinada.

- *Martensita*. É uma solução supersaturada de carbono - ferro-silício, formada por um resfriamento brusco passando a esquerda do cotovelo do diagrama TTT. Sua constituição depende da temperatura e o seu aspecto é semelhante ao da Bainita apresentando-se na forma de agulhas (acicular) com coloração mais clara. Trata-se de um elemento muito duro e frágil e somente usinável por abrasão dentre os processos convencionais.

- *Austenita*. Trata-se de uma solução sólida de carbono no ferro gama com no máximo 2,11% de carbono [12]. Para estabilizar a austenita são usados elementos de liga tais como níquel, cromo, manganês e cobre e combinação destes onde, o níquel é o principal elemento. Apresenta-se na forma de grãos poligonais irregulares, possui boa tenacidade e resistência a tração e alongamentos elevados. Devido a presença destes elementos de liga a grafita degenera-se, surgem nódulos e formas de veios radiculares (rosetas). A usinabilidade da matriz austenítica é baixa devido a presença de carbonetos de alta dureza [13].

Do ponto de vista prático, os ferros fundidos nodulares consumidos industrialmente, em sua maior parte apresentam matrizes ferríticas, perlíticas ou mistas. Em razão disto, e considerando-se que as outras matrizes não apresentam condições de usinagem, as pesquisas desenvolvidas se concentram no estudo da usinabilidade de ferros fundidos nodulares e maleáveis ferríticos e ou perlíticos.

MARGERIE [20] verificou a influência da matriz do ferro fundido nodular sobre a usinabilidade. Como esperava-se, concluiu que o aumento de perlita na matriz reduz a usinabilidade, is

to porque há um aumento na dureza. Seus resultados são mostrados na figura 1 onde se tem a usinabilidade expressa em função do volume de material removido.

KAHLES e FIELD [21] em pesquisa de aspecto semelhante chegam a mesma conclusão e os resultados são mostrados na figura 2, onde a usinabilidade é expressa em função da vida da ferramenta.

Outras pesquisas realizadas confirmam a conclusão anterior, de que a matriz ferrítica é melhor usinável [22,23,24,25, 26,27].

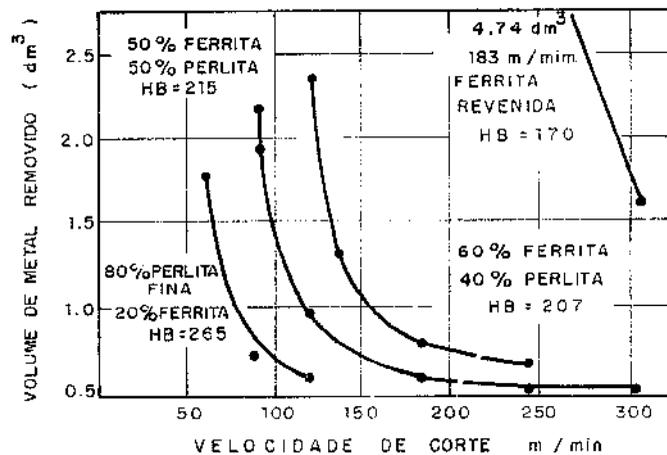


Figura 1 - Influência da estrutura da matriz dos ferros fundidos nodulares sobre a usinabilidade [20].

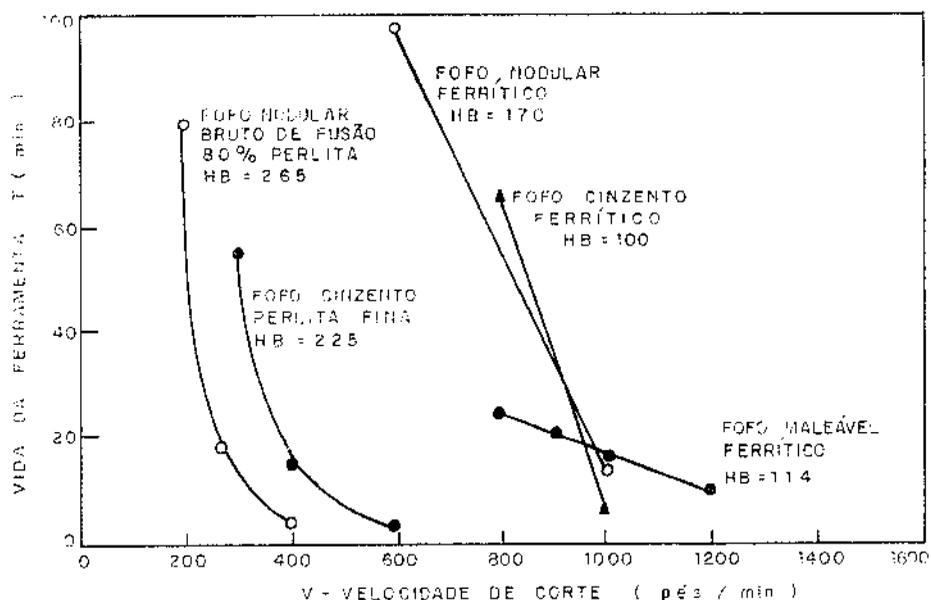


Figura 2 - Comparação da usinabilidade dos tipos de matrizes dos ferros fundidos nodulares no torneamento com ferramenta de metal duro C2 [21].

3.3.2. Influência da adição de elementos de liga, condições de corte e propriedades dos ferros fundidos nodulares na usinabilidade.

São vários os pesquisadores que relacionam a usinabilidade com a dureza Brinell, encontrando correlações muito boas. Em função disto, apontam a dureza como o melhor indicador da usinabilidade [7,20,25,28,29,30]. Destas referências foram selecionadas as correlações mostradas nas figuras 3, 4 e 5.

Levando em consideração este fato, pode-se dizer que os elementos de liga adicionados aos ferros fundidos nodulares para aumentar a dureza e resistência à tração devem reduzir a usinabilidade.

Em estudos realizados com ferros fundidos cinzentos e maleáveis, PEARCE e BROMAGE [1] concluem que adições de cobre podem melhorar a usinabilidade, devido ao seu efeito grafitizante.

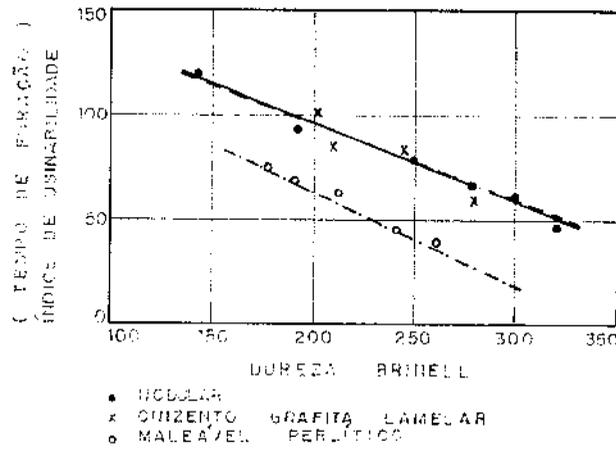


Figura 5 - Variação do índice de usinabilidade com a dureza brinell para 3 tipos de ferros fundidos [28].

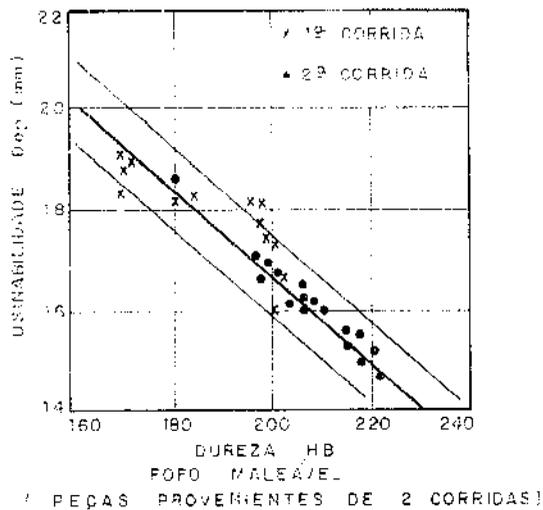


Figura 1 - Correlação entre a dureza brinell e a usinabilidade para ferros fundidos maleáveis [50].

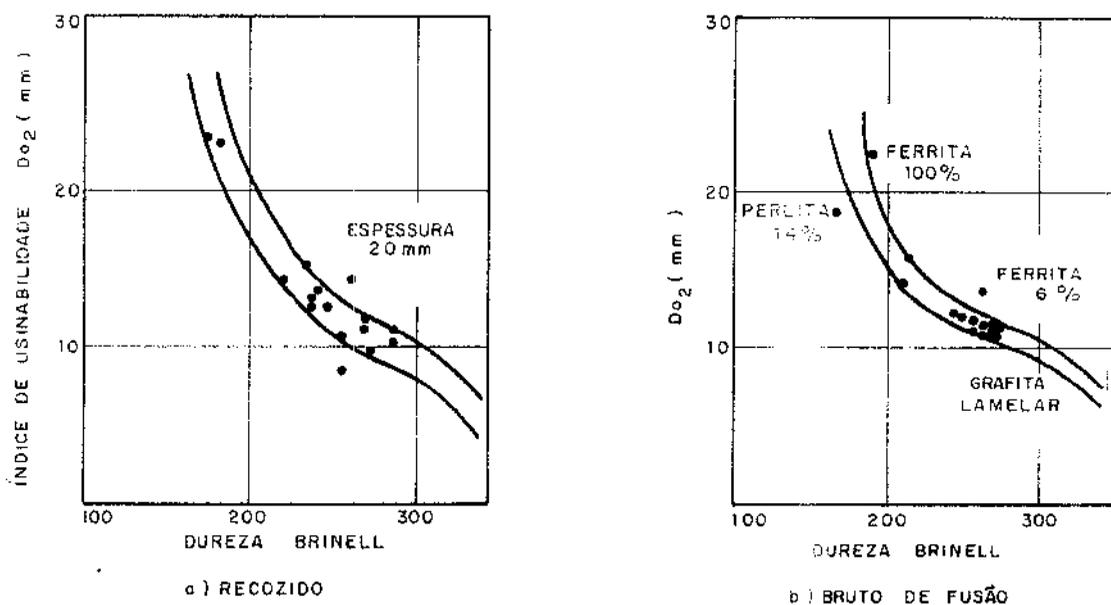


Figura 5 - Correlação entre a dureza brinell e a usinabilidade do ferro fundido nodular em dois estados de tratamento térmico [29]; a esquerda - recozido, a direita - bruto de fusão.

DE SY [8], afirma que o cobre, apesar de elevar a dureza não causa uma redução significativa na usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos. Ressalta-se que nas pesquisas citadas não há citações sobre que tipo de ensaios de usinabilidade foram realizados para se chegar a tais conclusões.

NEUMEIER e BETS [3] referem-se a uma citação não compreensível de Khanduja, Gaingar e Sharan em que há melhora das propriedades mecânicas e da usinabilidade do ferro fundido nodular através da adição de 0,1% de estanho. Não compreensível porque o estanho é um promovedor de perlita assim como o cobre.

DE SY e EEGHAM [7] em outra pesquisa, onde foi usado como índice de usinabilidade a velocidade V_{60} , concluem que em ferros fundidos cinzentos a adição de cobre melhora a usinabilidade. Fato justificado pelo efeito grafitizante do cobre.

A única citação encontrada na literatura com relação a usinabilidade dos ferros fundidos nodulares com adições de cobre é a da pesquisa realizada por FREUDIGER e MAYER [32]. As conclusões a que chegaram são estranhas e surpreendentes porque eles afirmam que ao adicionar-se 1,0% de cobre em ferro fundido nodular normalizado ocorre uma melhoria da usinabilidade. A afirmação deles foi justificada no fato de que, apesar do refinamento da perlita ocorre uma maior formação de ferrita em torno da grafita e seus resultados são baseados nas curvas de vida.

A afirmação anterior é considerada surpreendente e estranha porque ela contraria todas as outras afirmações além disto, a perlita fina por si só é mais dura e resistente e consequentemente, mais difícil de usinar. Por outro lado a adição de cobre a um ferro fundido nodular normalizado que já possui uma estrutura da matriz perlítica, vai contribuir negativamente quanto a usinabilidade pois irá refinar a perlita e reduzir a camada de ferrita ao redor da grafita. Este fato é comprovado nas micrografias apresentadas no capítulo quatro e que foram conseguidas pelo autor deste trabalho.

SILVEIRA [31] em recente trabalho, verificou a usinabilidade de dois ferros fundidos nodulares entre outros, o FE6002 e o FE4212 segundo a ABNT e determinou a influência do material do molde (quartzo e granalha) com dois tipos de modelos (convencional e poliestireno expandido). Para tal, utilizou dois ensaios de usinabilidade: variação da velocidade de corte por incrementos no torneamento cilíndrico e faceamento segundo "MATHON" [9].

Os dois ferros fundidos nodulares utilizados possuíam as seguintes características:

FE4212 - sem adição de cobre, estrutura da matriz ferrita mais perlita, dureza média de 190 HB, resistência a tração aproximada de 42 kgf/mm², alongamento 12,0% e carbono equivalente 4,53%.

FE6002 - com 0,60% de cobre, estrutura predominantemente perlítica, dureza média de 250 HB, resistência à tração aproximada de 80 kgf/mm², alongamento 2,0% e carbono equivalente 4,55%.

As conclusões a que chegou foram as seguintes:

- segundo o índice de usinabilidade baseado no ensaio de torneamento cilíndrico, independente do tipo de molde e modelo, o ferro fundido FE4212 apresentou uma melhor usinabilidade.

- segundo o índice de usinabilidade baseado no ensaio de facamento "MATHON" ocorreram discrepâncias: o FE6002 obtido em moldes de quartzo apresentou uma melhor usinabilidade do que o FE4212 em condições idênticas enquanto, os materiais processados em molde de granalha tiveram comportamento inverso.

As explicações dadas pelo autor para as discrepâncias ocorridas no ensaio "MATHON" são as seguintes:

- Não foi a usinabilidade do FE6002 que aumentou, a do FE4212 é que reduziu-se segundo foi comprovado e isto deveu-se a existência de porosidades no interior do FE4212, e que causaram cortes descontínuos com prejuízo à vida da ferramenta. Além disto foi constatada a existência de Steadita na estrutura da matriz do FE4212 e esta contribui para acelerar o desgaste da ferramenta pois possui elevada dureza.

Os resultados encontrados por SILVEIRA servem para fortalecer as confirmações anteriores de que nos ferros fundidos nodulares ao aumentar a dureza e resistência à tração, a usinabilidade deverá reduzir-se. Por outro lado o mesmo deverá acontecer ao introduzir-se cobre nos nodulares.

Outra pesquisa sobre a usinabilidade dos ferros fundidos nodulares mostra mais os aspectos das condições de corte com relação a adesão do cavaco à superfície de saída da ferramenta. HITOMI e THUERING [33,34,35] estudaram esses efeitos em três tipos de ferros fundidos nodulares, classes 60, 80 e 100, utilizando ferramentas de metal duro e cerâmica e concluíram que determinadas condições de corte limitam o surgimento da adesão na superfície de saída da ferramenta e que há condições ótimas para uma maior vida da ferramenta.

CAPITULO 3

USINABILIDADE

3.1. CONCEITUAÇÃO

Existem várias definições para o termo "Usinabilidade". Como no Brasil ainda não existe uma norma que padronize os ensaios de usinabilidade e conseqüentemente, estabeleça a sua definição, optamos então por uma conceituação baseada nas definições de DATSKO [10] e FERRARESI [36].

A usinabilidade é uma grandeza tecnológica comparativa que expressa por meio de um valor numérico (índice ou porcentagem) a capacidade que um material tem de ser usinado sob determinadas condições de corte com maior ou menor facilidade.

O valor numérico que a expressa é chamado de "Índice de Usinabilidade". Este índice expressa a usinabilidade de um determinado material comparado a de um outro tomado como padrão.

O tema "Usinabilidade" é muito complexo e demanda uma série de discussões visto que não pode ser comparado as demais propriedades mecânicas dos materiais. O termo usinabilidade é muito amplo e o índice de usinabilidade expressa uma situação particularíssima de um par peça-ferramenta sob determinadas condições de usinagem e por outro lado é de grande interesse para os fabricantes e consumidores dos metais e das ferramentas.

Da Literatura Americana já são bem conhecidos os índices comerciais de usinabilidade, onde o aço AISI B1112 é tomado como padrão e em determinadas condições de fabricação e usinagem é atribuído a ele o índice 100%. A partir dele são tabelados os demais materiais.

3.2. PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUEM NA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE USINABILIDADE

Transcrevemos a seguir os fatores listados por HILMANN-SI [36], que influem na usinabilidade.

- Material da Peça
- Processo mecânico e condições de usinagem
- Tipo de critério utilizado na avaliação.

Com relação ao material da peça os fatores que mais influem são:

- Composição química;
- Microestrutura;
- Dureza;
- Propriedades das tensões e deformações;

Dentre os processos mecânicos e condições de usinagem os que mais influem são:

- Material da ferramenta;
- Condições de Usinagem (velocidade, avanço, profundidade, geometria da ferramenta, etc);
- Fluidos de corte;
- Rigidez da máquina, ferramenta e do sistema de fixação da peça;
- Tipos de trabalhos executados pela ferramenta (operação empregada, tipo de corte, etc.)

3.3. CRITÉRIOS EMPREGADOS NOS ENSAIOS DE USINABILIDADE

São relatados a seguir os critérios que são considerados principais e de maior interesse prático quanto a utilização em pesquisas publicadas, pois são inúmeros os trabalhos que foram desenvolvidos para avaliar a usinabilidade do material.

Os critérios podem ser subdivididos em duas categorias: Critérios básicos e Critérios específicos [36].

Dentre os critérios básicos os principais são:

- *Baseados na vida da ferramenta*

Ensaio de longa duração

Curvas de vida da ferramenta, velocidade V_{60}

Ensaio de curta duração

Método do comprimento usinado

Método do faceamento BRANDSMA

Método do faceamento de RENAULT-MATHON [9,37]

Método do aumento discreto da velocidade na operação de torneamento cilíndrico [9, 36]

Método do aumento contínuo da velocidade na operação de torneamento cilíndrico

- *Baseados na força de usinagem*

Método da força de avanço constante

Método baseado na força de avanço de KOVACH [38]

Método do índice universal de TOBIAS E DAS [39]

- *Baseado no acabamento superficial*

- *Baseado na produtividade*

Os critérios específicos principais são:

- *Baseado na análise dimensional*

Método do índice universal de DATSKO [10]

- *Baseado na temperatura de corte*

3.4. COMENTÁRIOS SOBRE OS CRITÉRIOS E PARÂMETROS UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO DOS MESMOS

3.4.1. Parâmetros utilizados na avaliação dos critérios de usinabilidade

A tabela 1 lista os ensaios de usinabilidade, critérios, variáveis medidas e parâmetros de comparação utilizados no cálculo dos diversos índices de usinabilidade.

| CRITÉRIOS | TIPOS DE ENSAIOS | ENSAIOS DE USINABILIDADE | VARIÁVEIS MEDIDAS | PARÂMETROS DE COMPARAÇÃO |
|--------------------|---|---|---|---|
| Vida da Ferramenta | Longa duração | Levantamento das curvas de vida | Desgaste ou vida | v_{60} , v_{90} , etc. |
| | Curta duração (aceleração) | Método do comprimento usado Faceamento de "BRANDSMA" Faceamento de "MATHON" Aumento discreto da velocidade de corte no torneamento Aumento progressivo da velocidade de corte no torneamento Ensaio com ferramenta bedame Ensaio com medida do desgaste pelo método radioativo. | Vida Vida $D_{0,2}$ Vida Vida Desgaste Desgaste | Comprimento do cavaco usado. Velocidade equivalente " v_r " Diâmetro $D_{0,2}$ para uma rotação 350 rpm Velocidade de corte comparativa " v_{comp} " Velocidade de corte comparativa " v_{comp} " Desgaste para um certo número de operações Desgaste para um certo tempo de operação |
| Força de Usinagem | Ensaios com duração relativamente pequena | Método da pressão específica de corte | Força principal de corte | Volume de cavaco usado em relação a potência consumida e tempo de operação |
| | | Método da tensão de cisalhamento | Força principal de corte | Tensão média de cisalhamento |

| CRITÉRIOS | TIPOS DE ENSAIOS | ENSAIOS DE USINABILIDADE | VARIÁVEIS MEDIDAS | PARÂMETROS DE COMPARAÇÃO |
|-------------------|--|--|---|---|
| Força de usinagem | Ensaio com duração relativamente pequena | Método da força de avanço constante. a) na furação b) Torneamento | a) avanço b) Força de avanço | a) Percorso de avanço para um determinado nº de voltas da broca b) avanço que produz uma determinada força de avanço |
| | | Método da força de avanço constante de "KOVACH" na furação | Vida | Tempo para executar um de terminado nº de furos |
| Longa duração | | Ensaio baseado no acabamento superficial | Rugosidade | Relação entre a rugosidade de teórica e a rugosidade obtida no ensaio |
| Curta duração | | Ensaio baseado na Produtividade | Produção, vida ou rugosidade | Produção horária |
| | | Baseado na temperatura de usinagem | Temperatura de usinagem | Temperatura de usinagem para uma dada velocidade de corte |
| Longa duração | | Baseado nas características do cavaco a) grau de recalque b) coeficiente volumétrico e forma do cavaco c) frequência e amplitude de vibração da força de usinagem | a) espessura de corte b) volume ocupado pelo cavaco e peso do cavaco c) Frequência e amplitude de vibração da força de usinagem | a) grau de recalque b) coeficiente volumétrico do cavaco. |
| | | Método baseado na energia fornecida pelo pêndulo | Deslocamento do mancal do pêndulo ou energia do pêndulo. | Desgaste ou força de corte |

| Métodos indiretos de determinação da usinabilidade | Variáveis calculadas | Parâmetros de comparação |
|--|--|--|
| Método baseado na análise dimensional | Desgaste, velocidade de corte para uma dada vida e temperatura de usinagem | - desgaste - v60 - Temperatura de usinagem |
| Índice universal de "Tobias" e "Das" | Índice universal "D" baseado numa relação entre ângulos: atrito, saída e cizalhamento | "D" |
| Equação da usinabilidade de "DATSKO" | v60, baseado numa relação entre certas propriedades físicas e mecânicas da peça e condições de usinagem. | v60 |

Tabela 1 - Critérios de ensaios de usinabilidade, suas variáveis de medição e parâmetros de comparação.

Definições básicas dos termos utilizados na tabela 1:

- *Ensaio de usinabilidade*. Como o próprio nome sugere, trata-se de um experimento realizado em condições pré-determinadas para o conjunto ferramenta-peça-dispositivo-máquina e segundo um determinado critério.

Um ensaio de usinabilidade pode ser de longa ou curta duração.

O ensaio de longa duração é realizado em condições normais de usinagem e demandam muito tempo na execução, enquanto os de curta duração, são realizados em condições forçadas de usinagem para reduzir o tempo consumido.

- *Critério de usinabilidade*. Trata-se de uma grandeza tecnológica relacionada diretamente com a usinagem ou não e que permite estabelecer um parâmetro de comparação que é calculado através de uma variável medida durante o ensaio.

Os critérios podem ser básicos e específicos segundo FERRARESI [36], e segundo a classificação por ele apresentada, fica difícil distinguir em termos de definição um critério básico e um específico. Ressalta-se que esta subdivisão não é de muita importância.

- *Variável medida*. É a variável medida diretamente ou indiretamente durante o ensaio e que serve para calcular o parâmetro de comparação.

- *Parâmetro de comparação*. É o parâmetro utilizado no cálculo do índice de usinabilidade, este parâmetro poderá ser calculado ou poderá ser a própria variável medida.

- *Índice de usinabilidade*. É a grandeza que expressa em porcentagem a usinabilidade de um material e definido como sendo a relação entre o parâmetro de comparação do material testado e o parâmetro de comparação do material tomado como padrão.

O índice de usinabilidade poderá ser calculado a partir de um ensaio ou poderá ser determinado indiretamente através de fórmulas empíricas que consideram variáveis diretamente envolvidas com a usinabilidade. A aplicação destes índices é muito limitada.

3.4.2. Comentários sobre os critérios utilizados nos ensaios de usinabilidade

Devido ao grande número de fatores que influem na usinabilidade, ao expressar-se um determinado índice baseado em um critério qualquer, é importante salientar as condições através das quais este foi determinado.

Caso se deseje efetuar outro ensaio é muito pouco provável que haja repetição do tal índice, isto porque as variáveis incontroláveis que entram no processo são muitas. Basta por exemplo, que a ferramenta utilizada não seja da mesma corrida siderúrgica que a primeira ou que seja afiada em outra condição. O mesmo raciocínio se aplica ao material da peça.

Como a usinabilidade não é uma propriedade do material nem da ferramenta e sim do sistema peça-ferramenta-máquina-dispositivo não se pode determiná-la a partir da resistência à tração ou da dureza.

Da literatura se tem notícia de que apenas um País, a França, está dando os primeiros passos no sentido de normalizar alguns ensaios de usinabilidade, pois já existe a Norma "A03-654 da AFNOR" [9].

Do ponto de vista prático é de consenso geral que o ensaio de longa duração não satisfaz as necessidades industriais, porque demanda muito tempo na sua execução e é necessário levantar as curvas desgaste - tempo para chegar-se as curvas de vida e então determinar a velocidade v_{60} , v_{90} , v_{50} , etc. Outra alternativa é levantar diretamente as curvas de vida para ferramentas de aço rápido onde se usina até a destruição da aresta cortante e mede-se a vida da ferramenta [9].

Já foram feitas muitas pesquisas em usinabilidade com ensaios de longa duração. Milhares de toneladas de material foram gastas para determinar as velocidades v_{60} e construir tabelas com os índices comerciais de usinabilidade.

No entanto, pelos motivos expostos estes valores servem apenas como orientativos e às vezes nem isto, pois, dependem das condições de usinagem reais que o material vai ser usinado podem-se encontrar enormes discrepâncias.

Os ensaios de curta duração atendem melhor aos requisitos práticos principalmente, economia e tempo consumido. No entanto, dadas as condições forçadas de usinagem ou aceleração que se usam, seus resultados são por vezes considerados imprecisos.

O correto então seria efetuar pelo menos dois ensaios de usinabilidade e comparar os resultados. Ainda assim podem surgir discrepâncias como as relatadas da referência [31]. Ou então utilizar um ensaio com condições de usinagem as mais próximas das condições reais em que o material será usinado.

A correlação dos resultados dos ensaios e ou critérios será avaliada através de parâmetros estatísticos: o coeficiente de correlação.

FERRARESI [36] apresenta os resultados da correlação entre ensaios de longa e curta duração e que foram publicados na revista alemã "Stahl und Eisen" vol. 20 e 21. No trabalho são fixados os seguintes valores para a correlação desde ótima até nenhuma.

Seja r^2 o coeficiente de correlação, então para:

| | |
|---------------------|-------------------------|
| $r^2 = 1,0$ | correlação ideal, ótima |
| $r^2 \geq 0,90$ | " boa |
| $0,80 < r^2 < 0,90$ | " limitada |
| $0,60 < r^2 < 0,80$ | " pequena |
| $0,40 < r^2 < 0,60$ | " muito pequena |
| $r^2 < 0,40$ | nenhuma correlação |

Com base nestes dados foi elaborada a tabela 2 onde se observa que as melhores correlações com o ensaio de longa duração (v_{60}) são conseguidas para o método baseado na análise dimensional, método do comprimento usinado e método do aumento progressivo da velocidade. Não foi citado o material usinado e condições de corte.

| MÉTODO DE ENSAIO | MAT. DA FERRAMENTA | COEF. DE CORR. r^2 | CORRELAÇÃO |
|--|--------------------|----------------------|---------------|
| Aumento progressivo da velocidade de corte | Aço rápido | 0,81 | limitada |
| | Metal duro P30 | 0,50 | muito pequena |
| Comprimento usinado | Aço rápido | 0,93 | Boa |
| Baseado na análise dimensional | Metal duro P10 | 0,95 | Boa |
| | Metal duro P30 | 0,93 | Boa |
| Força de corte | Metal duro P10 | 0,35 | nenhuma |
| | Metal duro P30 | 0,57 | muito pequena |

Tabela 2 - Correlações entre Ensaios de longa e curta duração para um desgaste $K = \frac{C_p}{C_d} = 0,1$ [36].

Segundo Micheletti [40] em ensaios com ferramentas de aço rápido, na usinagem de vários tipos de aço, o método do aumento progressivo da velocidade de corte por incrementos apresenta uma correlação muito boa.

Várias pesquisas foram desenvolvidas com ensaios de curta duração verificando-se a correlação com o ensaio de longa duração [29,37,41 a 48].

Dentre eles selecionou-se algumas correlações que rela-ta-se a seguir.

A figura 6 mostra a comparação entre as velocidades de corte comerciais para vários aços e o índice de usinabilidade pelo método da força de avanço constante onde modificou-se o método de medida, em vez de medir-se o avanço que produz uma força constante, mediu-se a força de avanço para um certo avanço controlado [41,45], os resultados foram muito significativos.

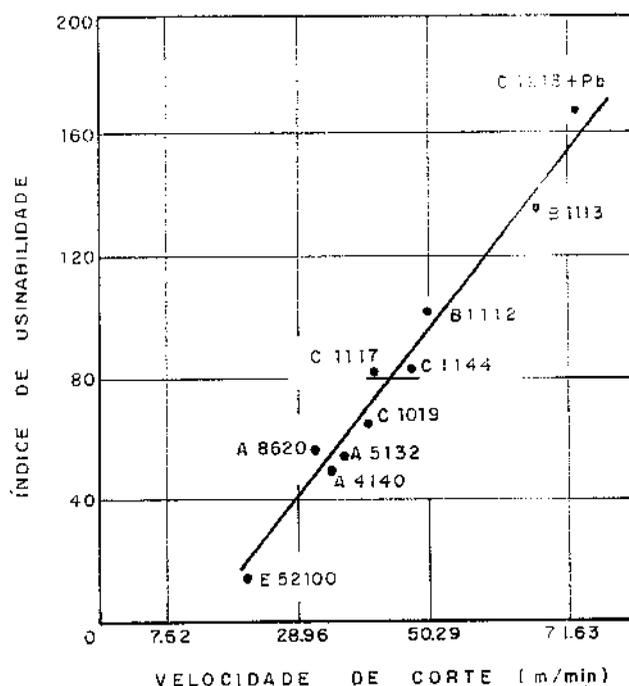


Figura 6 - Comparação entre as velocidades de corte comerciais e os resultados dos ensaios de usinabilidade com força de avanço constante, cortesia do "Le Battelle Memorial Institute" [47].

A figura 7 apresenta a comparação de vários critérios efetuada por CZAPLICKI [48], mostra que não há correlação entre a força de corte e v_{60} e muito menos a temperatura que possui um comportamento anormal [41,45].

Uma comparação efetuada segundo "Le Battelle Memorial Institute" [47] é mostrada na figura 8, onde se observa a usinabilidade de quatro aços diferentes segundo critérios distintos. Observa-se que o Aço "A" foi usado como padrão de usinabilidade [45] pois possui a mesma usinabilidade 100% para os 5 critérios usados. Observa-se ainda uma ótima correlação entre os critérios da temperatura e força de corte assim como, entre força de avanço e v_{60} .

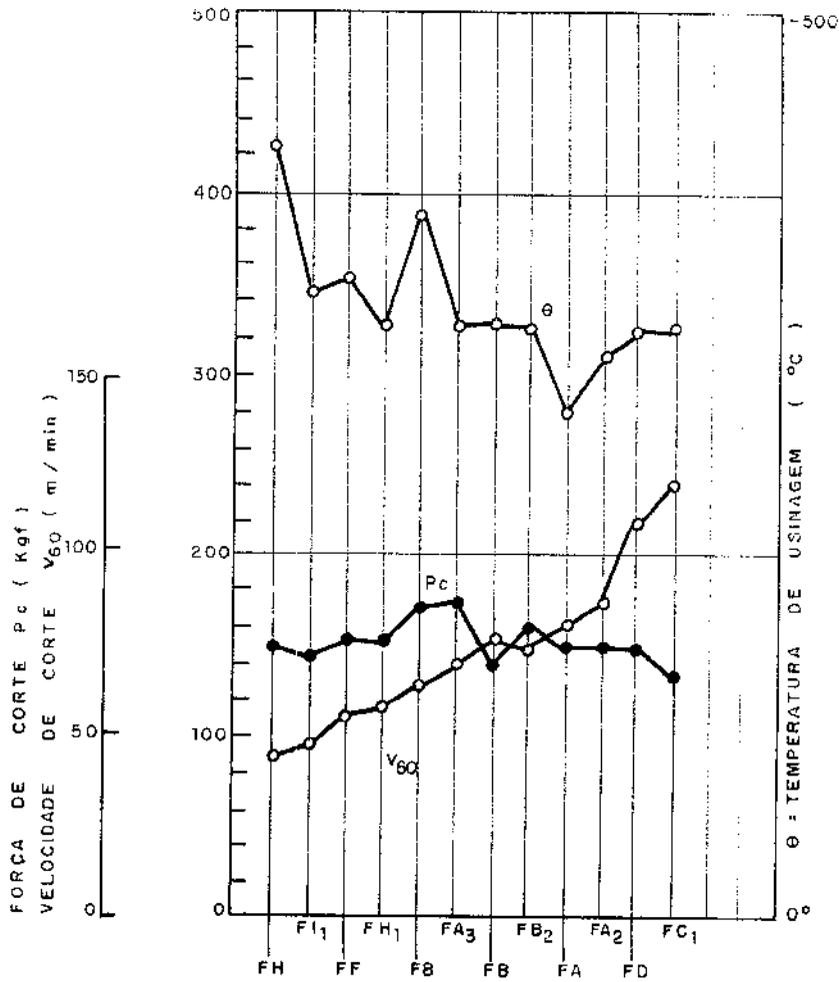


Figura 7 - Comparação de diferentes métodos de avaliação da usinabilidade segundo CZAPLICKI [48].

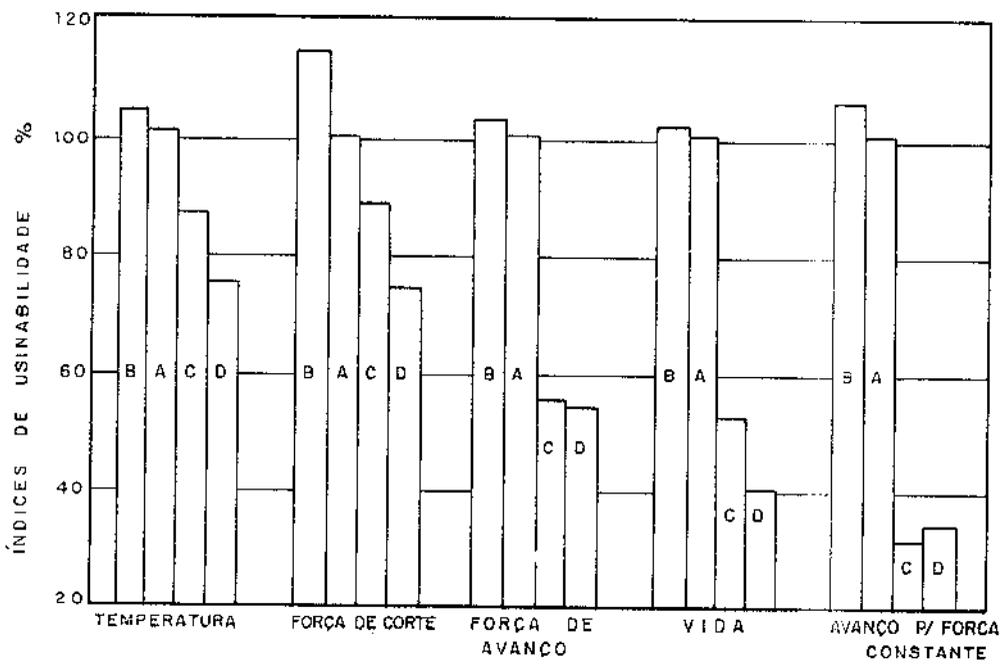


Figura 8 - Comparação de alguns critérios de usinabilidade na usinagem de 4 tipos de aços segundo o Battelle Memorial Institute [47].

De uma maneira geral ocorreu uma boa correlação dos critérios na variação da usinabilidade dos aços com exceção feita ao aço C no critério da medida do avanço para uma força constante.

Segundo MURRY [45], como nem sempre é possível comparar um critério de curta duração com o de longa duração, para que a resposta de um ensaio de usinabilidade seja aceitável é necessário efetuar pelo menos dois ensaios de curta duração onde um deles deve ser já amplamente utilizado ou comprovadamente apresentar uma boa correlação com o ensaio de longa duração.

Além disto, é importante ressaltar a precisão dos ensaios utilizados e a comparação entre eles.

Segundo a literatura, os recentes resultados de pesquisas efetuadas nas Universidades e centros de Pesquisas da Europa, o ensaio de curta duração mais utilizado e que melhor correlação oferece com o de longa duração é o "ensaio de faceamento de um disco pré-furado", semelhante ao método BRANDSMA [36] com a variante de se medir o diâmetro correspondente a um recuo de 0,2 mm na ponta da ferramenta. Este ensaio foi desenvolvido por RENAULT-MATHON [29,37] na França e a Associação Francesa de Normalização "AFNOR" [9] já o adotada como Norma.

MURRY [45] relata também os resultados de pesquisas efetuadas em 6 centros de pesquisas diferentes da França onde obteve-se uma boa correlação entre o ensaio de longa duração e os ensaios do aumento progressivo da velocidade de corte continuamente e por incrementos.

ROBELET et ODIN [41] compararam o ensaio de longa duração com o ensaio da força de avanço e com o ensaio do faceamento RENAULT-MATHON encontrando os resultados mostrados na tabela 3, onde "r" é o coeficiente de correlação e S o desvio padrão.

Observa-se da tabela uma boa correlação entre v_{60} e $D_{0,2}$ (N 700 rpm), melhor que $D_{0,2}$ (N=350 rpm) e uma fraça correlação entre v_{60} e P_a .

Segundo MATHON [37] a utilização de um diâmetro correspondente a um recuo de 0,2 mm na ponta da ferramenta $D_{0,2}$ (mm) para uma rotação de referência igual a 350 rpm é feita porque para este valor tem-se uma melhor correspondência entre $D_{0,2}$ e v_{90} com

um mínimo de dispersão em torno de 9,6%, para usinagem de aços e ferros fundidos.

| Ensaio de longa duração | Ensaio de faceamento de RENAULT/MATHON a) $D_{0,2}$ (N=700 rpm) b) $D_{0,2}$ (N=350 rpm) | Ensaio da força de avanço na furação P_a (Kgf) |
|-------------------------|--|---|
| v_{60} | a) $r = 0,94$ $s = 3,8$ | $r = 0,77$ |
| | b) $r = 0,92$ $s = 4,32$ | $s = 7,1$ |

Tabela 3 - Correlação dos critérios de usinabilidade de curta duração com o de longa duração [41]

Por outro lado, a razão da utilização de v_{90} na comparação efetuada por MATHON, em vez de v_{60} que é utilizada na maioria das pesquisas com ensaios de longa duração é devido ao fato, que com base em dados levantados e publicados pelo METCUT [49] em 1972, o valor v_{90} oferece menor dispersão com relação a equação de Taylor $VT^Y = C$ quando se considerada todos os elementos que influem na equação.

Com base nisto, a dispersão encontrada por MATHON foi de 9% para o aço rápido e 14% para o metal duro. Em razão do exposto sugere-se a utilização da rotação 350 rpm para obtenção do valor $D_{0,2}$.

Tendo como base o ensaio de faceamento de MATHON outros pesquisadores franceses em vários centros de pesquisa, verificaram a correlação entre o $D_{0,2}$ e a temperatura de usinagem, medida pelo método do termopar peça-ferramenta [42,44,46, 50] obtiveram uma curva típica como a da figura 9.

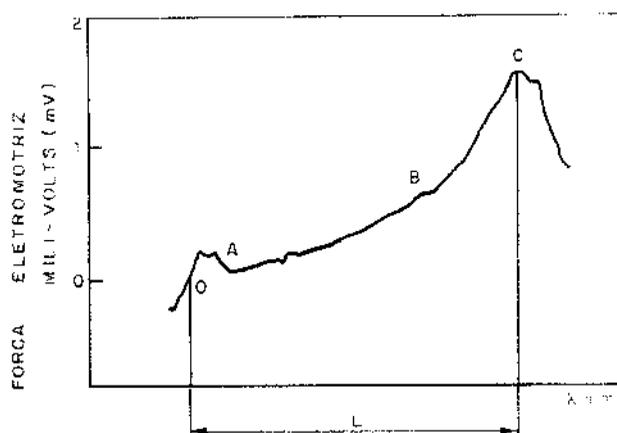


Figura 9 - Curva típica obtida no registro da força eletromotriz durante o ensaio MATHON [42,44,46].

Da figura se observa a variação que a temperatura de usinagem sofre durante o ensaio. O ponto O corresponde ao início da usinagem e o ponto C corresponde ao instante em que ocorreu a destruição da aresta cortante da ferramenta.

Conhecido o percurso "L", basta dividi-lo pela velocidade do papel para obter-se o tempo de corte da ferramenta. Torna-se possível calcular com precisão a velocidade de corte correspondente a destruição da aresta cortante da ferramenta que pode servir como um outro parâmetro de comparação de usinabilidade.

ROUMESY e outros pesquisadores [42,44,46,50] encontraram uma ótima correlação entre o diâmetro $D_{0,2}$ e aquela velocidade, a qual chamaram-na de "velocidade limite de faceamento", o valor do coeficiente de correlação $r^2=0,997$, um valor excelente e que mostra que não dependem da rotação adotada [50].

Com relação a utilização da temperatura propriamente dita como um critério específico de usinabilidade, nas pesquisas recentes não existem citações, exceção feita ao caso anteriormente citado onde utilizou-se apenas o registro da temperatura com a indicação da destruição da aresta cortante da ferramenta.

talvez esta lacuna na literatura seja explicada em razão da correlação efetuada anteriormente por CIAPLICKI [48], figura 7, ou ainda em função da correlação com a velocidade v_{60} . Outro fato que poderia justificar esta lacuna seria o método de medida da temperatura.

No que se refere a relação entre a temperatura e o desgaste, TAKEYAMA e MURATA [36] pesquisaram o mecanismo de desgaste da superfície de folga da ferramenta e encontraram uma relação entre o desgaste e a temperatura de usinagem. TRIGGER e CHAO [36] também relacionam o desgaste de cratera com a temperatura. TAKEYAMA também relacionou a temperatura com a vida da ferramenta.

Os resultados obtidos por TAKEYAMA podem ser vistos nas figuras 10 a 12. A figura 10 mostra a relação entre o peso do material desgastado da ferramenta na unidade de tempo e a temperatura absoluta, a figura 11 mostra a relação entre a vida da ferramenta T (min) e a temperatura absoluta e por último, a figura 12 apresenta a variação da temperatura de corte com a velocidade de corte para dois avanços distintos.

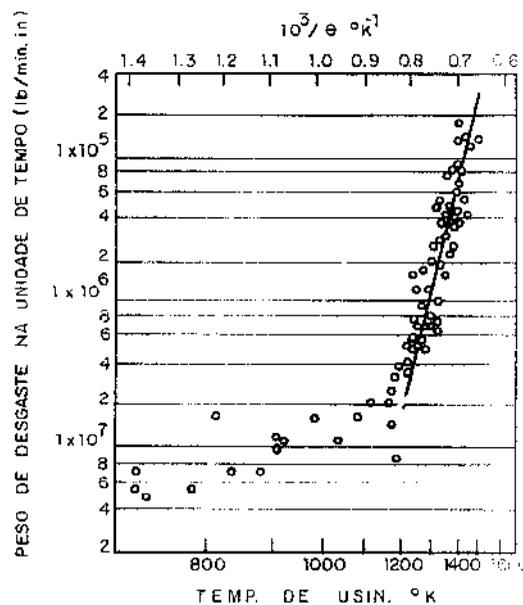


Figura 10 - Relação entre o peso do desgaste na unidade de tempo e a temperatura de usinagem de material da peça aço liga G18B (norma japonesa) e ferramenta M.D.P10 [51].

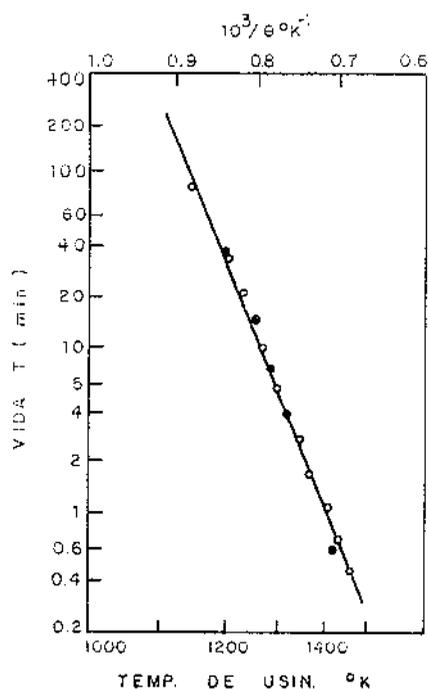


Figura 11 - Relação entre a vida da ferramenta e a temperatura de usinagem para ($f_l=0,024$ pol) demais condições, figura 10 [51].

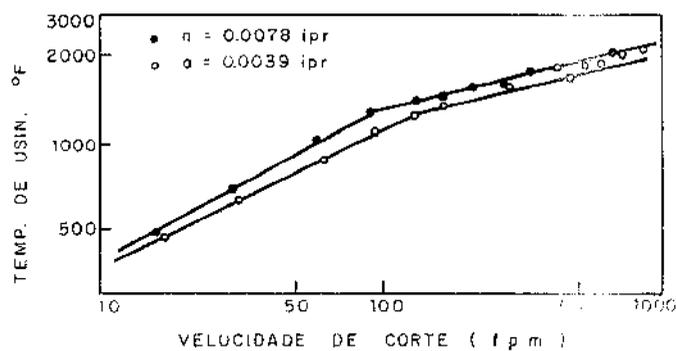


Figura 12 - Variação da temperatura de usinagem em função da velocidade de corte para ($p=0,59$ pol) e demais condições da figura 9 [51].

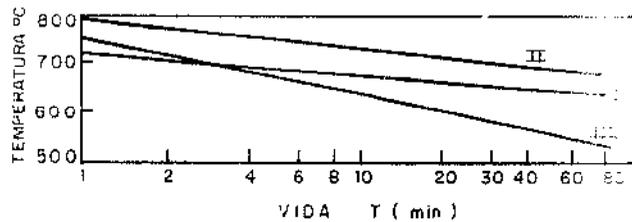


Figura 13 - Curvas de vida em função da temperatura de usinagem para 3 tipos de ferramenta de aço rápido na usinagem de aço carbono, extraída do FERRARESI [36] segundo SCHALLBROCH.

Segundo FERRARESI [36], o método de ensaio baseado na temperatura de usinagem só tem aplicação quando existe uma relação significativa entre a temperatura e a vida da ferramenta.

Para ferramentas de aço rápido em velocidades de corte de médias a baixas, observa-se uma correspondência biunívoca entre a temperatura de usinagem θ e a vida da ferramenta T . Em coordenadas di-logarítmicas a curva $T=f(\theta)$ pode ser expressa por uma equação do tipo

$$\theta T^{1/m} = C \quad (1)$$

onde os termos C e m dependem do material da peça e da ferramenta. Estes valores encontram-se tabelados em [36] p.p. 634 e segundo SCHALLBROCH e REICHEL os valores de C e m na usinagem com aço rápido independem da área da secção de corte para $v < 70$ m/min.

Para o metal duro e aço rápido com velocidades acima de 70 m/min não existe uma correspondência perfeita entre a vida e a temperatura de usinagem e nestes casos FERRARESI [36] não recomenda o método de ensaio baseado na temperatura.

Considerando-se a medida da usinabilidade como uma com-

paração entre dois materiais onde um é considerado padrão, acredita-se que a temperatura de usinagem pode ser usada como índice de usinabilidade desde que os dois materiais sejam usinados em condições idênticas.

3.4.3. Métodos indiretos para medida de usinabilidade

Os métodos indiretos são baseados na análise dimensional e em relações obtidas a partir de um determinado número de experiências.

WALLICHS e DARRINGHAUS [40] especificaram que a velocidade de v_{60} é inversamente proporcional e 1,25 do limite de resistência à tração.

JANITZKI [40] sugeriu que v_{60} é função de proporcionalidade da estrição e dureza Brinell, inicialmente na relação 1,01 e depois 1,63.

Outros pesquisadores e instituições sugeriram relações entre v_{60} e a força de corte, ou v_{60} com o comprimento de corte.

Todas estas relações são muito restritas e de aplicação muito limitada pois estas fórmulas expressam variações restritas apenas a alguns materiais.

Recentemente, HENKIN e DATSKO [10,40] relacionaram v_{60} com a dureza Brinell, condutividade térmica e variação de secção na ruptura por tração do material e também a área da secção de corte. Na usinagem de vários materiais cerca de 25, entre aços, ferros fundidos, etc. encontrou-se uma excelente correlação entre o v_{60} obtido em ensaio e o calculado por sua expressão.

Em razão disto DATSKO sugere a sua expressão como um índice universal de usinabilidade.

Outro índice universal de usinabilidade foi proposto por TOBIAS e DAS [39,51], com base na teoria do corte ortogonal. Este índice universal proposto foi simbolizado pelos autores por "D" e expressa a relação:

$$D = \frac{\cos(\alpha - \gamma)}{\dots} \quad (2)$$

ou pode-se dizer também que:

$$D = \frac{P_C}{P_Z} = \frac{K_C}{K_Z} \quad (3)$$

Os valores de K_C e K_Z representam as inclinações das retas P_C versus A_Z e P_Z versus A_Z respectivamente, onde A_Z é a área do plano de cisalhamento.

A grande vantagem deste índice proposto por TOBIAS e DAS é que se baseia em resultados experimentais mas, sua aplicação se restringe a materiais que apresentam cavaco contínuo e ao corte ortogonal.

Nos Estados Unidos se observa uma maior tendência pelos métodos indiretos de avaliação da usinabilidade, tanto que, a Carboloy (General Electric) e o METCUT Research Associations [40], vêm desenvolvendo pesquisas no sentido de modificar a equação de Taylor, em função de todas as variáveis que influenciam, procurando uma equação que possa definir melhor a usinabilidade e suas variáveis. Paralelamente é montado um banco de dados para que com a utilização de computadores se possa chegar a uma fórmula que traduza com maior precisão a "Usinabilidade".

Enquanto isto não acontece, o produtor de materiais, de ferramentas e o consumidor deverão se contentar com os resultados fornecidos por pelo menos dois métodos de ensaio de curta duração, certificando-se da precisão destes. Ou na pior das hipóteses ter uma idéia aproximada através de algumas das tabelas já publicadas.

O problema real só vai surgir quando se tiver um material novo, ou uma ferramenta nova, recém desenvolvidos. Nestes casos, é necessário testar. E nestes casos surge a necessidade de Normas para que exista um intercâmbio de resultados. Por outro lado a utilização desta ampliará a confiabilidade do ensaio.

Da literatura já se tem notícias de grupos de trabalho para o estudo da usinabilidade. Um destes grupos é composto por 12 países onde 10 são Europeus, mais Estados Unidos e Japão. Da qual fazem parte: Reino Unido, Suíça, Alemanha, França, Bélgica, Itália, Espanha, Noruega, Holanda e Suécia.

3.5. OS ENSAIOS DE USINABILIDADE DO PONTO DE VISTA PRÁTICO

Do ponto de vista prático um ensaio de usinabilidade deve ser preciso, ter boa reprodutibilidade, ser fácil de executar, requerer poucos equipamentos de medição, demandar pouco tempo, consumir a menor quantidade possível de material e ferramenta e consequentemente ter um baixo custo.

Os requisitos acima enquadram-se perfeitamente dentro de uma boa parte das Indústrias Siderúrgicas e de Fundição do Brasil que normalmente são as que mais se interessam. Quanto às Indústrias manufatureiras, uma parte já está englobada na Fundição e as demais só eventualmente estarão com problemas de conhecimento da usinabilidade.

Dentre os ensaios que atendem aos requisitos citados no todo ou em parte os principais são enumerados a seguir, obedecendo uma ordem que atende aos referidos requisitos:

- A - Ensaio com força de avanço constante KOVACH
- B - Ensaio de faceamento RENAULT-MATHON
- C - Ensaio com variação da velocidade por incrementos
- D - Ensaio baseado na medição da temperatura de usinagem pelo termopar peça-ferramenta
- E - Ensaio baseado no avanço que produz uma determinada força de avanço.

Neste trabalho, para avaliação da influência do teor de cobre e dos tratamentos térmicos na usinabilidade de alguns ferros fundidos nodulares, utilizou-se os ensaios B, C e D e ainda uma determinação indireta da usinabilidade, segundo "DATSKO".

A descrição detalhada dos ensaios será feita no capítulo 4.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA DOS ENSAIOS

4.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para verificar a influência da adição do cobre dos ferros fundidos nodulares na usinabilidade, surgiu a necessidade de fixar alguns parâmetros relativos aos ferros fundidos a fim de limitar as variáveis que influem na usinabilidade.

Com esta finalidade fixou-se os seguintes parâmetros:

- número de corridas distintas
- variação nos teores de cobre
- quantidade de tratamentos térmicos.

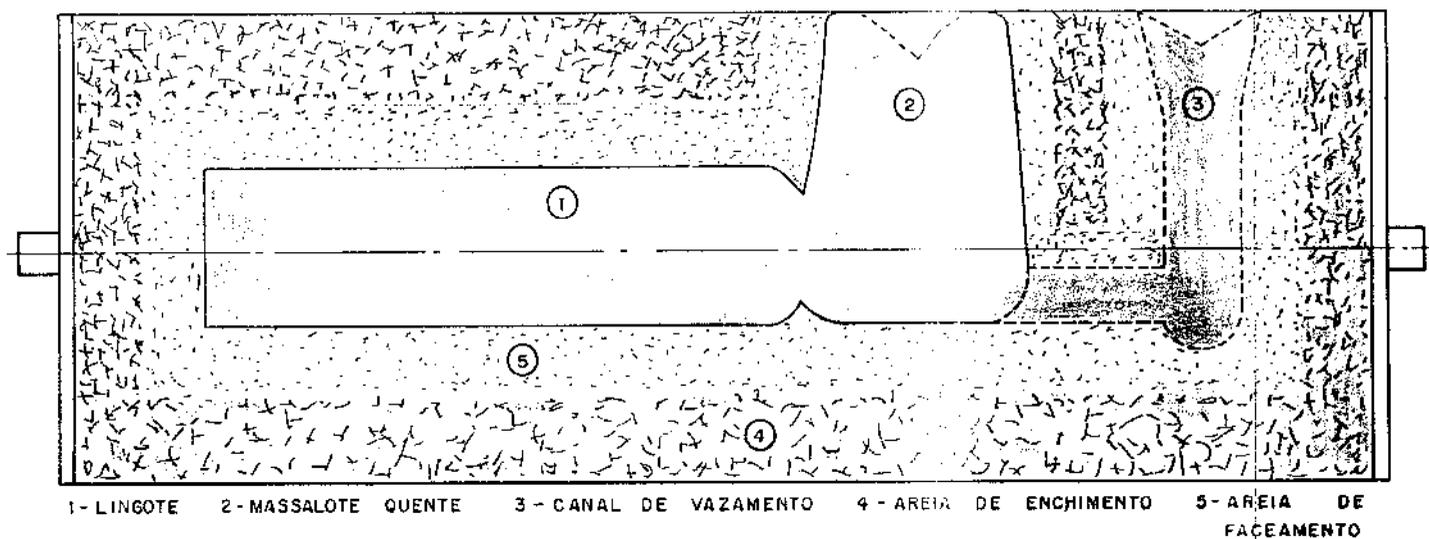
As corridas distintas, significam que poderia haver variações nas temperaturas de vazamento dentro de um determinado limite, bem como, pequenas variações na composição química básica.

A fim de otimizar a quantidade de lingotes necessários para os ensaios fixou-se em 3 (três) o valor de cada parâmetro acima, pois, pensou-se ser suficiente para avaliar a influência citada.

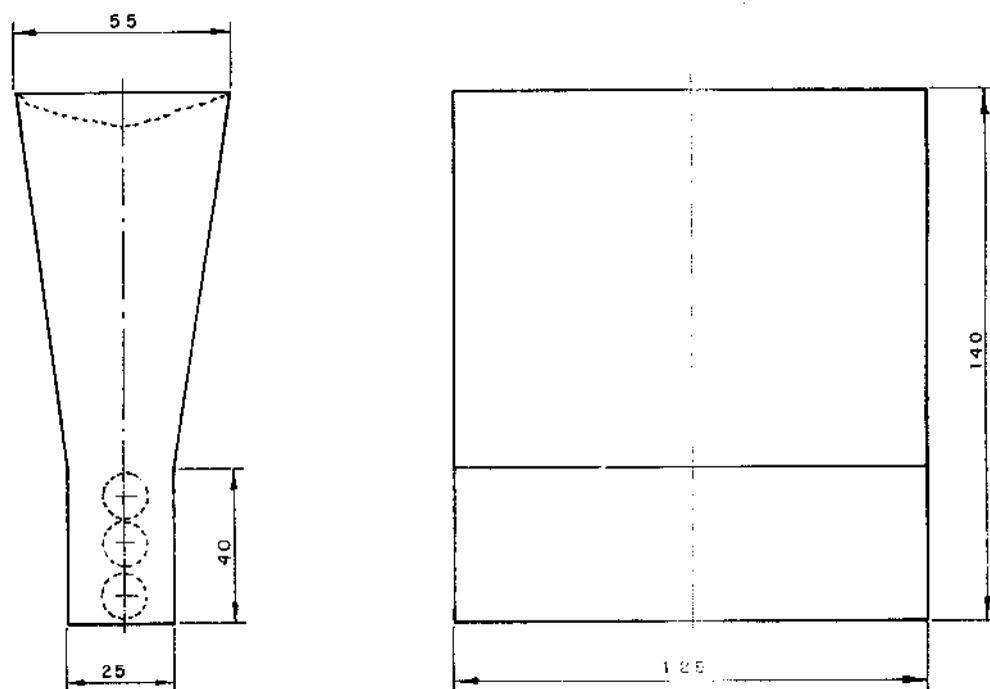
Em função da quantidade dos parâmetros acima e a combinação entre eles, determinou-se o número de lingotes para os ensaios. Ao todo foram 18 lingotes; 9 na primeira corrida, 3 na segunda e 6 na terceira, conforme a tabela 4.

A caracterização de cada corpo de prova obtido foi efetuada pelo levantamento das seguintes propriedades:

- Composição química
- microestrutura
- dureza
- limite de resistência à tração
- alongamento
- variação de área na secção de ruptura.



a) ESQUEMA DO MOLDE PARA OBTENÇÃO DOS LINGOTES



b) ESQUEMA DO CORPO DE PROVA Y SEGUNDO A A.B.N.T. [53]

Figura 14 - Esquemas do molde para vazamento dos lingotes e corpo de prova Y para ensaio de tração.

As propriedades mecânicas e a usinabilidade foram levadas após uma série de três ensaios sobre cada corpo de prova. Nestes ensaios procurou-se repetir nos mínimos detalhes as condições com as quais efetuou-se o primeiro, para reduzir a um mínimo os erros indesejáveis. Em seguida calculou-se os seguintes parâmetros estatísticos.

- média
- desvio padrão
- dispersão percentual em torno da média.

Os lingotes tiveram suas dimensões determinadas em função de todas estas variáveis.

O planejamento dos ensaios de usinabilidade será descrito posteriormente para não tornar-se repetitivo.

4.2. FERROS FUNDIDOS ENSAIADOS

4.2.1. Obtenção dos corpos de prova

Os lingotes foram vazados segundo o esquema da figura 14a e segundo as dimensões constantes da figura 15 e o procedimen

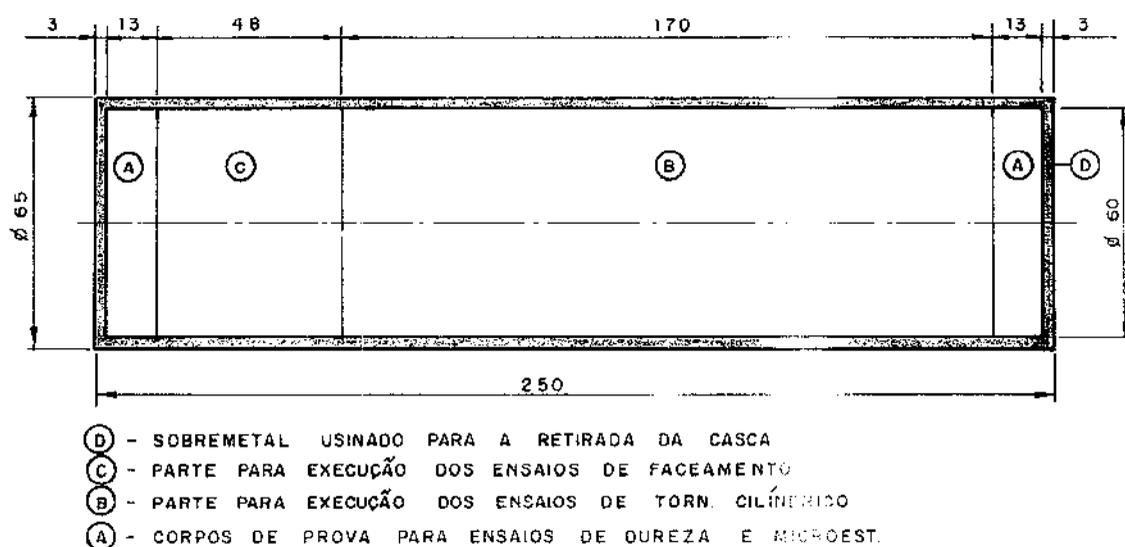


Figura 15 - Dimensões do lingote e dos corpos de prova resultantes para os diversos ensaios.

to utilizado foi o seguinte:

O molde para vazamento dos lingotes foi confeccionado segundo o esquema da figura 14a, foi construído de areia verde onde a areia de faceamento continha 8 a 10% de granalha de aço. Utilizou-se um massalote quente e o vazamento foi efetuado por um canal que alimentava diretamente ao massalote.

O corpo de prova "Y" foi moldado separadamente de acordo com as exigências da A.B.N.T. [53]. O molde foi construído em areia pelo processo CO₂ e o vazamento efetuado diretamente sobre a parte superior do "Y" simultaneamente com os lingotes.

O esquema do corpo de prova "Y", bem como as suas dimensões podem ser observadas na figura 14b.

Na fusão foi utilizado um forno de indução tipo cadinho de capacidade 150 kg e potência de 240 KVA do "Centro de Pesquisas de Fundição Tupy" em Joinville - S.C. onde, foi realizada a fusão.

A carga metálica era constituída de gusa para nodular, sucata de retorno de ferro fundido nodular e sucata de aço doce. O banho metálico foi superaquecido até 1510/1520°C no forno.

Em seguida foi transferido para uma panela de nodularização, pré-aquecida onde sofreu tratamento com a liga Fe-Si-Mg (5 a 10% Mg) e adição de 2%. Nesta panela ainda, foi feita a adição de arames de cobre quando necessário e em quantidade variável dependendo do planejamento.

Terminada a reação de nodularização, retirou-se a escória formada e transferiu-se o metal líquido para uma segunda panela também pré-aquecida, na qual se efetuou a inoculação de 0,60% da liga Fe-Si (75% Si) granulada. O vazamento foi efetuado na faixa de temperatura 1400/1420°C em moldes de areia verde.

4.2.2. Composição química

A análise da composição química dos ferros fundidos foi efetuada no laboratório do centro de pesquisas da Fundição Tupy e

a partir de amostras colhidas de cada corrida.

Os resultados são mostrados na tabela (4), onde pode-se ver também o valor do carbono equivalente calculado e as variações máximas e mínimas dos elementos.

| MATERIAIS | | PORCENTAGENS EM PESO % | | | | | | | CARB. EQUIV. CE | QUANT. DE LINGOTES |
|-----------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-------|-------------------|--------------------|
| CORRIDAS | CÓDIGOS | Cu | C | Si | Mn | Mg | S | P | | |
| 1. ^a (IC) | B1000 R1000 N1000 | 0 | 3,45 a 3,55 | 2,60 a 2,65 | 0,10 a 0,12 | 0,035 a 0,045 | 0,012 a 0,015 | <0,07 | 4,33 a 4,45 | 3 |
| | B1034 R1034 N1034 | 0,34 | " | " | " | " | " | " | | 3 |
| | B1070 R1070 N1070 | 0,70 | " | " | " | " | " | " | | 3 |
| 2. ^a (IIC) | B2000 | 0 | 3,49 | 2,72 | 0,24 | 0,029 | " | " | 4,41 | 1 |
| | B2061 | 0,61 | 3,47 | 3,17 | " | 0,045 | " | " | 4,54 | 1 |
| | B2104 | 1,04 | 3,45 | 2,83 | " | 0,041 | " | " | 4,40 | 1 |
| 3. ^a (IIIC) | R3000 N3000 | 0 | 3,52 | 2,82 | 0,15 | 0,045 | 0,014 | " | 4,46 | 2 |
| | R3037 N3037 | 0,37 | " | " | " | 0,035 | " | " | | 2 |
| | R3090 N3090 | 0,90 | " | " | " | 0,046 | " | " | | 2 |
| VARIÇÕES MÁX. E MIN DOS ELEMENTOS | | 0 a 1,04 | 3,45 a 3,55 | 2,60 a 3,17 | 0,10 a 0,24 | 0,029 a 0,046 | 0,012 a 0,015 | <0,07 | 4,33 a 4,54 | Total 18 |

Tabela 4 - Composição química dos ferros fundidos ensaiados e quantidade de lingotes.

A codificação usada para os ferros fundidos ensaiados é tal que, a letra significa o estado de tratamento térmico. O primeiro dígito significa o número da corrida e os três seguintes referem-se ao teor de cobre. Por exemplo: B1070 refere-se ao material bruto de fusão com 0,70% de cobre, da 1.^a corrida.

O carbono equivalente foi calculado através da expressão dada por CHIAVERINI [12]

$$\% \text{ C.E} = \% \text{ C} + \frac{\% \text{ Si} + \% \text{ P}}{3} \quad (4)$$

Da tabela (4) observa-se que os valores do carbono equivalente variando na faixa 4.33 a 4.54 indica que todos os ferros fundidos utilizados são hipereutéticos.

Observa-se ainda que dentre os ferros fundidos oriundos da 2ª corrida, o corpo de prova B2000 que apresenta um baixo valor de Mg (0,029%) poderia apresentar problemas de nodularização. Por outro lado o corpo de prova B2061 com um alto valor de Mg presente (0,045%), poderia apresentar uma certa fragilidade com uma conseqüente redução do alongamento. Estas observações serão comprovadas ou não posteriormente.

Para caracterizar a usinabilidade usou-se como padrão em alguns casos o aço SAE 1212 laminado bruto, produzido pela siderúrgica N. S.^a Aparecida com a seguinte composição química percentual: C=0,09; Mn=1,41; P=0,88; S=0,205; Cr=0,24; Cu=0,17 e Si=0,22.

4.2.3. Tratamentos Térmicos

Foram utilizados três estados de tratamento térmico conforme descrito anteriormente, brutos de fusão, recozidos e normalizados.

Os tratamentos térmicos foram efetuados em forno tipo Mufla onde, eram colocados simultaneamente os lingotes e os corpos de prova para os ensaios de tração, para garantir condições iguais de execução destes tratamentos.

O procedimento utilizado nos tratamentos térmicos foi o seguinte:

recozimento - foi realizado à temperatura de 760°C com tempo de permanência de 2 horas seguido de descida controlada da temperatu

ra durante 3 horas até 660°C e depois resfriamento ao ar.

normalização - foi realizado à temperatura de 900°C com tempo de permanência de 2 horas e 30 min, seguido de resfriamento ao ar.

A tabela (4) mostra a ocorrência destes tratamentos nas três corridas.

4.2.4. Análises metalográficas

As análises metalográficas para revelação das microestruturas foram efetuadas em 2 amostras colhidas de dois corpos de prova (A) conforme a figura 15.

As amostras foram cortadas a partir do corpo de prova (A) conforme o esquema da figura 16.

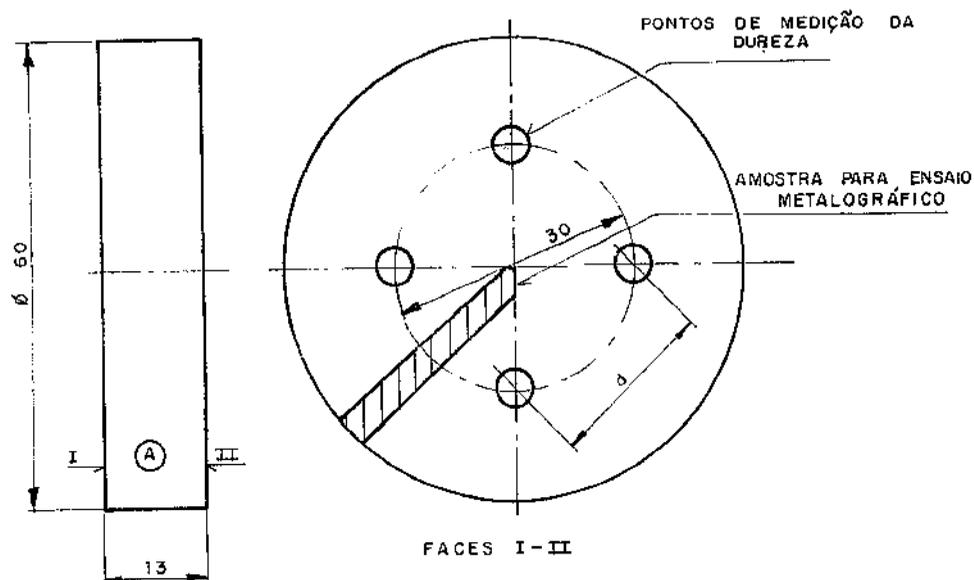


Figura 16 - Corpos de prova tipo (A) figura 15 para ensaios de dureza e metalografia.

Conforme a técnica convencional da metalografia as amostras

tras foram cortadas através do disco abrasivo, em seguida as amostras foram embutidas, lixadas e polidas com pasta de diamante de diversas granas. Após, foram atacadas com Nital a 2% e observadas ao microscópio.

As amostras de uma extremidade do lingote foram comparadas ao do outro extremo e como não apresentaram diferenças, foram fotografadas as amostras colhidas de um só lado dos lingotes. Para os fundidos provenientes da 2.^a corrida, como havia possibilidade de ocorrerem certas irregularidades em função da composição química, foram tiradas fotos de amostras dos dois extremos do lingote.

Equipamento usado nas micrografias:

- microscópio metalográfico
- modelo PME
- fabricante Olympus

As figuras 17 a 25 mostram as microestruturas dos ferros fundidos provenientes da primeira corrida onde tem-se respectivamente:

- figuras 17 a 19 - material bruto de fusão
- figuras 20 a 22 - " recozido
- figuras 23 a 25 - " normalizado

Ambas, com teores de cobre: 0, 0.34 e 0.70%.

Como pode ser observado, cada amostra foi fotografada com dois aumentos, 180X e 720X respectivamente.

Os fundidos provenientes da 2.^a corrida são mostrados nas figuras 26 a 31.

As figuras 26 a 28 referem-se a amostra n^o 1 enquanto as figuras 29 a 31 são relativas a amostra n^o 2.

Os fundidos da corrida n^o 2 são brutos de fusão e os teores de cobre os mais elevados: 0, 0.61 e 1.04% respectivamente.

As figuras 32 a 37 mostram as microestruturas dos ferros fundidos provenientes da 3.^a corrida onde, as figuras 32 a 34

referem-se ao material recozido enquanto as demais são relativas ao material normalizado.

COMENTÁRIOS SOBRE AS MICROGRAFIAS

Influência do cobre

a) Estrutura bruta de fusão

Considerando-se as microestruturas dos fundidos da 1^a e 2^a corridas, figuras 17 a 19 e 26 a 31, observou-se que o cobre atuou como elemento perlitizante como era esperado em função do exposto no capítulo referente a revisão da literatura [1,2,3,4,5,6,7,8].

O material sem cobre que apresenta uma matriz predominantemente ferrítica (com cêrca de 75 a 80%), ao ser adicionado 0,34% de cobre a sua matriz modificou-se substancialmente, reduzindo-se a quantidade de ferrita para aproximadamente 40 a 45%. A ferrita nestes casos ficou concentrada ao redor dos nódulos de grafita e em camada intercaladas às lamelas de perlita fina.

Por outro lado a perlita presente apresenta aspectos variados com perlita grosseira e perlita fina.

A adição de 0,61% de cobre reduziu ainda mais a quantidade de ferrita para cerca de 20 a 25% com formação idêntica à anterior. A perlita por outro lado, refinou-se mais, observando-se áreas maiores com perlita fina.

O teor de 0,70% de cobre mostrou praticamente os mesmos efeitos de 0,61% enquanto 1,04% acentuou a redução da ferrita e o refino da perlita.

Os nódulos de grafita presentes são da forma VI e dimensões 6, 7 e 8 [64].

Não observou-se efeito deletério do cobre quanto ao nódulos de grafita de acordo com observações de MORROUGH [4]. Também não houve formação de carbonetos eutéticos para os teores crescentes do cobre, comprovando conclusões tiradas por CASTELO BRANCO e SOUZA SANTOS [6].

Quanto ao tamanho e quantidade dos nódulos de grafita, praticamente não houve alteração em presença do cobre não sendo portanto, evidenciado efeito grafitizante do cobre.

Com relação a possibilidade de problemas de nodularização no lingote IIC B2000, as fotos tiradas de amostras colhidas dos 2 extremos do lingote evidenciaram algumas formas de grafita diferentes da esferoidal mas, sem chegar a comprometer a natureza da classificação do ferro fundido, conforme as figuras 26 e 29.

b) Estruturas recozidas

Observando-se as fotos das figuras 20 a 22 e 32 a 34 que mostram os materiais provenientes da 1.^a a 3.^a corridas respectivamente, nota-se que a adição do cobre não causou mudança alguma na matriz metálica que é composta em ambos os casos de ferrita no seu todo e grãos de ferrita de formas as mais diversas.

No que se refere a grafita, apresentaram-se nódulos forma VI e dimensões 6, 7 e 8 e também algumas formas V com dimensões 6 e 7 [64].

Pode-se dizer também que houve uma pequena tendência de redução no tamanho dos nódulos e conseqüente aumento da quantidade de nódulos confirmando-se a observação de BARUCH [5].

c) Estruturas normalizadas

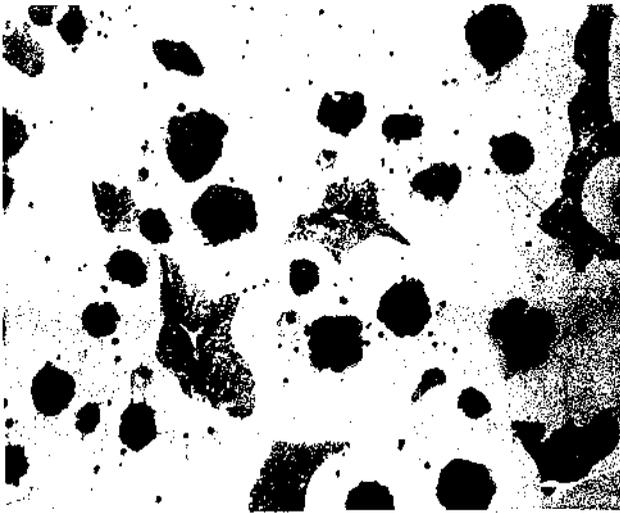
As figuras 23 a 25 e 35 a 37 revelam as microestruturas dos materiais da 1.^a e 3.^a corridas respectivamente, nelas verifica-se que a normalização conduz a matriz metálica a uma estrutura predominantemente perlítica sem no entanto, eliminar por completo a ferrita.

A ferrita remanescente tende a se alojar ao redor dos módulos de grafita e também entre as lamelas de perlita.

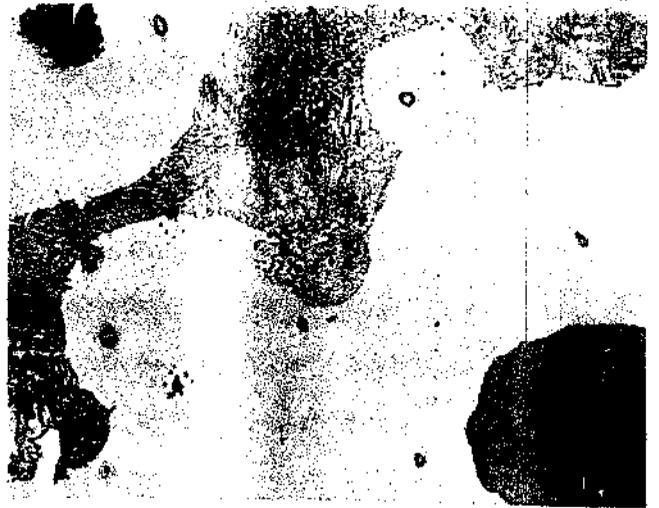
O efeito da adição do cobre neste caso é semelhante ao das estruturas brutas de fusão embora que em proporções menores em decorrência do efeito mais marcante do tratamento térmico.

A proporção de perlita presente aumenta consideravelmente em conseqüência da normalização e a adição de cobre aumenta-a mais um pouco e refina a perlita.

Os nódulos de grafita são da forma VI e dimensões 6, 7 e 8 [64].



a) 180X



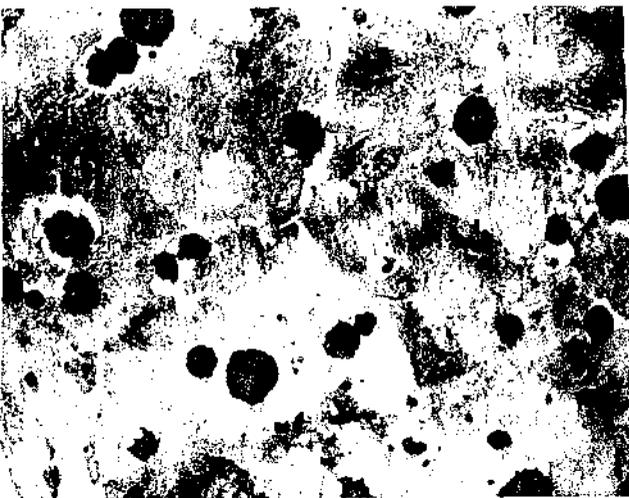
b) 720X

Figura 17 - Material B1000 - estrutura da matriz: Ferrita \cong 80%

a) 180X



b) 720X

Figura 18 - Material B1034 - estrutura da matria: Perlita \cong 60%

a) 180X



b) 720X

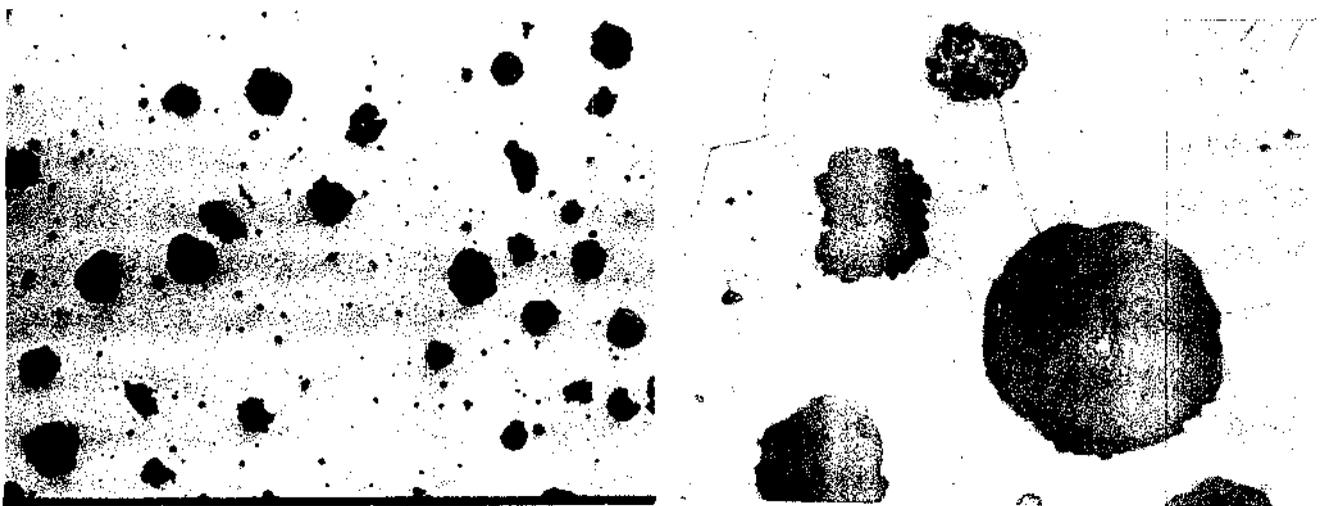
Figura 19 - Material B1070 - estrutura da matriz: Perlita \cong 80%



a) 180X

b) 720X

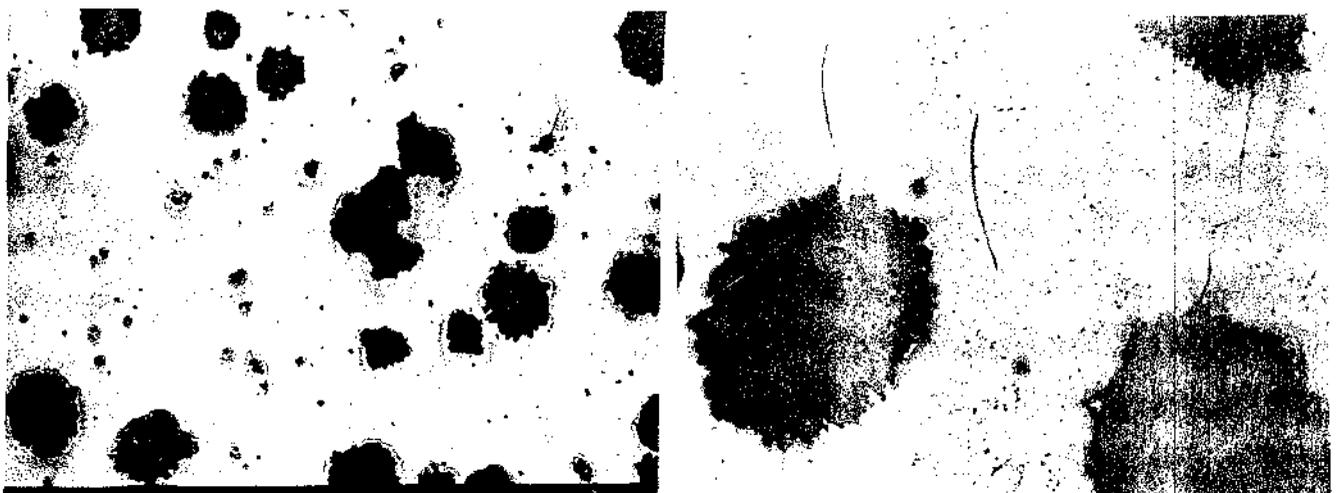
Figura 20 - Material R1000 - estrutura da matriz: Ferrita = 100%



a) 180X

b) 720X

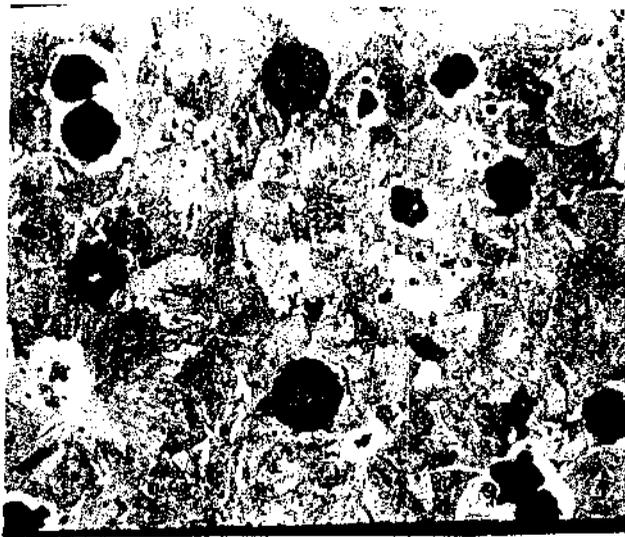
Figura 21 - Material R1034 - estrutura da matriz: Ferrita = 100%



a) 180X

b) 720X

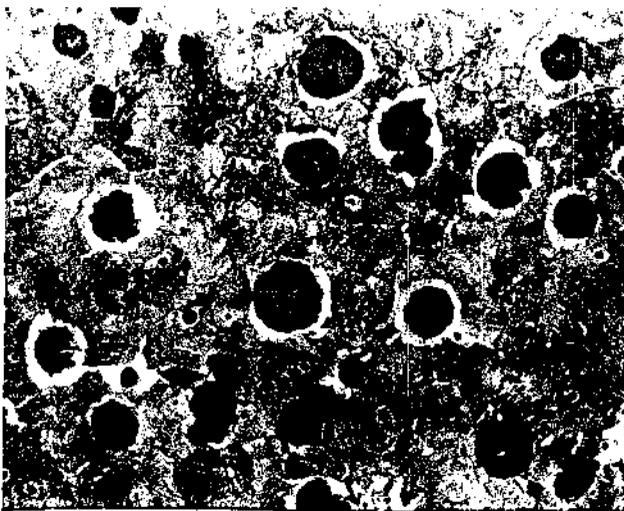
Figura 22 - Material R1070 - estrutura da matriz: Ferrita = 100%



a) 180X



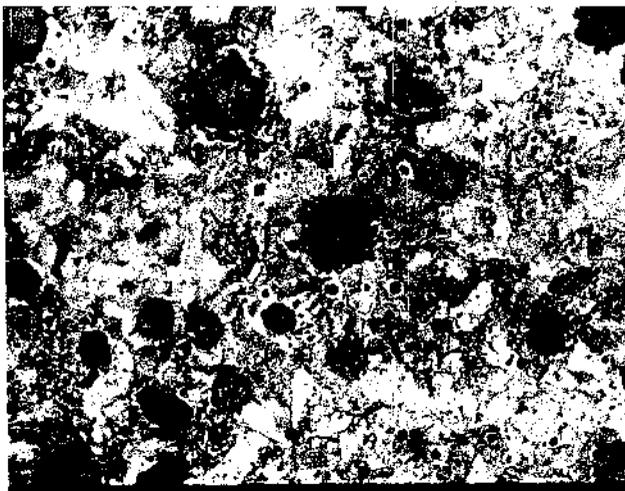
b) 720X

Figura 23 - Material N1000 - estrutura da matriz: Perlita \cong 80%

a) 180X



b) 720X

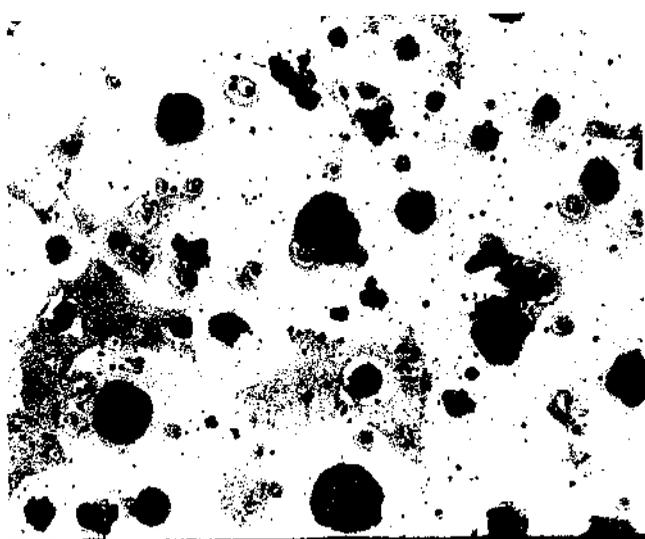
Figura 24 - Material N1034 - estrutura da matriz: Perlita \cong 90%

a) 180X



b) 720X

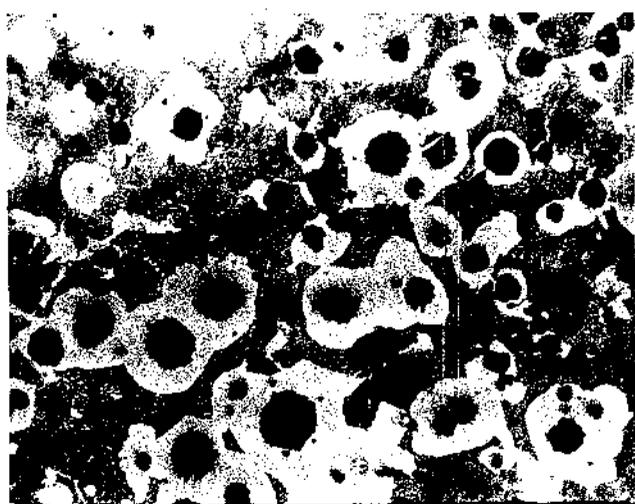
Figura 25 - Material N1070 - estrutura da matriz: Perlita \cong 95%



a) 180X



b) 720X

Figura 26 - Material B2000 - Estrutura da matriz: Ferrita \cong 80%. Amostra 1

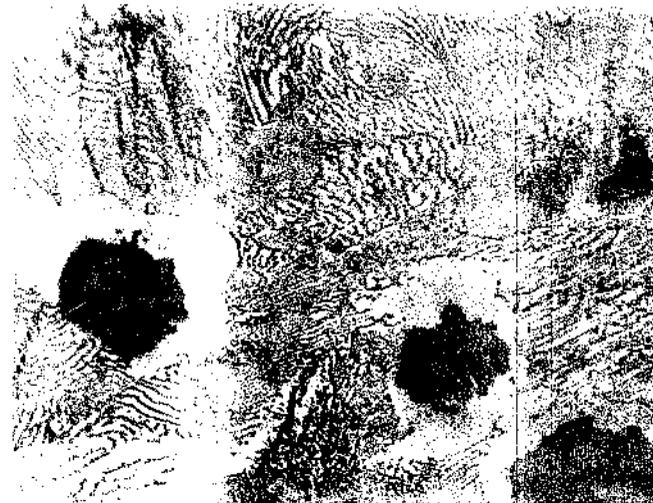
a) 180X



b) 720X

Figura 27 - Material B2061 - estrutura da matriz: Perlita \cong 70%. Amostra 1

a) 180X



b) 720X

Figura 28 - Material B2104 - estrutura da matriz: Perlita \cong 85%. Amostra 1

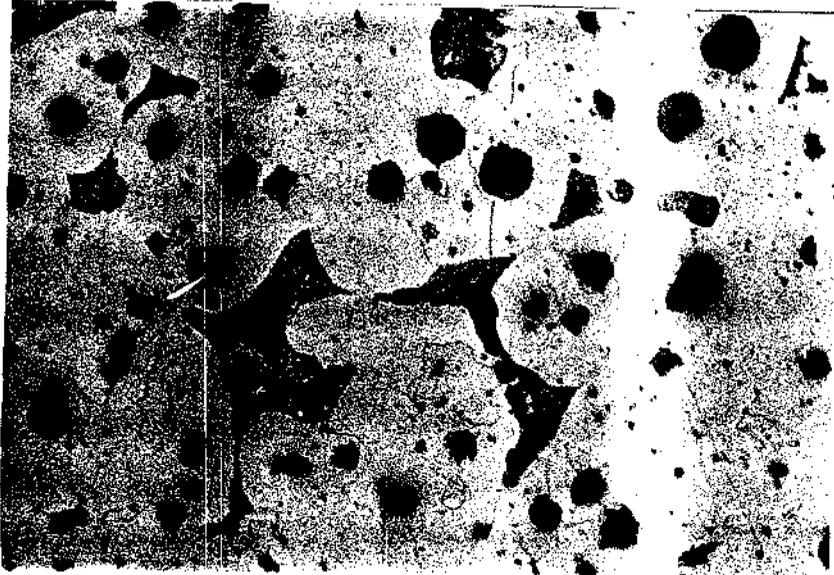


Figura 29a - Material B2000, amostra 2 - estrutura da matriz:
Ferrita \approx 80%. Aumento 180X.

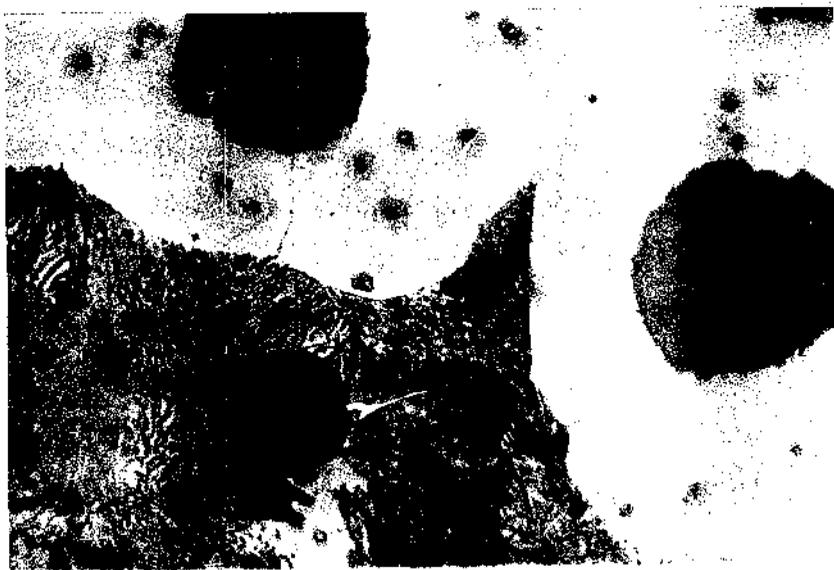


Figura 29b - Material B2000, amostra 2 - Estrutura da matriz:
Ferrita \approx 80%. Aumento 720X.

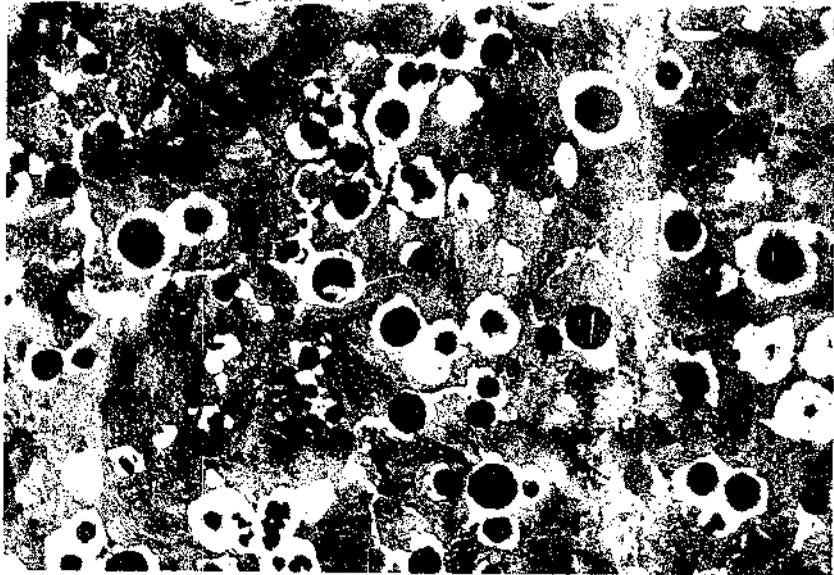


Figura 30a - Material B2061, amostra 2 - Estrutura da matriz:
Perlita \approx 70%. Aumento 180X



Figura 30b - Material B2061, amostra 2 - estrutura da matriz:
Perlita \approx 70%. Aumento 720x.

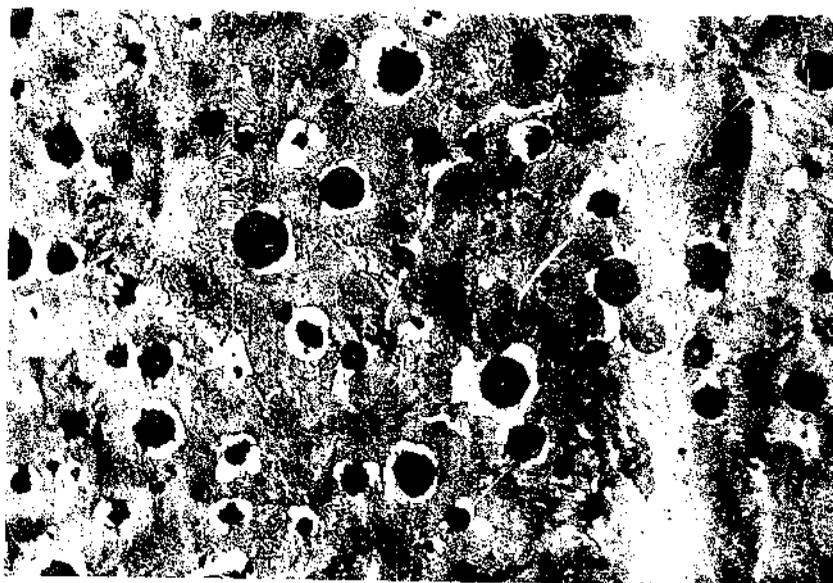


Figura 31a - Material B2104, amostra 2 - Estrutura da matriz:
Perlita \approx 85%. Aumento 180X.

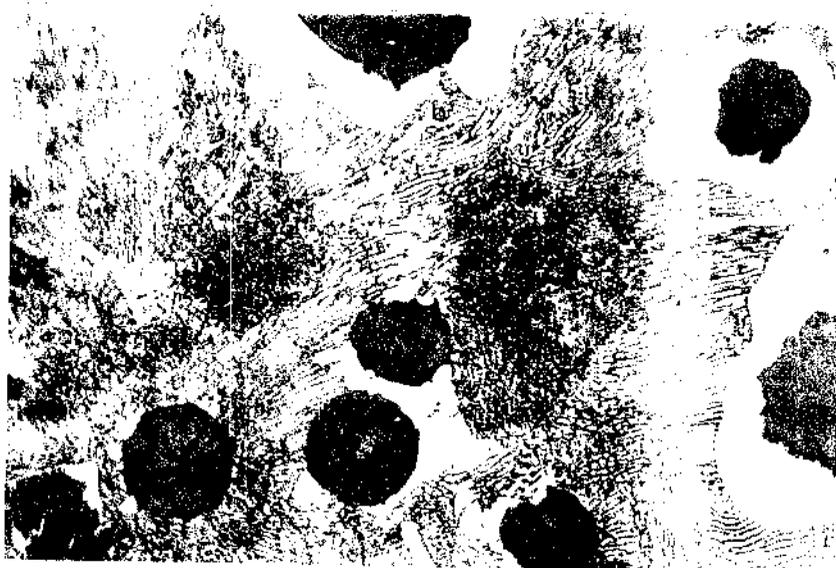
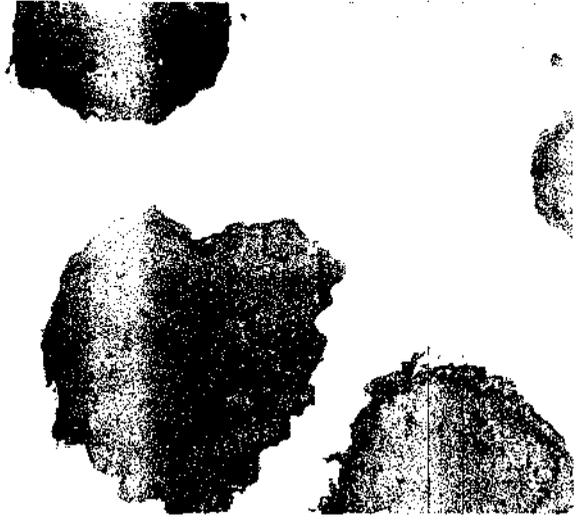


Figura 31b - Material B2104, amostra 2 - estrutura da matriz:
Perlita \approx 85%. Aumento 720X.

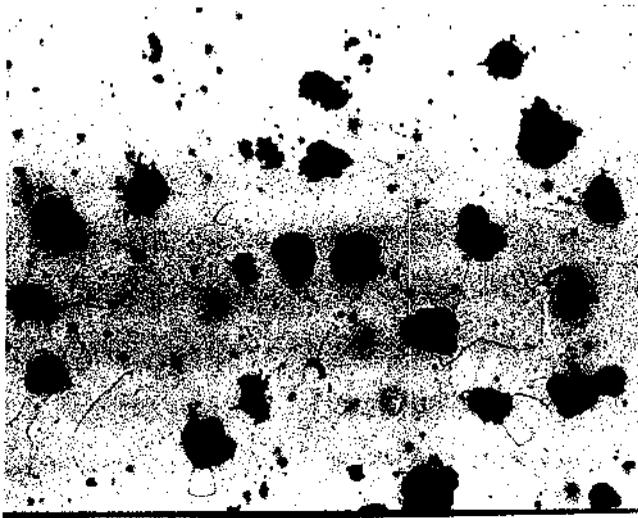


a) 180X

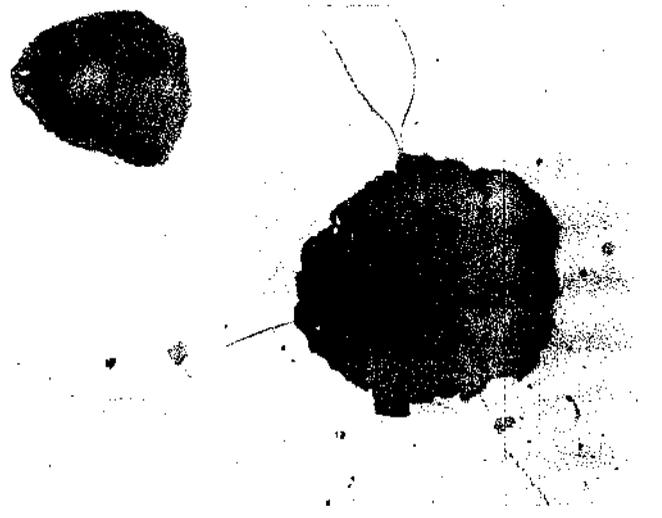


b) 720X

Figura 32 - Material R3000, estrutura da matriz: Ferrita = 100%

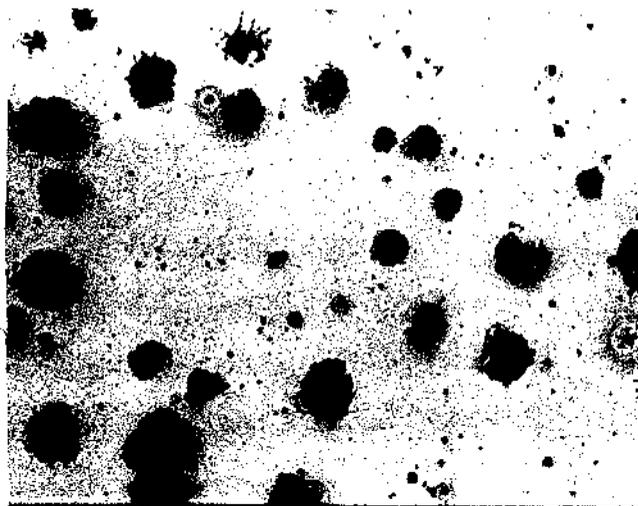


a) 180X

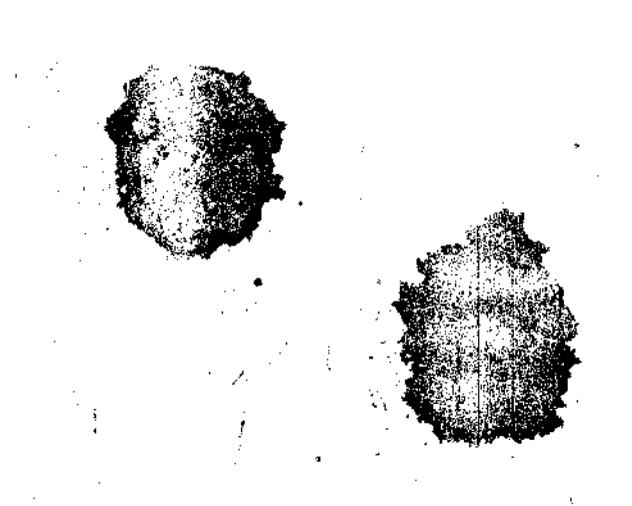


b) 720

Figura 33 - Material R3037, estrutura da matriz: Ferrita = 100%

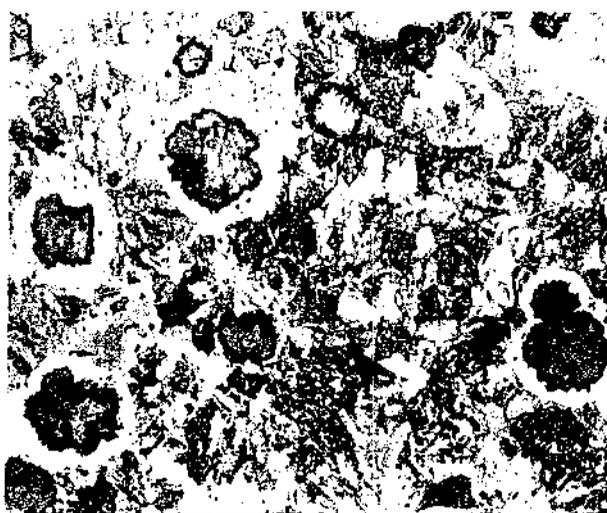


a) 180X



b) 720X

Figura 34 - Material R3090, estrutura da matriz: Ferrita = 100%



a) 180X



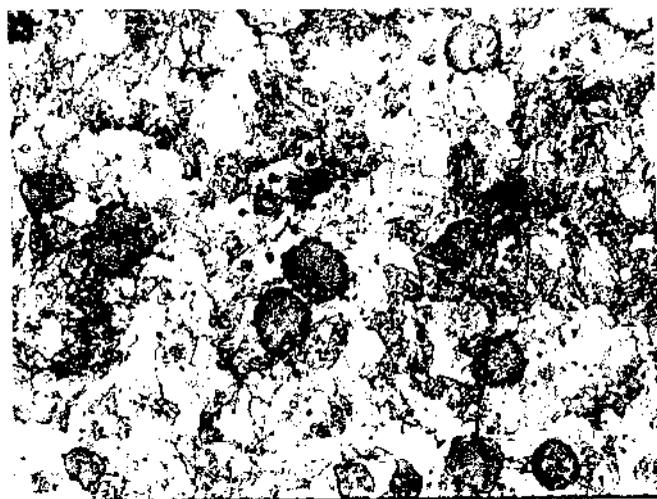
b) 720X

Figura 35 - Material N3000 - estrutura da matriz: Perlita \approx 85%

a) 180X



b) 720X

Figura 36 - Material N3037 - estrutura da matriz: Perlita \approx 90%

a) 180X



b) 720X

Figura 37 - Material N3090 - estrutura da matriz: Perlita \approx 95%

4.2.5. Ensaaios de dureza

Os ensaios de dureza foram realizados sobre dois corpos de prova tipo disco colhidos de cada extremo do lingote conforme o esquema da figura 16.

Todas as medições foram efetuadas sobre um mesmo diâmetro de 30,0 mm e igual a metade do diâmetro do corpo de prova.

Tratando-se de dureza Brinell, foram feitas 4 impressões equidistantes sobre o diâmetro em ambos os lados de cada corpo de prova.

A distância entre duas impressões, a espessura do disco e a relação carga aplicada contra o diâmetro da esfera foram mantida dentro das especificações da "ABNT" norma MB 60 [54].

Os ensaios foram realizados utilizando:

- Máquina universal de ensaios
Tipo BK 300
Acionamento hidráulico
Capacidade 4000 kgf
Fabricante: Otto Wolpert-Werke, Alemanha

A leitura dos diâmetros das impressões foi efetuada com uma lupa. A carga aplicada foi 3000 kgf e o diâmetro da esfera 10,0 mm.

Para as medições efetuadas da forma descrita foram calculados os valores da média, desvio padrão e dispersão percentual dos valores em torno da média.

Os resultados são apresentados no apêndice I e resumidos e comentados no capítulo 5.

4.2.6. Ensaaios de Tração

Através do ensaio de tração foram levantadas as seguintes características de cada material ensaiado:

- a) limite de resistência à tração

- b) alongamento
- c) proporção de área na ruptura.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram fundidos simultaneamente com os lingotes na forma de blocos Y Figura 14b e depois usinados na forma e dimensões constantes na Figura 38, obedecendo os critérios impostos pela ABNT [53].

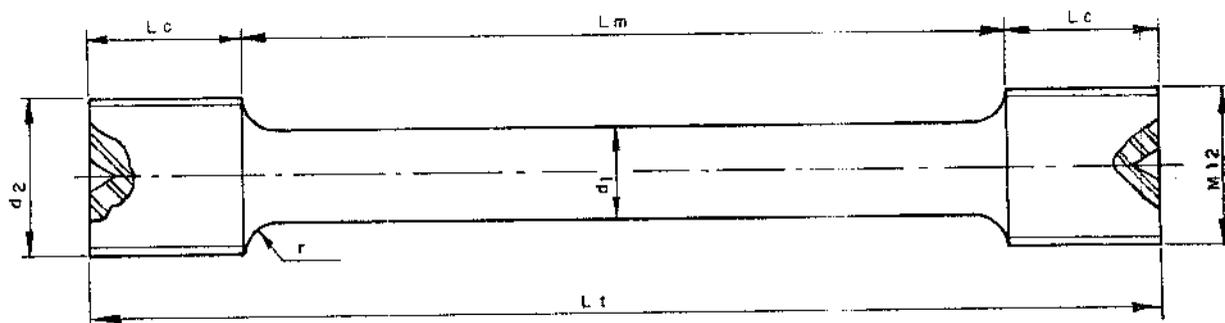


Figura 38 - Corpos de prova para ensaios de tração obtidos a partir de blocos "Y" segundo ABNT [55].

As dimensões referentes a figura 38 são as seguintes:

- $d_1 = 8,0 \text{ mm}$
- $d_2 = M12$
- $L_c = 10,0 \text{ mm}$
- $L_m = 95,0 \text{ mm}$
- $L_t = 115 \text{ mm}$
- $r > 4,0 \text{ mm}$, $r = 6,0 \text{ mm}$

O equipamento utilizado nos ensaios foi:

- Máquina universal de ensaios
 - Capacidade 40.000 kgf
 - Acionamento hidráulico
 - Fabricante: Mohr & Federhaf A.C. Alemanha

As características levantadas nos ensaios foram calculadas da seguinte forma:

a) Limite de resistência à tração (σ_r)

$$\sigma_r = \frac{P}{S} \quad (5)$$

b) Alongamento ($\epsilon\%$)

$$\epsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100 \quad (6)$$

c) Proporção de área na ruptura ($1/R_f$)

$$\frac{1}{R_f} = \frac{S_f}{S_0} = \frac{d_f}{d_1} \quad (7)$$

todas as características citadas foram calculadas com valores provenientes de ensaios sobre 3 corpos de prova e calculados os valores da média, desvio padrão e dispersão.

Os resultados são apresentados no apêndice I e resumidos e comentados no capítulo 5.

4.3. ENSAIOS DE USINABILIDADE

4.3.1. Parâmetros dos Ensaios Utilizados

A utilização de um ensaio de usinabilidade requer uma análise criteriosa das variáveis que o influenciam, através desta análise torna-se possível fixar um certo número de variáveis e variar outras de modo a obter-se resultados de boa aceitação em função da sua repetibilidade.

Para tornar-se possível comparar critérios distintos,

necessita-se estabelecer critérios mais rigorosos na fixação das variáveis.

Devido a ausência de uma norma brasileira que estabeleça os critérios para realização dos ensaios de usinabilidade resolveu-se adotar a norma Francesa "AFNOR" [9] para os ensaios já normalizados por aquela entidade e para os ensaios carentes de normas, usou-se critérios baseados em resultados experimentais anteriores.

Em função do exposto, montou-se a tabela 5 onde, para cada ensaio utilizado tem-se as variáveis fixas, os parâmetros medidos e os elementos variáveis.

Ensaios de usinabilidade utilizados e seus nomes códigos usados neste trabalho.

- a) Ensaio de usinabilidade baseado na variação da velocidade de corte por incrementos no torneamento cilíndrico - "Ensaio T.C."
- b) Ensaio baseado na temperatura de usinagem
 - b_1 - temperatura para uma dada velocidade de corte - "Ensaio θ_v "
 - b_2 - temperatura média - "Ensaio θ_m "
 - b_3 - Ensaio baseado na leitura do gráfico da temperatura na operação de faceamento e que permite o cálculo de uma velocidade limite de faceamento - "Ensaio V_{LF} "
- c) Ensaio baseado na variação contínua da velocidade de corte na operação de faceamento de RENAULT-MATHON - "Ensaio Mathon".
- d) Determinação indireta do índice de usinabilidade através do cálculo da velocidade de corte para uma vida de 60 minutos segundo Datsko - "Ensaio Datsko".

Padrões de usinabilidade utilizados:

Foram utilizados comparações referentes a dois padrões adotados, o Aço SAE 1212 laminado bruto e o ferro fundido nodular B1000 bruto de fusão sem cobre proveniente da 1.^a corrida.

Variáveis estatísticas usadas nas medições:

O Apêndice II contém as expressões de cálculo usadas para a média, desvio padrão, dispersão, fórmulas de regressão linear e estimativas de precisão em função da distribuição de Student, segundo [55, 56 e 57].

4.3.2. Equipamentos utilizados nos ensaios

Dos ensaios enumerados na tabela (5), com exceção do Ensaio Datsko, todos foram experimentais e para realização destes ensaios foram utilizados as seguintes máquinas e equipamentos.

Torno IMOR

Modelo S20

Distância entre pontas: 1000mm

Diâmetro máximo sobre o barramento: 325 mm

Potência 5CV

Fabricante: Indústrias Romi S.A. - Sta. Bárbara D'Oeste
S.P.

Afiadora Universal

Tipo: AFU2

Fabricante: Vigorelli do Brasil, Jundiaí-SP

Relógio comparador

Resolução: 0,01 mm

Fabricante: Mitutoyo

Paquímetro

Resolução: 0,05 mm

Faixa de medição: 0 a 250 mm

Fabricante: Mitutoyo

Nível de bolha

Resolução: 0,02 mm/m

Fabricante: Mitutoyo

Cronômetro

Resolução: 0,2 seg.

Fabricante: Ilona

Tacômetro

Faixa de medição: 40 a 50.000 rpm

Fabricante: Deumo, Alemanha

Escovas

Contatos de prata SK6 - GR 410-01

Referência: FNR

Fabricante: Hottinger Baldwin Mestechnik

Voltímetro digital

Modelo: 8000A

Fabricante: John Fluke, MFC CO INC

Registrador

Modelo 7155B

Fabricante: Hewlett Packard, USA

Registrador

YEW Laboratory Recorder

Modelo 3047

Fabricante: Yokogawa Electric Works, Ltda, Japão

Todos os equipamentos e sistemas de medição foram aferidos para determinar os possíveis erros das medições efetuadas.

Também foi efetuado nivelamento prévio da máquina ferramenta utilizada, bem como, controlado os parâmetros de medição indicados na máquina e aferidas as suas escalas.

As demais providências tomadas para eliminação e controle de erros são descritas nos procedimentos de cada ensaio.

| Ensaio de Usinabilidade Utilizados | PARÂMETROS RELATIVOS A: | | | | Variáveis Medidas |
|------------------------------------|--|---------------------------------------|------------------------|-------------------------------|--|
| | Mat.da peça (Variáveis) | Ferramenta | Processo de Usinagem | Condições de Usinagem | |
| Ensaio T.C. | Comp.quim. microestrut. Dureza (HB) Lim.resist (σ_r) Along (8%) | Material(1) tratam. (1) geometria(1) | Torneam. Cilíndrico | Avanço (1) profundidade (1) | Velocidade de corte para a destruição da aresta cortante |
| Ensaio θ_v | Idem | Idem | Idem | Idem | temperatura de usinagem |
| Ensaio θ_m | Idem | Idem | Idem | Idem | temperatura média função dos tempos no ensaio T.C. |
| Ensaio Mathon com ferram. (1) | Idem | Material(1) tratam. (1) geometria(2) | Torneam. de Faceamento | avanço(2) profundidade (2) | diâmetro correspondente a um recuo de 0,2mm na ponta da Ferramenta |
| Ensaio Mathom com ferram. (2) | Idem | material (2) tratam. (2) geometria(2) | Idem | Idem | Idem |
| Ensaio V_{LF} | Idem | Mat.(1)e(2) Trat.(1)e(2) geometria(2) | Idem | Idem | Velocidade Limite de faceamento (falha da ferram.) |
| Ensaio Datsko | Idem | aço rápido | Torneamento cilíndrico | Avanço, profundidade de corte | v60 conforme fórmula específica |

Tabela 5 - Diversos parâmetros envolvidos com ensaios de usinabilidade utilizados. (1) e (2) significam diferentes condições.

4.3.3. Procedimentos e Descrição dos Ensaio

4.3.3.1. Ensaio T.C.

Este ensaio consiste no aumento discreto da velocidade de corte por incrementos e baseia-se no critério de vida da ferramenta.

O método consiste no torneamento cilíndrico de corpo de prova, conforme figura 39, com uma ferramenta de aço rápido.

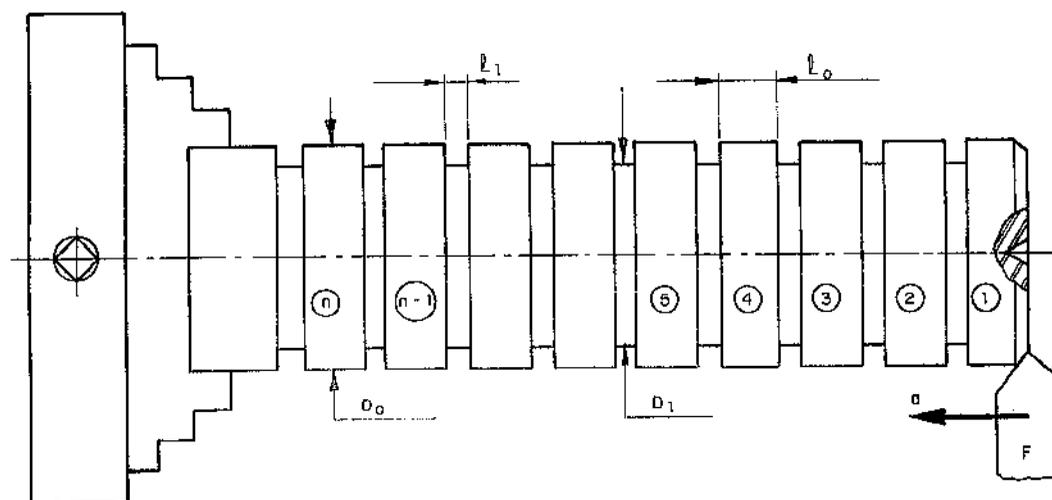


Figura 39 - Esquema do Ensaio T.C. segundo a AFNOR [9].

O ensaio começa no anel (1) usinando com velocidade de corte v_1 e termina com a destruição da aresta cortante da ferramenta no n ésimo anel em um tempo relativamente curto.

A norma "AFNOR-A03 654" [9] padronizou as seguintes condições para execução dos ensaios levando em conta a usinagem de aços.

Começando com a velocidade v_1 o ensaio prossegue até

atingir-se a falha da ferramenta com a destruição da sua aresta cortante evidenciado pela formação do anel brilhante, a emissão de um ruído característico ou ainda a brusca elevação da temperatura ou da força de usinagem. Para o anel em que ocorreu a falha atribui-se a n-ésima velocidade de corte (v_n).

A velocidade de corte varia desde v_1 até v_n e é aumentada progressivamente com incrementos Δv segundo uma progressão geométrica de razão 1,12.

As dimensões constantes da figura 59 são determinadas como segue:

(l_0) deve ser tal que o percurso de corte sobre o diâmetro ($D_0 - 2p$) em cada anel seja igual a 25m tem-se então:

$$l_0 = \frac{25 \cdot 10^3 \cdot a}{\pi (D_0 - 2p)} \quad (\text{mm}) \quad (8)$$

O diâmetro interno D_1 deve ser calculado em função do número de ensaios que serão executados sobre cada corpo de prova e a dimensão l_1 deve ser tal que permita a saída sem problemas da ferramenta estipulado pela norma entre 10 e 15 mm.

As condições de corte devem ser tais que se tenha:

Para operações de desbaste:

- avanço, $a=0,25$ mm/volta
- profundidade, $p=2,5$ mm
- raio da ponta da ferramenta $r=0,3$ mm

Para operações de acabamento:

- avanço $a=0,1$ mm/volta
- profundidade, $p=1,0$ mm
- raio da ponta da ferramenta $r=0,4$ mm

A velocidade de corte deve ser constante em cada anel com uma tolerância de $\pm 0,5\%$ e a velocidade inicial v_1 deve ser tal que a falha da ferramenta ocorra do 6º até o 8º anel. O in-

tervalo de corte entre um anel e outro é pré-fixado e igual a 2 min \pm 15 segs.

O corpo de prova deve ter rigidez suficiente para que não ocorram vibrações nem flexão.

Para os ensaios adotou-se a condição de acabamento com:

avanço, $a=0,104$ mm/volta

profundidade, $p=1,00$ mm

raio da ponta da ferramenta, $r=0,4$ mm

Resultando o corpo de prova com a forma e dimensões mostradas na figura 40.

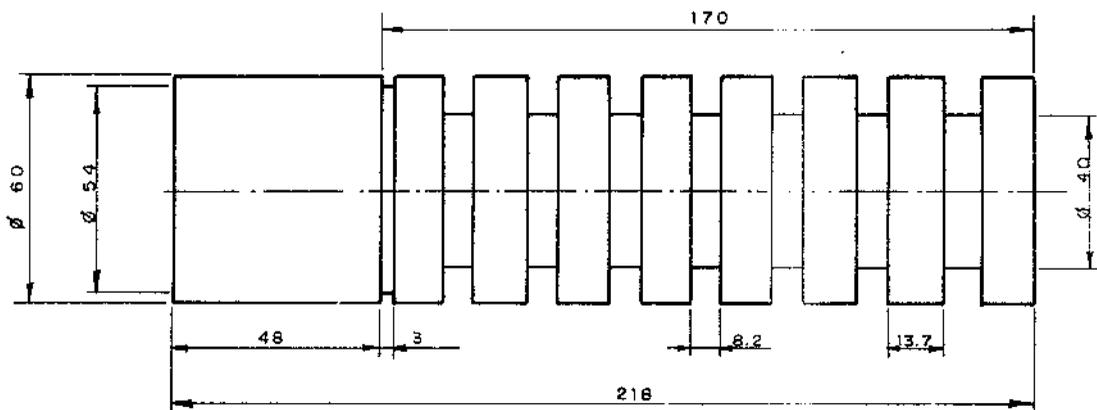


Figura 40 - Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios T.C.

A ferramenta de corte segundo a norma deve ser de aço rápido classe 650 correspondente ao tipo M_2 da "A.I.S.I." [36].

A geometria da ferramenta especificada na figura 41 é a seguinte:

- ângulo de posição $X = 75^\circ$
- ângulo de folga $\alpha = 8^\circ$

- ângulo de saída $\gamma = 25^\circ$
- ângulo de ponta $\epsilon = 90^\circ$
- ângulo de inclinação $\lambda = 0^\circ$
- raio da ponta $r = 0,4 \text{ mm}$

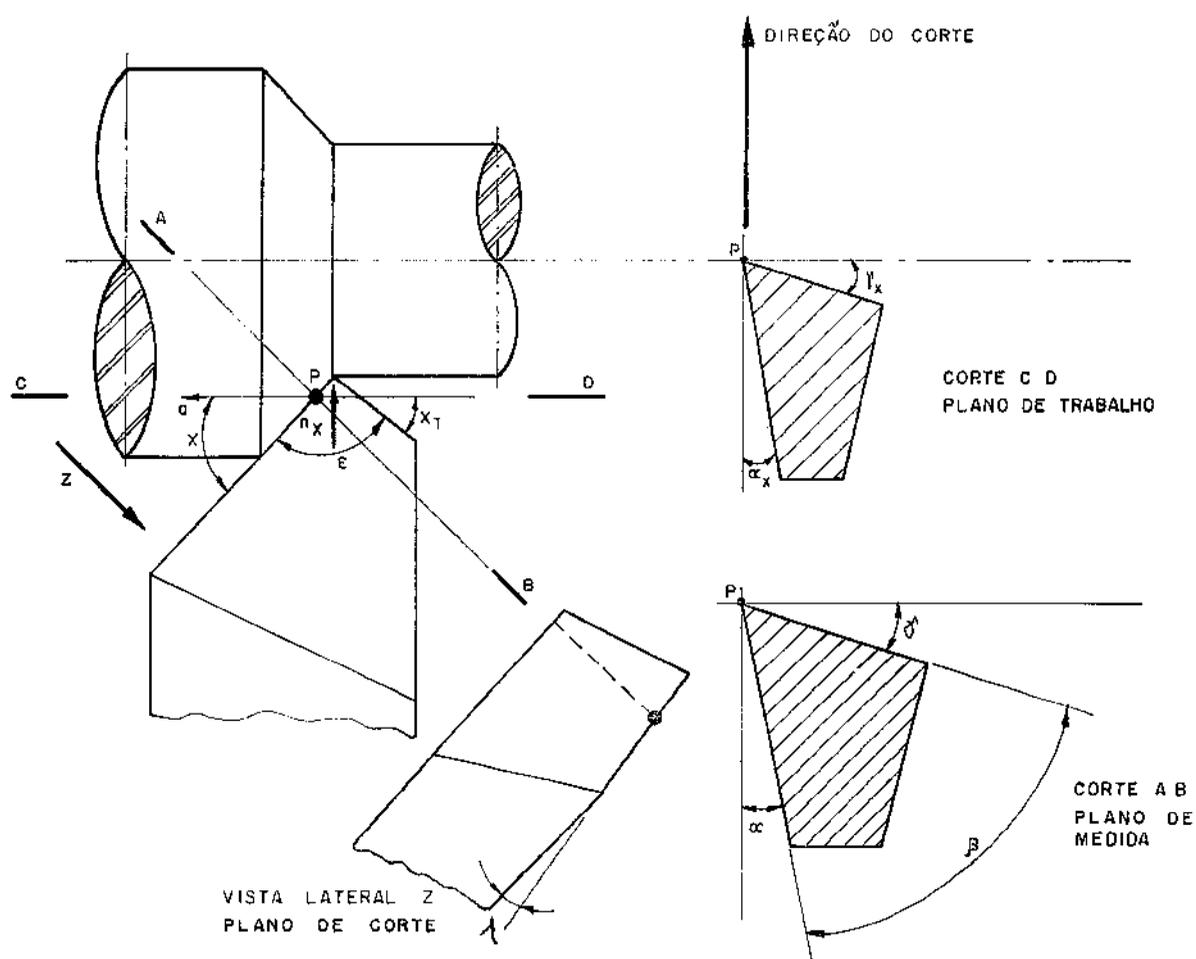


Figura 41 - Geometria da ferramenta de corte segundo o sistema de referência da ferramenta.

A cunha da ferramenta deve ter suas superfícies com uma rugosidade superficial não superior a $25 \mu\text{m}$ e nas reafiações deverá ser cortado pelo menos $2,0 \text{ mm}$ de material além do desgaste com o rebolo incidindo perpendicularmente à aresta de corte com fluido refrigerante adequado.

Adotou-se um valor de rugosidade superficial de no máximo 0,18 Ra conforme a ABNT e na reafiação da ferramenta removeu-se 5,0mm de material estando a ferramenta montado em um suporte especialmente construído para esse fim, garantindo o perpendicularismo do disco abrasivo à aresta de corte.

O resultado do ensaio consiste em calcular uma velocidade de corte comparativa (v_{comp}) em função dos seguintes elementos:

$$v_{comp} = v_{n-1} + (v_n - v_{n-1}) \frac{1}{I_0} \quad (\text{m/min}) \quad (9)$$

De posse do valor da velocidade comparativa calcula-se o índice de usinabilidade comparando-se o material ensaiado com o material tomado como padrão de acordo com a expressão:

$$I.U = \frac{v_{comp.ens.}}{v_{comp.padr.}} \times 100 \quad (10)$$

Para execução dos ensaios foram modificadas algumas das disposições da norma.

A primeira ocorreu com a razão da progressão geométrica "r" dos incrementos, devido as características do torno disponível para os ensaios. Usou-se $r=1,25$ ao invés de 1,12.

Isto causou um aumento na taxa de variação das velocidades e seria lógico esperar um tempo menor para a falha da ferramenta, comparando-se ao valor proposto pela norma $1,25 = (1,12)^2$.

A segunda modificação diz respeito a ferramenta de corte. O material proposto pela norma foi o aço rápido M_2 classe 650 e que corresponde ao aço rápido Villares VWM-2.

Dada a ausência deste material no mercado pois, não é mais fabricado, optou-se pela utilização do aço rápido Villares VK10N com 10% de cobalto da classe 660 é indicado pela Villares para usinagem de ferro fundido.

O aço rápido VK10N possui a seguinte composição química percentual em peso:

| | | |
|-----------|-----------|-----------|
| C = 1,15 | Si = 0,22 | Mn = 0,32 |
| Cr = 4,22 | Ni = 0,30 | Mo = 4,36 |
| W = 7,96 | V = 0,78 | Co = 9,88 |
| P = 0,025 | S = 0,010 | Nb = 2,1 |
| Cu = 0,09 | | |

As modificações citadas praticamente não alteram os resultados do ensaio porque elas se compensam. Se a razão da progressão geométrica maior antecipa a falha da ferramenta, a utilização de uma ferramenta de material com maior resistência ao desgaste de certa forma compensa este efeito.

Para determinação das velocidades de corte iniciais dos ensaios foram efetuados ensaios prévios com os diversos tipos de ferros fundidos nodulares que seriam ensaiados e em função da exigência da norma de que a falha da ferramenta devia ocorrer entre o 6º e 8º anel, tornou-se necessário usar várias faixas de rotação.

Em função disto as rotações utilizadas foram assim determinadas, tabela (6).

| Nº | | MAT. NORMALIZADO ESTRUTURA PERLÍ- TICA | MAT. BRUTO DE FU- SÃO, ESTRUTURA FERRITA/PERLITA | | MAT. RECOZIDO ESTRUTURA FERRÍ- TICA |
|----|---|--|--|-----|---|
| R | 1 | 80 | 80 | 125 | 125 |
| O | 2 | 100 | 100 | 160 | 160 |
| T | 3 | 125 | 125 | 200 | 200 |
| A | 4 | 160 | 160 | 250 | 250 |
| Ç | 5 | 200 | 200 | 315 | 315 |
| Õ | 6 | 250 | 250 | 400 | 400 |
| E | 7 | 315 | 315 | 500 | 500 |
| S | 8 | 400 | 400 | 630 | 630 |

Tabela 6 - Rotações utilizadas nos ensaios de torneamento cilíndrico.

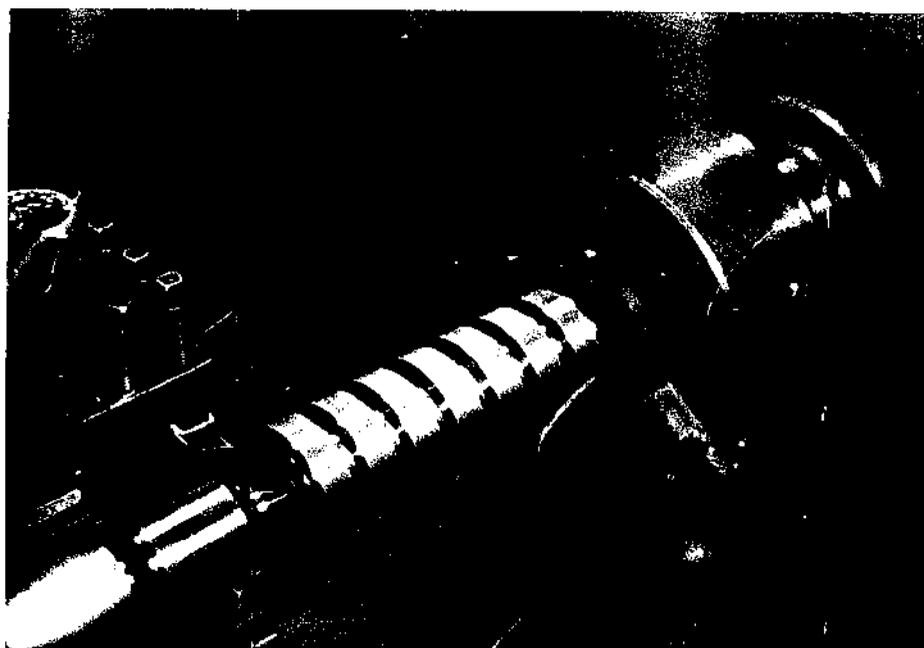


Figura 42 - Corpo de prova montado na máquina apto para iniciar o ensaio de torneamento cilíndrico.

A figura 42 mostra o corpo de prova montado durante o ensaio de usinabilidade de torneamento cilíndrico.

Os resultados deste ensaio estão no apêndice III e Capítulo 5, onde é discutido e analisado.

4.3.3.2. Ensaios baseados na temperatura de usinagem

O critério da temperatura de usinagem baseia-se como o próprio nome sugere, na medida da temperatura de usinagem.

Como há uma lacuna na literatura quanto a descrição de uma metodologia para o ensaio baseado neste critério, descreve-se a seguir a metodologia utilizada neste trabalho e que é proposta para ensaios deste tipo.

O método consiste em medir a temperatura de usinagem para um dado valor da velocidade de corte e comparar este valor da temperatura para dois materiais distintos onde um destes é o que se deseja ensaiar e o outro é o padrão.

Como este critério não é normalizado foram adotados alguns procedimentos já testados anteriormente pelo autor [58,59] em outros trabalhos experimentais.

Em razão disto usou-se como método de medida da temperatura de usinagem o método do termopar peça ferramenta que já havia demonstrado ser bastante preciso, possuindo uma margem de erro máxima de 4% dentro de um intervalo de confiança de 95%.

Como planejou-se comparar os resultados dos vários ensaios de usinabilidade, efetuou-se o ensaio de temperatura simultaneamente com os outros ensaios.

Desta forma, simultaneamente com o ensaio de torneamento cilíndrico, efetuou-se as medições da temperatura de usinagem de acordo com o esquema da figura 43.

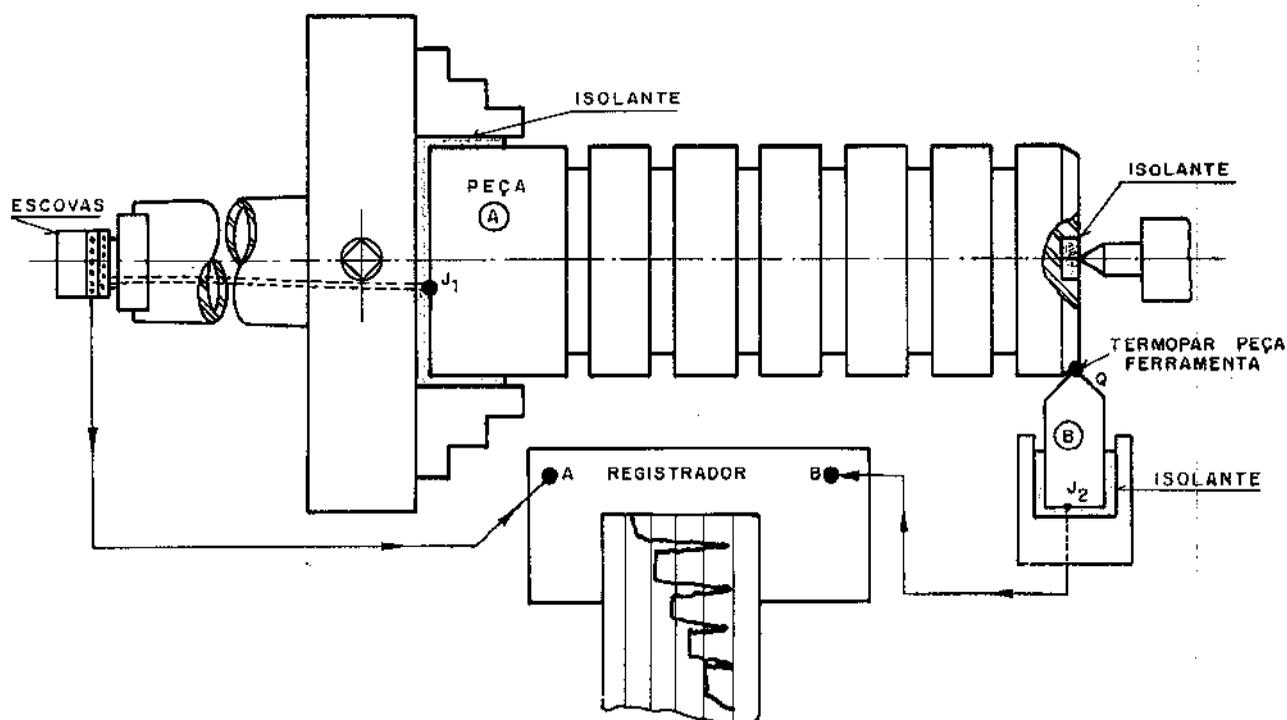


Figura 43 - Esquema da medição da temperatura de usinagem durante o ensaio de torneamento cilíndrico.

No esquema da figura citada observa-se os principais requisitos do método de medição da temperatura baseado no termopar peça-ferramenta.

Peça e ferramenta devem ser montados completamente isolados da máquina e o isolamento deve ser testado antes de iniciar-se o ensaio. Ao extremo da peça e da ferramenta são conectados fios em contato íntimo por solda ou por pressão e que são responsáveis por levarem o sinal gerado até o equipamento de registro.

Ao serem postos em contato peça e ferramenta, o ponto Q (zona de contato) constitui-se em um termopar pois, como a zona de contato se aquece e esta é formada por dois materiais diferentes, gera-se então uma força eletromotriz (F.E.M.) cujo valor em mili-volts é diretamente proporcional à temperatura da zona de contato desde que algumas condições sejam observadas.

Estas condições são:

As juntas J_1 e J_2 da peça e da ferramenta devem estar a uma mesma temperatura e igual à temperatura ambiente. Peça e ferramenta devem ser mantidas isoladas da máquina. Por último, deverá haver uma conexão perfeita do fio no extremo do eixo árvore da máquina.

No método de medição inicialmente proposto e depois utilizado por vários pesquisadores usava-se uma cuba com mercúrio no interior da qual girava uma peça metálica presa ao extremo do eixo árvore. Deste modo era feita a conexão do fio proveniente da peça e que é dotada de movimento de rotação.

Neste trabalho e em outros anteriores [58, 59], utilizou-se escovas com contato de prata, que garantem uma ótima precisão na conexão e esta substituição já mostrou-se adequada pois, torna-se muito mais prática que o procedimento inicialmente proposto.

O ideal neste método de ensaio, é que após a obtenção do registro da força eletromotriz e posterior leitura, proceda-se a aferição do termopar para que a temperatura final possa ser dada em °C. No entanto a aferição do termopar envolve diversas cir-

cunståncias já analisadas em outros trabalhos que afastariam este trabalho de seus objetivos principais [58,59].

Diante deste fato optou-se pela utilização dos valores da temperatura em mili-volts sem realizar a correspondente conversão para °C.

Como os ferros fundidos ensaiados possuíam características termoelétricas semelhantes, pois possuíam composições químicas similares, exceto pelos baixos teores de cobre, não haveria razão para não aceitar a medida da temperatura em mili-volts.

4.3.3.2.1. Ensaio θ_v

Neste ensaio o índice de usinabilidade foi calculado de acordo com a expressão seguinte:

$$I.U = \frac{\theta_{\text{mat.padrão}}}{\theta_{\text{mat.ensaiado}}} \times 100 \quad (11)$$

onde θ é a temperatura de usinagem após atingir-se o equilíbrio para um dado valor da velocidade de corte.

Devido a necessidade de fixar-se faixas diferentes de rotação para os diferentes estados de tratamento térmico dos materiais nos ensaios de torneamento cilíndrico, só ocorreram 3 rotações comuns aos materiais ensaiados.

Em consequência, só existiam 3 velocidades de corte comuns. Antes de fixar-se uma delas como referência, verificou-se a correlação que apresentavam qual a influência da velocidade de corte no valor do I.U.

A figura 44 mostra uma foto colhida durante a utilização do método e a figura 45, um registro típico obtido da temperatura de usinagem.

Da forma como foi descrito, o ensaio θ_v pode ser efetuado em qualquer operação de torneamento, isto é claro, desde que se execute todas as medidas necessárias à aplicação do método.

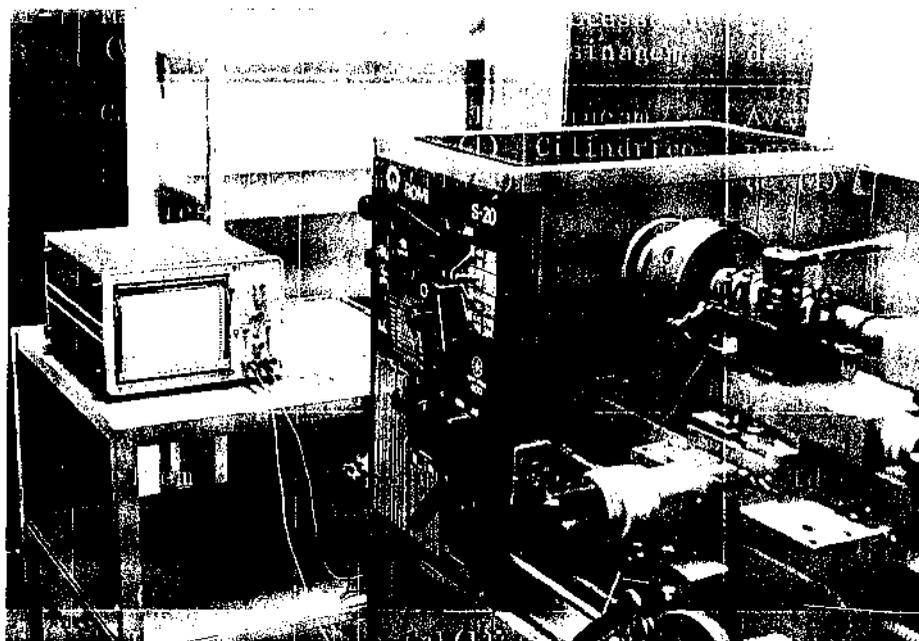


Figura 44 - Detalhe do método de medição da temperatura de usinagem durante o ensaio de torneamento cilíndrico.

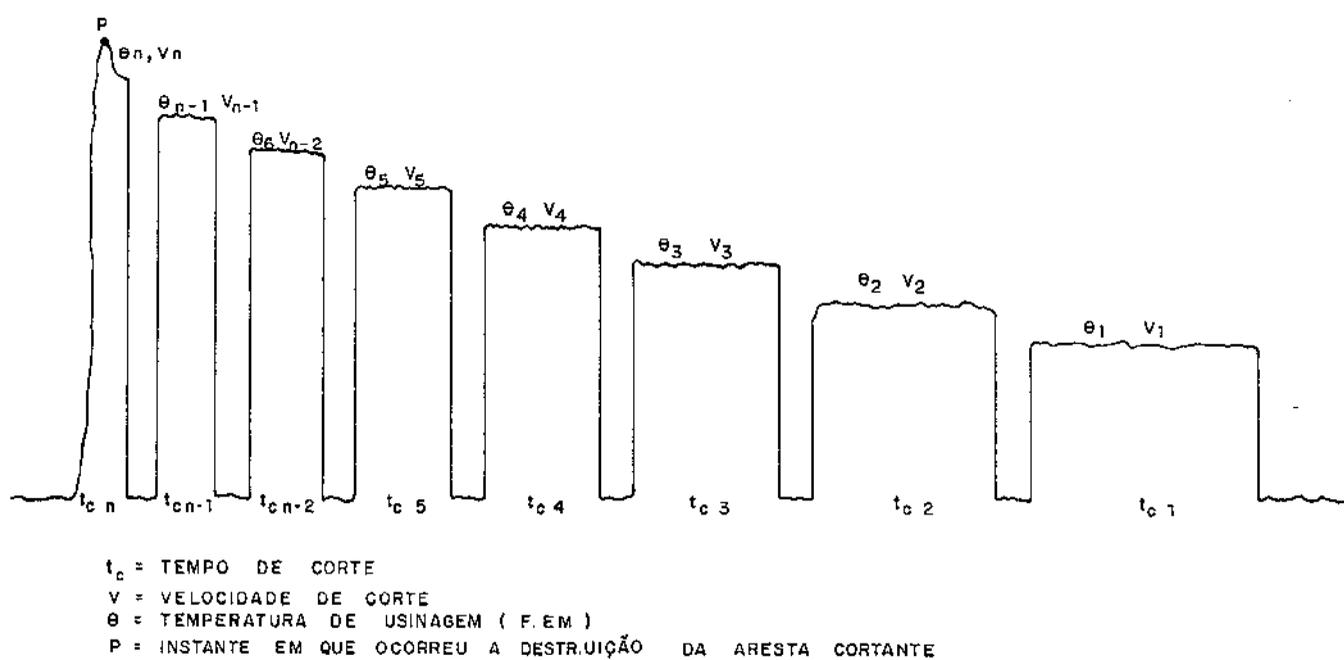


Figura 45 - Esquema de um registro típico da temperatura de usinagem durante o ensaio T.C.

A descrição da metodologia deste ensaio simultaneamente com o ensaio de torneamento de faceamento, será feita após a descrição do "Ensaio Mathon" para evitar a repetição de certos conceitos referentes àquele ensaio.

4.3.3.2.2. Ensaio θ_m

Esta proposta de avaliação da usinabilidade segundo o critério da temperatura de usinagem através de uma expressão diferente da anterior relaciona-se ao fato de que ela traduziria melhor o que acontece durante o ensaio de torneamento cilíndrico.

Observando-se o registro típico da temperatura da figura 45 nota-se que o ensaio começa com a velocidade de corte v_1 , uma temperatura θ_1 e a ferramenta leva um tempo de corte t_{c1} usando o anel número 1. O ensaio prossegue até atingir-se o enésimo anel onde, consome-se um tempo de corte t_{cn} até a falha da ferramenta. Tem-se uma temperatura θ_n e uma velocidade de corte v_n .

Em função disto torna-se viável pensar-se em termos de uma temperatura média ponderada de todo o ensaio pois ela considera além da variação da velocidade de corte, a evolução do desgaste da ferramenta até a falha.

Em tal média ponderada, a temperatura é dada pela expressão:

$$\theta_m = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i \cdot t_{c i}}{\sum_{i=1}^n t_{c i}} \quad (12)$$

Os diversos tempos de corte t_{c1} até t_{cn} seriam obtidos diretamente mediante cronometragem.

Como a cronometragem destes tempos depende da acuidade visual do observador, o processo está sujeito a erros não controláveis. Melhor será calcular este tempo em função das condições de usinagem utilizadas.

Procedendo desta forma obtêm-se:

$$t_c = \frac{\ell_a}{v_a} \quad (13)$$

ou

$$t_c = \frac{\ell_a \pi D}{1000 a} \frac{1}{v} \quad (14)$$

Considerando-se a expressão que dá o valor do tempo de corte " t_c " e levando-se em conta que em um ensaio qualquer os valores de ℓ_a , D e a são constantes, exceto por ℓ_a no último anel, então pode-se reescrever a expressão desta forma.

$$t_c = C \frac{1}{v} \quad (15)$$

Que é válida desde o anel número 1 até o anel número (n-1).

Observando-se mais uma vez a figura 45, nota-se que a temperatura em cada anel atinge um equilíbrio permanecendo praticamente constante com exceção do último anel onde ocorre uma brusca transição próximo a falha da ferramenta.

É devido a este fato que é usado o valor correspondente ao anel n-1 em vez de n na expressão de cálculo de θ_m .

Assim procedendo, poderemos substituir o valor de t_c na expressão de θ_m que assume a forma:

$$\theta_m = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{\theta_i}{v_i}}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{v_i}} \quad (16)$$

O índice de usinabilidade calculado em função de θ_m é

$$I.U = \frac{\theta_m \text{ do mat. padrão}}{\theta_m \text{ do mat. ensaiado}} \times 100 \quad (17)$$

O índice de usinabilidade determinado por este ensaio permitirá sempre que se determine o índice de usinabilidade baseado no torneamento cilíndrico de forma simultânea.

As figuras 46, 47 e 48 ilustram outros detalhes referentes e medição da temperatura de usinagem.

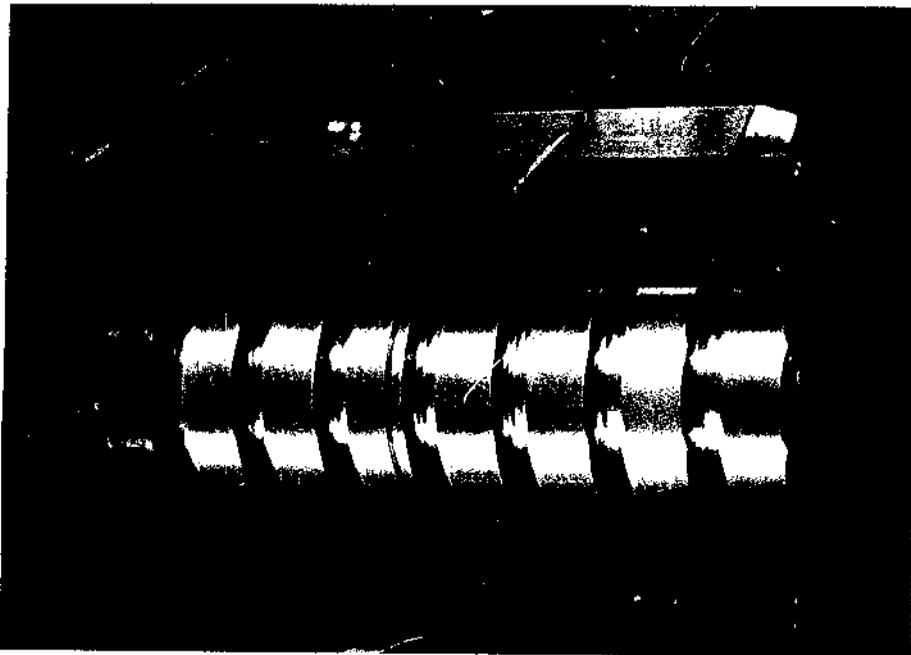


Figura 46 - Detalhe da peça e ferramenta durante os ensaios da temperatura de usinagem.

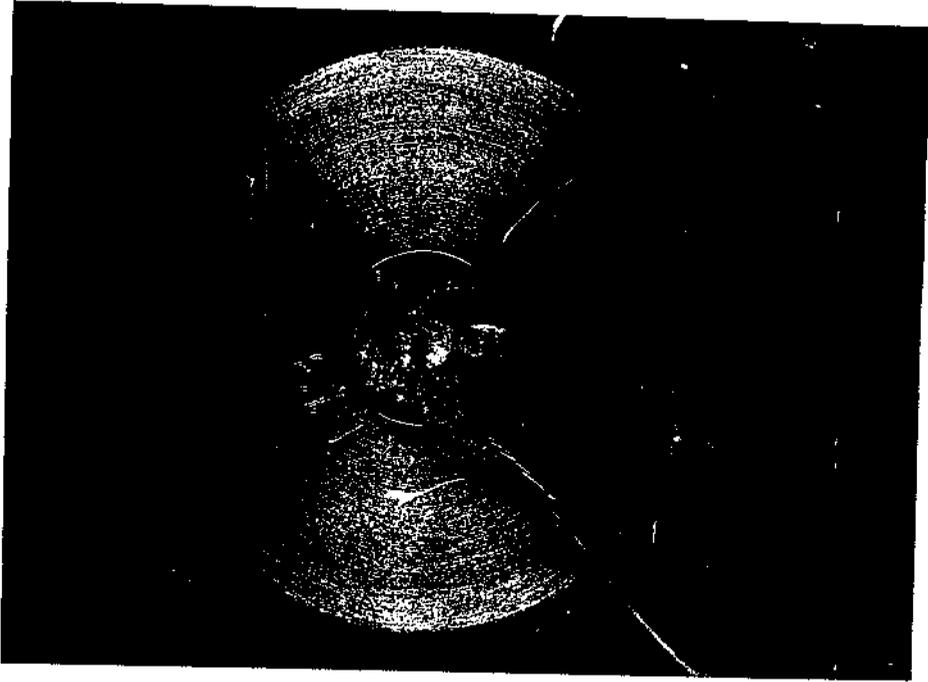


Figura 47 - Detalhe da fixação do fio à peça durante os ensaios da temperatura de usinagem.

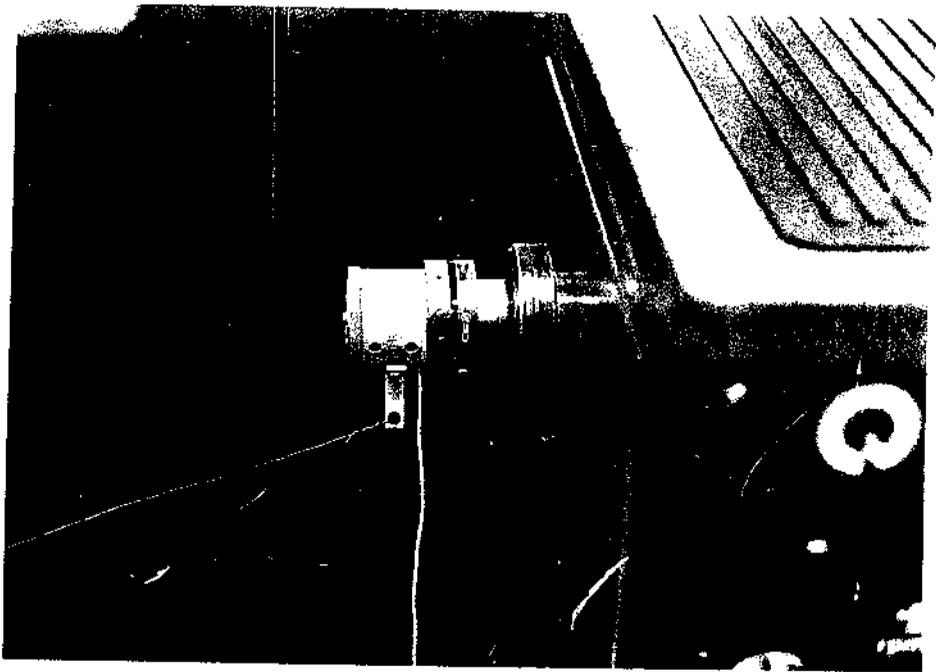


Figura 48 - Detalhe da escova acoplada ao eixo árvore do torno, durante os ensaios da temperatura de usinagem.

4.3.3.3. Ensaio Mathon

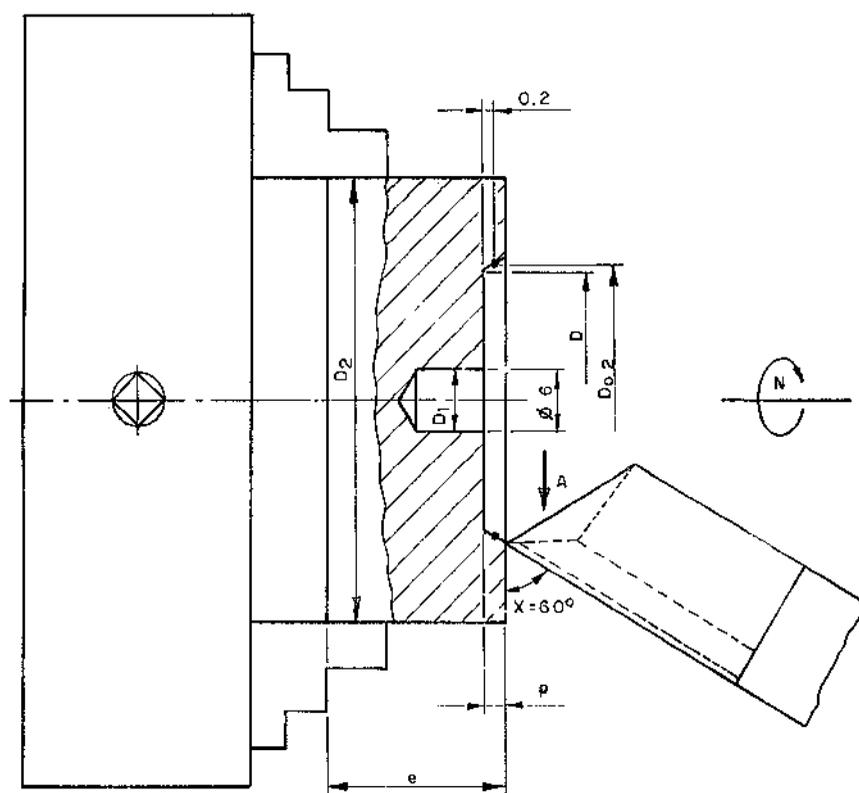


Figura 49 - Esquema do Ensaio de Mathon.

Este ensaio é uma variação do método de faceamento BRANDSMA [36] que consiste em facear um disco a partir de um furo central de diâmetro D_1 com rotação de avanço constantes até um certo valor do diâmetro D onde ocorre a destruição da aresta cortante.

No método inicialmente proposto por BRANDSMA a grandeza comparativa usada no cálculo do índice de usinabilidade era uma velocidade de corte equivalente " v_T " definida a seguir.

A velocidade de corte equivalente é a velocidade de corte constante que produz, no mesmo tempo de ensaio " T ", o mesmo desgaste na ferramenta obtido anteriormente em ensaio com velocidade de corte variável e nas mesmas condições de usinagem.

O valor desta velocidade de corte equivalente é calculado como segue:

$$v_r = \frac{\pi \cdot n}{1000} \left[\frac{D^{x+1} - D_1^{x+1}}{(x+1) \cdot 2 \cdot a \cdot n \cdot T} \right]^{\frac{1}{x}} \quad (18)$$

e o valor de x é obtido da expressão

$$x = \frac{\log \frac{D_3 \cdot n_1}{D \cdot n_2}}{\log \frac{D \cdot n_1}{D_3 \cdot n_2}} \quad (19)$$

observa-se a necessidade de efetuar dois ensaios com condições diferentes de variação da velocidade de corte para que se obtenha o valor da velocidade de corte equivalente.

As modificações sugeridas por "RENAULT-MATHON" [9,29,37] e normalizadas posteriormente pela "AFNOR A03 654" [9] e que caracterizam o Ensaio Mathon são relatadas a seguir.

A grandeza comparativa é o diâmetro correspondente a um recuo efetivo da ponta da ferramenta de 0,2 mm, como mostra a figura 49.

O diâmetro do furo central D_1 foi padronizado em 6,0 mm \pm 0,1 e a profundidade de corte $p=1,0$ mm.

A operação de usinagem é interrompida com a destruição da aresta cortante da ferramenta.

O diâmetro $D_{0,2}$ é medido com o auxílio de um relógio comparador acoplado ao carro transversal do torno. Deslocando-se o carro transversal e conseqüentemente o comparador sobre o perfil usinado, quando este indicar 0,2 mm significa que houve um recuo efetivo de 0,2 mm da ponta ferramenta e neste instante, tem-se no dial do fuso do carro transversal o deslocamento igual a $\frac{D_{0,2}}{2}$.

A norma fixa ainda as dimensões mínimas do corpo de prova.

diâmetro mínimo $D_2 = 20,0$ mm
 espessura mínima $e = 6,0$ mm

As dimensões adotadas foram no trabalho

$D_2 = 60,0$ mm
 $e = 25,0$ mm

Para a determinação do índice de usinabilidade, MATHON concluiu que a rotação que oferece um valor de $D_{0,2}$ que mais se correlaciona ao v_{90} de um ensaio de longa duração é 350 rpm [29, 37].

Para a execução deste ensaio o ideal seria poder-se dispor de uma faixa de rotações que permitisse interpolar o valor 350 rpm, como nem sempre destrói-se a aresta constante da ferramenta nessa faixa de rotações contorna-se o problema da seguinte forma.

Efetua-se uma série de pelo menos 3 ensaios com rotações diferentes e obtêm-se para cada uma o valor $D_{0,2}$. Colocando-se os resultados em um diagrama dilogarítmico obtêm-se uma reta que expressa:

$$\log(D_{0,2}) = f(\log N) \quad (20)$$

ou ainda

$$D_{0,2} \cdot N^m = \text{constante} \quad (21)$$

Segundo MATHON [37], para os ferros fundidos o valor de "m" varia entre 0,9 e 1,0.

Com auxílio destes valores $D_{0,2}$ e N na escala log é então possível efetuar-se uma regressão linear e determinar o valor $D_{0,2}$ para $N=350$ rpm.

O índice de usinabilidade é então calculado

$$I.U = \frac{D_{0,2} \text{ mat. padrão}}{D_{0,2} \text{ mat. ensaiado}} \times 100 \quad (22)$$

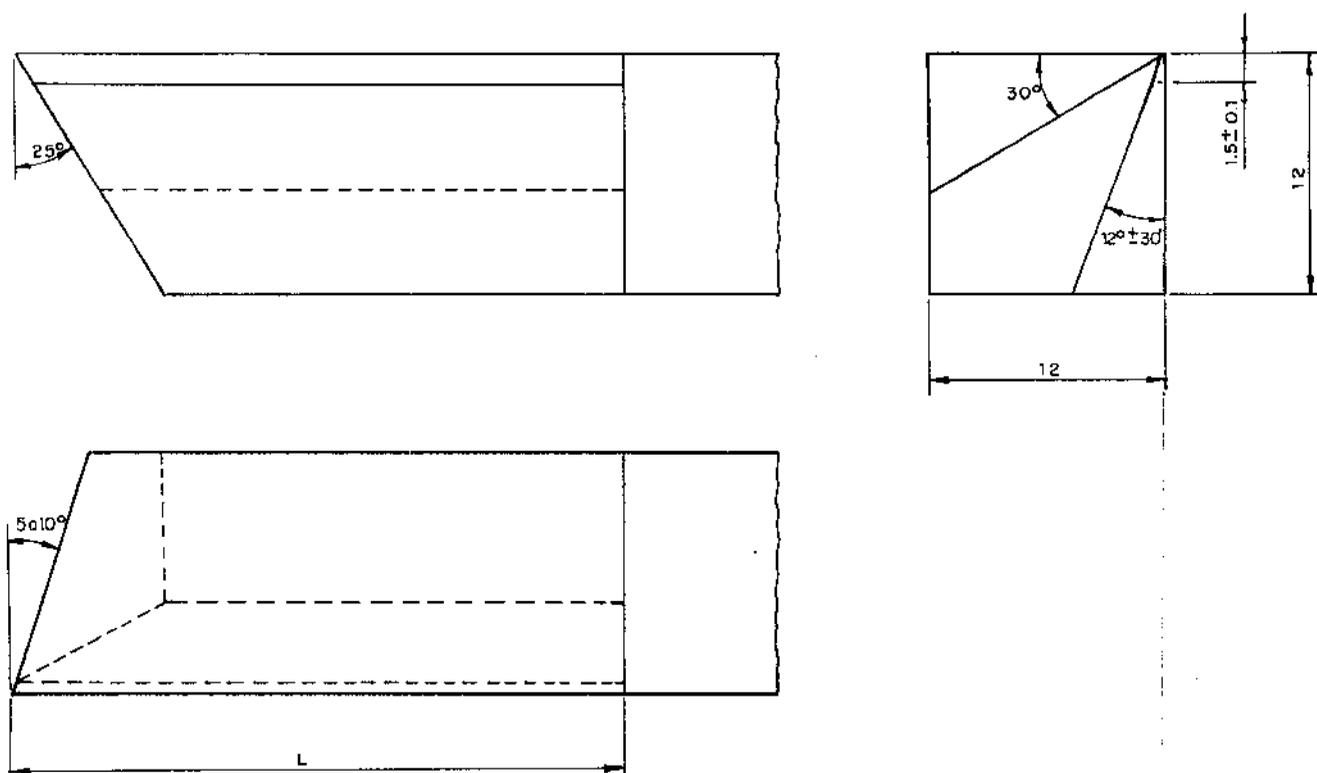


Figura 50 - Geometria da ferramenta utilizada no ensaio MATHON [9]

A norma fixa também o material e a geometria da ferramenta de modo a permitir uma rápida destruição da aresta cortante.

A geometria da ferramenta pode ser vista na figura 50. Os ângulos da ferramenta possuem os seguintes valores:

- ângulo de posição $\chi = 60^\circ$
- ângulo de chanfro $\alpha_c = 12^\circ \pm 30'$
- ângulo de folga $\alpha = 20^\circ$
- ângulo de saída $\gamma = 30^\circ$
- ângulo de inclinação $\lambda = 0^\circ$
- ângulo de ponta $\epsilon = 80 \text{ a } 85^\circ$
- raio da ponta $r = 0$

O material da ferramenta deve ser um aço ferramenta 100C6 da norma francesa NFA 35-551 e que corresponde ao aço SAE 52100.

Este material deverá ser temperado e revenido para uma dureza de 59 a 61 Rc e a norma detalha as condições de execução do tratamento térmico.

Como era objetivo do trabalho comparar os resultados da temperatura da usinagem no torneamento cilíndrico e faceamento, resolveu-se usar dois tipos de materiais na confecção das ferramentas.

Um dos materiais utilizados foi o aço rápido VK10N da Villares e o outro foi o recomendado pela norma o SAE 52100.

Desta forma foi possível inclusive determinar a influência do material da ferramenta no ensaio.

Devido às variações nas propriedades que os ferros fundidos apresentavam não foi possível adotar 3 rotações constantes para todos os materiais; foi necessário usar faixas diferentes de rotações, que foram selecionadas através de ensaios prévios.

O avanço utilizado foi $a=0,021$ mm/volta.

As figuras 51 e 52 ilustram alguns aspectos da execução do ensaio MATHON.

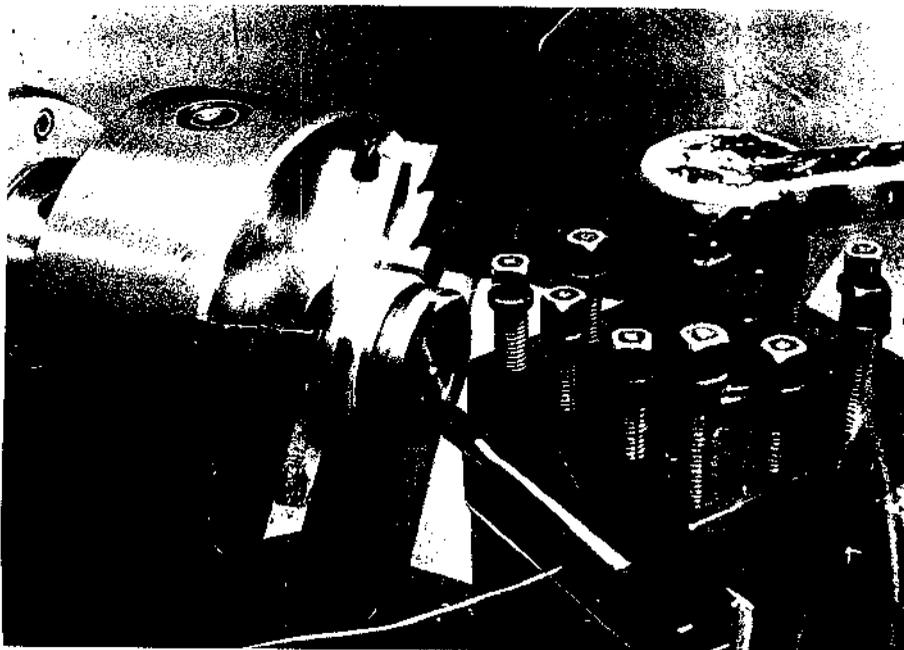


Figura 51 - Detalhe da montagem no torno durante a execução do ensaio MATHON.

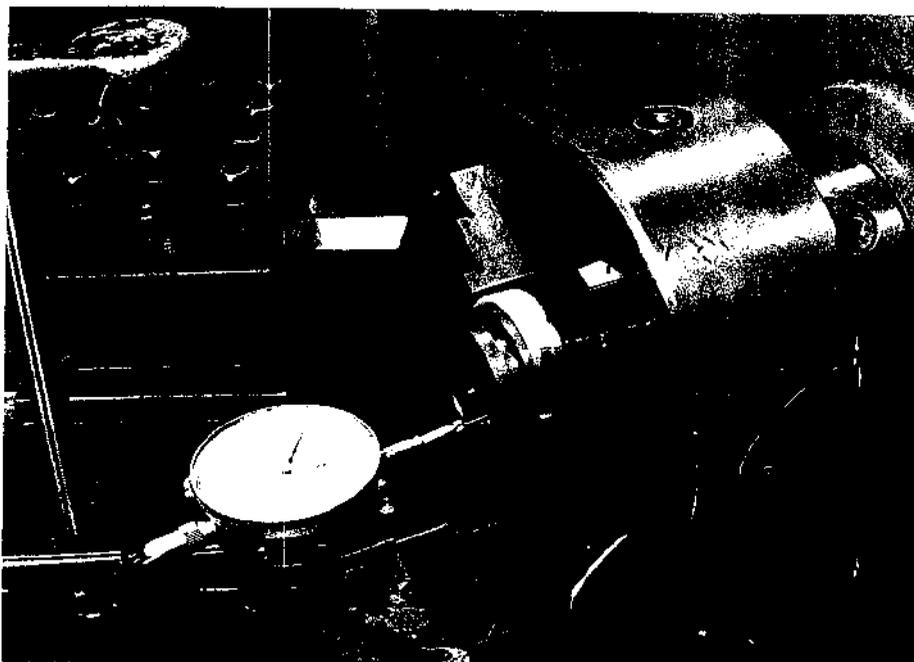


Figura 52 - Detalhe da medição do diâmetro $D_{0,2}$ durante o ensaio MATHON.

4.3.3.4. Ensaio V_{LF}

Este ensaio baseia-se no método de medição da temperatura de usinagem durante a realização do ensaio MATHON.

Foi proposto por ROUMÉSY [42,44,46] que o utilizou em alguns trabalhos com o objetivo inicial de acompanhar a evolução do desgaste da ferramenta e propor um modelo para o cálculo do desgaste da ferramenta.

Após verificar a boa correlação que o método apresentava com o ensaio de MATHON, vários pesquisadores franceses e de outros países europeus, têm usado este método obtendo bons resultados.

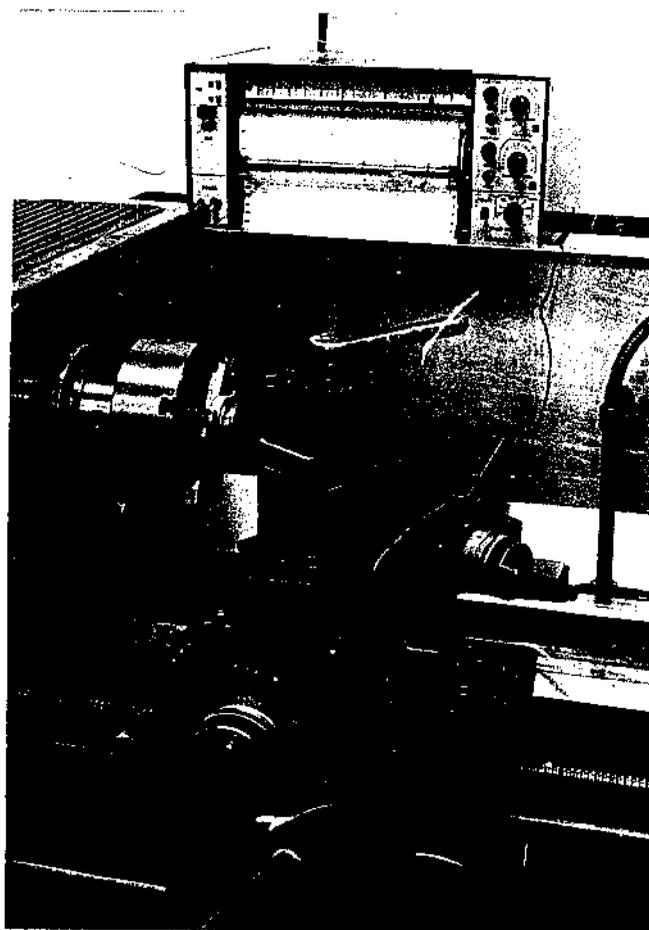


Figura 53 - Detalhe da montagem no torno para execução do ensaio v_{LF} .

Para efetuar a medição da temperatura de usinagem durante o ensaio MATHON, necessitou-se executar algumas modificações para a fixação da peça e ferramenta à máquina, tais modificações estão ilustradas nas figuras 53 e 54.

Como se observa nas figuras 51 e 54, peça e ferramenta foram isoladas da máquina e o sinal gerado pelo termopar peça-ferramenta era transmitido ao registrador através de dois fios conectados sob pressão à peça e ferramenta nos pontos J_1 e J_2 .

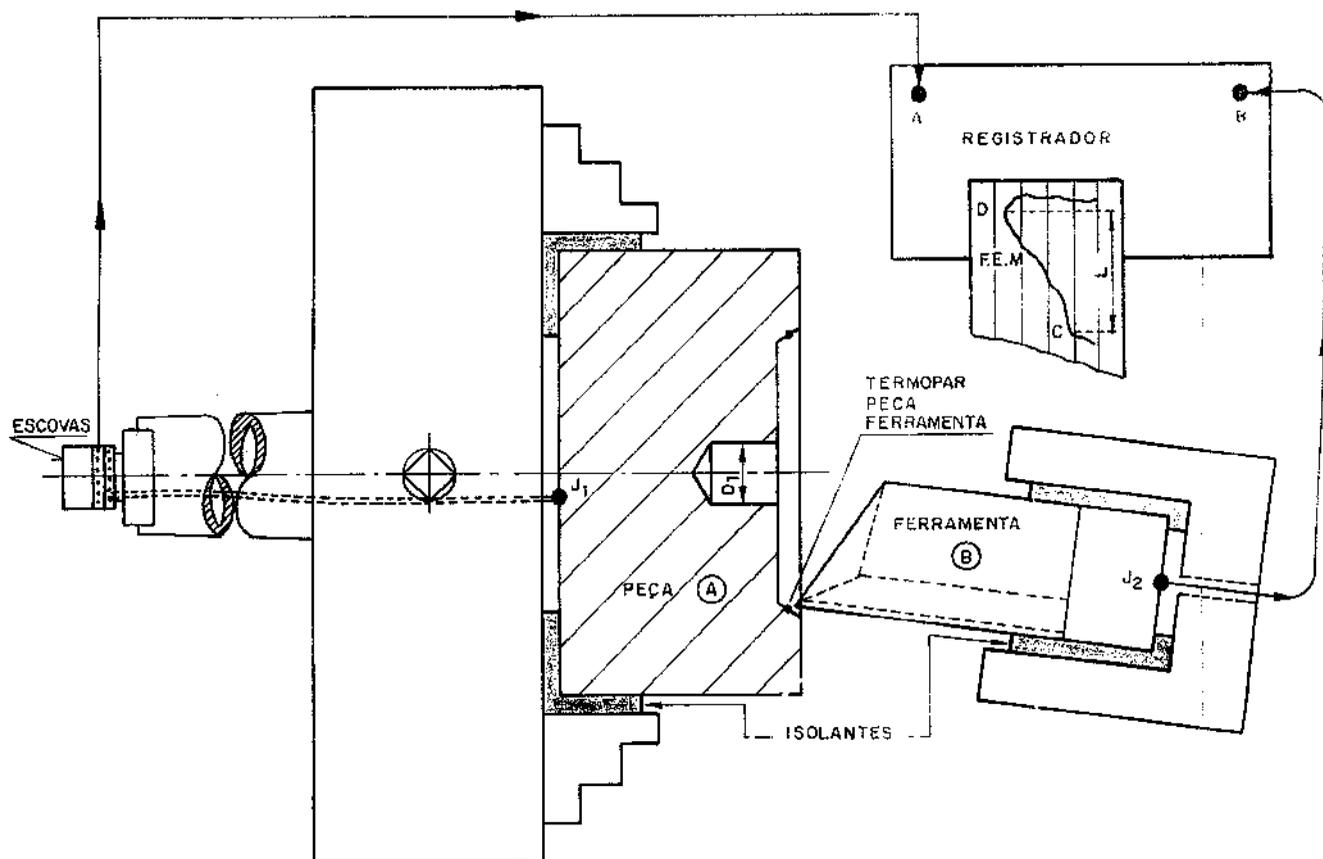


Figura 54 - Esquema da medição da temperatura de usinagem durante o ensaio MATHON.

O sinal da força eletromotriz era registrado e a forma típica deste sinal é mostrada na figura 55.

Para os ferros fundidos nodulares dois tipos de curvas eram obtidas, com e sem ondulações.

Segundo ROUMÉSY o "Ensaio v_{LF} " consiste em calcular a velocidade limite de faceamento (v_{LF}) ou seja, a velocidade na qual a ferramenta tem a sua aresta cortante destruída.

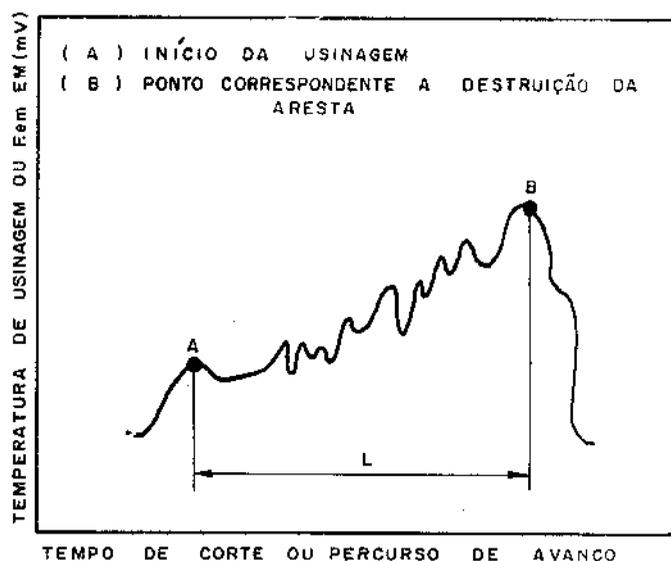


Figura 55 - Esquema do registro típico da temperatura de usinagem durante o ensaio MATHON.

Observando-se o registro da temperatura de usinagem da figura 55 tem-se o ponto A onde o ensaio começa. Ocorre, então, uma transição da temperatura em função da velocidade de corte e do desgaste até o ponto B onde ocorre uma súbita elevação da temperatura que caracteriza a destruição da aresta cortante.

O comprimento "L" corresponde ao percurso de avanço para o caso em que a velocidade de avanço é igual a velocidade do papel do registrador.

ROUSMÉSY sugere para o cálculo da velocidade limite de faceamento a seguinte expressão

$$v_{LF} = \pi \cdot N \cdot 10^{-3} \left(2 \cdot L \cdot \frac{a \cdot N}{v_p} + D_1 \right) \quad (23)$$

Na expressão, o valor entre parêntesis representa o va

lor do diâmetro onde ocorre a destruição da aresta cortante.

O valor v_{LF} também poderia ser calculado desta forma:

$$v_{LF} = \pi \cdot N \cdot 10^{-3} (2 \cdot a \cdot N \cdot t_c + D_1) \quad (24)$$

Comparando-se as duas expressões tem-se que

$$t_c = \frac{L}{V_p} \quad (25)$$

Significando que o tempo de corte é calculado dividindo-se o comprimento L pela velocidade do papel.

O índice de usinabilidade calculado em função da velocidade v_{LF} é função da rotação utilizada no ensaio e esta rotação deverá ser especificada.

Para o cálculo deste índice propõe-se a definição dada pela expressão (26).

$$I.U = \frac{v_{LF} \text{ do mat. ensaiado}}{v_{LF} \text{ do mat. padrão}} \quad (26)$$

4.3.3.5. Ensaio DATSKO

O procedimento indireto de avaliação da usinabilidade proposto por "DATSKO" [10] consiste em calcular a velocidade de corte " v_{60} " correspondente a uma vida da ferramenta de 60 minutos através da expressão seguinte, a qual denominou de "equação fundamental da usinabilidade".

$$v_{60} = \frac{(17,3)K}{q \cdot H_B} \left(\frac{1}{R_f} \right)^{0,5} \quad (27)$$

Após tecer várias considerações sobre as expressões existentes para o cálculo do comprimento característico, DAFSKO [10] conclui que a expressão mais adequada é:

$$q = (a+y)^m \cdot (p+y)^{1-m} \quad (28)$$

"m" é um valor calculado da seguinte forma:

$$m = 0,6 \left(\frac{a}{p}\right)^{-0,05} \quad (29)$$

"y" é um valor que varia de zero, para um material que não encrua até um máximo de 0.004 para um material que encrua o mais possível.

O valor de "y" varia segundo o coeficiente de encruamento "n" (Tabela 9).

$$\sigma = K' \cdot \varepsilon^n \quad (30)$$

equação válida apenas na zona plástica [60], o valor de K' mede a tensão real para $\varepsilon=1,0$ e segundo [61] "n" pode ser calculado com um erro mínimo através de:

$$n = \ln(1+\varepsilon) \quad (31)$$

onde n varia de 0 a 1,0 sendo que 0,5 é o valor máximo para a maioria dos metais.

O valor zero refere-se a um material perfeitamente plástico enquanto 1,0 é atribuído ao material completamente elástico, sem fase plástica [60].

A equação da usinabilidade proposta por DAFSKO foi posta em confronto por ele, com os resultados experimentais obtidos

para vários materiais e apresentou resultados que podem se chamar de excelentes.

Alguns destes resultados, que são de interesse comparativo são mostrados na tabela (7).

| MATERIAL | DUREZA HB (kgf/mm ²) | LIMITE DE RESIST. σ_r (kgf/mm ²) | v ₆₀ calculado (m/min) | v ₆₀ experimental (m/min) | Erro para v ₆₀ % |
|----------------|--|---|---|--|-----------------------------------|
| Aço SAE 1212 | 106 | 37,3 | 57,9 | 57,9 | 0 |
| Fofo cinza | 105 | 12,7 | 103,6 | 106,7 | 2,9 |
| Fofo perlítico | 192 | 17,6 | 45,7 | 47,2 | 3,2 |

Tabela 7 - Comparação dos valores calculados e experimentais obtidos por DATSKO [10] de alguns materiais.

A equação da usinabilidade proposta por DATSKO baseia-se em estudos analíticos e experimentais efetuados também por HENKIN e que determinam 8 variáveis que influem diretamente na usinabilidade. Estas variáveis são:

- 1 - Dureza Brinell (HB)
- 2 - Proporção de área na ruptura (R_f)
- 3 - Condutibilidade térmica (K)
- 4 - Calor específico volumétrico (C_v ou C_p)
- 5 - Avanço (a)
- 6 - Profundidade de corte (p)
- 7 - Velocidade de corte (V)
- 8 - Temperatura na zona cavaco-ferramenta (T)

Aplicando a análise dimensional e levando em conta estudos experimentais, DATSKO definiu a velocidade v₆₀ como sendo a velocidade para a qual a temperatura do gume cortante da ferramenta atinge $525 \pm 15^\circ\text{C}$. E chegou a propor a fórmula para o cálculo do v₆₀ como foi mostrado.

As propriedades físicas e mecânicas que aparecem na equação, K HB e R_f devem ser determinadas para uma temperatura mé

dia $\approx 315^{\circ}\text{C}$. Além disto, no cálculo ele considera uma usinagem com ferramenta de aço rápido (não especifica a geometria) em torneamento cilíndrico e com uma relação $p/a=10$, onde

$$a = 0,0051 \text{ pol/volta}$$

$$p = 0,050 \text{ pol}$$

Para a utilização da equação de DATSKO neste trabalho torna-se necessário fazer algumas considerações.

I - As propriedades mecânicas dos ferros fundidos foram determinadas à temperatura ambiente, respectivamente: HB, R_f e σ_r .

II- Os valores da condutibilidade térmica "K", dos ferros fundidos e que muito pouco variam com a temperatura foram tirados da literatura [13,63,65] e tem-se estes valores apresentados da forma mostrada na tabela 8.

| (MATERIAIS) FERROS FUNDIDOS NODULARES | CONDUTIBILIDADE TÉRMICA (K) (BTU/h-ft $^{\circ}\text{F}$) | |
|---|---|--------------------------|
| | em 100°C | em 400°C |
| estrutura ferrítica | 20,5 | 20 |
| estrutura perlítica | 18,1 | 18,4 |

Tabela 8 - Valores da condutibilidade térmica em função da estrutura do material.

Com base na tabela 8 adotou-se a seguinte disposição:

- a) Ferros fundidos brutos de fusão sem cobre e recozidos com estrutura predominantemente ferrítica, $K=20,5$;
- b) Ferros fundidos brutos de fusão com cobre e normalizados cuja estrutura é predominantemente perlítica, $K=18,1$ (BTU/h-ft $^{\circ}\text{F}$).

III- Os valores do coeficiente de encruamento "n" foram calculados através da expressão (34) e em função dos valores do alongamento obtidos nos ensaios à temperatura ambiente. Enquanto isto os valores de "y" usados no cálculo de "q", expressão (31), foram obtidos por interpolação dos valores apresentados por [10].

A tabela 9 apresenta os valores de "n" calculados da forma descrita e os correspondentes valores de "y" e "q".

| MATERIAIS (códigos) | $\epsilon\%$ | n | y | q |
|--|--------------|-------|--------|--------|
| B1000/B2000 | 2,0 | 0,18 | 0,0022 | 0,0115 |
| B1034/B2061 | 3,2 | 0,031 | 0,0010 | 0,0098 |
| B1070/B2104 | 2,5 | 0,024 | 0,0009 | 0,0098 |
| R1000, R1034, R1070 R3000, R3037, R3039 | 23 | 0,21 | 0,0023 | 0,0116 |
| N1000/N3000 | 6,0 | 0,058 | 0,0015 | 0,0105 |
| N1034/N1037 | 4,5 | 0,044 | 0,0011 | 0,0098 |
| N1070/N1090 | 3,0 | 0,029 | 0,0010 | 0,0098 |
| SAE 1212 | 27 | 0,24 | 0,0024 | 0,0118 |

Tabela 9 - Valores utilizados no cálculo do comprimento característico q.

IV - Os valores de "a" e "p" avanço e profundidade de corte utilizados são os mesmos do ensaio de torneamento cilíndrico e que apesar de apresentar a mesma relação p/a proposta por DATSKO diferem entre si dos valores propostos.

Foi proposta a relação p/a = 10, com os seguintes valores de "a" e "p":

$$a = 0,0057 \text{ pol/volta}$$

$$p = 0,50 \text{ pol}$$

$$s = 2,85 \times 10^{-4} \text{ pol}^2$$

utilizou-se os valores:

$a = 0,104 \text{ mm/volta}$, corresponde $a = 0,00394 \text{ pol/volta}$
 $p = 1,0 \text{ mm/volta}$, corresponde $p = 0,0394 \text{ pol}$
 $p/a = 10$
 $s = 1,104 \text{ mm}^2$, corresponde a $1,55 \times 10^{-4} \text{ pol}^2$

Apesar de uma mesma relação p/a , usou-se uma secção de corte "s" menor.

V - Os valores das propriedades físicas e mecânicas referentes ao aço SAE 1212 foram obtidos de várias formas como é da do a seguir:

Dureza Brinell = 116 kgf/mm² ensaio a temp. ambiente
 Proporção de área $1/R_f = 0,43$, ambiente [13]
 Condutibilidade $K = 28 \text{ BTU/h-ft } ^\circ\text{F}$ a 315°C [10]
 Alongamento $\epsilon = 27\%$, ambiente [13]
 Limite de Resistência $\sigma_r = 42 \text{ a } 45 \text{ kgf/mm}^2$, ambiente [13]

Os demais valores necessários à equação 30 estão no apêndice I.

Os resultados são apresentados no apêndice VI e capítulo 5.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS FERROS FUNDIDOS

5.1.1. Microestruturas

5.1.1.1. Resultados

De acordo com as figuras 17 a 37, os resultados obtidos nas análises metalográficas estão resumidas na tabela 10 em função do carbono equivalente, teor de cobre e estado de tratamento térmico. Ressalta-se o tipo de estrutura predominante com percentual aproximado.

| MATERIAIS CÓDIGOS | | C.E. % | % Cu | TRAT.TERMICO | ESTRUTURA | %PERLITA | %FERRITA |
|----------------------|-------|--------|-------------|----------------|-----------|----------|----------|
| IC | B1000 | | 0 | Bruto de Fusão | Ferrítica | 20 | 80 |
| | B1034 | | 0,34 | " | Perlítica | 60 | 40 |
| | B1070 | | 0,70 | " | " | 80 | 20 |
| | R1000 | 4,33 | 0 | Recozido | Ferrítica | - | 100 |
| | R1034 | a | 0,34 | " | " | - | 100 |
| | R1070 | 4,45 | 0,70 | " | " | - | 100 |
| | N1000 | | 0 | Normalizado | Perlítica | 80 | 20 |
| | N1034 | | 0,34 | " | " | 90 | 10 |
| | N1070 | | 0,70 | " | " | 95 | 5 |
| IIC | B2000 | 4,41 | 0 | Bruto de fusão | Ferrítica | 20 | 80 |
| | B2061 | 4,54 | 0,61 | " | Perlítica | 70 | 30 |
| | B2104 | 4,40 | 1,04 | " | " | 85 | 15 |
| IIIC | R3000 | 4,46 | 0 | Recozido | Ferrítica | - | 100 |
| | R3037 | | 0,37 | " | " | - | 100 |
| | R3090 | | 0,90 | " | " | - | 100 |
| | N3000 | 0 | Normalizado | Perlítica | 85 | 15 | |
| | N3037 | 0,37 | " | " | 90 | 10 | |
| | N3090 | 0,90 | " | " | 95 | 5 | |

Tabela 10 - Resultados das Análises Micrográficas.

5.1.1.2. Discussão

Em função da tabela 10 e figuras 17 a 37 pode-se resumir a influência do cobre nos ferros fundidos nodulares hipereutéticos, da maneira seguinte:

- O cobre é um elemento fortemente perlitizante em bruto de fusão, como a literatura aponta e já foi comprovado por vários pesquisadores [1,2,3,4,5,6,7,8,9]. Observou-se também um efeito secundário, o de refinar a perlita, acentuado pelo aumento do teor de cobre.

- O efeito do tratamento térmico predomina sobre o efeito do cobre e no caso do recozimento, anula-se por completo esta influência. Na normalização o cobre mantém uma influência semelhante àquela ocorrida nos brutos de fusão, embora em proporções bem inferiores.

De acordo com ANGUS [13], em função das estruturas resultantes é de se esperar que as demais propriedades mecânicas variem segundo a figura 56 ao mudar-se o tipo de estrutura da matriz metálica.

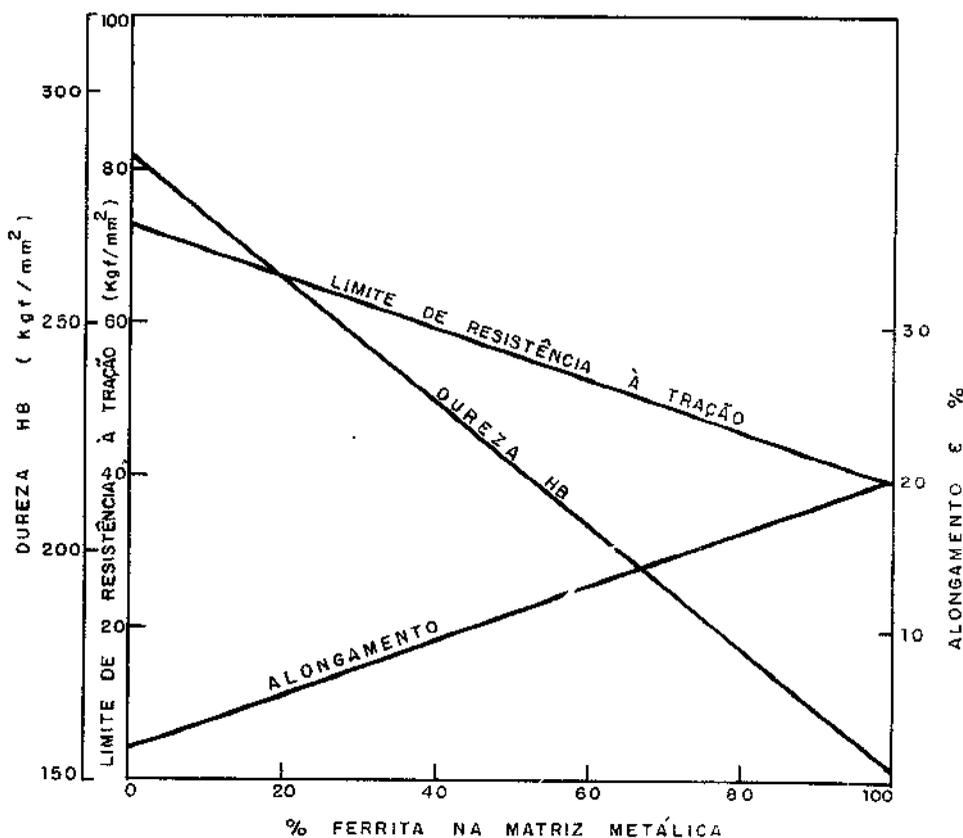


Fig. 56 - Efeito da quantidade de Ferrita da Matriz nas propriedades mecânicas [13]

5.1.2. Ensaio de Dureza

5.1.2.1. Resultados

Os resultados dos ensaios de dureza Brinell estão nas tabelas I.1 a I.4 do apêndice I e transcreve-se aqui um quadro resumo. Tabela II, onde tem-se a dureza dos diversos ferros fundidos utilizados em função das corridas, teor de cobre, estado de tratamento térmico e estrutura resultante.

| MATERIAL CÓDIGOS | %Cu | TRAT. TÉRMICO | ESTRUTURA | HB ($\frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2}$) | HB ($\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$) | VARIAÇÃO % |
|---------------------|-------------------------|---------------|-----------|---|---------------------------------------|------------|
| B1000 | 0 | Brutos/Fusão | Ferrítica | 166 | 1627 | * 100 |
| B1034 | 0,34 | " " | Perlítica | 196 | 1921 | 118 |
| B1070 | 0,70 | " " | " | 249 | 2440 | 150 |
| R1000 | 0 | Recozidos | Ferrítica | 158 | 1548 | 95 |
| R1034 | 0,34 | " | " | 159 | 1558 | 96 |
| R1070 | 0,70 | " | " | 167 | 1637 | 100 |
| N1000 | 0 | Normalizados | Perlítica | 265 | 2597 | 160 |
| N1034 | 0,34 | " | " | 287 | 2813 | 173 |
| N1070 | 0,70 | " | " | 295 | 2891 | 178 |
| B2000 | 0 | Bruto/Fusão | Ferrítica | 175 | 1715 | 105 |
| B2061 | 0,61 | " " | Perlítica | 257 | 2519 | 155 |
| B2104 | 1,04 | " " | " | 272 | 2667 | 164 |
| R3000 | 0 | Recozidos | Ferrítica | 161 | 1578 | 97 |
| R3037 | 0,37 | " | " | 163 | 1597 | 98 |
| R3090 | 0,90 | " | " | 176 | 1725 | 106 |
| N3000 | 0 | Normalizados | Perlítica | 249 | 2440 | 150 |
| N3070 | 0,37 | " | " | 287 | 2813 | 173 |
| N3090 | 0,90 | " | " | 311 | 3048 | 187 |
| SAE1212 | PADRÃO DE USINABILIDADE | | | 116 | 1137 | - |

Tabela II - Resumo dos ensaios de dureza.

(* tomado como referencial)

Na coluna (variação) da tabela II, foi usado como referência o material "B1000".

As figuras 57 e 58 mostram estes resultados na forma gráfica.

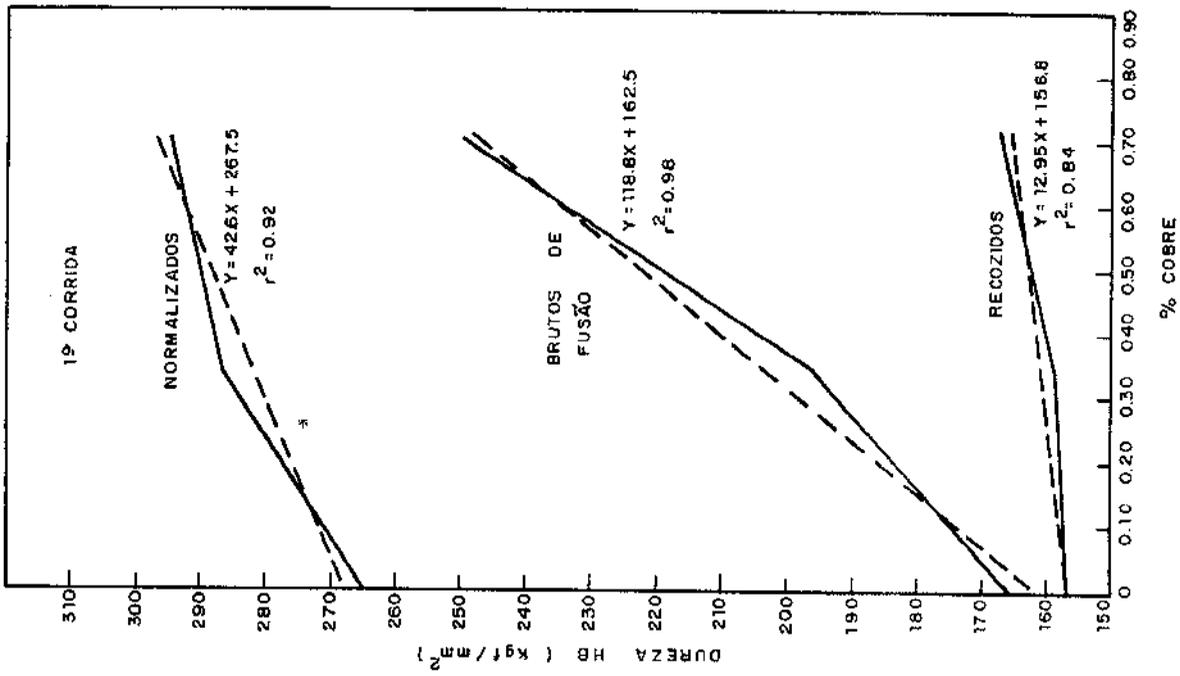


Figura 57 - Variação da dureza com o teor de cobre nos vários estados de tratamento térmico (1ª corrida)

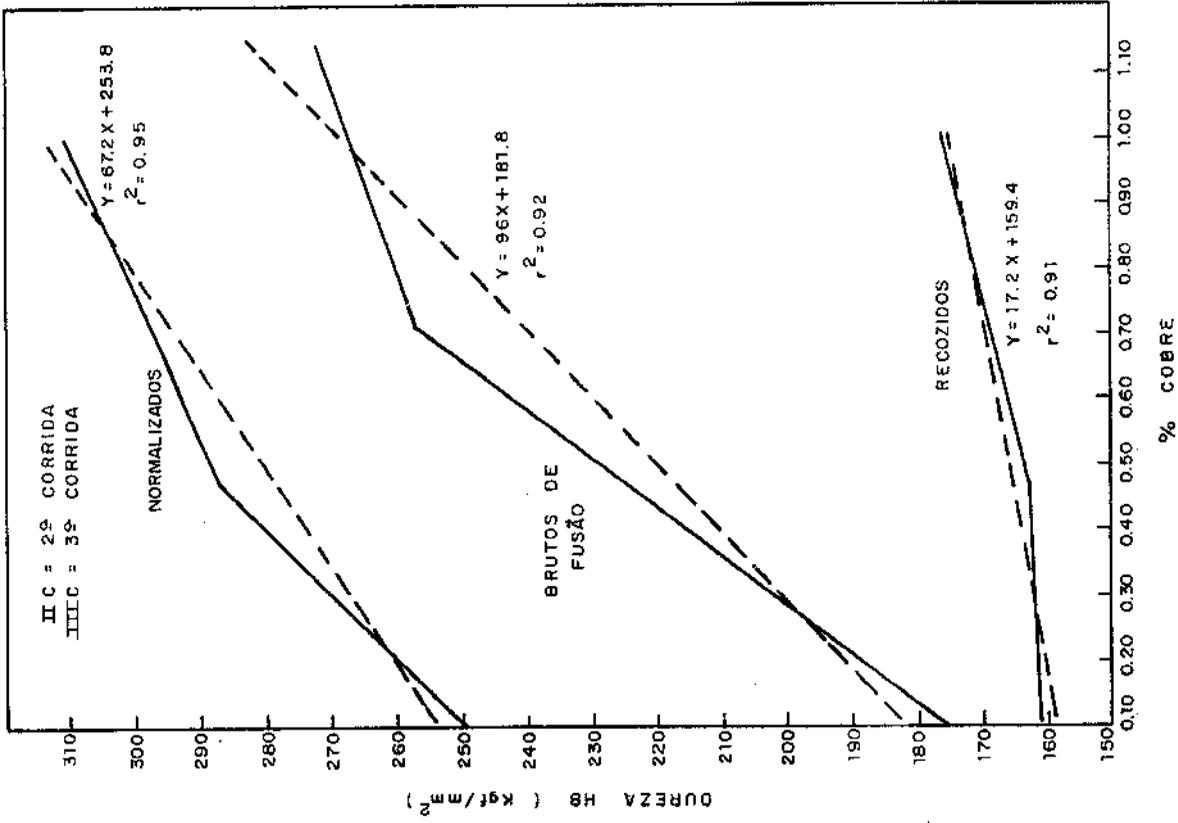


Figura 58 - Variação da dureza com o teor de cobre nos vários estados de tratamento térmico (2ª e 3ª corrida)

5.1.2.2. Discussão

As figuras 57 e 58 mostram as variações da dureza com o teor de cobre nas diversas corridas, as linhas tracejadas referem-se as correlações efetuadas cujos valores estão resumidos na tabela 12.

A figura 59 apresenta uma composição das correlações em encontradas nas diversas corridas.

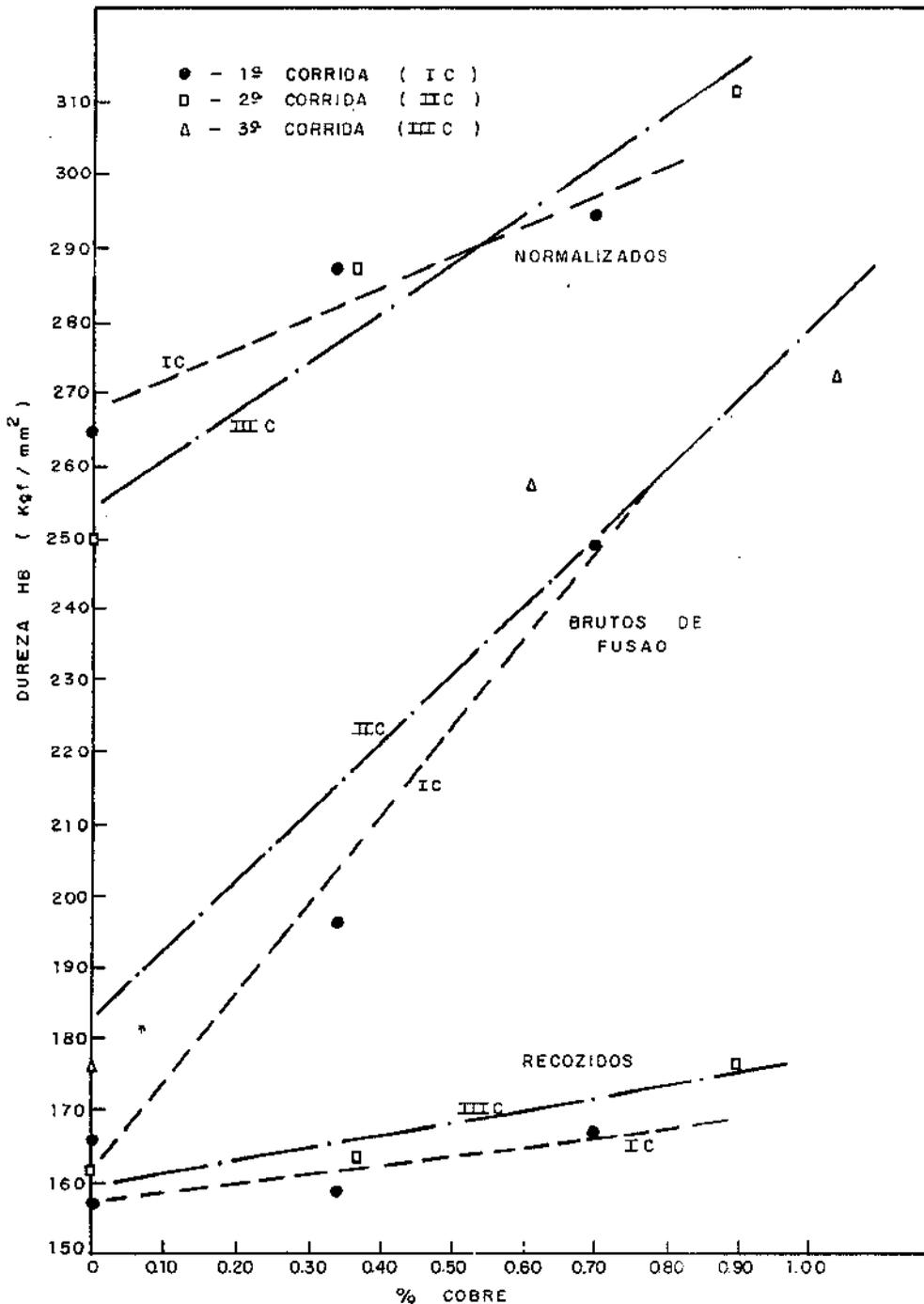


Figura 59 - Comparação dos resultados dos Ensaio de dureza em função do teor de cobre, nos vários estados de tratamento térmico e corridas diferentes.

Na figura 59 observa-se que existe uma tendência bem definida denotada pela influência do teor de cobre em relação a dureza, mesmo considerando materiais provenientes de diversas corridas.

Nos materiais recozidos onde não ocorre modificação da estrutura, pequenos teores de cobre, até 0,50% praticamente nada altera a dureza, no entanto, teores de 0,70% acima, provocam um aumento relativo embora que inferior a 10%. Ocorre então um endurecimento da ferrita.

Os materiais brutos de fusão confirmam as afirmações de vários pesquisadores [1,2,3,4,5,6,7,8,13]. Devido ao efeito perlitizante do cobre há um sensível acréscimo da dureza.

Semelhante aos brutos de fusão, os materiais normalizados apresentam uma elevação da dureza crescente com o teor de cobre embora que a taxa de crescimento seja bem menor.

As diferenças observadas nas durezas dos materiais da 1.^a corrida e 2.^a e também 1.^a e 3.^a devem-se ao fato de que os materiais da 2.^a e 3.^a corridas possuem um maior teor de silício e conseqüentemente um maior carbono equivalente. Segundo ANGUS [13] uma elevação no teor de Si de por exemplo 2,6 a 2,8% provoca um aumento de 4 a 5% na dureza.

| MATERIAL CORRIDA | TRATAMENTO TÉRMICO | EQUAÇÃO DA CORRELAÇÃO | COEFICIENTE DE CORR | | PRECISÃO DA EQUAÇÃO % |
|---------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------|-------|-----------------------------|
| | | | r^2 | r | |
| IC | Recozido | HB=12,95%Cu+156,8 | 0,84 | 0,92 | 85 |
| IIIC | " | HB=17,2%Cu+159,4 | 0,91 | 0,95 | 90 |
| IC | Bruto de fusão | HB=118,8%Cu+162,5 | 0,98 | 0,990 | 96 |
| IIC | " | HB=96%Cu+181,8 | 0,92 | 0,96 | 91 |
| IC | Normalizado | HB=42,6%Cu+267,5 | 0,92 | 0,96 | 91 |
| IIIC | " | HB=67,2%Cu+253,8 | 0,95 | 0,97 | 92 |

Tabela 13 - Correlações entre dureza e teor de cobre obtidos nos ensaios.

Com relação aos dados da tabela 12, observa-se que as correlações encontradas podem ser classificadas como boas em função da precisão na determinação desta.

Os valores da precisão foram determinados de acordo com o teste de distribuição de Student (Apêndice II) visto que se trata de pequenas amostras.

A dispersão calculada nas medições de dureza foi sempre inferior aos 2% e pode-se afirmar que o erro não é superior a este valor $\pm 2,0\%$.

5.1.3. Ensaio de Tração

5.1.3.1. Resultados

Os resultados obtidos nos ensaios de tração constam da tabela I.5 do Apêndice I e estão resumidos na tabela 13 onde tem-se os valores das seguintes propriedades:

- Limite de Resistência à Tração, σ_R
- Alongamento $\epsilon\%$
- Proporção de área na ruptura, R_f

Estas propriedades apresentaram dispersões nos valores medidos todas inferiores a 2% o que leva a determinar os valores de erro seguinte:

| | | | |
|------------|-------|------------|------------------|
| σ_R | e | ϵ | erro $\pm 2,0\%$ |
| | R_f | | erro $\pm 1,0\%$ |

As figuras 60 e 61 apresentam os valores do limite de resistência a tração em função do teor de cobre para os vários materiais, corridas, tratamentos térmicos e estruturas obtidas.

A figura 62, de maneira similar apresenta os valores do alongamento.

| MATERIAL CÓDIGOS | %Cu | TRAT. TERM. | ESTRU- TURAS | $\left(\frac{1}{R_f}\right)$ | ALONGA- MENTO ε % | σ_r ($\frac{kgf}{mm^2}$) | σ_R ($\frac{N}{mm^2}$) | VARIA- ÇÃO % |
|---------------------|------|----------------|-----------------|------------------------------|---|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------|
| B1000 | 0 | BR/FUS. | FERRIT. | 0,86 | Leituras prejudicadas devido à marcação dos corpos de prova | 49,3 | 483 | *100 |
| B1034 | 0,34 | " | PERLIT. | 0,93 | | 57,1 | 560 | 116 |
| B1070 | 0,70 | " | " | 0,98 | | 75,5 | 740 | 153 |
| R1000 | 0 | RECOZ. | FERRIT. | 0,86 | | 46,5 | 456 | 94 |
| R1034 | 0,34 | " | " | 0,88 | | 46,5 | 456 | 94 |
| R1070 | 0,70 | " | " | 0,89 | | 47,3 | 464 | 96 |
| N1000 | 0 | NORM. | PERLIT. | 0,96 | | 100,3 | 983 | 203 |
| N1034 | 0,34 | " | " | 0,97 | | 102,8 | 1007 | 208 |
| N1070 | 0,70 | " | " | 0,98 | | 109,0 | 1068 | 221 |
| B2000 | 0 | BR/FUS. | FERRIT. | 0,89 | 20 | 52,8 | 518 | 107 |
| B2061 | 0,61 | " | PERLIT. | 0,94 | 3,2 | 69,2 | 678 | 140 |
| B2104 | 1,04 | " | " | 0,98 | 2,5 | 80,4 | 788 | 163 |
| R3000 | 0 | RECOZ. | FERRIT. | 0,85 | 23,7 | 48,2 | 472 | 98 |
| R3037 | 0,37 | " | " | 0,86 | 23,7 | 48,2 | 472 | 98 |
| R3090 | 0,90 | " | " | 0,89 | 23,0 | 49,6 | 486 | 101 |
| N3000 | 0 | NORM. | PERLIT. | 0,96 | 6,2 | 93,9 | 920 | 190 |
| N3037 | 0,37 | " | " | 0,97 | 4,7 | 100,3 | 983 | 203 |
| N3090 | 0,90 | " | " | 0,98 | 3,2 | 102,1 | 1001 | 207 |

Tabela 13 - Resultados obtidos através dos ensaios de tração.
*(valor tomado como referência).

Observação: Os problemas ocorridos na marcação para medida e cálculo do alongamento citado na tabela 13, ocorreram porque a tinta à base de grafita utilizada havia sido mal aplicada.

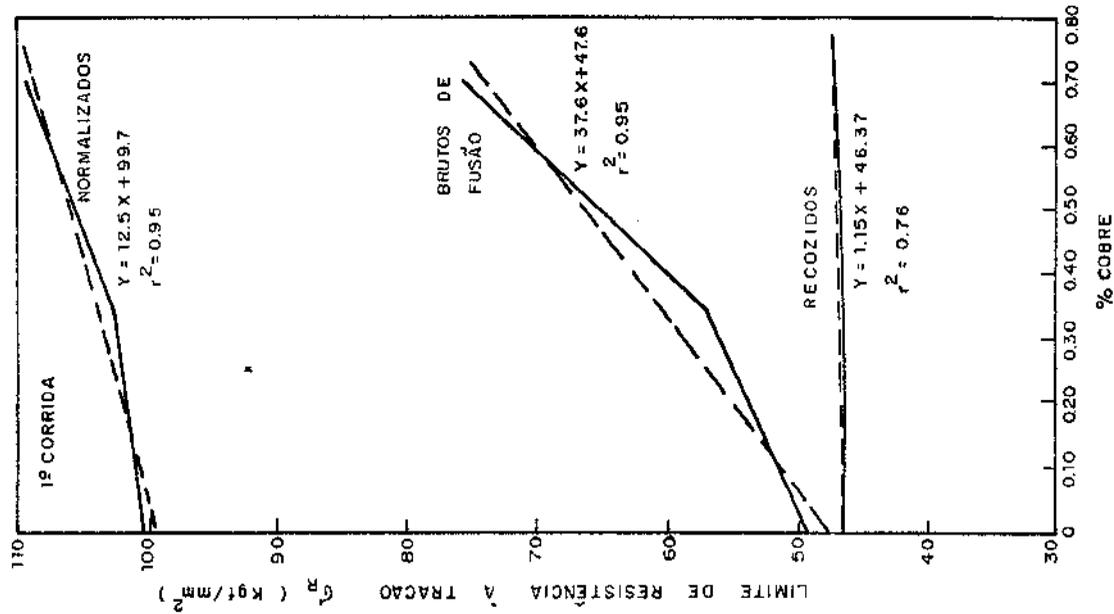


Fig. 60 - Variação do limite de resistência à tração com o teor de cobre nos vários estados de tratamento térmico (1ª corrida).

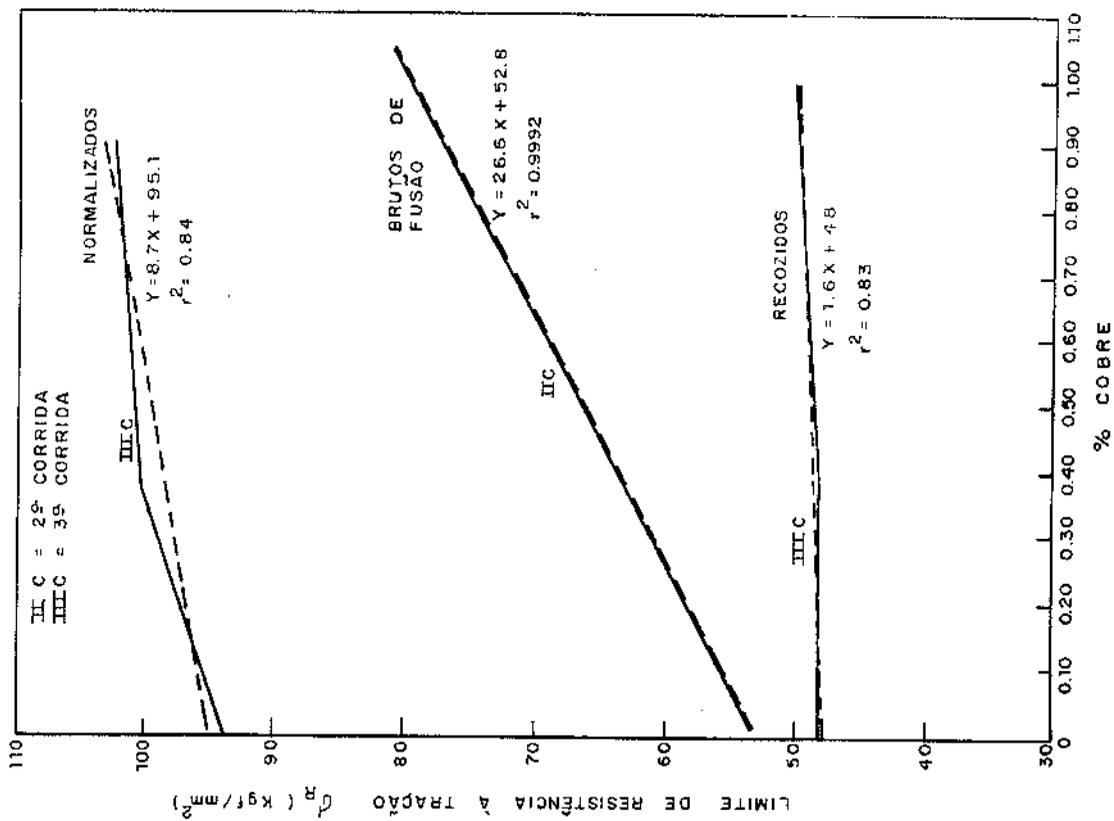


Fig. 61 - Variação do limite de resistência à tração com o teor de cobre nos vários estados de tratamento térmico (2ª e 3ª corridas).

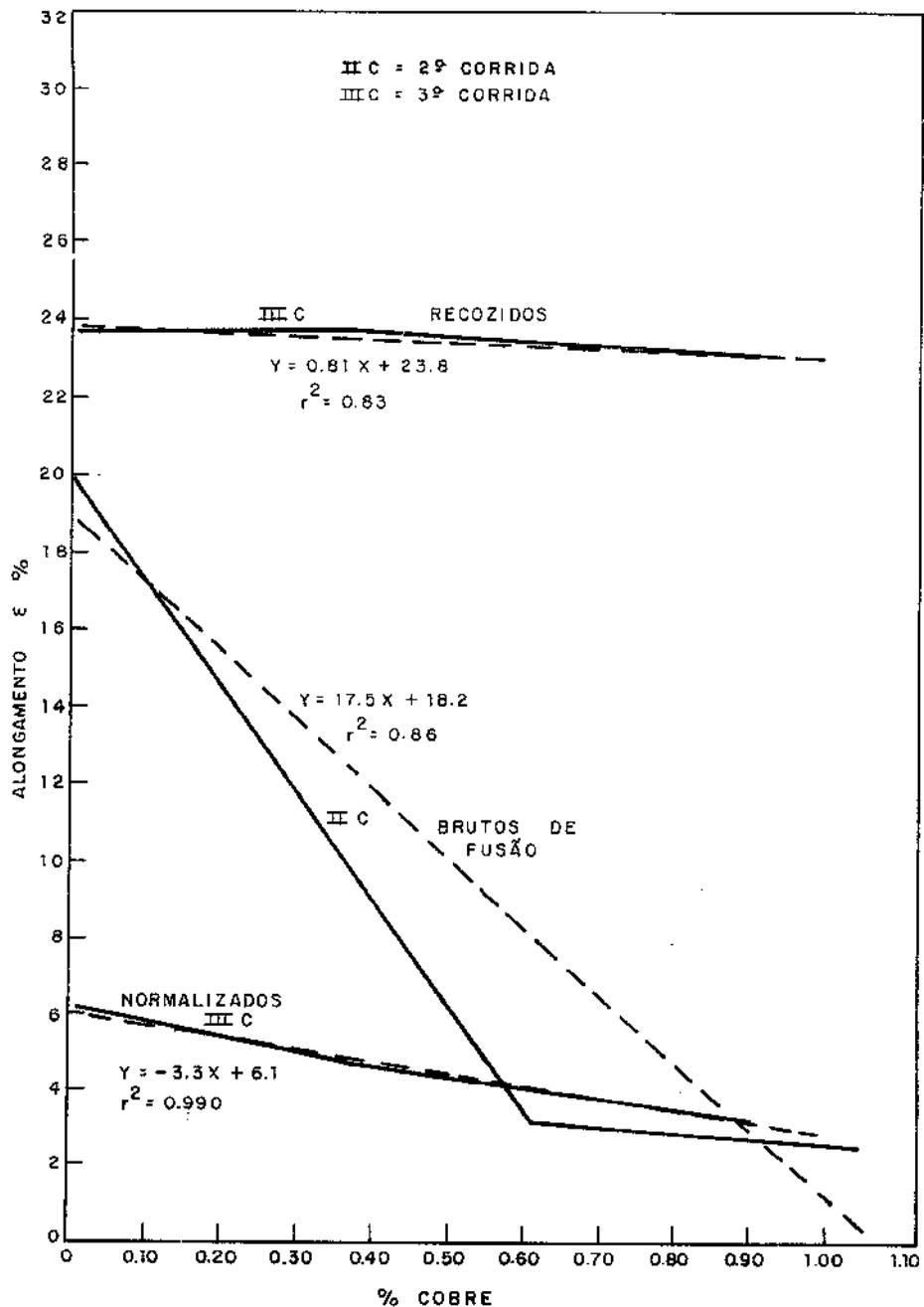


Figura 62 - Variação do alongamento com o teor de cobre nos vários estados de tratamento térmico (2ª e 3ª corridas).

5.1.3.2. Discussão

Os resultados obtidos com os ensaios de tração apresentaram-se bastante coerentes com os da dureza e de acordo com a literatura em função da adição do cobre e consequente modificação da estrutura da matriz metálica [1,2,3,4,5,6,7,8,13].

As correlações obtidas nas figuras 60 e 61 são comparadas na figura 63.

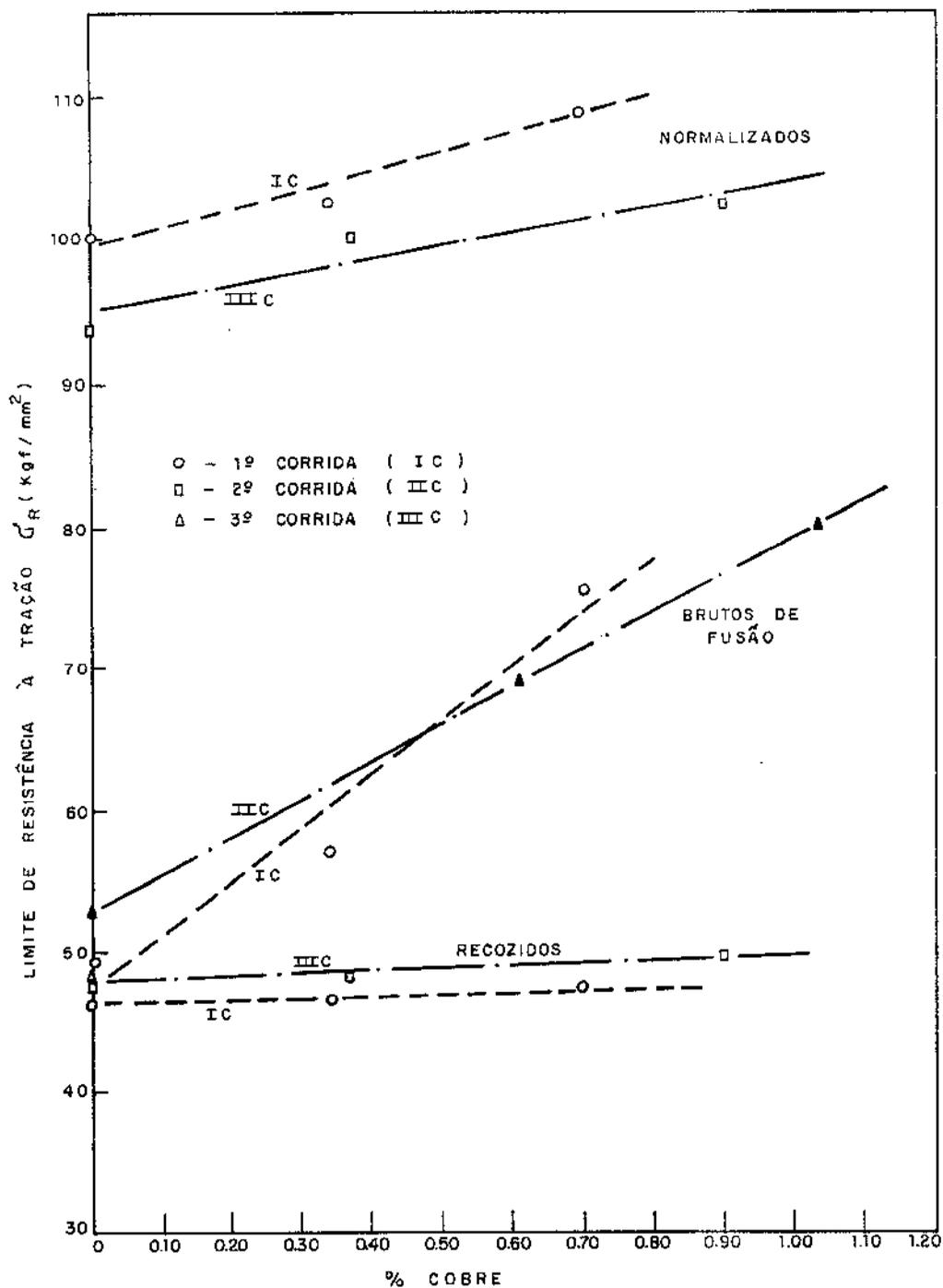


Figura 63 - Comparação dos resultados do limite de resistência à tração nos vários estados de tratamento térmico e nas várias corridas em função do teor de cobre.

Das figuras 62 e 63 observa-se que existe uma tendência bem definida do limite de resistência à tração e alongamento em função do teor de cobre embora com materiais de diferentes corridas.

Os materiais recozidos têm o limite de resistência σ_r e o alongamento ϵ praticamente inalteráveis ante a presença do cobre, mesmo em teores de 0,90%.

Os materiais brutos de fusão experimentam uma notável elevação no limite de resistência à tração ante o acréscimo de cobre. O mesmo acontece para os materiais normalizados embora com uma pequena taxa de crescimento.

As diferenças nos valores entre materiais de corridas distintas são atribuídas as diferenças no carbono equivalente e teor de silício [13].

As tabelas 14 e 15 mostram as correlações do limite de resistência à tração e alongamento com o teor de cobre, respectivamente.

| MATERIAL CORRIDA | TRATAMENTO TÉRMICO | EQUAÇÃO DA CORRELAÇÃO | COEF. DE CORR. | | PRECISÃO DA EQUAÇÃO % |
|------------------|--------------------|--------------------------|----------------|---------|-----------------------|
| | | | r^2 | r | |
| IC | RECOZIDO | $\sigma_r=1,15\%Cu+46,4$ | 0,76 | 0,87 | 85 |
| IIIC | " | $\sigma_r=1,6\%Cu+48$ | 0,83 | 0,91 | 86 |
| IC | Bruto de Fusão | $\sigma_r=37,6\%Cu+47,6$ | 0,95 | 0,97 | 91 |
| IIC | " | $\sigma_r=26,6\%Cu+52,8$ | 0,99992 | 0,99996 | 99,5 |
| IC | Normalizado | $\sigma_r=12,5\%Cu+99,7$ | 0,95 | 0,97 | 91 |
| IIIC | " | $\sigma_r=8,7\%Cu+95,1$ | 0,84 | 0,92 | 86 |

Tabela 14 - Valores das correlações entre o limite de resistência a tração e o teor de cobre.

| MATERIAL CORRIDA | TRATAMENTO TÉRMICO | EQUAÇÃO DA CORRELAÇÃO | COEF. DE CORR. | | PRECISÃO DA EQUAÇÃO % |
|------------------|--------------------|---------------------------|----------------|-------|-----------------------|
| | | | r^2 | r | |
| IIIC | Recozido | $\epsilon=-3,3\%Cu+6,1$ | 0,99 | 0,995 | 97,5 |
| IIC | Bruto de Fusão | $\epsilon=-17,5\%Cu+18,2$ | 0,86 | 0,93 | 86 |
| IIIC | Normalizado | $\epsilon=-0,81\%Cu+23,8$ | 0,83 | 0,91 | 85 |

Tabela 15 - Valores das correlações entre o alongamento e o teor de cobre.

De uma forma geral o limite de resistência à tração e o alongamento apresentaram uma boa correlação com a variação do teor de cobre.

Os valores da proporção de área na ruptura serão usados no método da determinação indireta da usinabilidade segundo DATSKO.

5.1.4. Correlação entre HB e σ_r

5.1.4.1. Resultados

As figuras 64 e 65 apresentam as correlações entre dureza e limite de resistência à tração, respectivamente, na 1ª corrida e 2ª e 3ª corridas. A tabela 16 resume as equações de correlações e os coeficientes de correlação correspondentes as figuras citadas.

| MATERIAL CORRIDA | TRATAMENTO TÉRMICO | EQUAÇÃO DA CORRELAÇÃO | COEF. DE CORR. | | PRECISÃO DA EQUAÇÃO % |
|------------------|--------------------|-------------------------|----------------|-------|-----------------------|
| | | | r^2 | r | |
| IC | Recozido | $HB=10,6\sigma_r-335,6$ | 0,99 | 0,995 | 97 |
| IIIC | " | $HB=10\sigma_r-320$ | 0,98 | 0,992 | 96 |
| IC | Brutos de fusão | $HB=3,1\sigma_r+14,7$ | 0,995 | 0,997 | 97,5 |
| IIC | " | $HB=3,6\sigma_r-9,8$ | 0,93 | 0,96 | 91 |
| IC | Normalizados | $HB=3\sigma_r-33,6$ | 0,77 | 0,88 | 85 |
| IIC | " | $HB=7,1\sigma_r-422$ | 0,97 | 0,98 | 94 |

Tabela 16 - Correlações entre dureza e resistência à tração.

5.1.4.2. Discussão

A figura 66 mostra uma comparação das correlações da dureza e limite de resistência à tração nas diversas corridas. Da figura observa-se que há uma tendência bem definida entre HB e σ_r e da tabela 16 observa-se que, em função da precisão das equações as correlações obtidas são muito boas.

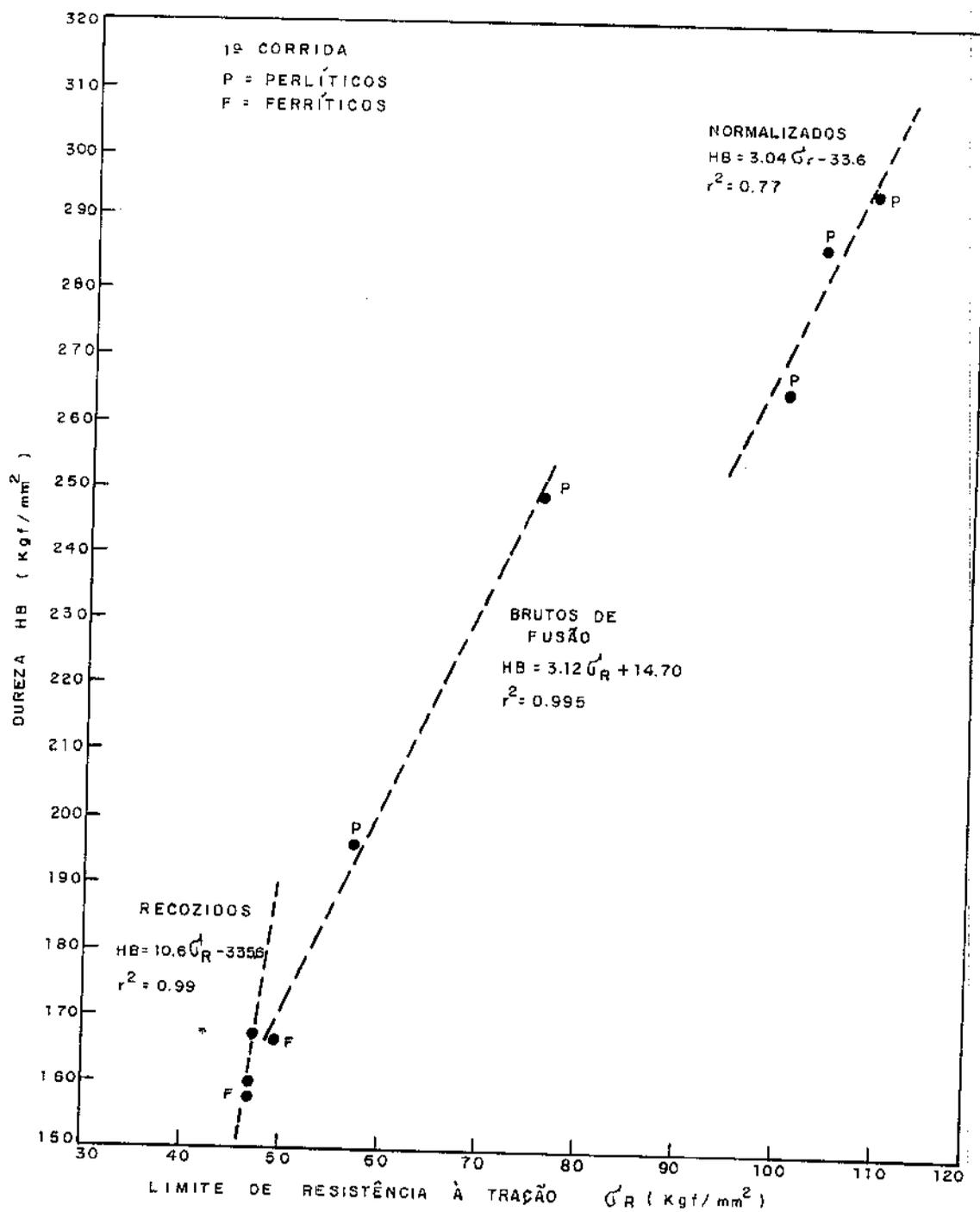


Figura 64 - Correlação da dureza com o limite de resistência à tração nos vários estados de tratamento térmico (1ª corrida).

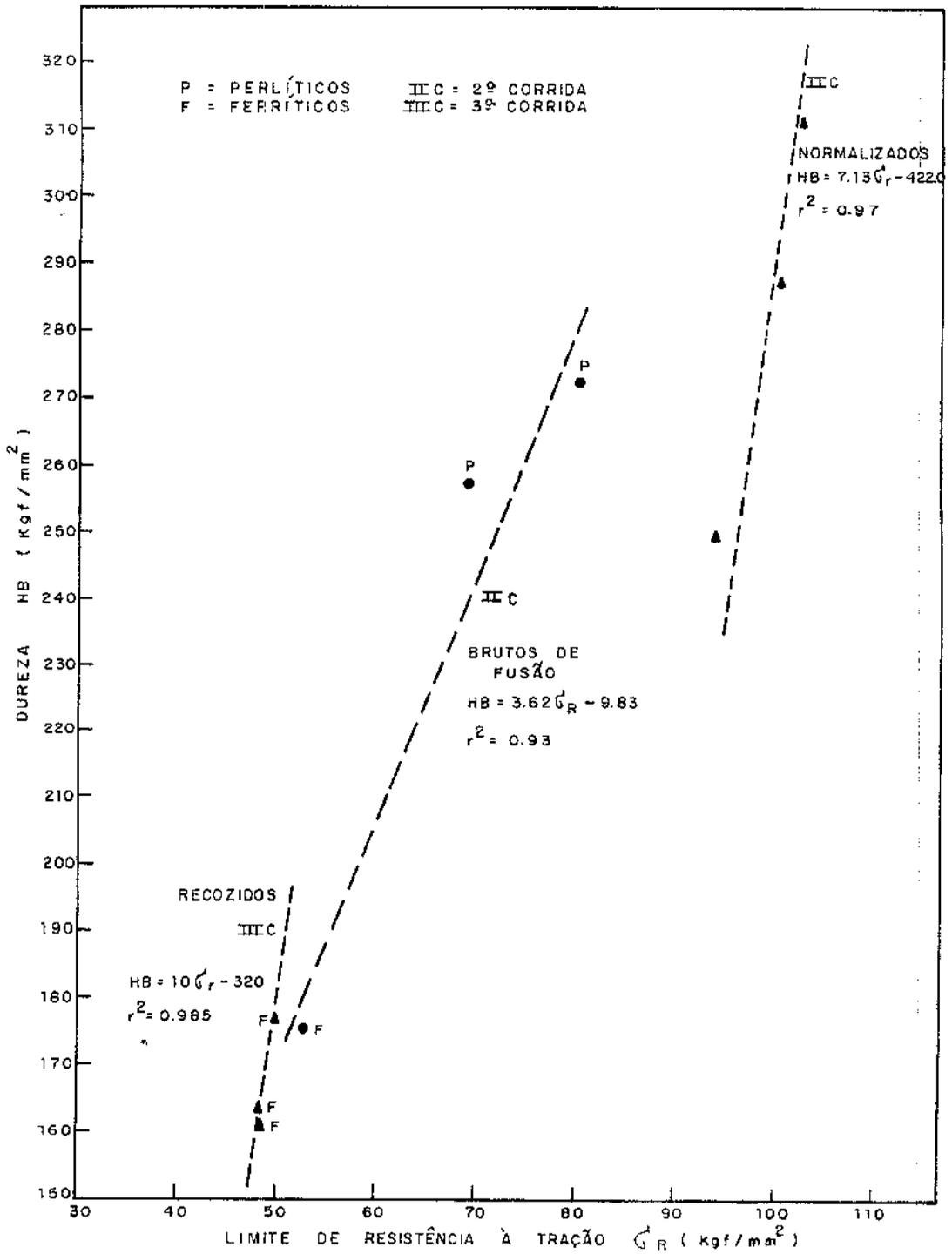


Figura 65 - Correlação da dureza com o limite de resistência à tração nos vários estados de tratamento térmico (2ª e 3ª corridas).

A pequena divergência nos materiais normalizados deve-se ao fato de que, neles, σ_r varia muito mais que a dureza em função do teor de cobre, pois, trata-se de estruturas compostas de per_lta fina, portanto, muito resistente.

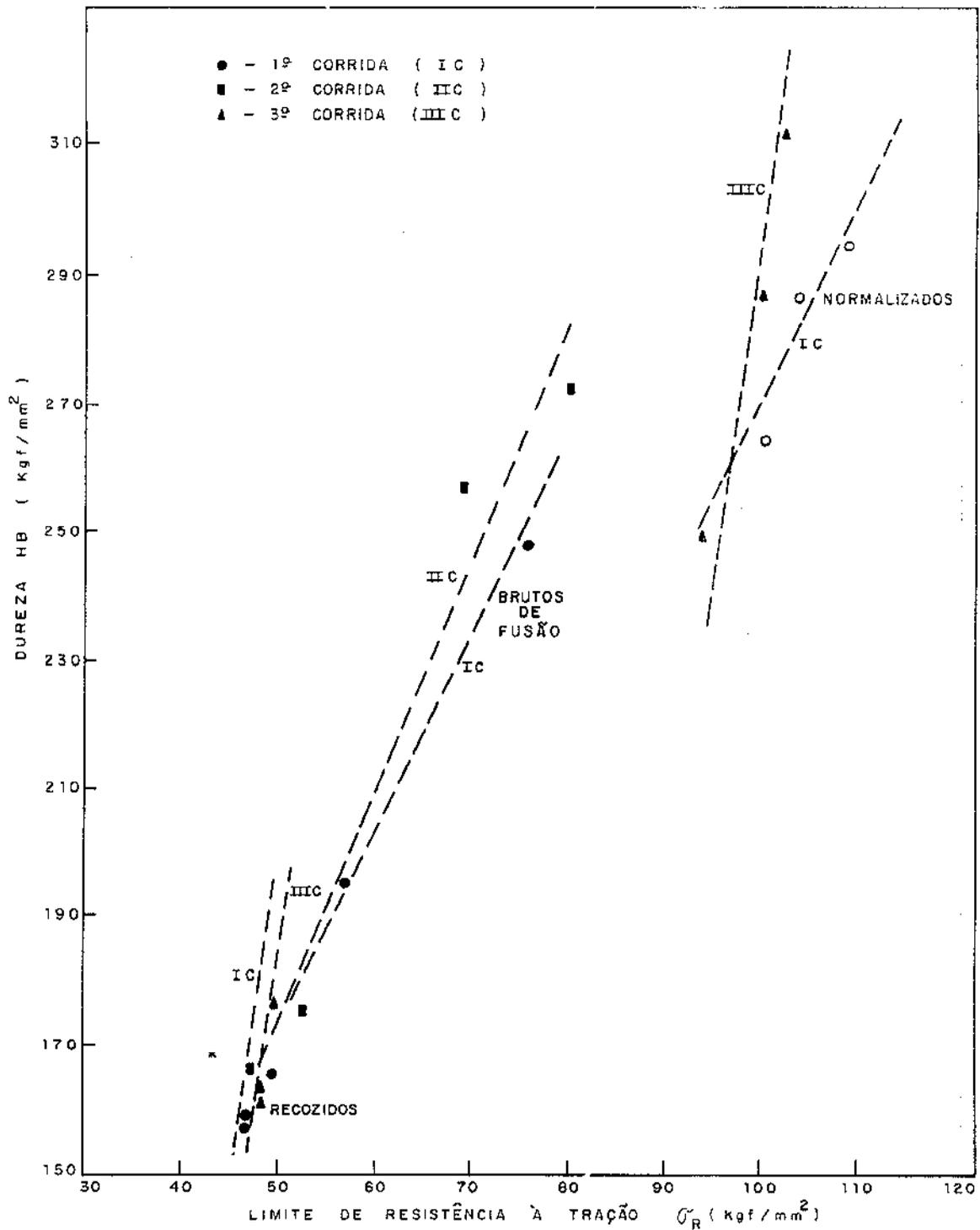


Figura 66 - Comparação das correlações entre dureza e o limite de resistência à tração nos vários estados de tratamento térmico e corridas distintas.

5.2. ENSAIO DE TORNEAMENTO CILÍNDRICO

5.2.1. Índices de usinabilidade

5.2.1.1. Resultados

Para os resultados dos ensaios de torneamento cilíndrico, as velocidades comparativas, estão na tabela III.1 do apêndice III. Observando-se a tabela, verifica-se que o ensaio apresentou uma dispersão máxima de 6,4% e uma dispersão média de 4,2%.

Os valores do índice de usinabilidade estão na tabela 17 e foram calculados com relação a dois padrões, respectivamente, o ferro fundido nodular bruto de fusão sem cobre código B1000 e o aço SAE 1212 laminado bruto.

Torna-se conveniente ressaltar que o aço em questão utilizado como padrão não apresenta as mesmas propriedades do padrão universal de usinabilidade o aço B1112 da A.I.S.I. Este material é trefilado a frio com dureza de 190 HB [63]. Este mesmo aço, se laminado, apresenta uma dureza de aproximadamente 140 HB, ou seja 25% menor.

Como o padrão utilizado apresenta uma dureza de 116 HB que representa 39% menor que a do padrão universal, os valores do índice de usinabilidade calculados através deste são menores do que se fosse utilizado o padrão universal. Todavia, estes índices oferecem valores que podem ser considerados orientativos.

A tabela 17 mostra também as variações da dureza e limite de resistência à tração em função do tipo de tratamento, teor de cobre e corridas dos diversos ferros fundidos nodulares.

5.2.2. Discussão

| MATE- RIAL CODIG. | TRATAMENTO TÉRMICO | ESTRUTURA DA MATRIZ | % Cu | DUREZA HB % PADRÃO B1000 | LIM. DE RESIST. σ_T % PADRÃO B1000 | I.U. % PADRÃO B1000 | I.U. % PADRÃO SAE 1212 |
|-------------------------|-----------------------|---------------------------|---------|-----------------------------------|---|---------------------------|------------------------------|
| B1000 | BRUTO/FUS. | FERRÍTICA | 0 | 100 | 100 | 100 | 66 |
| B1034 | " | PERLÍTICA | 0,34 | 118 | 116 | 86 | 57 |
| B1070 | " | " | 0,70 | 150 | 153 | 53 | 35 |
| R1000 | RECOZIDO | FERRÍTICA | 0 | 95 | 94 | 123 | 81 |
| R1034 | " | " | 0,34 | 96 | 94 | 110 | 73 |
| R1070 | " | " | 0,70 | 100 | 96 | 94 | 62 |
| N1000 | NORMALIZ. | PERLÍTICA | 0 | 160 | 203 | 34 | 23 |
| N1034 | " | " | 0,34 | 173 | 208 | 29 | 19 |
| N1070 | " | " | 0,70 | 178 | 221 | 27 | 18 |
| B2000 | BRUTO/FUS. | FERRÍTICA | 0 | 105 | 107 | 73 | 48 |
| B2061 | " | PERLÍTICA | 0,61 | 155 | 140 | 49 | 32 |
| B2104 | " | " | 1,04 | 164 | 163 | 34 | 22 |
| R3000 | RECOZIDO | FERRÍTICA | 0 | 97 | 98 | 98 | 65 |
| R3037 | " | " | 0,37 | 98 | 98 | 91 | 60 |
| R3090 | " | " | 0,90 | 106 | 101 | 87 | 58 |
| N3000 | NORMALIZ. | PERLÍTICA | 0 | 150 | 190 | 42 | 28 |
| N3037 | " | " | 0,37 | 173 | 203 | 31 | 20 |
| N3090 | " | " | 0,90 | 187 | 207 | 28 | 18 |
| SAE1212 | | | | | | | 100 |

Tabela 17 - Índices de usinabilidade obtidos nos ensaios de torneamento cilíndrico.

5.2.2.1. Correlação da usinabilidade com o teor de cobre

A figura 67 apresenta as variações dos índices de usinabilidade dos ferros fundidos provenientes da primeira corrida enquanto a figura 68 refere-se à segunda e terceira corrida.

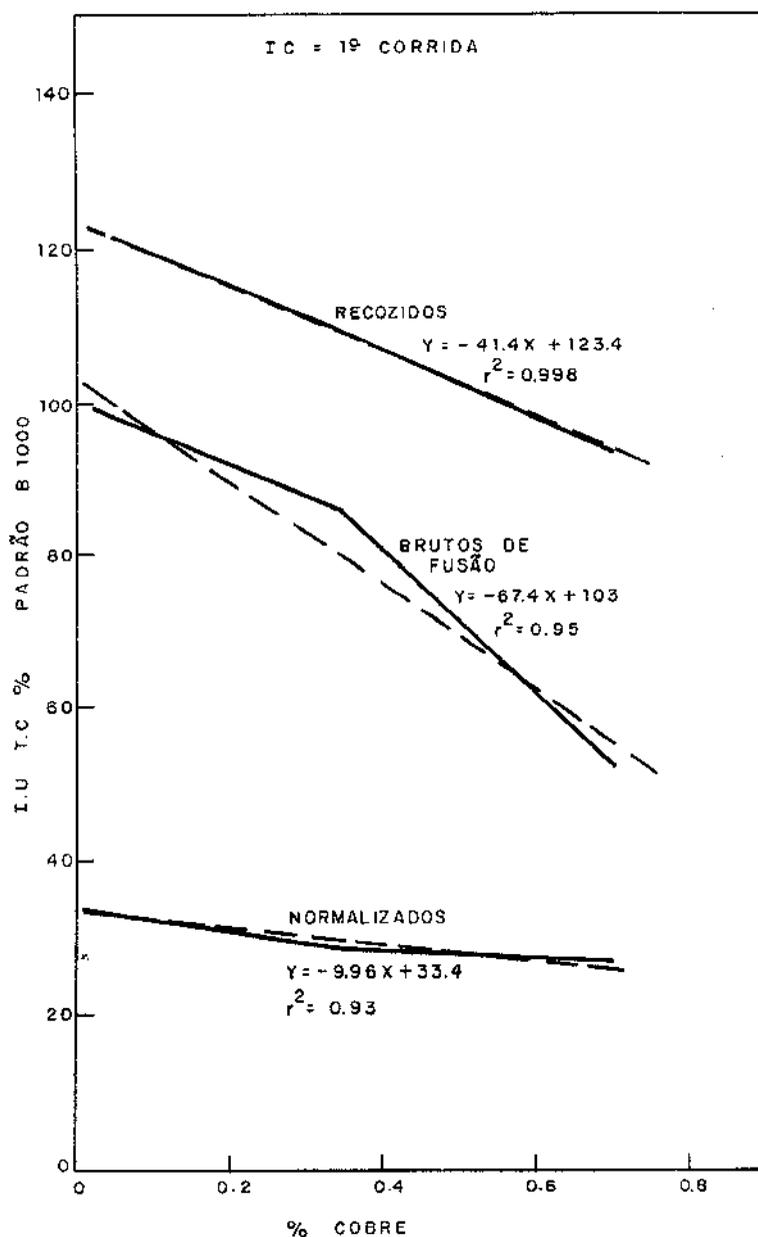


Figura 67 - Variação do índice de usinabilidade no torneamento cilíndrico em função do teor de cobre e tratamentos térmicos na 1.ª corrida (Padrão B1000).

Da figura 67, observa-se que adição de cobre causou uma redução da usinabilidade e mais notadamente nas estruturas brutas de fusão. Nos materiais provenientes da segunda e terceira corridas, figura 67, observa-se uma variação semelhante para os brutos de fusão enquanto os recozidos variaram menos e os normalizados mais.

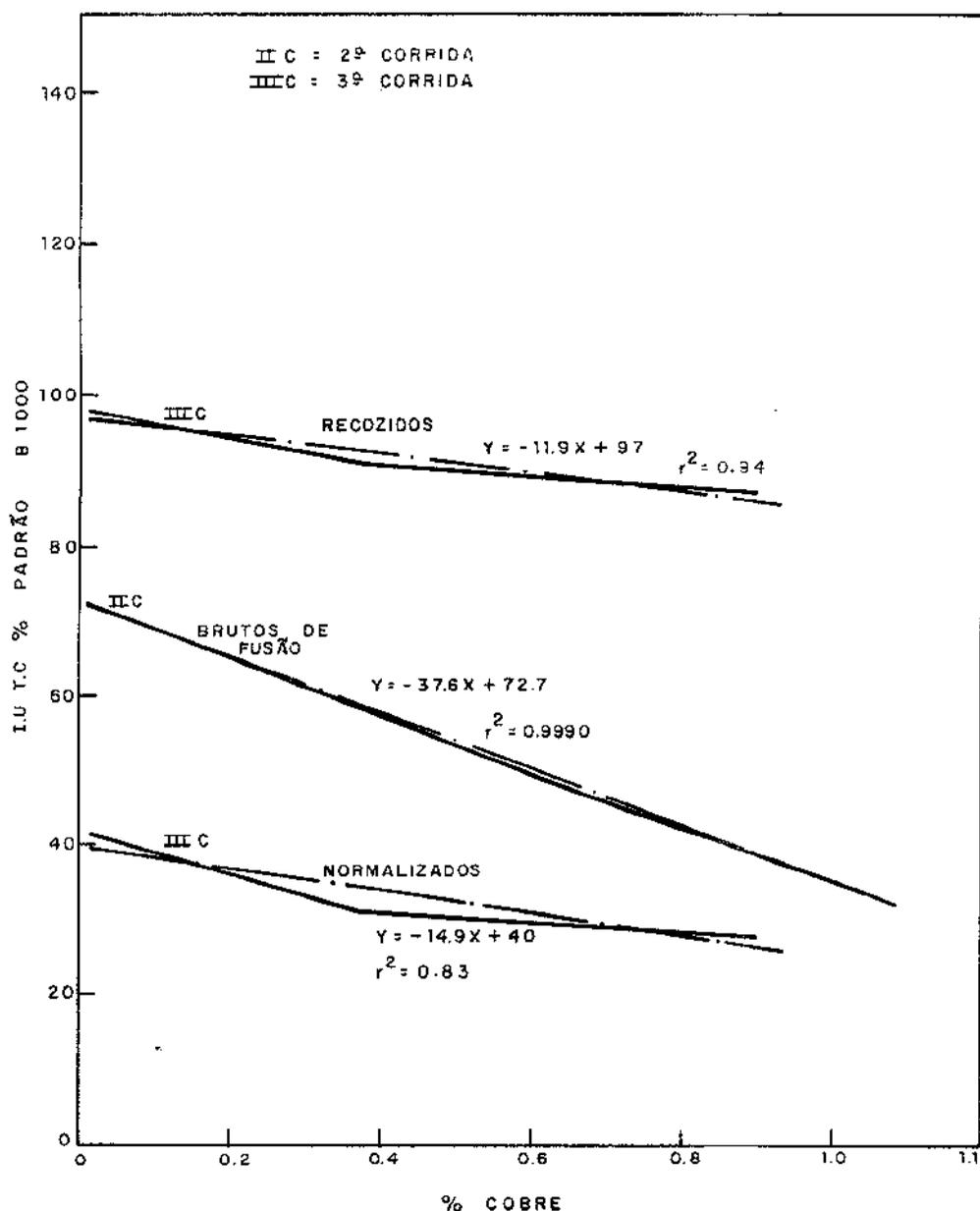


Figura 68 - Variação do índice de usinabilidade no torneamento cilíndrico em função do teor de cobre e tratamentos térmicos nas 2.^a e 3.^a corridas (Padrão B1000).

Na figura 69 verifica-se melhor as afirmações anteriores pois, agrupou-se os resultados das diversas corridas. Em função da tabela 18, pode-se dizer que as correlações encontradas são boas.

A figura 70 mostra que existe realmente uma tendência de redução do índice de usinabilidade com o teor de cobre, independentemente da corrida considerada.

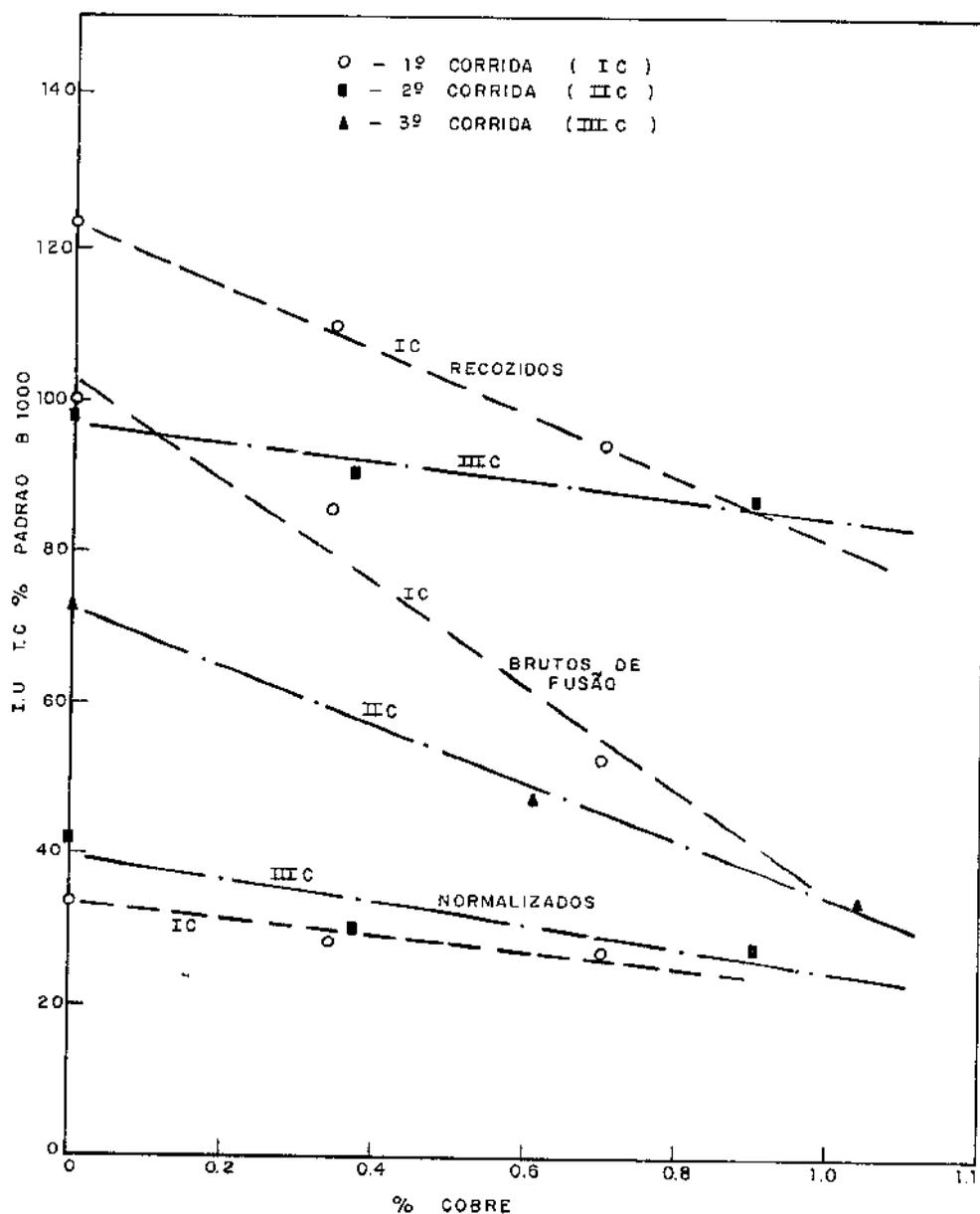


Figura 69 - Variação dos índices de usinabilidade com os teores de cobre nas diversas corridas.

| CÓDIGO | TRATAMENTO TÉRMICO | EQUAÇÃO DA CORRELAÇÃO | COEF. DE CORR. | | PRECISÃO DA EQUAÇÃO % |
|--------|--------------------|-------------------------|----------------|---------|-----------------------|
| | | | r^2 | r | |
| IC | RECOZIDO | I.U. = -41,4%Cu + 123,4 | 0,998 | -0,9990 | 98 |
| IIIC | " | I.U. = -11,9%Cu + 97 | 0,93 | -0,970 | 93 |
| IC | BRUTO/FUSÃO | I.U. = -67,4%Cu + 103 | 0,95 | -0,975 | 93 |
| IIC | " | I.U. = -37,6%Cu + 72,7 | 0,9990 | -0,9995 | 99 |
| IC | NORMALIZADO | I.U. = -10%Cu + 33,4 | 0,93 | -0,960 | 91 |
| IIIC | " | I.U. = -14,9%Cu + 40 | 0,83 | -0,910 | 87 |

Tabela 18 - Equações e coeficientes de correlações entre o índice de usinabilidade e teor de cobre.

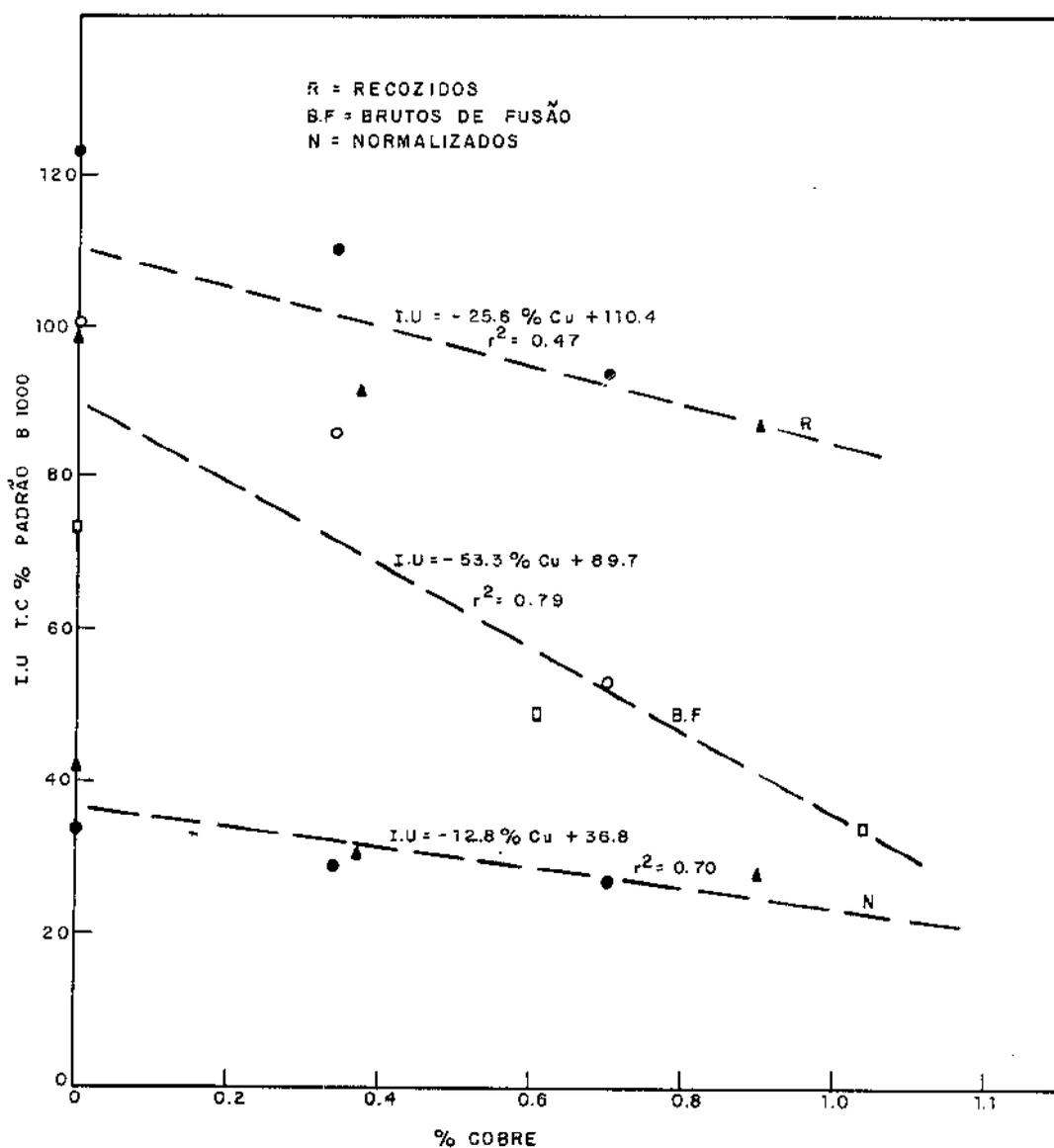


Figura 70 - Variações do índice de usinabilidade com o teor de cobre nos três estados de tratamento térmico para todas as corridas.

5.2.2.2. Correlação da Usinabilidade com a Dureza

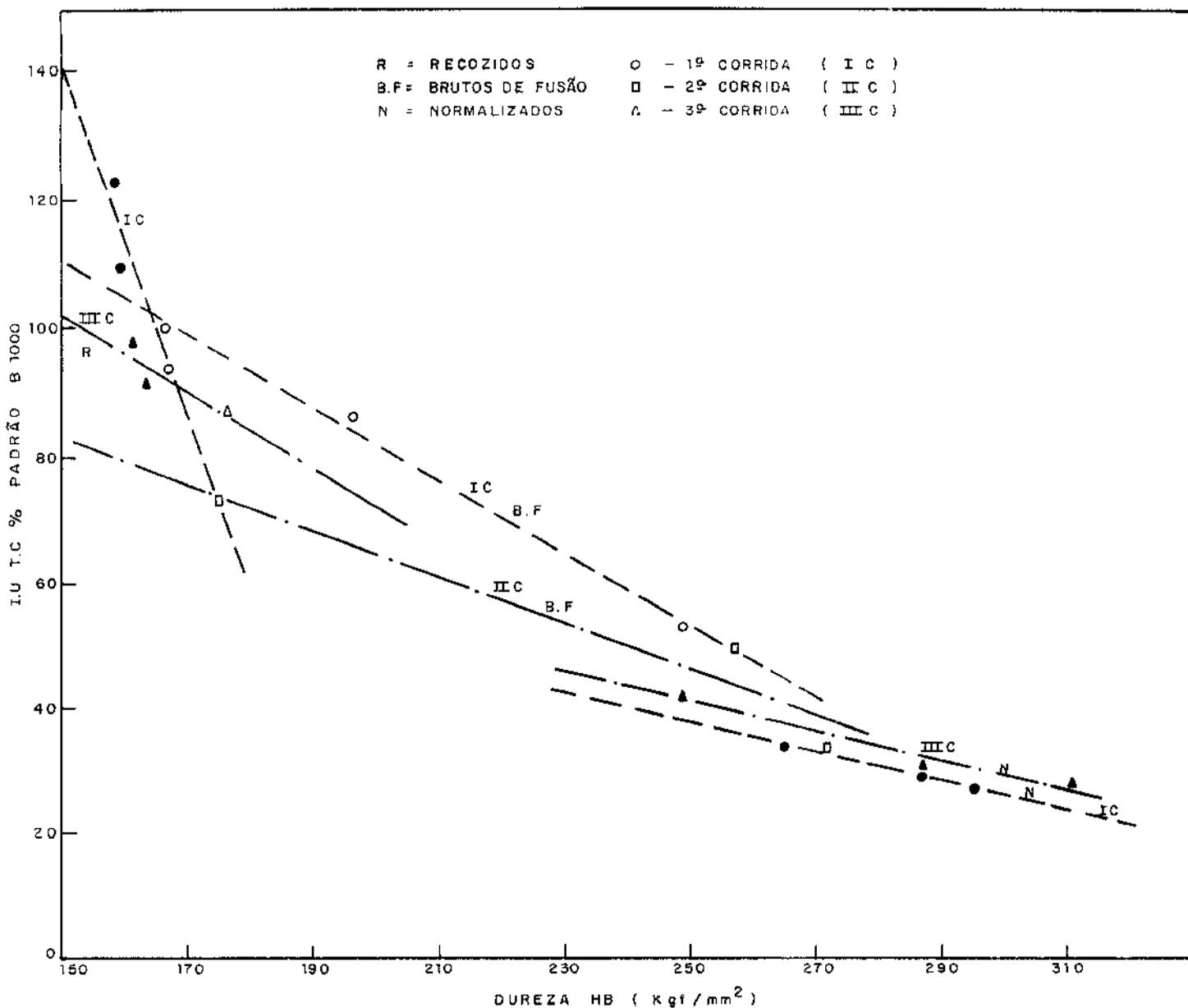


Figura 71 - Correlação dos índices de usinabilidade com a dureza, comparação nas diversas corridas.

Na figura 71 observa-se que os índices de usinabilidade possuem uma boa correlação com a dureza com exceção do material recozido que possui uma correlação mais fraca, apresentando diferentes inclinações na reta em função das corridas.

A tabela 19 confirma as afirmações acima pois, as menores precisões na determinação das correlações ocorrem nos materiais recozidos.

| CÓDIGO | TRATAMENTO TÉRMICO | EQUAÇÃO DA CORRELAÇÃO | COEF. DA CORR. | | PRECISÃO DA EQ. % |
|--------|-----------------------|--------------------------|----------------|---------|----------------------|
| | | | r^2 | r | |
| IC | RECOZIDO | I.U. = -2,75HB + 553,2 | 0,87 | -0,935 | 88 |
| IIIC | " | I.U. = -0,58HB + 188,7 | -0,72 | -0,85 | 83 |
| IC | BRUTO/FUSÃO | I.U. = -0,57HB + 196,3 | 0,995 | -0,997 | 97,5 |
| IIC | " | I.U. = -0,36HB + 137,7 | 0,94 | -0,97 | 92 |
| IC | NORMALIZADO | I.U. = -0,23HB + 95,5 | 0,9995 | -0,9997 | 99 |
| IIIC | " | I.U. = -0,23HB + 99 | 0,96 | -0,98 | 94 |

Tabela 19 - Equações e coeficientes de correlações entre o índice de usinabilidade e a dureza.

Levando em consideração estes índices de usinabilidades para os ferros fundidos nodulares no estado bruto de fusão e normalizados, a dureza é um bom indicador da usinabilidade. Por outro lado, no caso dos materiais recozidos existe uma correlação considerada regular.

Para verificar se existe realmente uma tendência definida da usinabilidade em relação a dureza construiu-se as curvas da figura 72 onde tem-se a correlação independente das corridas.

Analisando-se a figura 72, confirmou-se as observações anteriores ou seja, a dureza é um bom indicador da usinabilidade dos ferros fundidos nodulares exceto no estado recozido. Comprovam-se as afirmações de MATHON [29] que verificou os ferros fundidos nodulares brutos de fusão.

Com relação aos ferros fundidos nodulares recozidos, através da figura 72, observa-se que existem duas retas $R_{(1)}$ e $R_{(2)}$ definindo a correlação, onde a reta $R_{(2)}$ foi obtida desconsiderando-se um ponto especificado na figura. Pode-se dizer pela reta $R_{(2)}$ que haveria, neste caso, uma tendência da usinabilidade ser dependente da dureza até um certo valor e depois seria constante e neste caso a reta já não traduziria a correlação e sim uma curva hiperbólica.

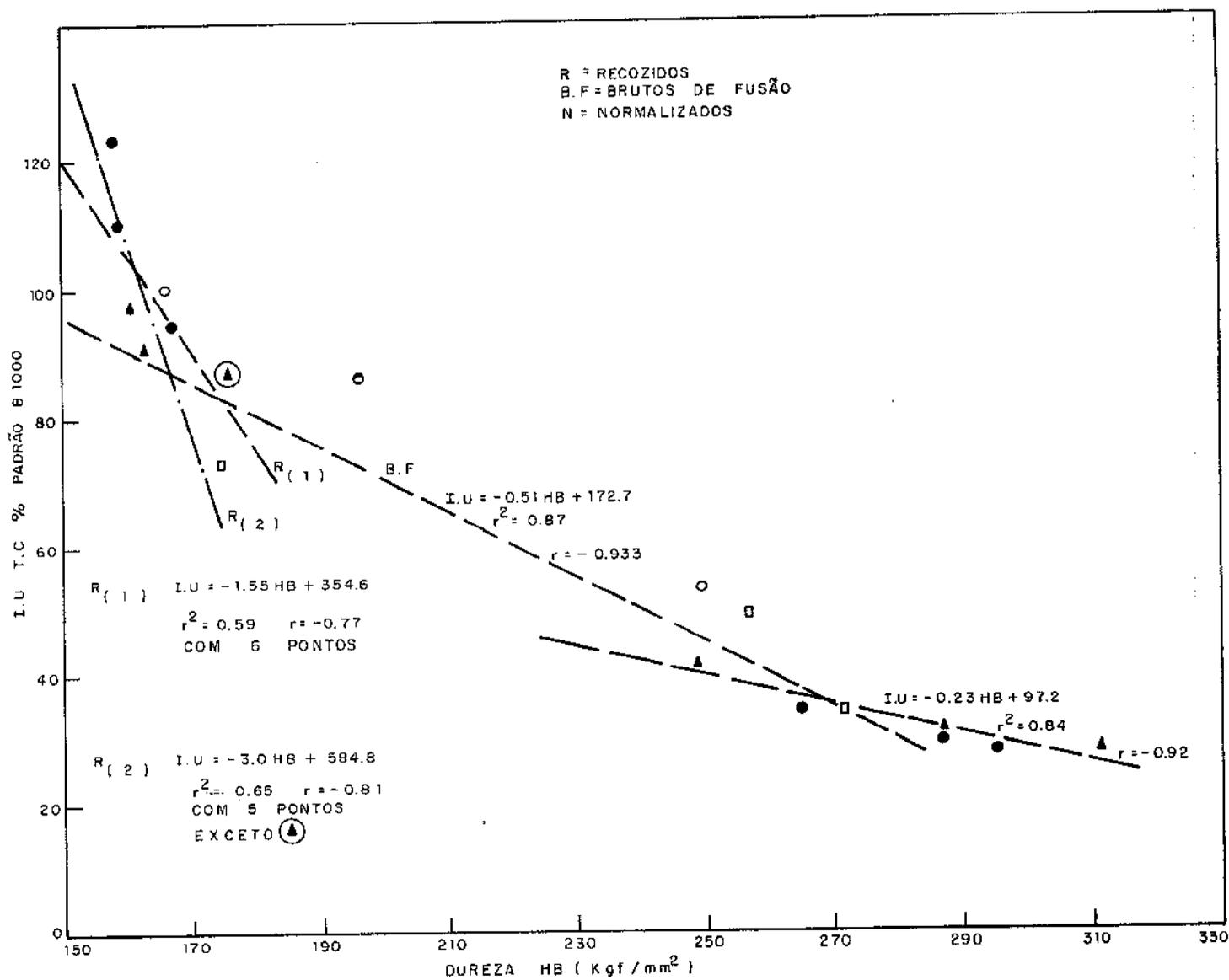


Figura 72 - Correlações do índice de usinabilidade com a dureza verificando a tendência com materiais de diferentes corridas.

5.2.2.3. Correlação da usinabilidade com o limite de resistência à tração.

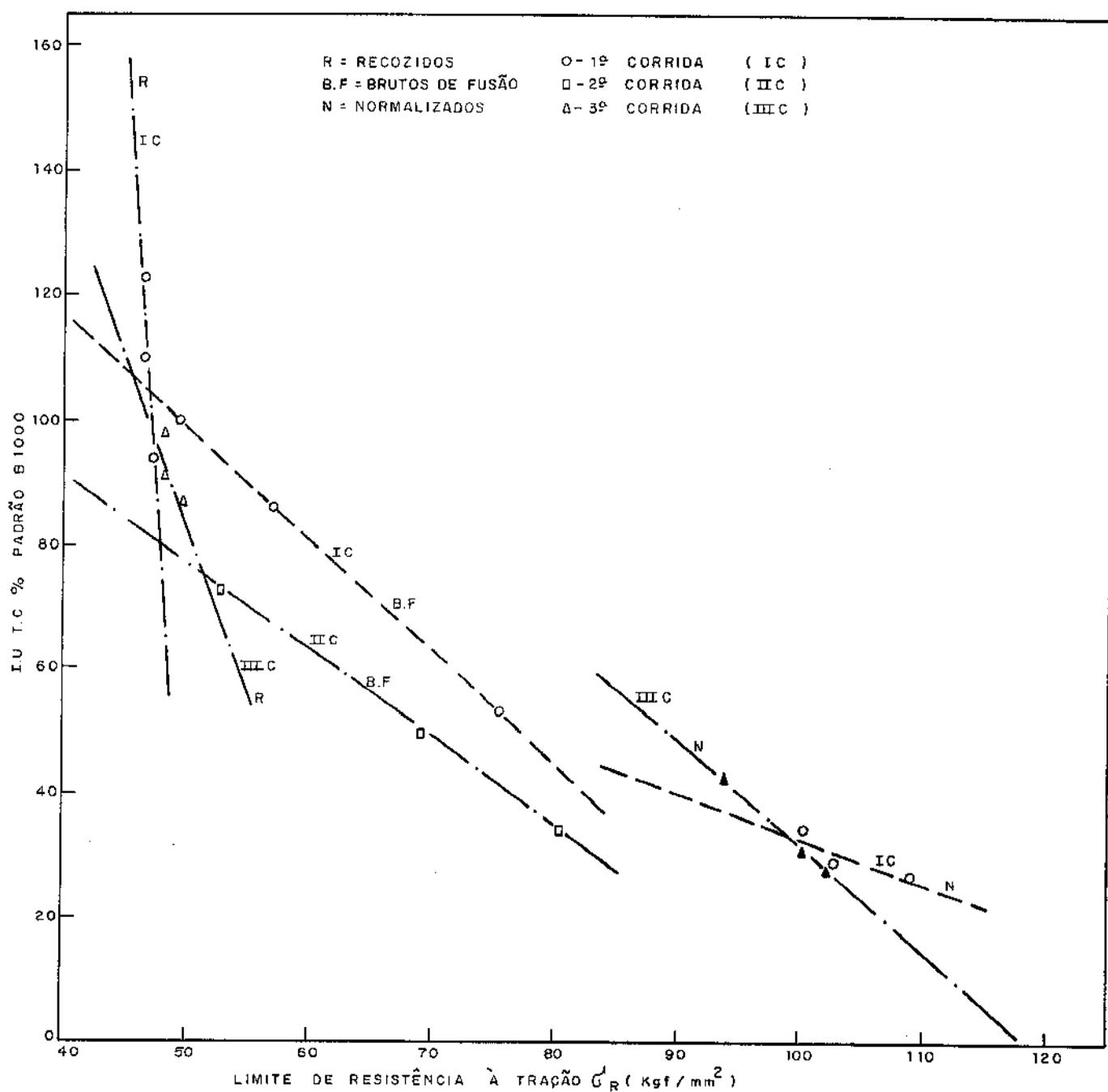


Figura 73 - Correlações dos índices de usinabilidade com o limite de resistência à tração para os materiais provenientes de várias corridas.

| CÓDIGO | TRATAMENTO TÉRMICO | EQUAÇÃO DA CORRELAÇÃO | COEF. DE CORR. | | PRECISÃO DA EQUAÇÃO % |
|--------|-----------------------|---------------------------------|----------------|----------|--------------------------|
| | | | r^2 | r | |
| IC | RECOZIDO | I.U. = $-28,1\sigma_r + 1424,3$ | 0,800 | -0,894 | 86 |
| IIIC | " | I.U. = $-5,4\sigma_r + 352,7$ | 0,605 | -0,78 | 77 |
| IC | BRUTO/FUSÃO | I.U. = $-1,8\sigma_r + 188,4$ | 1,0 | -1,0 | 100 |
| IIC | " | I.U. = $-1,4\sigma_r + 147,6$ | 0,9994 | -0,9997 | 99 |
| IC | NORMALIZADO | I.U. = $-0,7\sigma_r + 104,1$ | 0,78 | -0,885 | 85 |
| IIIC | " | I.U. = $-1,7\sigma_r + 202,6$ | 0,99997 | -0,99998 | 99,5 |

Tabela 20 - Equações e coeficientes de correlações entre o índice de usinabilidade e o limite de resistência à tração.

Através da figura 73 observa-se que existem correlações diferentes entre o índice de usinabilidade e o limite de resistência à tração e que dependem do estado de tratamento térmico.

Como a dureza apresentou uma boa correlação com o limite de resistência σ_r seria de se esperar correlações semelhantes neste caso.

Os ferros fundidos brutos de fusão apresentaram uma ótima correlação entre os parâmetros citados, tal afirmação baseia-se nos valores encontrados para os coeficientes da correlação e conseqüente precisão da equação constantes da tabela 20.

No estado normalizado, as correlações embora inferiores a anterior podem ser consideradas boas enquanto os recozidos, a exemplo do que aconteceu com a dureza, apresentaram uma correlação regular.

Verificando-se as tendências, através da figura 74, observa-se que existe realmente uma tendência de redução da usinabilidade com o aumento do limite de resistência a tração e principalmente nos estados de tratamento térmico, brutos de fusão e normalizados.

Os ferros fundidos recozidos mostram uma tendência da usinabilidade depender do limite de resistência até certo ponto e depois permanecer constante a exemplo do que aconteceu com a dureza.

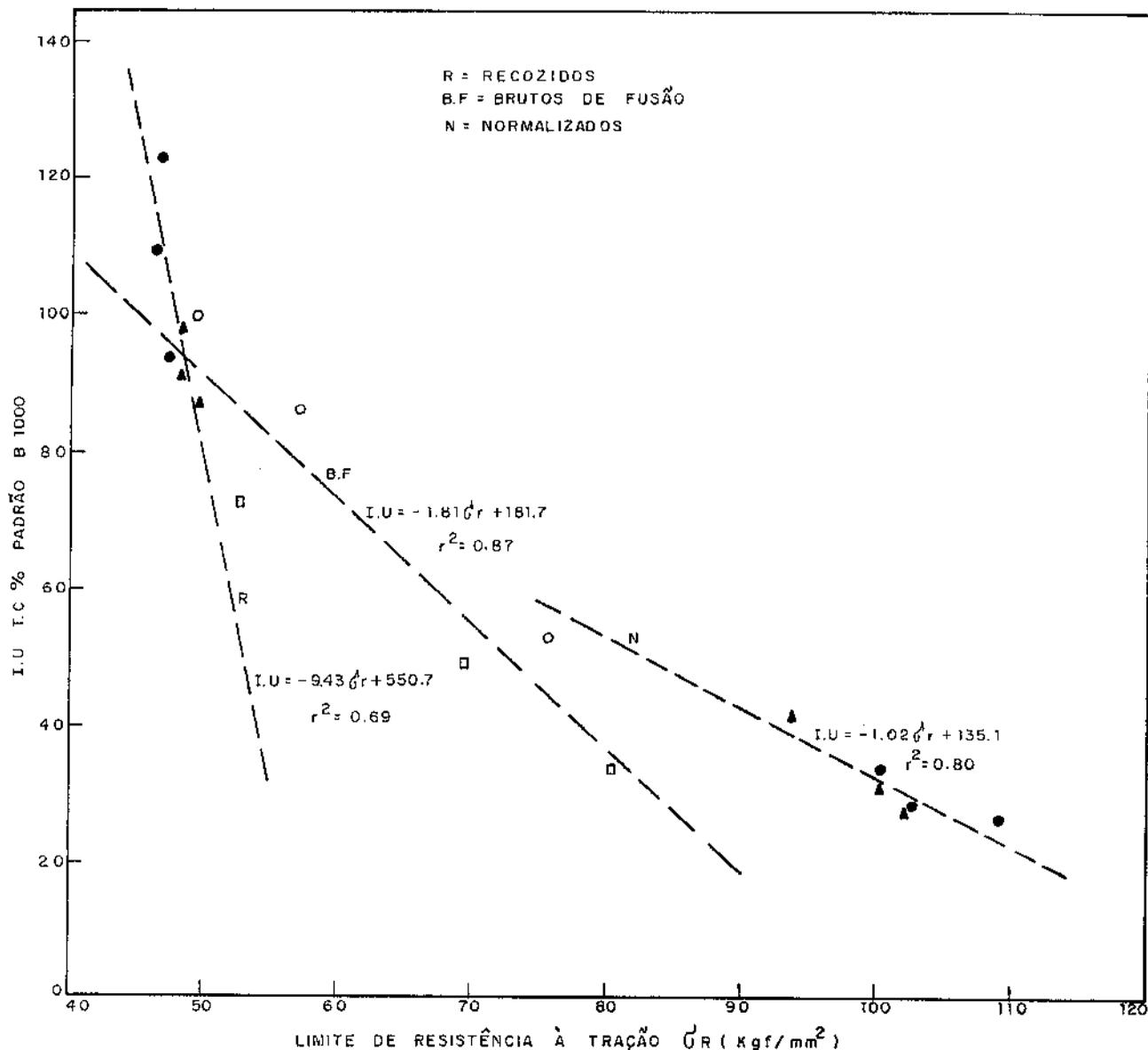


Figura 74 - Correlações entre o índice de usinabilidade e o limite de resistência à tração verificando a tendência com materiais de diferentes corridas.

5.2.3. Discussão conclusiva - Torneamento Cilíndrico

As velocidades comparativas obtidas através do ensaio baseado na variação da velocidade de corte por incrementos no torneamento cilíndrico que foi executado segundo as especificações da "AFNOR" A03 654 [9], apresentaram uma dispersão máxima da ordem de 6% e uma dispersão média de 4%.

A exigência da norma de que a destruição da aresta cortante se dê durante a usinagem do sexto ao oitavo anel não pôde ser cumprida em todos os ensaios, pois, nos ferros fundidos normalizados e de dureza elevada, a destruição ocorria entre o quarto e quinto anel. Tal fato ocorreu também no estado bruto de fusão para os teores de cobre mais elevados.

Os valores das rotações indicados na tabela 6 do capítulo 4 não foram utilizados rigorosamente nos casos descritos acima. Por outro lado, se fossem mudados os valores das rotações iniciais ter-se-iam velocidades de corte muito pequenas, inferiores a 14 m/min.

Da teoria da usinagem, sabe-se que para alguns materiais a usinagem em velocidades de corte tão baixas leva ao surgimento da aresta postiça de corte e que esta é a principal responsável pelo desgaste da ferramenta em regimes com baixas velocidades de corte [36]. Como a aresta postiça de corte é um fenômeno exclusivo dos materiais com cavacos contínuos, nestes materiais, deve-se ter certas precauções ao aplicar o método de ensaio da "AFNOR" pois poderia surgir um desgaste prematuro na ferramenta e que iria mascarar o resultado.

No caso, os ferros fundidos utilizados não estariam sujeitos a formação da aresta postiça mas, verificou-se que a utilização de velocidades de corte inferiores a 14 m/min não prorrogaria a vida da ferramenta até o sexto anel. Atribuiu-se a seguinte explicação para o fato:

Como nos regimes de baixa velocidades (menores 14 m/min) tem-se a formação de cavaco de cisalhamento, o material é recalçado frente à aresta cortante e o cavaco fissiona sob o efeito das tensões de tração, a pressão normal é elevada e em consequência haveria uma tendência de microsoldagens do cavaco à ferramenta. Em razão da baixa velocidade de saída do cavaco o tempo de contato é maior.

No estágio seguinte a velocidade de corte aumenta e há então tendência de romper-se as microsoldas com consequente escoamento das partículas arrancadas através da superfície de saída da ferramenta.

A pressão normal elevada em consequência da grande energia de deformação requerida em baixas velocidades também contribui para aumentar o desgaste pois aumenta a sollicitação mecânica e deformação plástica da aresta cortante.

As correlações entre o índice de usinabilidade e o teor de cobre mostraram que segundo este índice de usinabilidade, a adição de cobre aos ferros fundidos nodulares provocou uma redução na usinabilidade.

As estruturas brutas de fusão são mais sensíveis pois, a sua usinabilidade sofreu reduções maiores em presença do cobre. Esta redução é causada pela maior quantidade de perlita presente.

A transformação ferrita-perlita observada nas fotos das microestruturas é a responsável pelo aumento da dureza e resistência à tração a qual, ocorre devido a adição de cobre [1,5,6].

As estruturas normalizadas sofrem uma influência semelhante, embora que em proporções menores. Neste caso o cobre influi aumentando um pouco a quantidade de perlita e refinando parte dela, tornando-a perlita fina, que é mais resistente.

As estruturas recozidas, com estrutura predominantemente ferrítica pouca influência sofrem. Ocorre uma pequena redução da usinabilidade em consequência do pequeno endurecimento observado na ferrita.

Considerando a elevação observada nas propriedades mecânicas em consequência da adição do cobre nas estruturas brutas de fusão, pode-se dizer que a dureza e o limite de resistência à tração variam nas mesmas proporções e inversamente proporcional à usinabilidade com referência ao índice determinado neste ensaio.

Por outro lado, se as propriedades citadas aumentam proporcionalmente com a adição de cobre, em contra-partida o alongamento se reduz, como consequência se tem uma alteração na classificação do ferro fundido nodular segundo a A.B.N.T. [53] que o classifica segundo o limite de resistência à tração e o alongamento.

5.3. ENSAIO θ_v - MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DE USINAGEM PARA UMA DADA VELOCIDADE

5.3.1. Resultados

As tabelas IV.1 e IV.2 do apêndice IV mostram os resultados da temperatura de usinagem dos vários materiais ensaiados para três velocidades de corte respectivamente: 23.5, 28.3 e 35.3 m/min. A tabela 21 apresenta os índices de usinabilidade obtidos através dessas temperaturas.

| MATERIAL CÓDIGO | TEMPERATURAS (mV) | | | ÍNDICES DE USINABILIDADE % (PADRÃO B1000) | | |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--|-------------------|-------------------|
| | (v ₁) | (v ₂) | (v ₃) | (v ₁) | (v ₂) | (v ₃) |
| | 23,5m/min | 28,3m/min | 35,3m/min | | | |
| B1000 | 2,80 | 3,03 | 3,23 | 100 | 100 | 100 |
| B1034 | 3,40 | 3,56 | 3,76 | 82 | 85 | 86 |
| B1070 | 3,75 | 3,93 | 4,16 | 75 | 77 | 78 |
| R1000 | 2,60 | 2,70 | 2,80 | 108 | 112 | 115 |
| R1034 | 2,65 | 2,75 | 2,95 | 106 | 110 | 109 |
| R1070 | 2,80 | 3,00 | 3,20 | 100 | 101 | 101 |
| N1000 | 3,20 | 3,40 | 3,70 | 87 | 89 | 87 |
| N1034 | 3,70 | 4,00 | 4,30 | 76 | 76 | 75 |
| N1070 | 4,25 | 4,40 | 4,60 | 66 | 69 | 70 |
| B2000 | 2,90 | 3,05 | 3,25 | 96 | 99 | 99 |
| B2061 | 4,00 | 4,15 | 4,35 | 70 | 73 | 74 |
| B2104 | 4,10 | 4,25 | 4,50 | 68 | 71 | 72 |
| R3000 | 3,00 | 3,20 | 3,40 | 93 | 95 | 95 |
| R3037 | 3,00 | 3,20 | 3,40 | 93 | 95 | 95 |
| R3090 | 3,00 | 3,20 | 3,40 | 93 | 95 | 95 |
| N3000 | 3,83 | 4,03 | 4,18 | 73 | 75 | 77 |
| N3037 | 4,04 | 4,22 | 4,42 | 69 | 72 | 73 |
| N3090 | 4,40 | 4,60 | 4,75 | 64 | 66 | 68 |

Tabela 21 - Resultados dos ensaios de temperatura de usinagem e índices de usinabilidade para três velocidades de corte diferentes.

As medições foram efetuadas em três velocidades diferentes para verificar-se a influência que esta exerce sobre o índice de usinabilidade calculado neste ensaio.

5.3.2. Discussão

Da tabela 21 se observa que os índices de usinabilidade calculados em três velocidades distintas apresentam pouca diferença, os valores são semelhantes.

Para verificar se a velocidade exerce influência sobre os índices de usinabilidade, foram calculadas as correlações entre os índices de usinabilidade citados. Os resultados são apresentados na tabela 22.

| MATERIAIS (TRATAMENTO TÉRMICO) | $v_1 f(v_2)$ | | $v_2 f(v_3)$ | | $v_1 f(v_3)$ | |
|--------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| | COEF. DE CORRELA ÇÃO r | PRECISÃO DA CORRE LAÇÃO (%) | COEF. DE CORRELA ÇÃO r | PRECISÃO DA CORRE LAÇÃO (%) | COEF. DE CORRELA ÇÃO r | PRECISÃO DA CORRE LAÇÃO (%) |
| I Bruto/fusão | 0,997 | 97,5 | 0,9998 | 99,5 | 0,9990 | 98 |
| I Recozido | 0,997 | 97,5 | 0,964 | 93 | 0,980 | 95 |
| I Normalizado | 0,990 | 97 | 0,9990 | 98 | 0,980 | 95 |
| II Bruto/fusão | 1,00 | 100 | 0,999997 | 99,95 | 0,999997 | 99,95 |
| III Recozido | Const. | - | Const. | - | Const. | - |
| III Normalizado | 0,990 | 97 | 0,990 | 97 | 1,00 | 100 |
| GERAL | 0,997 | 97,5 | 0,997 | 97,5 | 0,991 | 97 |

Tabela 22 - Correlações entre os índices de usinabilidade calculados em função da temperatura de usinagem em várias velocidades de corte.

Em função da observação da tabela 22 pode-se dizer que as correlações entre os índices de usinabilidade são muito boas e que os índices de usinabilidade calculados através da temperatura de usinagem são independentes da velocidade de corte utilizada em pelo menos 97,5% dos casos. Além disto, a dispersão máxima e mé-

dia observadas nas medições da temperatura de usinagem foram respectivamente: 3,2 e 1,73%.

Para fins de comparação da usinabilidade dos diversos ferros fundidos nodulares ensaiados adotou-se o índice de usinabilidade calculado para a velocidade de corte 28,3 m/min.

5.3.2.1. Correlação da usinabilidade com o teor de cobre

A figura 75 mostra as correlações entre os índices de usinabilidade e o teor de cobre dos ferros fundidos ensaiados. Ob

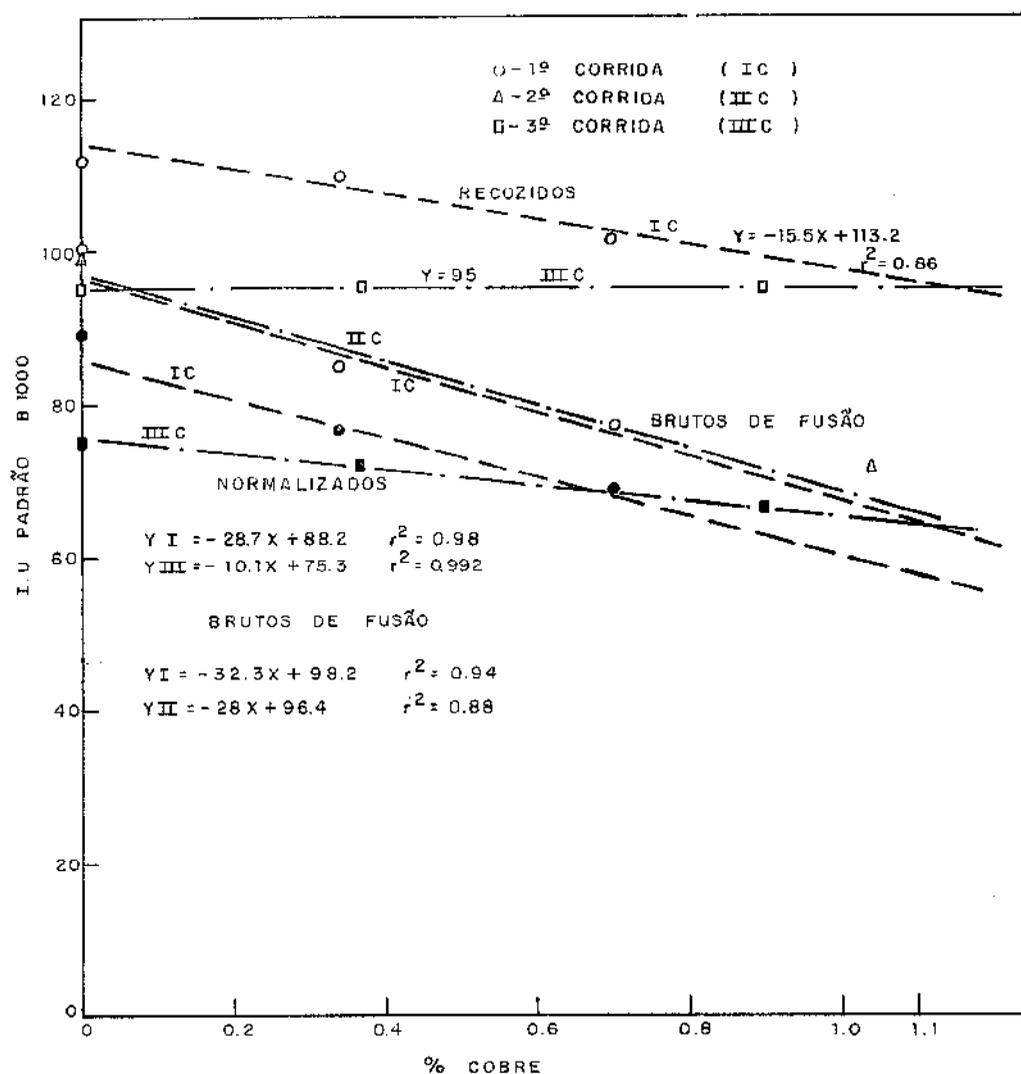


Figura 75 - Correlações dos índices de usinabilidade "0_v" com o teor de cobre para os diversos ferros fundidos, estado de tratamento térmico e corridas com referência ao Padrão "B1000".

servam-se reduções no índice de usinabilidade com o aumento do teor de cobre, exceção feita aos materiais recozidos da 3.^a corrida.

Nos materiais brutos de fusão ocorreram variações mais significativas que nos tratados termicamente. Na figura 76 observa-se uma verificação da tendência com a combinação das diversas corridas com materiais de mesmo estado de tratamento térmico.

Observa-se que a tendência existe e é maior no estado bruto de fusão.

Através dos coeficientes de correlação mostrados nas figuras 75 e 76 pode-se dizer que há uma boa correlação entre os parâmetros citados.

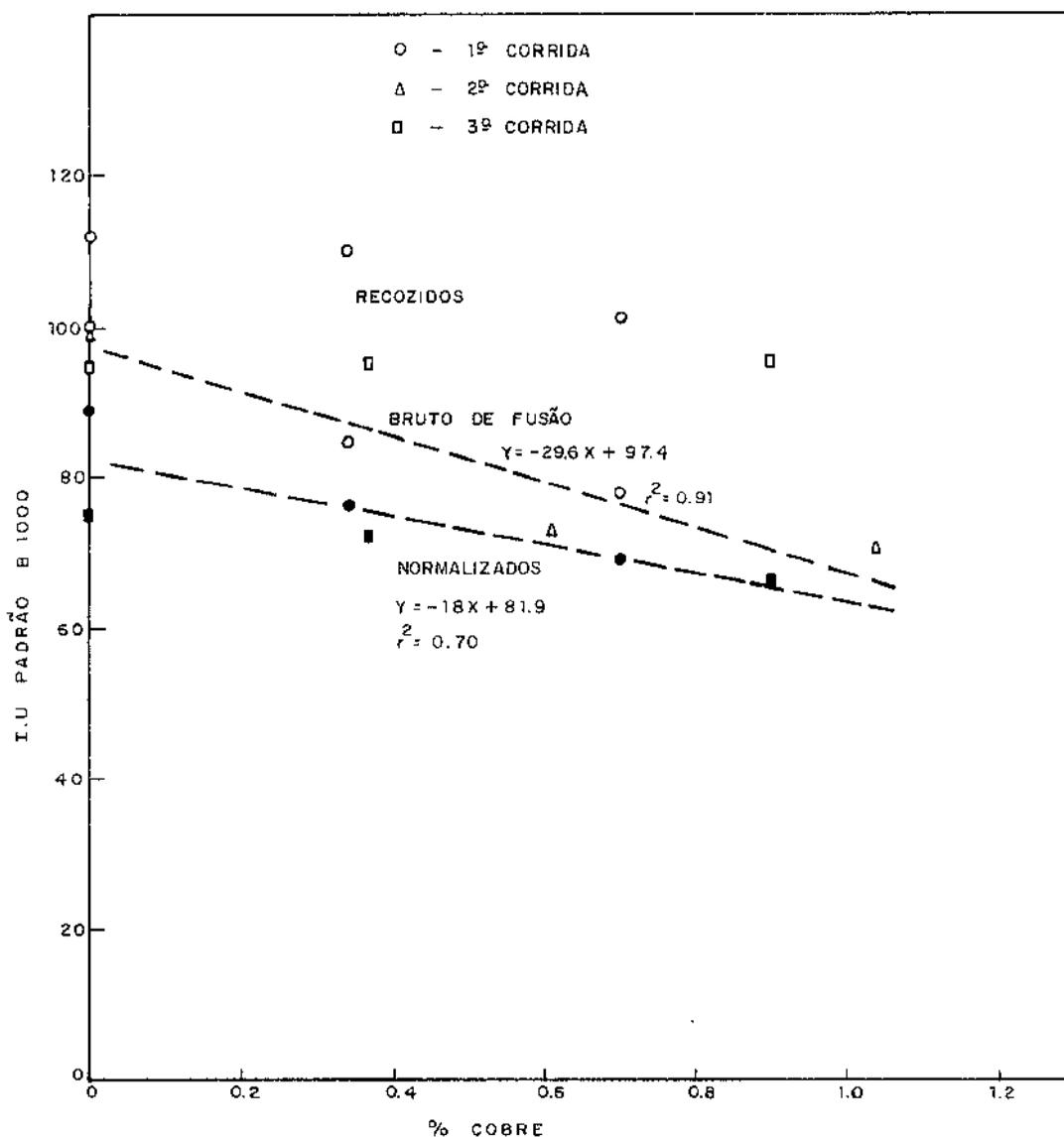


Figura 76 - Verificação da tendência das correlações entre os índices de usinabilidade e o teor de cobre nos vários estados de tratamento térmico.

5.3.2.2. Correlação da usinabilidade com a dureza Brinell

A figura 77 mostra as correlações entre os índices de usinabilidade e a dureza Brinell dos ferros fundidos ensaiados. Semelhante ao teor de cobre, ocorrem reduções no índice de usinabilidade com o aumento da dureza com exceção do material recozido da 3ª corrida.

As variações mais significativas nos índices de usinabilidade ocorrem para os materiais tratados termicamente. Em função dos coeficientes de correlação pode-se dizer que há uma boa correlação entre os parâmetros citados.

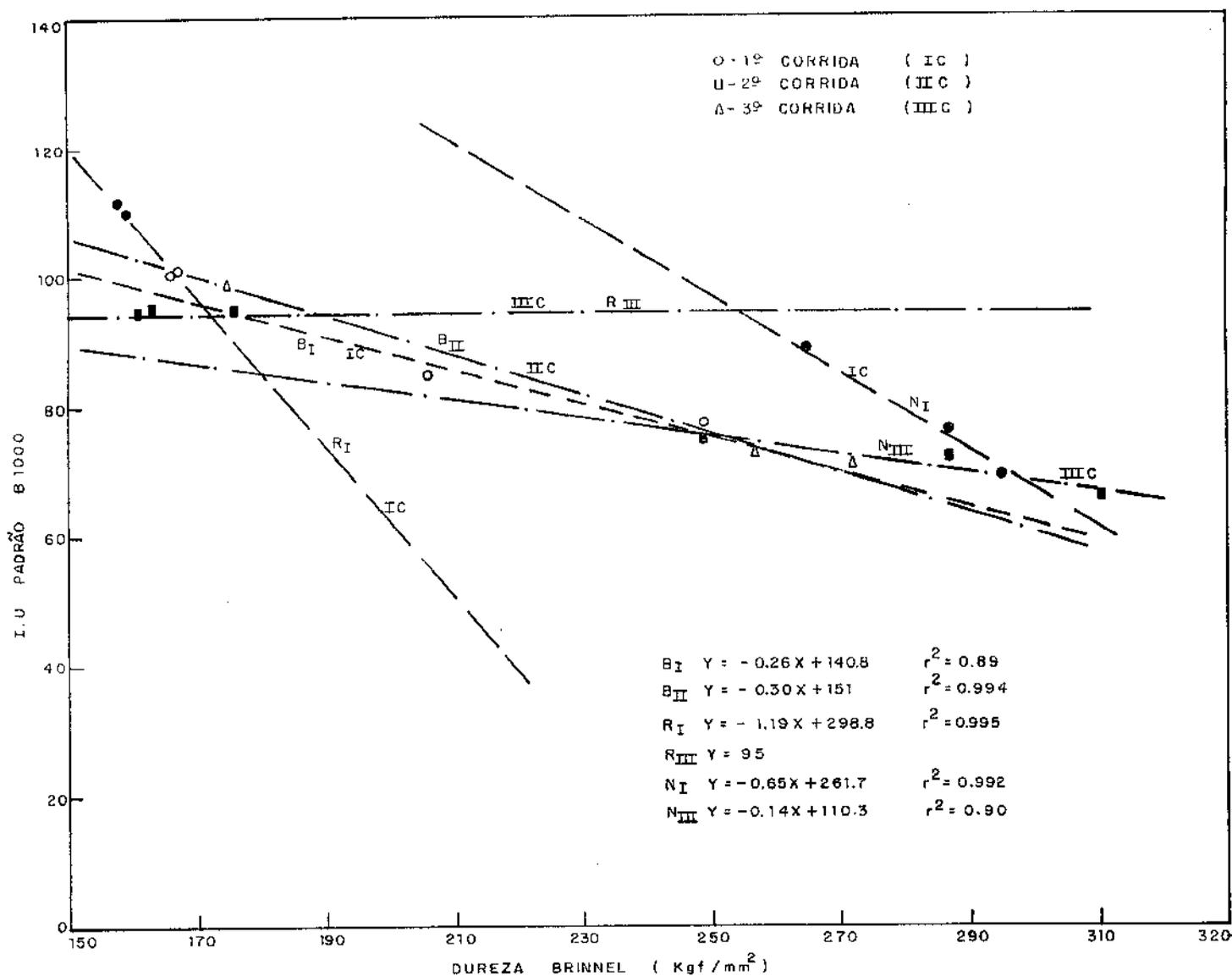


Figura 77 - Correlações entre os índices de usinabilidade e dureza Brinell para os vários estados de tratamento térmico para os ferros fundidos das diversas corridas.

A figura 78 mostra uma verificação da tendência das correlações, combinando-se as corridas e variando o tratamento térmico.

Existe uma tendência para os materiais brutos de fusão pois, nos demais estados de tratamento térmico a correlação é muito fraca ou não existe.

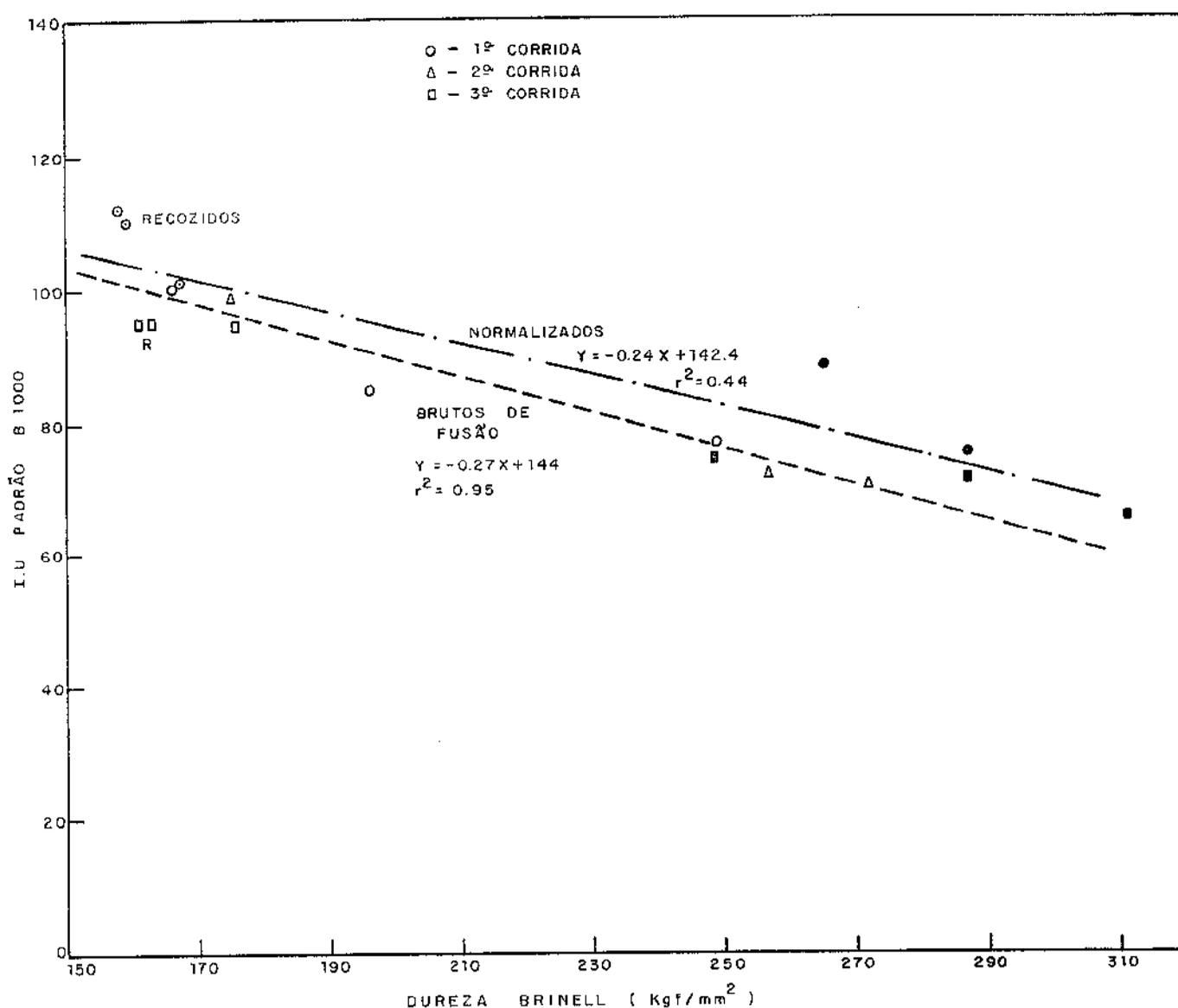


Figura 78 - Verificação da tendência das correlações entre os índices de usinabilidade e a dureza Brinell nos vários estados de tratamento térmico.

5.3.2.3. Correlação da usinabilidade com o limite de resistência à tração

A figura 79 apresenta as correlações entre os índices de usinabilidade e o limite de resistência à tração para os vários ferros fundidos ensaiados. As variações observadas são análogas as ocorridas com a dureza Brinell e comentada no item anterior.

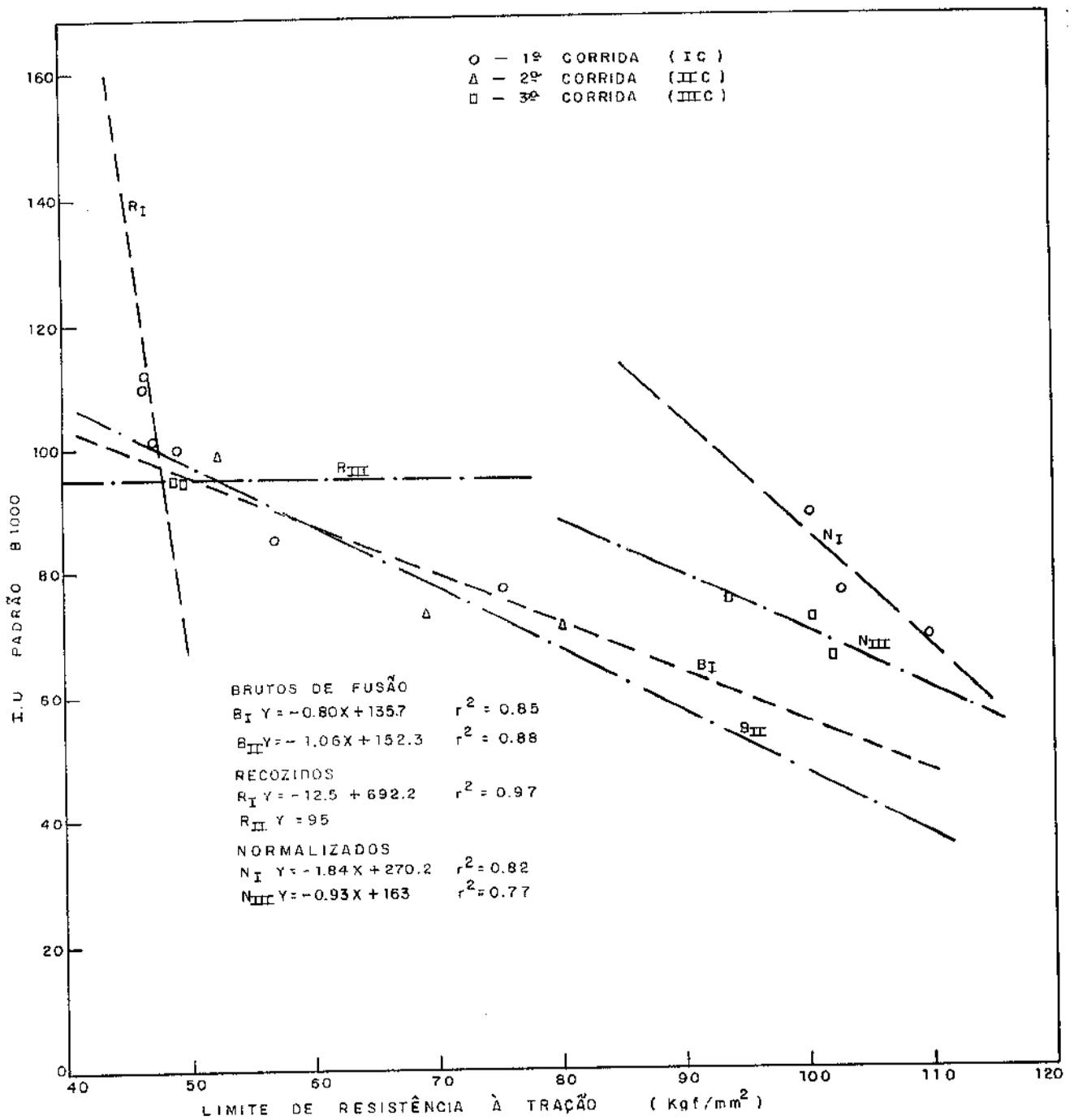


Figura 79 - Correlações entre os índices de usinabilidade e o limite de resistência à tração para as diversas condições de tratamento térmico nas várias corridas.

A figura 80 mostra a verificação da tendência das correlações variando-se as condições de tratamento térmico e combinando-se as corridas observa-se que só existe uma tendência definida por correlação para os resultados brutos de fusão.

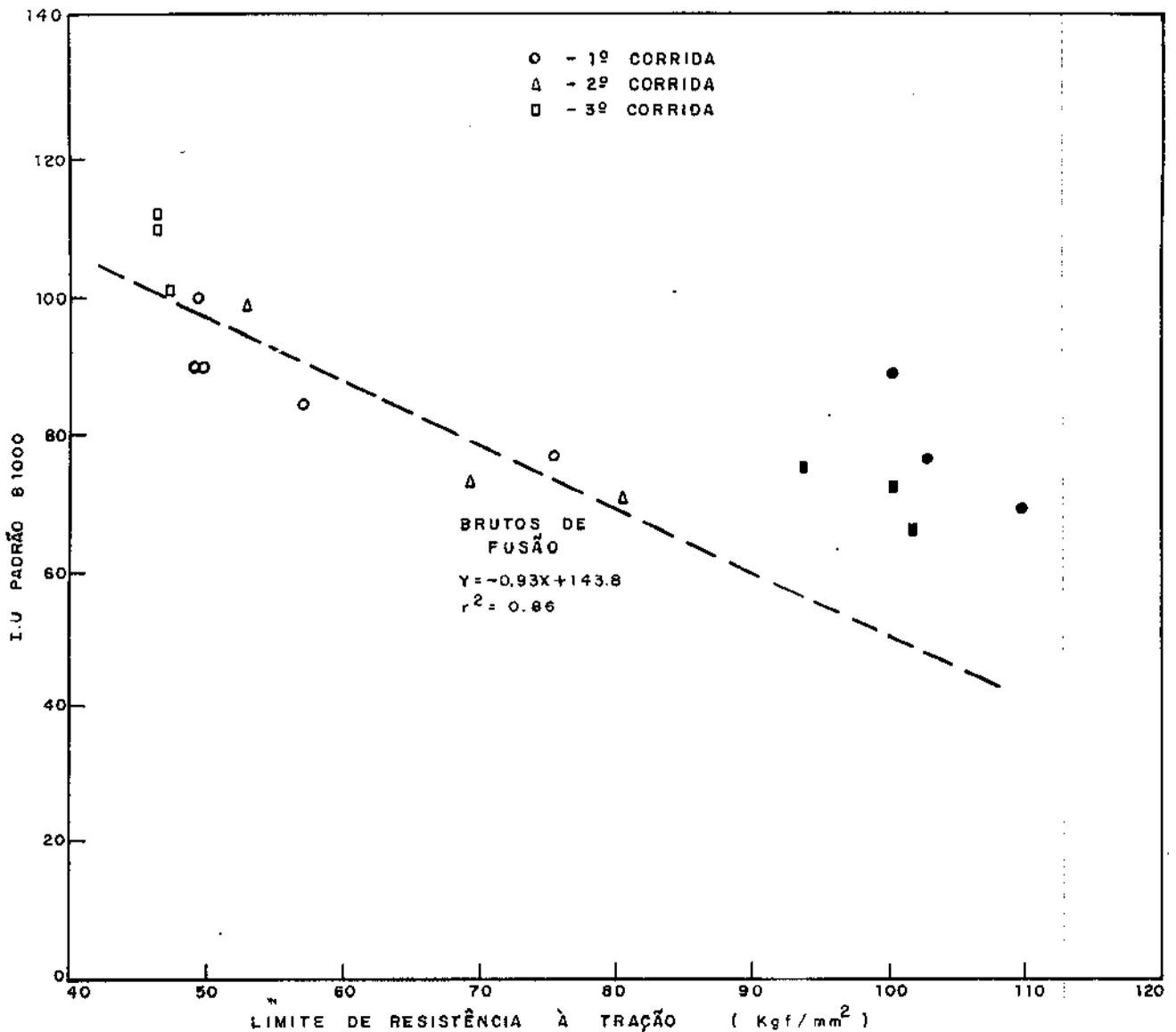


Figura 80 - Verificação da tendência das correlações entre os índices de usabilidade e o limite de resistência à tração nos vários estados de tratamento térmico.

5.4. ENSAIO Θ_m - CÁLCULO DA TEMPERATURA DE USINAGEM MÉDIA

5.4.1. Resultados

A tabela IV.3 do apêndice IV apresenta os valores calculados para a temperatura média segundo a expressão (16) do item 4.3.3.2.2 e os valores dos índices de usinabilidade calculados com base nesta temperatura constam da tabela 23.

| MATERIAIS CÓDIGOS | VALORES MÉDIOS DE Θ_m (mV) | I.U [%] (PADRÃO B1000) |
|----------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| B1000 | 3,30 | 100 |
| B1034 | 3,80 | 87 |
| B1070 | 3,90 | 83 |
| R1000 | 3,10 | 106 |
| R1034 | 3,20 | 103 |
| R1070 | 3,50 | 94 |
| N1000 | 3,40 | 97 |
| N1034 | 3,95 | 83 |
| N1070 | 4,31 | 76 |
| B2000 | 3,30 | 100 |
| B2061 | 4,29 | 77 |
| B2104 | 4,35 | 76 |
| R3000 | 3,41 | 97 |
| R3037 | 3,41 | 97 |
| R3090 | 3,41 | 97 |
| N3000 | 4,05 | 81 |
| N3037 | 4,23 | 78 |
| N3090 | 4,50 | 73 |

Tabela 23 - Valores médios de Θ_m e I.U.s. com referência ao padrão B1000.

5.4.2. Discussão

5.4.2.1. Correlação da usinabilidade com o teor de cobre

A figura 81 apresenta as correlações entre os índices de usinabilidade e o teor de cobre dos materiais ensaiados. Com exceção dos ferros fundidos recozidos da 3.^a corrida, os demais tiveram sua usinabilidade reduzida com o aumento do teor do cobre.

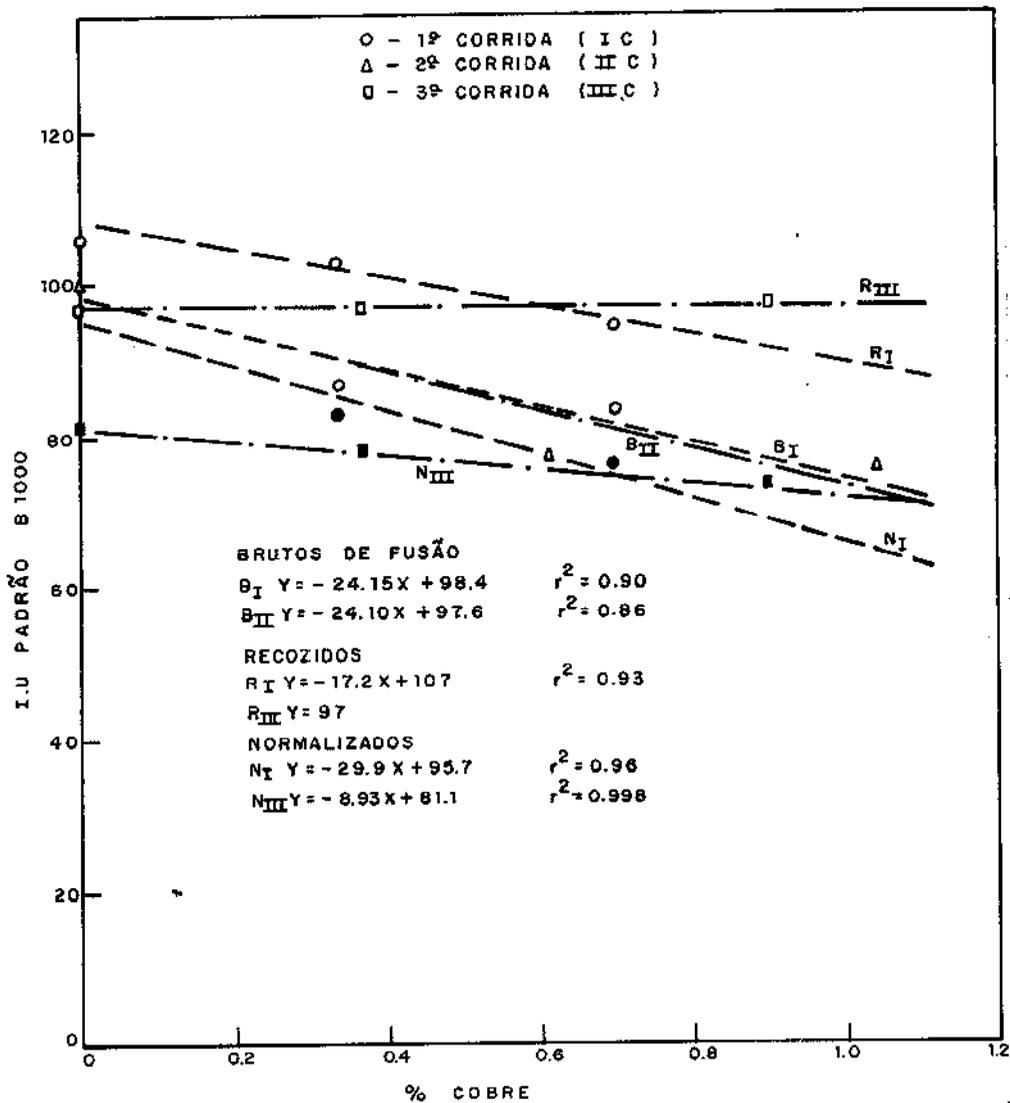


Figura 81 - Correlações entre os índices de usinabilidade " θ_m " e o teor de cobre para os vários materiais ensaiados.

As variações são mais significativas nos materiais brutos de fusão. A figura 82 mostra a verificação da tendência com a combinação das várias corridas.

Observa-se que só há uma tendência bem definida para os materiais brutos de fusão. Nos outros estados de tratamento térmico a tendência é muito pequena, sem uma correlação definida.

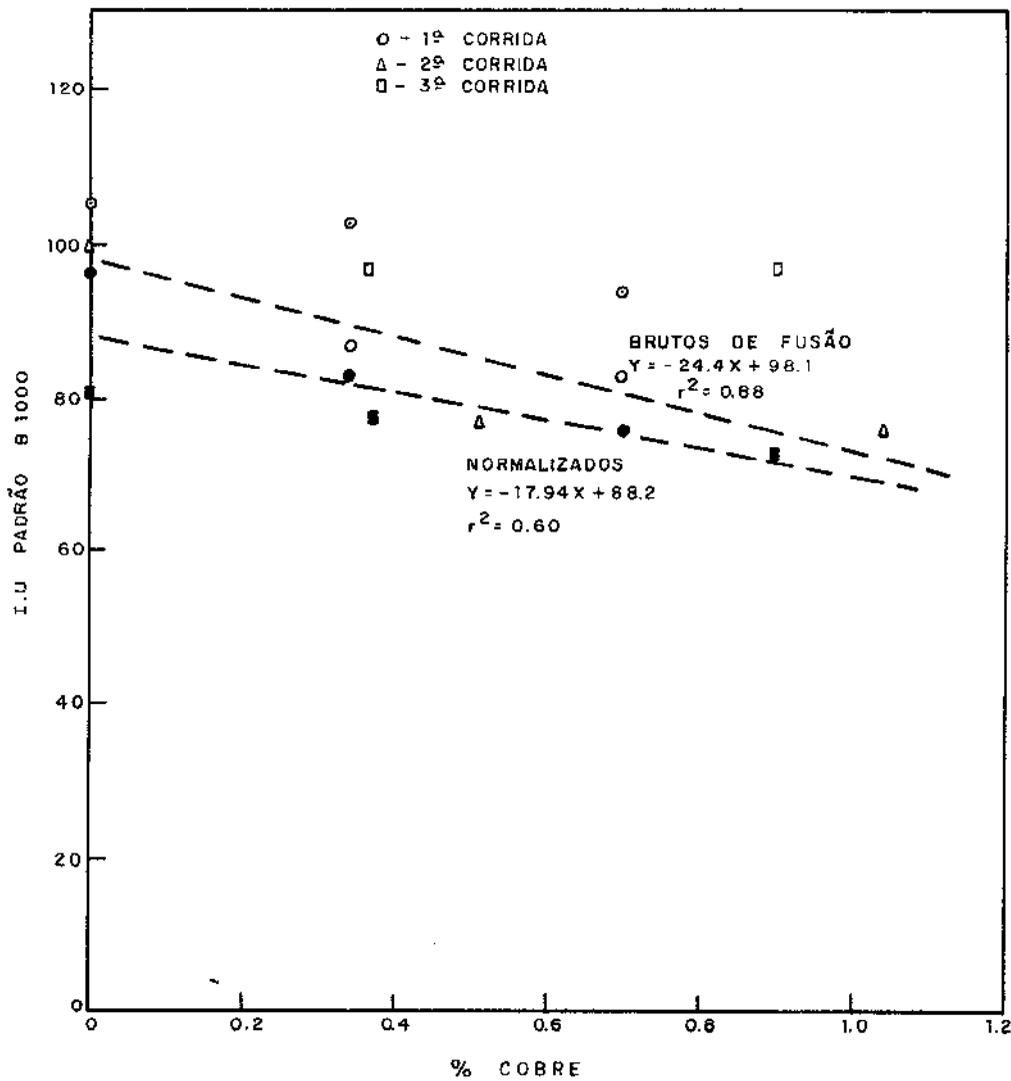


Figura 82 - Verificação da tendência da variação da usinabilidade " θ_m " com o teor de cobre nos vários estados de tratamento térmico.

5.4.2.2. Correlação da usinabilidade com a dureza Brinell

A figura 83 apresenta as correlações entre os índices de usinabilidade e a dureza Brinell. As variações observadas nos índices de usinabilidade mostram que a usinabilidade reduz-se mais com o aumento da dureza nos materiais tratados termicamente, exceção feita ao material recozido da 3ª corrida que tem usinabilidade constante.

Em função dos coeficientes de correlação, pode-se dizer que há uma boa correlação entre os parâmetros citados.

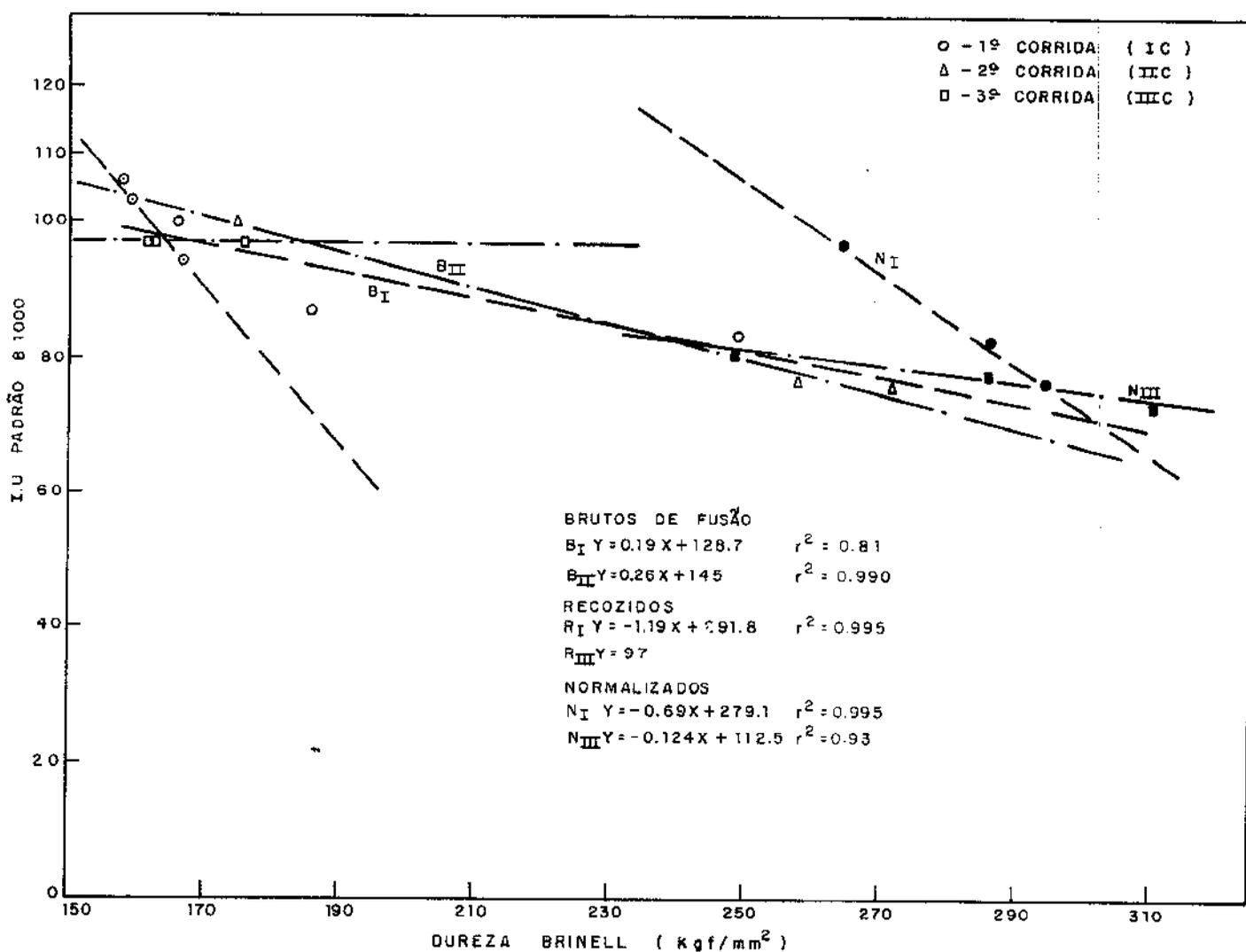


Figura 83 - Correlação entre os índices de usinabilidade " θ_m " e a dureza Brinell dos materiais ensaiados.

A figura 84 mostra a verificação da tendência nos vários estados de tratamento térmico. Observa-se que há uma tendência de redução da usinabilidade com o aumento da dureza, mas, só existe uma correlação definida para os materiais no estado bruto de fusão.

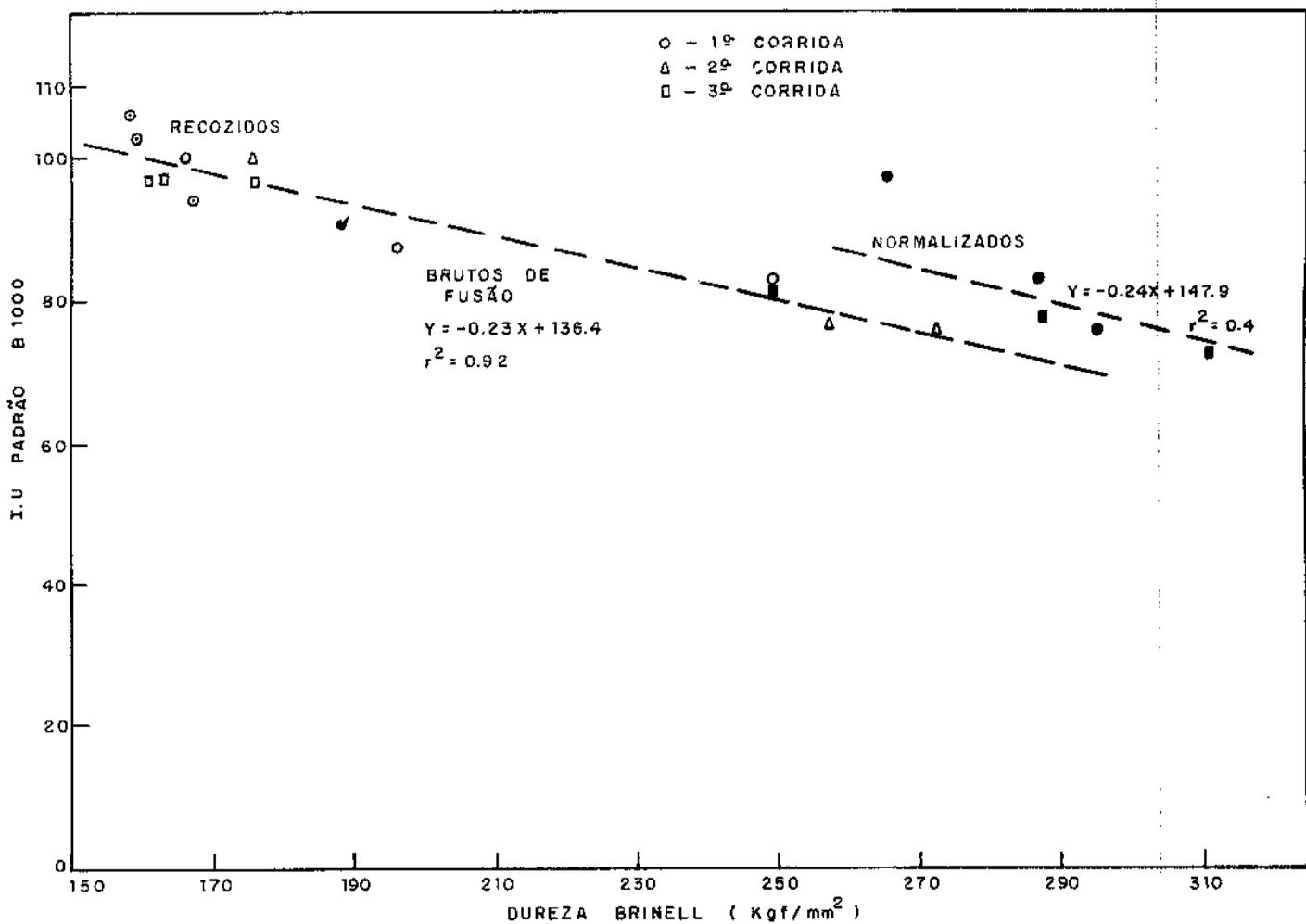


Figura 84 - Verificação das tendências das correlações entre os diversos índices de usinabilidade "I_m" e a dureza nos vários estados de tratamento térmico.

5.4.2.3. Correlação da usinabilidade com o limite de resistência à tração

A figura 85 mostra as correlações da usinabilidade com o limite de resistência à tração dos vários ferros fundidos ensaiados. Observa-se que a usinabilidade é reduzida com o aumento do limite de resistência com exceção do ferro fundido recozido da 3ª corrida.

Os coeficientes de correlação encontrados mostram que a correlação entre esses dois parâmetros é regular.

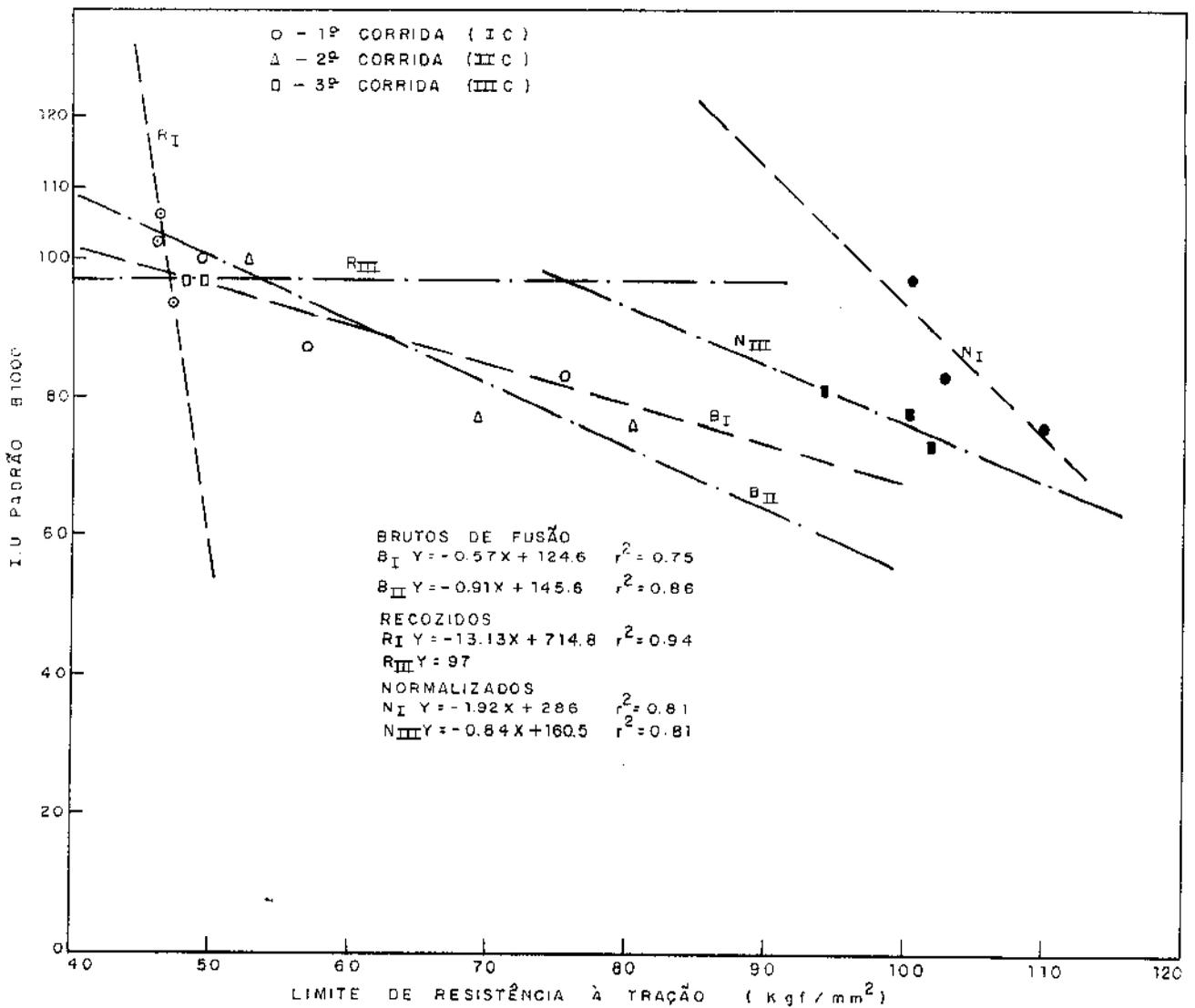


Figura 85 - Correlação entre os índices de usinabilidade "Θ_m" e o limite de resistência à tração dos diversos materiais ensaiados.

A figura 86 apresenta a verificação da tendência das correlações nos vários estados de tratamento térmico combinando-se as diversas corridas. Da figura observa-se que só existe uma tendência bem definida no estado bruto de fusão.

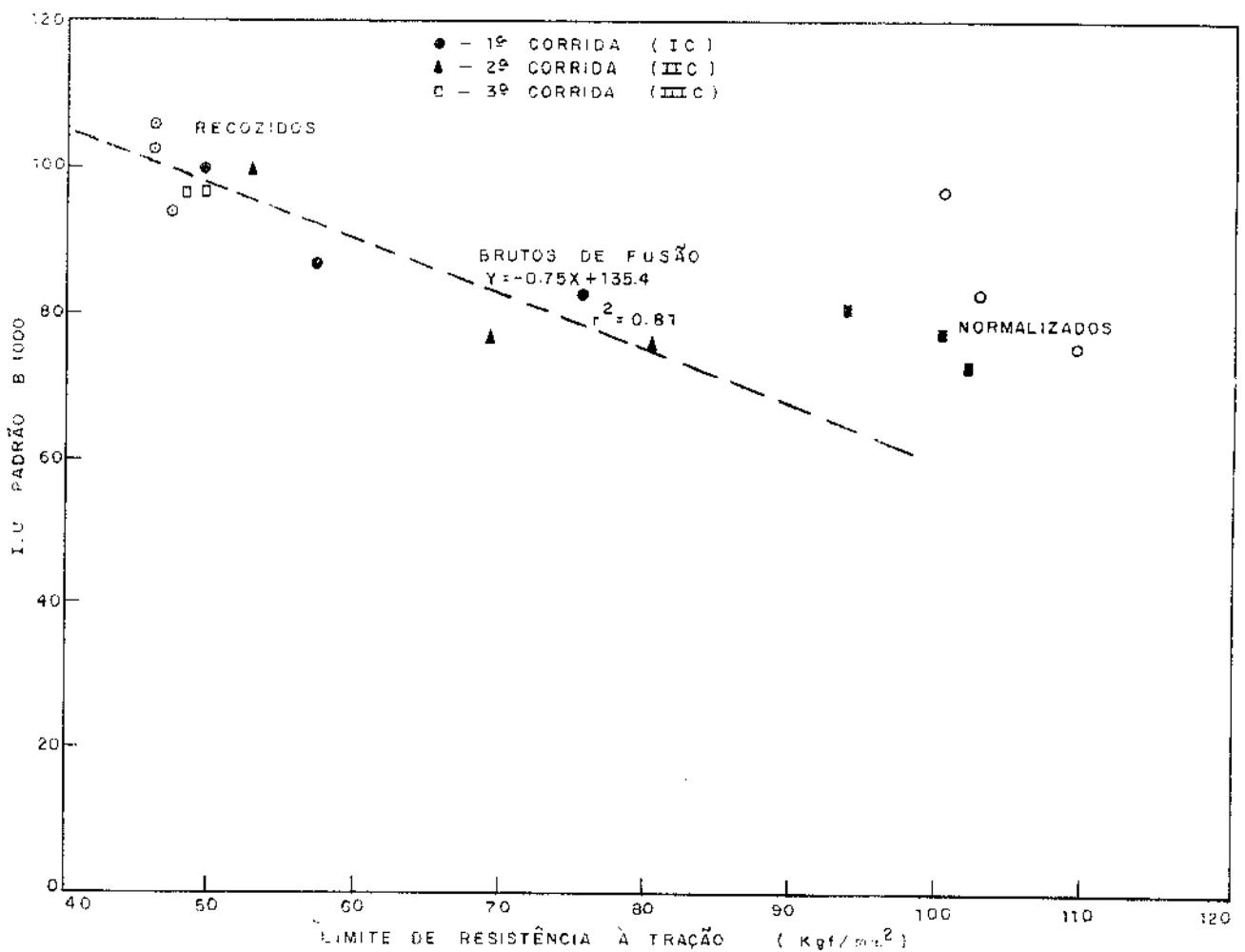


Figura 86 - Verificação das tendências entre os diversos índices de usinabilidade "I_{II}" e o limite de resistência à tração nos vários estados de tratamento térmico.

5.4.2.4. Precisão do Ensaio " θ_m "

Os valores encontrados para a dispersão máxima e média 7,0 e 2,1 respectivamente, mostram que este ensaio apresenta uma boa precisão com baixos valores de dispersão.

5.5. COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES DE USINABILIDADE DOS ENSAIOS θ_v E θ_m

A tabela 24 apresenta os índices de usinabilidade obtidos nos ensaios " θ_v " e " θ_m ".

| MATERIAIS CÓDIGOS | I.U. θ_v | I.U. θ_m | CORRELAÇÃO COEF. r | PRECISÃO DE CORREL. % |
|----------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------------------------|
| B1000 | 100 | 100 | 0,992 | 97,0 |
| B1034 | 85 | 87 | | |
| B1070 | 77 | 83 | | |
| R1000 | 112 | 106 | 0,997 | 97,5 |
| R1034 | 110 | 103 | | |
| R1070 | 101 | 94 | | |
| N1000 | 89 | 97 | 0,9998 | 99,5 |
| N1034 | 76 | 83 | | |
| N1070 | 69 | 76 | | |
| B2000 | 99 | 100 | 0,9996 | 99,0 |
| B2061 | 73 | 77 | | |
| B2104 | 71 | 76 | | |
| R3000 | 95 | 97 | Constantes | - |
| R3037 | 95 | 97 | | |
| R3090 | 95 | 97 | | |
| N3000 | 75 | 81 | 0,990 | 96,0 |
| N3037 | 72 | 78 | | |
| N3090 | 66 | 73 | | |

Tabela 24 - Comparação dos índices de usinabilidade obtidos nos ensaios " θ_v " e " θ_m ".

Em função dos valores dos coeficientes de correlação encontrados, pode-se afirmar que os índices de usinabilidade obtidos apresentam uma excelente correlação.

Os valores em si são diferentes mas, não apresentam nenhuma discrepância.

O índice θ_m é resultado de uma média ponderada em função dos tempos de corte do ensaio, e sua forma de cálculo é mais complexa que a de θ_v . Em razão da excelente correlação encontrada pode-se afirmar que o índice obtido no ensaio θ_v é suficiente para avaliar a usinabilidade em ensaios de torneamento cilíndrico.

5.6. ENSAIOS MATHON

5.6.1. Ensaio com ferramenta 1 (Aço rápido VK10N)

5.6.1.1. Resultados

Os ensaios com a ferramenta 1 foram realizados em diferentes faixas de rotações especificadas na tabela 25.

| Nº DE CORRIDA | ESTADO DE TRAT. TÉRMICO | ROTAÇÕES UTILIZADAS (RPM) | | |
|---------------|-------------------------|---------------------------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 1 | Bruto de fusão | 1000 | 1250 | 2000 |
| | Recozido | 1465 | 2000 | 2344 |
| | Normalizado | 630 | 800 | 1000 |
| 2 | Bruto de fusão | 1000 | 1250 | 2000 |
| 3 | Recozido | 1250 | 1465 | 2000 |
| | Normalizado | 630 | 800 | 1000 |

Tabela 25 - Rotações utilizadas nos Ensaio Mathon com ferramenta 1 em função do número da corrida e estado de tratamento térmico.

Os resultados dos diâmetros $D_{0,2}$ medidos nos vários ensaios para as rotações especificadas na tabela 25 estão no apêndice V, nas tabelas V.1 e V.2.

Para determinação do diâmetro $D_{0,2}$ para a rotação 350 rpm utilizou-se o procedimento descrito no capítulo 4 em função da expressão:

$$D_{0,2} \cdot N^m = C$$

Esta expressão logaritmada é uma equação de uma reta do tipo:

$$y = ax + b$$

$$\text{ou } \log D_{0,2} = - m \log N + \log C$$

Com os valores de $D_{0,2}$ das tabelas V.1 e V.2 e com o auxílio da regressão linear foram determinados os valores de $\log C$, m , $D_{0,2}$, o coeficiente da correlação (r) e a precisão da determinação da equação. Estes valores encontram-se na tabela V.3 do apêndice V.

Os gráficos correspondentes as determinações citadas encontram-se nas figuras 87 e 88 para os materiais da primeira corrida e segunda e terceira respectivamente.

Os valores do diâmetro $D_{0,2}$ para a rotação 350 rpm e os índices de usinabilidade calculados para os vários ferros fundidos ensaiados estão na tabela 26.

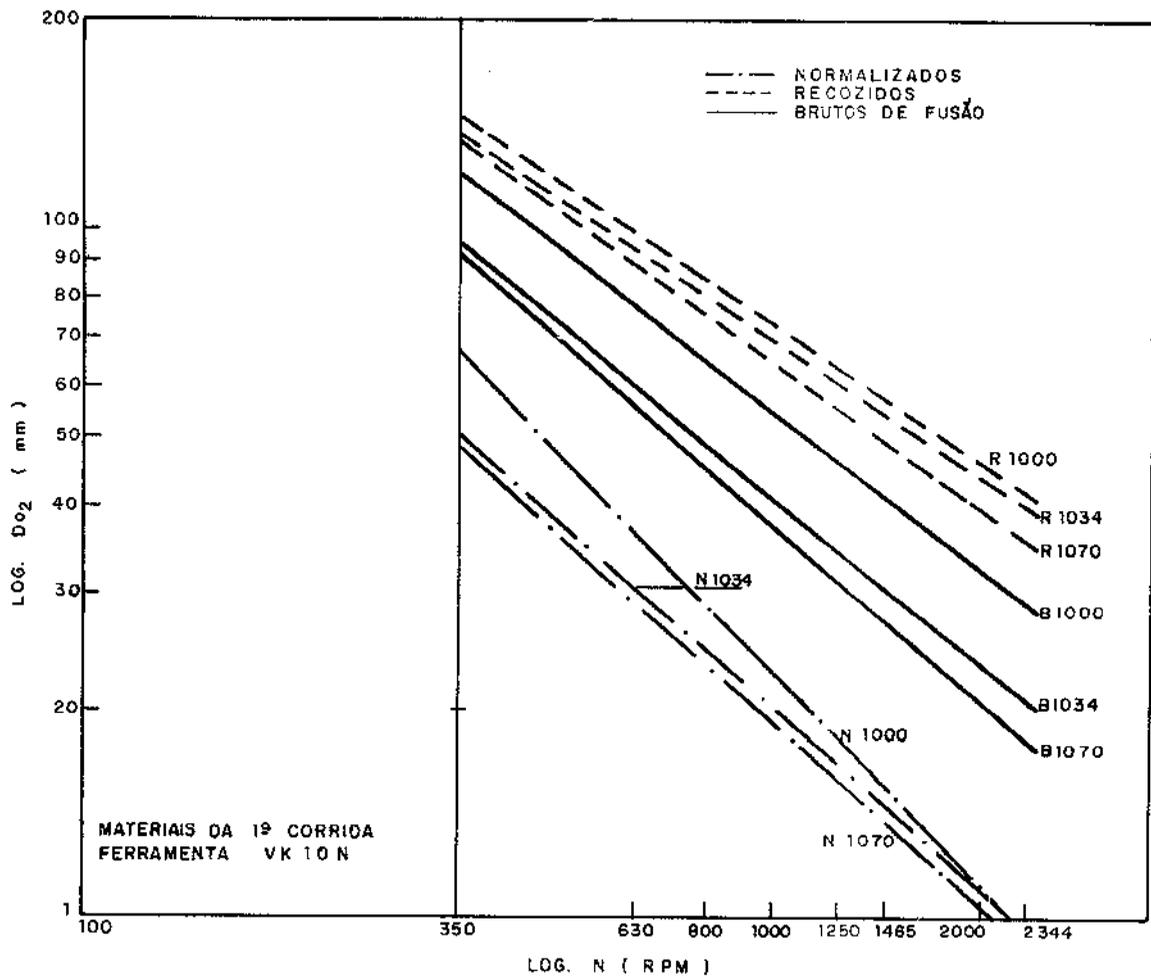


Figura 87 - Resultados dos ensaios Mathon ferramenta 1 para os materiais da primeira corrida.

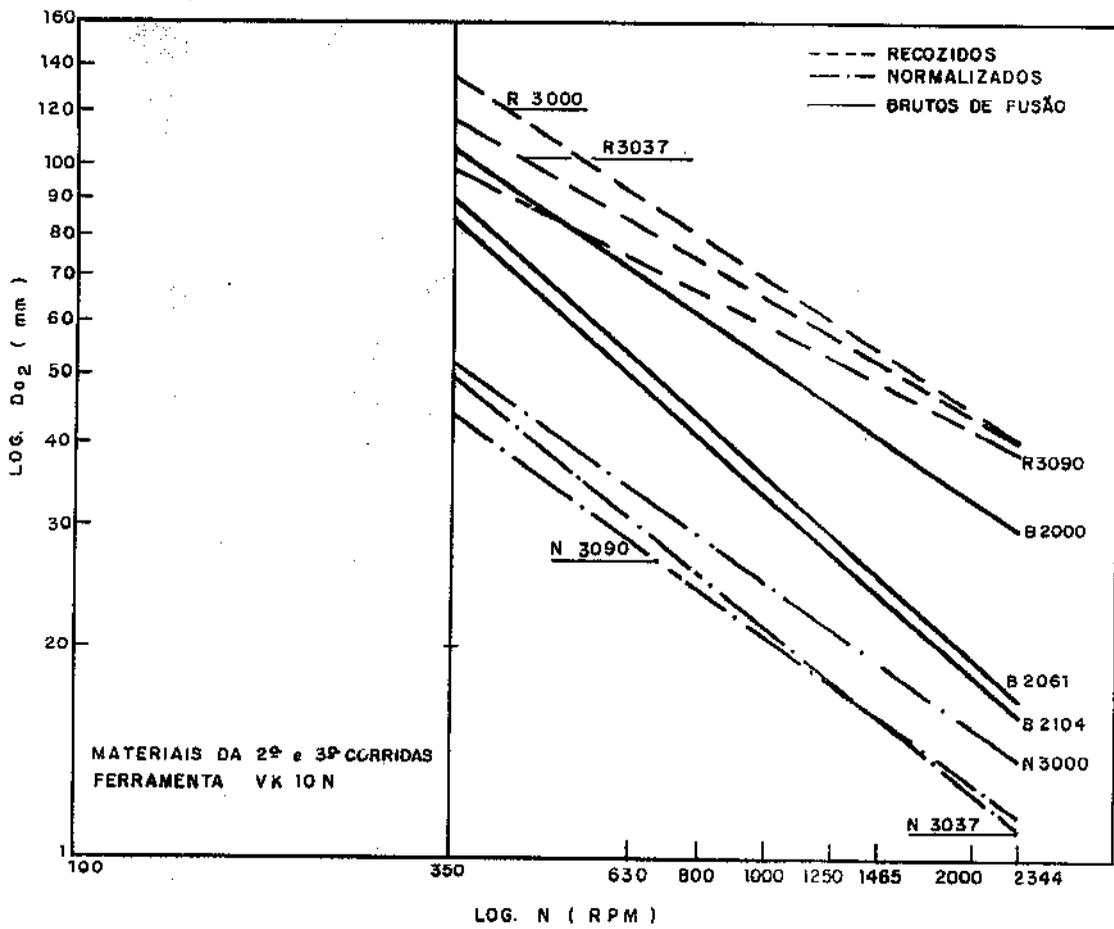


Figura 88 - Resultados dos ensaios Mathon ferramenta 1 para os materiais da segunda e terceira corridas.

| MATERIAIS CÓDIGOS | $D_{0,2}$ (mm) para N=350 rpm | PRECISÃO DA DETERMINAÇÃO % | L.U. (%) |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------|----------|
| B1000 | 119,9 | 100 | 100 |
| B1034 | 94,6 | 95 | 79 |
| B1070 | 91,3 | 99,9 | 76 |
| R1000 | 143 | 100 | 119 |
| R1034 | 135 | 100 | 112 |
| R1070 | 132 | 96 | 110 |
| N1000 | 66,2 | 97 | 55 |
| N1034 | 50,0 | 98 | 42 |
| N1070 | 48,7 | 97,5 | 40 |
| B2000 | 106,4 | 100 | 88 |
| B2061 | 90,0 | 97 | 75 |
| B2104 | 82,0 | 97 | 68 |
| R3000 | 133,0 | 95 | 111 |
| R3037 | 116,0 | 99,9 | 97 |
| R3090 | 103,0 | 93 | 86 |
| N3000 | 54,5 | 98,5 | 45 |
| N3037 | 50,4 | 93 | 42 |
| N3090 | 44,6 | 97,5 | 37 |
| Valor médio | | 97,5 | - |

Tabela 26 - Índice de usinabilidade $D_{0,2}$ (N=350 rpm) para os ensaios Mathon ferramenta 1, referente ao padrão B1000.

5.6.1.2. Discussão

5.6.1.2.1. Precisão dos resultados

A dispersão encontrada nos valores de $D_{0,2}$ durante os ensaios assumiu um valor máximo de 7,5% e um valor médio de 4,25%. Por outro lado, os valores determinados para o diâmetro $D_{0,2}$ para N=350 rpm estão sujeitos a um erro médio de 2,5%.

Estes valores são perfeitamente aceitáveis dentro de resultados experimentais deste tipo, onde normalmente se trabalha com uma margem de erro de até 5,0%.

5.6.1.2.2. Correlação da usinabilidade com o teor de cobre

A figura 89 apresenta as correlações da usinabilidade com o teor de cobre dos vários materiais ensaiados. Observa-se que em todos os casos ocorre uma redução da usinabilidade com o aumento do teor de cobre.

Em função dos coeficientes de correlação encontrados pode-se afirmar que a correlação existente é função da corrida. Os materiais da primeira corrida apresentam uma correlação regular

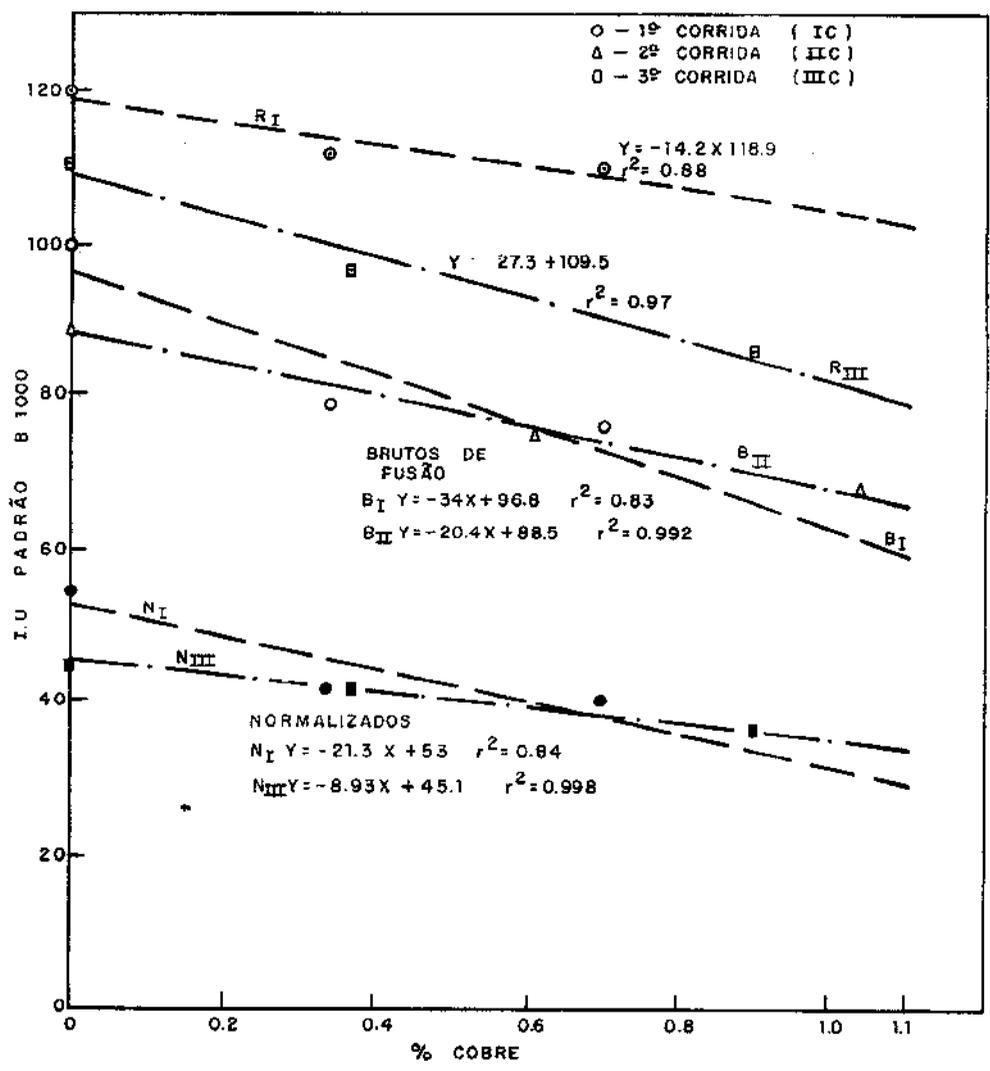


Figura 89 - Correlação dos índices de usinabilidade Mathon ferramenta I com o teor de cobre para os vários materiais ensaiados.

enquanto os demais, provenientes da segunda e terceira corrida, possuem uma boa correlação.

A usinabilidade diminui com o aumento do teor de cobre.

A figura 90 mostra uma verificação da tendência para os vários estados de tratamento térmico. Da figura observa-se que a tendência apresenta uma correlação regular no estado bruto de fusão enquanto que nos outros estados de tratamento térmico a correlação é muito fraca.

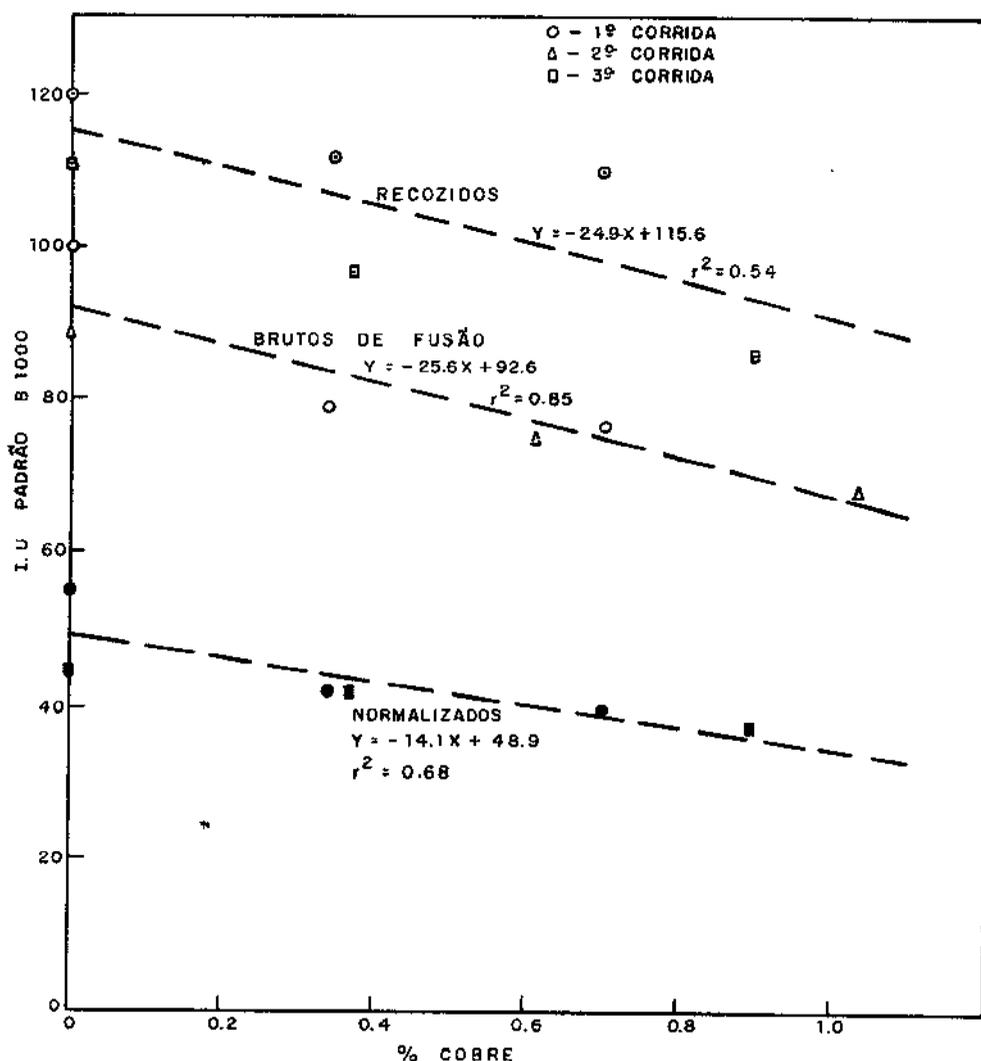


Figura 90 - Verificação das tendências das variações da usinabilidade com o teor de cobre nos diversos estados de tratamento térmico.

5.6.1.2.3. Correlações entre a usinabilidade e as propriedades de dureza e limite de resistência à tração

Nas figuras 91 e 92 verifica-se que a usinabilidade é reduzida com o aumento da dureza e o limite de resistência em todos os estados de tratamento térmico e corridas.

Do exame dos valores encontrados para os coeficientes de correlação pode-se dizer que a dureza apresenta uma melhor correlação com a usinabilidade. Especificando, a dureza apresenta uma correlação de regular para boa, enquanto o limite de resistência possui uma correlação que varia de regular para fraca.

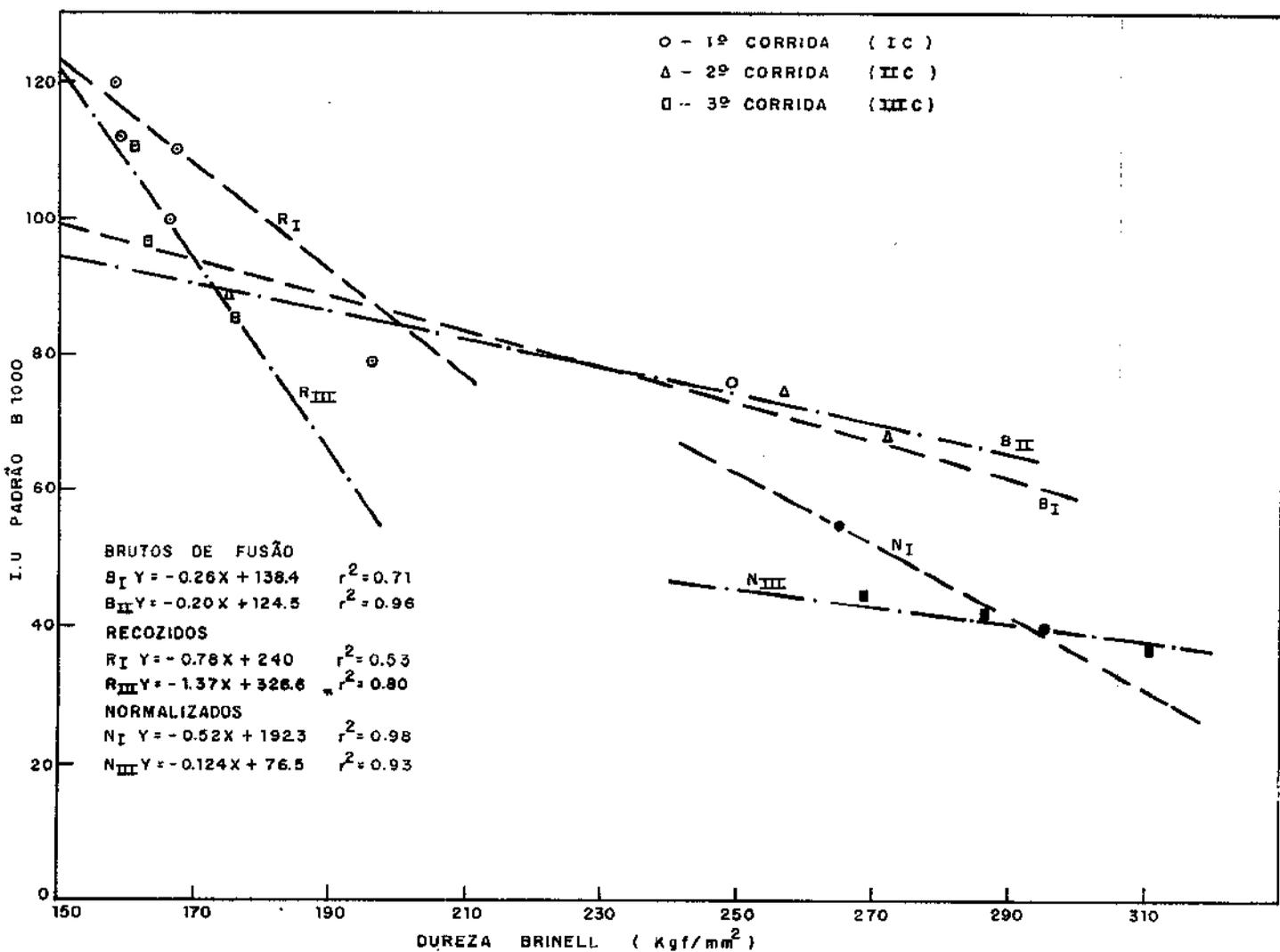


Figura 91 - Correlação entre os índices de usinabilidade e a dureza Brinell dos vários ferros fundidos ensaiados.

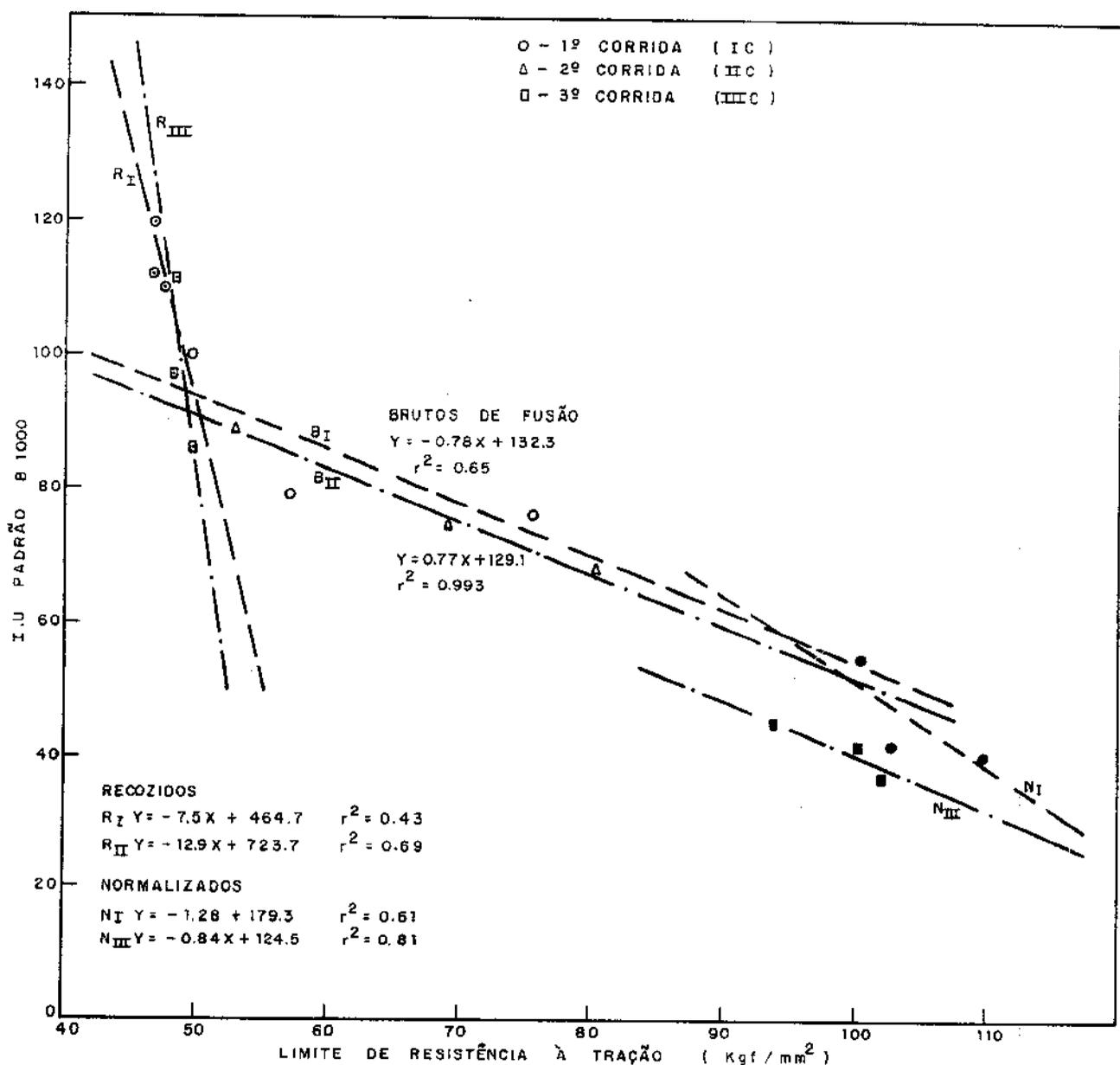


Figura 92 - Correlação entre os índices de usinabilidade e o limite de resistência à tração dos vários ferros fundidos ensaiados.

As figuras 93 e 94 mostram verificações das tendências das correlações da usinabilidade com os parâmetros citados. Através delas verifica-se que, para a dureza Brinell a tendência existe nos 3 estados de tratamento térmico e que é maior no estado bruto de fusão. Para o limite de resistência, a correlação só existe no estado bruto de fusão.

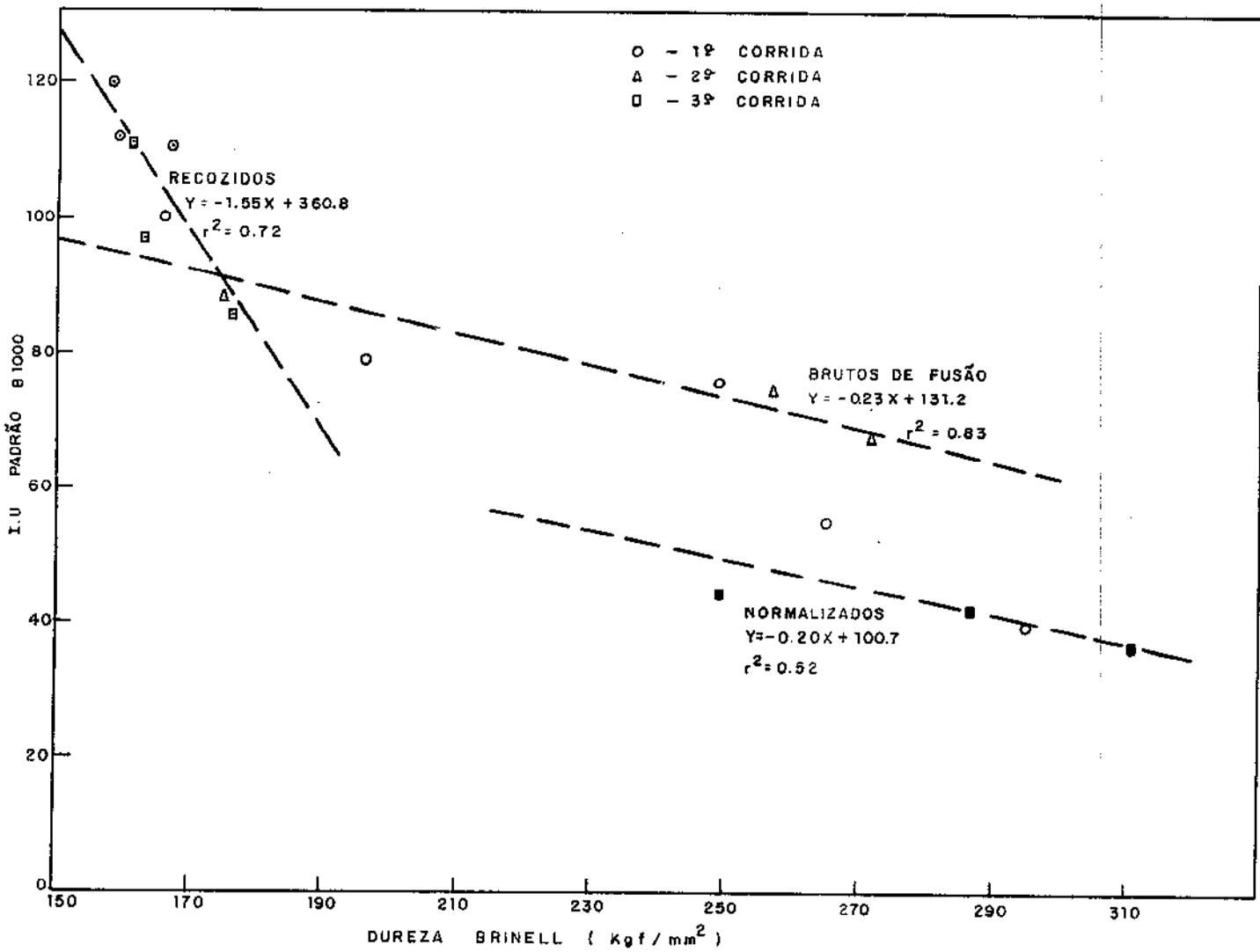


Figura 93 - Verificação das tendências das variações da usinabilidade com a dureza Brinell nos vários estados de tratamento térmico.

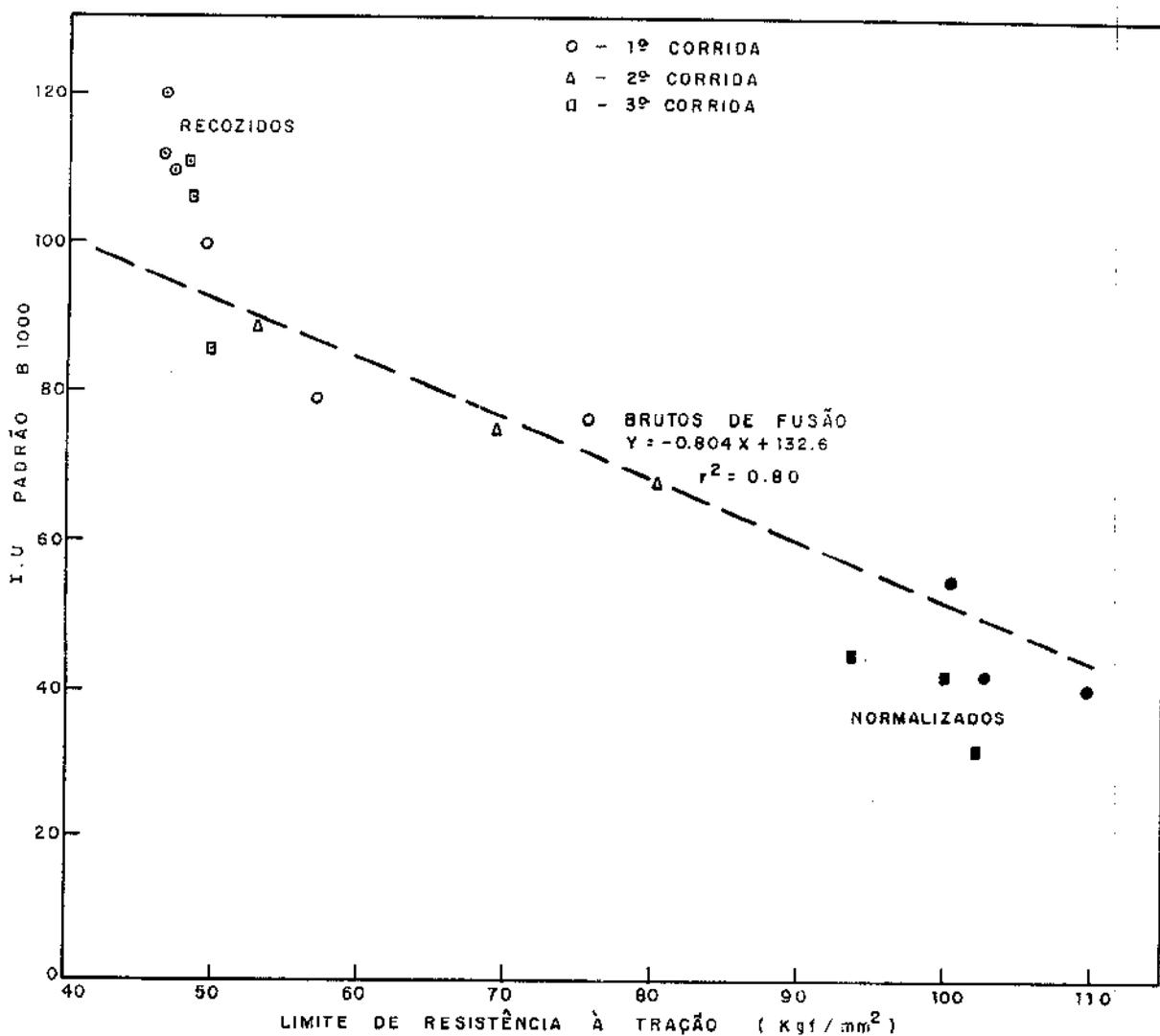


Figura 94 - Verificação das tendências das variações da usinabilidade com o limite de resistência à tração nos vários estados de tratamento térmico.

5.6.2. Ensaio com ferramenta 2 (Aço ferramenta 52100)

5.6.2.1. Resultados

Os ensaios com a ferramenta 2 foram realizados nas rotações 630, 800 e 1000 rpm, apenas para os ferros fundidos provenientes da primeira corrida.

Os resultados dos diâmetros $D_{0,2}$ medidos nos vários ensaios estão na tabela V.4 do apêndice V. Para esta ferramenta foi possível ensaiar também o aço SAE 1212.

Os diâmetros $D_{0,2}$ para $N=350$ rpm foram determinados de forma análoga aos da outra ferramenta e os resultados encontra-se na tabela V.5 do apêndice 5 e graficamente na figura 95.

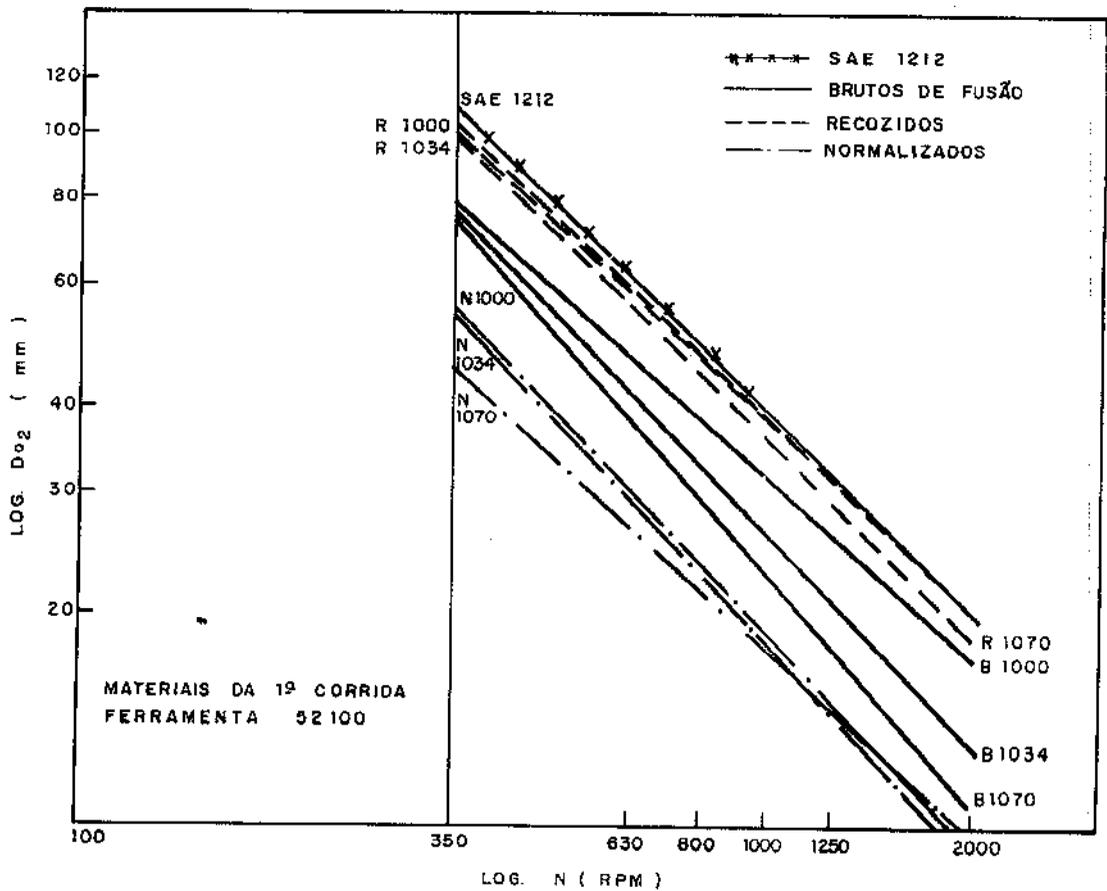


Figura 95 - Resultados dos ensaios Mathon com ferramenta 2 para os materiais da primeira corrida.

Os índices de usinabilidade calculados em função das determinações citadas encontram-se na tabela 27.

| MATERIAIS CÓDIGOS | $D_{0,2}$ (mm) PARA N=350 rpm | PRECISÃO DA DETERMINAÇÃO % | I.U. PADRÃO B1000 | I.U. PADRÃO SAE 1212 |
|----------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------|
| B1000 | 78 | 99,9 | 100 | 72 |
| B1034 | 76 | 95,0 | 97 | 70 |
| B1070 | 73 | 96,0 | 93 | 67 |
| R1000 | 102 | 97,5 | 130 | 94 |
| R1034 | 99 | 100 | 127 | 92 |
| R1070 | 98 | 100 | 126 | 91 |
| N1000 | 55 | 97 | 70 | 51 |
| N1034 | 54 | 97,5 | 69 | 50 |
| N1070 | 45 | 97,5 | 58 | 42 |
| SAE 1212 | 108 | 90,0 | - | 100 |
| Valor médio | | 97,0 | - | - |

Tabela 27 - Índice de usinabilidade $D_{0,2}$ (NE=350 rpm) para os ensaios Mathon ferramenta 2, referente ao padrão B1000 e SAE 1212.

5.6.2.2. Discussão

5.6.2.2.1. Precisão dos resultados

A dispersão calculada nas medições dos valores $D_{0,2}$ nos vários ensaios apresentou o valor máximo e médio de respectivamente 8,2 e 4,4% enquanto que os valores $D_{0,2}$ para N=350 rpm foram determinados com uma margem de erro de 3,0%.

Ambos os valores se enquadram dentro da faixa normal aceitável para ensaios experimentais que é de 5%.

5.6.2.2.2. Correlação da usinabilidade com o teor de cobre

A figura 96 mostra as correlações da usinabilidade com

teor de cobre dos vários ferros fundidos ensaiados provenientes da primeira corrida. Observa-se que a usinabilidade se reduz com o aumento do teor de cobre em todos os estados de tratamento térmico.

Em função dos coeficientes de correlação encontrados pode-se dizer que os materiais brutos de fusão apresentam uma boa correlação, enquanto que nos demais estados de tratamento térmico tem-se uma correlação regular.

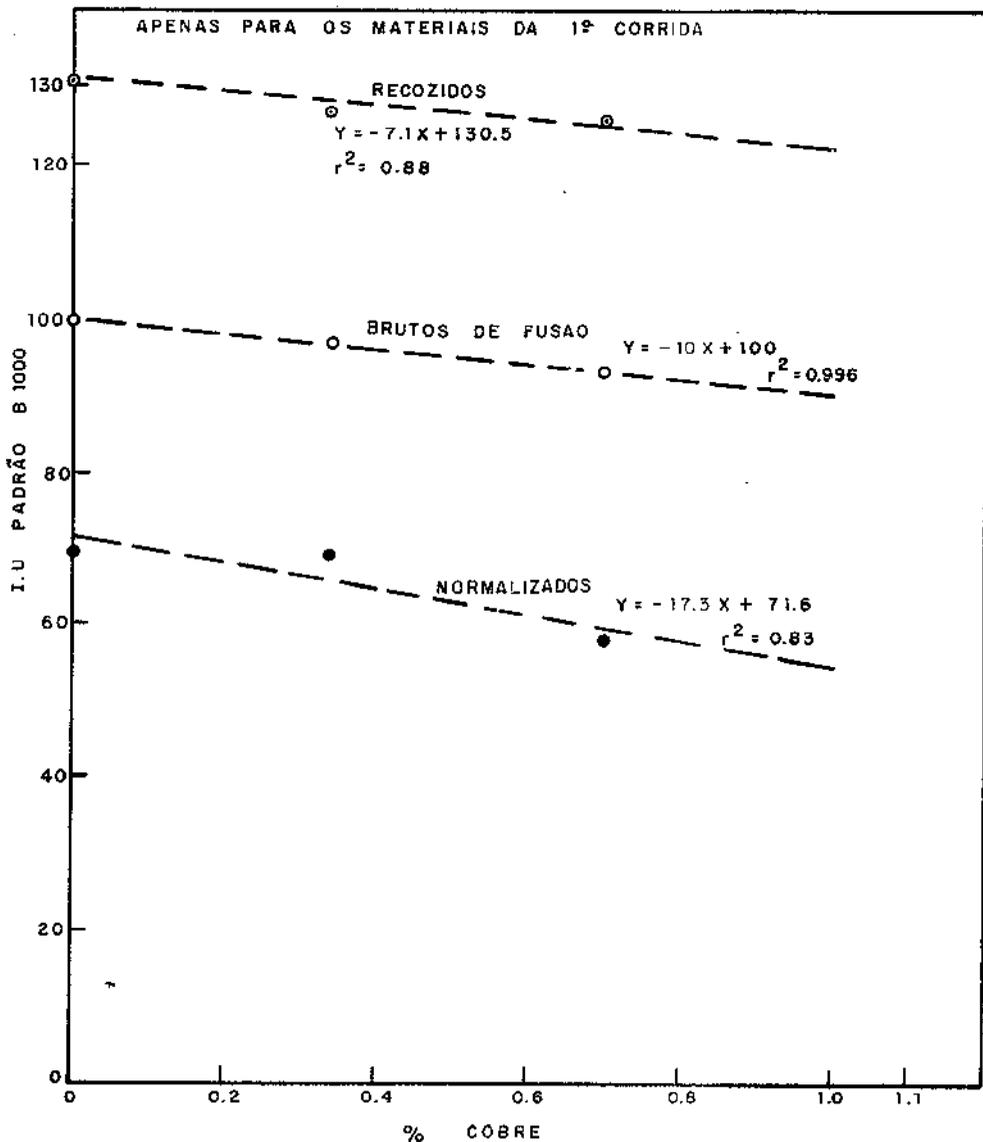


Figura 96 - Correlação dos índices de usinabilidade Mathon ferramenta 2 com o teor de cobre para os vários materiais ensaiados.

5.6.2.2.3. Correlações da usinabilidade com as propriedades dureza e limite de resistência à tração

As figuras 97 e 98 apresentam estas correlações. Observando-as, verifica-se que a usinabilidade se reduz com o aumento dessas propriedades.

Com relação a dureza (figura 97) os coeficientes de correlação calculados nos permitem dizer que só existe uma boa

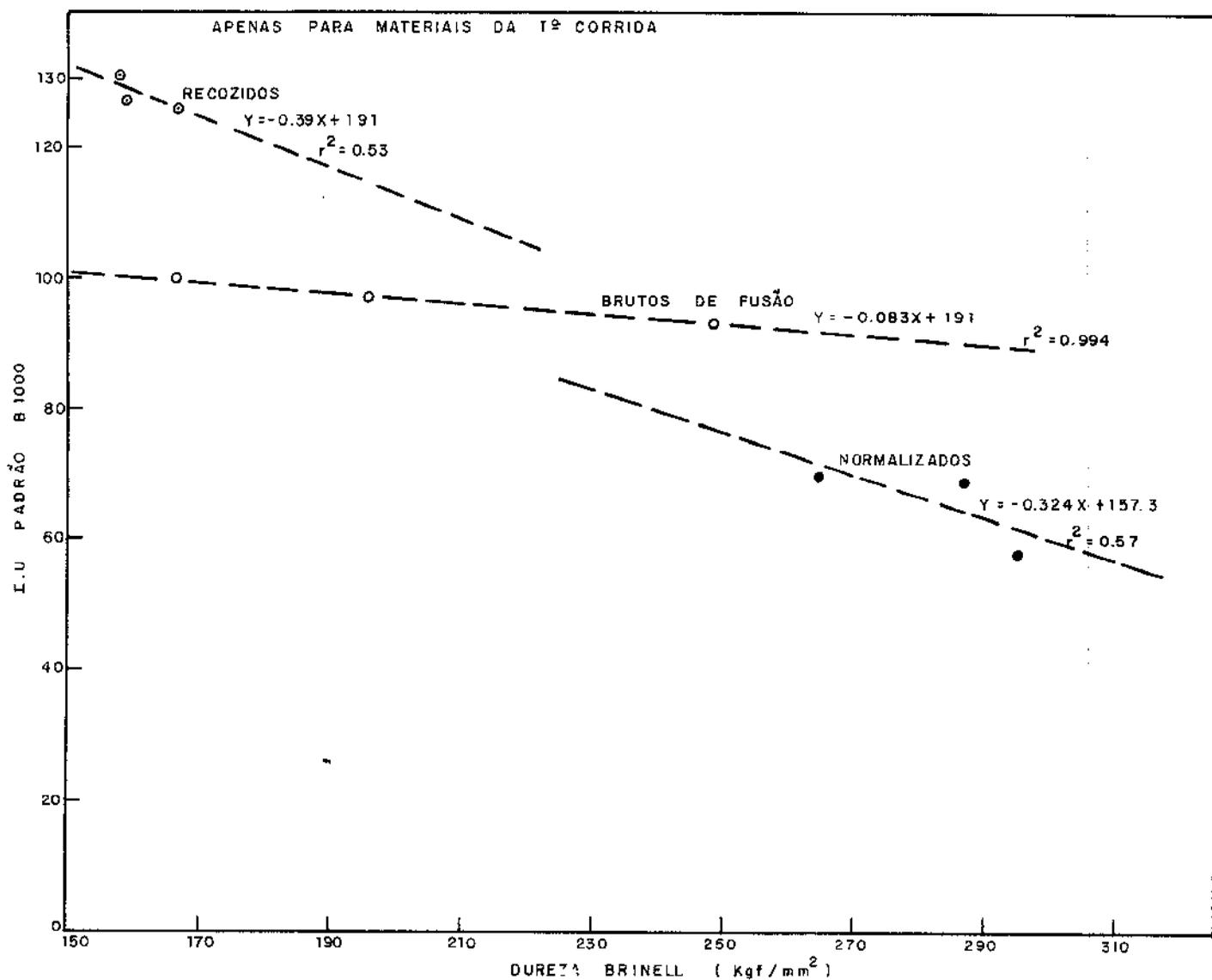


Figura 97 - Correlação entre os índices de usinabilidade Mathon ferramenta 2 e a dureza Brinell dos vários ferros fundidos ensaiados.

correlação para os materiais no estado bruto de fusão. Para os de mais estados de tratamento térmico a correlação é muito fraca.

O limite de resistência apresenta uma boa correlação nos estados bruto de fusão e normalizado e fraca para os materiais recozidos.

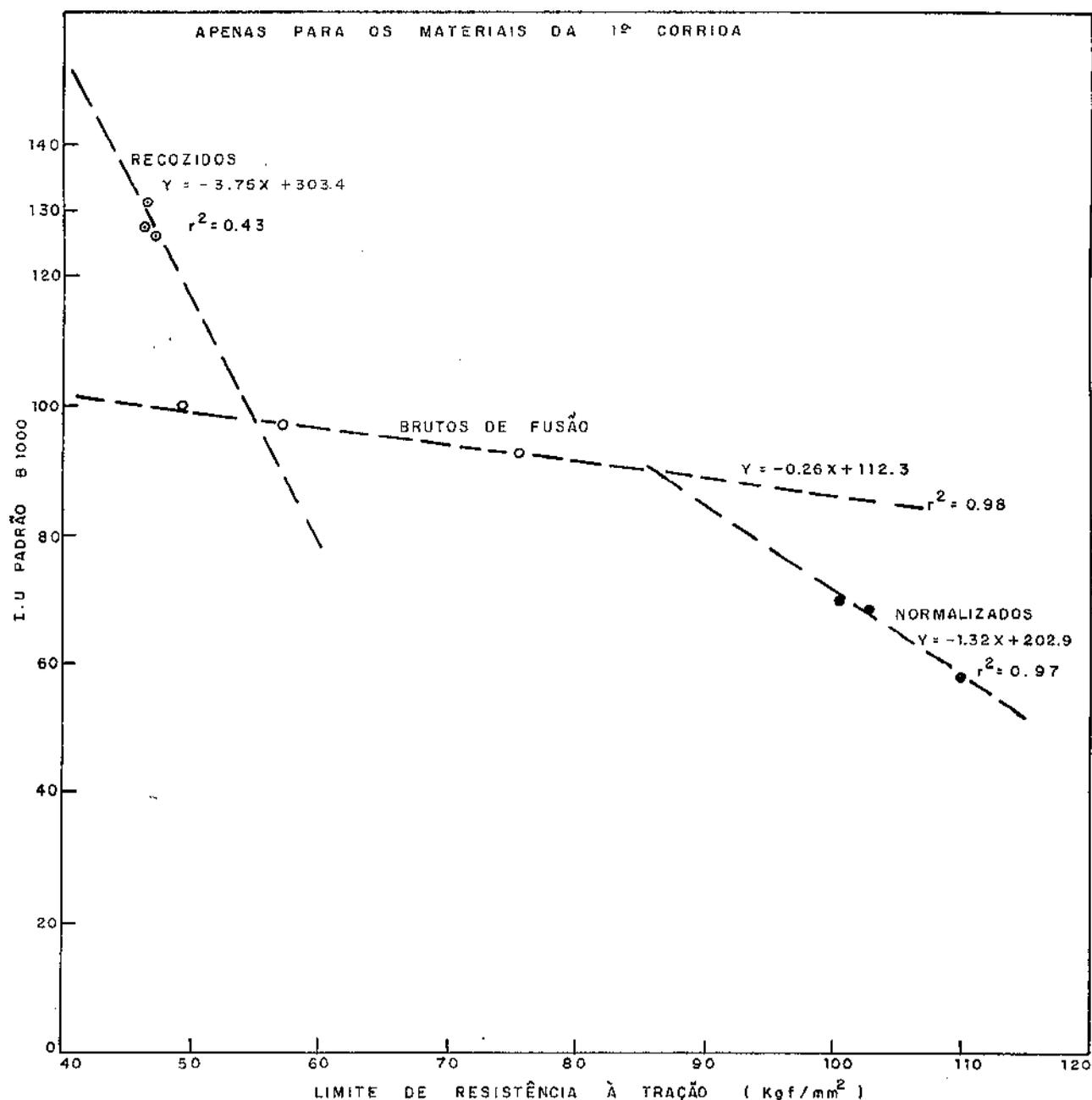


Figura 98 - Correlação entre os índices de usinabilidade Mathon ferramenta 2 e o limite de resistência à tração dos vários materiais ensaiados.

5.6.5. Influência do material da ferramenta no índice de usinabilidade obtido no ensaio Mathon

Tendo em vista que o ensaio com a ferramenta 2 foi realizado apenas nos materiais provenientes da primeira corrida, as comparações efetuadas referem-se exclusivamente a esses materiais.

A tabela 28 apresenta os índices de usinabilidade calculados para os ensaios com as duas ferramentas.

| MATERIAIS CÓDIGOS | I.U. FERRAM. 1 | I.U. FERRAM. 2 | CORRELAÇÃO COEF. r | PRECISÃO DA CORREL. \bar{r} |
|----------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|----------------------------------|
| B1000 | 100 | 100 | 0,88 | 85 |
| B1034 | 79 | 97 | | |
| B1070 | 76 | 93 | | |
| R1000 | 119 | 130 | 1,0 | 100 |
| R1034 | 112 | 127 | | |
| R1070 | 110 | 126 | | |
| N1000 | 55 | 70 | 0,66 | 73 |
| N1034 | 42 | 69 | | |
| N1070 | 40 | 58 | | |

Tabela 28 - Comparação dos índices de usinabilidade Mathon com diferentes ferramentas, referente ao Padrão B1000.

Do exame da tabela 28 verifica-se que há uma excelente correlação entre os índices de usinabilidade para os materiais regularizados, regular para os brutos de fusão e fraca para os materiais normalizados.

A ferramenta 2 é a ferramenta recomendada pela norma "AFNOR" [9] para a execução do ensaio Mathon, por ser uma ferramenta de aço ferramenta correspondente ao SAE 52100, é um material de baixa resistência ao desgaste se comparado ao aço rápido VK10N. Por essa razão os ensaios com a ferramenta 2 foram realizados em rotações mais baixas.

Os índices de usinabilidade calculados em função dos ensaios com a ferramenta 2 são maiores que os obtidos para a ferramenta 1.

A figura 99 apresenta uma comparação dos índices de usinabilidade para as duas ferramentas em função da variação do teor de cobre dos ferros fundidos ensaiados.

Da figura, fica evidente que a usinabilidade segundo estes dois índices é reduzida com o aumento do teor de cobre. Nos materiais brutos de fusão por exemplo, os índices obtidos nos ensaios com a ferramenta 2 mostram que a usinabilidade varia de forma menos acentuada em função do aumento do teor de cobre.

Esta diferença no comportamento pode ser explicada em função da vida da ferramenta.

Como a ferramenta 1 é uma ferramenta de aço rápido, material mais resistente ao desgaste que o aço ferramenta da ferramenta 2, nos ensaios necessitou-se de rotações mais elevadas para permitir a destruição da aresta cortante da ferramenta.

Isto deve-se ao fato de que a ferramenta 1 possui uma vida bem maior que a ferramenta 2, o que acarreta a necessidade de velocidades de corte bem maiores.

Então a comparação destes dois materiais se resume a uma comparação das vidas das duas ferramentas.

Observando as figuras 87 e 95, verifica-se que os valores de $D_{0,2}$ ou da vida da ferramenta são menores para os ensaios com a ferramenta 2. De um material para o outro com um maior teor de cobre as diferenças nos valores de $D_{0,2}$ também são menores e isto causa a diferença menor nos índices de usinabilidade.

A figura 100 compara as retas de determinação do diâmetro $D_{0,2}$ para $N=350$ rpm para os materiais brutos de fusão das duas ferramentas.

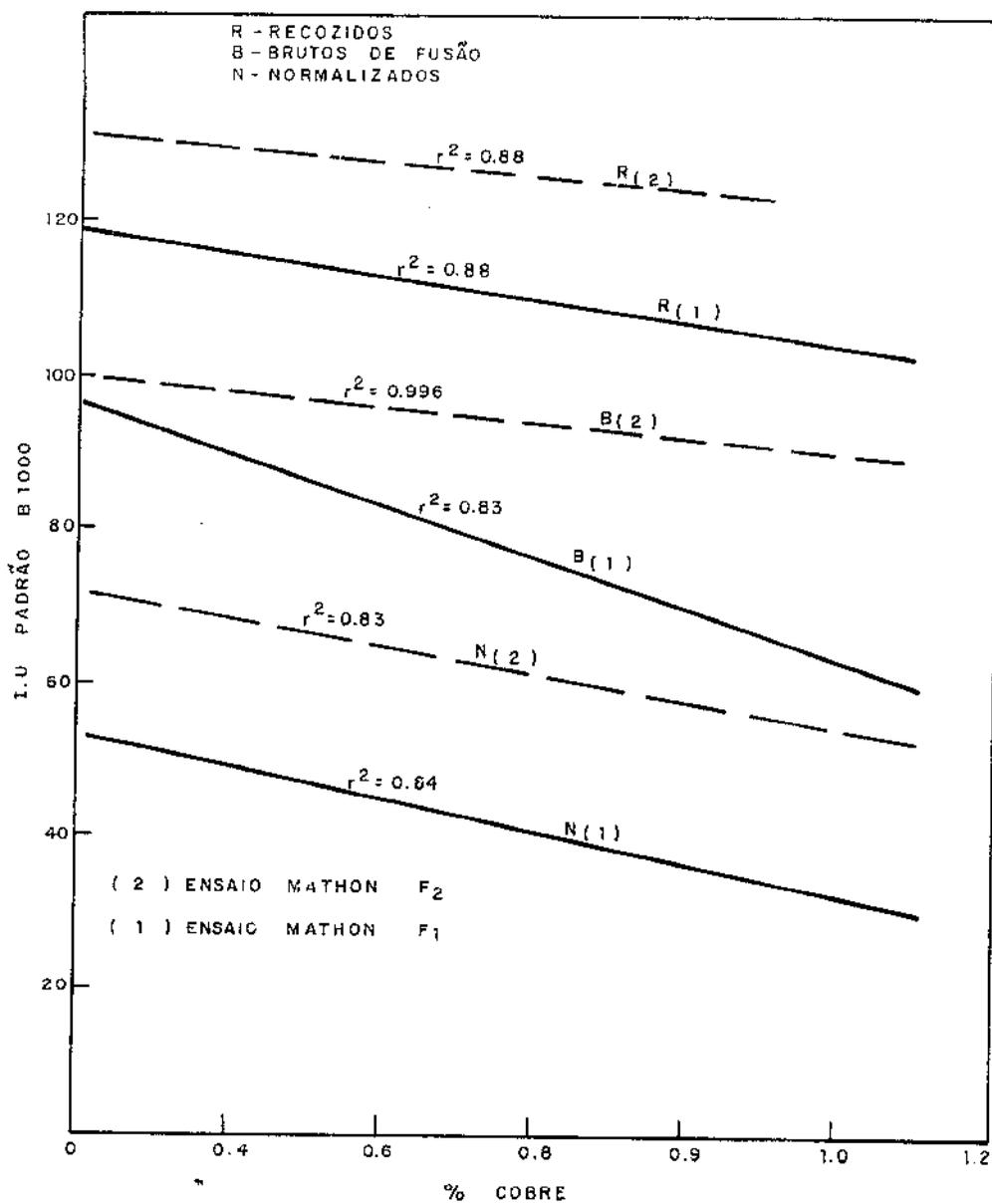


Figura 99 - Comparação dos Índices de usinabilidade de Mathon com as duas ferramentas em função do teor de cobre.

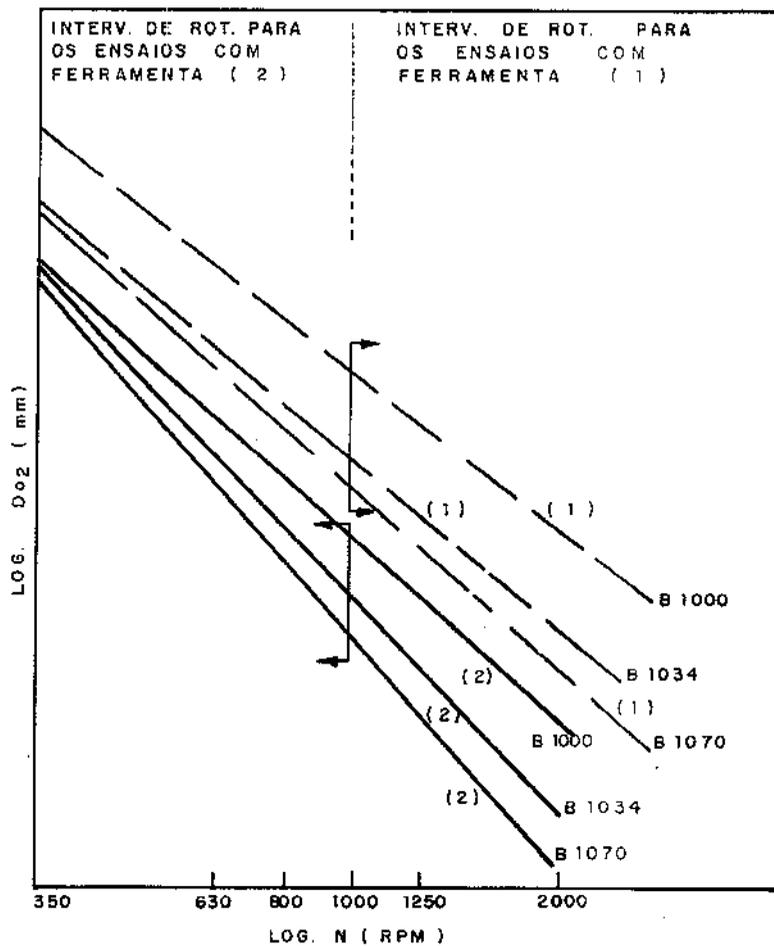


Figura 100 - Comparação da determinação do diâmetro $D_{0,2}$ para $N=350$ rpm para os materiais brutos de fusão nos ensaios Mathon com ferramenta 1 e 2, com os respectivos intervalos de rotações utilizados nos ensaios.

Da figura 100 se observa que no material fácil de usinar como é o caso do ferro fundido B1000, há uma boa correlação entre a usinabilidade com as ferramentas citadas. Tal fato se comprova através da figura 99, nos materiais recozidos com excelente correlação entre os dois índices.

Do exposto se pode afirmar que o material da ferramenta exerce influência sobre o índice de usinabilidade e que esta influência é maior nos materiais mais difíceis de usinar, no caso deste trabalho (material de maior dureza e resistência).

Da observação da figura 99 pode-se ter a falsa idéia de que a usinagem com a ferramenta 2, aço SAE 52100 seria mais vantajosa, no entanto, isto não é verdade. Na figura 100 verifica-se que os ensaios com a ferramenta 2 foram realizados numa faixa de rotações bem mais baixas que da ferramenta 1, enquanto os índices de usinabilidade foram calculados para uma rotação obtida por extrapolação (350 rpm).

Os resultados encontrados para os índices de usinabilidade com a ferramenta 1, acreditamos estarem mais próximo da realidade pois trata-se de um material especificado pelo fabricante para a usinagem de ferros fundidos.

Por outro lado, as razões pelas quais a norma fixou que o ensaio fosse realizado com uma ferramenta de baixa resistência ao desgaste são:

- Primeira, permitir que o ensaio fosse executado em materiais com diâmetros pequenos.
- Segunda, permitir a utilização de baixas rotações, conseqüentemente mais próximas da rotação 350 rpm.
- Terceira, em consequência das baixas rotações, máquinas de menor potência podem ser utilizadas.

5.7. ENSAIO v_{LF} - CÁLCULO DA VELOCIDADE LIMITE DE FACEAMENTO

5.7.1. Ensaios com ferramenta 1

5.7.1.1. Resultados

As velocidades de corte v_{LF} que significam velocidades de corte limite de faceamento, foram calculadas em ensaios simultâneos com os ensaios Mathon. Por esta razão os ensaios foram subdivididos em função das ferramentas, analogamente aos ensaios Mathon.

Estas velocidades foram calculadas de acordo com a expressão 23 e as variáveis do ensaio, além do material da peça e da ferramenta são a rotação e o comprimento L.

Os diversos valores de L e que indiretamente significa o tempo de corte em cada ensaio estão nas tabelas V.6 e V.7 do apêndice V para os materiais provenientes das diversas corridas.

O parâmetro L apresentou uma dispersão máxima de 8,2% e uma dispersão média de 3,3%, dentro portanto dos limites aceitáveis.

As velocidades v_{LF} calculadas em função das variáveis citadas estão nas tabelas V.8 e V.9 do mesmo apêndice.

Em virtude das diferentes faixas de rotações utilizadas nos ensaios com a ferramenta 1, não foi possível determinar um índice geral em função de um só padrão para os diversos ferros fundidos ensaiados.

Todavia o fato anterior não impediu que se verificasse a correlação entre este ensaio e o ensaio Mathon como sugeriu Roumesy [42,44 e 46].

A tabela 29 mostra uma comparação dos índices de usabilidade Mathon e v_{LF} em cada rotação de ensaio e tomando como padrão em cada caso o material sem cobre. Os casos em questão são os diferentes estados de tratamento térmico de cada corrida.

5.7.1.2. Discussão

Da tabela 29 verifica-se que o índice v_{LF} é dependente da rotação do ensaio.

As figuras 101, 102 e 103 apresentam as correlações entre " v_{LF} " e " $D_{0,2}$ " para as várias rotações de ensaio e os diferentes estados de tratamento térmico.

Do exame das figuras 101 a 103 e em função dos coeficientes de correlação encontrados pode-se dizer que a velocidade v_{LF} apresenta uma correlação muito boa com o diâmetro $D_{0,2}$, e de acordo com Roumesy [42,44 e 46].

| MATERIAIS CÓDIGOS | N (RPM) | I.U. D _{0,2} | I.U. v _{LF} | N (RPM) | I.U. D _{0,2} | I.U. v _{LF} | N (RPM) | I.U. D _{0,2} | I.U. v _{LF} |
|----------------------|------------|--------------------------|-------------------------|------------|--------------------------|-------------------------|------------|--------------------------|-------------------------|
| B1000 * | 1000 | 100 | 100 | 1250 | 100 | 100 | 2000 | 100 | 100 |
| B1034 | | 78 | 87 | | 70 | 79 | | 74 | 77 |
| B1070 | | 68 | 72 | | 66 | 65 | | 63 | 64 |
| R1000 * | 1465 | 100 | 100 | 2000 | 100 | 100 | 2344 | 100 | 100 |
| R1034 | | 94 | 92 | | 92 | 93 | | 94 | 88 |
| R1070 | | 86 | 85 | | 85 | 85 | | 83 | 78 |
| N1000 * | 630 | 100 | 100 | 800 | 100 | 100 | 1000 | 100 | 100 |
| N1034 | | 84 | 85 | | 82 | 83 | | 90 | 86 |
| N1070 | | 81 | 81 | | 79 | 75 | | 87 | 75 |
| B2000 * | 1000 | 100 | 100 | 1250 | 100 | 100 | 2000 | 100 | 100 |
| B2061 | | 67 | 77 | | 67 | 76 | | 58 | 77 |
| B2104 | | 61 | 68 | | 63 | 66 | | 54 | 69 |
| R3000 * | 1250 | 100 | 100 | 1465 | 100 | 100 | 2000 | 100 | 100 |
| R3037 | | 97 | 81 | | 94 | 73 | | 99 | 73 |
| R3090 | | 88 | 61 | | 91 | 63 | | 95 | 52 |
| N3000 * | 630 | 100 | 100 | 800 | 100 | 100 | 1000 | 100 | 100 |
| N3037 | | 86 | 88 | | 93 | 96 | | 83 | 95 |
| N3090 | | 82 | 82 | | 86 | 88 | | 74 | 89 |

* materiais tomados como padrão em cada tratamento.

Tabela 29 - Comparação entre os índices de usinabilidade Mathon e v_{LF} nas várias rotações de ensaio.

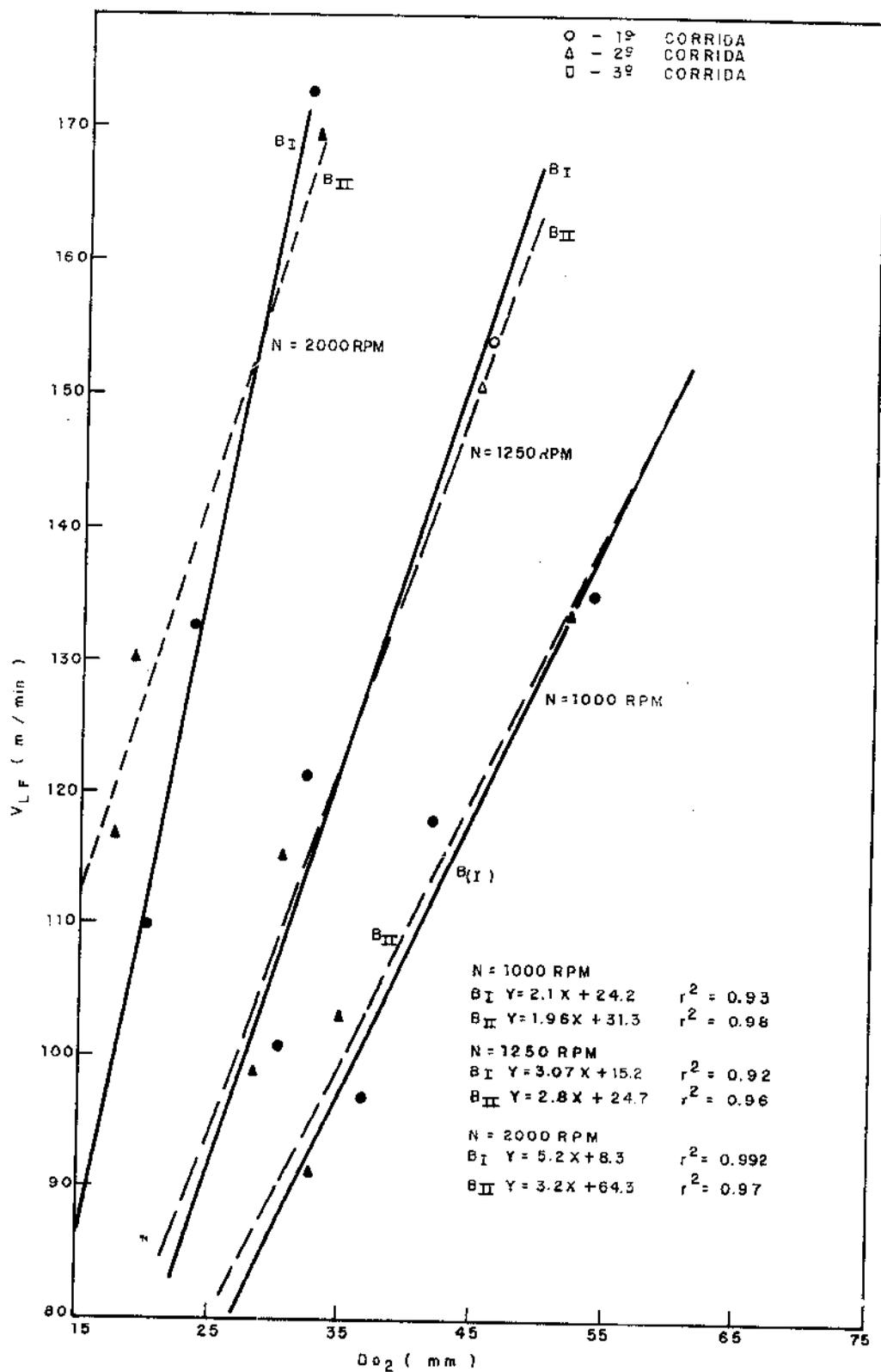


Figura 101 - Correlações entre " v_{LF} " e " $D_{0,2}$ " nas várias rotações para os materiais brutos de fusão.

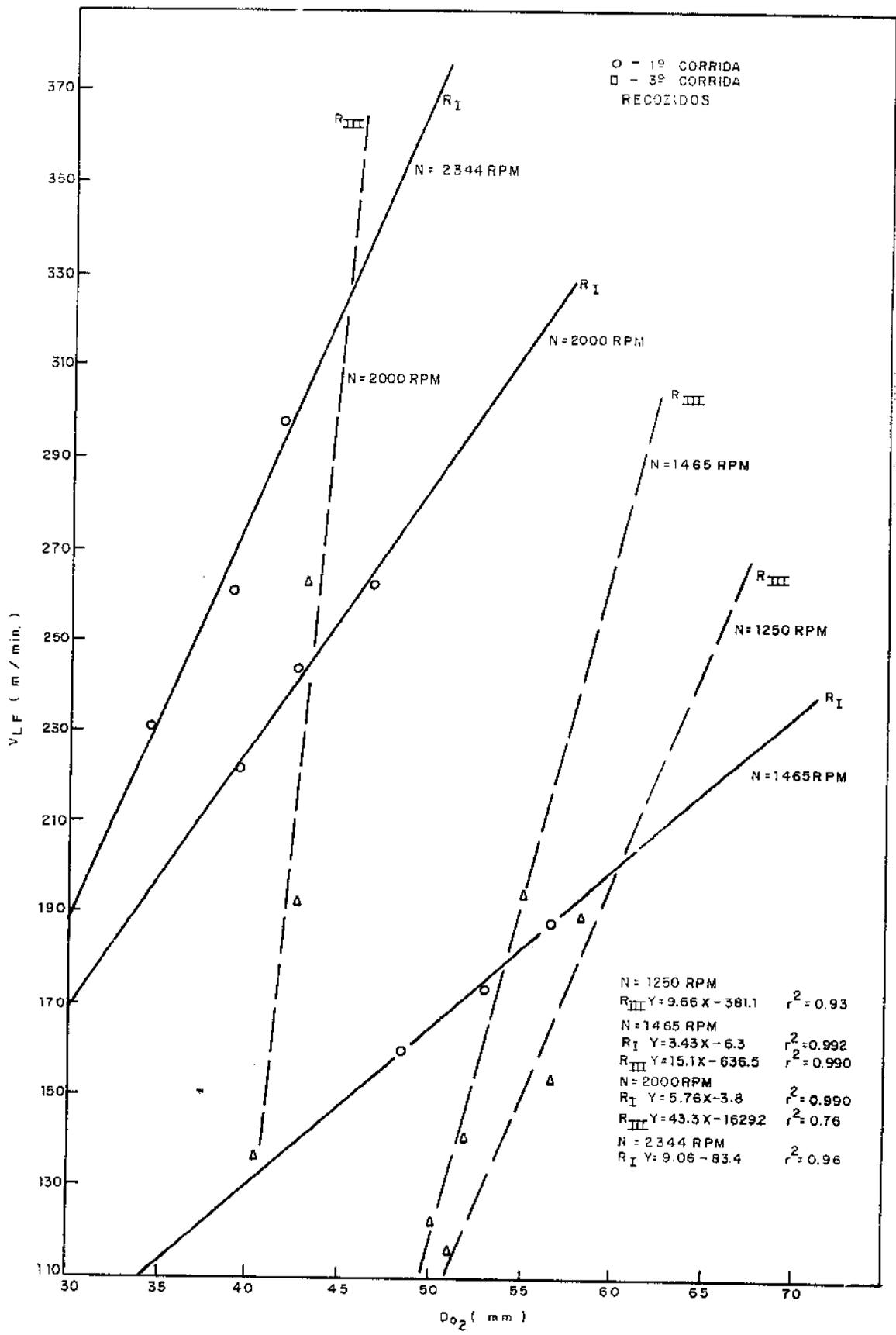


Figura 102 - Correlações entre "v_{LF}" e "D_{0,2}" nas várias rotações para os materiais recozidos.

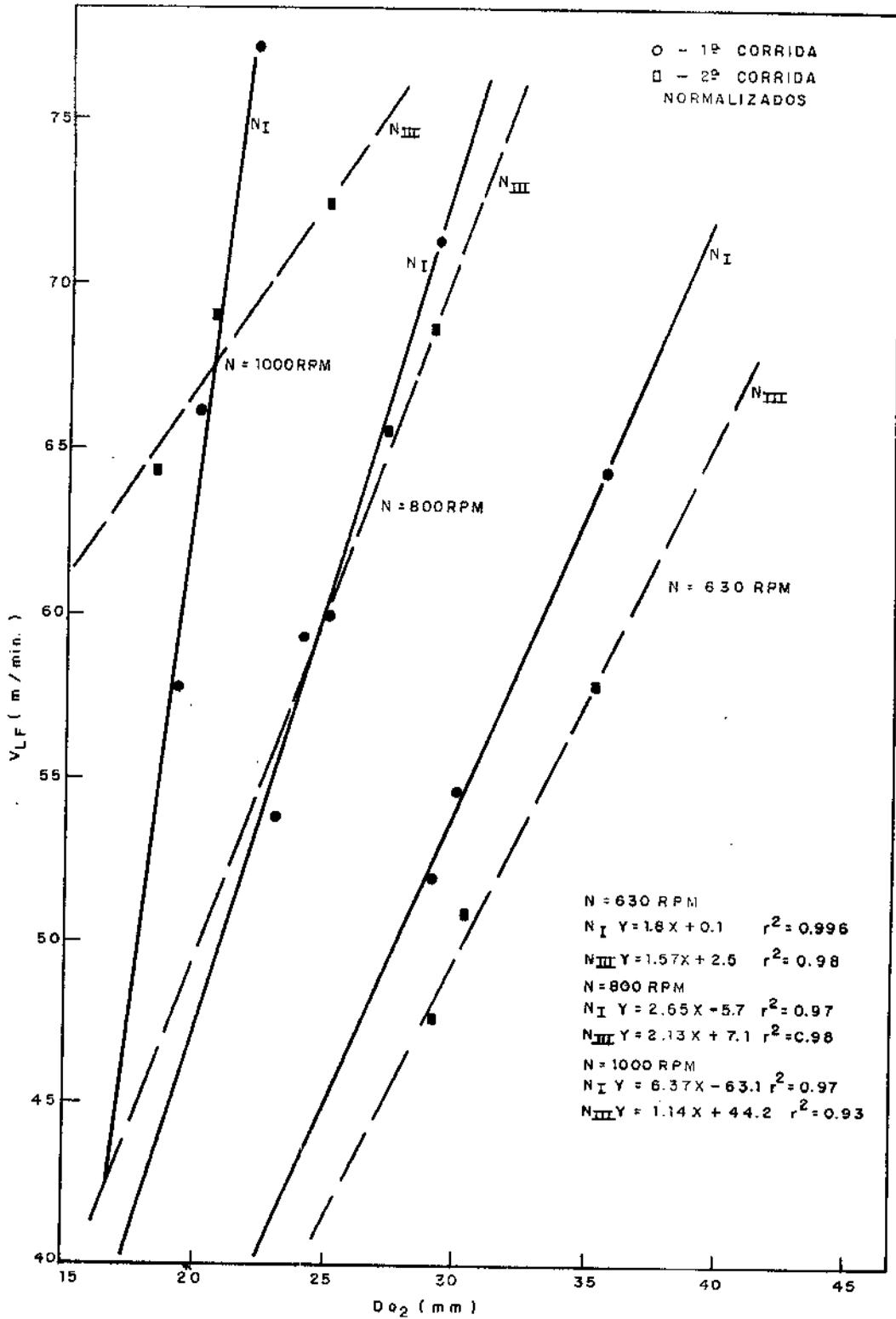


Figura 103 - Correlação entre " v_{LF} " e " $D_{0,2}$ " nas várias rotações para os materiais normalizados.

Em função disto, o índice calculado em função de v_{LF} apresentará a mesma tendência de variação que o obtido no ensaio Mathon.

5.7.2. Ensaio com ferramenta 2

5.7.2.1. Resultados

Os valores do parâmetro L utilizados no cálculo da velocidade v_{LF} estão na tabela V.10 do apêndice V e as velocidades calculadas em função deste estão na tabela V.11 do mesmo apêndice.

O parâmetro L apresentou dispersão máxima e média de respectivamente 7,1 e 3,9%, valores aceitáveis dentro da margem de erro máxima de 5%.

Como neste caso a faixa de rotações utilizadas foi a mesma para os vários estados de tratamento térmico, foi possível calcular um índice de usinabilidade geral com referência ao padrão "B1000". Estes índices estão na tabela 30 em função da rotação do ensaio.

As correlações entre as velocidades v_{LF} e os diâmetros $D_{0,2}$ estão nas figuras 104, 105 e 106.

A tabela 31 apresenta as correlações entre os índices de usinabilidade nas várias rotações verificando assim a influência da rotação no índice de usinabilidade.

| MATERIAIS CÓDIGOS | N=630 rpm | | N=800 rpm | | N=1000 rpm | |
|----------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| | I.U. $D_{0,2}$ | I.U. v_{LF} | I.U. $D_{0,2}$ | I.U. v_{LF} | I.U. $D_{0,2}$ | I.U. v_{LF} |
| B1000 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| B1034 | 87 | 93 | 89 | 90 | 80 | 94 |
| B1070 | 80 | 84 | 81 | 81 | 72 | 79 |
| R1000 | 130 | 112 | 127 | 125 | 129 | 125 |
| R1034 | 126 | 109 | 124 | 122 | 124 | 119 |
| R1070 | 120 | 108 | 117 | 116 | 115 | 113 |
| N1000 | 64 | 67 | 65 | 65 | 60 | 65 |
| N1034 | 63 | 66 | 62 | 63 | 58 | 63 |
| N1070 | 57 | 62 | 59 | 59 | 57 | 58 |

Tabela 30 - Comparação entre os índices de usinabilidade " $D_{0,2}$ " e " v_{LF} " nas rotações indicadas.

| COMPARAÇÃO ENTRE: ESTADO TRAT.TÉRMICO | I.U.630/I.U.800 r | I.U.630/I.U.1000 r | I.U.800/I.U.1000 r |
|--|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Brutos de fusão | 0,995 | 0,985 | 0,963 |
| Recozidos | 0,89 | 0,960 | 0,982 |
| Normalizados | 0,990 | 0,996 | 0,9990 |
| Geral | 0,987 | 0,990 | 0,997 |

Tabela 31 - Correlações entre os índices " v_{LF} " para as várias rotações.

5.7.2.2. Discussão

5.7.2.2.1. A determinação do índice de usinabilidade v_{LF}

Do exame das figuras 104 a 106 e dos coeficientes de correlação encontrados, verifica-se que existe uma boa correlação entre v_{LF} e $D_{0,2}$ e de acordo com a afirmação de ROUMESY [42,44 e 46].

Ainda da observação das figuras citadas e dos coeficientes de correlação, verifica-se que para rotação 800 rpm tem-se correlações melhores entre " v_{LF} " e " $D_{0,2}$ " nos vários estados de tratamento térmico.

Por outro lado, na tabela 31 verifica-se que os índices de usinabilidade das várias rotações apresentam uma boa correlação entre si e isto significa que para as rotações utilizadas a influência que elas exercem no índice de usinabilidade é muito pequena, mesmo considerando os valores um pouco diferentes dos índices observados na tabela 30.

Em função do exposto é válido adotar-se um procedimento semelhante àquele usado para o índice " θ_v " e escolher-se uma rotação de referência que especifique um determinado índice.

Esta rotação de referência escolhida foi 800 rpm e o índice de usinabilidade v_{LF} para esta rotação é chamado de "índice v_{LF} 800" e seus valores estão na tabela 30.

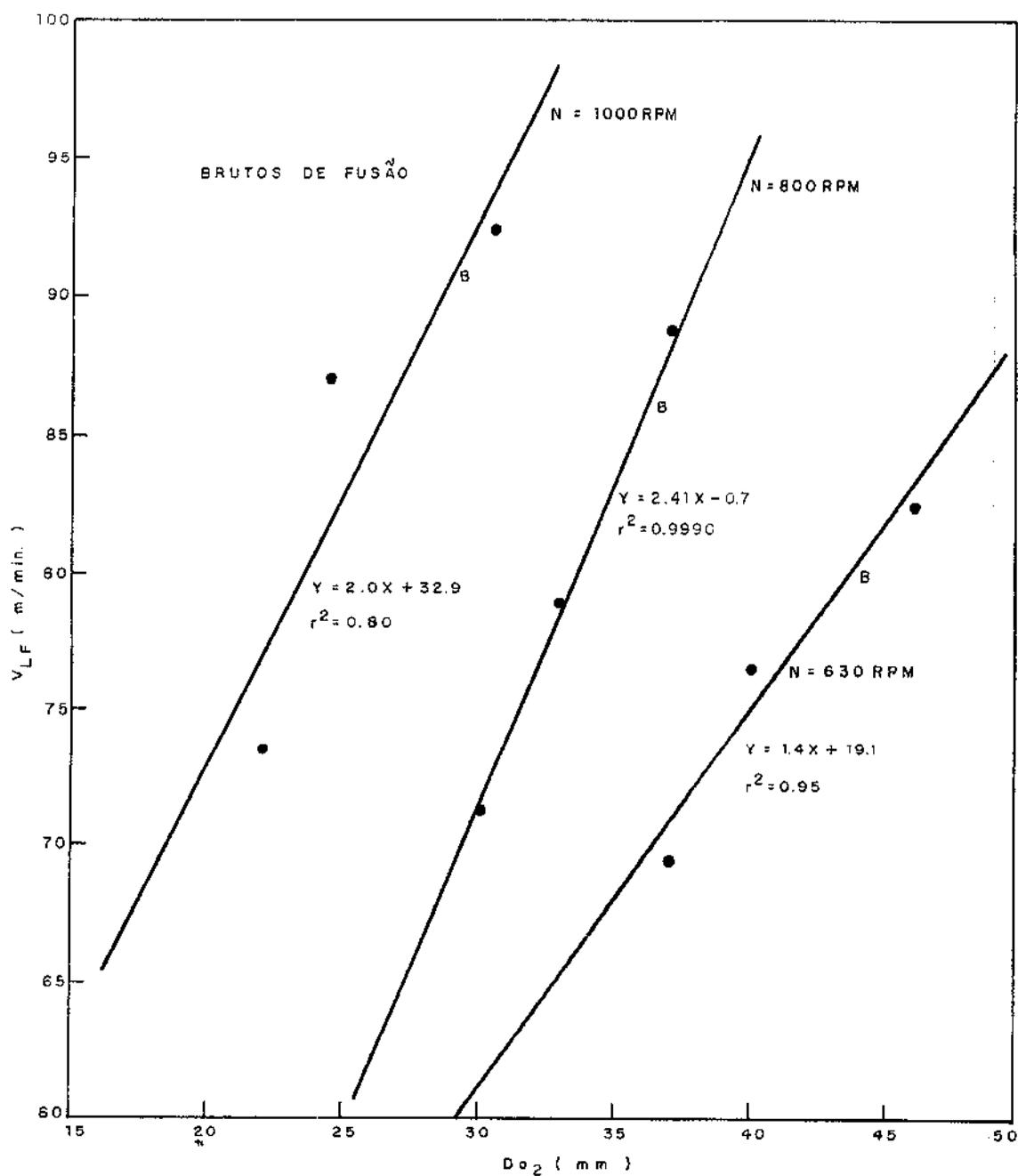


Figura 104 - Correlação entre " v_{LF} " e " $D_{0,2}$ " nas várias rotações para os materiais brutos de fusão.

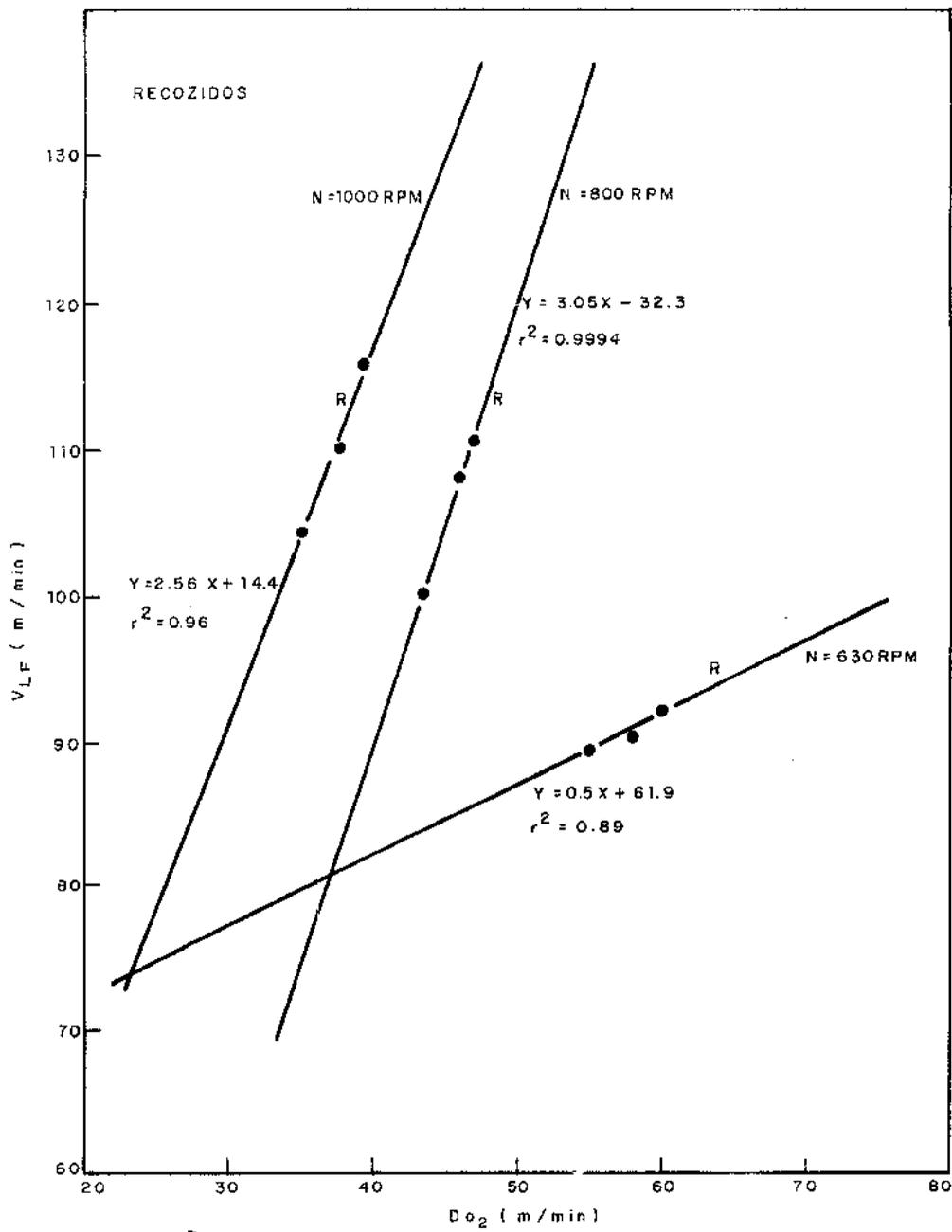


Figura 105 - Correlação entre " v_{LF} " e " $D_{0,2}$ " nas várias rotações para os materiais recozidos.

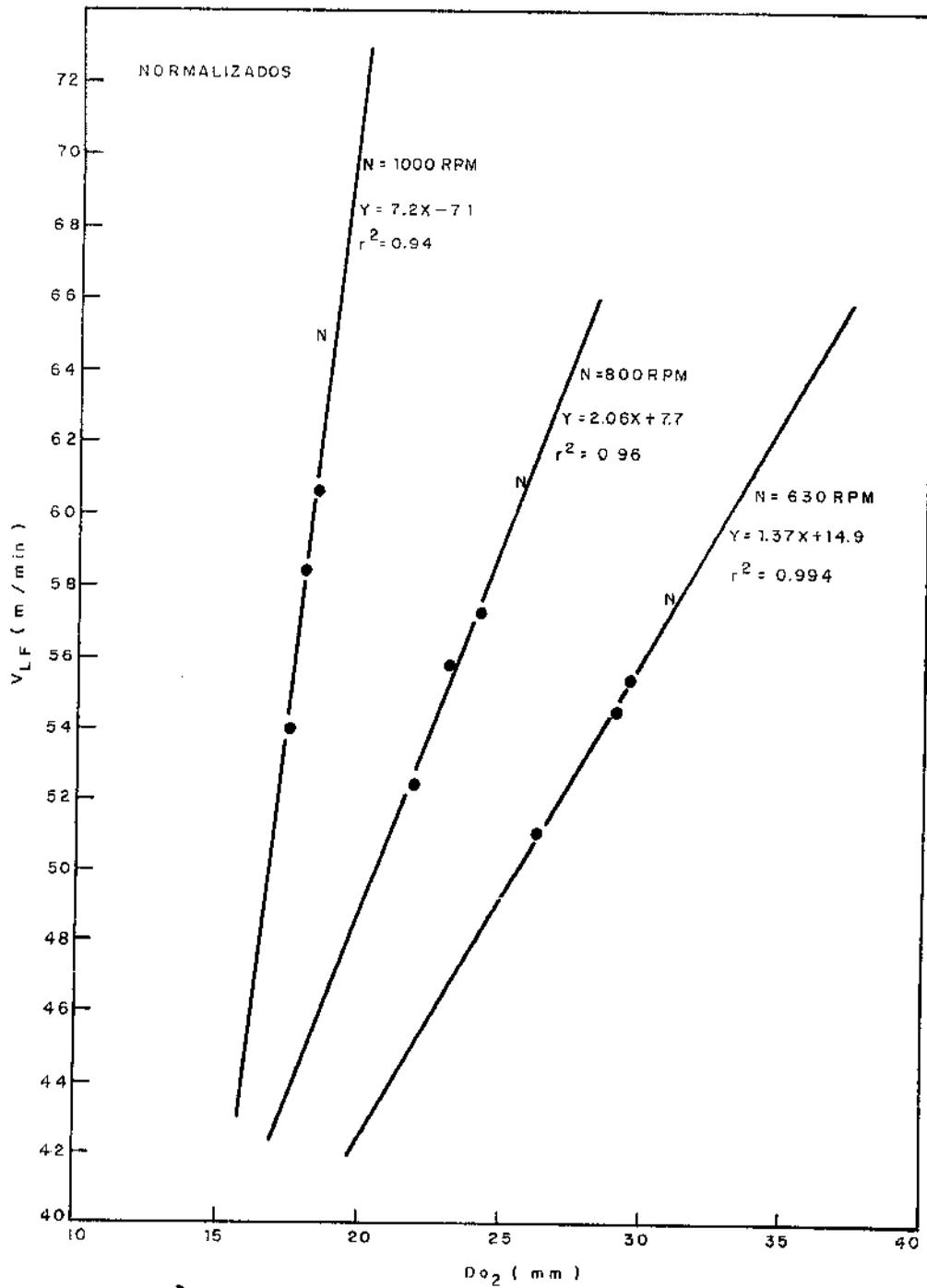


Figura 106 - Correlação entre " v_{LF} " e " $D_{0,2}$ " nas várias rotações para os materiais normalizados.

5.7.2.2.2. Correlação entre a usinabilidade " v_{LF} 800" e o teor de cobre

A figura 107 apresenta as correlações entre o índice de usinabilidade " v_{LF} 800" e o teor de cobre. Da figura se observa que a usinabilidade é reduzida em função do aumento no teor de cobre nos três estados de tratamento térmico.

A influência maior do teor de cobre na usinabilidade ocorre no estado bruto de fusão. Em função dos coeficientes de cor

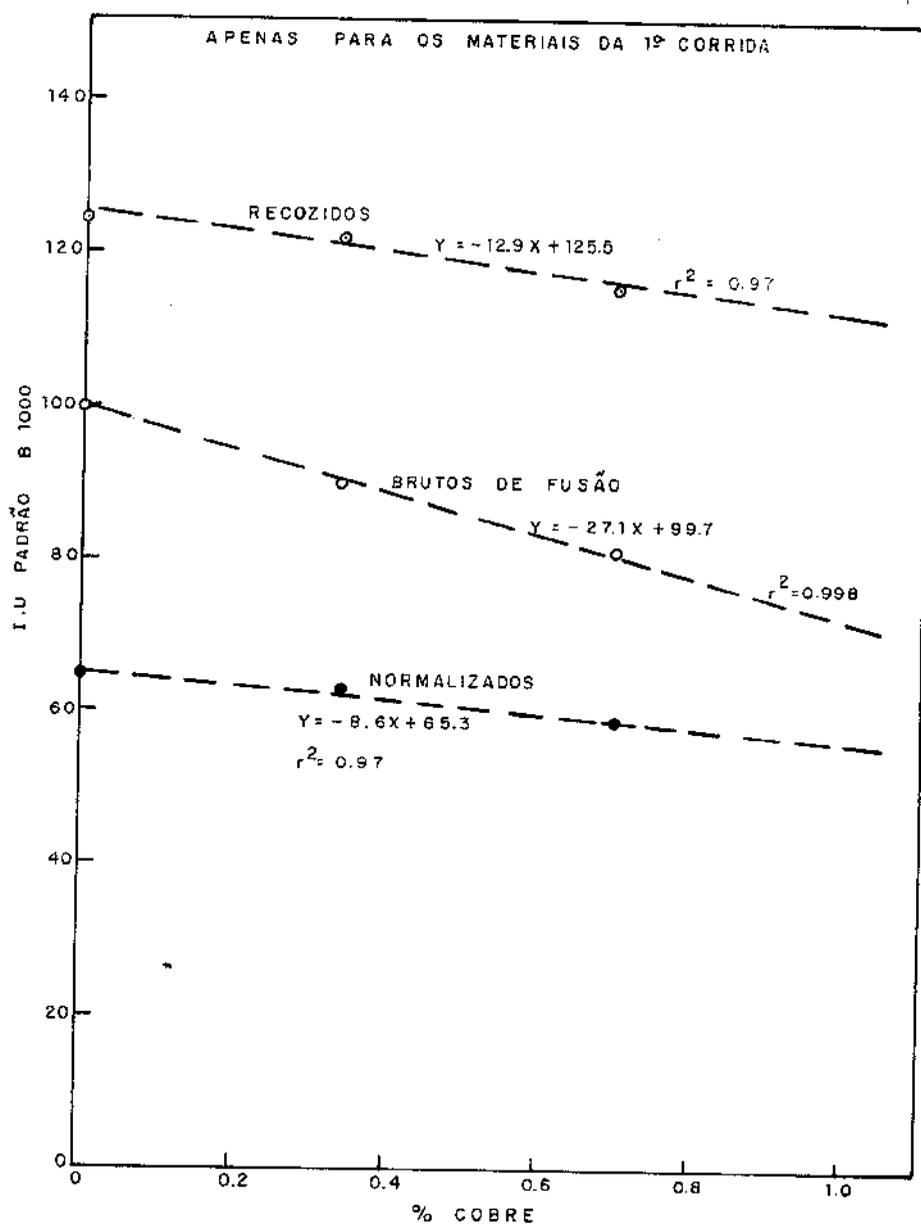


Figura 107 - Correlações entre os índices de usinabilidade " v_{LF} " e o teor de cobre nos vários estados de tratamento térmico.

relação encontrados pode-se dizer que existe uma boa correlação entre esses dois parâmetros.

5.7.2.2.3. Correlação entre a usinabilidade "v_{LF} 800" e as propriedades dureza e limite de resistência à tração

As figuras 108 e 109 mostram essas correlações. Da observação das figuras se verifica que a usinabilidade se reduz

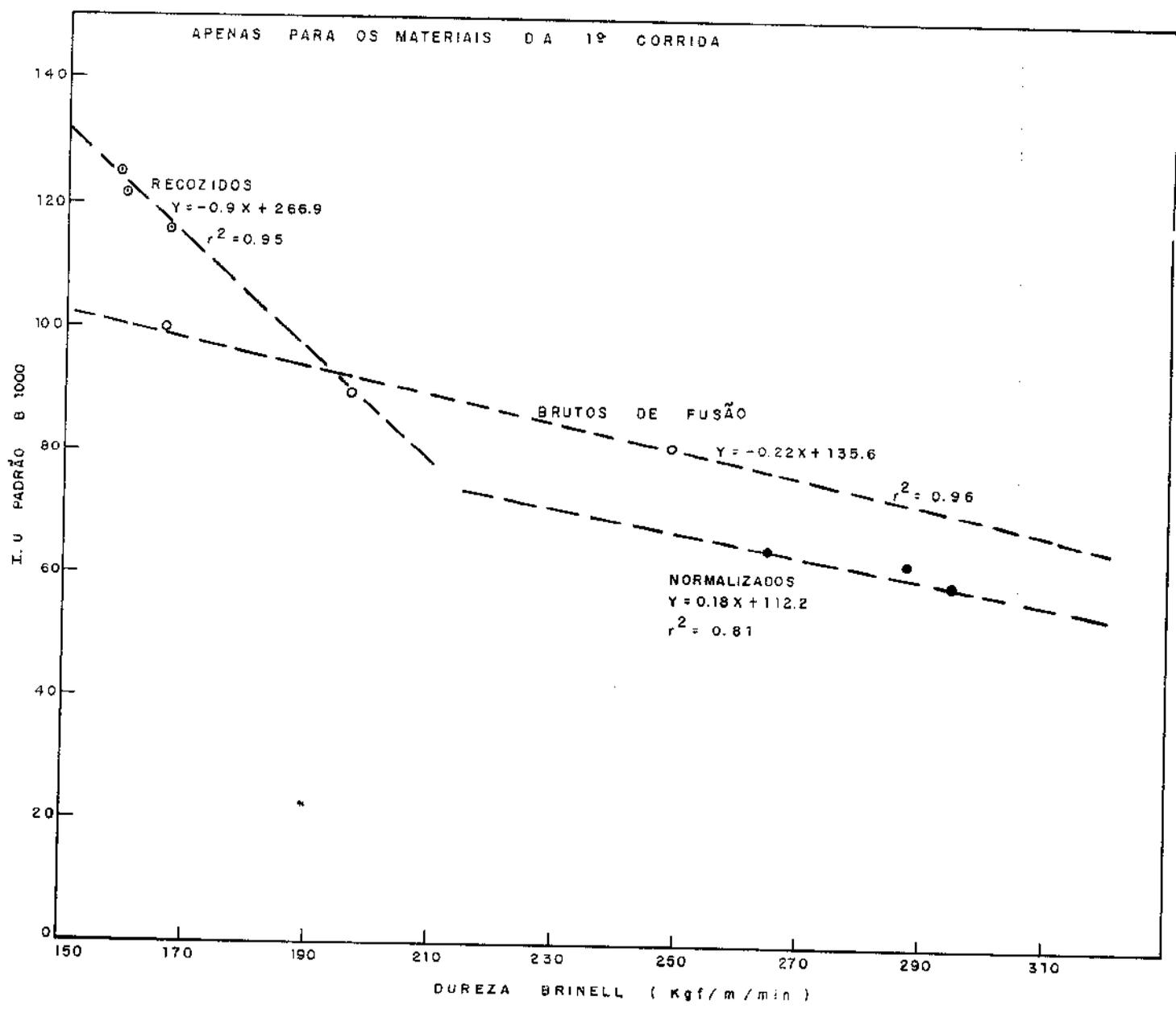


Figura 108 - Correlações entre o índice "v_{LF}" e a dureza Brinell nos vários estados de tratamento térmico.

com o aumento dessas propriedades e que em função dos coeficientes de correlação encontrados a correlação entre esses parâmetros varia de regular para boa em função do estado do tratamento térmico.

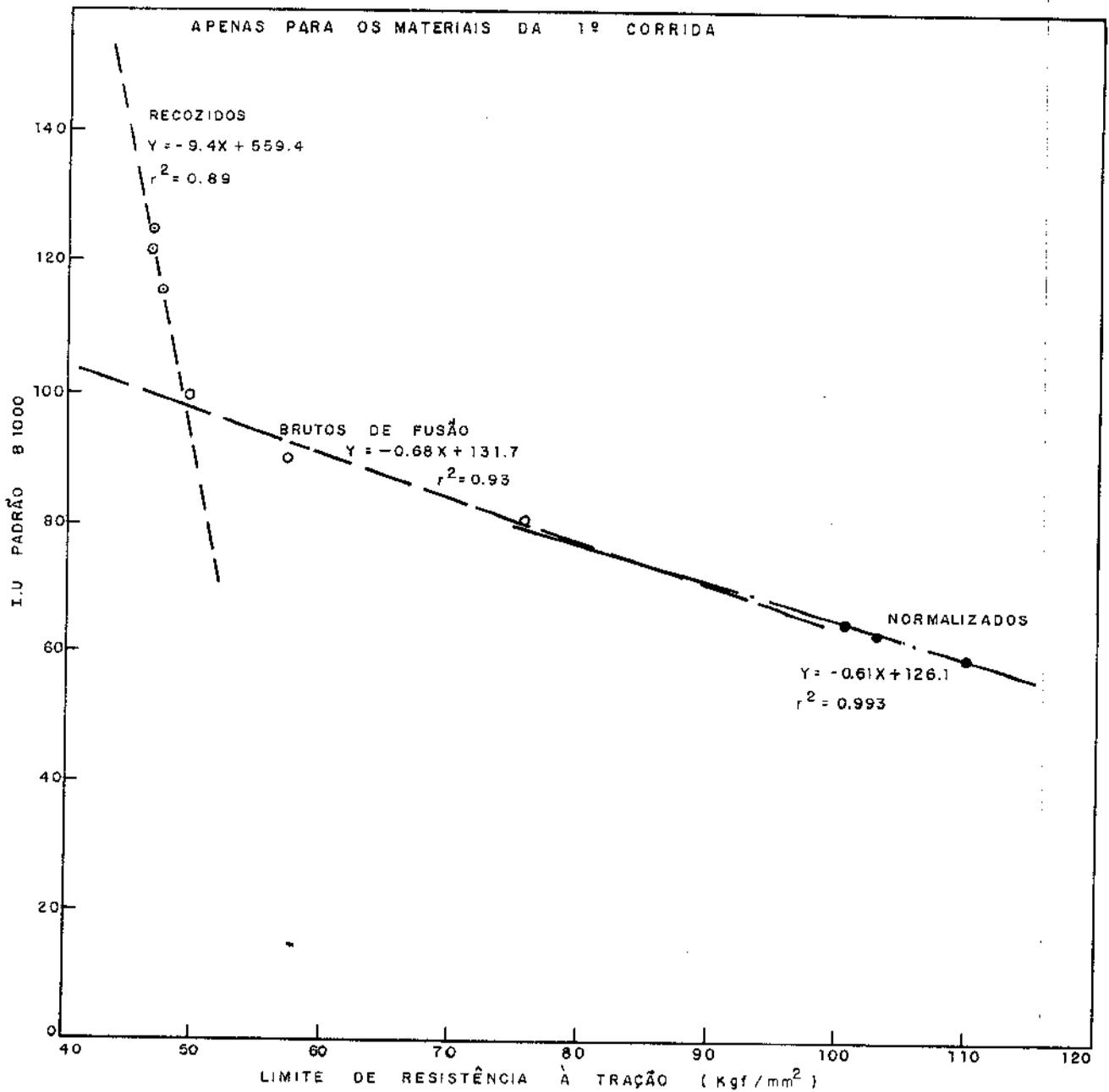


Figura 109 - Correlação entre os índices " $v_{LF} 800$ " e o limite de resistência à tração nos vários estados de tratamento térmico.

5.7.3. Influência do material de ferramenta no "Ensaio v_{LF} "

A tabela 32 foi montada para comparar os valores dos coeficientes de correlação calculados para as correlações entre as velocidades " v_{LF} " e os diâmetros " $D_{0,2}$ " nos ensaios com as ferramentas 1 e 2.

| ESTADO DE TRATAM. TÉRM. | ENSAIOS FERRAMENTA 1 | | ENSAIOS FERRAMENTA 2 | |
|-------------------------|----------------------|---------|----------------------|---------|
| | ROTAÇÃO | COEF. r | ROTAÇÃO | COEF. r |
| Brutos de fusão | 1000 | 0,964 | 630 | 0,975 |
| | 1250 | 0,960 | 800 | 0,9995 |
| | 2000 | 0,996 | 1000 | 0,894 |
| Recozidos | 1465 | 0,996 | 630 | 0,943 |
| | 2000 | 0,995 | 800 | 0,997 |
| | 2344 | 0,980 | 1000 | 0,980 |
| Normalizados | 630 | 0,998 | 630 | 0,997 |
| | 800 | 0,985 | 800 | 0,980 |
| | 1000 | 0,985 | 1000 | 0,970 |

Tabela 32 - Comparação das correlações entre " v_{LF} " e " $D_{0,2}$ " nos ensaios com as ferramentas 1 e 2.

Da tabela observa-se que as correlações são muito boas para ambas as ferramentas e isto serve para reforçar o raciocínio de que o ensaio Mathon executado com a ferramenta 1 é perfeitamente válido.

5.8. ENSAIO DATSKO

5.8.1. Resultados

Os valores da velocidade v_{60} calculados em função da expressão (27) sugerida por DATSKO [10] estão na tabela VI.1 do

apêndice VI, onde constam também todos os valores utilizados na expressão.

Os valores desta velocidade e o índice de usinabilidade calculados a partir dela estão na tabela 33.

| MATERIAIS CÓDIGOS | v_{60} (m/min) | I.U. [%] PADRÃO B1000 | R.U. [%] PADRÃO SAE 1212 |
|----------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------------|
| B1000 | 52,5 | 100 | 74 |
| B1034 | 47,9 | 91 | 68 |
| B1070 | 38,7 | 74 | 55 |
| R1000 | 54,7 | 104 | 77 |
| R1034 | 54,7 | 104 | 77 |
| R1070 | 52,6 | 100 | 74 |
| N1000 | 33,6 | 64 | 48 |
| N1034 | 33,4 | 63 | 47 |
| N1070 | 32,7 | 62 | 46 |
| B2000 | 50,6 | 96 | 72 |
| B2061 | 36,7 | 70 | 52 |
| B2104 | 35,4 | 67 | 50 |
| R3000 | 53,4 | 102 | 76 |
| R3037 | 53,0 | 101 | 75 |
| R3090 | 50,0 | 95 | 71 |
| N3000 | 35,8 | 68 | 51 |
| N3037 | 33,4 | 64 | 47 |
| N3090 | 31,0 | 59 | 44 |
| SAE 1212 | 70,7 | - | 100 |

Tabela 33 - Índices de usinabilidade segundo DATSKO.

5.8.2. Discussão

5.8.2.1. Correlação da usinabilidade com o teor de cobre

A figura 110 mostra estas correlações para os vários materiais ensaiados nos diversos estados de tratamento térmico.

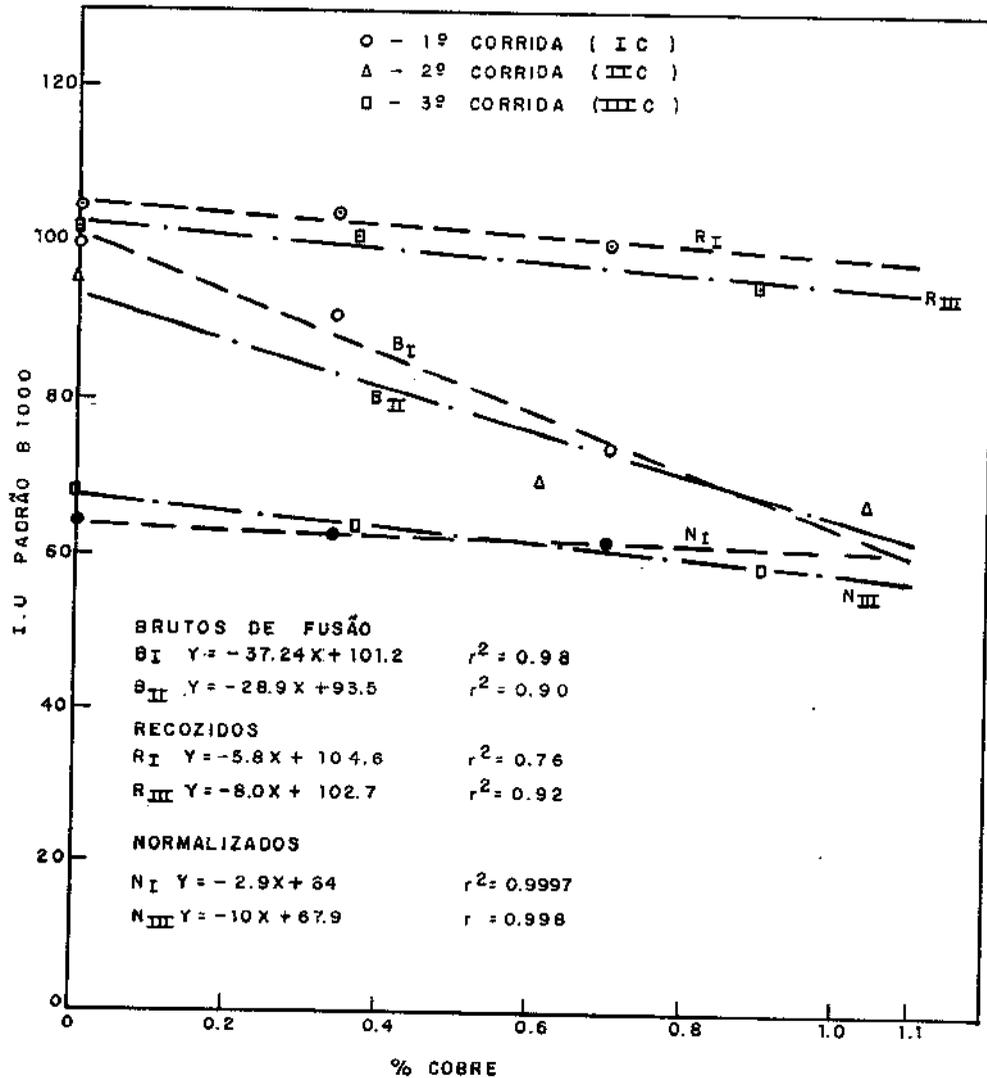


Figura 110 - Correlações entre os índices de usinabilidade DATSKO com o teor de cobre nas diversas corridas e estados de tratamento térmico.

Na figura se observa que a usinabilidade se reduz com o aumento do teor de cobre e que, em função dos coeficientes de correlação encontrados pode-se dizer que existe uma boa correlação entre esses parâmetros.

À exemplo dos outros índices de usinabilidade, a maior influência exercida pelo teor de cobre na usinabilidade ocorre com os ferros fundidos no estado bruto de fusão.

Na figura 111 se verifica a tendência da correlação em função do estado de tratamento térmico. Existe realmente a tendência de redução da usinabilidade com uma correlação regular e mais acentuada no estado bruto de fusão.

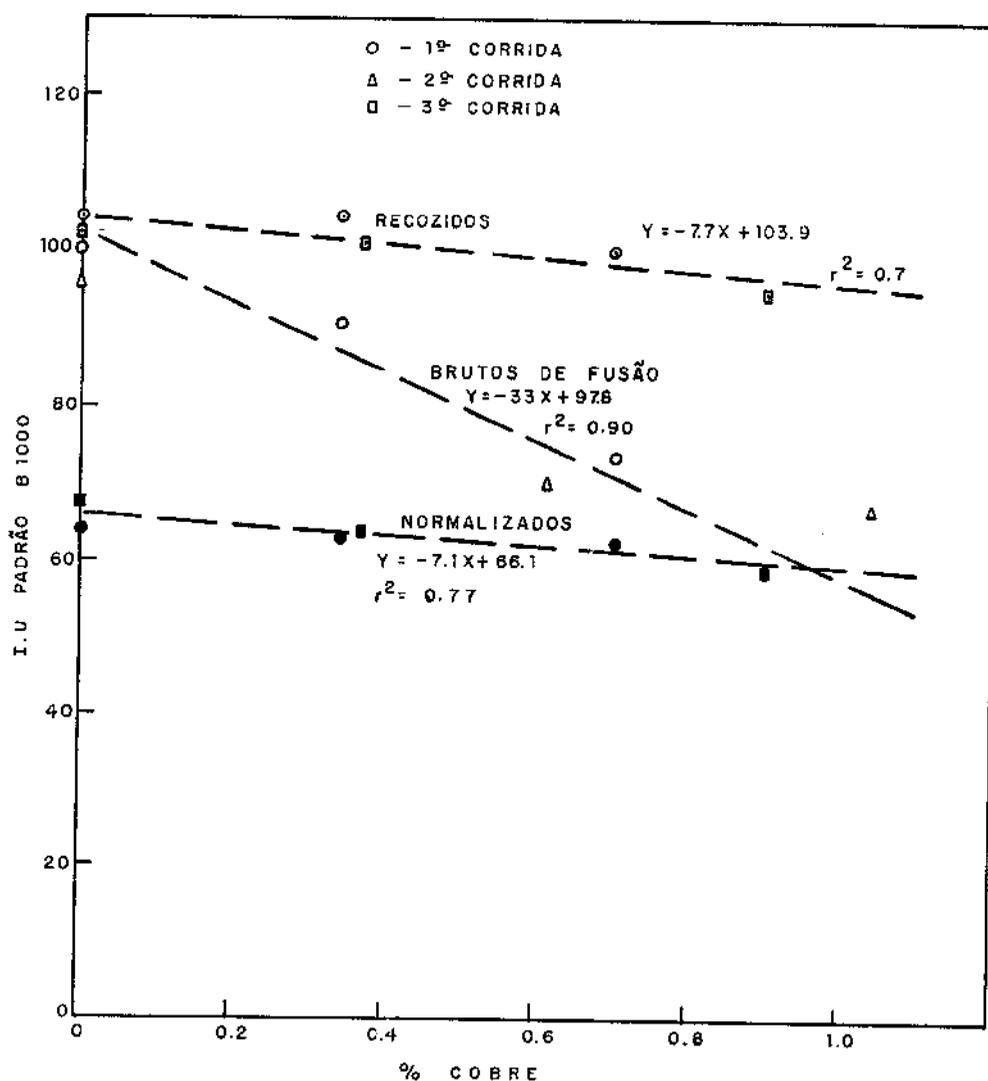


Figura 111 - Verificação da tendência da variação da usinabilidade DATSKO com o teor de cobre nos vários estados de tratamento térmico.

5.8.2.2. Correlação entre a usinabilidade e a dureza Brinell

A figura 112 mostra essas correlações para os diversos materiais ensaiados. Da figura se observa que a usinabilidade se reduz com o aumento da dureza.

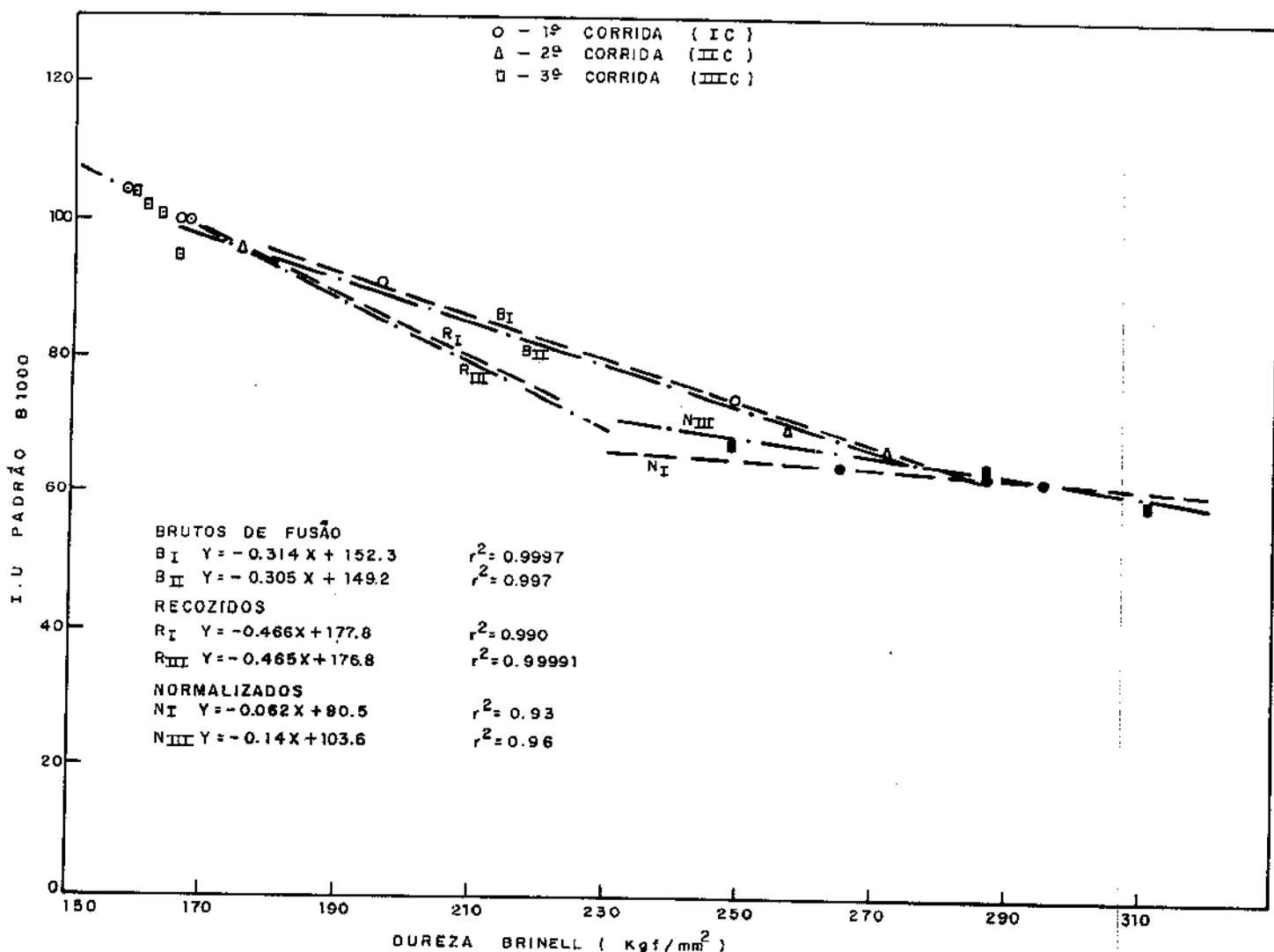


Figura 112 - Correlação entre os índices de usinabilidade DATSKO e a dureza Brinell para os vários materiais ensaiados.

As influências maiores ocorrem nos estados bruto de fusão e recozidos.

Em função dos coeficientes de correlação encontrados verifica-se que existe uma correlação muito boa entre os parâmetros citados. Isto se justifica porque no cálculo do índice de usinabilidade DATSKO uma das variáveis é a dureza e esta influencia diretamente, como ficou comprovado.

Na figura 113 se observa a verificação da tendência das correlações em função do estado de tratamento térmico. Comprova-se a existência da referida tendência com uma boa correlação nos diversos estados de tratamento térmico e muito mais acentuada, com uma excelente correlação para os materiais no estado bruto de fusão.

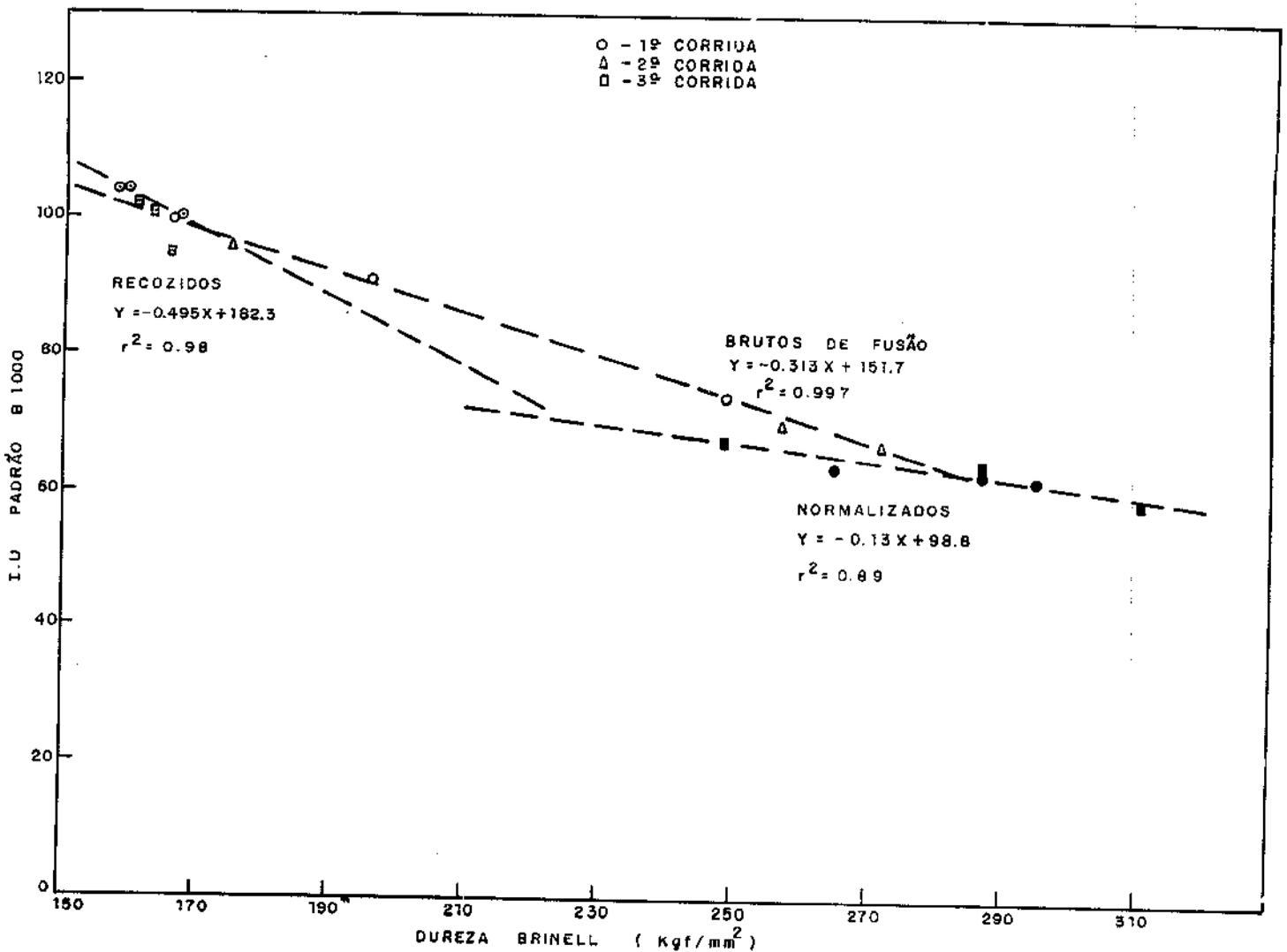


Figura 113 - Verificação da tendência da variação da usinabilidade com a dureza Brinell nos diversos estados de tratamento térmico.

5.8.2.3. Correlação entre a usinabilidade e o limite de resistência a tração

Na figura 114 se observa estas correlações para os vários materiais ensaiados. Como se verifica, a usinabilidade é reduzida em função desta propriedade e do exame dos coeficientes de correlação encontrados pode-se dizer que há uma boa correlação entre os parâmetros citados.

As variações mais significativas ocorrem para os materiais no estado bruto de fusão e recozidos.

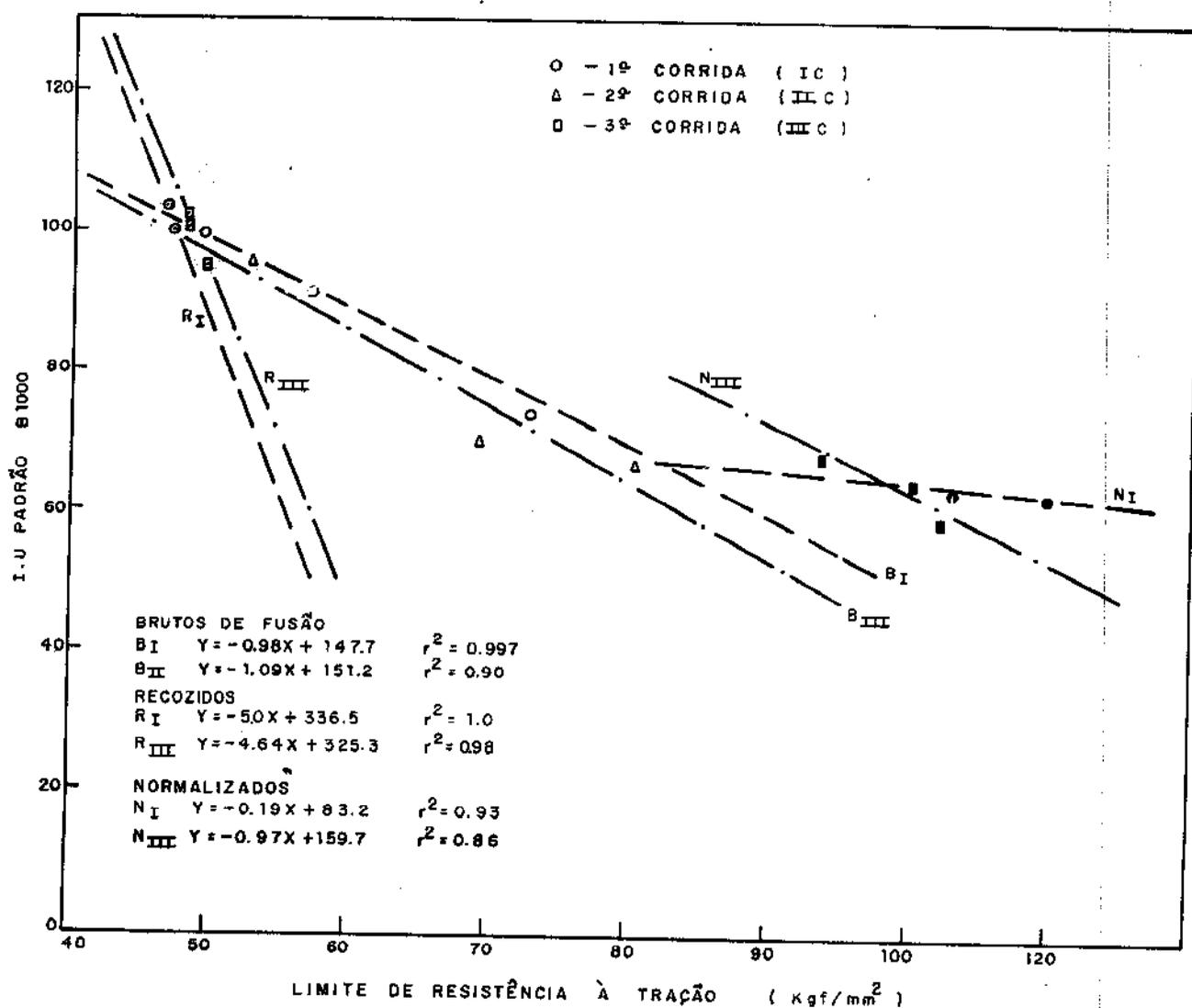


Figura 114 - Correlação entre os índices de usinabilidade DATSKO e o limite de resistência à tração para os diversos materiais ensaiados.

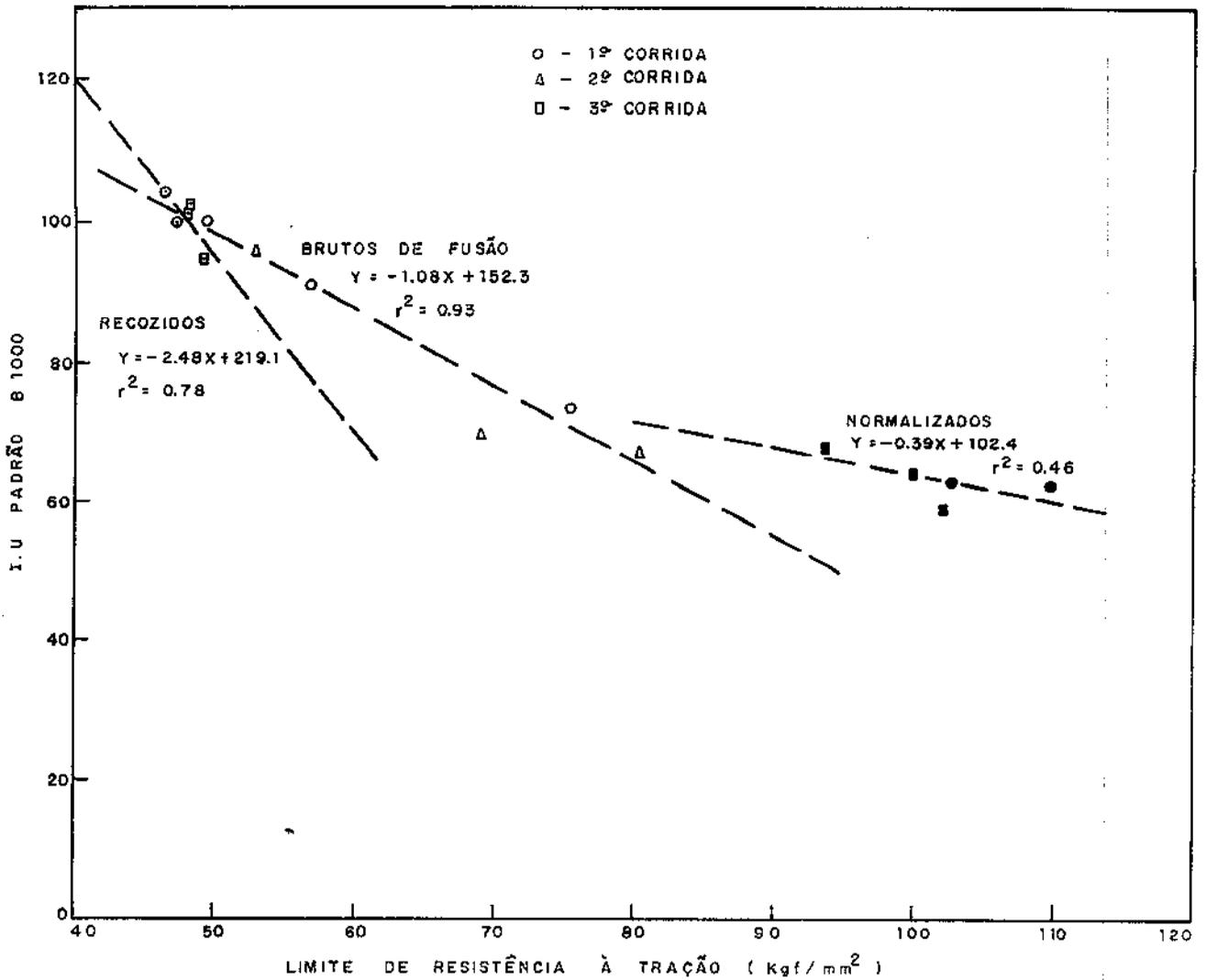


Figura 115 - Verificação da tendência da variação da usinabilidade DATSKO com o limite de resistência à tração nos vários estados de tratamento térmico.

Esta boa correlação encontrada pode ser devido ao fato de que a usinabilidade DATSKO é de certa forma função do limite de resistência a tração pois, uma das variáveis que participa do seu cálculo é a relação de área na ruptura por ocasião do ensaio de tração.

5.8.2.4. Discussão conclusiva - Ensaio DATSKO

Os índices de usinabilidade calculados segundo a expressão proposta por DATSKO apresentaram boas correlações com os parâmetros: teor de cobre, dureza e limite de resistência à tração. Sem proceder-se uma correlação deste índice com os demais aqui estudados pode-se dizer em função dos resultados apresentados, que eles estão bastante coerentes com os demais índices de usinabilidade.

O parâmetro de comparação que é utilizado no cálculo deste índice é a velocidade v_{60} , cuja expressão proposta por DATSKO para o seu cálculo, envolve quatro variáveis descritas a seguir.

Dureza Brinell (HB)
 Condutibilidade térmica (K)
 Relação de área da ruptura ($1/R_f$)
 Comprimento característico (q)

DATSKO [10] afirma que estas variáveis devem ser tomadas em uma temperatura intermediária entre a ambiente e a temperatura na qual a ferramenta tem a sua aresta cortante destruída.

No caso das ferramentas de aço rápido, esta temperatura seria entre 525 e 565°C. Disto resulta que a temperatura de referência para as propriedades seria aproximadamente 320°C.

Neste trabalho, tais variáveis tiveram seus valores de referência tomados à temperatura ambiente e os valores encontrados para os índices de usinabilidade são compatíveis com os demais ensaios realizados.

É oportuno ressaltar que as variáveis citadas são todas referentes ao material usinado, nada tendo a ver com a temperatu-

ra do gume cortante da ferramenta. Por outro lado a peça submetida a uma operação de usinagem jamais ficará sujeita a um nível de temperatura igual a pelo menos 1/4 da temperatura do gume cortante pois a parcela do calor gerado e dissipado pela peça é pequena.

A expressão 23 que foi utilizada para o cálculo da velocidade v_{60} é a seguinte:

$$v_{60} = \frac{17,3}{q} \left(\frac{K}{HB} \right) \left(\frac{1}{Rf} \right)^{0,5}$$

No caso dos ferros fundidos ensaiados a influência da temperatura é relatada a seguir:

- A dureza (HB) diminui com o aumento da temperatura;
- A condutibilidade térmica (K) permanece praticamente inalterável;
- $(1/Rf)^{0,5}$ diminui com o aumento da temperatura, trata-se de uma redução pequena;
- O comprimento característico quase não é influenciado pela temperatura.

Resumindo, a variável que mais influencia sofre é a dureza e a sua redução causaria um aumento na velocidade v_{60} .

Como a velocidade v_{60} significa a velocidade de corte para uma vida de 60 minutos, ela crescendo para uma mesma vida significa mais facilidade de usinar ou uma melhor usinabilidade.

Esta melhor usinabilidade é devida unicamente a temperatura de referência das variáveis citadas sem entretanto traduzir a realidade do sistema peça-ferramenta-máquina-dispositivo.

Acrescente-se que o aumento na velocidade v_{60} aconteceria para todos os ferros fundidos ensaiados, como o índice de usinabilidade é o resultado da comparação destas velocidades para o material ensaiado e o padrão, as diferenças nos valores dos índices de usinabilidade seria função das influências da temperatura sobre as propriedades de cada material.

Naturalmente que se as variações fossem iguais para to-

dos os materiais o I.U. permaneceria o mesmo. Mas, os valores poderiam também ser bastante diferentes daqueles aqui encontrados.

Obviamente as observações feitas referem-se ao estudo da usinabilidade dos ferros fundidos nodulares.

5.9. COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES DE USINABILIDADE

5.9.1. Resultados

Como observou-se nos itens precedentes, nem todos os índices de usinabilidade puderam ser calculados com referência ao padrão, Aço SAE 1212, por esta razão todos os índices serão comparados com referência ao ferro fundido de código B1000 (bruto de fusão, sem cobre).

A tabela 34 apresenta os diversos índices de usinabilidade dos ensaios realizados e as variações nas propriedades Dureza e limite de resistência para os vários materiais com referência ao padrão B1000.

A tabela 35 mostra os resultados das correlações entre os índices da tabela 34 em função das diferentes corridas e estado de tratamento térmico. Os resultados das correlações são apresentados em função do coeficiente de correlação (r).

5.9.2. Discussão

5.9.2.1. Comparação dos resultados e correlações

Foram calculados sete índices de usinabilidade com base nos seguintes grupos de ensaios:

- a) Ensaio de torneamento cilíndrico
- b) Ensaio de torneamento de faceamento com ferramentas 1 e 2
- c) Método indireto de determinação da usinabilidade.

| MATERIAL CÓDIGOS | VARIAÇÃO [%] HB | VARIAÇÃO [%] OR | ÍNDICES DE USINABILIDADE | | | | | | DATSKO |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------|
| | | | T.C. | Θ_v | Θ_m | MATHON F1 | MATHON F2 | v_{LF} 800 | |
| B1000 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| B1034 | 118 | 116 | 86 | 85 | 87 | 79 | 97 | 90 | 91 |
| B1070 | 150 | 153 | 53 | 77 | 83 | 76 | 93 | 81 | 74 |
| R1000 | 95 | 94 | 123 | 112 | 106 | 120 | 131 | 125 | 104 |
| R1034 | 96 | 94 | 110 | 110 | 103 | 112 | 127 | 122 | 104 |
| R1070 | 100 | 96 | 94 | 101 | 94 | 110 | 126 | 116 | 100 |
| N1000 | 160 | 203 | 34 | 89 | 97 | 55 | 70 | 65 | 64 |
| N1034 | 173 | 208 | 29 | 76 | 83 | 42 | 69 | 63 | 63 |
| N1070 | 178 | 221 | 27 | 69 | 76 | 40 | 58 | 59 | 62 |
| B2000 | 105 | 107 | 73 | 99 | 100 | 89 | | | 96 |
| B2061 | 155 | 140 | 49 | 73 | 77 | 75 | | | 70 |
| B2104 | 104 | 163 | 34 | 71 | 76 | 68 | | | 67 |
| R3000 | 97 | 98 | 98 | 95 | 97 | 111 | | | 102 |
| R3037 | 98 | 98 | 91 | 95 | 97 | 97 | | | 101 |
| R3090 | 106 | 101 | 87 | 95 | 97 | 86 | | | 95 |
| N3000 | 150 | 190 | 42 | 75 | 81 | 45 | | | 68 |
| N3037 | 173 | 203 | 31 | 72 | 78 | 42 | | | 64 |
| N3090 | 187 | 207 | 28 | 66 | 73 | 37 | | | 59 |

Tabela 34 - Comparação entre os diversos índices de usinabilidade com referência padrão B1000.

| ÍNDICES CORRELACIONADOS | 1.ª CORRIDA | | | 2.ª CORRIDA | | 3.ª CORRIDA | |
|----------------------------|-----------------------|---------------|------------------|-----------------------|-------------------|------------------|--|
| | BRUTOS DE FUSÃO | RECOZI DOS | NORMALI ZADOS | BRUTOS DE FUSÃO | RECOZI DOS | NORMALI ZADOS | |
| | | | | | | | |
| T.C e Θ_v | 0,92 | 0,96 | 0,9997 | 0,95 | Θ_v const. | 0,87 | |
| T.C e Θ_m | 0,87 | 0,98 | 0,998 | 0,94 | Θ_m const. | 0,90 | |
| T.C. e Mathon F1 | 0,80 | 0,92 | 0,990 | 0,998 | 0,996 | 0,90 | |
| T.C. e Mathon F2 | 0,990 | 0,92 | 0,77 | - | - | - | |
| T.C. e VLF800 | 0,97 | 0,991 | 0,91 | - | - | - | |
| T.C. e Datsko | 0,998 | 0,89 | 0,97 | 0,96 | 0,85 | 0,93 | |
| Θ_v e Θ_m | 0,992 | 0,997 | 0,9998 | 0,9996 | const. | 0,9990 | |
| Θ_v e Mathon F1 | 0,97 | 0,77 | 0,97 | 0,96 | Θ_v const. | 0,9990 | |
| Θ_v e Mathon F2 | 0,97 | 0,77 | 0,81 | - | - | - | |
| Θ_v e VLF 800 | 0,990 | 0,990 | 0,92 | - | - | - | |
| Θ_v e Datsko | 0,94 | 0,990 | 0,990 | 0,9995 | Θ_v const. | 0,992 | |
| Θ_m e Mathon F1 | 0,994 | 0,82 | 0,98 | 0,96 | Θ_m const. | 1,00 | |
| Θ_m e Mathon F2 | 0,93 | 0,82 | 0,80 | - | - | - | |
| Θ_m e VLF 800 | 0,96 | 0,996 | 0,93 | - | - | - | |
| Θ_m e Datsko | 0,89 | 0,97 | 0,98 | 0,998 | Θ_m const. | 0,997 | |
| Mathon F1 e Mathon F2 | 0,88 | 1,0 | 0,66 | - | - | - | |
| Mathon F1 e VLF 800 | 0,93 | 0,87 | 0,83 | - | - | - | |
| Mathon F1 e Datsko | 0,83 | 0,66 | 0,92 | 0,97 | 0,90 | 0,997 | |
| Mathon F2 e VLF 800 | 0,994 | 0,87 | 0,97 | - | - | - | |
| Mathon F2 e Datsko | 0,996 | 0,660 | 0,90 | - | - | - | |
| VLF 800 e Datsko | 0,98 | 0,94 | 0,98 | - | - | - | |

Tabela 35 - Coeficientes de correlação (r) para as correlações entre os diversos índices de usabilidade.

Dos ensaios de torneamento cilíndrico foram calculados os índices, T.C., θ_v e θ_m .

Dos ensaios do torneamento de faceamento foram calculados os índices, Mathon com ferramenta 1, Mathon com ferramenta 2 e v_{LF} 800.

Por último o índice Datsko resultante da determinação indireta da usinabilidade.

Para tornar mais compreensível a análise das correlações subdividiu-se os índices em função dos grupos a, b e c descritos anteriormente.

Grupo a: Neste grupo, o índice T.C. é baseado no critério de vida enquanto θ_v e θ_m baseiam-se na temperatura de usinagem.

Da tabela 34 se observa que os resultados do índice T.C se assemelham aos dos outros dois apenas para os materiais recozidos. Nos demais estados de tratamento térmico os resultados são bastante diferentes.

Analisando a tabela 35, pode-se dizer que apesar dos resultados diferentes citados, o índice T.C. apresenta uma correlação muito boa com θ_v e θ_m no estado normalizado e nos demais estados de tratamento térmico tem-se uma correlação regular.

Os índices θ_v e θ_m apresentam uma ótima correlação em todos estados de tratamento térmico como já foi comentado no item 5.5.

Com relação aos índices dos outros grupos se observou que:

O índice T.C. apresentou uma correlação considerada de regular para boa com os índices dos grupos b e c.

Os índices θ_v e θ_m correlacionaram-se de uma forma boa com os índices dos outros grupos.

Grupo b: Neste grupo, todos os índices baseiam-se no critério de vida da ferramenta.

Da observação da tabela 34 se verifica que os resultados do índice Mathon com a ferramenta 1 são inferiores ao do Ma-

thon com ferramenta 2 e do v_{LF} 800. Por outro lado os resultados destes dois últimos são mais semelhantes entre si.

Na tabela 35 se verifica que as correlações entre os índices deste grupo são muito dependentes do estado de tratamento térmico.

A influência da ferramenta no ensaio Mathon já foi comentada no item 5.7.3 e ela é maior em função do grau de dificuldade de usinar ou da dureza do ferro fundido ensaiado.

Comportamentos bem distintos são observados nas correlações com os outros índices.

Os índices Mathon Ferramenta 1 e 2 apresentam melhor correlação nos materiais de menor dureza (recozidos), esta correlação diminui com o aumento da dureza até os normalizados onde a correlação é fraca.

Os índices Mathon Ferramenta 1 e 2 em relação ao índice v_{LF} 800 apresentam uma correlação boa para os materiais no estado bruto de fusão, de regular para boa no estado normalizado e regular no estado recozido.

Com relação ao índice Datsko se observou o seguinte:

Os índices Mathon ferramenta 1 e 2 apresentaram uma boa correlação com esses índices exceção feita aos materiais recozidos da 3ª corrida onde a correlação foi fraca.

O índice v_{LF} 800 apresentou uma boa correlação com o índice DATSKO.

Grupo c: Neste grupo tem-se apenas o índice DATSKO que já foi comentado no item 5.8.2.4. Apesar deste índice ser o resultado de uma determinação indireta da usinabilidade e levando em consideração as observações feitas no item citado, em função da tabela 35, se observa que este índice se correlacionou de forma muito boa com os índices obtidos em ensaios experimentais.

Os baixos valores do coeficiente de correlação obtidos no material recozido citado anteriormente para os índices Mathon ferramenta 1 e 2 são atribuídos a semelhança das propriedades mecânicas dos materiais neste estado de tratamento térmico. Isto le

vou a obtenção de índices DATSKO iguais ou muito próximos nestes materiais diferentes dos resultados obtidos experimentalmente.

Todavia, este fato não invalida a correlação considerada muito boa obtida no âmbito geral.

5.9.2.2. Comparação dos índices de usinabilidade em função da variação do teor de cobre.

As figuras 116 a 121 apresentam estas comparações em função do estado de tratamento térmico e corridas.

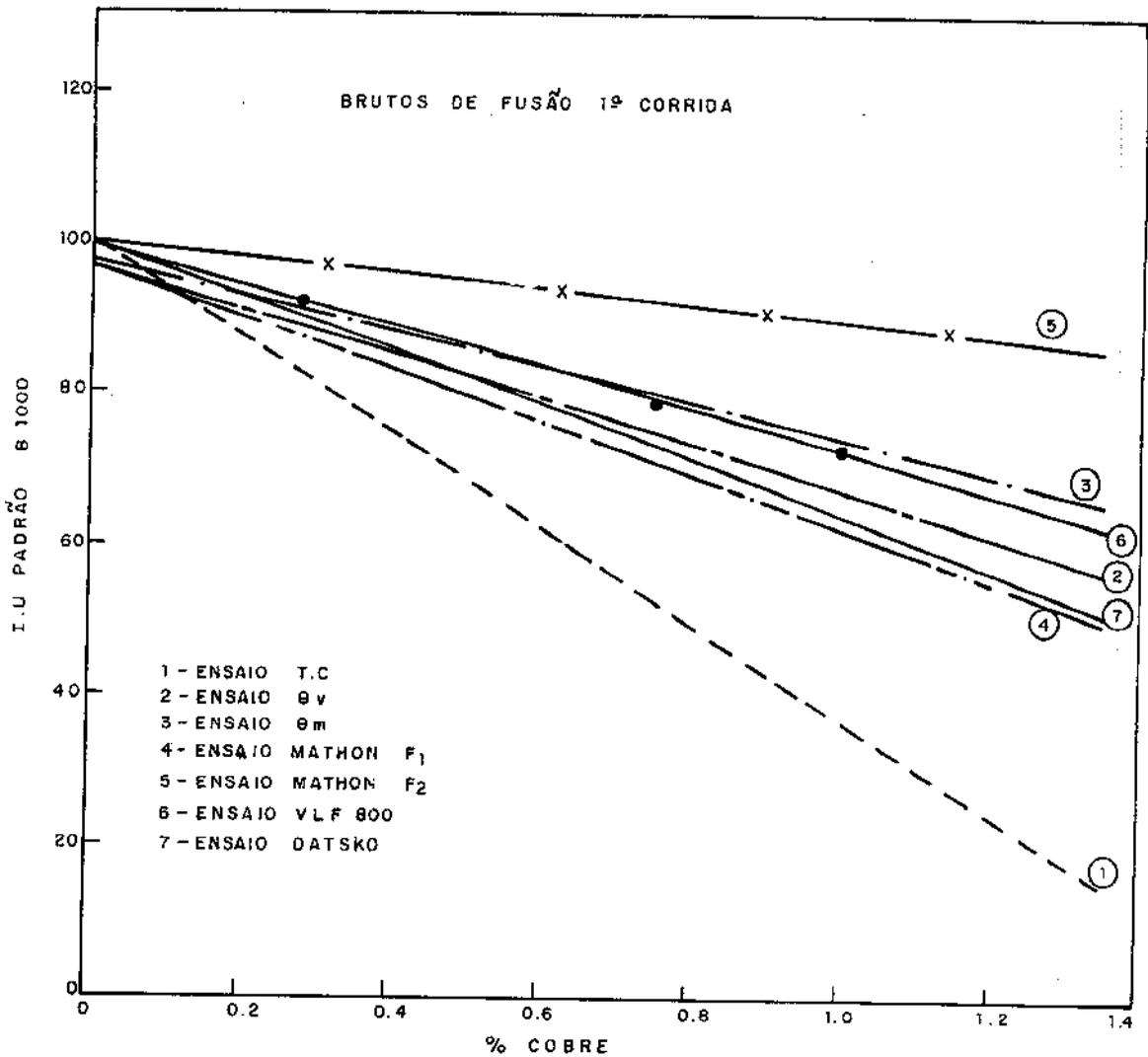


Figura 116 - Comparação dos diversos índices de usinabilidade em função do teor de cobre, materiais brutos de fusão da 1ª corrida.

Observando estas figuras se verifica que a adição de cobre aos ferros fundidos nodulares provoca uma redução na usinabilidade em todos os estados de tratamento térmico, segundo todos os índices de usinabilidade calculados.

Estas reduções na usinabilidade são mais significativas no estado bruto de fusão e esta redução é devida ao efeito perlitizante do cobre, visto que a matriz perlítica é mais difícil de usinar devido a sua maior dureza e resistência a tração [1,2,4,6,18,19,20,21].

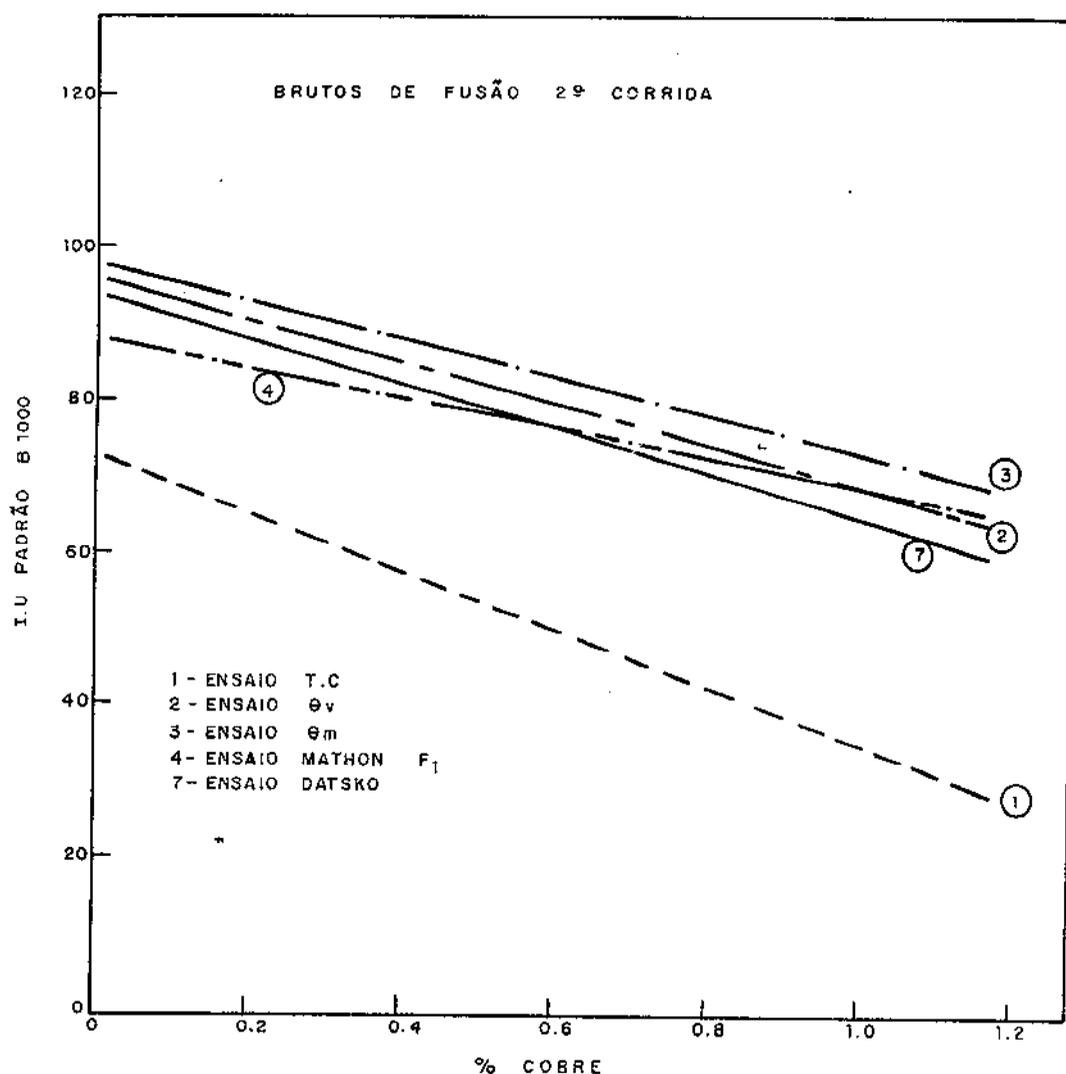


Figura 117 - Comparação dos diversos índices de usinabilidade em função do teor de cobre, materiais brutos de fusão da 2ª corrida.

Nos ferros fundidos recozidos, ocorre uma variação menor na usinabilidade comparado àquela ocorrida para os brutos de fusão e neste caso a redução é devida a ação do cobre sobre a matriz ferrítica causando um endurecimento por solução sólida como comentou-se na revisão da literatura [6].

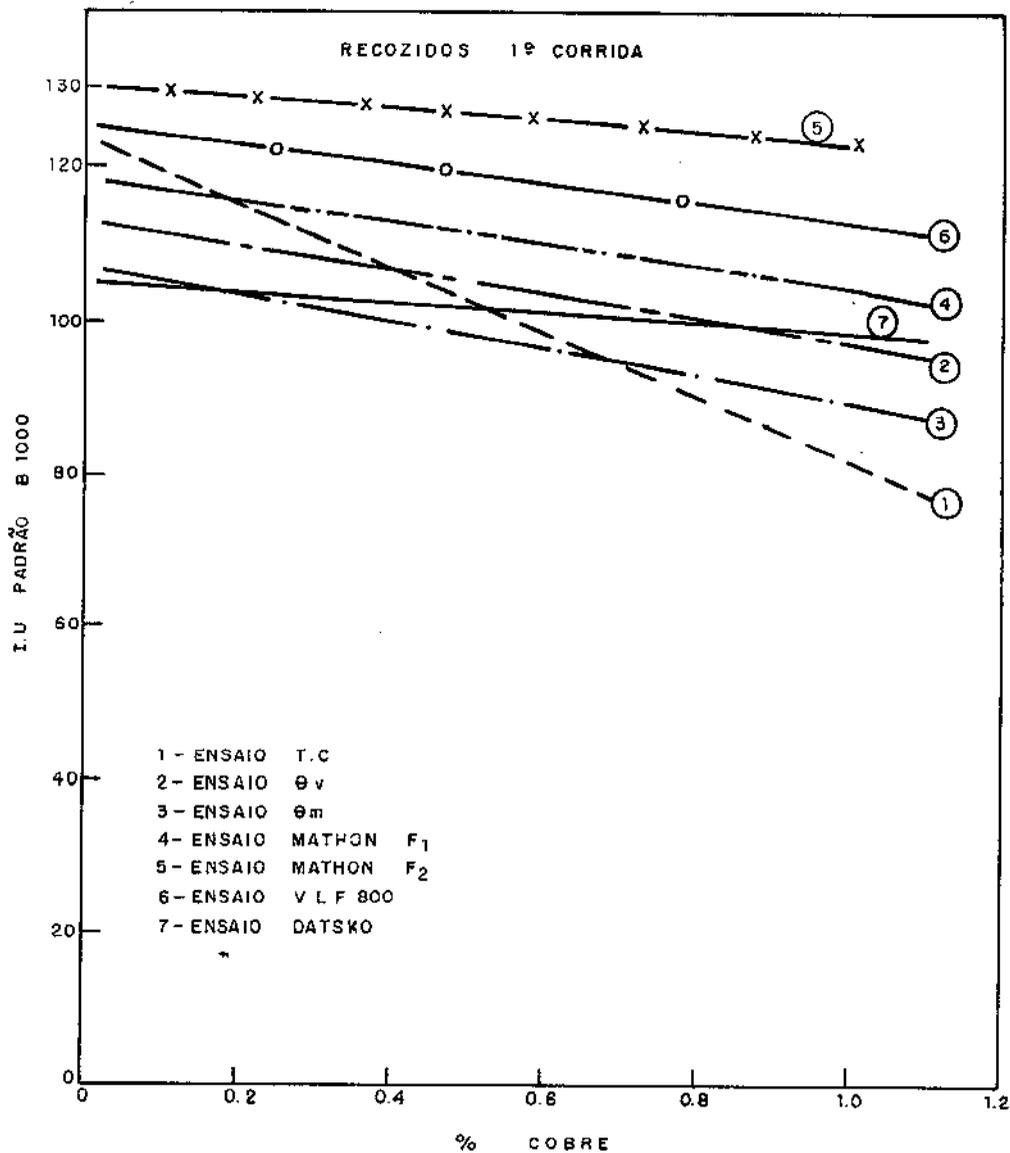


Figura 118 - Comparação dos diversos índices de usinabilidade em função do teor de cobre, materiais recozidos da 1.^a corrida.

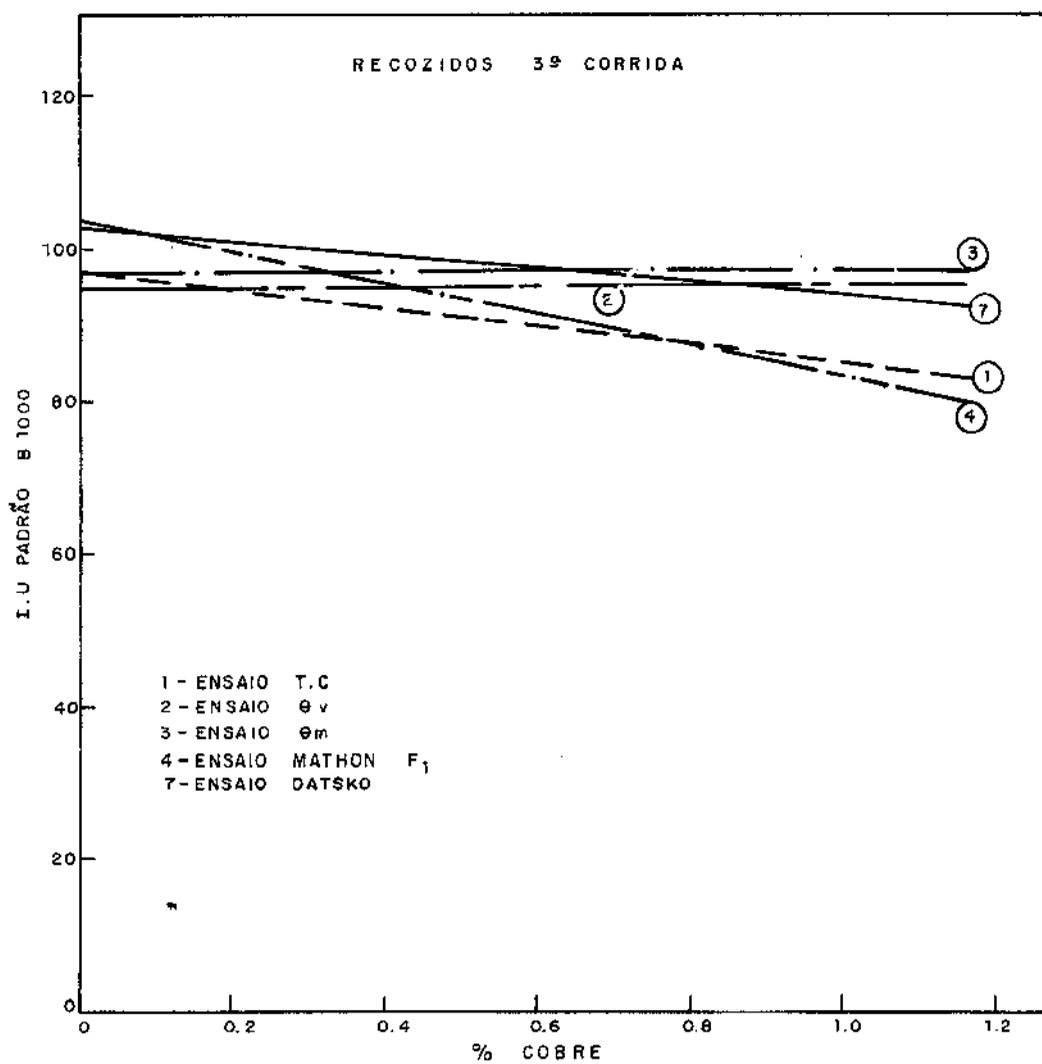


Figura 119 - Comparação dos diversos índices de usinabilidade em função do teor de cobre, materiais recozidos da 3ª corrida.

Para os materiais normalizados, ocorre uma pequena redução na usinabilidade em função do aumento da perlita na matriz e o conseqüente refino dela em conseqüência da adição do cobre.

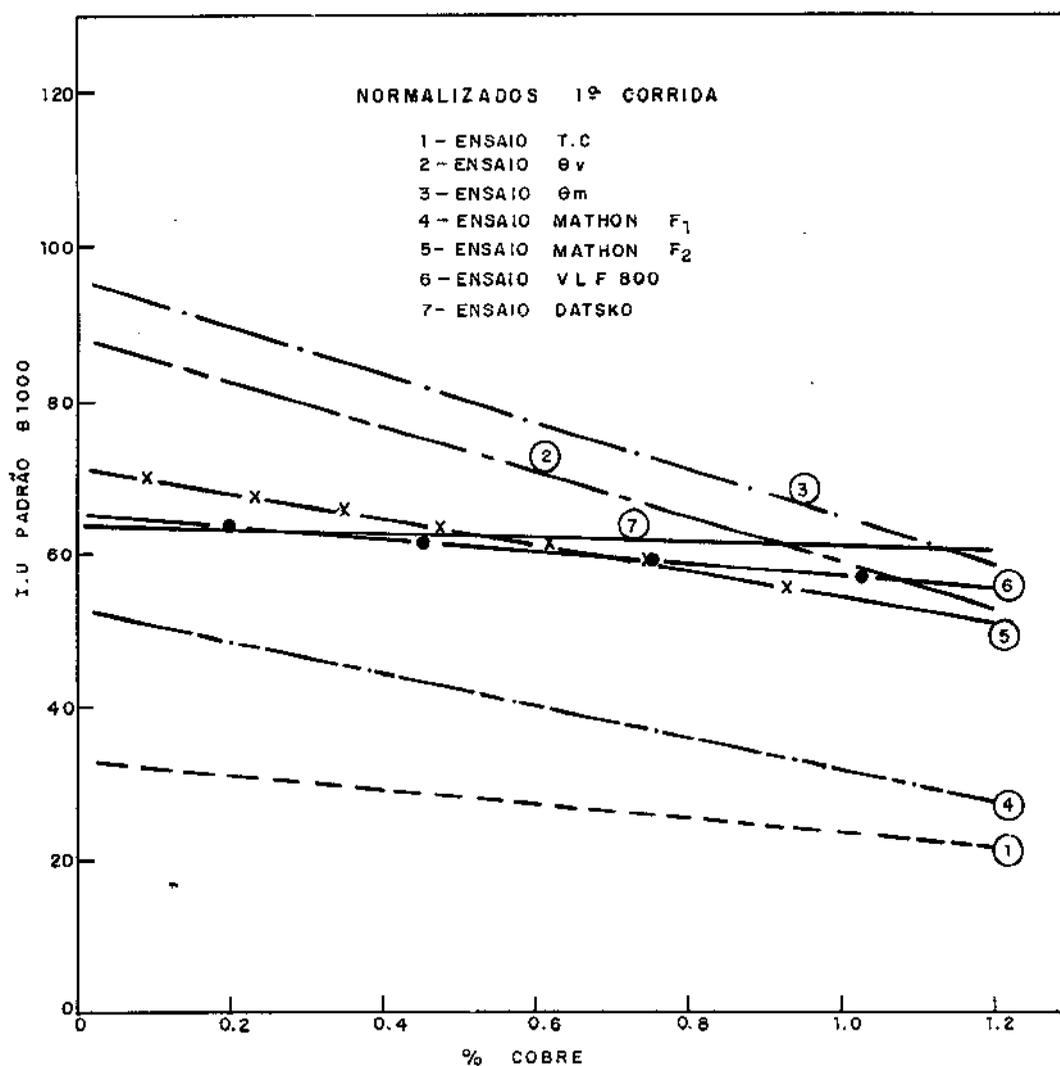


Figura 120 - Comparação dos diversos índices de usinabilidade em função do teor de cobre, materiais normalizados da 1ª corrida.

O índice de usinabilidade T.C. em praticamente todos os casos é o que apresenta valores menores enquanto que os valores mais elevados são devidos aos índices θ_m e Mathon com ferramenta 2.

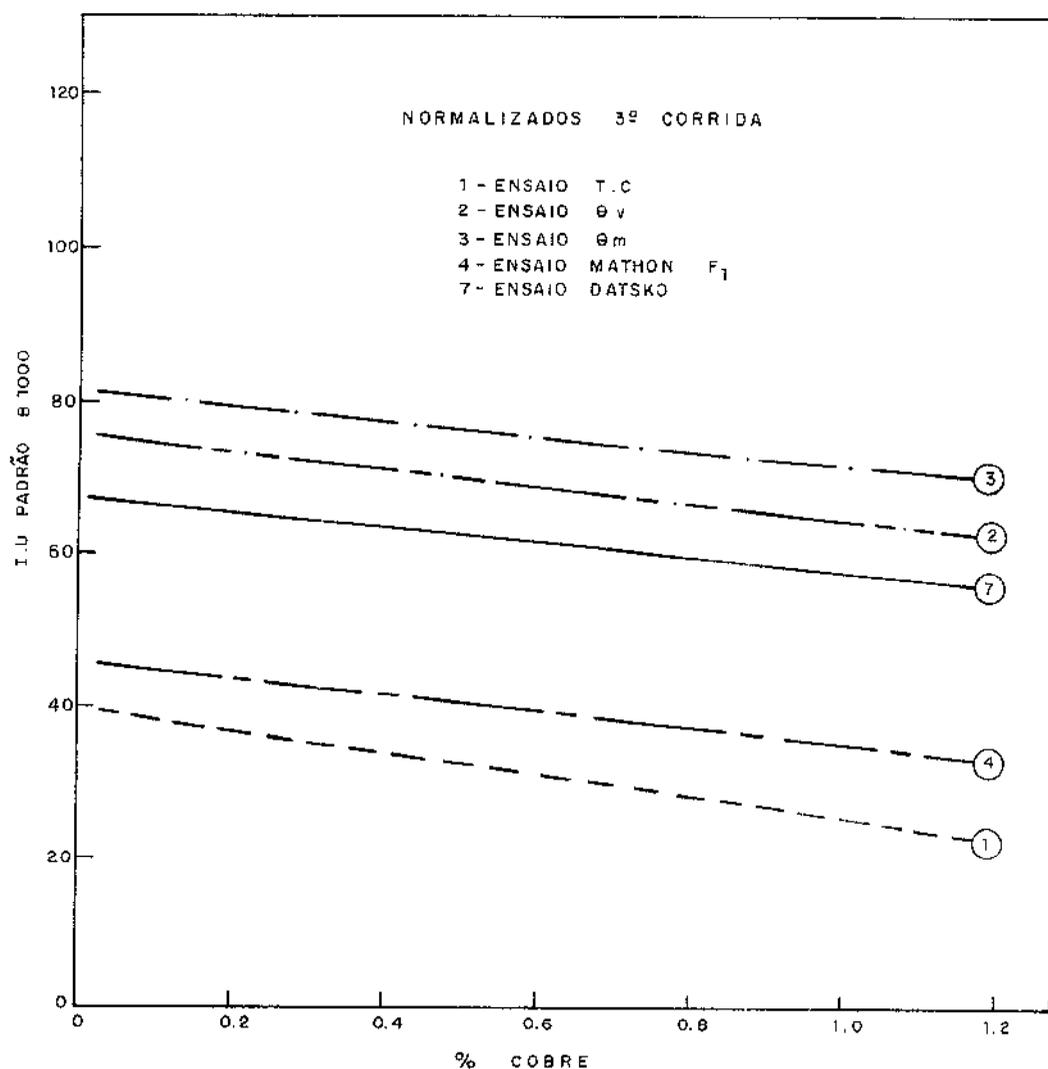


Figura 121 - Comparação dos diversos índices de usinabilidade em função do teor de cobre, materiais normalizados da 3ª corrida.

5.9.2.3. Comparação dos índices de usinabilidade em função da dureza Brinell.

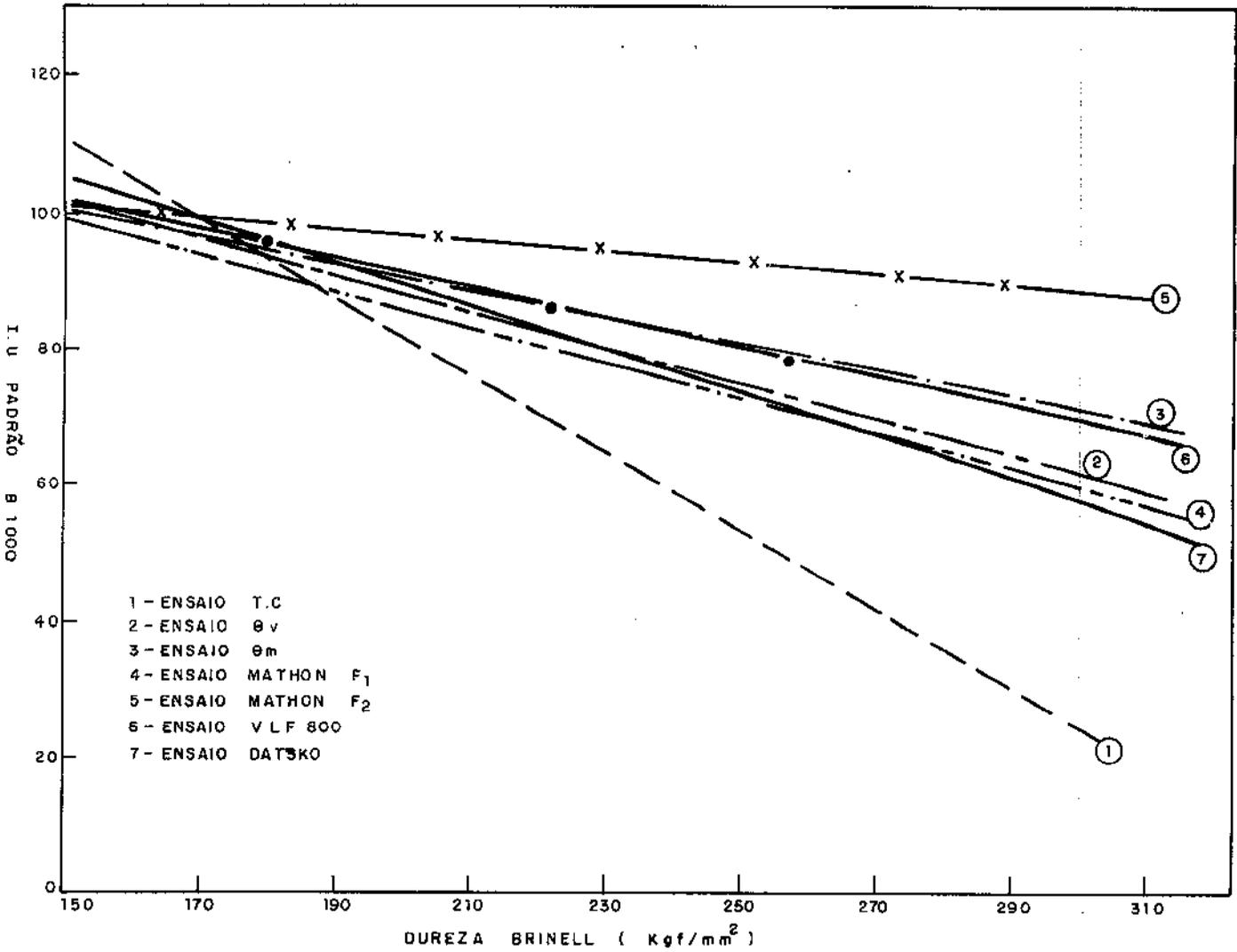


Figura 122 - Comparação dos diversos índices de usinabilidade em função da dureza Brinell, materiais brutos de fusão da 1ª corrida.

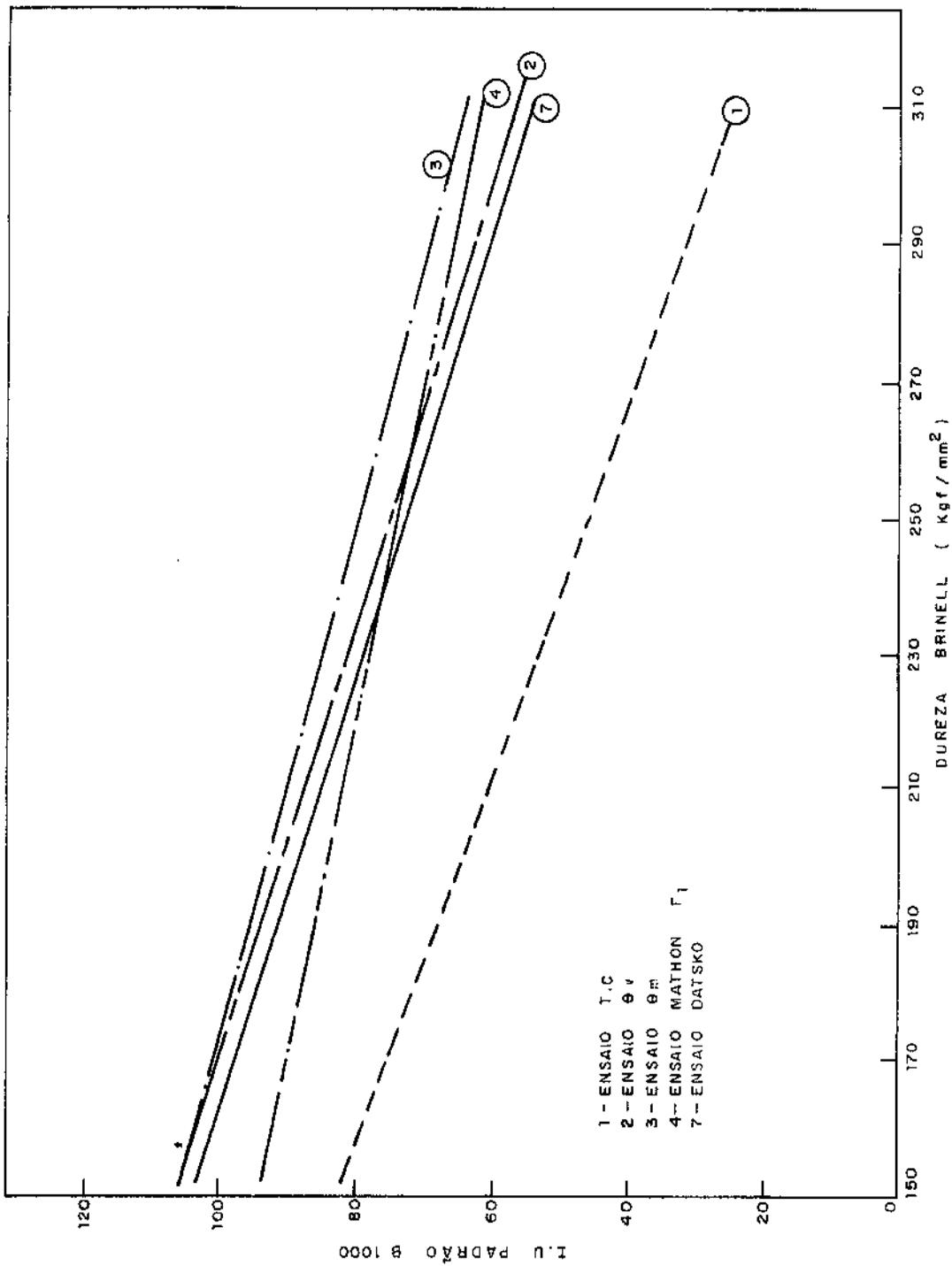


Figura 123 - Comparação dos diversos índices de usinabilidade em função da dureza Brinell, materiais brutos de fusão da 2ª corrida.

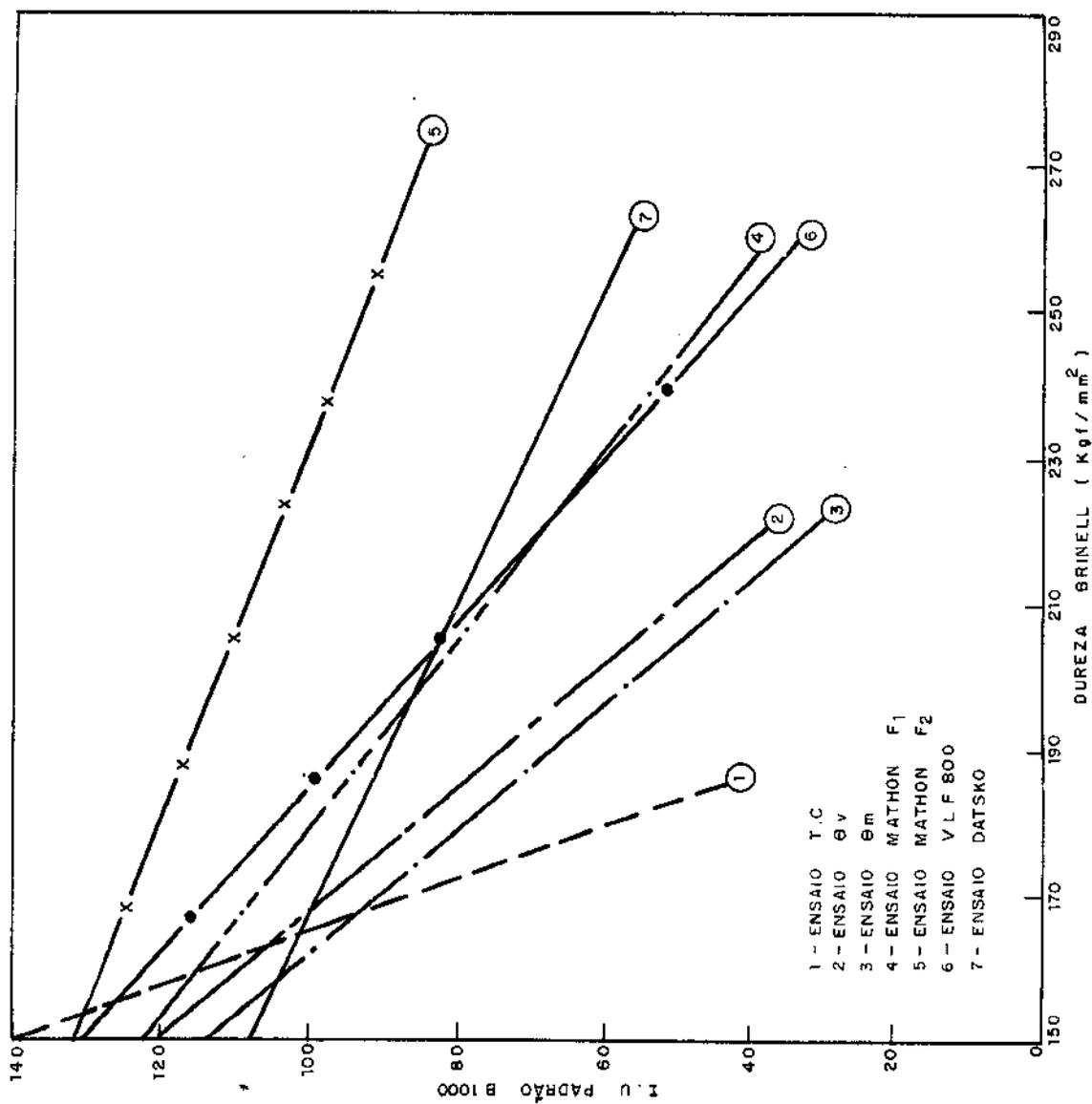


Figura 124 - Comparação dos diversos índices de usinabilidade em função da dureza Brinell, materiais recozidos da 1.ª corrida.

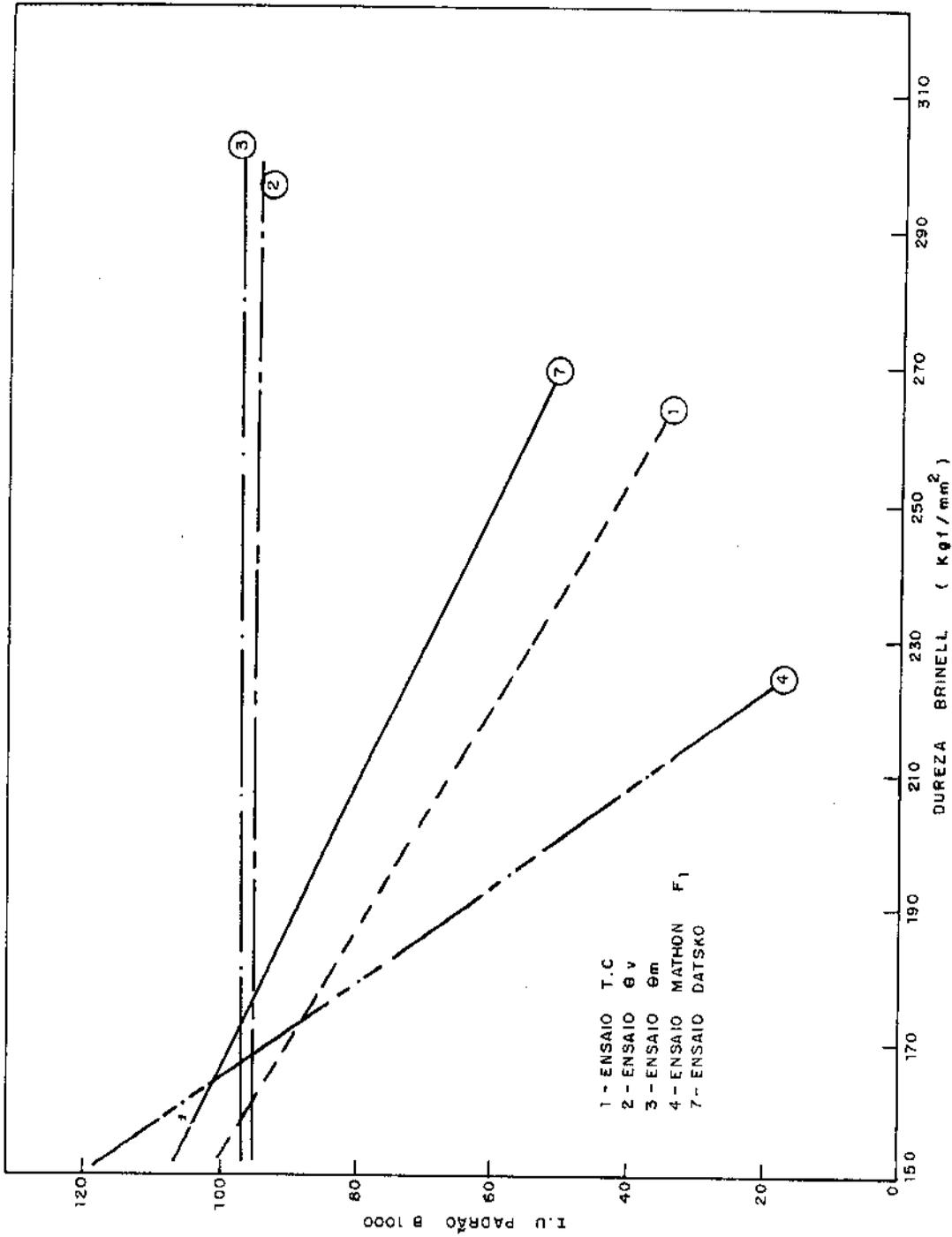


Figura 125 - Comparação dos diversos índices de usinabilidade em função da dureza Brinell, materiais recozidos da 3ª corrida.

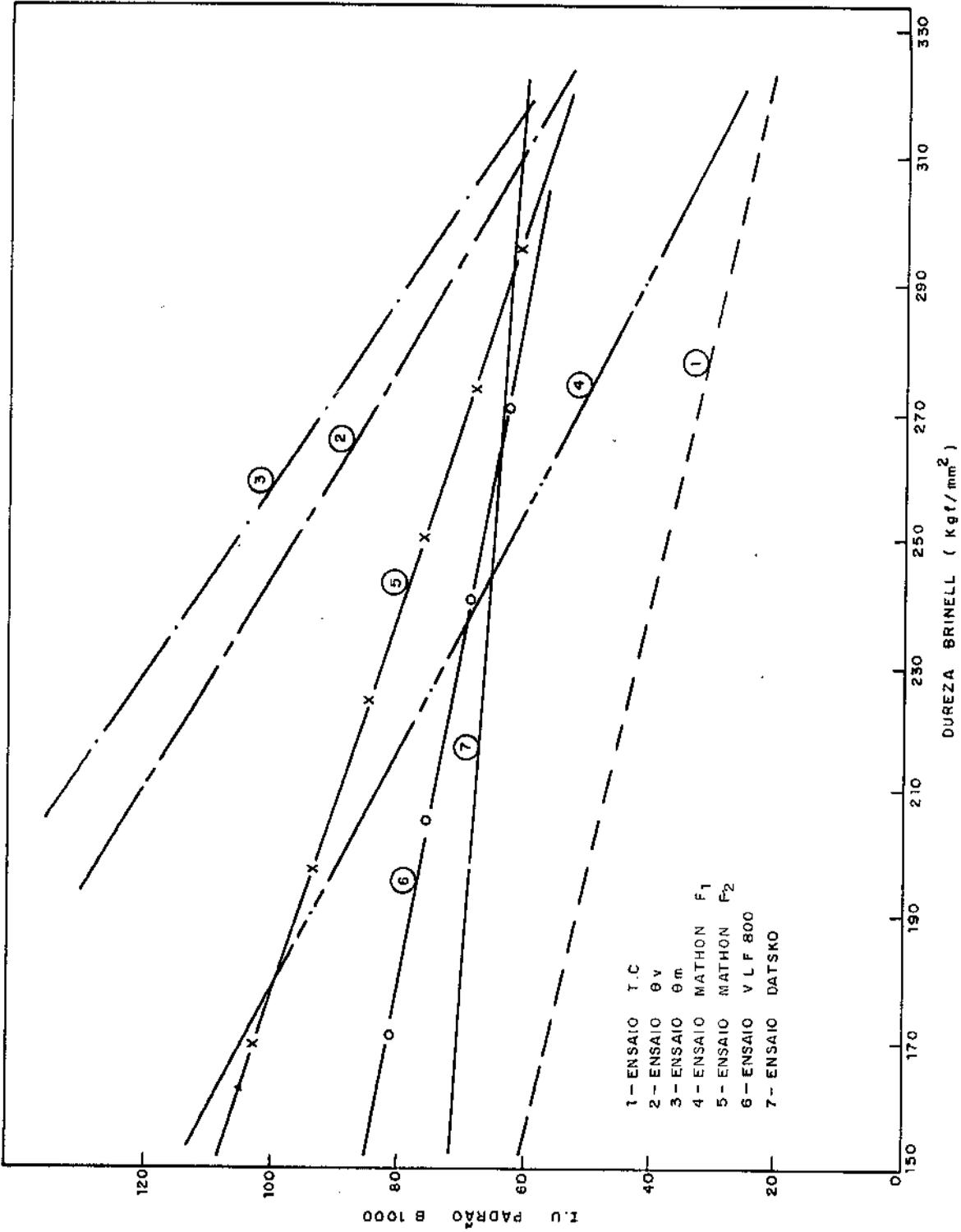


Figura 126 - Comparação dos diversos índices de usinabilidade em função da dureza Brinell, materiais normalizados da lâ corrida.

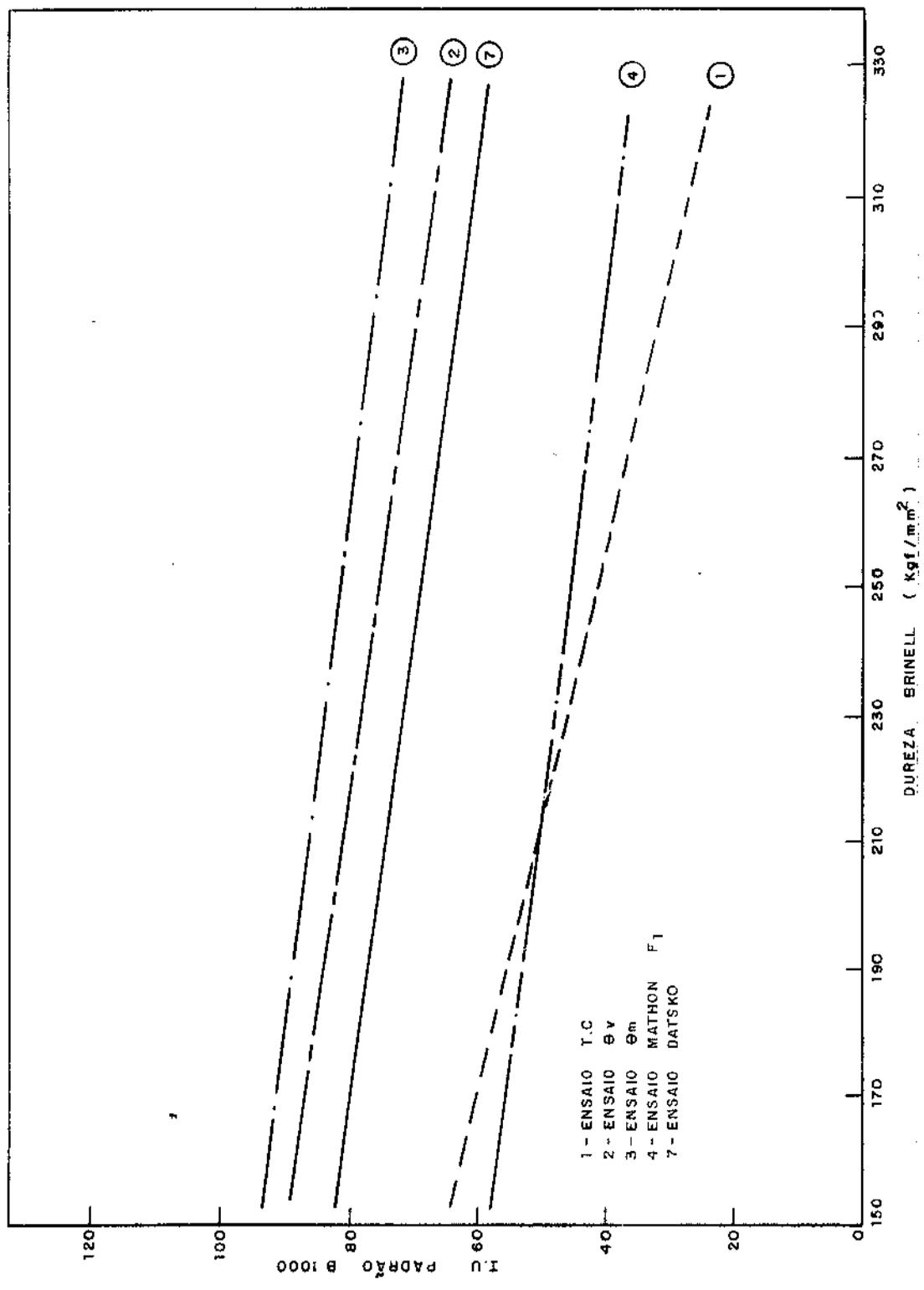


Figura 127 - Comparação dos diversos índices de usinabilidade em função da dureza Brinell, materiais normalizados da 3ª corrida.

As figuras 122 e 127 apresentam as comparações dos índices de usinabilidade em função da dureza Brinell para os vários estados de tratamento térmico e corridas.

Através da observação destas figuras se verifica que a usinabilidade sempre diminui em função do aumento da dureza segundo todos os índices de usinabilidade. Na verdade, esta correlação com a dureza é consequência do teor de cobre que elevou a du-reza e o limite de resistência à tração.

Contudo, pode-se dizer também que, no caso dos ferros fundidos nodulares a dureza é um bom indicador da usinabilidade, como afirmou MATHON [29]. O mesmo pode-se dizer com relação ao limite de resistência à tração pois, esta propriedade se correlacionou muito bem com a dureza.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

6.1. Com relação a influência da adição de cobre aos ferros fundidos nodulares pode-se concluir que:

- Considerando-se que os ferros fundidos nodulares possuam composição hipereutética observou-se que: quanto à estrutura da matriz existem as seguintes influências:

- a) Não se observou nenhum efeito grafitizante do cobre, possivelmente em razão dos teores um pouco elevados de silício, utilizados nos ferros fundidos ensaiados.
 - b) O efeito predominante foi o perlitizante que ocorrem em dois estados de tratamento térmico; bruto de fusão e normalizado com uma maior influência sobre o estado bruto de fusão.
 - c) Não se observou efeito degenerativo sobre a forma da grafita para os teores utilizados.
 - d) Verificou-se que há uma tendência de refinar a perlita presente na matriz nos teores mais elevados para o estado bruto de fusão e no estado normalizado para todos os teores.
 - e) Devido a dureza bastante homogênea da matriz pode-se dizer que não houve formação de pontos duros nem moles.
- Quanto as propriedades mecânicas resultantes:
- f) Nos materiais no estado bruto de fusão ocorreram aumentos significativos na dureza e limite de resistência à tração tais como:
para 0,70 e 1,04% de cobre, a dureza aumentou de 50 e 59% respectivamente enquanto o limite de resistência cresceu de 53 e 56%.
 - g) O alongamento foi bastante afetado, reduziu-se em 84 e 87,5% para teores de 0,61 e 1,04% respectivamente, para

os materiais no estado bruto de fusão.

- h) No estado recozido as variações observadas foram bastante pequenas. A dureza e o limite de resistência aumentaram 5 e 2% respectivamente e o alongamento praticamente não se alterou para um acréscimo de 0,70% de cobre.
 - i) No estado normalizado, este mesmo teor de cobre (0,70%) provocou aumentos na dureza e limite de resistência a tração de 15 e 18% respectivamente e uma redução no alongamento de aproximadamente 40%.
 - j) As causas das variações observadas nas propriedades mecânicas são: o efeito perlitizante e o refinamento da perlita nos estados bruto de fusão e normalizados. No estado recozido, possivelmente em razão de um certo endurecimento por solução sólida.
 - l) As variações citadas estão dentro de um nível de confiança de 95% e dispersões médias inferiores a 5%.
- Quanto a usinabilidade:
- m) Nos estados brutos de fusão ocorreram as variações mais significativas. A usinabilidade reduziu-se segundo todos os índices de usinabilidade. Para um teor de 1,04% a usinabilidade decresceu de 39% segundo o índice T.C. e 21% segundo o índice MATHON com ferramenta 1.
 - n) Considerando-se que os dois índices citados na conclusão anterior foram calculados com base em ensaios realizados com operações de usinagem e geometria da ferramenta diferentes mas, com um mesmo material da ferramenta, pode-se dizer que na média a usinabilidade reduziu-se de 30%.
 - o) Em função das duas últimas conclusões pode-se afirmar que: nos estados brutos de fusão a adição de elementos de liga perlitizantes como o cobre é muito vantajosa em termos práticos, pois, ocorrem elevações consideráveis nas propriedades mecânicas dureza e limite de resistência à tração, (vide conclusão f) com uma redução na usinabilidade da média de 30 a 35%.
 - p) Como os ensaios de usinabilidade citados anteriormente,

- foram realizados com ferramenta de aço rápido VK10N, as reduções citadas podem ser bem menores, se forem utilizadas as ferramentas de metal duro na usinagem.
- q) Nos outros estados de tratamento térmico também ocorreram reduções na usinabilidade, só que em proporções bem menores. Isto mostra que o tratamento térmico possui um efeito mais marcante.
 - r) As causas das variações citadas para a usinabilidade são as mesmas relatadas em (j).
 - s) Em função da conclusão anterior pode-se dizer que no caso dos ferros fundidos nodulares as propriedades dureza e limite de resistência a tração são bons indicadores da usinabilidade, principalmente a dureza, como afirmou MATHON.
 - t) Considerando que os índices de usinabilidade apresentados estão sujeitos a dispersões médias inferiores a 5% e dentro de um nível de confiança de 95% e ainda que foram utilizados critérios distintos nos ensaios efetuados, pode-se afirmar que a usinabilidade dos ferros fundidos nodulares com as composições químicas utilizadas neste trabalho, se reduzem com a adição de cobre em todos os estados de tratamento térmico.
 - u) Em razão da conclusão anterior, todas as citações da literatura contrárias e relatadas no capítulo dois carecem de qualquer fundamento e só serão aceitas dentro da faixa de erro adotado neste trabalho, zero a 5% de confiança.

6.2. Com relação ao índice de usinabilidade proposto em função da temperatura de usinagem e metodologia de ensaio.

- Como foram propostas duas formas de cálculo, uma bem simples, o índice Θ_v e outra mais complexa, o índice Θ_m , calculados com relação ao mesmo ensaio realizado. Pode-se dizer que:

- a) Em razão da excelente correlação encontrada para os dois índices, pode-se usar apenas o índice Θ_v que é ob-

tido em função da temperatura de usinagem para uma dada velocidade de corte.

- Quanto a metodologia e validade deste índice:

- b) considerando-se a boa correlação apresentada com índices obtidos em ensaios normalizados pela norma AFNOR, índice T.C. e MATHON. Pode-se afirmar que o índice Θ_v pode ser utilizado para avaliar a usinabilidade em ensaios de torneamento.
- c) A consideração efetuada quanto as características termoelétricas dos materiais ensaiados é verdadeira pois, em caso contrário não se obteriam correlações boas do índice Θ_v com os demais.
- d) O método de ensaio apresentou uma precisão excelente, com dispersões máximas inferiores a 3,2%. Isto comprova que a temperatura de usinagem pode ser medida pelo método do termopar peça-ferramenta com o auxílio das escovas de prata.
- e) Para utilização desta metodologia em materiais com características termoelétricas diferentes é necessário se proceder a aferição dos termopares e a comparar as temperaturas reais em $^{\circ}\text{C}$.

6.3. Com relação a comparação dos índices de usinabilidade:

- a) o índice de usinabilidade T.C. foi o que apresentou valores indicativos menores.
- b) A causa da conclusão anterior pode ser atribuída possivelmente a razão de variação dos incrementos da velocidade de corte utilizada. Usou-se 1,25 enquanto a norma previa o valor 1,12.

Como $1,25 = (1,12)^2$ é possível que o processo de desgaste da ferramenta tenha sido acelerado, mesmo levando em conta que o material da ferramenta utilizado era mais resistente ao desgaste que o previsto na norma. Ou ainda, devido ao fato de que o ensaio foi realizado na periferia do lingote.

- c) Em razão da boa correlação encontrada para os índices MATHON com as ferramentas 1 e 2, verificou-se que a maior influência que o material da ferramenta exerce é nos materiais mais difíceis de usinar. Todavia, é viável a utilização do ensaio com ferramentas de aço rápido.
- d) A comparação dos índices de usinabilidade para as duas ferramentas (figura 99) dá uma falsa idéia de que seria melhor a usinagem com a ferramenta de material menos resistente. Tal fato, é explicado em função dos intervalos diferentes de rotações, utilizados para cada ferramenta e também em função da rotação de referência (350 rpm) para o cálculo dos índices de usinabilidade ter sido obtido mediante extrapolações.
- e) O índice de usinabilidade proposto para o ensaio " v_{LF} ", índice v_{LF} 800, apresentou boas correlações com os demais índices de usinabilidade podendo ser utilizado para avaliar a usinabilidade.
- f) O índice de usinabilidade proposto por DATSKO [10] apresentou correlações de regular para boa com os demais índices de usinabilidade.
- g) Em razão da conclusão anterior pode-se dizer que este índice pode ser utilizado para avaliar a usinabilidade dos ferros fundidos nodulares e ressalvadas as observações feitas no item 5.8.2.4.
- h) As diferenças obtidas nos valores dos índices calculados devem-se ao fato de que os índices referem-se a condições diferentes de execução dos ensaios tais como: operação de usinagem, geometria e material da ferramenta e condições de usinagem.

CAPÍTULO 7

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em função das observações realizadas no decorrer deste trabalho são efetuadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- a) Realizar ensaios de usinabilidade de longa duração com materiais de características semelhantes aos aqui utilizados e comparar os resultados.
- b) Verificar a influência da velocidade de corte inicial, bem como da razão da variação dos incrementos de velocidade no ensaio de usinabilidade com torneamento cilíndrico.
- c) Para o mesmo ensaio descrito na sugestão anterior, verificar a influência do material da ferramenta, inclusive com a utilização de ferramentas de metal duro.
- d) Ainda com relação a sugestão b, verificar como a razão e a velocidade inicial influenciam a taxa de evolução do desgaste da ferramenta.
- e) Realizar ensaios de usinabilidade segundo o método da força de avanço constante em materiais semelhantes aos aqui utilizados e comparar os resultados.
- f) Projetar e construir um dispositivo de fixação para a ferramenta e peça, que possibilite a medição da temperatura de usinagem em operações de furação.
- g) Realizar ensaios de usinabilidade do tipo MATHON e comparar a usinabilidade " $D_{0,2}$ " com a usinabilidade BRANDSMA. Verificar a influência da rotação na determinação da velocidade equivalente utilizada na determinação do índice de BRANDSMA.

- h) Realizar ensaios de usinabilidade do tipo MATHON com vários materiais da ferramenta, inclusive o metal duro e determinar a influência do material sobre o ensaio.
- i) Realizar ensaios de usinabilidade do tipo MATHON com peças de diâmetro grande, de modo a permitir a utilização de baixas rotações e comparar as inclinações das retas ($D_{0,2} \times N^m = \text{cte}$) para vários materiais da ferramenta.
- j) Verificar a influência da temperatura de referência para a determinação das variáveis de cálculo do índice DATSKO, no cálculo do índice de usinabilidade.
- k) Determinar a influência da composição química de alguns aços e ferros fundidos nas características termoelétricas.
- l) Determinar a real solubilidade do cobre na ferrita dos ferros fundidos nodulares.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PEARCE, J.G. and BROMAGE, K. - "Copper in Malleable, Spheroidal-graphitic and White Irons". Foundry Trade Journal, march, 1965, pp. 257.
- [2] BROMAGE, K. - "Present Position of Copper in Cast Iron", Foundry Trade Journal, december, 1967, pp. 841.
- [3] NEUMEIER, L.A., BETTS, B.A. and DESY, D.H. - "Tin and Copper combinations in As-Cast Ductile Iron", AFS Transactions, 1974, pp. 131.
- [4] MORROUGH, H. - "The Harmful Influence of Some Residual Elements in Magnesium - Treated Nodular Cast Irons and Their Neutralization by Cerium", B.C.I.R.A. Journal Res. Devel, Vol. 4, 1952, pp. 292.
- [5] BARUCH, T.R., STONE, A.J. and LOWNIE Jr. H.W. - "Influence of Copper on Properties of Ductile Iron", AFS Transactions, Vol. 71, 1963, pp. 699.
- [6] CASTELO BRANCO, C.H. e SOUZA SANTOS, A.B. - "Efeitos da Adição de Cobre em Ferro Fundido Hipereutético", Metalurgia, Vol. 31, novembro de 1975, pp. 737.
- [7] DE SY, A. and EEGHEN, L.V. - "A Study of the Machinability of Gray Iron", Foundry, September 1961, pp. 78.
- [8] DE SY, A. - "Copper in Cast Iron" - AFS Transactions, (Modern Castings). Vol. 67, 1959, pp. 321.
- [9] L'Association Française de Normalisation - "AFNOR", "Methodes de Controle de L'Usinabilité par Tournage des Aciers destinés au Décolletage et des Aciers de Construction a L'Aide D'Outils en Acier Rapide", Norma experimentale, A03-654, Aout de 1975.

- [10] DATSKO, J. - "Machinability", Material Properties and Manufacturing Process, John Wiley & Sons. Inc., pp. 444.
- [11] COLPAERT, H. - "Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns" - Ed. Edgard Blücher, Ltda, 3^a Ed. 1974.
- [12] CHIAVERINI, V., "Tecnologia Mecânica", Vol. II, Materiais de Construção Mecânica, Editora McGraw-Hill do Brasil, 1978.
- [13] ANGUS, H.T., "Cast Iron, Physical and Engineering Properties", Butter Worths & CO. Publishers Ltd., London, 1976.
- [14] SOUZA SANTOS, A.B. E ALBERTIN, E. - "Ferros Fundidos Nodulares em secções espessas", V Encontro de Técnicos Industriais, SET-ATIJ, Joinville, agosto, 1977, pp. 1-32.
- [15] OLIVEIRA, M.M. - "Elementos Residuais em Ferros Fundidos Nodulares" - Fundição n° 129, 1980, pp. 17.
- [16] PIESKE, A., CHAVES FILHO, L.M. e REIMER, J. - "Ferros Fundidos Cinzentos de Alta Qualidade", Joinville, Centro de Pesquisas da Fundição Tupy, 1980, pp. 52.
- [17] MORETON, B.B. - "Recent Research on Copper in Cast Iron" - Foundry Trade Journal, december 1967, pp. 845.
- [18] FELÍCIO FILHO, F.W. e BECKERT, E.A. - "Obtenção de Peças espessas de Ferro Fundido Nodular com Diferentes Resistências Mecânicas, Através de Adições de Cobre", Centro de Pesquisa da Fundição Tupy, Joinville, novembro de 1981.
- [19] S/A - "Effect of Microstructure on Machinability of Ferrous Castings" - Casting Engineering, Spring, 1979, pp. 17.
- [20] MARGERIE, J.C. - "Facteurs Métallurgiques de L'Usinabilité des Pieces en Fonte", Fonderie n° 303 - Juillet 1971, pp. 251.

- [21] KAHLES, J. F. and FIELD, M. - "Relation of Microstructure to Machinability of Gray Iron, Ductile Iron and Malleable Iron" - AFS Transactions, Vol. 89, 1981, pp. 587.
- [22] HEINE, H.J. - "Machining Malleable Iron", A.F.S. Transactions, Vol. 72, 1964, pp. 898.
- [23] DEMMLER, A.W. - "Annealing Iron Casting for Machinability" , AFS Transactions, Vol. 61, 1953, pp. 651.
- [24] BRACHET, Y et CHARBONNIER, M. - "Caractéristiques Mécaniques et Usinabilité des Fontes Grises", Fonderie n° 334 - Mai de 1974, pp. 201.
- [25] BORGHIGIANI, E., COLA, G. e SCACCIA, A. - "Miglioramento della Lavorabilità delle Ghise Mediante Controlle dei fattori Metallurgici", la Fonderie Italiana, n° 718, Vol. 28, Jul/ago 1979, pp. 199.
- [26] KRUSE, J.E. - "Pearlitic Malleable Iron - Interrelation of Heat Treatment, Mechanical Properties and Machinability", AFS Transactions, Vol. 63, 1955, pp. 244.
- [27] NAKAE, H. and KIJOSUKE, H. - "Influence of Pearlite on the Machinability of Spheroidal Graphite Cast Iron", Imono, Journal of the Japan Foundrymen's Society, June 1982, Vol. 54, pp. 377/383.
- [28] HARRISON-SMITH, S.A. - "Machinability of Iron Castings", Foundry Trade Journal, december 1962, pp. 729.
- [29] MATHON, P. et GRECIT, M. - Usinage des Fontes et Alliages, Quels critères Retenir?" Hommes et Fonderie, Juin/Juillet 1976, pp. 9/17.
- [30] PARENT-SIMONIN, S. - "Mesure de L'Usinabilité des Malleables, a partir de L'essai Renault-Mathon", Fonderie vol. 31, n° 352/362, mai 1976, pp. 165.

- [31] SILVEIRA, J., "Influência de Fatores Metalúrgicos na Usinabilidade de Ferros Fundidos FE6002, FE4212 e FC25" - Tese de mestrado, UNICAMP, janeiro de 1983, Campinas, SP.
- [32] FREUDIGER, E. and MAYER, H. - "Progrès dans L'Usinabilité de La Fonte Perlitique Sphéroïdale" - Revue Technique Sulzer 55, n° 2, 1973, pp. 153/156 - Resumo, Fonderie n° 343, Mars 1975, pp. 117.
- [33] HITOMI, K., THUERING, G.L. and HAM, I. - "Machinability of Nodular Cast Irons". Part I - Transactions of the ASME, May 1961, pp. 142.
- [34] HITOMI, K. and THUERING, G.L. - "Machinability of Nodular Cast Irons", Part II - Transactions of the ASME, May 1962, pp. 282.
- [35] HITOMI, K. and THUERING, G.L. - "Machinability of Nodular Cast Irons", Part III - Transactions of the ASME, May, 1964, pp. 141.
- [36] FERRARESI, D. - "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Editora Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 1970.
- [37] MATHON, P., "Essais de Coupe Acélères", R.N.U.R. - Paris, França, pp. 16.
- [38] KOVACH, C.W. and MOSKOWITZ, A., "Effect of Manganese and Sulfur on the Machinability of Martensitic Stainless Steels", Transactions of the Metallurgical Society of AIME, Vol. 245, october 1969, pp. 2157.
- [39] TOBIAS, S.A. and DAS, M.K., "The Basis of a Universal Machinability Index", Proceedings of the M.T.D.R. Conf. Pergamon Press Ltd, London 1965, pp. 183.
- [40] MICHELETTI, G.F. - "Work on Machinability in the Cooperative Group C of C.I.R.P. aut Outside this Group", Annals of the C.I.R.P. Vol. XVIII, Printed in Great Britain 1970, pp. 13.

- [41] ROBELET, M. et ODIN, G., "Étude Comparée deux Tests Rapides d'Usinabilité. Correlation avec les Résultats d'essais de Longue durée", Revue de Métallurgie, Décembre, 1973, pp. 1021.
- [42] ROUMESY, B., BEDRIN, C. et PARENT-SIMONIN, S., "L'Usinabilité des Fontes Malléables et Influence de la Nature des Essais", Fonderie 388, Avril 1979, pp. 123.
- [43] Commission des Communautés Européennes - "Recueil de Recherches <<acier>>, Propriétés d'emploi des Aciers, Usinabilité des Aciers", Communauté Européenne du Charbon et de L'Acier, EUR 5313F, 1976.
- [44] ROUMESY, B., "Les Essais Accélérés en Tournage" - Machine-Outil n° 333 - Aout/Septembre 1976, pp. 751.
- [45] MURRY, G. - "Participation de la Siderurgie Française Au choix des Methodes de Controle de L'Usinabilité par Tournage et La Preparation de la Norme NF A03-654", Centre Technique pour L'utilisation de L'Acier - Février 1975, O.T.U.A. - Paris, França.
- [46] ROUMESY, B. et BEDRIN, C., "Methodes D'Essais Rapides pour La Determination de la Tenue de Coupe des Outils", Laboratoire d'Etude des Procédés de Fabrication, Departement G.M.C. - I.N.S.A., Lion - França.
- [47] "An Evaluation of the Present Understanding of Metal Cuting. (Point de nos connaissances sur l'usinage des metaux)", Battelle Memorial Institute, 30 Aout 1958.
- [48] CZAPLICKI, L.A.A., "L'Usinabilité et La Coupe des Métaux", Revue de La Societé Royale Belge des Ingénieurs et des Industriels, n° 12, 1962.
- [49] METCUT Research Associates, "Machining Data Handbook", 2e Edition, Machinability Data Center, Cincinnati, Ohio, Inc. 1972 - USA.

- [50] ROUMESY, B. et BEDRIN, C., "Correlation between Evolution of Tool - Piece Thermoelectric Force and Tool wear During Machinability Fast Tests", Annals of the C.I.R.P. Vol. 28, 1979, pp. 35.
- [51] TAKEYAMA, H. and MURATA, R. - "Basic Investigation of Tool Wear", Transactions of the A.S.M.E. Vol. 85, Série Journal of Engineering for Industry, Fev. 1963, pp. 33.
- [52] TOBIAS, S.A. and DAS, M.K., "Statistical Basis of the Universal Machinability Chart".
- [53] Associação Brasileira de Normas Técnicas, A.B.N.T., "Ferro Fundido Nodular", NBR 6916, outubro de 1981.
- [54] Associação Brasileira de Normas Técnicas, A.B.N.T. "Determinação da dureza Brinell de Materiais Metálicos" - Norma MB60, 1980.
- [55] KREYSZIG, E., "Matemática Superior", Vol. II, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. Rio de Janeiro, Brasil, 1969.
- [56] BOWKER, A.H. and LIEBERMAN, G.J. - "Engineering Statistics", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs N.J., 1959.
- [57] "A calculadora na tomada de decisões", Texas Instruments, publicação LCB 3251, 1977.
- [58] CUNHA, L.B., "Efeito da Variação da Microestrutura dos Aços nos Parâmetros de Corte", Dissertação de Mestrado, U.F.S.C. Florianópolis, S.C., 1976.
- [59] QUEIROZ, A.A., "Usinabilidade de Ferro Fundido Cinzento e Avaliação da Temperatura e Força de Corte como Sensores de Desgaste", Dissertação de Mestrado. U.F.S.C., Florianópolis, S.C., 1976.
- [60] DIETER, G.E., "Metalurgia Mecânica", Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, Brasil, 1981.

- [61] SOUZA, S.A., "Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos". Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, Brasil, 1977.
- [62] A.F.S., "Properties of Nodular Cast Iron", International Cast Metals Journal of the A.F.S. vol. 6, december 1981.
- [63] A.S.M.E., "Metals Engineering Handbook - Metals Properties", Edited by Samuel L. Hoyt, Sponsored by The Metals Engineering Handbook board of the A.S.M.E.
- [64] Associação Brasileira de Normas Técnicas, A.B.N.T., "Morfologia de Grafita em Ferro Fundido", especificação 01.021, NBR 6593, abril de 1981.
- [65] DATASHEET, "Thermal Conductivities and Thermal Expansion Coefficients for Various Cast Irons", A.F.S. International Cast Metals Journal, Vol. 6, Dec. 1981, pp. 38.
- [66] * SHAW, M.C., "Metals Cutting Principles" - The M.I.T. Press, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 3^a ed., 1965.
- [67] * BOOTHROYD, G. - "Fundamentals of Metal Machining", Edward Arnold Publishers, Ltd, London, 1965.
- [68] * BARROW, G., "A Review of Experimental and Theoretical Techniques for Assessing Cutting Temperatures", Annals of the C.I.R.P., Vol. 22/2, Great Britain, 1973, pp. 203.
- [69] * ALVELID, B. "Cutting temperature Thermo-Electrical Measurements", Annals of the C.I.R.P., vol. 28, Great Britain, 1970, pp. 547.
- [70] * LORIA, E.A., "Machinability and Microstructure of the Cast Irons, A.F.S. Transactions, Vol. 62, 1954, pp. 163.

(*) Bibliografias que foram consultadas sem que tenham sido citadas no trabalho.

- [71]*COLDING, B. and KÖNIG, W., "Validity of the Taylor Equation in Metal Cutting", Annals of the C.I.R.P. vol. 18/4, Great Britain, 1971, pp. 793.
- [72]*KONDIC, V. - "Princípios Metalúrgicos da Fundição", Editora Polígono, 1973.
- [73]*SOUZA SANTOS, A.B. e CASTELO BRANCO, C.H., "Metalurgia dos Ferros Cinzentos e Nodulares", I.P.T. São Paulo, SP, 1977.

APÊNDICE I
RESULTADOS DOS ENSAIOS RELATIVOS
AS PROPRIEDADES MECÂNICAS

| IMPRESÃO Nº | | FERROS FUNDIDOS 1. ^a CORRIDA (IC) ϕ mpr (mm) | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | B1000 | B1034 | B1070 | R1000 | R1034 | R1070 | N1000 | N1034 | N1070 |
| Corpo de prova A1 Lado 1 | 1 | 4,68 | 4,30 | 3,82 | 4,76 | 4,74 | 4,66 | 3,78 | 3,64 | 3,55 |
| | 2 | 4,64 | 4,29 | 3,86 | 4,78 | 4,73 | 4,65 | 3,70 | 3,60 | 3,53 |
| | 3 | 4,67 | 4,33 | 3,83 | 4,77 | 4,75 | 4,64 | 3,80 | 3,58 | 3,56 |
| | 4 | 4,65 | 4,31 | 3,85 | 4,75 | 4,77 | 4,67 | 3,68 | 3,66 | 3,50 |
| | \bar{X} | 4,66 | 4,30 | 3,84 | 4,76 | 4,74 | 4,65 | 3,74 | 3,62 | 3,53 |
| | S | 0,016 | 0,015 | 0,016 | 0,011 | 0,015 | 0,011 | 0,050 | 0,032 | 0,021 |
| | XZ | 0,34 | 0,35 | 0,42 | 0,23 | 0,32 | 0,24 | 1,33 | 0,88 | 0,60 |
| Corpo de prova A1 Lado 2 | 1 | 4,66 | 4,32 | 3,84 | 4,75 | 4,75 | 4,64 | 3,70 | 3,60 | 3,50 |
| | 2 | 4,65 | 4,30 | 3,86 | 4,79 | 4,75 | 4,63 | 3,74 | 3,60 | 3,60 |
| | 3 | 4,67 | 4,31 | 3,81 | 4,76 | 4,76 | 4,68 | 3,68 | 3,62 | 3,57 |
| | 4 | 4,65 | 4,29 | 3,83 | 4,75 | 4,74 | 4,66 | 3,76 | 3,58 | 3,53 |
| | \bar{X} | 4,65 | 4,30 | 3,83 | 4,76 | 4,75 | 4,65 | 3,72 | 3,60 | 3,55 |
| | S | 0,008 | 0,011 | 0,018 | 0,016 | 0,007 | 0,019 | 0,032 | 0,014 | 0,038 |
| | XZ | 0,17 | 0,25 | 0,47 | 0,33 | 0,15 | 0,41 | 0,85 | 0,40 | 1,10 |
| Corpo de prova A2 Lado 1 | 1 | 4,66 | 4,30 | 3,83 | 4,79 | 4,74 | 4,66 | 3,71 | 3,59 | 3,50 |
| | 2 | 4,65 | 4,32 | 3,85 | 4,79 | 4,77 | 4,69 | 3,75 | 3,63 | 3,58 |
| | 3 | 4,64 | 4,29 | 3,84 | 4,78 | 4,73 | 4,61 | 3,69 | 3,61 | 3,54 |
| | 4 | 4,68 | 4,33 | 3,83 | 4,77 | 4,75 | 4,65 | 3,77 | 3,62 | 3,54 |
| | \bar{X} | 4,66 | 4,31 | 3,84 | 4,78 | 4,75 | 4,65 | 3,73 | 3,61 | 3,54 |
| | S | 0,015 | 0,016 | 0,008 | 0,008 | 0,015 | 0,029 | 0,032 | 0,015 | 0,028 |
| | XZ | 0,32 | 0,37 | 0,21 | 0,17 | 0,32 | 0,62 | 0,85 | 0,41 | 0,80 |
| Corpo de prova A2 Lado 2 | 1 | 4,67 | 4,29 | 3,84 | 4,77 | 4,74 | 4,64 | 3,71 | 3,58 | 3,64 |
| | 2 | 4,64 | 4,31 | 3,83 | 4,76 | 4,76 | 4,66 | 3,82 | 3,62 | 3,54 |
| | 3 | 4,66 | 4,36 | 3,85 | 4,77 | 4,74 | 4,63 | 3,72 | 3,62 | 3,50 |
| | 4 | 4,67 | 4,29 | 3,84 | 4,77 | 4,74 | 4,67 | 3,66 | 3,62 | 3,50 |
| | \bar{X} | 4,66 | 4,31 | 3,84 | 4,77 | 4,75 | 4,65 | 3,73 | 3,61 | 3,54 |
| | S | 0,012 | 0,028 | 0,007 | 0,004 | 0,009 | 0,016 | 0,058 | 0,017 | 0,057 |
| | XZ | 0,26 | 0,65 | 0,18 | 0,09 | 0,19 | 0,34 | 1,55 | 0,47 | 1,61 |

Tabela I.1 - Resultados dos ensaios de dureza dos corpos de prova da 1.^a corrida e composição química IC.

| IMPRES SÃO Nº | FUNDIDOS 2. ^a CORRIDA FUNDIDOS 3. ^a CORRIDA IIIC (ϕ mpr mm) | | | | | | | | | | AÇO |
|---|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| | (IIC) | | | | | | | | | | SAE 1212 |
| | B2000 | B2061 | B2104 | R3000 | R3037 | R3090 | N3000 | N3037 | N3090 | | |
| Corpo de prova A ₁ Lado 1 | 1 | 4,52 | 3,80 | 3,68 | 4,72 | 4,68 | 4,52 | 3,86 | 3,54 | 3,43 | 5,50 |
| | 2 | 4,54 | 3,76 | 3,64 | 4,72 | 4,68 | 4,50 | 3,88 | 3,62 | 3,43 | 5,51 |
| | 3 | 4,51 | 3,78 | 3,63 | 4,70 | 4,66 | 4,54 | 3,84 | 3,56 | 3,41 | 5,52 |
| | 4 | 4,55 | 3,78 | 3,69 | 4,74 | 4,70 | 4,50 | 3,86 | 3,60 | 3,45 | 5,47 |
| | \bar{X} | 4,53 | 3,78 | 3,66 | 4,72 | 4,68 | 4,52 | 3,86 | 3,58 | 3,43 | 5,50 |
| | S | 0,016 | 0,014 | 0,025 | 0,014 | 0,014 | 0,017 | 0,014 | 0,032 | 0,014 | 0,019 |
| | XZ | 0,35 | 0,37 | 0,70 | 0,30 | 0,30 | 0,38 | 0,37 | 0,89 | 0,41 | 0,35 |
| Corpo de prova A ₁ Lado 2 | 1 | 4,54 | 3,75 | 3,66 | 4,75 | 4,70 | 4,53 | 3,84 | 3,60 | 3,45 | 5,54 |
| | 2 | 4,56 | 3,79 | 3,66 | 4,71 | 4,68 | 4,49 | 3,84 | 3,60 | 3,47 | 5,48 |
| | 3 | 4,52 | 3,73 | 3,68 | 4,72 | 4,72 | 4,50 | 3,82 | 3,58 | 3,43 | 5,47 |
| | 4 | 4,54 | 3,81 | 3,68 | 4,74 | 4,70 | 4,52 | 3,86 | 3,62 | 3,45 | 5,55 |
| | \bar{X} | 4,54 | 3,77 | 3,67 | 4,73 | 4,70 | 4,51 | 3,84 | 3,60 | 3,45 | 5,51 |
| | S | 0,014 | 0,032 | 0,010 | 0,016 | 0,014 | 0,016 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,035 |
| | XZ | 0,31 | 0,85 | 0,27 | 0,34 | 0,30 | 0,35 | 0,37 | 0,39 | 0,41 | 0,64 |
| Corpo de Prova A ₂ Lado 1 | 1 | 4,56 | 3,79 | 3,65 | 4,70 | 4,71 | 4,54 | 3,82 | 3,60 | 3,49 | 5,52 |
| | 2 | 4,54 | 3,80 | 3,65 | 4,72 | 4,73 | 4,52 | 3,82 | 3,58 | 3,45 | 5,46 |
| | 3 | 4,57 | 3,78 | 3,64 | 4,69 | 4,70 | 4,53 | 3,80 | 3,61 | 3,46 | 5,48 |
| | 4 | 4,53 | 3,79 | 3,66 | 4,73 | 4,74 | 4,53 | 3,84 | 3,57 | 3,48 | 5,50 |
| | \bar{X} | 4,55 | 3,79 | 3,65 | 4,71 | 4,72 | 4,53 | 3,82 | 3,59 | 3,47 | 5,49 |
| | S | 0,016 | 0,007 | 0,007 | 0,016 | 0,016 | 0,007 | 0,014 | 0,016 | 0,016 | 0,022 |
| | XZ | 0,35 | 0,19 | 0,19 | 0,34 | 0,34 | 0,16 | 0,37 | 0,45 | 0,46 | 0,40 |
| Corpo de prova A ₂ Lado 2 | 1 | 4,53 | 3,78 | 3,67 | 4,71 | 4,64 | 4,56 | 3,87 | 3,59 | 3,44 | 5,49 |
| | 2 | 4,54 | 3,79 | 3,68 | 4,72 | 4,70 | 4,53 | 3,91 | 3,58 | 3,45 | 5,48 |
| | 3 | 4,55 | 3,75 | 3,68 | 4,74 | 4,75 | 4,55 | 3,83 | 3,59 | 3,45 | 5,54 |
| | 4 | 4,55 | 3,78 | 3,66 | 4,72 | 4,73 | 4,46 | 3,73 | 3,61 | 3,47 | 5,48 |
| | \bar{X} | 4,54 | 3,78 | 3,67 | 4,72 | 4,70 | 4,52 | 3,84 | 3,59 | 3,45 | 5,50 |
| | S | 0,008 | 0,015 | 0,008 | 0,011 | 0,041 | 0,039 | 0,067 | 0,011 | 0,011 | 0,025 |
| | XZ | 0,18 | 0,40 | 0,22 | 0,23 | 0,88 | 0,86 | 1,74 | 0,30 | 0,32 | 0,45 |

Tabela I.2 - Resultados dos ensaios de dureza dos corpos de prova da 2.^a e 3.^a corrida, composições químicas IIC e IIIC e aço SAE 1212.

| RESUMO | | FERROS FUNDIDOS 1. ^a CORRIDA (IC) - ϕ mpr (mm) | | | | | | | | |
|---|-------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | B1000 | B1034 | B1070 | R1000 | R1034 | R1070 | N1000 | N1034 | N1070 |
| C.P. A1 Lado 1 | \bar{X} | 4,66 | 4,30 | 3,84 | 4,76 | 4,74 | 4,65 | 3,74 | 3,62 | 3,53 |
| | S | 0,016 | 0,015 | 0,016 | 0,011 | 0,015 | 0,011 | 0,050 | 0,032 | 0,021 |
| | X% | 0,34 | 0,35 | 0,42 | 0,23 | 0,32 | 0,24 | 1,33 | 0,88 | 0,60 |
| C.P. A1 Lado 2 | \bar{X} | 4,65 | 4,30 | 3,83 | 4,76 | 4,75 | 4,65 | 3,72 | 3,60 | 3,55 |
| | S | 0,008 | 0,011 | 0,018 | 0,016 | 0,007 | 0,019 | 0,032 | 0,014 | 0,038 |
| | X% | 0,17 | 0,25 | 0,47 | 0,33 | 0,15 | 0,41 | 0,85 | 0,40 | 1,10 |
| C.P. A2 Lado 1 | \bar{X} | 4,66 | 4,31 | 3,84 | 4,78 | 4,75 | 4,65 | 3,73 | 3,61 | 3,54 |
| | S | 0,015 | 0,016 | 0,008 | 0,008 | 0,015 | 0,029 | 0,032 | 0,015 | 0,028 |
| | X% | 0,32 | 0,37 | 0,21 | 0,17 | 0,32 | 0,62 | 0,85 | 0,41 | 0,80 |
| C.P. A2 Lado 2 | \bar{X} | 4,66 | 4,31 | 3,84 | 4,77 | 4,75 | 4,65 | 3,73 | 3,61 | 3,54 |
| | S | 0,012 | 0,028 | 0,007 | 0,004 | 0,009 | 0,016 | 0,058 | 0,017 | 0,057 |
| | X% | 0,26 | 0,65 | 0,18 | 0,09 | 0,19 | 0,34 | 1,55 | 0,47 | 1,61 |
| Médias dos (X) Máximos S e X% | (\bar{X}) | 4,66 | 4,31 | 3,84 | 4,77 | 4,75 | 4,65 | 3,73 | 3,61 | 3,54 |
| | S _{max} | 0,016 | 0,028 | 0,018 | 0,016 | 0,015 | 0,029 | 0,058 | 0,032 | 0,057 |
| | X% _{max} | 0,32 | 0,65 | 0,47 | 0,33 | 0,32 | 0,62 | 1,55 | 0,88 | 1,61 |
| HB ($\frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$) | 166 | 196 | 249 | 158 | 159 | 167 | 265 | 287 | 295 | |
| HB ($\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$) | 1627 | 1921 | 2440 | 1548 | 1558 | 1637 | 2597 | 2813 | 2891 | |

Tabela I.3 - Resumo dos Ensaios de dureza dos corpos de prova da 1.^a corrida e composição química IC.

| RESUMO | | FUNDIDOS 2. ^a CORRIDA (IC) | | | FUNDIDOS 3. ^a CORRIDA IIC ϕ mpr (mm) | | | | | | AÇO |
|--|-------------------|---------------------------------------|-------|-------|--|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| | | B2000 | B2061 | B2104 | R3000 | R3037 | R3090 | N3000 | N3037 | N3090 | SAE 1212 |
| C.P. A1 Lado 1 | \bar{X} | 4,53 | 3,78 | 3,66 | 4,72 | 4,68 | 4,52 | 3,86 | 3,58 | 3,43 | 5,50 |
| | S | 0,016 | 0,014 | 0,025 | 0,014 | 0,014 | 0,017 | 0,014 | 0,032 | 0,014 | 0,019 |
| | XZ | 0,35 | 0,37 | 0,70 | 0,30 | 0,30 | 0,38 | 0,37 | 0,89 | 0,41 | 0,35 |
| C.P. A1 Lado 2 | \bar{X} | 4,54 | 3,77 | 3,67 | 4,73 | 4,70 | 4,51 | 3,84 | 3,60 | 3,45 | 5,51 |
| | S | 0,014 | 0,032 | 0,010 | 0,016 | 0,014 | 0,016 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,035 |
| | XZ | 0,31 | 0,85 | 0,27 | 0,34 | 0,30 | 0,35 | 0,37 | 0,39 | 0,41 | 0,64 |
| C.P. A2 Lado 1 | \bar{X} | 4,55 | 3,79 | 3,65 | 4,71 | 4,72 | 4,53 | 3,82 | 3,59 | 3,47 | 5,49 |
| | S | 0,016 | 0,007 | 0,007 | 0,016 | 0,016 | 0,007 | 0,014 | 0,016 | 0,016 | 0,022 |
| | XZ | 0,35 | 0,19 | 0,19 | 0,34 | 0,34 | 0,16 | 0,37 | 0,45 | 0,46 | 0,40 |
| C.P. A2 Lado 2 | \bar{X} | 4,54 | 3,78 | 3,67 | 4,72 | 4,70 | 4,52 | 3,84 | 3,59 | 3,45 | 5,50 |
| | S | 0,008 | 0,015 | 0,008 | 0,011 | 0,041 | 0,039 | 0,067 | 0,011 | 0,011 | 0,025 |
| | XZ | 0,18 | 0,40 | 0,22 | 0,23 | 0,88 | 0,86 | 1,74 | 0,30 | 0,32 | 0,45 |
| Médias dos (\bar{X}) Máximos S e XZ | (\bar{X}) | 4,54 | 3,78 | 3,66 | 4,72 | 4,70 | 4,52 | 3,84 | 3,59 | 3,45 | 5,50 |
| | S _{max} | 0,016 | 0,032 | 0,025 | 0,016 | 0,041 | 0,039 | 0,067 | 0,032 | 0,016 | 0,035 |
| | XZ _{max} | 0,35 | 0,85 | 0,27 | 0,34 | 0,88 | 0,86 | 1,74 | 0,89 | 0,46 | 0,64 |
| HB ($\frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$) | | 175 | 257 | 272 | 161 | 163 | 176 | 249 | 287 | 311 | 166 |
| HB ($\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$) | | 1715 | 2519 | 2667 | 1578 | 1597 | 1725 | 2440 | 2813 | 3048 | 1137 |

Tabela I.4 - Resumo dos ensaios de dureza dos corpos de prova da 2.^a e 3.^a corrida, composições químicas IIC e IIC e Aço SAE 1212.

| CÓDIGOS | LIMITE DE RESIST. A TRAÇÃO (kgf/mm ²) | | | | | | ALONGAMENTO % (5d) | | | | | | PROPORÇÃO DE ÁREA NA RUPTURA ($\frac{l}{Rf}$) | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---|-------|-------|-------|-------|------|--------------------|---|------|------|------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | C.P.1 | | C.P.2 | | C.P.3 | | X̄ | | S | | XZ | | C.P.1 | | C.P.2 | | C.P.3 | | X̄ | | S | | XZ | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B1000 | 47,9 | 50,0 | 50,0 | 50,0 | 49,3 | 0,99 | 2,00 | Problemas com a marcação impediram o cálculo do alongamento destes corpos de prova | | | | | | | | | | | | 0,852 | 0,863 | 0,865 | 0,860 | 0,860 | 0,006 | 0,70 |
| B1034 | 58,2 | 56,7 | 56,4 | 56,4 | 57,1 | 0,79 | 1,40 | | | | | | | | | | | | | 0,927 | 0,937 | 0,926 | 0,930 | 0,930 | 0,005 | 0,53 |
| B1070 | 77,5 | 75,0 | 74,0 | 74,0 | 75,5 | 1,47 | 1,90 | | | | | | | | | | | | | 0,973 | 0,985 | 0,982 | 0,980 | 0,980 | 0,005 | 0,51 |
| R1000 | 46,0 | 46,0 | 47,5 | 46,5 | 46,5 | 0,71 | 1,50 | | | | | | | | | | | | | 0,870 | 0,850 | 0,860 | 0,860 | 0,860 | 0,008 | 0,93 |
| R1034 | 47,5 | 45,8 | 46,2 | 46,5 | 46,5 | 0,72 | 1,60 | | | | | | | | | | | | | 0,875 | 0,885 | 0,880 | 0,880 | 0,880 | 0,004 | 0,45 |
| R1070 | 46,9 | 48,3 | 46,7 | 47,3 | 47,3 | 0,72 | 1,50 | | | | | | | | | | | | | 0,894 | 0,884 | 0,892 | 0,890 | 0,890 | 0,004 | 0,45 |
| N1000 | 98,4 | 103,0 | 99,5 | 100,3 | 100,3 | 1,96 | 1,95 | | | | | | | | | | | | | 0,965 | 0,956 | 0,959 | 0,960 | 0,960 | 0,004 | 0,42 |
| N1034 | 105,1 | 100,3 | 103,0 | 102,8 | 102,8 | 1,96 | 1,91 | | | | | | | | | | | | | 0,975 | 0,972 | 0,963 | 0,970 | 0,970 | 0,005 | 0,52 |
| N1070 | 108 | 112 | 107 | 109,0 | 109,0 | 2,16 | 1,98 | | | | | | | | | | | | | 0,986 | 0,971 | 0,983 | 0,980 | 0,980 | 0,006 | 0,66 |
| B2000 | 53,0 | 54,0 | 51,4 | 52,8 | 52,8 | 1,07 | 2,02 | 19,7 | 19,8 | 20,5 | 20 | 0,36 | 1,80 | 0,883 | 0,891 | 0,896 | 0,890 | 0,890 | 0,005 | 0,60 | | | | | | |
| B2061 | 71,0 | 68,5 | 68,1 | 69,2 | 69,2 | 1,28 | 1,85 | 3,15 | 3,25 | 3,2 | 3,2 | 0,041 | 1,27 | 0,936 | 0,943 | 0,940 | 0,940 | 0,940 | 0,003 | 0,31 | | | | | | |
| B2104 | 78,5 | 80,5 | 82,2 | 80,4 | 80,4 | 1,51 | 1,88 | 2,54 | 2,44 | 2,52 | 2,5 | 0,043 | 1,73 | 0,977 | 0,98 | 0,984 | 0,98 | 0,984 | 0,003 | 0,30 | | | | | | |
| R3000 | 49,0 | 47,6 | 48,0 | 48,2 | 48,2 | 0,59 | 1,22 | 24,1 | 22,8 | 23,2 | 23,7 | 0,37 | 1,58 | 0,845 | 0,846 | 0,859 | 0,850 | 0,850 | 0,006 | 0,75 | | | | | | |
| R3037 | 48,3 | 49,2 | 47,1 | 48,2 | 48,2 | 0,86 | 1,78 | 23,8 | 24,0 | 23,3 | 23,7 | 0,29 | 1,24 | 0,868 | 0,853 | 0,859 | 0,860 | 0,860 | 0,006 | 0,72 | | | | | | |
| R3090 | 49,0 | 48,0 | 51,0 | 49,6 | 49,6 | 0,99 | 2,00 | 22,8 | 23,7 | 23,5 | 23,0 | 0,36 | 1,60 | 0,885 | 0,890 | 0,895 | 0,890 | 0,890 | 0,004 | 0,46 | | | | | | |
| N3000 | 95,7 | 91,5 | 94,5 | 93,9 | 93,9 | 1,77 | 1,90 | 6,35 | 6,15 | 6,10 | 6,2 | 0,108 | 1,74 | 0,964 | 0,952 | 0,964 | 0,960 | 0,960 | 0,006 | 0,62 | | | | | | |
| N3037 | 99,4 | 102,5 | 99,0 | 100,3 | 100,3 | 1,56 | 1,56 | 4,63 | 4,75 | 4,72 | 4,7 | 0,050 | 1,08 | 0,971 | 0,963 | 0,976 | 0,970 | 0,970 | 0,005 | 0,55 | | | | | | |
| N3090 | 104,0 | 101,7 | 100,6 | 102,1 | 102,1 | 1,42 | 1,39 | 3,25 | 3,23 | 3,12 | 3,2 | 0,057 | 1,79 | 0,985 | 0,980 | 0,975 | 0,980 | 0,980 | 0,004 | 0,42 | | | | | | |

Tabela I.5 - Resultados obtidos através dos ensaios de tração.

APÊNDICE II
FORMULÁRIO ESTATÍSTICO

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

II.1 - MÉDIA

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{II.1})$$

II.2 - DESVIO PADRÃO

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{II.2})$$

II.3 - COEFICIENTE DE DISPERSÃO

$$X = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 \quad [\%] \quad (\text{II.5})$$

II.4 - REGRESSÃO LINEAR

Para uma função linear do tipo $y=f(x)$ definida por uma equação:

$$y = a_1x + a_0 \quad (\text{II.4})$$

onde se tem os pares de valores que se deseja ajustar:

$$c \quad \begin{cases} y_1, y_2, y_3 \dots y_{n-1} y_n \\ x_1, x_2, x_3 \dots x_{n-1} x_n \end{cases}$$

A equação II.4 define este ajustamento desde que se tenha:

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (\text{II.5})$$

e

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x}$$

onde \bar{x} é definido por II.1

$$e \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (\text{II.6})$$

O coeficiente da correlação, que expressa a qualidade do ajustamento vale

$$r^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]} \quad (\text{II.7})$$

onde $0 \leq r^2 \leq 1$

A precisão do ajustamento pode ser determinada da seguinte forma:

- calcula-se o valor de $r = r^2$
- compara-se o valor "r" com "r_{comp}"

de tal modo que:

$$r_{\text{comp}} = \sqrt{\frac{t^2}{t^2 + g}} \quad (\text{II.8})$$

onde: t = ordenada da distribuição de "student"

g = número de graus de liberdade.

O número de graus de liberdade (g) é tomado desta forma:

$$g = n-1 \quad (\text{II.9})$$

onde: n = número de elementos da amostra.

A expressão II.9 é mais adequada para amostras com $n \geq 6$, para amostras muito pequenas, como no caso deste trabalho ($n=3$) é preferível adotar:

$$g = n-2 \quad (\text{II.10})$$

A tabela II.1 lista os valores calculados de (r_{comp}) e os níveis de precisão correspondente em função das expressões II.8, II.9 e II.10.

| VALORES DE t | | VALORES DE r_{comp} | | PRECISÃO [%] |
|----------------|-----------|------------------------------|-----------|----------------|
| $g=n-1=2$ | $g=n-2=1$ | $g=n-1=2$ | $g=n-2=1$ | correspondente |
| 31,598 | 636,619 | 0,9990 | 0,999997 | 99,95 |
| 22,3 | 318,3 | 0,996 | 0,999995 | 99,9 |
| 9,925 | 63,657 | 0,990 | 0,9998 | 99,5 |
| 6,97 | 31,8 | 0,98 | 0,9995 | 99,0 |
| 4,3 | 12,7 | 0,95 | 0,997 | 97,5 |
| 2,92 | 6,31 | 0,90 | 0,987 | 95,0 |
| 1,89 | 3,08 | 0,80 | 0,951 | 90,0 |
| 1,06 | 1,38 | 0,60 | 0,81 | 80,0 |
| 0,82 | 1,00 | 0,50 | 0,71 | 75,0 |
| 0,63 | 0,73 | 0,41 | 0,59 | 70,0 |
| 0,29 | 0,33 | 0,20 | 0,32 | 60,0 |

Tabela II.1 - Valores de r_{comp} .

Referências deste apêndice [55, 56, 57]

APENDICE III

ENSAIOS TC

| MATERIAL CÓDIGO | VELOCIDADE COMPARATIVA V_{comp} (m/min) | | | MÉDIA \bar{x} | DESVIO S | DISPERSÃO X% |
|---------------------------|--|-----------------|-----------------|--------------------|-------------|-----------------|
| | 1. ^a | 2. ^a | 3. ^a | | | |
| B1000 | 108,9 | 114,2 | 118,0 | 113,7 | 3,73 | 3,3 |
| B1034 | 99,5 | 100,5 | 93,4 | 97,8 | 3,14 | 3,2 |
| B1070 | 62,5 | 59,9 | 57,3 | 59,9 | 2,12 | 3,5 |
| R1000 | 145,1 | 146,1 | 128,2 | 139,8 | 8,21 | 5,8 |
| R1034 | 123,4 | 125,7 | 125,9 | 125,0 | 1,13 | 0,9 |
| R1070 | 106,8 | 116,0 | 99,1 | 107,3 | 6,91 | 6,4 |
| N1000 | 42,3 | 37,0 | 37,4 | 38,9 | 2,41 | 6,2 |
| N1034 | 35,4 | 33,2 | 30,7 | 33,1 | 1,92 | 5,8 |
| N1070 | 29,4 | 32,2 | 32,3 | 31,3 | 1,34 | 4,3 |
| B2000 | 80,3 | 87,5 | 82,1 | 83,3 | 3,06 | 3,7 |
| B2061 | 57,2 | 51,0 | 55,0 | 54,4 | 2,57 | 4,7 |
| B2104 | 40,6 | 35,2 | 39,4 | 38,4 | 2,31 | 6,0 |
| R3000 | 109,6 | 106,1 | 118,2 | 111,3 | 5,08 | 4,6 |
| R3037 | 107,5 | 104,6 | 99,6 | 103,9 | 3,26 | 3,1 |
| R3090 | 99,2 | 94,8 | 103,9 | 99,3 | 3,72 | 3,7 |
| N3000 | 48,8 | 49,7 | 46,0 | 48,2 | 1,57 | 3,3 |
| N3037 | 37,4 | 33,2 | 35,0 | 35,2 | 1,72 | 4,9 |
| N3090 | 31,6 | 30,8 | 31,9 | 31,4 | 0,46 | 1,5 |
| SAE 1212 | 171,9 | 171,7 | 171,8 | 171,8 | 0,082 | 0,05 |
| Valor máximo da dispersão | | | | | | 6,4 |
| Valor médio da dispersão | | | | | | 4,2 |

Tabela III.1 - Resultados das velocidades comparativas no torneamento cilíndrico.

APÊNDICE IV

ENSAIOS DE TEMPERATURA

| MATERIAIS CÓDIGOS | VELOCI- DADES m/min | TEMPERATURAS (mV) | | | MÉDIA \bar{X} | DESVIO S | DISPERSÃO XZ |
|------------------------|---------------------------|-------------------|------------|-----------------------|--------------------|-------------|-----------------|
| | | θ_1 | θ_2 | θ_3 | | | |
| B1000 | 23,5 | 2,84 | 2,77 | 2,79 | 2,80 | 0,029 | 1,05 |
| | 28,3 | 3,09 | 2,95 | 3,05 | 3,03 | 0,059 | 1,94 |
| | 35,3 | 3,14 | 3,20 | 3,26 | 3,23 | 0,065 | 2,00 |
| B1034 | 23,5 | 3,31 | 3,41 | 3,48 | 3,40 | 0,070 | 2,06 |
| | 28,3 | 3,50 | 3,58 | 3,60 | 3,56 | 0,043 | 1,21 |
| | 35,3 | 3,85 | 3,80 | 3,63 | 3,76 | 0,094 | 2,50 |
| B1070 | 23,5 | 3,77 | 3,67 | 3,82 | 3,75 | 0,062 | 1,66 |
| | 28,3 | 3,84 | 3,95 | 3,99 | 3,93 | 0,063 | 1,61 |
| | 35,3 | 4,10 | 4,24 | 4,13 | 4,16 | 0,060 | 1,45 |
| R1000 | 23,5 | 2,56 | 2,64 | 2,60 | 2,60 | 0,033 | 1,26 |
| | 28,3 | 2,67 | 2,75 | 2,68 | 2,70 | 0,035 | 1,32 |
| | 35,3 | 2,87 | 2,78 | 2,75 | 2,80 | 0,051 | 1,82 |
| R1034 | 23,5 | 2,61 | 2,70 | 2,63 | 2,65 | 0,038 | 1,46 |
| | 28,3 | 2,80 | 2,68 | 2,78 | 2,75 | 0,052 | 1,91 |
| | 35,3 | 2,97 | 3,02 | 2,85 | 2,95 | 0,071 | 2,42 |
| R1070 | 23,5 | 2,77 | 2,75 | 2,88 | 2,80 | 0,057 | 2,04 |
| | 28,3 | 3,09 | 3,05 | 2,87 | 3,00 | 0,096 | 3,19 |
| | 35,3 | 3,17 | 3,16 | 3,27 | 3,20 | 0,050 | 1,55 |
| N1000 | 23,5 | 3,15 | 3,14 | 3,30 | 3,20 | 0,073 | 2,29 |
| | 28,3 | 3,45 | 3,34 | 3,41 | 3,40 | 0,045 | 1,34 |
| | 35,3 | 3,81 | 3,69 | 3,60 | 3,70 | 0,086 | 2,32 |
| N1034 | 23,5 | 3,80 | 3,63 | 3,67 | 3,70 | 0,072 | 1,96 |
| | 28,3 | 4,10 | 4,03 | 3,87 | 4,00 | 0,096 | 2,41 |
| | 35,3 | 4,30 | 4,42 | 4,17 | 4,30 | 0,102 | 2,37 |
| N1070 | 23,5 | 4,17 | 4,24 | 4,35 | 4,25 | 0,074 | 1,74 |
| | 28,3 | 4,37 | 4,52 | 4,31 | 4,40 | 0,088 | 2,00 |
| | 35,3 | 4,68 | 4,50 | 4,62 | 4,60 | 0,075 | 1,63 |
| Dispersão máxima: 3,19 | | | | Dispersão média: 1,87 | | | |

Tabela IV.1 - Resultados da temperatura de usinagem para os materiais da 1.^a corrida.

| MATERIAIS CÓDIGOS | VELOCIDADES m/min | TEMPERATURAS (mV) | | | MÉDIA \bar{X} | DESVIO S | DISPERSÃO XZ |
|------------------------|----------------------|-------------------|------------|-----------------------|--------------------|-------------|-----------------|
| | | θ_1 | θ_2 | θ_3 | | | |
| (II) B2000 | 23,5 | 2,83 | 2,87 | 3,00 | 2,90 | 0,072 | 2,50 |
| | 28,3 | 3,10 | 3,06 | 3,00 | 3,05 | 0,041 | 1,34 |
| | 35,3 | 3,17 | 3,27 | 3,31 | 3,25 | 0,059 | 1,81 |
| (II) B2061 | 23,5 | 4,02 | 3,86 | 4,12 | 4,00 | 0,111 | 2,77 |
| | 28,3 | 4,05 | 4,22 | 4,18 | 4,15 | 0,072 | 1,75 |
| | 35,3 | 4,44 | 4,31 | 4,30 | 4,35 | 0,064 | 1,46 |
| (II) B2104 | 23,5 | 4,10 | 4,05 | 4,15 | 4,10 | 0,041 | 1,00 |
| | 28,3 | 4,08 | 4,34 | 4,33 | 4,25 | 0,120 | 2,80 |
| | 35,3 | 4,55 | 4,56 | 4,39 | 4,50 | 0,078 | 1,73 |
| (III) R3000 | 23,5 | 3,00 | 2,94 | 3,05 | 3,00 | 0,045 | 1,50 |
| | 28,3 | 3,13 | 3,17 | 3,30 | 3,20 | 0,072 | 2,27 |
| | 35,3 | 3,39 | 3,34 | 3,46 | 3,40 | 0,049 | 1,45 |
| R3037 | 23,5 | 3,04 | 2,92 | 3,04 | 3,00 | 0,056 | 1,88 |
| | 28,3 | 3,11 | 3,15 | 3,34 | 3,20 | 0,100 | 3,13 |
| | 35,3 | 3,38 | 3,35 | 3,47 | 3,40 | 0,051 | 1,50 |
| R3090 | 23,5 | 3,06 | 2,97 | 2,97 | 3,00 | 0,042 | 1,41 |
| | 28,3 | 3,15 | 3,18 | 3,27 | 3,20 | 0,051 | 1,59 |
| | 35,3 | 3,36 | 3,38 | 3,46 | 3,40 | 0,043 | 1,27 |
| (III) N3000 | 23,5 | 3,84 | 3,79 | 3,86 | 3,83 | 0,029 | 0,80 |
| | 28,3 | 4,04 | 4,05 | 4,00 | 4,03 | 0,022 | 0,54 |
| | 35,3 | 4,24 | 4,16 | 4,15 | 4,18 | 0,040 | 0,97 |
| N3037 | 23,5 | 4,14 | 4,00 | 3,98 | 4,04 | 0,071 | 1,76 |
| | 28,3 | 4,32 | 4,17 | 4,18 | 4,22 | 0,068 | 1,62 |
| | 35,3 | 4,53 | 4,35 | 4,39 | 4,42 | 0,077 | 1,74 |
| N3090 | 23,5 | 4,47 | 4,33 | 4,39 | 4,40 | 0,057 | 1,30 |
| | 28,3 | 4,55 | 4,60 | 4,65 | 4,60 | 0,041 | 0,90 |
| | 35,3 | 4,79 | 4,73 | 4,74 | 4,75 | 0,026 | 0,55 |
| Dispersão máxima: 3,13 | | | | Dispersão média: 1,61 | | | |

Tabela IV.2 - Resultados da temperatura de Usinagem para os materiais da 2.^a e 3.^a corridas.

| MATERIAIS CÓDIGOS | ENSAIOS | | | PARÂMETROS ESTATÍSTICOS | | | I.U |
|-------------------------|---------|------|------|-------------------------|-------------|-----------------|-----|
| | 1 | 2 | 3 | MÉDIA \bar{X} | DESVIO S | DISPERSÃO XZ | % |
| B1000 | 3,23 | 3,47 | 3,20 | 3,30 | 0,1208 | 3,66 | 100 |
| B1034 | 3,75 | 3,70 | 3,95 | 3,80 | 0,108 | 2,84 | 87 |
| B1070 | 4,05 | 3,84 | 3,96 | 3,95 | 0,086 | 2,18 | 83 |
| R1000 | 3,04 | 3,06 | 3,20 | 3,10 | 0,0712 | 2,30 | 106 |
| R1034 | 3,13 | 3,15 | 3,33 | 3,20 | 0,090 | 2,81 | 103 |
| R1070 | 3,49 | 3,52 | 3,49 | 3,50 | 0,014 | 0,40 | 94 |
| N1000 | 3,52 | 3,36 | 3,32 | 3,40 | 0,086 | 2,54 | 97 |
| N1034 | 4,03 | 3,86 | 3,97 | 3,95 | 0,070 | 1,78 | 83 |
| N1070 | 4,29 | 4,39 | 4,25 | 4,31 | 0,059 | 1,37 | 76 |
| B2000 | 3,43 | 3,28 | 3,19 | 3,30 | 0,099 | 3,00 | 100 |
| B2061 | 4,37 | 4,17 | 4,33 | 4,29 | 0,086 | 2,01 | 77 |
| B2104 | 4,29 | 4,31 | 4,45 | 4,35 | 0,071 | 1,64 | 76 |
| R3000 | 3,45 | 3,32 | 3,46 | 3,41 | 0,064 | 1,88 | 97 |
| R3037 | 3,35 | 3,42 | 3,46 | 3,41 | 0,045 | 1,33 | 97 |
| R3090 | 3,46 | 3,47 | 3,30 | 3,41 | 0,078 | 2,28 | 97 |
| N3000 | 4,15 | 4,02 | 3,98 | 4,05 | 0,072 | 1,80 | 81 |
| N3037 | 4,30 | 4,15 | 4,24 | 4,23 | 0,062 | 1,46 | 78 |
| N3090 | 4,60 | 4,41 | 4,50 | 4,50 | 0,078 | 1,72 | 73 |
| Dispersão máxima: 3,66% | | | | Dispersão média: 2,1% | | | |

Tabela IV.3 - Valores da temperatura média de usinagem calculados segundo a expressão 16 do item 4.3.3.2.2.

APÊNDICE V
ENSAIOS MATHON E V_{LF}

| MATERIAIS CÓDIGOS | ROTAÇÕES RPM | VALORES DE $D_{0,2}$ (mm) | | | \bar{X} | S | X% |
|-----------------------|-----------------|---------------------------|------|----------------------|-----------|-------|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | | | |
| B1000 | 1000 | 54,7 | 53,0 | 54,0 | 53,9 | 0,854 | 1,6 |
| | 1250 | 43,0 | 46,5 | 47,0 | 45,5 | 2,179 | 4,8 |
| | 2000 | 32,4 | 30,0 | 33,0 | 31,8 | 1,587 | 5,0 |
| B1034 | 1000 | 42,0 | 43,7 | 40,0 | 41,9 | 1,852 | 4,4 |
| | 1250 | 31,0 | 31,5 | 33,5 | 32,0 | 1,323 | 4,1 |
| | 2000 | 23,2 | 24,5 | 22,5 | 23,4 | 1,015 | 4,3 |
| B1070 | 1000 | 39,2 | 34,4 | 36,2 | 36,6 | 2,424 | 6,6 |
| | 1250 | 30,4 | 31,5 | 28,4 | 30,1 | 1,572 | 5,2 |
| | 2000 | 18,6 | 21,5 | 20,0 | 20,0 | 1,450 | 7,2 |
| R1000 | 1465 | 58,5 | 55,5 | 55,5 | 56,5 | 1,732 | 3,1 |
| | 2000 | 45,6 | 45,4 | 48,5 | 46,5 | 1,735 | 3,7 |
| | 2344 | 40,5 | 41,5 | 42,8 | 41,6 | 1,153 | 2,8 |
| R1034 | 1465 | 51,0 | 54,7 | 53,3 | 53,0 | 1,868 | 3,5 |
| | 2000 | 44,1 | 41,5 | 42,5 | 42,7 | 1,311 | 3,1 |
| | 2344 | 37,0 | 40,0 | 40,0 | 39,0 | 1,732 | 4,4 |
| R1070 | 1465 | 49,6 | 48,5 | 46,8 | 48,3 | 1,411 | 2,9 |
| | 2000 | 38,5 | 39,0 | 41,0 | 39,5 | 1,323 | 3,3 |
| | 2344 | 34,0 | 33,5 | 36,0 | 34,5 | 1,323 | 3,8 |
| N1000 | 630 | 36,6 | 34,2 | 36,0 | 35,6 | 1,249 | 3,5 |
| | 800 | 28,2 | 30,4 | 29,1 | 29,2 | 1,106 | 3,8 |
| | 1000 | 23,8 | 20,5 | 22,0 | 22,1 | 1,652 | 7,5 |
| N1034 | 630 | 32,0 | 28,5 | 29,5 | 30,0 | 1,802 | 6,0 |
| | 800 | 23,0 | 25,2 | 23,8 | 24,0 | 1,113 | 4,6 |
| | 1000 | 19,0 | 20,5 | 20,5 | 20,0 | 0,866 | 4,3 |
| N1070 | 630 | 28,8 | 28,0 | 30,2 | 29,0 | 1,113 | 3,8 |
| | 800 | 22,6 | 22,0 | 24,4 | 23,0 | 1,249 | 5,4 |
| | 1000 | 18,3 | 19,4 | 19,9 | 19,2 | 0,818 | 4,3 |
| Dispersão máxima: 7,5 | | | | Dispersão média: 4,3 | | | |

Tabela V.1 - Valores de $D_{0,2}$ nas rotações indicadas dos Ensaio Mathon ferramenta 1 para os materiais da 1ª corrida.

| MATERIAIS CÓDIGOS | ROTAÇÕES RPM | VALORES DE $D_{0,2}$ (mm) | | | \bar{X} | S | XZ |
|-----------------------|-----------------|---------------------------|------|----------------------|-----------|-------|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | | | |
| B2000 | 1000 | 54,5 | 50,1 | 52,3 | 52,3 | 2,200 | 4,2 |
| | 1250 | 43,3 | 46,8 | 44,9 | 45,0 | 1,752 | 3,9 |
| | 2000 | 34,0 | 32,1 | 32,0 | 32,7 | 1,127 | 3,4 |
| B2061 | 1000 | 23,7 | 35,3 | 35,7 | 34,9 | 1,058 | 3,0 |
| | 1250 | 29,0 | 31,0 | 30,3 | 30,1 | 1,015 | 3,4 |
| | 2000 | 19,6 | 17,7 | 19,4 | 18,9 | 1,044 | 3,5 |
| B2104 | 1000 | 30,8 | 33,3 | 31,9 | 32,0 | 1,253 | 3,9 |
| | 1250 | 30,0 | 27,0 | 27,9 | 28,3 | 1,539 | 5,4 |
| | 2000 | 17,3 | 18,5 | 17,0 | 17,6 | 0,794 | 4,5 |
| R3000 | 1250 | 60,0 | 57,3 | 57,3 | 58,2 | 1,560 | 2,7 |
| | 1465 | 53,7 | 55,0 | 56,0 | 54,9 | 1,153 | 2,1 |
| | 2000 | 41,5 | 42,5 | 45,0 | 43,0 | 1,803 | 4,2 |
| R3037 | 1250 | 53,5 | 57,5 | 58,5 | 56,5 | 2,160 | 3,8 |
| | 1465 | 53,4 | 50,8 | 51,2 | 51,8 | 1,400 | 2,7 |
| | 2000 | 44,3 | 41,1 | 43,0 | 42,8 | 1,609 | 3,8 |
| R3090 | 1250 | 50,0 | 50,1 | 53,5 | 51,2 | 1,992 | 3,9 |
| | 1465 | 48,3 | 51,2 | 50,8 | 50,1 | 1,572 | 3,1 |
| | 2000 | 40,0 | 39,8 | 42,3 | 40,7 | 1,389 | 3,4 |
| N3000 | 630 | 33,9 | 35,0 | 37,0 | 35,3 | 1,572 | 4,4 |
| | 800 | 27,5 | 28,0 | 31,5 | 29,0 | 2,179 | 7,5 |
| | 1000 | 24,5 | 24,0 | 26,5 | 25,0 | 1,323 | 5,3 |
| N3037 | 630 | 29,5 | 31,4 | 30,0 | 30,3 | 0,985 | 3,3 |
| | 800 | 28,5 | 27,8 | 25,0 | 27,1 | 1,852 | 6,8 |
| | 1000 | 21,1 | 20,0 | 21,0 | 20,7 | 0,608 | 2,9 |
| N3090 | 630 | 28,8 | 31,0 | 27,5 | 29,1 | 1,769 | 6,1 |
| | 800 | 23,6 | 24,5 | 27,0 | 25,0 | 1,761 | 7,0 |
| | 1000 | 19,2 | 17,5 | 18,5 | 18,4 | 0,854 | 4,6 |
| Dispersão máxima: 7,5 | | | | Dispersão média: 4,2 | | | |

Tabela V.2 - Valores de $D_{0,2}$ nas rotações indicadas dos Ensaio Mathon ferramenta 1, materiais da 2.^a e 3.^a corridas.

| MATERIAIS CÓDIGOS | VALORES MÉDIOS DE $D_{0,2}$ | | | COEF. CORR. r | COEF. m | log C | log $D_{0,2}$ | $P_{0,2}$ P/ N=350 | PRECISÃO DA DETERM. % |
|----------------------|-----------------------------|-------|-------|---------------------|------------|-------|---------------|-----------------------|-----------------------------|
| | n_1 | n_2 | n_3 | | | | | | |
| B1000 | 53,9 | 45,5 | 31,8 | 0,9999993 | 0,76 | 3,255 | 2,079 | 119,92 | 100 |
| B1034 | 41,9, | 32 | 23,4 | 0,98 | 0,81 | 3,222 | 1,976 | 94,6 | 95 |
| B1070 | 36,6 | 30,1 | 20,0 | 0,9999990 | 0,87 | 3,306 | 1,961 | 91,3 | 99,9 |
| R1000 | 56,5 | 46,5 | 41,6 | 0,9999998 | 0,66 | 3,172 | 2,160 | 143 | 100 |
| R1034 | 53 | 42,7 | 39,0 | 0,9999998 | 0,66 | 3,144 | 2,132 | 135 | 100 |
| R1070 | 48,3 | 39,5 | 34,5 | 0,992 | 0,71 | 3,222 | 2,128 | 132 | 96 |
| N1000 | 35,6 | 29,2 | 22,1 | 0,993 | 1,03 | 3,409 | 1,821 | 66,2 | 97 |
| N1034 | 30,0 | 24,0 | 20,0 | 0,9993 | 0,88 | 3,055 | 1,700 | 50,0 | 98 |
| N1070 | 29,0 | 23,0 | 19,2 | 0,998 | 0,89 | 3,066 | 1,688 | 48,7 | 97,5 |
| B2000 | 52,3 | 45,0 | 32,7 | 0,9999998 | 0,68 | 3,071 | 2,060 | 106,4 | 100 |
| B2061 | 34,9 | 30,1 | 18,9 | 0,995 | 0,89 | 3,337 | 1,958 | 90 | 97 |
| B2104 | 32 | 28,3 | 17,6 | 0,993 | 0,89 | 3,302 | 1,927 | 82 | 97 |
| R3000 | 58,2 | 54,9 | 43,0 | 0,98 | 0,65 | 3,127 | 2,130 | 133 | 95 |
| R3037 | 56,5 | 51,8 | 42,8 | 0,999997 | 0,57 | 2,948 | 2,067 | 116 | 99,9 |
| R3090 | 51,2 | 50,1 | 40,7 | 0,97 | 0,52 | 2,813 | 2,010 | 103 | 93 |
| N3000 | 35,3 | 29,0 | 25,0 | 0,998 | 0,75 | 2,891 | 1,736 | 54,5 | 98,5 |
| N3037 | 30,3 | 27,1 | 20,7 | 0,97 | 0,82 | 2,970 | 1,702 | 50,4 | 93 |
| N3090 | 29,1 | 25,0 | 18,4 | 0,998 | 0,72 | 2,754 | 1,649 | 44,6 | 97,5 |

Tabela V.5 - Determinação de $D_{0,2}$ através da regressão linear, ensaios com ferramenta I.

| MATERIAIS CÓDIGOS | ROTAÇÕES RPM | VALORES DE $D_{0,2}$ (mm) | | | \bar{X} | S | X% |
|-----------------------|-----------------|---------------------------|------|-----------------------|-----------|-------|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | | | |
| B1000 | 630 | 42,5 | 45,5 | 50 | 46,0 | 3,775 | 8,2 |
| | 800 | 34,2 | 38,3 | 38,5 | 37,0 | 2,427 | 6,5 |
| | 1000 | 33,0 | 29,2 | 29,4 | 30,5 | 2,138 | 7,0 |
| B1034 | 630 | 38,6 | 41,4 | 40,0 | 40,0 | 1,400 | 3,5 |
| | 800 | 31,5 | 32,0 | 35,5 | 33,0 | 2,179 | 6,6 |
| | 1000 | 25,5 | 24,5 | 23,5 | 24,5 | 1,000 | 4,1 |
| B1070 | 630 | 35,6 | 37,8 | 37,6 | 37,0 | 1,216 | 3,3 |
| | 800 | 29,2 | 30,4 | 30,4 | 30,0 | 0,692 | 2,3 |
| | 1000 | 22,5 | 21,0 | 22,5 | 22,0 | 0,866 | 3,9 |
| R1000 | 630 | 58,2 | 63,0 | 58,7 | 60,0 | 2,639 | 4,4 |
| | 800 | 50,0 | 45,5 | 45,5 | 47,0 | 2,598 | 5,5 |
| | 1000 | 39,2 | 40,7 | 38,0 | 39,3 | 1,352 | 3,4 |
| R1034 | 630 | 58,0 | 56,0 | 60,0 | 58,0 | 2,000 | 3,4 |
| | 800 | 45,2 | 47,3 | 45,5 | 46,0 | 1,136 | 2,5 |
| | 1000 | 36,4 | 38,2 | 38,8 | 37,8 | 1,250 | 3,3 |
| R1070 | 630 | 53,0 | 56,5 | 55,5 | 55,0 | 1,803 | 3,3 |
| | 800 | 41,2 | 44,3 | 45,0 | 43,5 | 2,022 | 4,6 |
| | 1000 | 37,0 | 36,0 | 32,0 | 35,0 | 2,646 | 7,5 |
| N1000 | 630 | 29,0 | 29,2 | 30,1 | 29,4 | 0,585 | 2,0 |
| | 800 | 25,6 | 23,8 | 23,2 | 24,2 | 1,249 | 5,2 |
| | 1000 | 17,8 | 18,2 | 18,9 | 18,3 | 0,557 | 3,0 |
| N1034 | 630 | 27,0 | 30,0 | 30,0 | 29,0 | 1,732 | 6,0 |
| | 800 | 23,4 | 22,5 | 23,4 | 23,1 | 0,520 | 2,2 |
| | 1000 | 18,0 | 18,4 | 17,0 | 17,8 | 0,721 | 4,0 |
| N1070 | 630 | 27,5 | 26,4 | 25,0 | 26,3 | 1,252 | 4,8 |
| | 800 | 21,2 | 21,8 | 22,4 | 21,8 | 0,600 | 2,8 |
| | 1000 | 17,0 | 18,2 | 17,0 | 17,4 | 0,693 | 4,0 |
| SAE 1212 | 1000 | 40,8 | 41,7 | 44,7 | 42,4 | 2,042 | 4,8 |
| | 1250 | 27,0 | 29,6 | 28,6 | 28,4 | 1,311 | 4,6 |
| | 2000 | 22,0 | 21,5 | 19,5 | 21,0 | 1,323 | 6,3 |
| Dispersão máxima: 8,2 | | | | Dispersão média: 4,43 | | | |

Tabela V.4 - Valores de $D_{0,2}$ nas rotações indicadas dos ensaios Mathon Ferramenta 2 para os materiais da 1ª corrida.

| MATERIAIS CÓDIGOS | VALORES MÉDIOS DE $D_{0,2}$ | | | COEF. CORR. r | COEF. m | $\log C$ | $\log D_{0,2}$ | $D_{0,2} P/$ $n=350$ | PRECISÃO DA DETERMIN. % |
|----------------------|-----------------------------|-------|-------|-----------------------|--------------|----------|----------------|-------------------------|-------------------------------|
| | n_1 | n_2 | n_3 | | | | | | |
| B1000 | 46,0 | 37,0 | 30,5 | 0,999990 | 0,89 | 3,275 | 1,893 | 78 | 99,9 |
| B1034 | 40,0 | 33,0 | 24,5 | 0,990 | 1,05 | 3,515 | 1,882 | 76 | 95,0 |
| B1070 | 37,0 | 30,0 | 22,0 | 0,991 | 1,12 | 3,600 | 1,864 | 73 | 96,0 |
| R1000 | 60,0 | 47,0 | 39,3 | 0,997 | 0,92 | 3,429 | 2,010 | 102 | 97,5 |
| R1034 | 58,0 | 46,0 | 37,8 | 0,9999995 | 0,88 | 3,337 | 1,998 | 99 | 100 |
| R1070 | 55,0 | 43,5 | 35,0 | 0,9999990 | 0,98 | 3,512 | 1,994 | 98 | 100 |
| N1000 | 29,4 | 24,2 | 18,3 | 0,993 | 1,03 | 3,331 | 1,740 | 55 | 97 |
| N1034 | 29,0 | 23,1 | 17,8 | 0,998 | 1,05 | 3,363 | 1,735 | 54 | 97,5 |
| N1070 | 26,3 | 21,8 | 17,4 | 0,998 | 0,89 | 3,033 | 1,653 | 45 | 97,5 |
| SAE 1212 | 42,4 | 28,4 | 21,0 | 0,96 | 0,96 | 3,512 | 2,033 | 108 | 90,0 |

Tabela V.5 - Determinação de $D_{0,2}$ através da regressão linear, Ensaios com ferramenta 2.

| MATERIAIS CÓDIGOS | ROTAÇÕES RPM | VALORES DE L (mm) | | | \bar{X} | X | XZ |
|------------------------|-----------------|-------------------|------|-----------------------|-----------|-------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | | | |
| B1000 | 1000 | 56,0 | 52,5 | 50,5 | 53,0 | 2,270 | 4,3 |
| | 1250 | 38,0 | 39,0 | 37,0 | 38,0 | 0,816 | 2,15 |
| | 2000 | 14,0 | 15,0 | 17,0 | 15,3 | 1,247 | 8,15 |
| B1034 | 1000 | 46,0 | 44,0 | 45,0 | 45,0 | 0,816 | 1,81 |
| | 1250 | 28,0 | 30,5 | 27,0 | 28,5 | 1,472 | 5,16 |
| | 2000 | 10,5 | 11,0 | 10,9 | 10,8 | 0,216 | 2,00 |
| B1070 | 1000 | 37,0 | 35,0 | 34,5 | 35,5 | 1,080 | 3,04 |
| | 1250 | 23,0 | 23,5 | 21,0 | 22,5 | 1,080 | 4,80 |
| | 2000 | 8,0 | 8,0 | 8,5 | 8,2 | 0,235 | 2,87 |
| R1000 | 1465 | 34,0 | 33,0 | 35,0 | 34,0 | 0,816 | 2,40 |
| | 2000 | 26,5 | 25,2 | 25,1 | 25,6 | 0,637 | 2,49 |
| | 2344 | 21,0 | 20,5 | 21,5 | 21,0 | 0,408 | 1,94 |
| R1034 | 1465 | 33,0 | 32,0 | 28,0 | 31,0 | 2,160 | 6,96 |
| | 2000 | 24,5 | 23,0 | 23,0 | 23,5 | 0,707 | 3,00 |
| | 2344 | 17,0 | 17,0 | 20,0 | 18,0 | 1,414 | 7,85 |
| R1070 | 1465 | 28,0 | 28,0 | 28,0 | 28,0 | 0 | 0 |
| | 2000 | 20,0 | 22,0 | 21,0 | 21,0 | 0,816 | 3,90 |
| | 2344 | 15,5 | 16,5 | 14,5 | 15,5 | 0,816 | 5,26 |
| N1000 | 630 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 0 | 0 |
| | 800 | 32,0 | 36,0 | 34,0 | 34,0 | 1,632 | 4,80 |
| | 1000 | 28,5 | 26,0 | 25,0 | 26,5 | 1,472 | 5,55 |
| N1034 | 630 | 49,0 | 51,0 | 47,0 | 49,0 | 1,632 | 3,3 |
| | 800 | 32,0 | 32,5 | 30,0 | 31,5 | 1,080 | 3,42 |
| | 1000 | 20,0 | 22,0 | 22,5 | 21,5 | 1,080 | 5,02 |
| N1070 | 630 | 46,0 | 46,0 | 46,0 | 46,0 | 0 | 0 |
| | 800 | 28,8 | 28,7 | 25,0 | 27,5 | 1,768 | 6,42 |
| | 1000 | 18,1 | 17,1 | 18,0 | 17,7 | 0,449 | 2,54 |
| Dispersão máxima: 8,15 | | | | Dispersão média: 3,67 | | | |

Tabela V.6 - Valores de (L) para cálculo da velocidade v_{LF} , materiais da 1.^a corrida e ensaios com ferramenta 1.

| MATERIAIS CÓDIGOS | ROTAÇÕES RPM | VALORES DE L (mm) | | | \bar{X} | S | XZ |
|------------------------|-----------------|-------------------|------|-----------------------|-----------|-------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | | | |
| B2000 | 1000 | 54,0 | 50,0 | 52,5 | 52,2 | 1,650 | 3,2 |
| | 1250 | 35,0 | 37,0 | 39,0 | 37,0 | 1,633 | 4,4 |
| | 2000 | 15,0 | 15,0 | 15,0 | 15,0 | 0 | 0 |
| B2061 | 1000 | 39,0 | 38,0 | 38,0 | 38,3 | 0,470 | 1,23 |
| | 1250 | 26,0 | 25,0 | 29,1 | 26,7 | 1,745 | 6,53 |
| | 2000 | 9,5 | 11,0 | 11,0 | 10,5 | 0,707 | 6,73 |
| B2104 | 1000 | 33,0 | 34,0 | 32,0 | 33,0 | 0,816 | 2,47 |
| | 1250 | 21,0 | 23,0 | 22,0 | 22,0 | 0,816 | 3,71 |
| | 2000 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 0 | 0 |
| R3000 | 1250 | 48,0 | 49,0 | 48,0 | 48,0 | 0,471 | 0,98 |
| | 1465 | 36,0 | 35,0 | 35,0 | 35,3 | 0,471 | 1,33 |
| | 2000 | 26,0 | 25,0 | 26,0 | 25,7 | 0,471 | 1,84 |
| R3037 | 1250 | 39,0 | 38,0 | 37,0 | 38,0 | 0,816 | 2,15 |
| | 1465 | 24,0 | 24,0 | 24,5 | 24,2 | 0,235 | 1,00 |
| | 2000 | 16,0 | 19,0 | 18,0 | 17,6 | 1,250 | 7,1 |
| R3090 | 1250 | 27,0 | 28,0 | 26,0 | 27,0 | 0,816 | 3,02 |
| | 1465 | 20,0 | 21,0 | 19,5 | 20,2 | 0,624 | 3,10 |
| | 2000 | 12,0 | 11,0 | 11,0 | 11,3 | 0,471 | 4,17 |
| N3000 | 630 | 53,0 | 53,0 | 52,0 | 52,7 | 0,471 | 0,90 |
| | 800 | 38,0 | 37,0 | 39,0 | 38,0 | 0,816 | 2,14 |
| | 1000 | 24,5 | 24,4 | 24,0 | 24,3 | 0,216 | 0,90 |
| N3037 | 630 | 46,0 | 44,0 | 44,0 | 44,7 | 0,942 | 2,11 |
| | 800 | 37,0 | 35,0 | 36,0 | 36,0 | 0,816 | 2,27 |
| | 1000 | 21,0 | 22,4 | 25,0 | 22,8 | 1,657 | 7,26 |
| N3090 | 630 | 40,0 | 41,0 | 42,0 | 41,0 | 0,816 | 2,00 |
| | 800 | 32,0 | 33,0 | 31,0 | 32,0 | 0,816 | 2,55 |
| | 1000 | 20,0 | 20,4 | 21,7 | 20,7 | 0,725 | 3,50 |
| Dispersão máxima: 7,26 | | | | Dispersão média: 2,84 | | | |

Tabela V.7 - Valores de (L) para o cálculo da velocidade v_{LP} , materiais da 2.^a e 3.^a corridas e ensaios com ferramenta 1.

| MATERIAIS CÓDIGOS | ROTAÇÕES RPM | L (mm) | v_{LF} (m/min) | $D_{0,2}$ (mm) | ROTAÇÕES RPM | L (mm) | v_{LF} (m/min) | $D_{0,2}$ (mm) | ROTAÇÕES RPM | L (mm) | v_{LF} (m/min) | $D_{0,2}$ (mm) |
|----------------------|-----------------|-----------|---------------------|-------------------|-----------------|-----------|---------------------|-------------------|-----------------|-----------|---------------------|-------------------|
| B1000 | 1000 | 53,0 | 135,4 | 53,9 | 1250 | 38,0 | 154,1 | 45,5 | 2000 | 15,3 | 172,3 | 31,8 |
| B1034 | 1000 | 45,0 | 117,8 | 41,9 | 1250 | 38,5 | 121,5 | 32,0 | 2000 | 10,8 | 132,7 | 23,4 |
| B1070 | 1000 | 35,5 | 96,9 | 36,6 | 1250 | 22,5 | 100,8 | 30,1 | 2000 | 8,2 | 109,8 | 20,0 |
| R1000 | 1465 | 34,0 | 188,1 | 56,5 | 2000 | 25,6 | 262,9 | 46,5 | 2344 | 21,0 | 297,9 | 41,6 |
| R1034 | 1465 | 31,0 | 173,9 | 53,0 | 2000 | 23,5 | 244,4 | 42,7 | 2344 | 18,0 | 261,7 | 39,0 |
| R1070 | 1465 | 28,0 | 159,8 | 48,3 | 2000 | 21,0 | 222,4 | 39,5 | 2344 | 15,5 | 231,5 | 34,5 |
| N1000 | 630 | 60,0 | 64,2 | 35,6 | 800 | 34,0 | 71,3 | 29,2 | 1000 | 26,5 | 77,1 | 22,1 |
| N1034 | 630 | 49,0 | 54,6 | 30,0 | 800 | 31,5 | 59,4 | 24,0 | 1000 | 21,5 | 66,1 | 20,0 |
| N1070 | 630 | 46,0 | 52,0 | 29,0 | 800 | 27,5 | 53,8 | 23,0 | 1000 | 17,7 | 57,8 | 19,2 |

Tabela V.8 - Valores de L, v_{LF} e $D_{0,2}$ nas várias rotações, ensaios dos materiais da 1.ª corrida e Ferramental I.

| MATERIAIS CÓDIGOS | ROTAÇÕES RPM | L (mm) | v_{LF} (m/min) | $D_{0,2}$ (mm) | ROTAÇÕES RPM | l (mm) | v_{LF} (m/min) | $D_{0,2}$ (mm) | ROTAÇÕES RPM | L (mm) | v_{LF} (m/min) | $D_{0,2}$ |
|----------------------|-----------------|-----------|---------------------|-------------------|-----------------|-----------|---------------------|-------------------|-----------------|-----------|---------------------|-----------|
| B2000 | 1000 | 52,2 | 133,6 | 52,3 | 1250 | 37,0 | 150,7 | 45,0 | 2000 | 15,0 | 169,9 | 32,7 |
| B2061 | 1000 | 38,3 | 103,1 | 34,9 | 1250 | 26,7 | 115,3 | 30,1 | 2000 | 10,5 | 130,1 | 18,9 |
| B2104 | 1000 | 33,0 | 91,4 | 32,0 | 1250 | 22,0 | 99,1 | 28,3 | 2000 | 9,0 | 116,9 | 17,6 |
| R3000 | 1250 | 48,3 | 189,5 | 58,2 | 1465 | 35,3 | 194,2 | 54,9 | 2000 | 25,7 | 263,8 | 43,0 |
| R3037 | 1250 | 38,0 | 154,1 | 56,5 | 1465 | 24,2 | 141,8 | 51,8 | 2000 | 17,6 | 192,5 | 42,8 |
| R3090 | 1250 | 27,0 | 116,3 | 51,2 | 1465 | 20,2 | 122,9 | 50,1 | 2000 | 11,3 | 137,1 | 40,7 |
| N3000 | 630 | 52,7 | 57,9 | 35,3 | 800 | 38,0 | 68,6 | 29,0 | 1000 | 24,3 | 72,3 | 25,0 |
| N3037 | 630 | 44,7 | 50,9 | 30,3 | 800 | 36,0 | 65,7 | 27,1 | 1000 | 22,8 | 69,0 | 20,7 |
| N3090 | 630 | 41,0 | 47,7 | 29,1 | 800 | 32,0 | 60,1 | 25,0 | 1000 | 20,7 | 64,4 | 18,4 |

Tabela V.9 - Valores de L, v_{LF} e $D_{0,2}$ nas várias rotações, ensaios dos materiais das 2.^a e 5.^a corridas com ferramenta 1.

| MATERIAIS CÓDIGOS | ROTAÇÕES RPM | VALORES DE L (mm) | | | \bar{X} | S | K% |
|------------------------|-----------------|-------------------|------|-----------------------|-----------|-------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | | | |
| B1000 | 630 | 78,0 | 85,0 | 80,0 | 81,0 | 2,943 | 3,63 |
| | 800 | 50,0 | 53,0 | 53,0 | 52,0 | 1,414 | 2,72 |
| | 1000 | 30,5 | 34,0 | 36,0 | 33,5 | 2,273 | 6,78 |
| B1034 | 630 | 72,0 | 74,0 | 77,0 | 74,0 | 2,055 | 2,80 |
| | 800 | 46,5 | 44,0 | 46,0 | 45,5 | 1,080 | 2,37 |
| | 1000 | 33,0 | 30,0 | 30,0 | 31,0 | 1,414 | 4,60 |
| B1070 | 630 | 63,0 | 65,0 | 70,0 | 66,0 | 2,944 | 4,46 |
| | 800 | 43,0 | 38,0 | 39,0 | 40,0 | 2,160 | 5,40 |
| | 1000 | 24,4 | 23,5 | 26,5 | 24,8 | 1,256 | 5,07 |
| R1000 | 630 | 96,0 | 93,0 | 87,0 | 92,0 | 3,742 | 4,10 |
| | 800 | 63,0 | 71,0 | 70,0 | 68,0 | 3,560 | 5,23 |
| | 1000 | 41,6 | 45,0 | 46,0 | 44,2 | 1,883 | 4,26 |
| R1034 | 630 | 86,5 | 93,5 | 90,0 | 90,0 | 2,857 | 3,17 |
| | 800 | 64,0 | 68,0 | 66,0 | 66,0 | 1,632 | 2,47 |
| | 1000 | 42,0 | 38,0 | 44,5 | 41,5 | 2,677 | 6,45 |
| R1070 | 630 | 87,5 | 89,5 | 90,5 | 89,0 | 1,247 | 1,40 |
| | 800 | 60,0 | 62,5 | 59,0 | 60,5 | 1,471 | 2,43 |
| | 1000 | 39,0 | 39,0 | 39,0 | 39,0 | 0 | 0 |
| N1000 | 630 | 48,0 | 53,0 | 49,5 | 50,0 | 2,094 | 4,18 |
| | 800 | 28,5 | 33,0 | 28,5 | 30,0 | 2,121 | 7,07 |
| | 1000 | 19,0 | 19,0 | 19,0 | 19,0 | 0 | 0 |
| N1034 | 630 | 46,5 | 48,5 | 52,0 | 49,0 | 2,273 | 4,63 |
| | 800 | 29,0 | 29,0 | 29,0 | 29,0 | 0 | 0 |
| | 1000 | 16,5 | 18,5 | 19,0 | 18,0 | 1,080 | 6,00 |
| N1070 | 630 | 47,5 | 43,5 | 44,5 | 45,0 | 1,699 | 3,80 |
| | 800 | 24,5 | 27,0 | 28,0 | 26,5 | 1,472 | 5,55 |
| | 1000 | 14,5 | 16,5 | 17,0 | 16,0 | 1,080 | 6,75 |
| Dispersão máxima: 7,07 | | | | Dispersão média: 3,90 | | | |

Tabela V.10 - Valores de (L) para o cálculo da velocidade v_{LF} , materiais da 1ª corrida e ensaios com ferramenta 2.

| MATERIAIS CÓDIGOS | ROTAÇÕES RPM | L (mm) | v_{LF} (m/min) | $D_{0,2}$ (mm) | ROTAÇÕES RPM | L (mm) | v_{LF} (m/min) | $D_{0,2}$ (mm) | ROTAÇÕES RPM | L (mm) | v_{LF} (m/min) | $D_{0,2}$ (mm) |
|----------------------|-----------------|-----------|---------------------|-------------------|-----------------|-----------|---------------------|-------------------|-----------------|-----------|---------------------|-------------------|
| B1000 | 630 | 81,0 | 82,6 | 46,0 | 800 | 52,0 | 88,3 | 37,0 | 1000 | 33,5 | 92,5 | 30,5 |
| B1034 | 630 | 74,0 | 76,5 | 40,0 | 800 | 45,5 | 79,1 | 33,0 | 1000 | 31,0 | 87,0 | 24,5 |
| B1070 | 630 | 66,0 | 69,5 | 37,0 | 800 | 40,0 | 71,4 | 30,0 | 1000 | 24,8 | 73,4 | 22,0 |
| R1000 | 630 | 92,0 | 92,2 | 60,0 | 800 | 68,0 | 110,8 | 47,0 | 1000 | 44,2 | 116,0 | 39,3 |
| R1034 | 630 | 90,0 | 90,4 | 58,0 | 800 | 66,0 | 108,0 | 46,0 | 1000 | 41,5 | 110,1 | 37,8 |
| R1070 | 630 | 89,0 | 89,6 | 55,0 | 800 | 60,5 | 102,0 | 43,5 | 1000 | 39,0 | 104,6 | 35,0 |
| N1000 | 630 | 50,0 | 55,5 | 29,4 | 800 | 30,0 | 57,3 | 24,2 | 1000 | 19,0 | 60,6 | 18,3 |
| N1070 | 630 | 45,0 | 51,1 | 26,3 | 800 | 26,5 | 52,4 | 21,8 | 1000 | 16,0 | 54,0 | 17,4 |
| N1034 | 630 | 49,0 | 54,6 | 29,0 | 800 | 29,0 | 55,9 | 23,1 | 1000 | 18,0 | 58,4 | 17,8 |

Tabela V.11 - Valores de L, v_{LF} e $D_{0,2}$ nas várias rotações, ensaios dos materiais da 1ª corrida e ferramenta 2.

APÊNDICE VI
ENSAIOS DATSKO

Cálculo da velocidade v_{60} segundo DATSKO

$$v_{60} = \frac{17,3}{q} \left(\frac{K}{HB} \right) \left(\frac{1}{Rf} \right)^{0,5} \quad (\text{f.p.m})$$

| MATERIAIS CÓDIGOS | q | K | HB | 1/Rf | v_{60} (f.p.m) | v_{60} (m/min) | I.U.Z. PADRÃO B1000 | I.U.Z. PADRÃO SAE1212 |
|----------------------|--------|------|-----|------|---------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------------|
| B1000 | 0,0115 | 20,5 | 166 | 0,86 | 172,3 | 52,5 | 100 | 74 |
| B1034 | 0,0098 | 18,1 | 196 | 0,93 | 157,2 | 47,9 | 91 | 68 |
| B1070 | 0,0098 | 18,1 | 249 | 0,98 | 127,0 | 38,7 | 74 | 55 |
| R1000 | 0,0116 | 20,5 | 158 | 0,86 | 180,0 | 54,7 | 104 | 77 |
| R1034 | 0,0116 | 20,5 | 159 | 0,88 | 180,0 | 54,7 | 104 | 77 |
| R1070 | 0,0116 | 20,5 | 167 | 0,89 | 172,7 | 52,6 | 100 | 74 |
| N1000 | 0,0105 | 18,1 | 265 | 0,96 | 110,3 | 33,6 | 64 | 48 |
| N1034 | 0,0098 | 18,1 | 287 | 0,97 | 109,6 | 33,4 | 63 | 47 |
| N1070 | 0,0098 | 18,1 | 295 | 0,98 | 107,2 | 32,7 | 62 | 46 |
| B2000 | 0,0115 | 20,5 | 175 | 0,89 | 165,2 | 50,6 | 96 | 72 |
| B2061 | 0,0098 | 18,1 | 257 | 0,94 | 120,5 | 36,7 | 70 | 52 |
| B2104 | 0,0098 | 18,1 | 272 | 0,98 | 116,3 | 35,4 | 67 | 50 |
| R3000 | 0,0116 | 20,5 | 161 | 0,85 | 175,1 | 53,4 | 102 | 76 |
| R3037 | 0,0116 | 20,5 | 163 | 0,86 | 174,0 | 53,0 | 101 | 75 |
| R3090 | 0,0116 | 20,5 | 176 | 0,89 | 163,9 | 50,0 | 95 | 71 |
| N3000 | 0,0105 | 18,1 | 249 | 0,96 | 117,3 | 35,8 | 68 | 51 |
| N3037 | 0,0098 | 18,1 | 287 | 0,97 | 109,6 | 33,4 | 64 | 47 |
| N3090 | 0,0098 | 18,1 | 311 | 0,98 | 101,7 | 31,0 | 59 | 44 |
| SAE1212 | 0,0118 | 28 | 116 | 0,43 | 232 | 70,7 | - | 100 |

Tabela VI.1 - Valores das variáveis do cálculo da velocidade de v_{60} segundo DATSKO e valores dos