UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Análise Térmica na Solidificação de Ferros Fundidos Cinzentos Hipoeutéticos

Autor: **Jorge Ayrton da Silva**
Orientador: **Amauri Garcia**

02/07

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DEPARTAMENTO DE MATERIAIS

Análise Térmica na Solidificação de Ferros Fundidos Cinzentos Hipoeutéticos

Autor: **Jorge Ayrton da Silva**
Orientador: **Amauri Garcia**

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Engenharia de Materiais e Processos de Fabricação

Trabalho final de Mestrado apresentado à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2007.
S.P . – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Si38a

Silva, Jorge Ayrton da
Análise térmica na solidificação de ferros fundidos cinzentos hipoeutéticos / Jorge Ayrton da Silva. – Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Amauri Garcia.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Análise térmica. 2. Solidificação. 3. Ferro fundido. 4. Metais líquidos – Propriedades térmicas. I. Garcia, Amauri. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Titulo em Inglês: Thermal analysis on solidification of hypoeutectic gray cast iron.
Palavras-chave em Inglês: Thermal analysis, Cast iron, Solidification, Thermal variables, Thermal sensors, Unidirectional solidification.
Área de concentração: Materiais e processos de fabricação.
Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica.
Banca examinadora: Carlos de Moura Neto, Célia Marina de Alvarenga Freire.
Data da defesa: 13/02/2007
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS

TRABALHO FINAL DE MESTRADO ACADÊMICO

Análise Térmica na Solidificação de Ferros Fundidos Cinzentos Hipoeutéticos

Autor: **Jorge Ayrton da Silva**
Orientador: **Amauri Garcia**

A Banca Examinadora aprovou esta Dissertação composta pelos membros abaixo:

Prof. Dr. Amauri Garcia, Presidente
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Prof. Dr. Carlos de Moura Neto
Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA

Profa. Dra. Célia Marina de Alvarenga Freire
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Campinas, 13 de fevereiro de 2007.

2007 41813

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais,

Jorge José da Silva e

Zenaide Batista da Silva,

pelo amor incondicional de todas as horas, pelo exemplo de trabalho e honestidade e, por serem responsáveis pela minha educação e pelo meu caráter.

À minha esposa,

Laís Cardoso Silva,

pelo incentivo e por sempre estar comigo, nos bons e maus momentos de minha vida.

Ao meu filho,

Pedro Cardoso Silva,

que, com o seu sorriso, me faz lembrar que a vida deve ser simples e bela.

E também aos meus irmãos,

Janete Silva e

Job José da Silva.

que felizmente fazem parte da minha história de vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por minha existência com saúde.

Ao meu orientador Prof. Dr. Amauri Garcia, que me mostrou os caminhos a serem seguidos, sempre com muita paciência e dedicação.

À ECIL MET. TEC. Ltda., em especial ao Vice-Presidente, Eng. Luís Antônio de Carvalho Freire, pela cessão dos materiais e de parte de meu horário de trabalho para a realização deste mestrado, bem como ao Gerente Industrial, Sr. Artur Hess Junior, pela amizade, credibilidade e confiança.

Às fundições Yadoya, Lepe, Fundituba e Magneti-Marelli, por permitirem o acesso para a realização dos ensaios, em especial, ao Eng. Gustavo Silva (Magneti-Marelli).

Aos amigos do GPS, Grupo de Pesquisas em Solidificação da UNICAMP, pela ajuda nas horas das dúvidas. Em especial, ao Dr. Noé Cheung e ao Dr. Ivaldo Leão Ferreira.

Aos amigos da UNICAMP, MSc. Mário Luiz Nunes da Silva e MSc. Arnaldo Gonçalves, aos mestrandos Camila Sola Ruiz e Roque Ribeiro Junior, pela amizade, pelo incentivo e companheirismo durante o curso.

Aos amigos da ECIL, Eng. Djalma Domingues do Amaral, Eng. Diego Nicolau Soares e José Otávio Xavier de Oliveira, pela ajuda nas realizações dos ensaios. E também a Marcelo Ferraz Revidiego e Rodrigo de Góes Vieira, pela ajuda com desenhos técnicos e manipulação de arquivos eletrônicos.

A todos os professores e colegas que ajudaram, de forma direta ou indireta, na concretização deste trabalho.

À FAPESP, ao CNPq e à FAEPEX-UNICAMP, pelo apoio financeiro às atividades do GPS.

"Muitos dos fracassos na vida acontecem a pessoas que não percebem o quanto estavam perto do sucesso, na hora em que desistiram."
(Thomas Edison)

RESUMO

SILVA, Jorge Ayrton da; *Análise Térmica na Solidificação de Ferros Fundidos Cinzentos Hipoeutéticos*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007 (Dissertação de Mestrado).

A análise térmica é amplamente utilizada como método de controle de processos metalúrgicos e na investigação da composição química de ferros fundidos na prática de fundição. Um meio confiável de avaliação da composição de ferros fundidos é disponibilizado pela técnica do Carbono Equivalente, que é baseada na mudança de inclinação da curva de resfriamento na temperatura *liquidus* durante o resfriamento de uma amostra de ferro fundido a partir do estado líquido. O presente trabalho é focado no desenvolvimento de um novo sensor para análise térmica, um sensor de imersão, que objetiva contribuir com determinações mais confiáveis de composição durante as operações de fundição. Foram desenvolvidos experimentos em diferentes empresas de fundição, utilizando-se tanto o sensor de imersão quanto o tradicional sensor tipo cápsula, normalmente utilizado na prática de fundição. As comparações de composições químicas, medidas por essas duas técnicas e medidas fornecidas por análise de espectrometria de emissão óptica, demonstram que geralmente o sensor de imersão fornece resultados mais confiáveis. Uma análise térmica realizada durante o resfriamento de ferro fundido em um dispositivo unidirecional com uma coquilha, e utilizando um conjunto de termopares, permitiu também a determinação quantitativa de variáveis térmicas de solidificação, tais como: coeficientes transitórios de transferência de calor metal/molde e molde/ambiente e taxa de resfriamento à frente da isoterma *liquidus*.

Palavras-Chave: Análise térmica, Ferro fundido cinzento, Variáveis térmicas, Sensores térmicos, Solidificação unidirecional.

ABSTRACT

SILVA, Jorge Ayrton da; *Thermal Analysis on Solidification of Hypoeutectic Gray Cast Iron*. Campinas: Faculty of Mechanical Engineering, State University of Campinas, Brazil, 2007 (Master Degree Thesis).

Thermal analysis is a widely used method for metallurgical process control and investigation of alloy composition of cast irons in foundry practice. A reliable means of rapidly evaluating the composition of cast irons is available by the Carbon-Equivalent technique, which is based on the change in thermal arrest temperature of the *liquidus* as the sample of molten cast iron freezes. The present work focuses on the development of a new sensor for thermal analysis, a dip-sensor, wich aims to contribute to more reliable determination of alloy composition during casting operation. Experiments were carried-out in different foundries by using both the dip-sensor and the traditional capsule-sensor, which is normally used in foundry practice. The comparison of alloy compositions measured by these two techniques with analysis performed by Arc/Spark spectrometry has shown that generally the dip-sensor provides more reliable results. Thermal analysis conducted during cooling of molten cast iron in a unidirectional chill apparatus, by using a set of thermocouples, has also permitted the quantitative determination of solidification thermal variables, such as: transient metal/mold and mold/ambient heat transfer coefficients and tip cooling rates.

Keywords: Thermal analysis, Gray cast iron, Solidification thermal variables, Thermal sensors, Unidirectional solidification.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS xii
ÍNDICE DE TABELAS xv
NOMENCLATURA xvi

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO 1
1.1. Considerações Iniciais 1
1.2. Objetivos do Trabalho 5

CAPÍTULO 2 - ANÁLISE TÉRMICA NA FUNDIÇÃO DE FERROS FUNDIDOS CINZENTOS 6
2.1. Ferro fundido 6
2.1.1. Definição de ferro fundido 6
2.1.2. Fatores preponderantes na estrutura do ferro fundido 7
2.1.2.a. Composição química: 7
2.1.2.b. Velocidade de resfriamento 7
2.1.3. Componentes estruturais dos ferros fundidos 8
2.2. Classificação de ferros fundidos 10
2.2.1 Ferro fundido branco 10
2.2.2. Ferro fundido maleável 11
2.2.3. Ferro fundido mesclado 11
2.2.4. Ferro fundido cinzento 12
2.2.4.a. Classificação dos ferros fundidos cinzentos 13
2.2.4.b. Propriedades dos ferros fundidos cinzentos 14

2.2.4.c. Aplicações do ferro fundido cinzento....16
2.2.5. Ferro fundido nodular....17
2.2.5.a. Especificações e propriedades do ferro fundido nodular....19
2.2.5.b. Aplicações típicas do ferro fundido nodular....19
2.2.6. Ferro fundido vermicular....20
2.3. Princípios da termometria....22
2.3.1. O efeito Seebeck:....22
2.3.2. Potência termoelétrica....23
2.3.3. Efeito termoelétrico de Peltier....23
2.3.4. Leis básicas de funcionamento de termopares....24
2.3.5. Escalas práticas de temperatura....27
2.4. Análise térmica....28
2.4.1. O ponto de fusão....28
2.4.2. O intervalo de solidificação....32
2.4.3: Análise térmica em ferros fundidos para determinação da composição química....35

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS....43
3.1. Análise química e análise térmica....43
3.1.1. Considerações iniciais....43
3.2. Ferros fundidos utilizados nos ensaios....45
3.2.1. Primeira etapa de comparação (cápsula x sensor de imersão)....46
3.2.3. Segunda etapa de comparação (cápsula x sensor de imersão)....46
3.2.4. Terceira etapa de comparação (cápsula x sensor de imersão)....46
3.2.5. Ensaio de aferição experimental....47
3.3 - Metodologia de ensaios/análise....48
3.3.1. Ensaios comparativos cápsula padrão x sensor de imersão....48
3.4. Calibração dos sensores utilizados nos ensaios....50
3.5. Experimentos em dispositivo de solidificação unidirecional....51
3.6. Aparelhos utilizados nos ensaios....53
3.6.1. Para o controle de temperatura do banho....53
3.6.2. Para o registro da análise térmica....53

3.6.3. Para a aferição experimental 54
3.6.4. Para as análise químicas 55
3.7. Sensores utilizados nos ensaios 56
3.7.1. Sensor de temperatura 56
3.7.2. Cápsula de análise térmica 56
3.7.3. Sensor de análise térmica por imersão 57
3.7.4. Análise experimental 58

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES 59
4.1. Desenvolvimento do sensor por imersão 59
4.1.1. Resultados dos primeiros ensaios 62
4.2. Resultados experimentais 64
4.2.1. Variáveis térmicas da solidificação 64
4.2.2. Análise comparativa entre resultados cápsula padrão x sensor de imersão 68
4.2.2.a. Primeira etapa 68
4.2.2.b Segunda etapa 72
4.2.2.c. Terceira etapa 76
4.3. Curvas de resfriamentos 82
4.4. Análises dos resultados experimentais 85
4.4.1. Análise química pela análise térmica 85

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 87
5.1. Conclusões 87
5.2. Sugestões para trabalhos futuros 91

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS: 92

ANEXOS 96

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Curvas de resfriamento e diagrama de fases para as ligas A e B. 1
FIGURA 1.2 – Curva de resfriamento para um ferro fundido com 3,2 %C. 2
FIGURA 1.3 - Curva e Taxa de resfriamento obtida por Análise Térmica Diferencial. 3
FIGURA 2.1 - Diagrama de equilíbrio ferro-carbono. 6
FIGURA 2.2 - Tipos de grafita em ferros fundidos cinzentos. 8
FIGURA 2.3 - Imagens de MEV ilustrando as diversas morfologias da grafita presentes nos ferros fundidos cinzentos 13
FIGURA 2.4 - Exemplos de morfologia típica da grafita encontrada em ferros fundidos. 18
FIGURA 2.5 - Microestrutura típica de ferro fundido vermicular. 21
FIGURA 2.6 - Representação do efeito Seebeck. 23
FIGURA 2.7 - Lei do circuito homogêneo. 24
FIGURA 2.8 - Lei dos materiais intermediários 25
FIGURA 2.9 - Lei das temperaturas intermediárias. 25
FIGURA 2.10 - Curvas de resfriamento de um elemento puro a partir do estado líquido 31
FIGURA 2.11 - Casos típicos de curvas de resfriamento 32
FIGURA 2.12 - Resfriamento de uma liga monofásica a partir do estado líquido e em condições de equilíbrio. 33
FIGURA 2.13 - Evolução da fração sólida (f_s) com a temperatura e a entalpia a partir do estado líquido. 34
FIGURA 2.14 - Diagrama de equilíbrio isomorfo 36
FIGURA 2.15 - Detalhe da região do eutético no diagrama de equilíbrio Fe-C. 38
FIGURA 2.16 - Cápsula com tinta à base de telúrio, solidificando no sistema metaestável. 39
FIGURA 2.17 - Cápsula sem tinta à base de telúrio, solidificando no sistema estável 40

FIGURA 2.18 - Ábaco BCIRA. 41
FIGURA 3.1 - Vazamento de ferro fundido em uma cápsula de análise térmica. 44
FIGURA 3.2 - Faixa das ligas utilizadas nos ensaios de comparação. 45
FIGURA 3.3 - Esquema experimental na solidificação unidirecional 51
FIGURA 3.4 - Aparelho Inditemp II. 53
FIGURA 3.5 - Aparelho Ferrolab III. 54
FIGURA 3.6 - Registrador Data-Logger Almemo. 54
FIGURA 3.7 - Tela do monitoramento das temperaturas e fornecimento dos perfis térmicos. 55
FIGURA 3.8 - Cápsulas de análise térmica 56
FIGURA 3.9 - Principais dimensões da cápsula tradicional 57
FIGURA 3.10 - Sensor de análise térmica por imersão. 57
FIGURA 4.1 - Detalhes construtivos do sensor de imersão. 59
FIGURA 4.2 - Curva de resfriamento comparativa entre uma Cápsula x Sensor de imersão. 61
FIGURA 4.3 - Sensor por imersão sendo colocado do banho.. 61
FIGURA 4.4 - Gráfico de análise dos resultados de %CE, na Primeira Etapa. 69
FIGURA 4.5 - Gráfico dos resultados de %CE - Primeira Etapa. 70
FIGURA 4.6 - Gráfico de análise dos resultados de %C, na Primeira Etapa. 70
FIGURA 4.7 - Gráfico dos resultados de %C - Primeira Etapa. 71
FIGURA 4.8 - Gráfico de análise dos resultados de %Si, na Primeira Etapa. 71
FIGURA 4.9 - Gráfico dos resultados de %Si - Primeira Etapa. 72
FIGURA 4.10 - Gráfico de análise dos resultados de %CE, na Segunda Etapa. 73
FIGURA 4.11 - Gráfico dos resultados de %CE - Segunda Etapa. 74
FIGURA 4.12 - Gráfico de análise dos resultados de %C, na Segunda Etapa. 74
FIGURA 4.13 - Gráfico dos resultados de %C - Segunda Etapa. 75
FIGURA 4.14 - Gráfico de análise dos resultados de %C, na Segunda Etapa. 75
FIGURA 4.15 - Gráfico dos resultados de %C - Segunda Etapa. 76
FIGURA 4.16 - Gráfico de análise dos resultados de %CE, na Terceira Etapa.. 76
FIGURA 4.17 - Gráfico dos resultados de %CE - Terceira.Etapa. 76
FIGURA 4.18 - Gráfico de análise dos resultados de %C, na Terceira Etapa.. 76
FIGURA 4.19 - Gráfico dos resultados de %C - Terceira Etapa.. 76
FIGURA 4.20 - Gráfico de análise dos resultados de %Si, na Terceira Etapa.. 76

FIGURA 4.21 - Gráfico dos resultados de %Si - Terceira Etapa. 81
FIGURA 4.22 - Curva de resfriamento comparativa Cápsula x Imersão, exemplo 1.....82
FIGURA 4.23 - Curva de resfriamento comparativa Cápsula x Imersão, exemplo 2.....83
FIGURA 4.24 - Curva de resfriamento comparativa Cápsula x Imersão, exemplo 3.....83
FIGURA 4.25 - Curva de resfriamento comparativa Cápsula x Imersão, exemplo 4.....84

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1 - Aplicações dos ferros cinzentos, segundo as classes ASTM A48. 16
TABELA 2.2 - Composição e propriedades mecânicas de tipos ferro nodular. 19
TABELA 2.3 - Aplicação do ferro fundido nodular segundo as normas.....20
TABELA 2.4 - Termopares mais utilizados industrialmente.....26
TABELA 2.5 - Valores dos pontos fixos segundo as IPTS 48, IPTS 68 e ITS 90. 27
TABELA 3.1 - Composição química nominal: (%p) – Primeira etapa. 46
TABELA 3.2 - Composição química: (%p)– Segunda Etapa.....46
TABELA 3.3 - Composição química: (%p) – Terceira etapa. 47
TABELA 3.4 - Composição de carga – Ensaio aferição experimental.....47
TABELA 3.5 - Composição química: (%p) – Ensaio aferição experimental. 47
TABELA 3.6 - Precisão dos sensores descartáveis utilizados nos ensaios.....50
TABELA 3.7 - Precisão dos sensores convencionais utilizados nos ensaios. 50
TABELA 4.1 - Resultados de tempos de análise x dimensões da câmara.....60
TABELA 4.2 - Composição química dos ferros fundidos utilizados 62
TABELA 4.3 - Dados coletados na Primeira Etapa.....68
TABELA 4.4 - Resumo dos resultados obtidos na Primeira Etapa. 68
TABELA 4.5 - Dados coletados na Segunda Etapa.....72
TABELA 4.6 - Resumo dos resultados obtidos na Segunda Etapa. 73
TABELA 4.7 - Dados coletados na Terceira Etapa. 77
TABELA 4.8 - Resumo dos resultados obtidos na Terceira Etapa.....78

NOMENCLATURA

Letras Latinas

C	Calor específico	[J/kg.K]
c_{pS}	Calor específico do sólido	[J/kg/K]
c_{pL}	Calor específico do líquido	[J/kg/K]
C_0	Concentração inicial	[% em peso]
C_{EUT}	Concentração eutética	[% em peso]
C_{EL}	Carbono Equivalente do líquido	[% em peso]
c_L	Calor específico do metal líquido	[J/kg.K]
com	Calor específico do molde	[J/kg.K]
E	Energia interna da fase	[J/m^3]
F_L	Energia livre do líquido	[J/m^3]
f_L	Fração de líquido	adimensional
F_S	Energia livre do sólido	[J/m^3]
f_S	Fração de sólido	adimensional
H	Entalpia	[J/m^3]
H_L	Entalpia do líquido	[J/m^3]
H_S	Entalpia do sólido	[J/m^3]
h_{amb}	Coeficiente de transferência de calor coquilha/ambiente	[W/m^{2}K]
h_i	Coeficiente de transferência de calor ferro fundido/coquilha	[W/m^{2}K]
K	Calor específico	[J/kg/K]
K_0	Coeficiente de partição	adimensional
Km	Calor específico do molde	[J/kg/K]
K_S	Condutividade térmica sólido	[W/mK]
K_L	Condutividade térmica líquido	[W/mK]
L	Calor latente	[kJ/kg]
M	Massa do material	[kg]
P	Pressão	Pa
Pt	Potência termoelétrica	*m*V/°C
Q	Calor a ser removido	J
R^2	Coeficiente da regressão linear	adimensional
r_{hom}	Massa específica do molde	[kg/m^3]
r_{hoS}	Massa específica do metal sólido	[kg/m^3]
r_{hoL}	Massa específica do metal líquido	[kg/m^3]
S	Entropia	[J/m^{3}K]

S_L	Entropia do líquido	[J/m^{3}K]
S_S	Entropia do sólido	[J/m^{3}K]
T	Temperatura absoluta	[K]
$\dot{T}$	Taxa de resfriamento	[°C/s]
T	Tempo	s
TEE	Temperatura do eutético estável	[°C]
TEM	Temperatura do eutético metaestável	[°C]
T_{inf}	Temperatura do ar (Parâmetros da Simulação)	[K]
T_f	Temperatura de fusão	[°C]
T_L	Temperatura da isoterma *liquidus*	[°C]
$TL_{Hipoeutética}$	Temperatura *liquidus* hipoeutética	[°C]
$TL_{Hipereutética}$	Temperatura *liquidus* hipereutética	[°C]
T_R	Temperatura de superresfriamento	[°C]
T_S	Temperatura de *solidus*	[°C]
T_{sup}	Superaquecimento (Parâmetros da Simulação)	[K]
T_V	Temperatura de vazamento	[°C]
T_W	Temperatura do eutético de ferro fundido branco	[°C]
V	Volume	[m^3]
V_L	Velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus*	[m/s]

Letras Gregas

ΔmV	Variação de milivoltagem	[*m*V]
Δ°C	Variação de temperatura	[°C]
ΔP	Variação de pressão	[°C]
ΔS	Variação em entropia	[J/K]
ΔT	Variação no ponto fusão (equação 2.3)	[°C]
ΔT_P	Superresfriamento	[°C]
ΔT_V	Superaquecimento	[°C]
γ	ferro gama, forma alotrópica do ferro, entre 912 e 1394 °C	-
ρ	Massa específica	[kg/m^3]

Abreviações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFS	American Foundry Society
ASM	Materials Information Society
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials Standards
BCIRA	British Cast Iron Research Association
CGPM	Conferência Geral dos Pesos e Medidas

DIN	Deutsches Institut für Normung e. V. (Germany)
EPT-76	Escala Provisória de Temperatura
IPTS-48	International Practical Temperature Scale of 1948
IPTS-68	International Practical Temperature Scale of 1968
ITS-27	International Temperature Scale of 1927
ITS-90	International Temperature Scale of 1990
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
SAE	Society of Automotive Engineers
STP	Special Technical Publication (ASTM)

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A análise térmica consiste em um método clássico de determinação de diagramas de fases binários, a partir da fusão e posterior resfriamento de um número significativo de ligas de diferentes composições químicas, capazes de caracterizar completamente os campos estruturais do estado líquido até à temperatura ambiente. O método baseia-se em medidas de temperatura ao longo da solidificação através de termopares inseridos no metal, e com resfriamento suficientemente lento, de modo a caracterizar uma sucessão de estados de equilíbrio, ou seja, evitando-se transformações estruturais decorrentes de ativação térmica. O múltiplo registro da evolução da temperatura com o tempo, isto é, das curvas de resfriamento de múltiplas composições químicas, permite o levantamento de um mapa termodinâmico de estabilidade de fases, conforme apresentado esquematicamente na Figura 1.1 para um sistema binário hipotético constituído por dois componentes A-B.

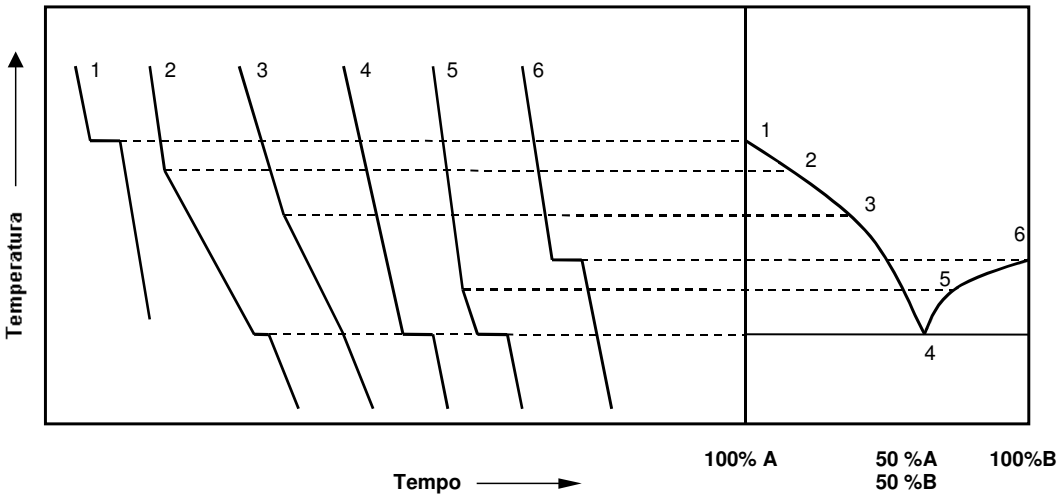


FIGURA 1.1 - Curvas de resfriamento e diagrama de fases para as ligas A e B.

As representações idealizadas das curvas de resfriamento apresentadas na Figura 1.1 não são exatamente aquelas encontradas nas condições práticas de solidificação. As diferenças que podem ser observadas em condições experimentais devem-se tanto à natureza quanto às condições específicas de formação dos primeiros cristais sólidos, levam-se em conta eventuais condições práticas de resfriamento que não traduzam exatamente uma situação de equilíbrio, conforme preconizado pelos diagramas de equilíbrio de fases (Müller, 2002). A Figura 1.2 apresenta um exemplo típico referente a uma curva de resfriamento de um ferro fundido com 3,2 %C, mostrando os inícios de formação de austenita e do eutético para temperaturas abaixo das indicadas como temperaturas *liquidus* e eutética, respectivamente (Fredriksson, 1988).

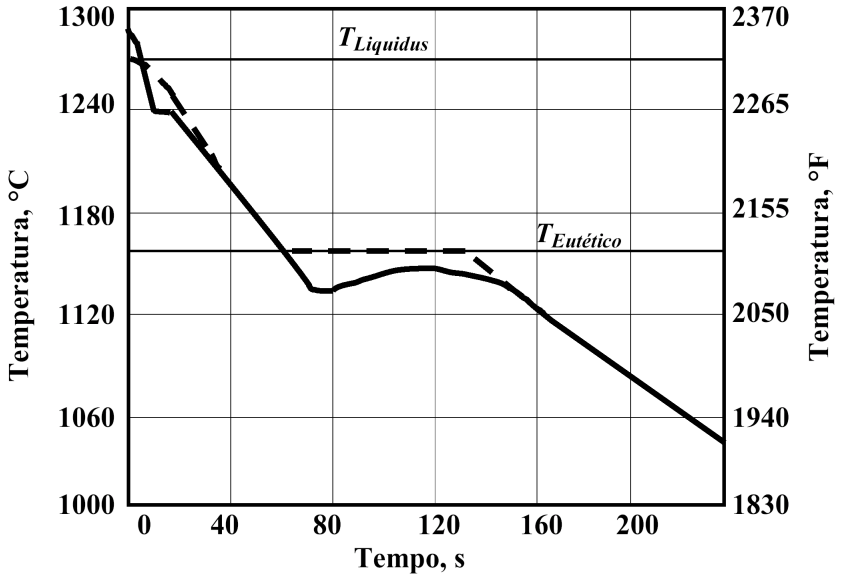


FIGURA 1.2 - Curva de resfriamento para um ferro fundido com 3,2%C. Linha tracejada: Equilíbrio; Linha cheia: Experimental (Adaptado de Fredriksson, 1988).

As curvas de resfriamento de uma amostra metálica refletem um equilíbrio entre a evolução de calor na amostra e a energia térmica transportada para fora da amostra. Essa situação física tem maior visibilidade quando colocada em termos matemáticos. Assim, considerando a amostra ainda no estado líquido antes do início da solidificação, tem-se (Fredriksson, 1988) :

$$\frac{dQ}{dt} = V \rho c \frac{dT}{dt} \tag{1.1}$$

onde V é o volume da amostra, ρ a massa específica, c o calor específico, dT/dt a taxa de resfriamento e dQ/dt a taxa de extração de calor da amostra. Nas curvas representadas na Figura 1.1, o parâmetro dQ/dt representa a inclinação da curva de resfriamento em cada instante até

atingir-se a temperatura *liquidus*. Quando o líquido alcança essa temperatura, atinge-se um quadro termodinâmico favorável à formação de núcleos sólidos e crescimento de cristais. Com a formação dos cristais sólidos há que se agregar à equação (1.1) essa nova situação, ou seja:

$$\frac{dQ}{dt} = (V\,\rho\,c\frac{dT}{dt} + \rho\,L\frac{df}{dT})\frac{dT}{dt} \tag{1.2}$$

onde L é o calor latente de solidificação e df/dT representa a taxa de formação da fração sólida (f) no intervalo de solidificação. A inclinação da curva de resfriamento passa então a depender da evolução do calor latente. Quanto maior a taxa de evolução da fração sólida, menor a taxa de resfriamento (ou seja, maior quantidade de calor latente é liberada implicando em uma frenagem no processo de resfriamento).

O início do processo de solidificação (linha *liquidus*) bem como o seu término (linha *solidus*) são acompanhados de mudanças de inclinação na curva de resfriamento tendo em vista o início e final do processo de liberação de calor latente, respectivamente. Para facilitar a determinação das temperaturas *liquidus* e *solidus*, utiliza-se um procedimento experimental de derivação da curva de resfriamento em relação ao tempo (análise térmica diferencial), que amplia o fenômeno, e permite uma maior precisão nas medidas das temperaturas de transformação, conforme apresentado na Figura 1.3.

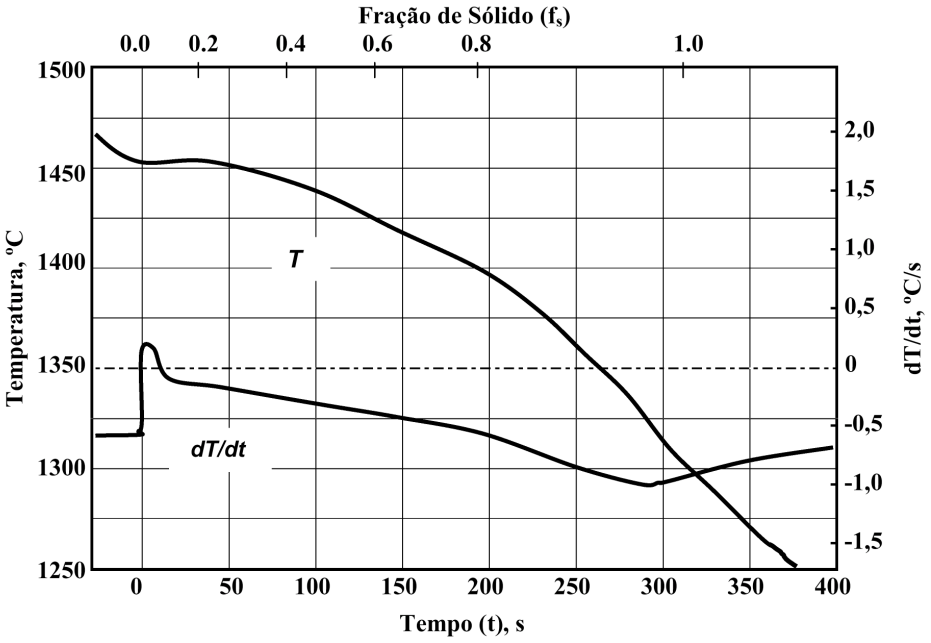


FIGURA 1.3 - Curva de resfriamento e taxa de resfriamento obtida por Análise Térmica Diferencial. Liga: Fe 1,01% C; 0,25% Si; 0,46% Mn (Adaptado de Fredriksson, 1988).

Os resultados da análise térmica na solidificação permitem também a determinação experimental de importantes variáveis térmicas que são fundamentais para correlações com a estrutura final de solidificação (Stefanescu, 2005), podendo-se citar: tempo local de solidificação, velocidades de deslocamento das isotermas *liquidus* e *solidus*, taxa de resfriamento à frente da isoterma *liquidus*, que são determinantes na formação da morfologia da macroestrutura e nas dimensões das redes celulares ou dendríticas da microestrutura de solidificação (Garcia, 2001). Cabe também mencionar a importância da correta determinação do coeficiente transitório de transferência de calor metal/molde, principalmente para fundição em moldes metálicos ou refrigerados, tendo em vista a sua influência imediata sobre as já mencionadas variáveis térmicas de solidificação (Ferreira, 2005; Spinelli, 2006).

Na prática industrial de fundição de ferros-fundidos é também comum a utilização da análise térmica na determinação da composição química do ferro fundido, ou seja, para a determinação do denominado Carbono Equivalente (CE). Pode-se, por exemplo, utilizar-se uma relação linear entre a temperatura *liquidus* e o Carbono Equivalente na forma:

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} \tag{1.3}$$

É importante mencionar que os sensores utilizados na análise térmica industrial, bem como a distorção térmica que pode ocorrer na utilização de termopares, são possíveis fontes de erros na avaliação térmica e que precisam ser cuidadosamente avaliados em cada situação experimental (Diószegi, 2005). Outro aspecto que merece atenção, no caso da solidificação de ferros fundidos em coquilhas, refere-se à determinação de coeficientes transitórios de transferência de calor metal/molde, até hoje inexistentes na literatura. A disponibilização desses coeficientes permitiria a simulação de variáveis térmicas de solidificação dos ferros fundidos, possibilitando o aprofundamento de correlações entre essas variáveis e a estrutura final de solidificação e, conseqüentemente, com as características mecânicas finais do componente fundido.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Pela importância que se reveste a análise térmica na solidificação e, em particular, na produção industrial de componentes de ferro fundido, planejou-se o desenvolvimento de um trabalho experimental criterioso de análise térmica durante a solidificação de um ferro fundido cinzento, com os seguintes objetivos:

1. Montar um sistema de solidificação unidirecional com coquilha de aço carbono, devidamente instrumentado com termopares, para a análise térmica da solidificação de um ferro fundido cinzento dentro de uma planta industrial;

2. Determinar o perfil transitório de coeficiente de transferência de calor ferro fundido/coquilha (h_i), utilizando-se as medidas de temperatura em pontos ao longo da peça e da coquilha, e simulações de um modelo numérico de solidificação;

3. Determinar coeficientes transitórios de transferência de calor coquilha/ambiente (h_{amb}), na forma h_{amb} = f (tempo), utilizando-se medidas de temperatura na coquilha metálica ao longo da solidificação;

4. Determinar as variáveis térmicas de solidificação: velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus*, V_L, e a taxa de resfriamento à frente da isoterma *liquidus*, T_L , a partir dos registros térmicos experimentais;

5. Desenvolver um sensor de análise térmica, específico para aplicação na prática industrial de ferros-fundidos cinzentos na determinação de temperaturas *liquidus* e Carbono Equivalente e aferi-lo em condições industriais frente a outras técnicas de medida atualmente utilizadas na indústria.

CAPÍTULO 2 - ANÁLISE TÉRMICA NA FUNDIÇÃO DE FERROS FUNDIDOS CINZENTOS

2.1. FERRO FUNDIDO

Neste capítulo é feita uma breve abordagem sobre os ferros fundidos, quanto aos tipos existentes, suas propriedade e aplicações. (Chiaverini, 2005; Santos & Castello Branco, 1989)

2.1.1. DEFINIÇÃO DE FERRO FUNDIDO

Os ferros fundidos são ligas que contêm basicamente ferro, carbono e silício, com teores de carbono geralmente acima de 2,0%, em quantidade superior à que pode ser retido em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita. Caracterizam-se por apresentarem reação eutética durante sua solidificação. Tipos de ferro fundido: branco, cinzento, maleável, mesclado, nodular e vermicular.

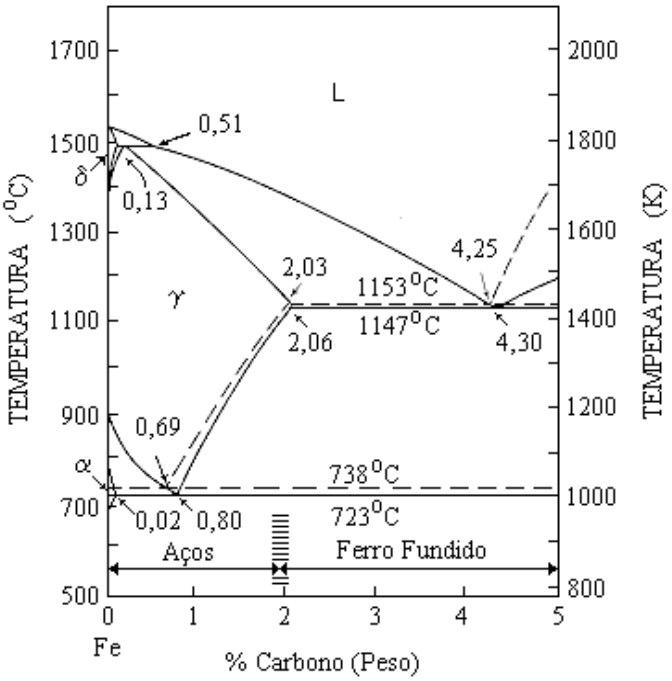


FIGURA 2.1 – Diagrama de equilíbrio Ferro-Carbono (Garcia, 2001).

2.1.2. FATORES PREPONDERANTES NA ESTRUTURA DO FERRO FUNDIDO

2.1.2.a. Composição química

Os elementos que mais influem na estrutura são o carbono e o silício. O carbono determina a quantidade de grafita que se pode formar e o silício é essencialmente elemento grafitizante, favorecendo a decomposição do carboneto de ferro. Sua presença pode determinar um ferro fundido como cinzento ou branco.

O manganês tem efeito oposto ao do silício. É estabilizador da *cementita* e assim compensa, de certo modo, a ação grafitizante do silício.

Outros elementos como o fósforo e enxofre, não têm uma ação muito significativa sob o ponto de vista de tendência grafitizante. Porém, o fósforo é um estabilizador relativamente forte do carboneto de ferro, com ação na estrutura do material porque forma com o ferro e o carbono um composto de natureza eutética, chamada *esteadita*.

2.1.2.b. Velocidade de resfriamento

A velocidade de resfriamento durante a solidificação varia com a espessura das peças moldadas. Em elevadas velocidades de resfriamento (que ocorrem normalmente em seções finas ou nas áreas junto às paredes do molde) não há tempo para decompor a *cementita*, de modo que, dependendo dos teores de carbono e de silício, ocorre pouca ou nenhuma grafitização, e há tendência para formar-se ferro fundido branco.

Com as velocidades de resfriamento lentas das seções mais espessas, ocorre uma grafitização (dependente sempre do teor de silício) e a estrutura será constituída essencialmente de *perlita* e grafita.

A velocidade de resfriamento influi também na forma, distribuição e tamanho dos veios de grafita. Quanto maior for essa velocidade, mais refinada será essa microestrutura.

2.1.3. COMPONENTES ESTRUTURAIS DOS FERROS FUNDIDOS

O mais importante é a grafita, por ser o elemento determinante nas alterações das características mecânicas dos ferros fundidos.

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e a *American Foundry Society* (AFS) classificam o aspecto e a forma de apresentação da grafita em cinco tipos:

A - Irregular desorientada;

B - Em roseta;

C - Desigual irregular;

D - Interdendrítica desorientada; e

E - Interdendrítica orientada.

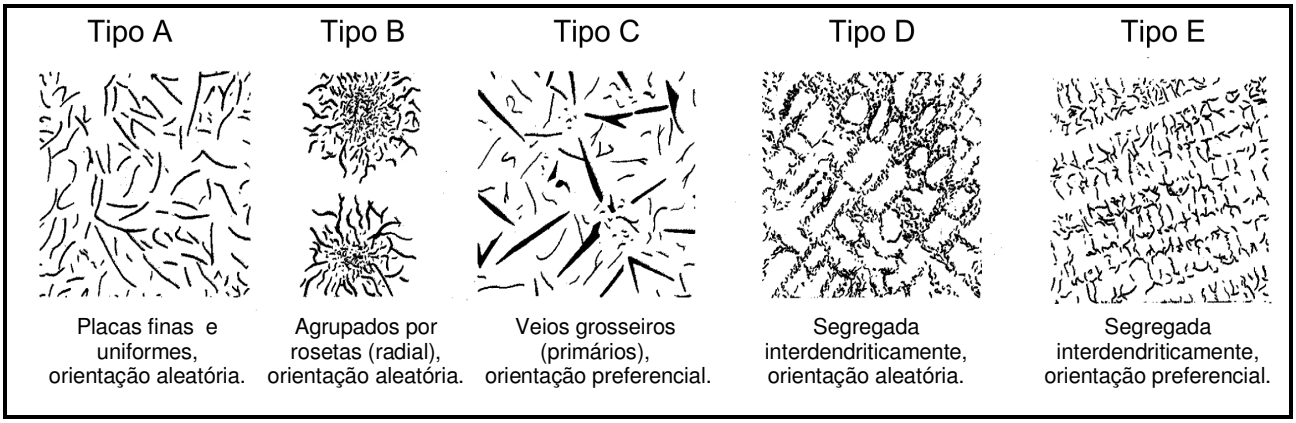


FIGURA 2.2 - Tipos de grafita em ferros fundidos cinzentos, aumento de 100X (Adaptado da ASTM A247, 2006).

Do mesmo modo, essas associações classificam a grafita, pelas suas dimensões, em oito tamanhos, de 1 a 8, correspondendo o n° 1 às dimensões maiores (veio mais longos) e o n° 8 às dimensões menores.

Os outros constituintes estruturais são: *ferrita*, *cementita*, *perlita*, *ledeburita* e a *esteadita*.

- *Ferrita* é a solução sólida do carbono em ferro alfa, de estrutura CCC.

- *Cementita,* é o carboneto de ferro (Fe_3C), de estrutura ortorrômbica e alta dureza.

- *Perlita*, logo abaixo da linha A_1 (723 °C) do diagrama Fe-C, toda a *austenita* deverá se transformar em *ferrita* mais *cementita*. Entretanto, quando o processo é rápido, fisicamente a separação se processa em forma de lâminas bastante finas, somente visíveis ao microscópio com elevadas ampliações. Tal estrutura, *ferrita* e *cementita* em forma laminar, é chamada de *perlita*.

- *Ledeburita*, ocorre nos ferros fundidos brancos e é um constituinte formado de pequenos glóbulos de *perlita*, sobre um fundo de *cementita*; por isso, apresenta elevada dureza.

- *Esteadita* é um constituinte de natureza eutética, compreendendo partículas de fosfeto de ferro (Fe_3P) e carboneto de ferro (Fe_3C), com baixo ponto de fusão (inferior a 98 °C). Ocorre em áreas interdendríticas, formando uma segregação, pois essas áreas são as últimas que solidificam. A *esteadita* ocorre quando a quantidade de fósforo presente é superior a 0,15%. É muito dura e frágil.

A forma, distribuição e dimensões dos veios de grafita (chamada de grafitização) e, portanto, a estrutura e as características mecânicas dos ferros fundidos, também são influenciadas por outros fatores. O mais importante é a chamada inoculação que consiste na adição de uma liga metálica no metal, enquanto estiver líquido, quer no próprio forno ou na panela de fundição, pouco antes do vazamento do metal ou no jorro do metal líquido quando da passagem do forno para a panela de vazamento. Essa prática provoca o aparecimento de núcleos de metal não dissolvido ou precipitado, que atuam como substratos nucleantes. O efeito implica num decréscimo da tendência de formação de ferro branco, ou seja, numa tendência à grafitização, sem conseqüência apreciável na estabilidade da *perlita*. Além disso, fica favorecida a formação de veios menores de grafita, com distribuição mais uniforme.

2.2. CLASSIFICAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS

2.2.1 FERRO FUNDIDO BRANCO

Nos ferros fundidos brancos, praticamente todo o carbono apresenta-se na forma combinada de carboneto de ferro Fe_3C, mostrando uma superfície de fratura clara. Suas propriedades, devido a altas quantidades de *cementita*, são a elevada dureza e resistência ao desgaste. Porém, a usinabilidade é prejudicada.

A composição química adequadamente ajustada (%C e %Si), além da velocidade de resfriamento são os meios mais usados para produzir ferro fundido branco. A produção industrial do ferro fundido branco exige, em princípio, a combinação desses dois fatores.

É utilizado um sistema de coquilhamento, que consiste em derramar-se o metal líquido em moldes metálicos, onde o metal resfria em condições tais e com tal velocidade que praticamente toda a grafitização é eliminada e o carbono fica retido na forma combinada. A profundidade da camada coquilhada pode ser controlada, ajustando-se o teor de silício do ferro fundido.

Outros fatores de influência são os seguintes no coquilhamento: temperatura de vazamento, temperatura da coquilha (molde metálico), espessura da peça na seção coquilhada, espessura da coquilha e tempo durante o qual o metal fica em contato com a coquilha.

Aplicações típicas para ferros fundidos brancos:

- Equipamento de manuseio de terra, mineração e moagem;
- Rodas de vagões;
- Revestimentos de moinhos; e
- Bolas para moinhos de bola.

2.2.2. FERRO FUNDIDO MALEÁVEL

Trata-se de um tipo de ferro fundido branco, que posteriormente submetido a um tratamento térmico, chamado maleabilização, onde a *cementita* se decompõe em grafita e austenita, adquire maleabilidade. Ou seja, a liga adquire ductilidade e torna-se mais tenaz, características que, aliadas a bons níveis de resistência à tração, dureza, resistência à fadiga, resistência ao desgaste e usinabilidade, permite importantes aplicações industriais.

Aplicações do ferro fundido maleável:

- Conexões para tubulações hidráulicas;
- Conexões para linhas de transmissão elétrica;
- Correntes;
- Suportes de mola;
- Caixas de direção e de diferencial;
- Cubos de rodas;
- Sapatas de freios;
- Pedais de embreagem e freio;
- Bielas e
- Caixas de engrenagens.

2.2.3. FERRO FUNDIDO MESCLADO

É o ferro fundido branco que, por um efeito da velocidade de resfriamento e/ou de altos teores de silício, apresenta uma microestrutura final composta por ferro fundido branco na superfície (formado pela elevada velocidade de resfriamento) e ferro fundido cinzento no núcleo do componente. Sua fratura apresenta uma coloração mista entre branca e cinzenta, donde resulta a sua denominação.

Aplicações do ferro fundido mesclado:

- Equipamentos para mineração e implementos agrícolas;
- Cilindros de laminação;
- Revestimentos de moinhos de bolas para moagem de minério;
- Mandíbulas de britadores;
- Eixos cames.

2.2.4. FERRO FUNDIDO CINZENTO

Apresenta-se microestruturalmente com carbono na forma livre, grafita, em morfologia de lamelas e carbono na forma combinada, *cementita* (Fe_3C). Sua superfície de fratura apresenta coloração cinza escuro, de onde vem o seu nome.

A composição química dos ferros cinzentos apresenta-se dentro de uma faixa muito ampla (Chiaverini, 2005):

- 2,00 a 4,00 %C;
- 1,00 a 3,00 %Si;
- 0,3 a 1,00 %Mn;
- 0,10 a 1,00 %S; e
- 0,05 a 0,25 %P.

Características principais:

- Boa resistência mecânica;
- Alta capacidade de amortecer vibrações;
- Excelente usinabilidade;
- Ductilidade extremamente baixa;
- Tenacidade superior aos ferros fundidos brancos; e
- Fácil fusão.

Além de apresentar temperaturas de fusão relativamente baixas, na solidificação, os ferros fundidos cinzentos apresentam uma expansão de volume devido à precipitação da grafita. Esta expansão pode superar a contração do líquido, minimizando a quantidade e o volume de massalotes para a alimentação das peças fundidas. De fato, peças de geometria complexa podem ser obtidas com projetos de alimentação simples.

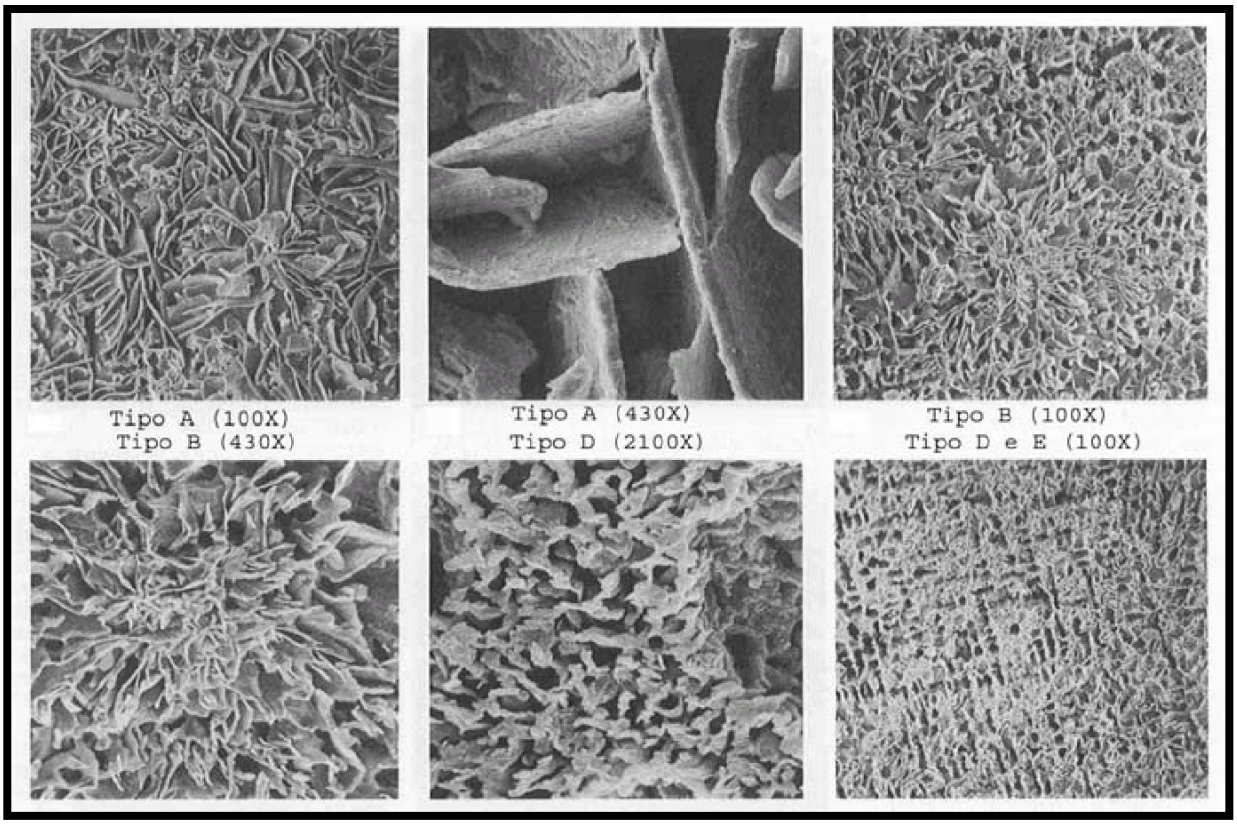


FIGURA 2.3 - Imagens de MEV ilustrando as diversas morfologias da grafita presentes nos ferros fundidos cinzentos (Stefanescu, 1988).

2.2.4.a. Classificação dos ferros fundidos cinzentos

Segundo as normas ABNT NBR6589 (antiga EB126) e DIN 1691, os ferros fundidos cinzentos são designados por FC (ABNT) ou GG (DIN), seguidos dos algarismos representativos do limite mínimo de resistência à tração em kgf/mm^2 (FC10 a FC 40).

As classes FC-10 e FC-15 correspondem aos ferros fundidos cinzentos comuns, com excelente fundibilidade e melhor usinabilidade. A classe FC-15 é utilizada, entre outras aplicações, em bases de máquinas, carcaças metálicas e aplicações semelhantes.

As classes FC-20 e FC-25, também de boas fundibilidade e usinabilidade, apresentam melhor resistência mecânica e são aplicadas principalmente em elementos estruturais, tais como barramentos, cabeçotes e mesas de máquinas operatrizes.

As classes FC-30 e FC-35, com maiores dureza e resistência mecânica, aplicam-se em engrenagens, pequenos virabrequins, bases pesadas de máquinas, colunas de máquinas, buchas e grandes blocos de motor.

A classe FC-40 é a classe de uso comercial que possui a maior resistência mecânica, apresentando, para essa finalidade, combinação dos elementos de liga, entre eles, níquel, cromo e molibdênio. Como possui elevada tendência ao coquilhamento, sua utilização é limitada a peças de espessuras médias e grossas.

A ASTM A48 também classifica os ferros fundidos cinzentos de acordo com a resistência mecânica. Os números 20 a 60 correspondem aos limites de resistência a tração em ksi (1000 lb/pol^2) sendo:

- classe 20 - 14,0 kgf/mm^2 (137,2 MPa);
- classe 25 - 17,5 kgf/mm^2 (171,5 MPa);
- classe 30 - 21,0 kgf/mm^2 (205,8 MPa);
- classe 35 - 24,5 kgf/mm^2 (240,1 MPa);
- classe 40 - 28,9 kgf/mm^2 (283,2 MPa);
- classe 50 - 35,0 kgf/mm^2 (343,0 MPa); e
- classe 60 - 42,0 kgf/mm^2 (411,6 MPa).

2.2.4.b. Propriedades dos ferros fundidos cinzentos

As propriedades fundamentais que são exigidas dos ferros fundidos são geralmente caracterizadas por bons níveis de resistência à tração, resistência à compressão e dureza. Essas propriedades dependem fundamentalmente da composição química, da velocidade de resfriamento a partir da temperatura de fusão até a temperatura ambiente e da espessura da peça. Entretanto, também depende muito da prática de fundição, a ponto de ser comum não se especificar rigorosamente uma determinada composição química e sim escolher a composição mais adequada para uma determinada resistência à tração.

A *resistência à tração* é a mais importante e o próprio agrupamento dos ferros fundidos em classes pelas Associações de Normas Técnicas é feito com base nos valores do limite de resistência à tração, conforme descrito na seção anterior.

O *módulo de elasticidade*, nos ferros fundidos, não é uma constante, o que significa que esses materiais não obedecem à lei de Hooke. Determina-se esse valor arbitrariamente, como sendo a inclinação da linha que une o ponto de origem da curva tensão-deformação e o ponto correspondente a ¼ do limite de resistência à tração. O módulo de elasticidade dos ferros fundidos, assim determinado, varia de 73500 a 151900 Mpa (7500 a 15500 kgf/mm^2), dependendo do limite de resistência à tração do material e do volume, forma e distribuição da grafita.

A *dureza*, nos ferros fundidos, varia desde valores 100 HB, para os ferros fundidos com grande usinabilidade, até valores superiores a 600 HB, para os ferros fundidos brancos ou coquilhados. Pode-se admitir, como nos casos dos aços, uma relação entre o limite de resistência à tração e a dureza Brinell dos ferros fundidos.

A *resistência à compressão* é considerada propriedade de importância comercial. O valor do limite de resistência à compressão é de 3 a 4,5 vezes superior ao da resistência à tração. Varia, nos ferros fundidos cinzentos, de cerca de 490 Mpa (50 kgf/mm^2) para cerca de 1370 Mpa (140 kgf/mm^2).

O *limite de fadiga* varia aparentemente de modo linear, em relação ao limite de resistência à tração, na proporção de 0,40 a 0,55. Assim, os ferros fundidos cinzentos comuns apresentarão limites de fadiga entre 59 e 172 Mpa (6 e 17,5 kgf/mm^2).

A *resistência ao choque* já foi considerada secundária, pelo motivo do ferro fundido cinzento ser um material frágil. Porém atualmente, ferros fundidos convenientemente ligados (por exemplo, com Ni e Mo em baixos teores), apresentam valores de limite de resistência à tração da ordem de 390 a 490 Mpa (40 a 50 kgf/mm^2), podem mostrar resistência ao choque variando de 7 a 14 kgf.m (Chiaverini, 2005).

Uma propriedade típica dos ferros fundidos cinzentos é sua *capacidade de amortecimento,* definida como a habilidade de um metal absorver vibrações resultantes de tensões cíclicas, por

atrito interno, transformando a energia mecânica em calor. A importância dessa propriedade reside no fato de que esse material tem grande aplicação em máquinas-ferramenta, sobretudo nas suas bases. A maior capacidade de amortecimento do ferro fundido, em relação ao aço, é atribuída aos veios de grafita, que, por não apresentarem resistência mecânica, constituem espécies de vazios na estrutura do material, o que permite deformação plástica do material localizado ao redor dos veios, sob tensões nominais menores que em outros casos.

Outra propriedade característica é a sua boa *usinabilidade.* Os ferros fundidos cinzentos mais comumente produzidos apresentam uma estrutura em que a matriz é ferrítica ou ferrítico-perlítica. Além da influência evidente dos veios de grafita, a própria matriz ou a porcentagem relativa de *ferrita* e *perlita* presentes é fator importante na usinabilidade do material.

A *resistência ao desgaste* do ferro fundido cinzento também é considerada uma característica importante, comprovado na prática pelo seu emprego usual em peças móveis de máquinas.

2.2.4.c. Aplicações do ferro fundido cinzento

A ASTM classifica as aplicações dos ferros cinzentos, conforme apresentado na Tabela 2.1.

TABELA 2.1 - Aplicações dos Ferros Cinzentos, segundo as classes ASTM A48 (Chiaverini, 2005).

Classe	Aplicações
20	Aplicações de baixa responsabilidade: utensílios domésticos; produtos sanitários; bases de máquinas; fundidos ornamentais; carcaças; tampas de poços; tubos centrifugados e conexões.
25	Aplicações idênticas às da classe 20, porém com maiores exigências de resistência mecânica.
30	Elementos construtivos (grelhas, buchas, rotores, carcaças de compressor, tubos e conexões); placas de embreagem; discos de freio; blocos de motor; cabeçotes, pistões hidráulicos; barramentos de máquinas operatrizes; carcaças de motores elétricos.
35	Aplicações idênticas às da classe 30, porém com maiores exigências de resistência mecânica.
40	Aplicações envolvendo tensões mais elevadas, sendo exigidas maior dureza e resistência à tração, para que se pode usar inoculação ou elementos de liga em baixos teores: engrenagens; discos de freio; eixo de comando de válvulas; virabrequins; blocos de motor; cabeçotes; buchas; válvulas; munhões, cilindros e anéis empregados em locomotivas.
50	Aplicações idênticas às da classe 40.
60	É a classe de maior resistência mecânica, empregando-se, normalmente, a adição de Ni, Cr e Mo: tambores e discos de freio especiais; virabrequins; bielas; cabeçotes; peças de bombas de alta pressão; carcaças de britadores; matrizes de forjamento e estampagem; cilindros hidráulicos.

Devido à importância dos ferros fundidos cinzentos na indústria automobilística, a SAE elaborou a especificação J431, que classifica o uso desses materiais.

As suas principais aplicações são:

- *Classe* G *1800* - peças fundidas miscelâneas (no estado fundido ou recozido, onde a resistência mecânica não é um fator primordial);

- *classe* G *2500* - pequenos blocos de cilindro, cabeçotes de cilindro, cilindros resfriados a ar, pistões, discos de embreagem, carcaças de bombas de óleo, caixas de transmissão, caixas de engrenagens, tambores de freio para serviço leve; também para tambores de freio e discos de embreagem para serviço *moderado,* onde o alto teor de carbono minimiza o efeito desfavorável do calor;

- *Classe* G *3000* - blocos de cilindro de automóveis e motores diesel, cabeçotes de cilindro, volantes, pistões, tambores de freio e caixas de transmissão de tratores para serviço médio;

- c*lasse* G *3500* - blocos de motores diesel, blocos e cabeças de cilindro de caminhões e tratores, volantes pesados, caixas de transmissão de tratores, caixas de engrenagens pesadas; também para tambores de freio e discos de embreagem para serviço pesado, onde se exige altas resistência mecânica e à fadiga térmica;

- *classe* G *4000* - peças fundidas para motores diesel, camisas de cilindro, cilindros, pistões e eixos de comando de válvulas.

2.2.5. FERRO FUNDIDO NODULAR

Apresenta-se na forma microestrutural com o carbono livre na morfologia de nódulos, o que lhe confere características mecânicas superiores àquelas do ferro fundido maleável. É obtido por modificações químicas na composição do material no estado líquido. Sua superfície de fratura apresenta coloração prateada.

O ferro fundido nodular, ou ferro dúctil, possui aplicações múltiplas em peças e componentes mecânicos devido às boas características de resistência mecânica, ductilidade e tenacidade. A característica mais importante, relacionada com a resistência mecânica, é o seu

limite de escoamento. É mais elevado do que nos ferros fundidos cinzentos e maleáveis e mesmo que o de alguns aços carbono comuns. Sua grafita apresenta-se na forma esferoidal, dando-lhe um grau de importância tecnológica, porque este fato não interrompe a continuidade da matriz, como acontece no ferro fundido cinzento.

A forma da grafita é obtida pela adição de determinados elementos no metal fundido líquido, como o magnésio metálico ou ligas de magnésio, cério, cálcio, bário, ítrio ou terras raras, com a finalidade de aumentar a velocidade de resfriamento do metal, conseqüentemente, esferoizar a grafita. Após este tratamento, denominado esferoidização, faz-se necessária a introdução de outros elementos químicos para reduzir o "efeito de coquilhamento", por meio de um processo chamado "tratamento de inoculação".

Os principais agentes nodulizantes contêm geralmente magnésio. São eles: magnésio sem liga, nodulizantes à base de níquel e nodulizantes a base de Mg-Fe-Si. Esses nodulizantes são introduzidos na forma de briquetes, lingotes ou fios. O nodulizante é colocado no fundo da panela de vazamento e o metal fundido é rapidamente derramado sobre a liga nodulizante.

Para a incorporação do magnésio à liga, existem métodos específicos desenvolvidos. Tais métodos são necessários devido ao baixo rendimento da adição e problemas ambientais com os fumos de óxido de magnésio, forte luminescência e respingos de metal (OLAH et al, 1986).

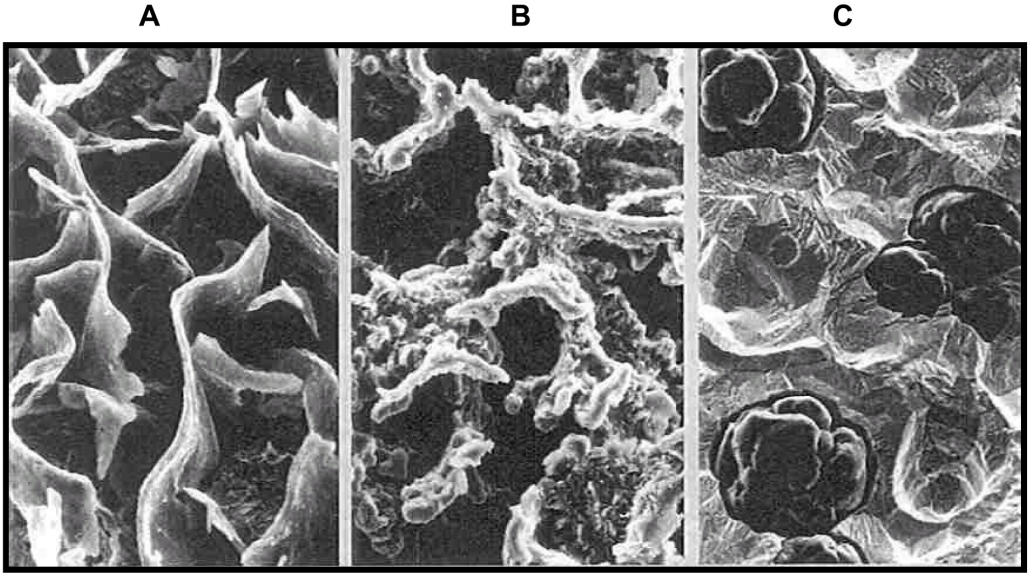


FIGURA 2.4 - Exemplos de morfologia típica da grafita encontrada em ferros fundidos: A (cinzento), B (vermicular) e C (nodular). Imagens geradas por MEV (Marquad et al, 1998).

2.2.5.a. Especificações e propriedades do ferro fundido nodular

A tabela 2.2.indica as composições e as propriedades de classes padrões de ferro nodular, segundo especificações ASTM, ASME e SAE.

TABELA 2.2 - Composição e propriedades mecânicas de tipos ferro nodular (Adaptado de Chiaverini, 2005).

Especificação n°	Classe	Composição					Natureza	Propriedades Mecânicas			
		C_t	Si	Mn	P	S		HB	Resistência à tração MPa (kgf/mm^2)	Limite de escoamento MPa (kgf/mm^2)	Alongamento em 50mm(%)
ASTM A 395; ASME SA 395	**60-40-18**	3,0 mínimo	2,50 máximo	-	0,08 máximo	-	Ferrítica; recozida	143 a 187	411,6 (42,0)	274,4 (28,0)	18
ASTM A 476; SAE AMS 5316	**80-60-3**	3,0 mínimo	3,0 máximo	-	0,08 máximo	0,05 máximo	Fundida	201 mínimo	548,8 (56,0)	411,6 (42,0)	3
ASTM A 536	**60-40-18**	Composição química especificada mediante acordo mútuo entre produtor e consumidor.					Ferrítica; pode ser recozida.	-	411,6 (42,0)	274,4 (28,0)	48
	65-45-12						Principalmente ferrítica	-	445,9 (45,5)	308,7 (31,5)	12
	80-55-06						Ferrítica – perlítica	-	548,8 (56,0)	377,3 (38,5)	6
	100-70-03						Principalmente perlítica	-	686,0 (70,0)	480,2 (49,0)	3
	120-90-2						Martensítica temperada em óleo e revenida	-	823,2 (84,0)	617,4 (63,0)	2
SAE J 434	**D 4018**	320 a 4,10	1,80 a 3,00	0,10 a 1,00	0,015 a 0,10	0,005 a 0,035	Ferrítica	170 máximo	411,6 (42,0)	274,4 (28,0)	18
	D 4512		Valores devem ser compatíveis com a dureza mínima especificada para as peças fundidas.				Ferrítica – perlítica	156 a 217	445,9 (45,5)	308,7 (31,5)	12
	D 5506						Ferrítica – perlítica	187 a 255	548,8 (56,0)	377,3 (38,5)	6
	D 7003						Perlítica	241 a 302	686,0 (70,0)	480,2 (49,0)	6
	DQ & T						Martensítica	Especificadas entre produtor e consumidor, compatíveis com a dureza.			
NOTA: Os números indicativos das classes, conforme especificação ASTM, referem-se aos valores de limite de resistência à tração (em milhares de libras por polegadas											

2.2.5.b. Aplicações típicas do ferro fundido nodular

A tabela 2.3 indica as composições e as propriedades de classes padrões de ferro nodular, segundo especificações ASTM, ASME e SAE.

TABELA 2.3 - Aplicação do ferro fundido nodular, segundo as normas (Chiaverini, 2005).

Norma	Classe	Usos Gerais	Aplicações Típicas
ASTM A 395 ASME AS 395	60-40-18	Componentes para pressão para emprego a altas temperaturas.	Componentes para bombas hidráulicas; carcaças, válvulas; componentes de caldeiras e reatores da industria química.
ASTM A 474 SAE AMS 5313	80-60-03	Equipamento de fábricas de papel, até temperaturas de 230 °C.	Equipamentos para processamento de papel que operem em temperaturas de até 230ºC tais como cilindros de secagem
ASTM A 536	60-40-18	Partes para resistência ao choque; serviços para baixa temperaturas.	Componentes submetidos a choques; válvulas e carcaças de bombas
	65-45-12	Serviços gerais.	Componentes de máquinas submetidos a impactos e fadiga
	80-55-06	Serviços gerais.	Virabrequins, engrenagens e buchas de rolamento
	100-70-03	Melhor combinação de resistência mecânica e ao desgaste e à tempera superficial.	Apresenta microestrutura martensítica; engrenagens e componentes submetidos a tensões elevadas
	120-90-02	Mais elevadas resistência mecânica e ao desgaste.	Pinhões, engrenagens e rolamentos
SAE J 434	D 4018	Componentes mecânicos sob cargas moderadas, exigindo boas ductilidades e usinabilidade.	Articulações de direção
	D 4512		*Calipers* e discos de freio
	D 5506	Componentes sujeitos a tensões elevadas, exigindo boa tenacidade.	Virabrequins e engrenagens
	D 7003	Componentes sujeitos a tensões elevadas, exigindo muito boa resistência ao desgaste e reação a endurecimento parcial.	Engrenagens e pinhões
	DQ & T	Componentes sujeitos sujeitos a tensões elevadas, exigindo uniformidade de microestrutura e controle rigoroso de propriedades.	Balancins

2.2.6. FERRO FUNDIDO VERMICULAR

Também conhecido como ferro fundido de grafita compactada, o vermicular é um ferro fundido obtido pela adição do titânio na composição do ferro fundido nodular, com a finalidade de degenerar o nódulo de grafita. Apresenta propriedades intermediárias entre os ferros fundidos nodular e cinzento.

É um material cuja aplicação tem sido cada dia mais ampla, porém, ainda é relativamente novo no mercado industrial. Sua fratura apresenta-se na forma mesclada.

Aplicações:

O uso do ferro fundido vermicular está em constante crescimento na indústria automobilística. Um bom exemplo é o uso em blocos e cabeçotes de motores que, devido à maior resistência do vermicular em relação ao cinzento, possibilita uma grande redução de peso.

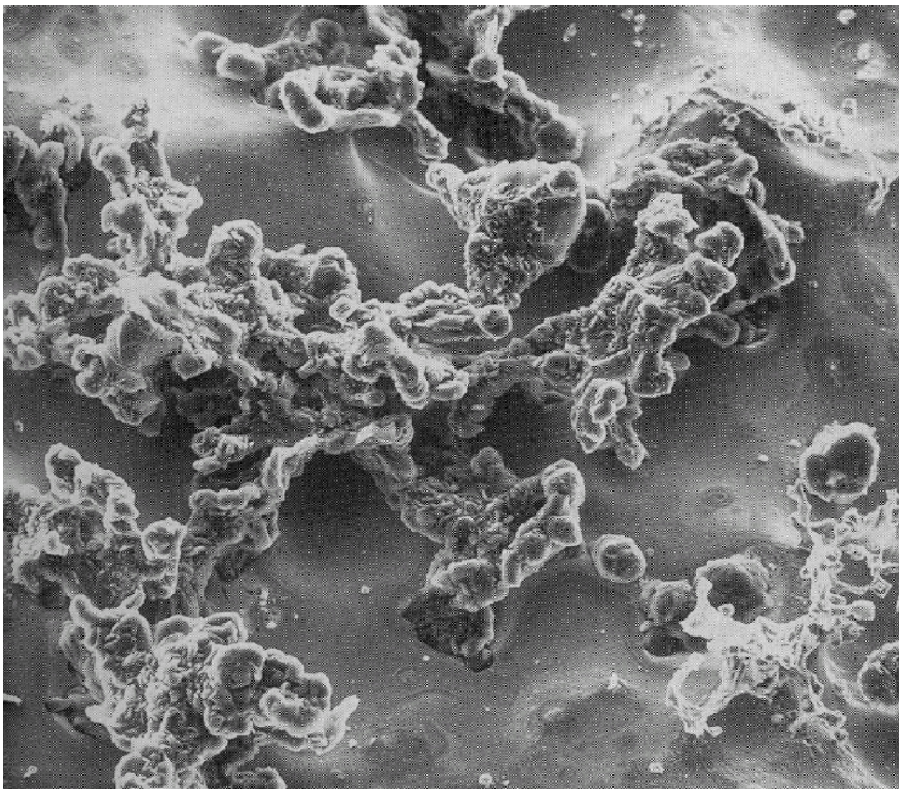


FIGURA 2.5 - Microestrutura típica de ferro fundido vermicular (Heisser & Sturm, 2003).

2.3. PRINCÍPIOS DA TERMOMETRIA

Neste capítulo serão apresentados os princípios e leis básicas que regem o funcionamento dos termopares. (ASTM STP 470B, 1980; Ecil, 1979)

2.3.1. O EFEITO SEEBECK

Seebeck, em 1822, descobriu a existência de correntes termoelétricas enquanto observava os efeitos eletromagnéticos associados em circuitos de Bi-Cu e Bi-Sb. Seus experimentos mostraram que, quando as junções (extremidades) de dois metais diferentes são expostas a diferentes temperaturas, uma rede de força eletromotriz é gerada, gerando uma corrente elétrica contínua.

O efeito Seebeck consiste na conversão da energia térmica em energia elétrica com o aparecimento de uma corrente elétrica. A direção e a magnitude desta corrente dependem das temperaturas destas junções e dos materiais que compõem o termopar.

Em resumo, quando em um circuito se encontram as seguintes condições:

a) dois condutores metálicos diferentes entre si, A e B;

b) A e B unidos em suas extremidades;

c) essas extremidades estão submetidas às temperaturas T e t (sendo T maior que t); aparece um fluxo de elétrons, ou seja, uma corrente I. No circuito da figura 2.6, diz-se que *A* é positivo se a corrente fluir de *A* para *B* na junta de referência (chamada junta fria).

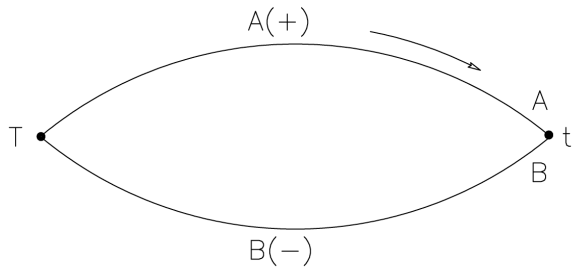


FIGURA 2.6 - Representação do Efeito Seebeck.

Esta força eletromotriz (f.e.m.), que pode ser medida, é chamada de efeito Seebeck e sua variação é função da diferença de temperatura entre as junções.

Baseado neste efeito pode-se construir um gráfico que representa a variação da f.e.m. "E" com a temperatura T.

2.3.2. POTÊNCIA TERMOELÉTRICA

É a relação que expressa a milivoltagem gerada a cada grau Celsius de variação de temperatura. A expressão matemática que define a potência termoelétrica é:

$$Pt = \frac{\Delta mV}{\Delta °C} \tag{2.1}$$

Por uma questão de facilidade, costuma-se expressar a potência termoelétrica como:

$$Pt = mV/100\ °C.\Delta t \tag{2.2}$$

uma vez que a milivoltagem gerada por 1 °C de variação, é geralmente um número desprezível.

Como a potência termoelétrica de um termopar pode variar dependendo do intervalo de temperatura de uso, costuma-se especificar os termopares pela potência termoelétrica média no seu intervalo de utilização.

2.3.3. EFEITO TERMOELÉTRICO DE PELTIER

Peltier, em 1834, descobriu um efeito peculiar quando introduziu uma pequena corrente externa a um termopar de Bi-Sb de Seebeck. Seus experimentos mostraram que, quando uma pequena corrente elétrica é passada através da junção de dois metais diferentes em uma direção, a

junção é resfriada (isto é, age como um dissipador de calor) e então absorve calor das redondezas. Quando a direção da corrente é invertida, a junção é aquecida (isto é, age como uma fonte de calor) e então aquece seus arredores.

O efeito Peltier está ligado proximamente ao efeito Seebeck. Para uma dada corrente elétrica, a taxa de absorção ou liberação de calor de uma junção termoeléctrica depende do coeficiente Seebeck dos dois materiais.

Em resumo, quando uma corrente elétrica flui através de dois condutores A e B, unidos em suas extremidades e à mesma temperatura T, haverá emissão de calor em uma de suas juntas e absorção na outra, criando uma diferença de temperatura entre essas juntas. Essa diferença, por sua vez, gera uma corrente que tem sentido contrário ao da corrente introduzida no circuito.

2.3.4. LEIS BÁSICAS DE FUNCIONAMENTO DE TERMOPARES

Para a compreensão e explicações dos fenômenos que ocorrem nos termopares, há necessidade de se apoiar em três leis, que constituem a base da teoria termoelétrica das medições de temperatura.

<u>- 1ª Lei: CIRCUITO HOMOGÊNEO:</u>

Quando dois condutores metálicos homogêneos são ligados, conforme apresentado na figura 2.7, a f.e.m. produzida dependerá única e exclusivamente da diferenças da temperatura das junções T1 e T2. Mesmo que haja grandes variações de temperatura entre uma das duas junções e um ponto qualquer ao longo do condutor, esta temperatura T3 não influirá na f.e.m. produzida pela diferença da temperatura entre as junções.

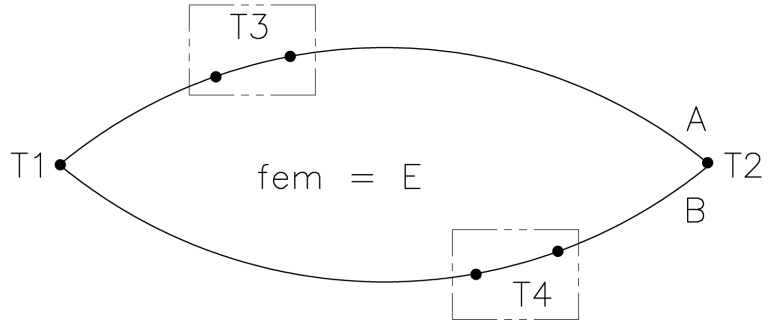


FIGURA 2.7 - Lei do circuito homogêneo.

- 2ª Lei: MATERIAIS INTERMEDIÁRIOS:

Esta lei estabelece que, num circuito como o anterior, ao se introduzir um material diferente C, conforme apresentado na figura 2.8, não haverá mudança na f.e.m. produzida pela diferença de temperatura T1 e T2 se as extremidades desse condutor C estiverem à mesma temperatura T3.

Como aplicação prática desta lei, tem-se a ligação de fios de cobre (ou a utilização de terminais de ligação) entre os terminais de um termopar de platina. Estes materiais de compensação não mudarão a f.e.m. produzida pelo termopar, desde que os pontos dessa ligação estejam à mesma temperatura.

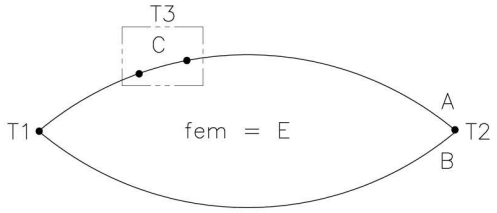


FIGURA 2.8 - Lei dos materiais intermediários

- 3ª Lei: TEMPERATURAS INTERMEDIÁRIAS:

Se dois metais homogêneos diferentes A e B produzem um f.e.m. E1, quando suas extremidades estão submetidas às temperaturas T1 e T2, e uma f.e.m. E2, quando as juntas estão submetidas às temperaturas T2 e T3, a f.e.m. E3 produzida, pelo mesmo termopar, quando as extremidades estão às temperaturas T1 e T3, será igual à soma E1 + E2.

Uma aplicação prática desta lei está nas ligações de termopares a cabos de compensação, por exemplo: fios de Cu e Cu-Ni, utilizados para ligação de termopares de platina.

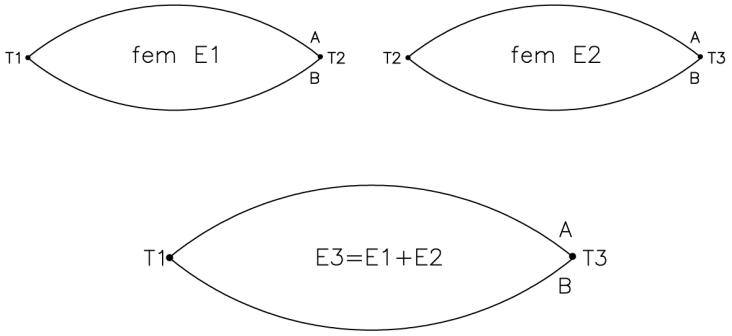


FIGURA 2.9 - Lei das temperaturas intermediárias.

A seguir, apresenta-se uma tabela com os termopares mais utilizados industrialmente, com seus componentes, faixa de aplicação, vantagens e outras características importantes.

TABELA 2.4 - Termopares mais utilizados industrialmente (Adaptado de ECIL,2002).

Tipo	Elemento Positivo	Elemento Negativo	Faixa de temperaturas	Vantagens	Desvantagens	Potência Termolétrica (mV/100°C)	Aplicação	Limite de erro especial *(*Nota 1)*
T	Cobre	Constantan	-184 a 370 °C	Resiste a atmosfera corrosiva. Aplicável em atmosfera redutora ou oxidante abaixo de 310°C. Sua estabilidade o torna útil em temperaturas abaixo de 0°C. Apresenta boa precisão em sua faixa de utilização.	Oxidação do cobre acima de 310°C.	5,25	Criometria, indústria de refrigeração, química e petroquímica.	±0,5°C ou ±0,4%
J	Ferro	Constantan	0 a 760 °C	Baixo custo. Indicado para serviços contínuos até 760°C em atmosfera neutra ou redutora.	Limite máximo de utilização em atmosfera oxidante de 760°C, devido à rápida oxidação do ferro. Acima de 480°C, é necessária utilização de tubo de proteção.	5,74	Centrais de energia, metalurgia, química petroquímica e industrias em geral.	±1,1°C ou 0,4%
E	Chromel	Constantan	0 a 870 °C	Alta potência termoelétrica Os elementos são altamente resistentes à corrosão, permitindo o uso em atmosfera oxidante.	Baixa estabilidade em atmosfera redutora.	7,61	Química e petroquímica.	±1,0°C ou 0,4%
K	Chromel	Alumel	0 a 1260 °C	Indicado para atmosferas oxidantes. Para faixa de temperaturas mais elevada, fornece rigidez mecânica melhor que os tipos S ou R e vida mais longa que o tipo J.	Vulnerável em atmosferas redutoras, sulfurosas e gases como SO_2 e $H2_S$,	4,04	Metalurgia, siderurgia, fundições, usinas de cal e cimento, vidros e industrias em geral	±1,1°C ou 0,4%
S	Pt 10% Rh	Pt	0 a 1480 °C	Indicado para atmosferas oxidantes. Apresenta boa precisão em altas temperaturas.	Vulnerável à contaminação em atmosferas que não sejam oxidantes. Para altas temperaturas, utilizar bons isoladores.	0,645	Metalurgia, siderurgia, fundições, usinas de cal e cimento, vidros e medições de altas temperaturas com alta precisão.	±0,6°C ou 0,1%
R	Pt 13% Rh	Pt	0 a 1480 °C	Indicado para atmosferas oxidantes. Apresenta boa precisão em altas temperaturas.	Vulnerável à contaminação em atmosferas que não sejam oxidantes. Para altas temperaturas, utilizar bons isoladores. Potência termoelétrica maior do que a do tipo S.	0,647	Idem tipo S	±0,6°C ou 0,1%
B	Pt 30% Rh	Pt 6% Rh	870 a 1705 °C	Melhor estabilidade e resistência mecânica do que os tipos S ou R. Mais adequado para altas temperaturas. Não necessita de compensação de junta de referência, se a temperatura desta não exceder a 50°C.	Vulnerável à contaminação em atmosferas que não sejam oxidantes. Para altas temperaturas, utilizar bons isoladores.	0,033	Metalurgia, siderurgia, fundições, usinas de cimento, vidros, cerâmicas e medições de altas temperaturas em geral.	±0,25%

** NOTA 1: Escolher o maior valor.*

2.3.5. ESCALAS PRÁTICAS DE TEMPERATURA

No início do século XX constatou-se a necessidade de uma escala de temperaturas universal, definida de modo que fosse precisa, reprodutível, simples de utilizar e que fornecesse valores de temperatura tão próximos quanto possível da temperatura termodinâmica (Cabral, 1995).

Em 1927 a 7ª CGPM (*Conferência Geral dos Pesos e Medidas)* adotou a primeira Escala Internacional de Temperatura, denominada ITS-27. Essa escala estendia-se desde os -190 °C até acima dos 1063 °C. A ITS-27 foi sujeita a uma revisão em 1948, e passou a ser designada por ITS-48. Esta escala foi alterada em 1960, e adotou nesse ano a nova designação de IPTS-48.

Em 1968, ocorreu uma revisão mais profunda, sendo adotada a Escala Internacional Prática de Temperaturas de 1968 (IPTS-68). Pouco tempo após a sua adoção, foram constatadas muitas limitações e deficiências quando foram introduzidas algumas correções em 1975. Além disso, foi acrescentada uma Escala Provisória de Temperatura de 0,5 K a 30 K (EPT-76), em 1976.

Em 1987, a 18ª CGPM decidiu pelo desenvolvimento de uma nova escala de temperaturas, que viria a entrar oficialmente em vigor em 1° de Janeiro de 1990, sob a designação de Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90).

O salto tecnológico vivido neste último século sempre foi a razão para as revisões das escalas práticas. Os aparelhos utilizados para a elaboração das primeiras escalas eram analógicos. Com o advento da instrumentação digital, os procedimentos usados para se levantar os pontos fixos ficaram cada vez mais precisos. Como exemplo, podem-se citar os pontos fixos relacionados na Tabela 2.5.

TABELA 2.5 - Valores dos Pontos fixos segundo as IPTS 48, IPTS 68 e ITS 90. (Stimson, 1948; Power et al, 1974 e Burns et al, 1993).

Pontos Fixos	IPTS 48	IPTS 68	ITS 90
Ponto de fusão do ouro	1063,00	1064,43	1064,18
Ponto de fusão do paládio	1552,00	1554,00	1553,50

Apesar da evolução das escalas práticas, industrialmente ainda são produzidos sensores na escala de 1948, principalmente no Brasil e nos Estados Unidos, por exemplo para análise térmica.

2.4. ANÁLISE TÉRMICA

2.4.1. O PONTO DE FUSÃO

Um elemento puro ou um composto podem existir tanto na forma de sólido cristalino quanto como líquido, existindo uma temperatura T_f , acima da qual a forma estável é o líquido e abaixo da qual estabiliza-se o sólido. Essa temperatura é definida como o ponto de fusão do material, e é a única temperatura em que os dois estados de agregação podem coexistir em equilíbrio. Embora seja considerado constante na maioria das situações, na verdade o ponto de fusão varia ligeiramente com a pressão. A aplicação de pressão favorece a estabilização da fase de menor volume. No caso da maioria dos metais, que contraem durante a solidificação, a aplicação de pressão irá aumentar o ponto de fusão já que o sólido apresenta menor volume. Por outro lado, silício, gálio, bismuto e até água, que expandem ao solidificar, irão apresentar uma diminuição no ponto de fusão quando sob ação de uma pressão maior que a atmosférica. A equação de Clapeyron pode traduzir essa situação:

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{T_f (V_2 - V_1)}{L} \tag{2.3}$$

onde:

ΔT: variação no ponto de fusão;

ΔP: variação na pressão;

V_1 e V_2: são os volumes de cada estado de agregação; e

L: calor latente de fusão que é calor liberado quando o líquido se transforma em sólido.

A energia interna do líquido desordenado deve ser maior do que a necessária para a ordenação do sólido, e uma liberação ou absorção de calor deve ocorrer quando o material passa

de um estado a outro. A variação que se observa na temperatura de fusão pela aplicação de pressão é, entretanto, pequena por exemplo no caso do níquel, onde se observa um valor de $\Delta T = 2{,}7.10^{-3}$ K, para um aumento de uma atmosfera na pressão. Nessas condições, em termos práticos, o ponto de fusão pode ser considerado constante na maioria das situações, esteja a fusão do metal ocorrendo à pressão atmosférica ou sob vácuo.

O ponto de fusão também pode ser definido como sendo a temperatura na qual as energias livres das duas fases são iguais. Uma outra maneira de expressar-se essa idéia consiste em afirmar que a essa temperatura tanto o líquido quanto o sólido tem a mesma energia ou capacidade de realizar trabalho, ou seja:

$$F_L = F_S \tag{2.4}$$

onde F_L e F_S são, respectivamente, as energias livres do sólido e do líquido. A energia livre é definida pela seguinte expressão:

$$\mathrm{F = E - T\,S + P\,V} \tag{2.5}$$

onde:

E: energia interna da fase;

T: temperatura absoluta;

P: pressão;

V: volume; e

S: entropia

A entalpia de uma fase pode ser definida por:

$$H = E + P\,\mathrm{V} \tag{2.6}$$

que substituída na equação (2.5) irá conduzir a:

$$F = H - T\,\mathrm{S} \tag{2.7}$$

À temperatura de fusão, T_f , a energia livre do líquido iguala-se à do sólido, logo:

$$H_L - T_f S_L = H_S - T_f S_S \tag{2.8}$$

em que os subscritos *L*, *S* e f referem-se a líquido, sólido e fusão, respectivamente.

como:

$$H_L - H_S = L \tag{2.9}$$

tem-se:

$$\Delta S = S_L - S_S = \frac{L}{T_f} \tag{2.10}$$

A equação (2.10) mostra que a variação em ordenação que ocorre pela transformação de um líquido em sólido pode ser quantificada pela relação entre o calor latente e o ponto de fusão. Tendo em vista que a diferença de estrutura cristalina, e conseqüentemente a diferença em ordenação de um sólido em relação a outro é muito menor que aquela existente entre um sólido e um líquido, a variação em entropia, ΔS, não deve ser fortemente dependente da estrutura do sólido por ocasião da transformação líquido/sólido. Resultados experimentais demonstraram que o valor de T_f é proporcional a L para uma determinada estrutura cristalina, variando pouco de uma estrutura a outra. As estruturas metálicas, cúbica de faces centradas, cúbica de corpo centrado e hexagonal compacta, apresentam pontos de fusão elevados em relação a seu calor latente quando comparadas com estruturas que apresentam ligação covalente. Essa diferença é atribuída à probabilidade muito menor de um átomo alcançar uma posição em que possa satisfazer uma ligação direcional específica de uma estrutura covalente, comparada com a maior flexibilidade de ligação de uma estrutura metálica.

2.4.1.a. Superaquecimento e superresfriamento

Na maioria das situações práticas de solidificação, para que o líquido possa tomar completamente a forma geométrica que se pretenda dar ao sólido, é necessário que o vazamento desse líquido ocorra a uma temperatura superior àquela que dá início à transformação líquido/sólido, para que o líquido possa escoar e preencher completamente os contornos geométricos da peça. A diferença entre essa temperatura de vazamento e a temperatura de transformação denomina-se superaquecimento, ou seja:

$$\Delta T_V = T_V - T_f \tag{2.11}$$

onde:

ΔT_V: superaquecimento;

T_V: temperatura de vazamento; e

T_f: temperatura de fusão.

A Figura 2.10 mostra um esquema de curvas de resfriamento de um elemento puro do estado líquido até temperaturas abaixo do ponto de transformação líquido/sólido, sem e com superaquecimento. Na ausência de superaquecimento, o calor a ser removido para que ocorra a solidificação é dado por:

$$Q = mL \tag{2.12}$$

onde:

Q: calor a ser removido;

m: massa do material e

L: calor latente de fusão .

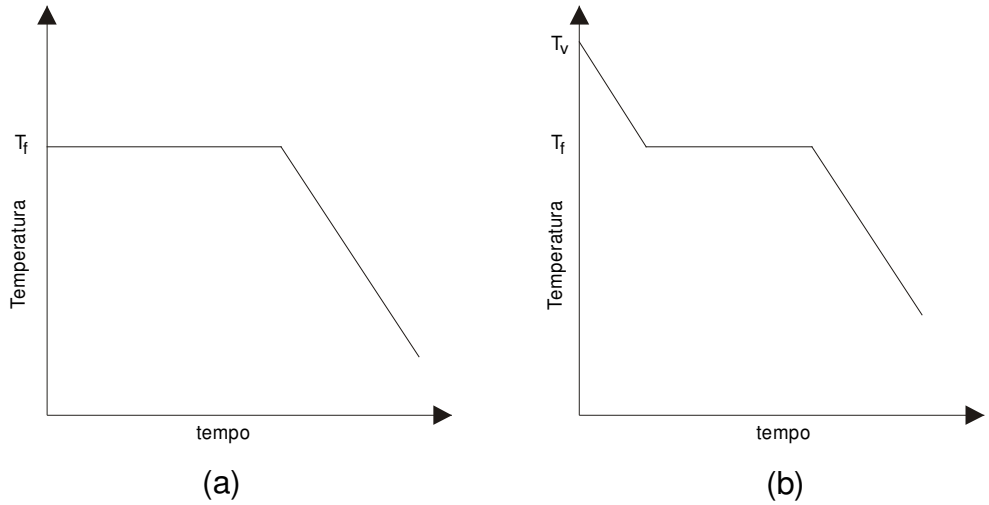


FIGURA 2.10 – Curvas de resfriamento de um elemento puro a partir do estado líquido: a) sem superaquecimento e b) com superaquecimento (Garcia, 2001).

No caso de vazamento em presença de superaquecimento, a quantidade de calor a ser removida engloba o calor sensível e o calor latente, ou seja;

$$Q = m\, c_L (T_V - T_f) + mL \tag{2.13}$$

sendo c_L , o calor específico do metal líquido .

Embora admita-se que o líquido inicia a transformação em sólido quando atinge a temperatura de equilíbrio entre as duas fases, ou seja o ponto de fusão, observa-se na prática com freqüência o surgimento de partículas de sólido a temperaturas inferiores a T_f . A essa diferença de temperatura dá-se o nome de Superresfriamento, ou seja:

$$\Delta T_R = T_f - T_R \tag{2.14}$$

onde:

ΔT_R: Superresfriamento

T_R: temperatura de Superresfriamento.

A Figura 2.11 apresenta casos típicos de curvas de resfriamento a partir da monitorização da temperatura de uma certa massa de líquido. O caso (a) mostra que, quando o líquido atinge a temperatura T_R, este encontra-se superresfriado. Entretanto, mas uma vez iniciada a transformação em sólido a temperatura do líquido remanescente atinge rapidamente a temperatura de fusão em função do calor latente que é liberado. Quando a quantidade de líquido analisada for muito pequena, o calor latente liberado pode não ser suficiente para conduzir a temperatura de volta ao ponto de fusão, e a curva de resfriamento teria o aspecto mostrado na Figura 2.11(b). Alguns materiais não formam um sólido cristalino, mas solidificam na forma de um sólido amorfo. Esses sólidos apresentam uma estrutura similar à de um líquido superresfriado, e como não ocorre uma mudança na ordenação atômica, o calor latente não é liberado e a curva de resfriamento correspondente assemelha-se à apresentada na Figura 2.11(c).

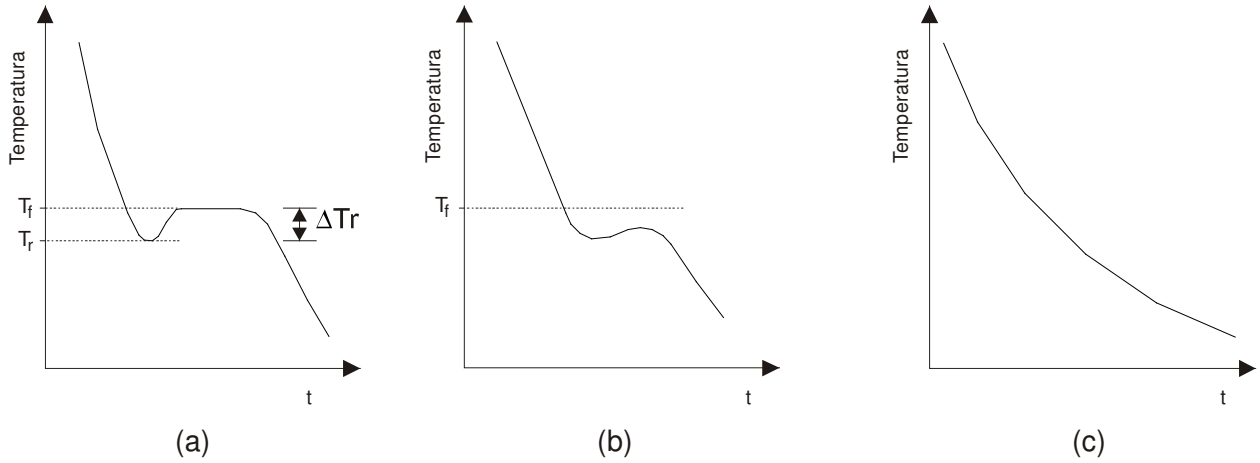


FIGURA 2.11 – Casos típicos de curvas de resfriamento: a) elemento Puro com superesfriamento nítido, b) mesma situação anterior sem retorno ao ponto de fusão e c) sólido amorfo (Garcia, 2001).

2.4.2. O INTERVALO DE SOLIDIFICAÇÃO

Na grande maioria das situações práticas de solidificação, ao invés de elementos puros são utilizadas misturas de dois componentes na forma de ligas, o que permite ampliar o espectro de características físicas e mecânicas disponibilizando um elenco de opções mais amplo na seleção

de materiais. Nessas condições é necessário considerar o equivalente do ponto de fusão para uma liga. Essa consideração deve envolver não somente a composição química específica de cada liga, e as conseqüentes condições termodinâmicas refletidas pelos diagramas de fases, bem como as condições em que a solidificação se realiza: em equilíbrio ou fora dele. Para uma primeira análise, e em nível de exemplo, pode-se considerar a solidificação em condições de equilíbrio de uma liga binária monofásica, com o início da solidificação ocorrendo à temperatura *liquidus* T_L, completando-se à temperatura *solidus* T_S, ambas indicadas no diagrama de equilíbrio correspondente. A Figura 2.12 ilustra a curva de resfriamento que corresponde a essa situação. Nesse caso, o calor latente não é liberado a uma única temperatura, mas ao longo do intervalo de solidificação, $\Delta T = T_L - T_S$. A entalpia da liga durante a solidificação, H, é dada por:

$$H = H_S f_S + H_L f_L \tag{2.15}$$

onde:

H_S e H_L são as entalpias do sólido (S) do líquido (L);

f_S e f_L são as frações de sólido e líquido, respectivamente.

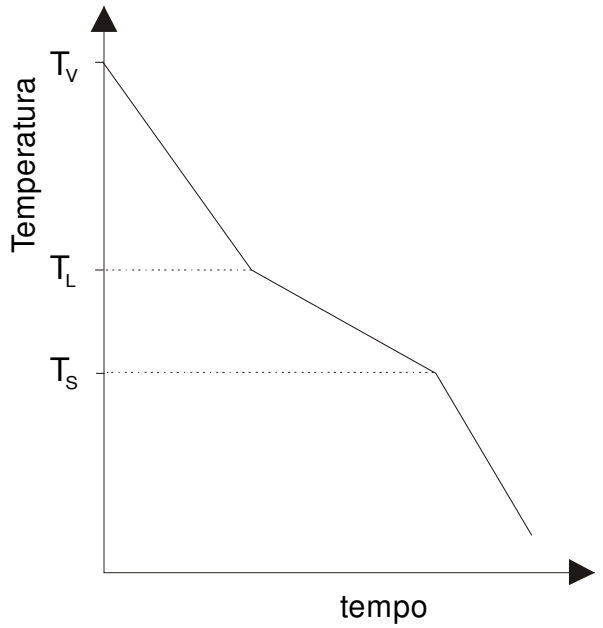


FIGURA 2.12 – Resfriamento de uma liga monofásica a partir do estado líquido e em condições de equilíbrio (Garcia, 2001).

A entalpia pode também ser explicitada na forma:

$$H = H_L - Lf_S \tag{2.16}$$

A Figura 2.13 mostra qualitativamente a evolução da temperatura durante o intervalo de solidificação, bem como a variação da entalpia durante o resfriamento a partir do estado líquido.

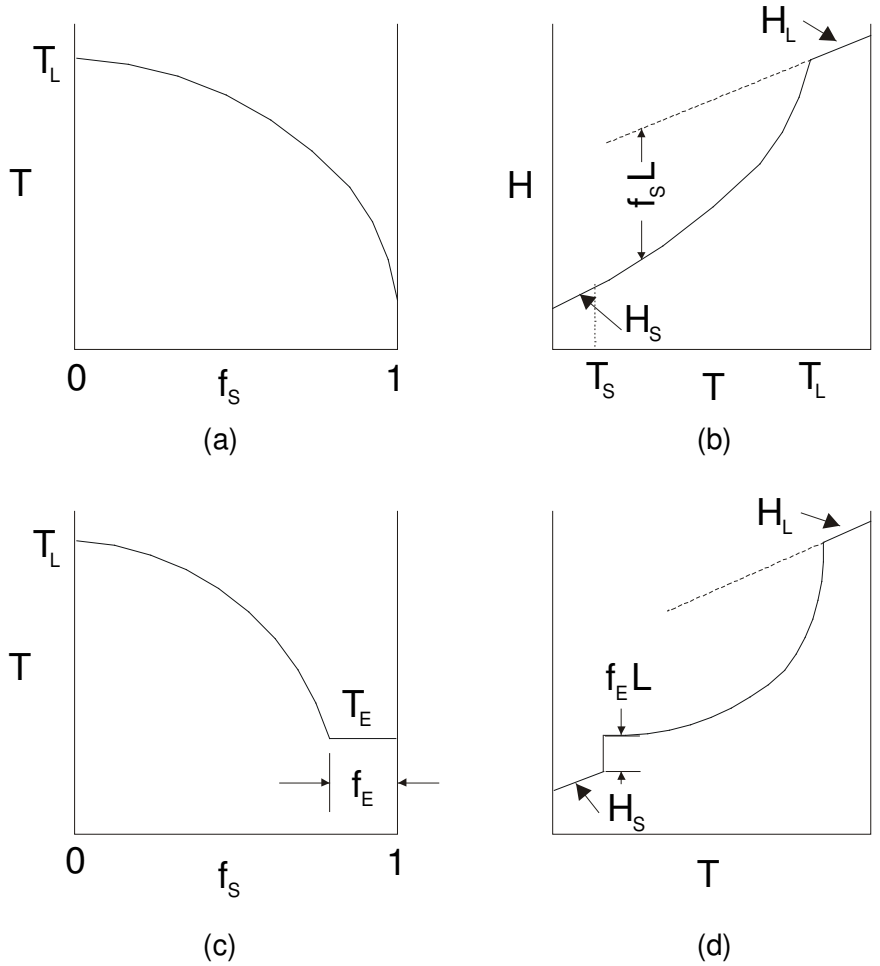


FIGURA 2.13 – Evolução da fração sólida (f_s) com a temperatura e a entalpia a partir do estado líquido (a) e (b) liga monofásica; (c) e (d) liga que apresenta composição eutética no final da solidificação (Garcia, 2001).

2.4.3: ANÁLISE TÉRMICA EM FERROS FUNDIDOS PARA DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Introdução

O uso de curvas de resfriamento para identificar ligas ferrosas ganhou aceitação como uma técnica de produção em fundições de ferro fundido no final dos anos 50. Iniciou-se nos Estados Unidos e depois foi para a Europa, usada para determinar o Carbono Equivalente.

> No Brasil, em 1968, a SOFUNGE, com insumos parcialmente nacionalizados pela Ecil Ltda., iniciava a utilização da análise térmica no Brasil [...] A análise térmica foi evoluindo e adaptando-se a novas realidades da fundição de ferros fundidos. Nascida para auxiliar o fundidor no controle e acompanhamento de fusão nos fornos tipos Cubilot, hoje é utilizada principalmente em fornos a indução, não somente no controle da composição química, como também para o controle das características finais do produto, durante a fusão (Freire e Marques, 1987, p. 85).

A análise térmica é baseada em temperaturas gravadas em certos intervalos de tempo durante o processo de solidificação. Curvas de resfriamento podem ser construídas e usadas para analisar e classificar uma liga. As curvas de resfriamento são uma representação gráfica da temperatura em função do tempo para uma amostra de uma liga vazada em um molde normalizado com um termopar, normalmente posicionado no centro. O registro de temperaturas, como *liquidus* e *solidus,* em uma curva resfriamento, equivalentes a taxas resfriamento durante várias fases da solidificação, pode ser utilizado como atributo metalúrgico para classificar um metal fundido e correlacionar-lo ao comportamento do mesmo em um molde.

Duran (1985) exemplifica com uma liga A-B que possui como característica um diagrama de equilíbrio do tipo isomorfo (Figura 2.14).

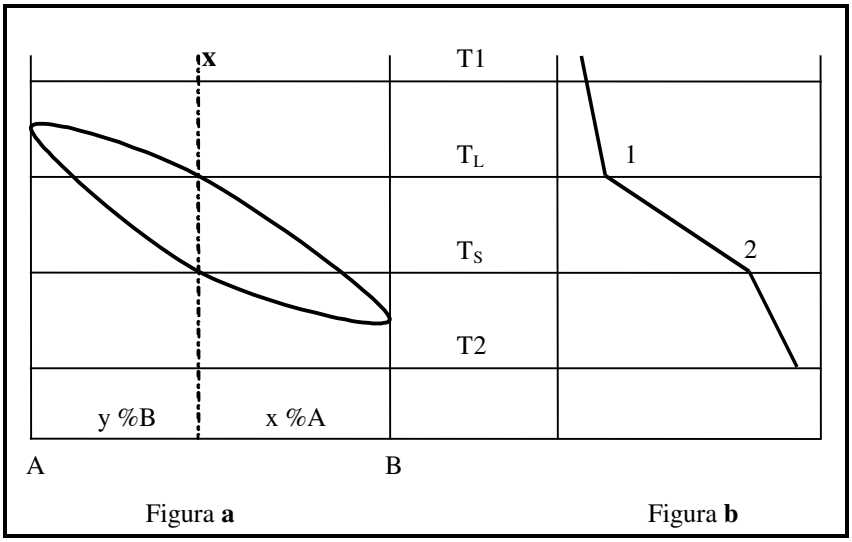


FIGURA 2.14 - Diagrama de equilíbrio isomorfo (a) e curva de resfriamento para a liga com X %A e Y %B (b) (Duran, 1985).

Quando esta liga com X %A resfria desde a temperatura T1 até a temperatura T2, num molde qualquer, obtém-se, através da utilização de um termopar inserido no metal e ligado a um registrador, a curva de resfriamento teórica da figura 2.14.b. O trecho T1-T_L é função do calor específico do líquido, e quando a temperatura atinge T_L, há uma mudança na inclinação que começa no ponto 1. Esta mudança na inclinação deve-se à presença de uma nova fase (sólida) no sistema, e o trecho T_L a T_S é portanto, função de calores específicos do líquido e do sólido e do calor latente de solidificação do sólido. Na temperatura T_S, observa-se uma nova mudança na inclinação da curva, que tem início no ponto 2. Neste ponto, o líquido já se transformou totalmente em sólido e de T_S a T2 a curva é função do calor específico do sólido (Duran, 1985).

Na prática, estas explicações acima permitem correlacionar o ponto 1 e o ponto 2 diretamente com a composição química. Para cada composição tem-se uma temperatura em que ocorrem as mudanças de inclinação ou patamares.

A determinação da composição química básica (%CE: carbono equivalente, %C, %Si) e de outras características, com o metal ainda no forno, permite ao operador fazer correções no metal antes de vazar. Evitam-se eventuais oscilações na composição química, que poderiam acarretar problemas na produção e que somente seriam percebidas após algum tempo, de acordo com a rotina de envio de amostras para o laboratório.

2.4.3.a. Determinação do Carbono Equivalente

Como na prática todos os ferros fundidos produzidos em escala industrial não são ligas binárias (Fe-C), introduziu-se o conceito de Carbono Equivalente (CE) para expressar a influência do Si e do P em quantidades equivalentes ao carbono.

Humphreys (1961) tentou correlacionar a composição química dos ferros fundidos com as características das curvas de resfriamento. Esse autor verificou que a temperatura *liquidus* para ferros fundidos cinzentos não ligados variava com a composição química da seguinte forma:

- Temperatura *liquidus* hipoeutética:

$$TL_{Hipoeutética} = 1669 - 124\left(\%C + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%P}{2}\right)[°C] \tag{2.17}$$

- Temperatura do Eutético Estável:

$$TEE = 1171 - 30\left(1 + \%P - \frac{\%Si}{4}\right)[°C] \tag{2.18}$$

- Temperatura *liquidus* Hipereutética:

$$TL_{Hipereutética} = f\,[\%C + 0{,}3\,(\%Si + P)]\ [°C] \tag{2.19}$$

Heine (1969) utilizou um cadinho revestido de telúrio. Este componente, por evitar a grafitização, também evita a recalescência da transformação eutética, e apresenta um patamar plano que sofre uma influência menor das variáveis do processo metalúrgico.

Posteriormente, Moore (1971) utilizou um corpo-de-prova cilíndrico com 30mm de diâmetro e 50mm de altura, moldado pelo processo em casca, com e sem pintura de telúrio, e determinou a seguinte expressão para a temperatura *liquidus* Hipoeutética:

$$TL_{Hipoeutética} = 1664 - 124\left(\%C + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%P}{2}\right)[°C] \tag{2.20}$$

Há outras expressões que correlacionam a temperatura *liquidus* com o Carbono Equivalente do *liquidus*, que no entanto são bastante semelhantes à determinada por Moore. Em comum as suas expressões, estes autores têm o termo:

$$\%C + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%P}{2} \tag{2.21}$$

conseguindo uma boa precisão, em relação aos valores obtidos pela análise química convencional.

Duran (1985) alerta que não se deve confundir a fórmula do Carbono Equivalente do *liquidus* (equação 2.21) com a conhecida como Carbono Equivalente:

$$\%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} \tag{2.22}$$

a última posiciona a composição do ferro fundido em relação ao ponto eutético e a primeira representa a influência da composição química na temperatura *liquidus*.

Com a utilização do telúrio, a restrição do método que era a utilização da composição hipoeutética no sistema estável (C+Si/3+P/3 ≤ 4,3), passa a ser o uso de composição hipoeutética nos sistema metaestável (C+Si/3+P/3,5 ≤ 4,3).

A razão da utilização do telúrio (ou outro elemento que tenha acentuado efeito promovedor de formação de carbonetos na solidificação), refere-se ao fato de haver uma diferença entre os Carbonos Equivalentes referentes ao eutético estável e o metaestável, como apresentado na Figura 2.15.

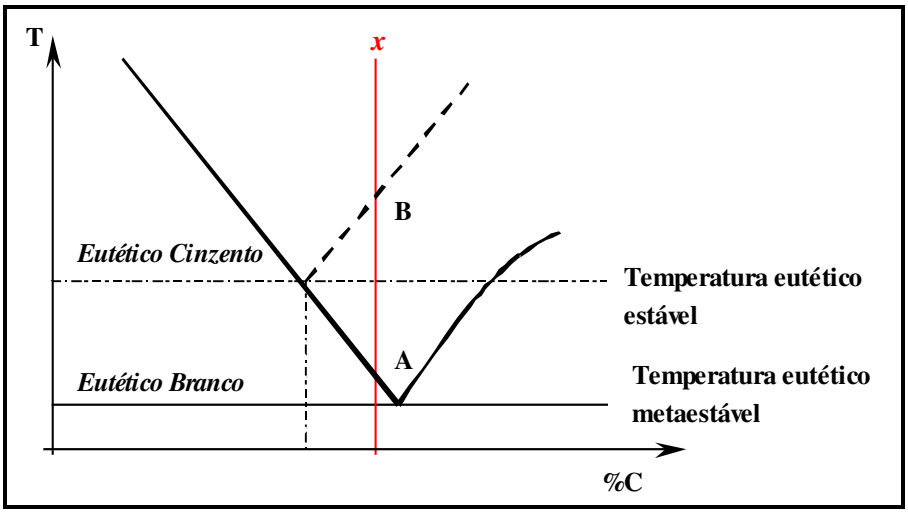


FIGURA 2.15 - Detalhe da região do eutético no diagrama de equilíbrio Fe-C (Freire e Marques, 1977).

Pode-se notar na figura 2.15 que o ferro fundido de composição *x* é hipereutético no sistema estável e hipoeutético quando se solidifica no sistema metaestável. Com o telúrio promovendo a formação de ferro fundido branco, consegue-se obter o patamar da austenita que corresponde à linha *liquidus* (ponto A na figura 2.15). Sem a utilização do telúrio, ao atingir o

ponto B, fica difícil obter o patamar, devido à flotação da grafita, à pequena parcela de calor envolvida durante a precipitação da grafita primária e ao rápido aumento da temperatura com pequeno aumento do Carbono Equivalente. A figura 2.16 é um exemplo de um registro de análise térmica, com um sensor utilizando telúrio.(Duran, 1985)

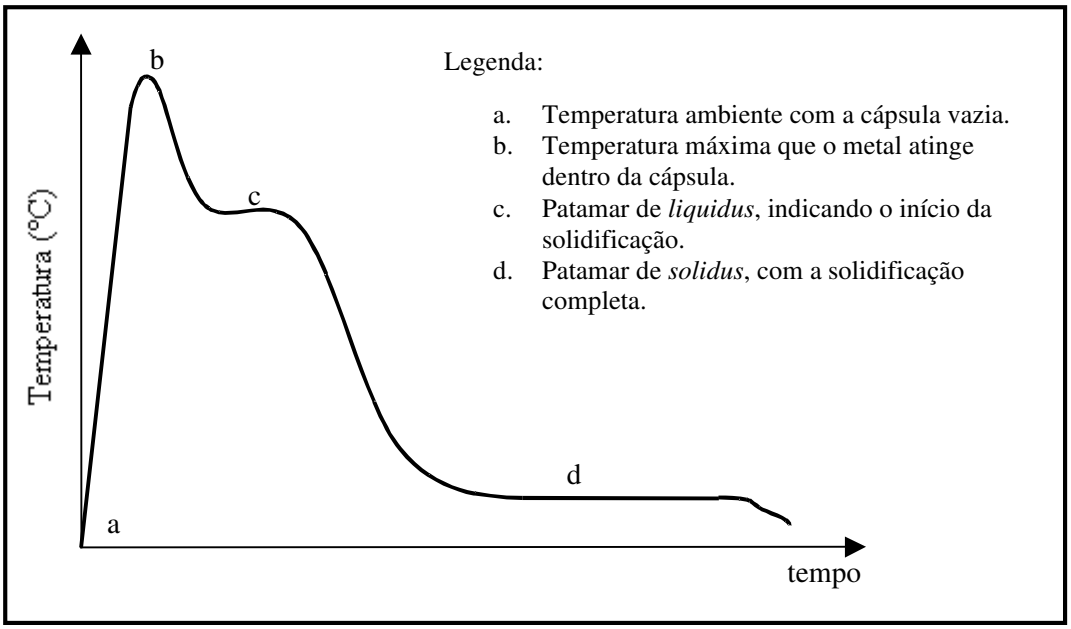


FIGURA 2.16 - Cápsula com tinta à base de telúrio, solidificando no sistema metaestável ($Fe\gamma+Fe_3C$).

Durante a reação eutética verifica-se que ocorre um aumento da temperatura, denominado recalescência (Doepp, 2005), diferença de temperatura entre os pontos *d* e *e* do gráfico 2.17. Segundo Duran et al (1979), o calor liberado (calor latente de solidificação) não foi totalmente extraído pelo molde e uma grande parcela deste calor envolvido na recalescência deve-se à solidificação da austenita, visto que esta ocupa a maior fração do eutético e possui um calor latente de solidificação maior que a da grafita.

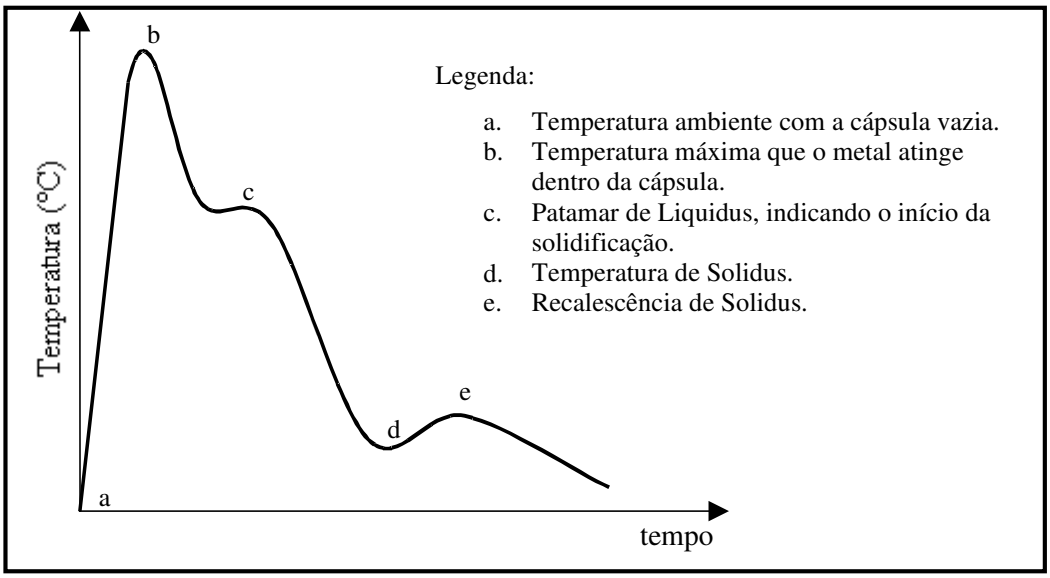


FIGURA 2.17 - Cápsula sem tinta à base de telúrio, solidificando no sistema estável (Feγ+grafita).

2.4.3.b. Determinação do teor de carbono

A determinação do teor de carbono para ferros fundidos hipoeutéticos pode ser feita através da determinação da temperatura *liquidus* hipoeutética e da temperatura do eutético, utilizando o corpo-de-prova com telúrio.

As temperaturas *liquidus* e do eutético de ferro fundido branco podem ser dadas pelas seguintes equações (Duran, 1985):

$$\mathbf{T_L = 1650 - 121{,}5(\%C) - 26{,}7\ (\%Si + 2{,}45\%P)}\ [°C];\ \text{e} \tag{2.23}$$

$$\mathbf{T_W = 1104 + 9{,}8(\%C) - 12{,}1\ (\%Si + 2{,}45\%P)}\ [°C]; \tag{2.24}$$

sendo:

***T_L*:** temperatura *liquidus* hipoeutética e

***T_W*:** temperatura do eutético de ferro fundido branco (t*emperatura solidus no sistema metaestável*).

Resolvendo-se o sistema das duas equações anteriores, obtém-se a seguinte expressão para o teor de carbono:

$$\mathbf{\%C = 0{,}01693T_W - 0{,}00796T_L - 6{,}05} \tag{2.25}$$

Esta equação foi posteriormente colocada num ábaco pela *British Cast Iron Research Association* (BCIRA) e ficou conhecido como "BCIRA *Calculator*". Este ábaco, até o surgimento de aparelhos digitais, foi muito utilizado pelas fundições devido a sua praticidade.

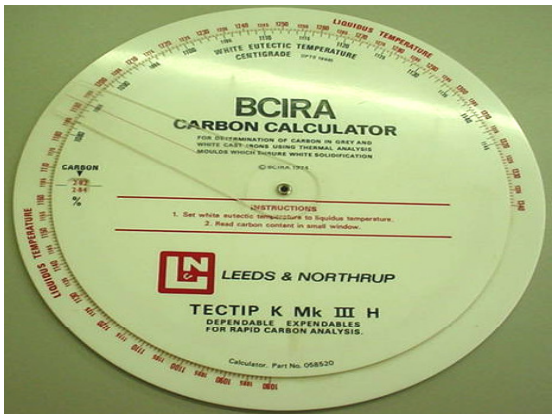


FIGURA 2.18 - Ábaco BCIRA.

2.4.3.c. Determinação do teor de silício:

O teor de silício pode ser determinado através do Carbono Equivalente, do carbono e do fósforo, utilizando a equação *2.21,* em função do silício. Entretanto, a margem de erro seria muito grande, pois os erros nas determinações do Carbono Equivalente e do carbono seriam multiplicados por quatro:

$$\%Si = 4\left(C_{EL} - \%C - \frac{\%P}{2}\right) \tag{2.26}$$

Outro fato relevante é que somente se conhece o valor correto do fósforo após análise química do laboratório. Deste modo, não se pode usá-lo em uma equação de análise térmica. Na prática o que se faz é excluir o valor do fósforo da equação. A equação anterior assume a seguinte forma:

$$\%Si = 4(C_{EL} - \%C) \tag{2.27}$$

Os aparelhos utilizados na análise térmica de ferros fundidos normalmente trabalham com a seguinte equação para a determinação do silício (Duran, 1985):

$$\%Si = -6{,}4 - 13{,}2(\%P) + \sqrt{(7553{,}08 - 6{,}6T_{Sol})} \tag{2.28}$$

Da mesma forma que na equação *2.26*, é necessário inserir o valor do fósforo no aparelho. Como o valor varia bastante e na prática não há tempo para os operadores do forno inserirem este valor, a variação do fósforo nada acrescenta ao resultado final.

Por todos os motivos apresentados, a determinação do valor do silício, via análise térmica, sempre apresenta variações em relação ao laboratório.

2.4.3.d. Outras pesquisas

Souza Júnior e Pinotti Júnior (1995) propuseram um novo procedimento de análise térmica para a determinação da composição dos ferros fundidos. Este novo procedimento utiliza, além das temperaturas *liquidus* e *solidus* já empregadas pelo procedimento normal, os tempos das transformações e velocidades de resfriamento, através de um cadinho sem telúrio. Para tanto, desenvolveram uma instrumentação específica, constituída de microcomputador e placa de condicionamento de sinal. Para a determinação das grandezas, utilizou-se do recurso da primeira e segunda derivadas da curva de resfriamento.

Porém, os resultados obtidos mostraram equivalência ao método tradicional na determinação do CEL, carbono e silício, com coeficientes de correlação de 0,91, 0,917 e 0,677, respectivamente.

Existem ainda muitos outros estudos sobre a análise térmica, por exemplo, os trabalhos de Backerud, Nilsson and Steen (1974); Loper Jr, Heine and Chaudari (1974); Duran, Castello Branco e Krause (1979); Fuoco et al. (2000); Dayong Li et al. (2004), Fuoco et al. (2005) e Doepp and Schwenkel (2005), correlacionando as curvas de resfriamento com propriedades dos ferros fundidos, tais como: nodularidade, microestrutura, monitoramento da inoculação, previsão de carbonetos e etc. Porém, estes temas não fazem parte do objetivo deste estudo.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. ANÁLISE QUÍMICA E ANÁLISE TÉRMICA

3.1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Durante o processo de fabricação dos ferros fundidos, o fundidor usa os resultados da análise química (principalmente %CE, %C e %Si) do metal ainda no forno, para corrigir a composição e assim conseguir atingir a composição objetivada.

Atualmente, a análise química de um ferro fundido pode ser feita de duas maneiras:

- retirando-se uma amostra do metal líquido com uma concha, vazando-o em uma coquilha metálica e enviando a amostra coquilhada ao laboratório para análise por espectrometria de emissão óptica.

- via análise térmica, com cápsula sensora descartável "tipo copo" (moldado em areia fenólica e com termopar tipo K ao centro), preenchido através de uma concha com metal retirado do forno (Figura 3.1). Nomes comerciais deste tipo de sensor: Carbontip KT (Ecil), Quick-Cup (Heraus Electro-Nite) e Italcarb K (Italterm).

A primeira maneira é a mais precisa, apresenta todos os componentes químicos, mas tem as seguintes desvantagens:

- a qualidade da amostra é muito importante e nem sempre é fácil obtê-la. A amostra deve coquilhar como ferro fundido branco (Fe γ + Fe_3C), para tornar possível a análise. Normalmente, são utilizadas coquilhas de cobre, com esquemas especiais de resfriamento.

- tempo para realizar a amostragem e exposição do operador ao calor do forno. O operador primeiramente aquece a concha refratária e depois colhe o metal;

- tempo para a preparação da amostra (lixamento ou retificação); e

- tempo para realização da análise da amostra. Em média, o tempo total para a obtenção da amostra, envio ao laboratório, preparação e análise, é da ordem de 5 minutos.

A segunda técnica é bastante rápida e precisa, mas apresenta as seguintes desvantagens:

- o vazamento do metal líquido na cápsula sensora deve ser constante;

- o vazamento não deve atingir diretamente o termopar;

- a cápsula deve ficar completamente preenchida;

- há o contato do metal colhido com o ar; e

- devido às dimensões das cápsulas e dependendo da liga a ser analisada, uma análise pode levar de 3 a 4 minutos.

FIGURA 3.1 - Vazamento de ferro fundido em uma cápsula de análise térmica.

3.2. FERROS FUNDIDOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

Foram realizados vários ensaios em diferentes fundições, com ferros fundidos de diferentes composições. Os teores de carbono variaram de 2,78 a 3,77% e os teores de silício, variaram de 1,13 a 2,92% em peso, conforme indicado na Figura 3.2.1.

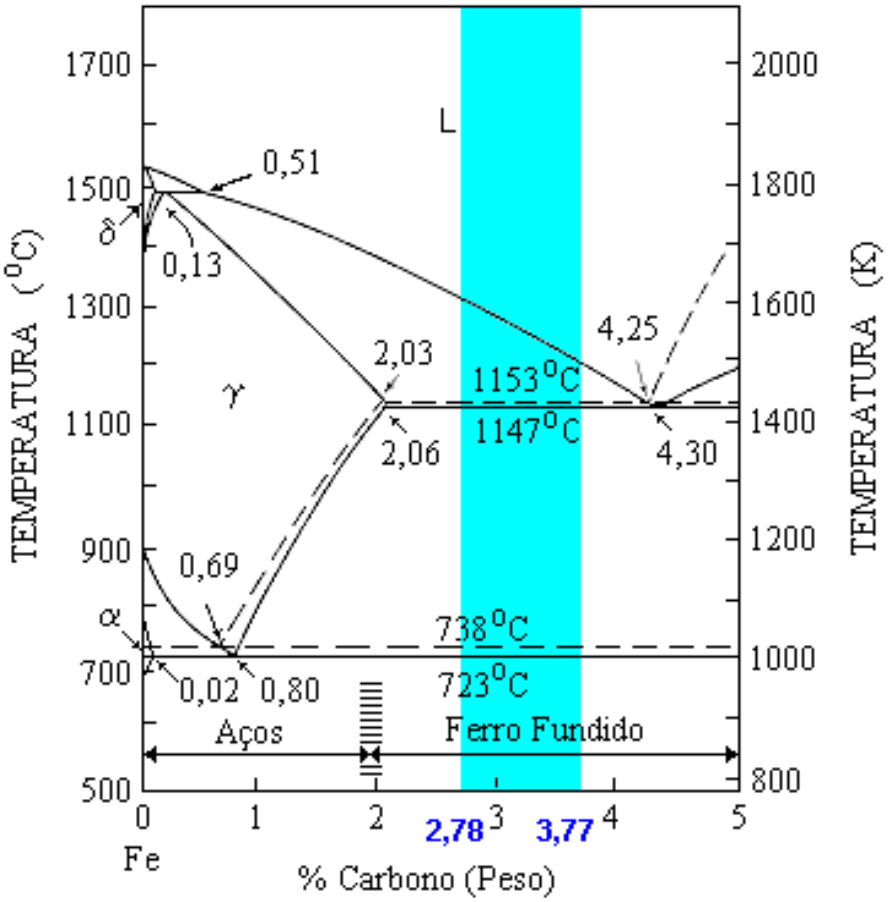


FIGURA 3.2 - Faixa das ligas utilizadas nos ensaios de comparação (Gráfico de fundo: Garcia, 2005).

3.2.1. PRIMEIRA ETAPA DE COMPARAÇÃO (Cápsula x Sensor de Imersão)

Este ensaio foi realizado na Fundição Yadoya, em Bom Jesus dos Perdões-SP.

- Forno utilizado: forno de indução elétrico de 1 tonelada.

- Composição química nominal do ferro fundido utilizado:

TABELA 3.1 - Composição química nominal, porcentagem em peso (%p) – Primeira etapa.

CE	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
3,95	3,20	2,22	0,50	0,0735	0,018	0,575	0,047	0,0645	0,007

3.2.3. SEGUNDA ETAPA DE COMPARAÇÃO (Cápsula x Sensor de Imersão)

Este ensaio foi realizado na Fundição Lepe, em Guarulhos-SP.

- Forno utilizado: forno de indução elétrico de 3 toneladas

- Composição química do ferro fundido utilizado:

TABELA 3.2 - Composição química: (%p)– Segunda Etapa.

Variação	CE	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Mínimo	3,90	3,16	1,21	0,060	0,0827	0,011	0,010	0,001	0,001
Máximo	4,17	3,65	2,89	0,841	0,1120	0,020	0,025	0,017	0,004
Variação	Al	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	Mg	B
Mínimo		0,014	0,0110	0,0083			0,0005		0,0007
Máximo	0,005	0,577	0,0135	0,0124	0,01	0,0001	0,0313	0,001	0,0009

3.2.4. TERCEIRA ETAPA DE COMPARAÇÃO (Cápsula x Sensor de Imersão)

Nesta etapa, os ensaios foram realizados na Fundição Magnetti-Marelli, em São Bernardo do Campo-SP. Esta empresa produz camisas de pistão, pelo processo de centrifugação.

- Forno utilizado: forno de indução elétrico de 5,5 toneladas.

- Composição química dos banhos utilizados:

TABELA 3.3 - Composição química (%p) – Terceira etapa.

Variação	CE	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
Mínimo	3,27	2,779	1,131	0,462	0,115	0,032	0,329	0,215	0,02	0,013
Máximo	4,44	3,767	1,937	0,796	0,696	0,102	1,184	0,342	0,054	0,324

Variação	Ti	Sn	V	Al	Mg	Nb	B	W	Pb	Fe
Mínimo	0,009	0,007	0,009	0,004	0	0,006	0,002	0,008	0,023	91,91
Máximo	0,031	0,021	0,015	0,24	0,001	0,012	0,005	0,014	0,221	94,57

3.2.5. ENSAIO DE AFERIÇÃO EXPERIMENTAL

Este ensaio foi realizado na Fundição Funditubа, em Indaiatuba-SP.

- Forno utilizado: forno de indução elétrico de 900 kg.

- Composição de carga para os carregamentos dos fornos, utilizada nesta empresa:

TABELA 3.4 - Composição de carga – Ensaio Aferição Experimental.

Item	Gusa	Aço	Retorno	FeMn	S	Grafita
%	15	35	50	0,02	0,0017	0,05

Composição química do ferro fundido utilizado:

TABELA 3.5 - Composição química (%p) – Ensaio Aferição Experimental.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	V
3,19	2,14	0,617	0,0693	0,0718	0,0148	0,0148	0,0096	<0,005	0,931	0,00914	0,00725
W	**Pb**	**Sn**	**Mg**	**Sb**	**B**	**CE**	**Rtc**	**Rtn**	**Hbc**	**Hbn**	**Fe**
<0,01	<0,001	0,0037	<0,001	0,00522	0,00522	0,392	28,46	68,07	222	208	92,77

3.3 - METODOLOGIA DE ENSAIOS/ANÁLISE

3.3.1. ENSAIOS COMPARATIVOS CÁPSULA PADRÃO X SENSOR DE IMERSÃO

O objetivo dos ensaios foi comparar o desempenho dos sensores para determinação dos teores de %CE, %C e %Si em ferros fundidos, via análise térmica. Foram comparados os resultados obtidos pelo sensor atual tipo cápsula e pelo novo sensor por imersão desenvolvido no presente trabalho, com os resultados de amostras enviadas ao laboratório.

Foram realizadas três etapas de ensaios em deferentes fundições, para analisar o desempenho dos sensores.

A seqüência utilizada foi a seguinte:

- Primeiramente media-se a temperatura do banho, utilizando um medidor portátil e termopar de imersão descartável. As temperaturas utilizadas neste ensaio situaram-se entre 1400 e 1500 °C;
- Retirava-se com uma concha, uma certa quantidade de material para enchimento da cápsula de análise e para a obtenção de uma amostra coquilhada, para posterior análise por Espectrometria de Emissão Óptica.
- Realizava-se a imersão do sensor;
  - a análise de resfriamento feita pela cápsula foi analisada e registrada através do aparelho FERROLAB III (Tipo K). Este aparelho detectava as temperaturas *liquidus* e *solidus* e apresentava os valores dos elementos, segundo as equações neles inseridas. (Vide 2.4.3)

- a análise de resfriamento feita pelo sensor de imersão e foi analisada e registrada através do aparelho FERROLAB III (Tipo R). Este aparelho detectava as temperaturas *liquidus* e *solidus* do metal.

- As curvas de resfriamento obtidas foram transferidas para um computador e salvo em planilhas do Microsoft Excel.
- Posteriormente, os resultados das temperaturas de solidificação relativas ao sensor de imersão foram planilhados (Microsoft Excel) e foram realizadas as regressões lineares da seguinte forma:
    - Teor de Carbono Equivalente: foi correlacionado o teor de %CE obtido com a amostra analisada pelo laboratório, com os valores das temperaturas *liquidus* obtidas pelos sensores;
    - Teor de carbono: foi correlacionado o teor de %C obtido com a amostra analisada pelo laboratório, com os valores das temperaturas *liquidus* e *solidus* obtidas pelos sensores;
    - Teor de silício: Primeiramente, foi feita a regressão, correlacionando-se a temperatura *liquidus* registrada pelo sensor com os resultados de %Si do laboratório. Desta forma, seria seguido o mesmo padrão usado pela análise das cápsulas (Item 2.4.3.c). Depois foi feita também, como no cálculo de %C, a regressão linear utilizando as temperaturas *solidus* e *liquidus*.

- Com os valores obtidos pelas regressões, foram elaboradas equações para os cálculos dos valores de %CE, %C e %Si.
- Foram realizadas comparações entre os dados obtidos pelo sensor de imersão, com os resultados das cápsulas e os resultados das análises das amostras enviadas ao laboratório.

3.4. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES UTILIZADOS NOS ENSAIOS

Os sensores utilizados são normalizados pela *American Society for Testing and Materials*, ASTM, segundo a norma E-230. As tolerâncias aplicáveis são apresentadas nas tabelas 3.6 e 3.7 .

TABELA 3.6 - Precisão dos sensores descartáveis utilizados nos ensaios (ASTM E-230,2003).

Sensores Descartáveis/ Descrição	Desvio permissível segundo norma
Sensor de Temperatura: Termopar de platina tipo S (Pt-Pt 10%Rh)	± 0,1% da temperatura lida
Sensor de Análise Térmica por Imersão: Termopar de platina Tipo R (Pt-Pt 13%Rh)	± 0,1% da temperatura lida
Cápsula de Análise Térmica: Termopar de chromel-alumel Tipo K	± 1,1 °C

TABELA 3.7 - Precisão dos sensores convencionais utilizados nos ensaios (ASTM E-230,2003).

Termopares convencionais (dispositivo de aferição)	Desvio permissível segundo norma
Termopares posicionados na coquilha metálica: Termopar de chromel-alumel Tipo K	±2,2 °C ou 0,75% da temperatura lida (vale o que for maior)
Termopares posicionados na caixa de areia, diretamente no metal líquido: Termopar de platina Tipo S (Pt-Pt 10%Rh)	±1,5 °C ou 0,25% da temperatura lida (vale o que for maior)

3.5. EXPERIMENTOS EM DISPOSITIVO DE SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL

Em uma caixa moldada em areia de fundição, foram montados quatro termopares posicionados para o registro da solidificação do metal vazado a ser vazado na mesma. Em uma das extremidades, foi colocada uma coquilha metálica de aço carbono de espessura de 76,2mm (3”), para direcionar a solidificação do metal.

Os termopares foram posicionados a 5, 11, 17 e 42 mm, a partir da superfície interna da coquilha. Na coquilha, foram colocados mais três termopares: um a 5 mm da superfície interna, outro ao centro e o último a 5 mm da superfície externa da mesma, conforme apresentado nas figuras 3.3 e 3.4. Maiores detalhes são fornecidos no anexo I.

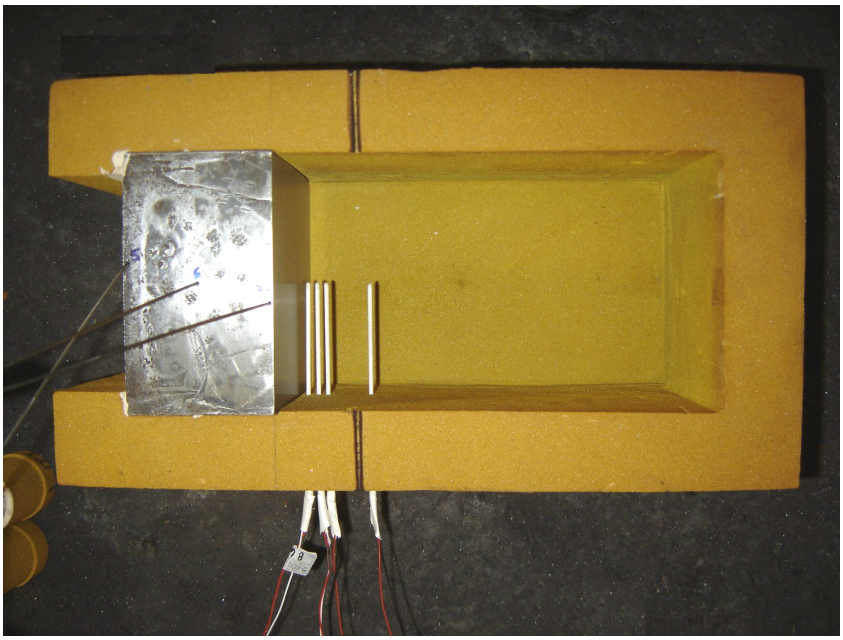


FIGURA 3.3 - Esquema experimental na solidificação unidirecional.

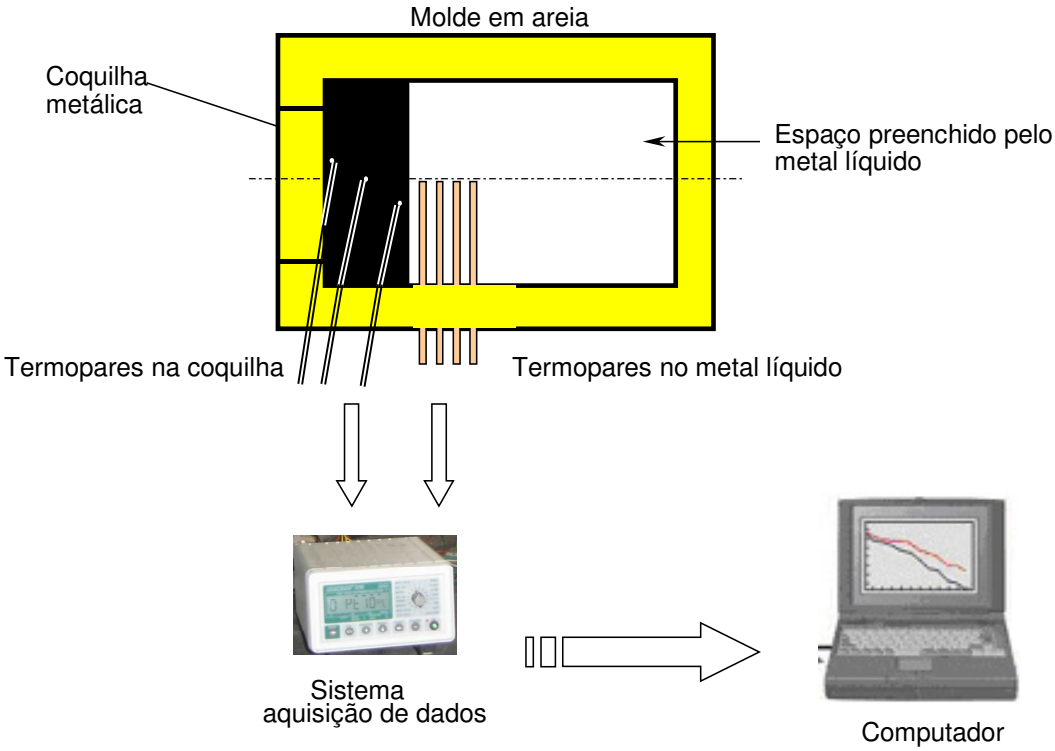


FIGURA 3.4 - Esquema experimental na solidificação unidirecional.

3.6. APARELHOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

Este item apresenta os aparelhos utilizados nos ensaios e suas características principais.

3.6.1. PARA O CONTROLE DE TEMPERATURA DO BANHO

- Medidor portátil de temperatura *Inditemp II*, marca Ecil Met. Tec. Ltda., calibração Tipo S, escala de 1200 a 1800 °C.

FIGURA 3.4 – Aparelho Inditemp II (Ecil Met Tec, 2005).

3.6.2. PARA O REGISTRO DA ANÁLISE TÉRMICA

- Indicador digital microprocessador *Ferrolab III*, marca Ecil Met Tec Ltda., calibração Tipo R, escala de 900 a 1500 °C, taxa de aquisição de dados de 0,10 ms, dois canais de entrada, para utilização com o sensor por imersão.

- Indicador digital microprocessador *Ferrolab III*, marca Ecil Met Tec Ltda., calibração Tipo K, escala de 800 a 1500 °C, taxa de aquisição de dados de 0,10 ms, dois canais de entrada, para utilização com o sensor tipo cápsula.

FIGURA 3.5 - Aparelho Ferrolab III (Ecil Met Tec, 2005).

3.6.3. PARA A AFERIÇÃO EXPERIMENTAL

- Sistema de aquisição de dados, para registros de perfis térmicos, marca *ALMEMO*, modelo *3290-8*. Este sistema apresenta uma configuração que permite a leitura e aquisição direta de temperatura, em tempo real, em oito canais de entrada e dois canais de saída, com taxa de aquisição de 1 ponto por segundo.

FIGURA 3.6 - Registrador Data-Logger Marca Almemo.

- Software utilizado: AMR marca *ALMEMO Data-Control*, para acompanhar, registrar e armazenar os dados obtidos pelos termopares durante o processo de solidificação, além de possibilitar um monitoramento em tempo real dos dados medidos.

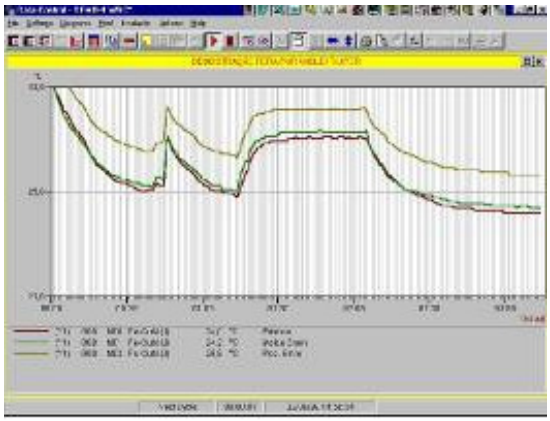


FIGURA 3.7 - Tela do Software de monitoramento das temperaturas e fornecimento dos perfis térmicos.

3.6.4. PARA AS ANÁLISE QUÍMICAS

Todas as análises químicas foram realizadas nos laboratórios da Fundição Magneti Marelli Cofap, em São Bernardo do Campo.

O aparelho utilizado foi o espectrômetro de emissão óptica por fonte de faísca, marca *BAIRD*, modelo *DV6*.

3.7. SENSORES UTILIZADOS NOS ENSAIOS

Este item apresenta os sensores utilizados nos ensaios e suas características principais.

3.7.1. SENSOR DE TEMPERATURA

Sensor descartável para medição de temperatura, com termopar tipo S, copo plástico, capa de proteção em alumínio e montado em tubo de papelão de 12" de comprimento. É comercialmente conhecido como *Termotip MK VI 12" tipo S capa de Alumínio*, fabricação Ecil Met. Tec. Ltda.

3.7.2. CÁPSULA DE ANÁLISE TÉRMICA

Sensor cilíndrico tipo copo, com volume de 33,2 cm^3, moldado pelo processo de areia coberta (s*hell moulding),* com termopar tipo K (Chromel-Alumel) em seu interior e posicionado no centro do mesmo, com pintura interna à base de telúrio metálico. Comercialmente, este sensor é conhecido por *Cápsula Carbontip MK V KT*, fabricação Ecil Met. Tec. Ltda.

FIGURA 3.8 – Cápsulas para análise térmica (Ecil Met Tec, 2005).

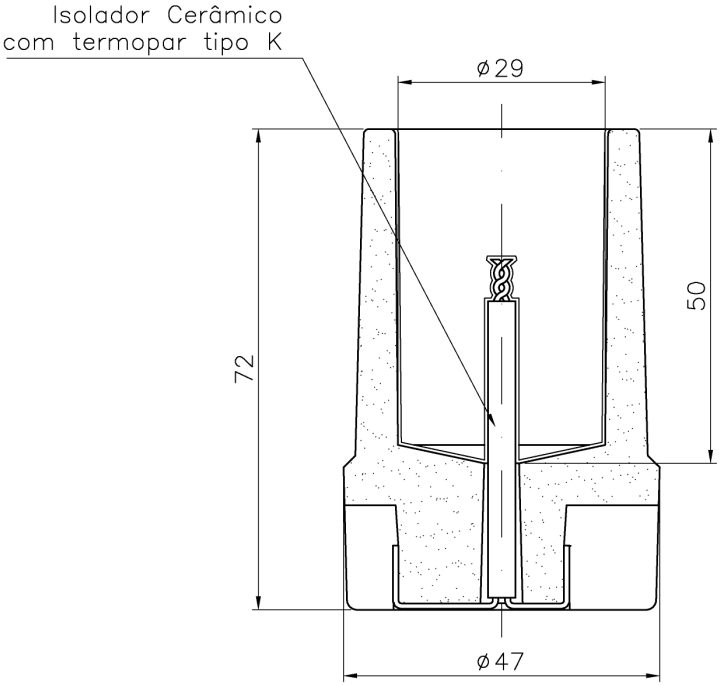


FIGURA 3.9 - Principais dimensões da cápsula tradicional (Ecil Met Tec, 2005).

3.7.3. SENSOR DE ANÁLISE TÉRMICA POR IMERSÃO

Sensor cilíndrico com câmara interna com volume de 6,1 cm^3, moldado pelo processo de areia coberta, com termopar tipo R (Pt-Pt/13% Rh) em seu interior e posicionado no centro desta câmara, com pintura interna à base de telúrio metálico. Comercialmente, este sensor é conhecido por *Sensor TAT-RT®*, fabricação Ecil Met. Tec. Ltda.

FIGURA 3.10 – Sensor de Análise Térmica por Imersão (Ecil Met Tec, 2005).

3.7.4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Foram empregados os seguintes termopares:

- na caixa de areia: termopar tipo S (Pt-Pt/10%Rh), diâmetro de 0,35mm, montado em capilar cerâmico de diâmetro 2,5 mm, com comprimento de 120 mm e rabichos em fios de cobre e liga 11 (Cu-Ni), isolados em teflon (ver o desenho no ANEXO II).

- na coquilha metálica: termopar de isolação mineral, tipo K (Chromel-Alumel), bainha em aço inox 304, diâmetro 1,5mm, comprimento de 250 mm. Rabichos isolados em PVC com comprimento de 3000 mm (ver desenho no ANEXO III).

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. DESENVOLVIMENTO DO SENSOR POR IMERSÃO

O sensor consiste de uma sonda descartável, elaborada com um corpo cilíndrico moldado em areia fenólica, com uma câmara de análise interna, na qual é posicionado um termopar de fios de platina. Esta câmara é preenchida quando o sensor é imerso num banho de ferro fundido, através de uma entrada de topo.

Após uma simples imersão de 4 segundos, o sensor deve ser retirado do banho. O metal líquido que preencheu a câmara começa a solidificar. Toda a solidificação desta porção de metal é "registrado/acompanhado" pelo sinal do termopar posicionado no centro da câmara.

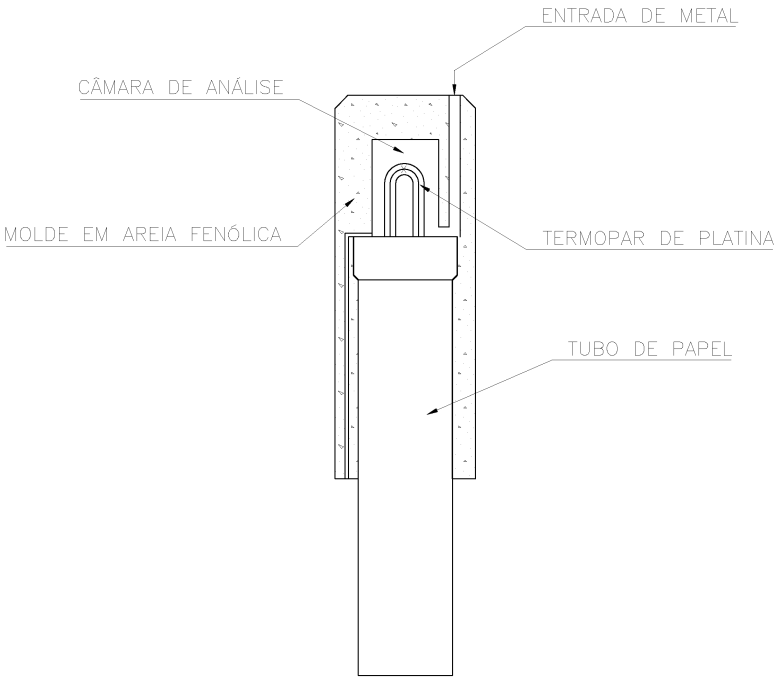


FIGURA 4.1 - Detalhes construtivos do sensor de imersão (Adaptado de Ecil, 2004).

Os objetivos iniciais do desenvolvimento deste sensor foram:

- realizar a medição por imersão, através de uma lança metálica simples e leve, evitando o contato da amostra de metal com o ar;
- diminuir o tempo de exposição do operador à radiação do forno para algo em torno de 5 segundos, como numa medição comum de temperatura;
- diminuir o tempo de análise necessário em relação às cápsulas; e
- aumentar a confiabilidade nos resultados obtidos.

Foram realizados vários experimentos para determinar as dimensões ideais da câmara de análise a fim de obter-se o menor tempo de resposta com uma boa qualidade do "sinal" obtido. Foram realizadas várias tentativas com câmaras de volumes diferentes.

Foram realizados testes com volumes de 4 a 13 cm^3;. Deve-se ressaltar que a cápsula tradicional trabalha com uma amostra de 33 cm^3. Os resultados foram semelhantes, porém o tempo de resposta variou bastante.

TABELA 4.1 - Resultados de tempos de análise x dimensões da câmara.

Dimensões	**Tempo médio de resposta (s)**
25x27mm - (13cm^3)	75
20x27mm - (8,5cm^3)	60
17x27mm - (6cm^3)	45
15x27mm - (4.8cm^3)	28

Decidiu-se pelo diâmetro de 17mm, pelo bom tempo de resposta e pela boa definição da curva de resfriamento. Observa-se que, abaixo desse dimensional, os patamares das temperaturas *liquidus* e *solidus* não apresentam boa definição devido à velocidade de resfriamento.

Como foi projetada uma câmara com dimensões reduzidas, as temperaturas de solidificação (*liquidus* e *solidus*) são obtidas facilmente e de forma precisa, em um tempo curto. Porém, são necessários termopares com menor tempo de resposta em comparação aos atualmente utilizados nas cápsulas. Ou seja, haveria necessidade em se utilizar um termopar montado com fios de menores diâmetros, como os utilizados em sensores de temperatura descartáveis, com diâmetro em torno de 0,05mm.

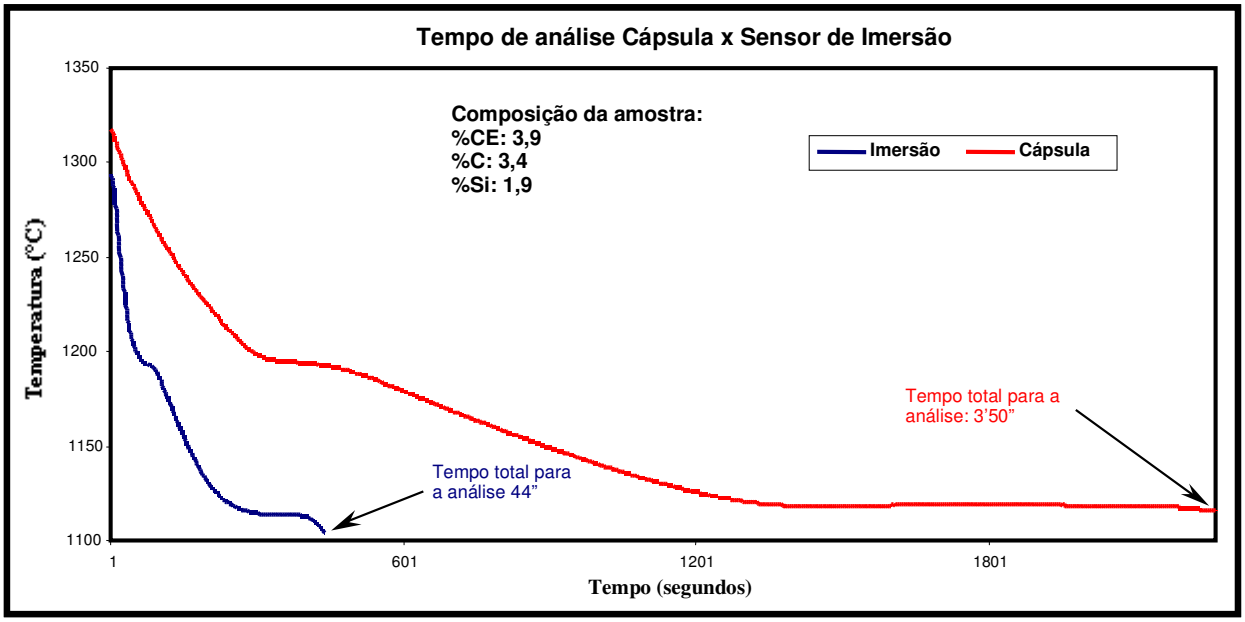


FIGURA 4.2 - Curva de resfriamento comparativa entre uma Cápsula x Sensor de imersão.

O termopar utilizado atualmente nas cápsulas para análise térmica é o tipo K, composto por fios de chromel e alumel, com diâmetro de 0,7mm. A composição química nominal da liga de chromel é: 90% Ni e 10% Cr (liga binária). O alumel é uma liga com quatro componentes: 94% Ni, 3% Mn, 2% Al e 1% Si. O fato de ter vários componentes compromete a utilização da liga de Alumel em fios de menor diâmetro pois, à medida que se vai trefilando este fio, a distribuição granular dos componentes altera as propriedades da liga.

Ao escolher outro termopar, a primeira opção seria o uso de tipo S (Pt x Pt/10%Rh), por se tratar de um termopar de uma liga de fácil obtenção (reprodutibilidade/calibração) e muito comum em sensores descartáveis em medições em metal líquido. Porém, decidiu-se utilizar o termopar tipo R (Pt x Pt/13%Rh) que, além das vantagens do tipo S, possui uma maior potência termoelétrica (efeito Seebeck), isto é; o sensor tipo R apresenta em seu sinal mais milivolts por grau Celsius. Na prática, esta liga é mais sensível às pequenas variações de temperatura durante a solidificação do metal.

4.1.1. RESULTADOS DOS PRIMEIROS ENSAIOS

Depois de concluídas as fases de desenvolvimento, partiu-se para testes com maiores quantidades de peças. Estes testes foram realizados na Fundição Thyssen (Barra do Piraí-RJ), com o intuito de se verificar o desempenho do novo sensor por imersão.

Nesta empresa o metal base é fundido em fornos tipo Cubilot e depois enviado aos fornos de indução de 15 toneladas.

TABELA 4.2 - Composição química (%p) dos ferros fundidos utilizados.

Tipo	%CE	%C	%Si	%P
Cinzentos	3,93	3,35	1,72	0,042
Nodulares	4,16	3,72	1,28	0,042

Nestes ensaios foram feitas comparações entre %CE, %C e %Si, determinados por intermédio da análise térmica utilizando o sensor de imersão, com os resultados obtidos pela análise de uma amostra coquilhada analisada via espectrômetro de emissão óptica.

Os valores obtidos para as temperaturas *liquidus* e *solidus* foram planilhadas e posteriormente foram realizadas regressões lineares, correlacionando as mesmas com os valores obtidos pelas amostras enviadas para análise no laboratório.

Os sensores apresentaram bom desempenho com ótima confiabilidade e reprodutibilidade de resultados e boa correlação com os resultados de laboratório.

Equações obtidas para ferros fundidos cinzentos:

$$\mathbf{CE = (-0{,}009928 \,.\, T_L) + 15{,}82209} \quad (4.1)$$

$$\mathbf{C = [(-0{,}006520 \,.\, T_L) + (0{,}00218 \,.\, T_S) + 8{,}71568]} \quad (4.2)$$

$$\mathbf{Si = (CE - C) \,.\, 2{,}9213} \quad (4.3)$$

Equações obtidas para ferros fundidos nodulares:

$$\mathbf{CE = (-0{,}007019 \,.\, T_L) + 12{,}3615} \quad (4.4)$$

$$\mathbf{C = [(-0{,}007457 \,.\, T_L) + (\ 0{,}004395 \,.\, T_S) + 7{,}49729]} \quad (4.5)$$

$$\mathbf{Si = (CE - C) \,.\, 2{,}8811} \quad (4.6)$$

Os coeficientes de regressão (R^2) obtidos foram:

%CE = 0,96, %C = 0,98 e %Si = 0,93.

FIGURA 4.3 - Sensor por imersão sendo colocado do banho.

Concluída esta fase, partimos para a comparação entre este novo sensor por imersão e o sensor tipo cápsula, atualmente utilizado pelas fundições.

4.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.2.1. VARIÁVEIS TÉRMICAS DA SOLIDIFICAÇÃO

Apoiados no método do confronto dos perfis térmicos e experimentais, os coeficientes transitórios de transferências de calor metal/molde (h_i) e molde/ambiente (h_{amb}) puderam ser determinados a partir dos arquivos contendo o monitoramento experimental das temperaturas (Ferreira, 2005; Spinelli, 2006).

As curvas de resfriamento experimentais (Figura 4.4) foram comparadas com aquelas simuladas numericamente (utilizando as propriedades termofísicas do Anexo IV) e os coeficientes h_i e h_{amb}, extraídos do melhor ajuste entre as curvas, conforme apresentado na Figura 4.5.

O tratamento matemático da convecção no líquido foi incluído no sentido de prever os efeitos da convecção térmica e da convecção do soluto, presentes durante a solidificação. Uma vez executado o programa, são gerados três arquivos DAT. Um deles com a evolução térmica simulada, outro contendo a planilha da posição prevista da isoterma *liquidus* em função do tempo e o último trazendo os dados de gradiente térmico em função da posição no lingote a partir da interface metal/molde.

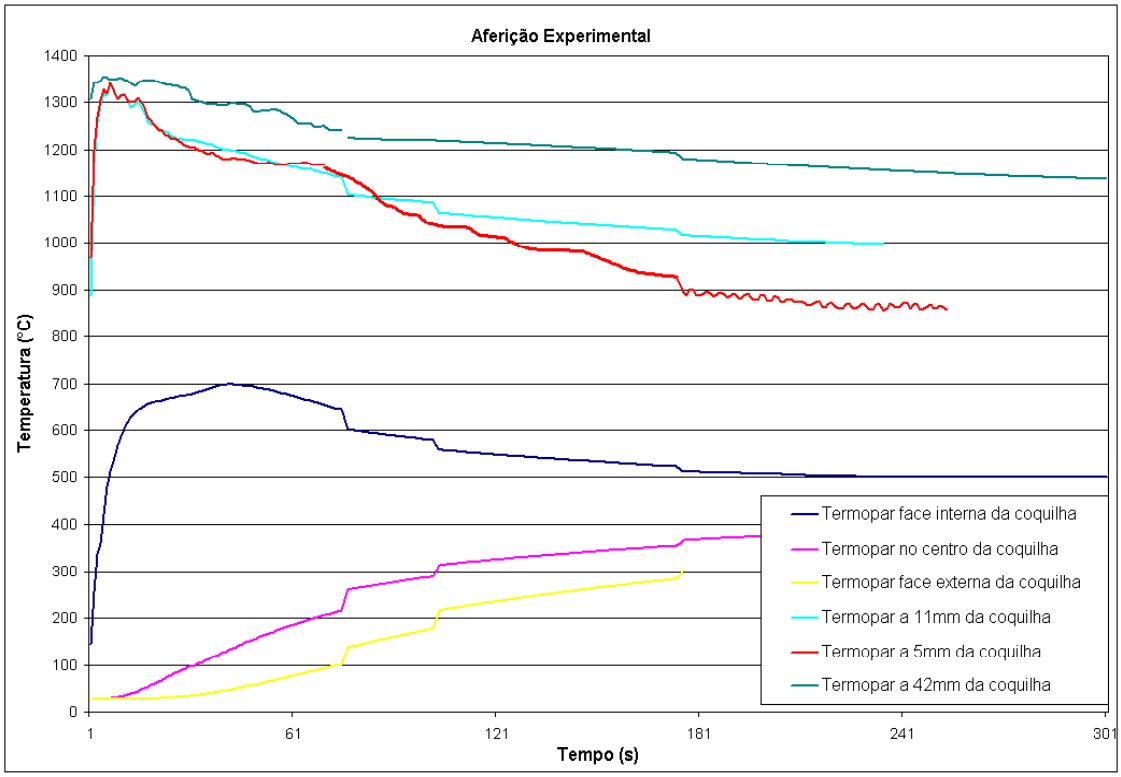


FIGURA 4.4 - Curvas de resfriamento obtidas no ensaio experimental

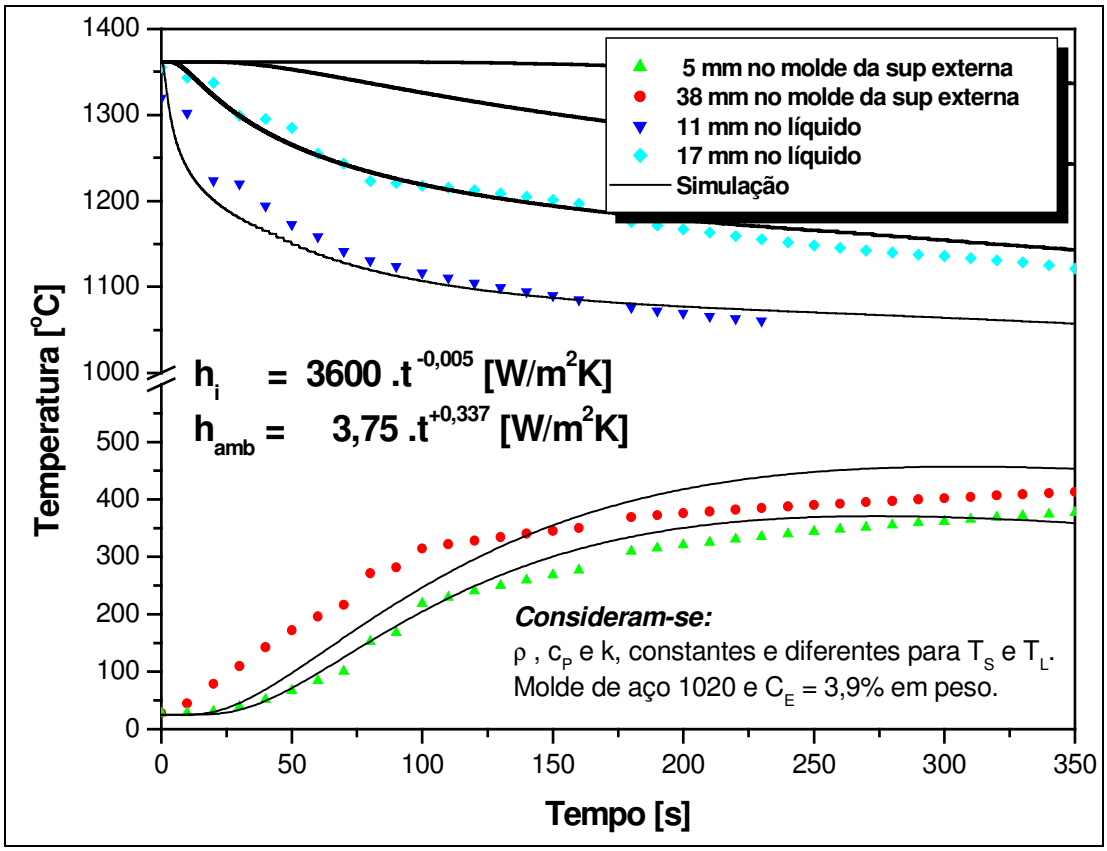


FIGURA 4.5 – Resultados de h_i e h_{amb} para o ferro fundido analisado.

As velocidades experimentais da isoterma de *liquidus* (V_L), podem ser determinadas pelas derivadas das funções P = *f* (t), isto é, V_L = dP/dt. O tempo é definido como sendo o tempo de passagem da isoterma *liquidus* em cada posição de termopar. Desta forma, podem ser obtidos os resultados dos pares ordenados (P,t) e são apresentados na Figura 4.6.

As taxas de resfriamento ($\dot{T}$) para cada posição dos termopares, foram obtidas experimentalmente a partir das interseções das retas cada T_L com as curvas de resfriamento para cada posição dos termopares, e através do resultado da leitura direta do quociente das temperaturas imediatamente antes e depois da T_L e dos tempos correspondentes, isto é $\dot{T}$ = dT/dt.

A figura 4.6 apresenta esquematicamente o procedimento para determinar V_L e $\dot{T}$.

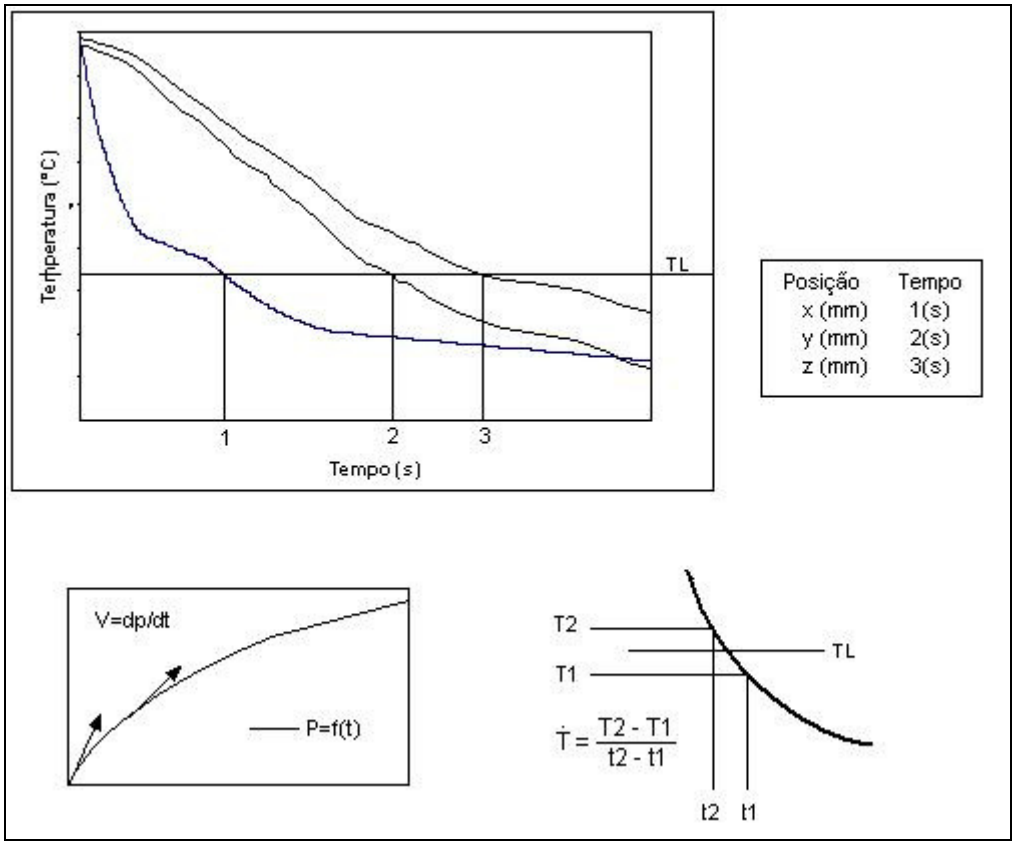


FIGURA 4.6 - Procedimento experimental para determinação das variáveis térmicas.

Na Figura 4.7 apresentam-se os resultados simulados de V_L nas posições. A curva experimental não pode ser obtida em função dos poucos registros disponíveis (3 pontos).

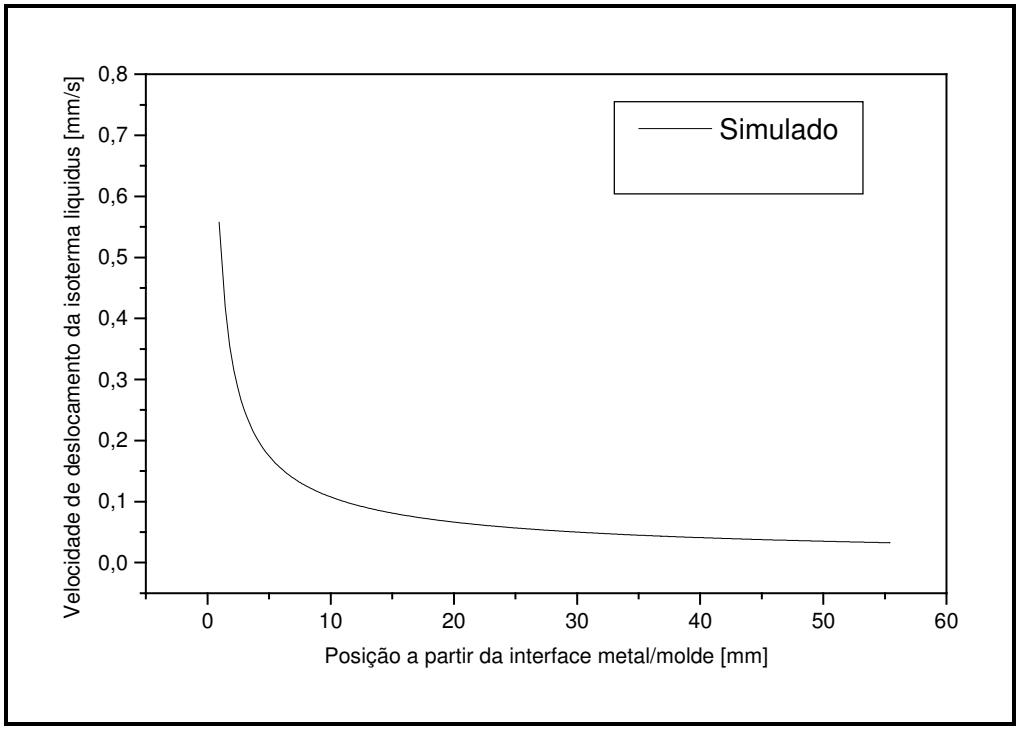


FIGURA 4.7 – Perfil simulado de V_L por posição a partir da interface metal/molde.

A Figura 4.8 apresenta a comparação entre taxas de resfriamento simuladas e os pontos experimentais. Pode-se notar uma boa concordância entre os dois conjuntos de resultados.

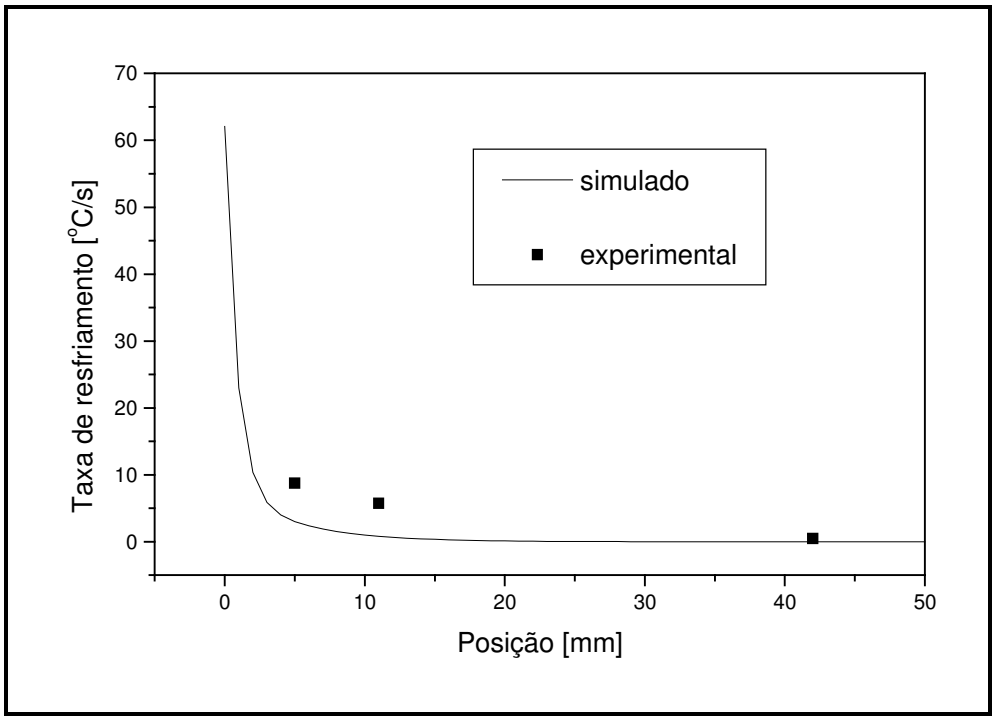


FIGURA 4.7 – Taxa de resfriamento por posição (numérico e pontos experimentais).

4.2.2. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS CÁPSULA PADRÃO X SENSOR DE IMERSÃO

Estes ensaios comparativos foram realizados em três etapas.

4.2.2.a. Primeira Etapa

Os dados coletados a partir de oito diferentes amostras são apresentados na Tabela 4.3.

TABELA 4.3 - Dados coletados na Primeira Etapa.

	Análise Química				Cápsula					Sensor de Imersão					
	CE	C	Si	P	TL	TS	CE	C	Si	TL	TS	CE	C	Si (TL)	Si (TL&TS)
1	3,83	3,16	1,91	0,0966	1195,0	1115,5	3,32	2,25	3,93	1189,7	1112,3	3,85	3,18	1,93	1,93
2	3,81	3,13	1,94	0,0927	1202,0	1115,2	3,26	2,27	3,87	1197,2	1114,7	3,81	3,12	1,95	1,95
3	3,80	3,12	1,94	0,0908	1203,1	1115,5	3,26	2,25	3,86	1199,0	1113,8	3,80	3,11	1,96	1,96
4	3,82	3,14	1,95	0,0849	1209,3	1114,9	3,20	2,29	3,80	1202,4	1111,0	3,78	3,10	1,97	1,97
5	3,95	3,30	1,86	0,0978	1184,4	1115,4	3,41	2,25	4,03	1175,5	1112,6	3,93	3,26	1,89	1,89
6	3,88	3,20	1,93	0,0952	1190,1	1115,3	3,36	2,26	3,97	1183,4	1110,5	3,88	3,22	1,92	1,91
7	3,86	3,17	1,97	0,0946	1194,9	1114,9	3,31	2,29	3,93	1188,4	1112,9	3,86	3,18	1,93	1,93
8	3,79	3,10	1,99	0,0938	1199,8	1114,9	3,27	2,29	3,89	1195,0	1112,7	3,82	3,14	1,95	1,95

Os resultados obtidos nesta etapa estão listados na Tabela 4.4.

TABELA 4.4 - Resumo dos resultados obtidos na Primeira Etapa.

	%CE		%C		%Si		
Dados	**CAP**	**IM**	**CAP**	**IM**	**CAP**	**IM (TL)**	**IM (TL&TS)**
Coeficiente da Regressão Linear	0,73	0,83	0,69	0,80	0,52	0,43	0,44
Média das diferenças entre sensores e Laboratório	-0,07	0,00	-0,13	0,00	-0,33	0,00	0,00
Desvio padrão diferenças entre sensores e Laboratório	0,04	0,02	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
Maior diferença negativa entre laboratório e sensores	-0,10	-0,03	-0,17	-0,04	-0,39	-0,03	-0,03
Maior diferença positiva entre laboratório e sensores	0,02	0,04	-0,06	0,04	-0,30	0,04	0,04

CAP = Cápsula de análise e **IM** = Sensor por imersão.

Equações obtidas com as regressões:

$$\%\mathbf{CE} = 10{,}342441 + [T_L \cdot (-0{,}0054568)] \quad (4.7)$$

$$\%\mathbf{C} = 13{,}787887 + [T_L \cdot (-0{,}006186) + T_S \cdot (-0{,}002924)] \quad (4.8)$$

$$\%\mathbf{Si}_{f(liquidus)} = 1{,}505919 + (T_L \cdot 0{,}002889) \quad (4.9)$$

$$\%\mathbf{Si}_{f(liquidus\ e\ solidus)} = 1{,}30477 + [T_L \cdot (-0{,}002986) + T_S \cdot (-0{,}002630)] \quad (4.10)$$

Os resultados obtidos nesta etapa são apresentados nas figuras 4.4 a 4.9 .

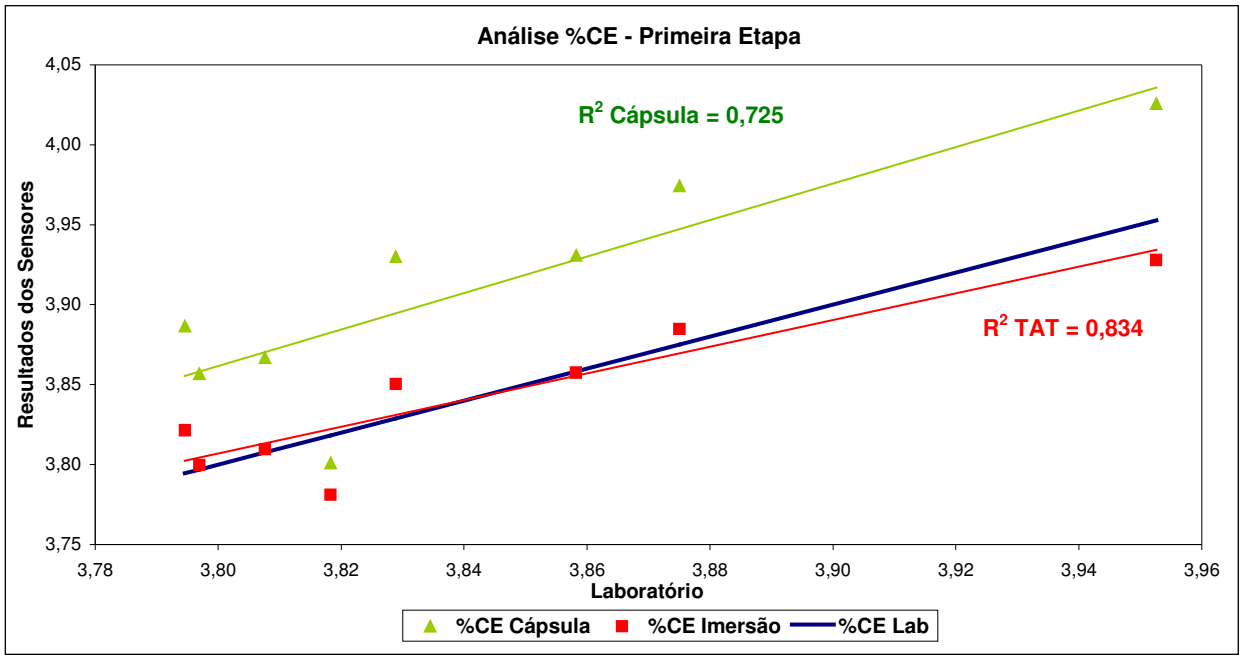


FIGURA 4.4 - Gráfico de análise dos resultados de %CE, na Primeira Etapa.

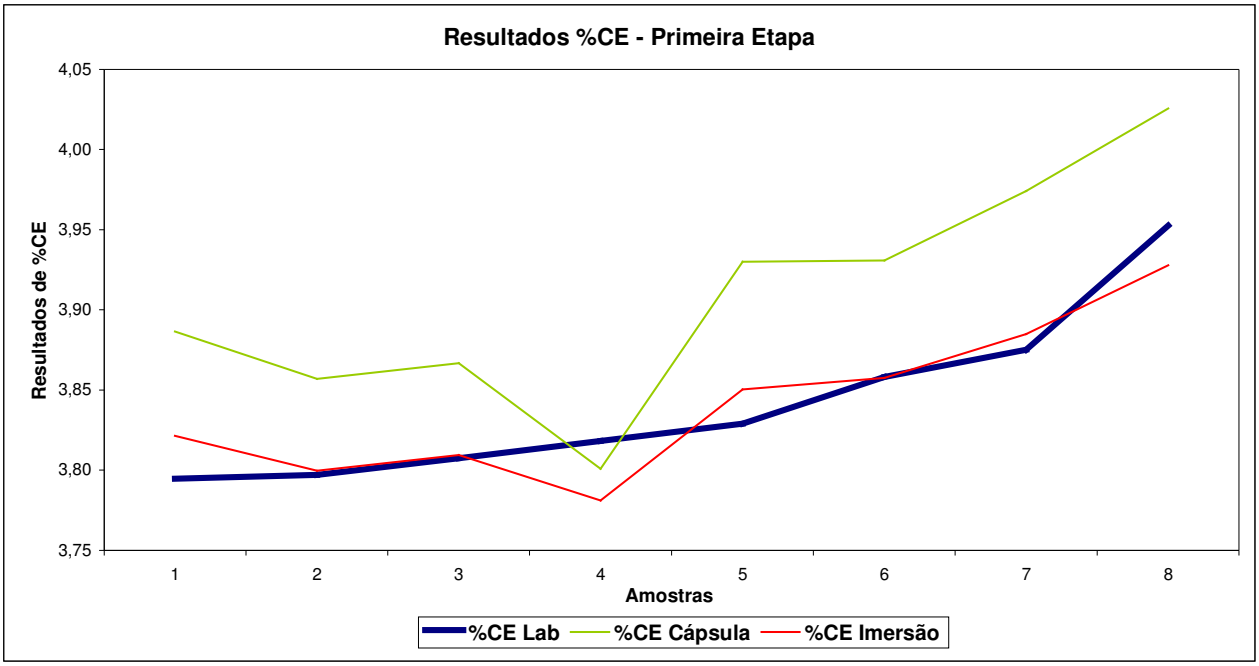


FIGURA 4.5 - Gráfico dos resultados de %CE, na Primeira Etapa.

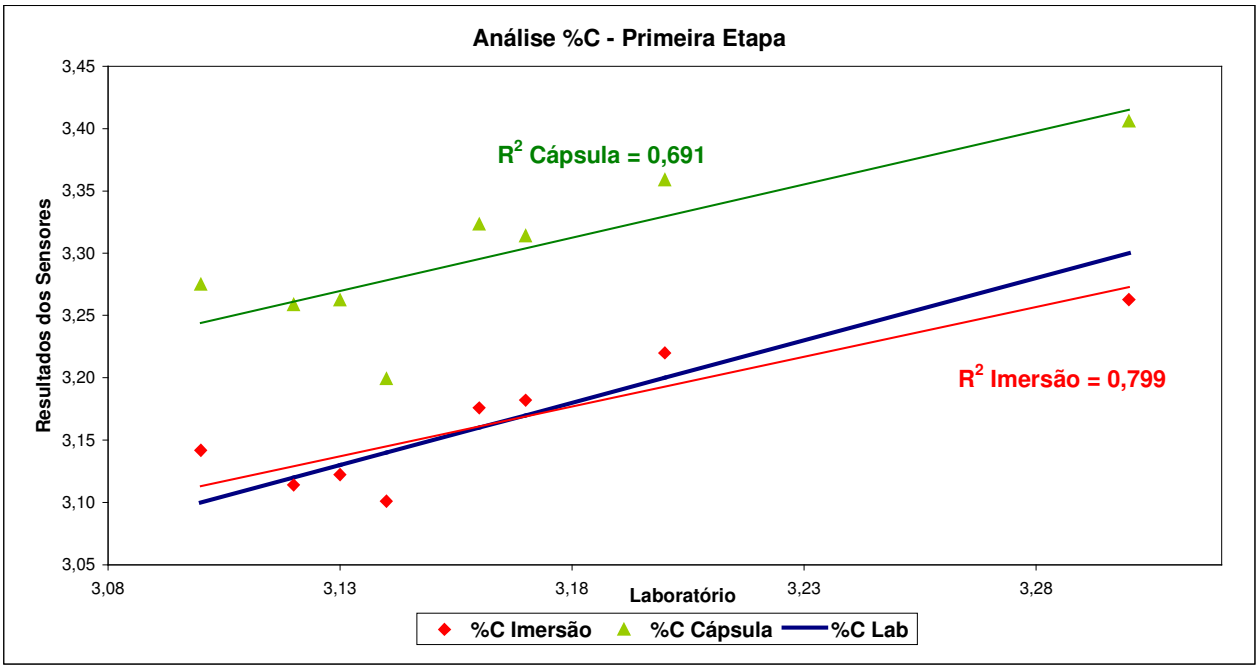


FIGURA 4.6 - Gráfico de análise dos resultados de %C, na Primeira Etapa.

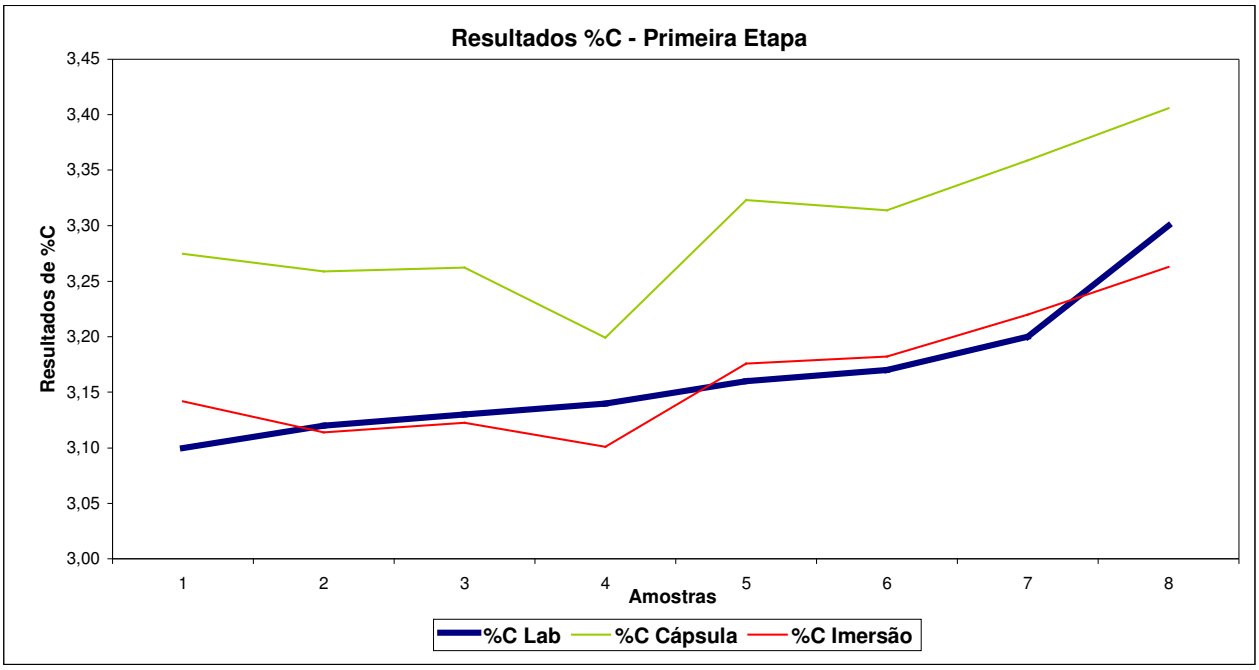


FIGURA 4.7 - Gráfico dos resultados de %C, na Primeira Etapa.

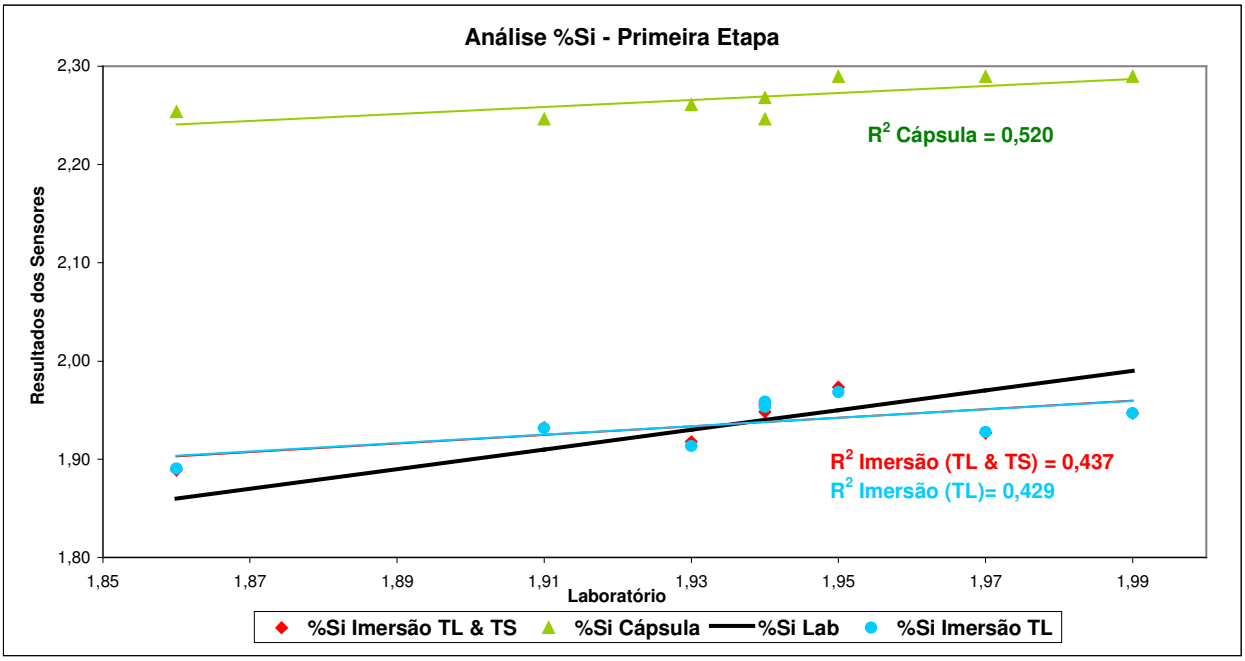


FIGURA 4.8 - Gráfico de análise dos resultados de %Si, na Primeira Etapa.

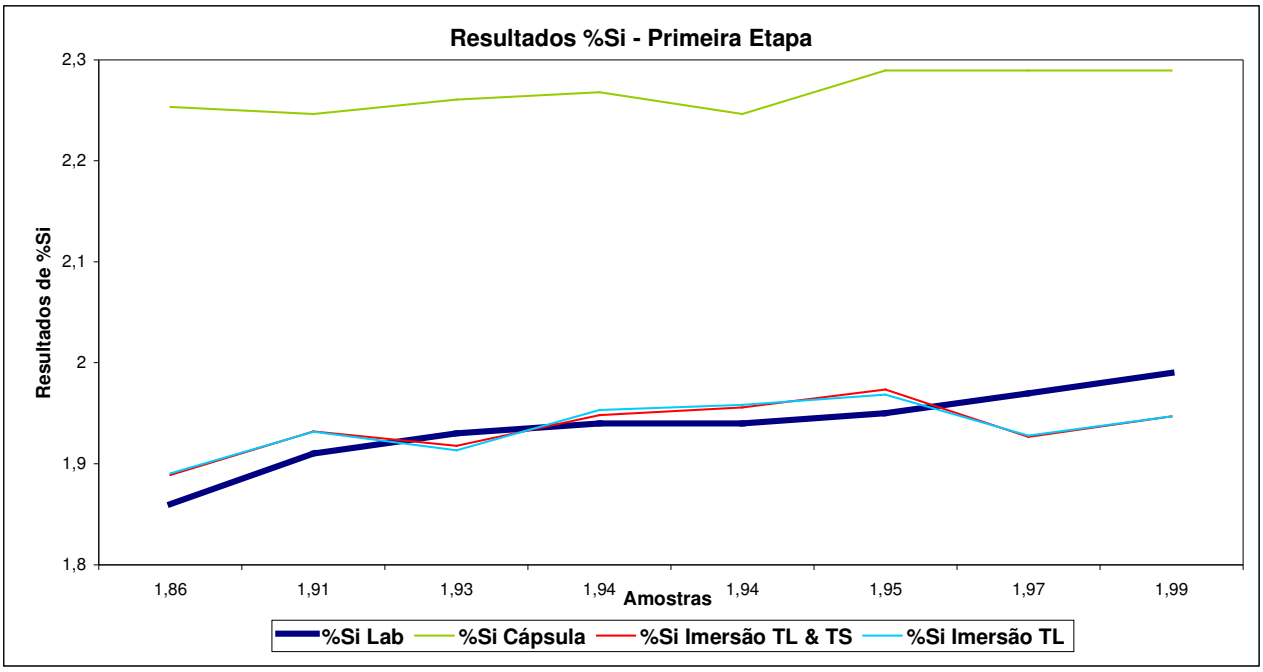


FIGURA 4.9 - Gráfico dos resultados de %Si, na Primeira Etapa.

4.2.2.b Segunda Etapa

Os dados coletados a partir de onze diferentes amostras são apresentados na Tabela 4.5 .

TABELA 4.5 - Dados coletados na Segunda Etapa.

	Análise Química				Cápsula					Sensor de Imersão					
	CE	C	Si	P	TL	TS	CE	C	Si	TL	TS	CE	C	Si (TL)	Si (TL&TS)
1	4,14	3,14	2,92	0,0805	1171,0	1099,7	4,15	3,25	3,27	1162,7	1094,9	4,02	4,38	2,89	1,88
2	3,90	3,31	1,66	0,0965	1187,8	1117,9	3,99	3,42	2,07	1181,5	1121,4	3,93	4,41	1,58	2,12
3	3,97	3,28	1,96	0,0961	1175,6	1116,2	4,11	3,49	2,20	1170,3	1114,7	3,98	4,33	1,88	1,98
4	4,00	3,32	1,93	0,0970	1178,5	1116,3	4,08	3,47	2,19	1170,1	1110,8	3,98	4,35	2,09	1,98
5	3,94	3,27	1,93	0,0942	1179,4	1115,9	4,07	3,45	2,22	1170,9	1113,2	3,98	4,34	1,96	1,99
6	4,09	3,65	1,21	0,0986	1156,5	1126,9	4,28	3,82	1,32	1138,1	1123,5	4,12	3,90	1,25	1,57
7	4,14	3,48	1,88	0,1120	1147,0	1116,9	4,36	3,73	2,14	1137,3	1113,2	4,13	3,96	1,79	1,56
8	4,17	3,52	1,84	0,1050	1155,5	1118,1	4,29	3,68	2,05	1145,6	1113,6	4,09	4,05	1,81	1,67
9	4,13	3,62	1,46	0,0827	1147,5	1123,9	4,36	3,84	1,59	1142,0	1121,4	4,11	3,96	1,38	1,62
10	4,03	3,53	1,42	0,0894	1151,3	1123,5	4,32	3,81	1,62	1141,8	1119,7	4,11	3,97	1,47	1,62
11	4,04	3,53	1,43	0,0884	1153,3	1124,0	4,31	3,80	1,58	1144,7	1119,1	4,09	4,01	1,52	1,66

Os resultados obtidos nesta etapa são apresentados na Tabela 4.6 .

TABELA 4.6 - Resumo dos resultados obtidos - Segunda Etapa.

	%CE		%C		%Si		
Dados	**CAP**	**IM**	**CAP**	**IM**	**CAP**	**IM (TL)**	**IM (TL&TS)**
Coeficiente da Regressão Linear	0,58	0,58	0,94	0,96	0,98	0,20	0,97
Média das diferenças entre sensores e Laboratório	-0,16	0,00	-0,19	0,00	-0,24	0,00	0,00
Desvio padrão das diferenças entre sensores e Laboratório	0,09	0,06	0,00	0,03	0,09	0,41	0,08
Maior diferença negativa entre laboratório e sensores	-0,29	-0,07	-0,28	-0,04	0,09	-0,46	0,08
Maior diferença positiva entre laboratório e sensores	-0,01	0,12	-0,11	0,05	-0,41	1,04	-0,16

Equações obtidas com as regressões:

$$\mathbf{\%CE} = 9{,}079876 + [TL \cdot (-0{,}004356)] \tag{4.11}$$

$$\mathbf{\%C} = -1{,}275834 + [T_L \cdot (-0{,}006891) + T_S \cdot 0{,}011351] \tag{4.12}$$

$$\mathbf{\%Si}_{f(liquidus)} = -12{,}720558 + (T_L \cdot 0{,}012559) \tag{4.13}$$

$$\mathbf{\%Si}_{f(liquidus\ e\ solidus)} = 55{,}03223041 + (T_L \cdot 0{,}0050932) + [T_S \cdot (-0{,}0530287)] \tag{4.14}$$

Os resultados obtidos nesta etapa são apresentados nas Figuras 4.10 a 4.15 .

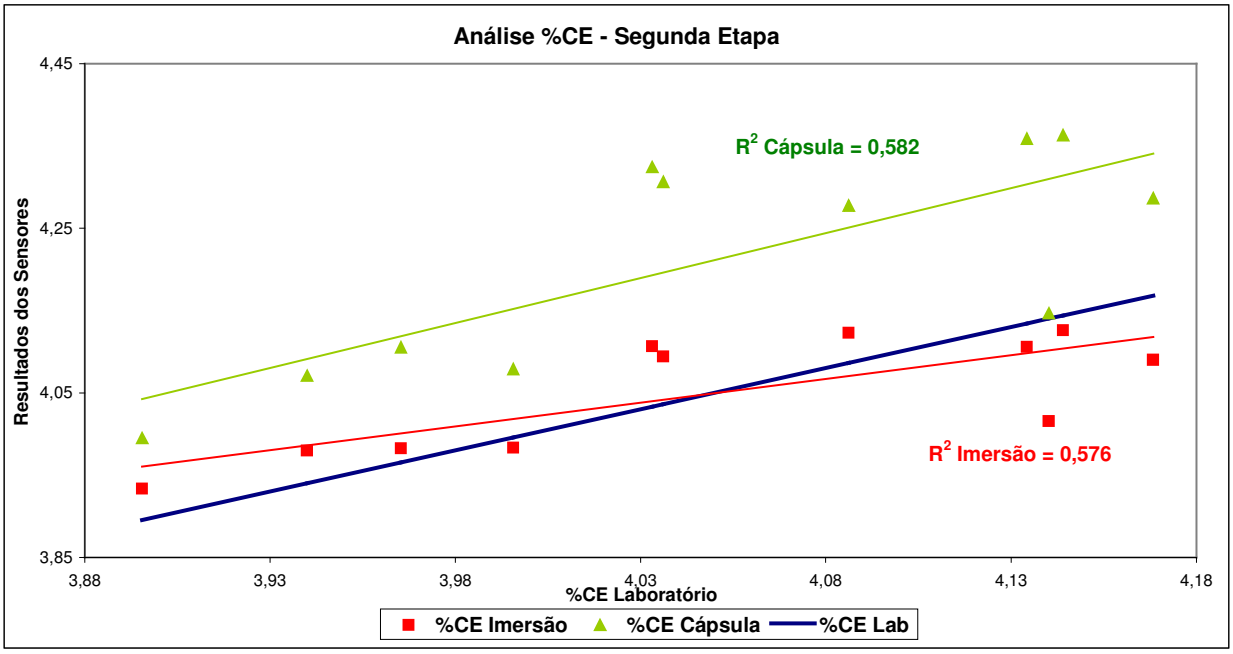


FIGURA 4.10 - Gráfico de análise dos resultados de %CE, na Segunda Etapa.

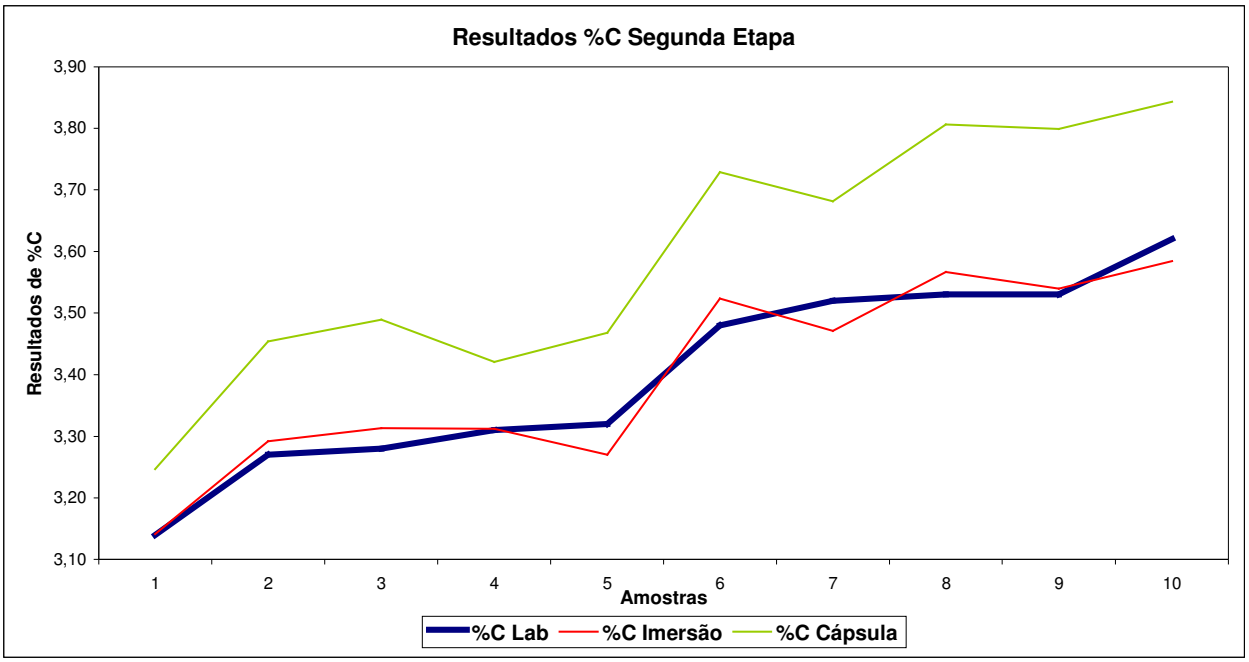


FIGURA 4.11 - Gráfico dos resultados de %CE, na Segunda Etapa.

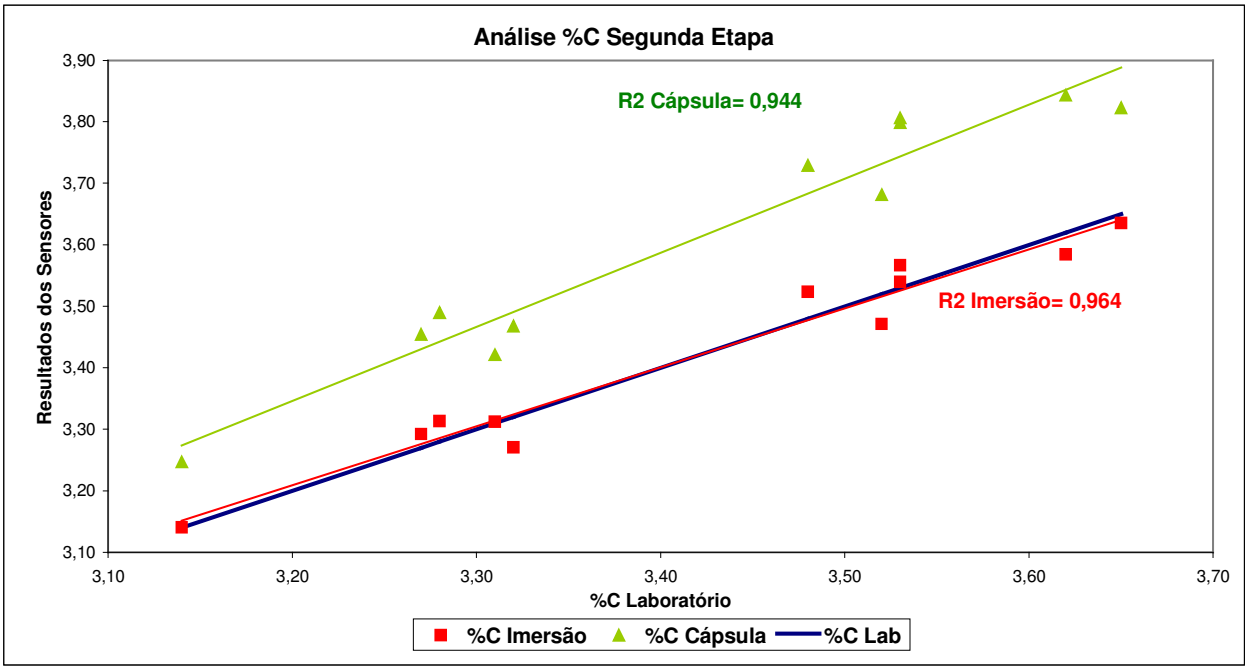


FIGURA 4.12 - Gráfico de análise dos resultados de %C, na Segunda Etapa.

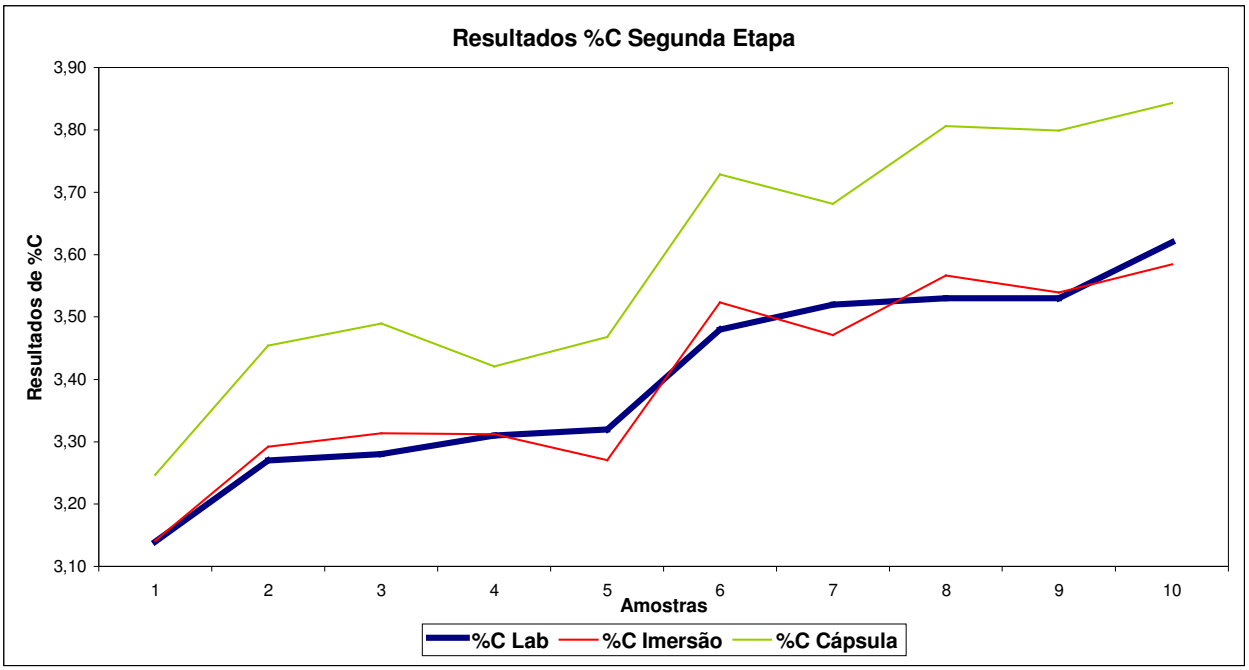


FIGURA 4.13 - Gráfico dos resultados de %C, na Segunda Etapa.

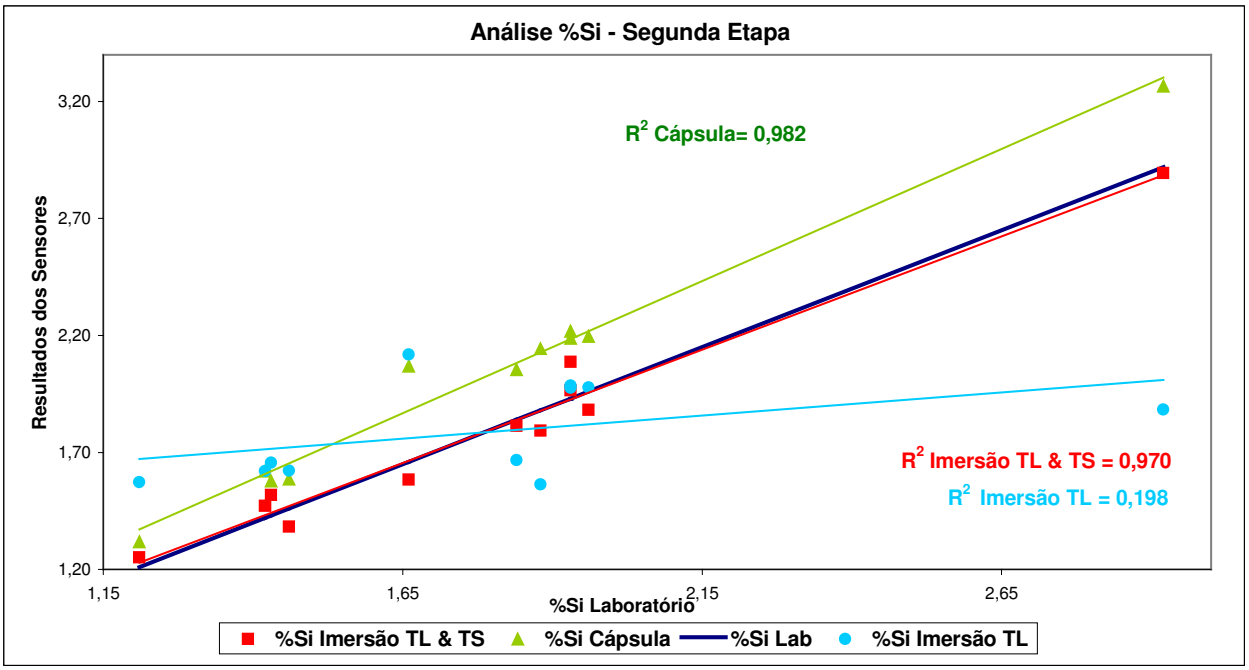


FIGURA 4.14 - Gráfico de análise dos resultados de %C, na Segunda Etapa.

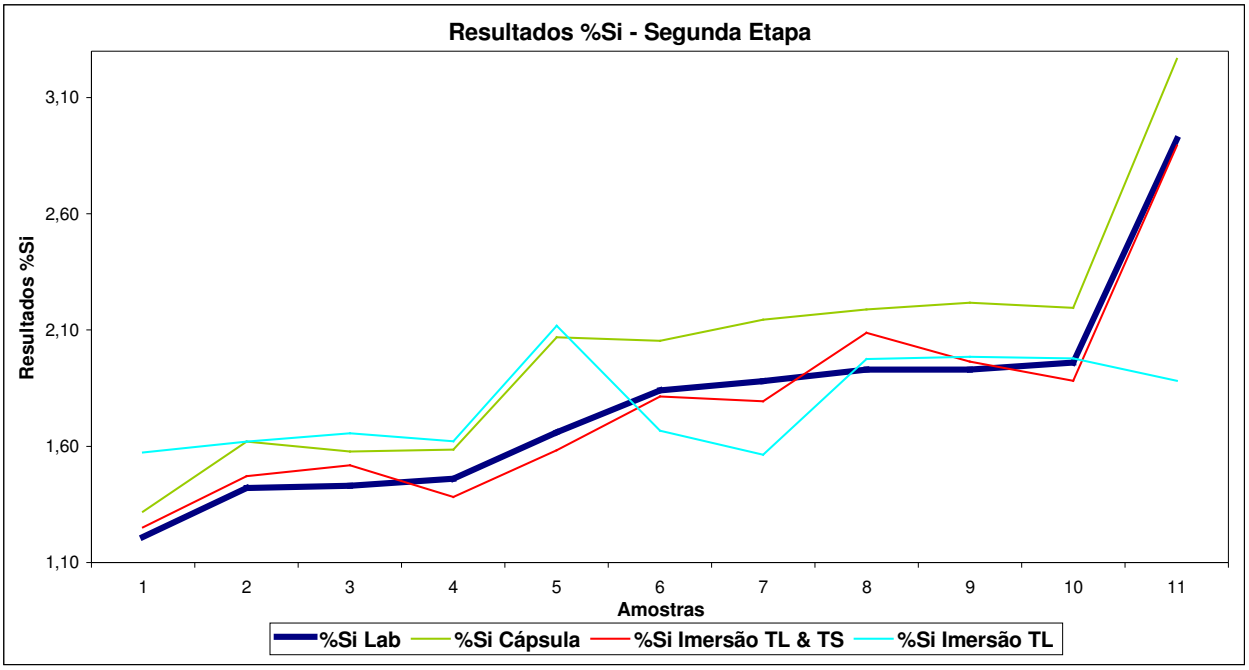


FIGURA 4.15 - Gráfico dos resultados de %C, na Segunda Etapa.

4.2.2.c. Terceira Etapa

Os dados coletados a partir de quarenta diferentes amostras são apresentados na Tabela 4.7

.

TABELA 4.7 - Dados coletados na Terceira Etapa.

	Análise Química				Cápsula					Sensor de Imersão					
	CE	C	Si	P	TL	TS	CE	C	Si	TL	TS	CE	C	Si (TL&TS)	Si (TL)
1	4,22	3,53	1,83	0,236	1165,6	1114,5	4,20	3,54	2,32	1156,2	1113,3	4,19	3,55	1,81	1,84
2	4,23	3,56	1,80	0,221	1167,8	1114,2	4,18	3,52	2,34	1160,7	1111,0	4,15	3,49	1,79	1,80
3	4,04	3,37	1,76	0,251	1182,7	1113,7	4,04	3,39	2,37	1176,4	1111,0	4,00	3,36	1,68	1,69
4	4,11	3,43	1,78	0,261	1184,4	1114,0	4,03	3,38	2,35	1179,0	1111,4	3,97	3,34	1,66	1,67
5	4,25	3,56	1,81	0,247	1166,3	1114,3	4,19	3,53	2,33	1163,5	1111,9	4,12	3,47	1,76	1,78
6	4,20	3,51	1,73	0,327	1164,5	1111,9	4,21	3,51	2,50	1160,6	1108,7	4,15	3,46	1,80	1,81
7	4,19	3,50	1,75	0,332	1166,4	1112,9	4,19	3,51	2,43	1158,8	1106,4	4,17	3,45	1,82	1,82
8	4,20	3,50	1,76	0,330	1161,5	1111,4	4,23	3,52	2,53	1154,9	1107,6	4,21	3,49	1,84	1,85
9	4,19	3,49	1,75	0,334	1161,0	1112,2	4,24	3,54	2,48	1150,7	1107,4	4,25	3,52	1,87	1,88
10	4,32	3,60	1,81	0,348	1157,4	1112,9	4,27	3,58	2,43	1143,8	1108,3	4,32	3,59	1,92	1,93
11	4,13	3,57	1,57	0,115	1166,6	1120,0	4,19	3,63	1,91	1166,7	1120,0	4,09	3,55	1,70	1,76
12	4,15	3,56	1,62	0,149	1166,1	1118,6	4,19	3,61	2,02	1161,6	1116,2	4,14	3,54	1,75	1,80
13	3,82	3,12	1,71	0,390	1205,9	1106,8	3,83	3,09	2,83	1200,3	1102,7	3,76	3,07	1,56	1,52
14	3,84	3,14	1,72	0,391	1206,0	1107,1	3,83	3,09	2,82	1199,4	1105,0	3,77	3,10	1,56	1,53
15	4,25	3,43	1,89	0,579	1161,7	1101,0	4,23	3,34	3,19	1151,9	1096,5	4,24	3,38	1,93	1,87
16	4,20	3,37	1,89	0,588	1160,4	1101,0	4,24	3,35	3,19	1154,5	1101,1	4,21	3,42	1,88	1,85
17	4,23	3,37	1,90	0,688	1156,7	1097,5	4,28	3,32	3,39	1147,0	1094,5	4,28	3,40	1,97	1,90
18	4,22	3,37	1,88	0,676	1156,7	1097,5	4,28	3,32	3,39	1149,2	1096,1	4,26	3,40	1,95	1,89
19	4,19	3,33	1,90	0,671	1156,7	1097,5	4,28	3,32	3,39	1157,8	1095,3	4,18	3,32	1,89	1,83
20	4,23	3,36	1,92	0,696	1158,0	1097,4	4,26	3,31	3,40	1149,9	1091,2	4,26	3,34	1,97	1,88
21	3,33	2,84	1,15	0,315	1250,5	1114,7	3,43	2,87	2,30	1247,6	1112,8	3,30	2,81	1,19	1,18
22	3,29	2,80	1,15	0,328	1250,9	1114,3	3,43	2,86	2,33	1243,1	1111,8	3,34	2,83	1,22	1,21
23	3,28	2,79	1,15	0,324	1249,9	1114,9	3,43	2,88	2,29	1246,2	1107,7	3,31	2,76	1,22	1,19
24	3,27	2,78	1,14	0,324	1251,8	1114,5	3,42	2,85	2,32	1250,2	1111,3	3,27	2,77	1,18	1,16
25	3,28	2,79	1,13	0,318	1255,3	1114,7	3,39	2,83	2,30	1247,5	1111,9	3,30	2,80	1,19	1,18
26	4,14	3,44	1,86	0,220	1168,4	1113,5	4,17	3,50	2,39	1161,8	1109,1	4,14	3,46	1,79	1,80
27	3,79	3,00	1,92	0,449	1197,1	1101,1	3,91	3,06	3,18	1192,1	1097,2	3,84	3,07	1,65	1,58
28	4,05	3,37	1,83	0,216	1170,4	1113,6	4,15	3,49	2,38	1163,7	1109,8	4,12	3,45	1,77	1,78
29	4,04	3,38	1,77	0,218	1172,9	1113,5	4,13	3,47	2,39	1165,0	1111,0	4,11	3,45	1,76	1,77
30	4,06	3,38	1,81	0,219	1172,7	1113,5	4,13	3,47	2,39	1167,0	1111,4	4,09	3,44	1,74	1,76
31	4,06	3,38	1,83	0,221	1173,1	1114,0	4,13	3,47	2,35	1166,9	1111,4	4,09	3,44	1,74	1,76
32	3,75	3,17	1,53	0,224	1203,9	1116,7	3,85	3,27	2,16	1200,2	1114,4	3,76	3,21	1,50	1,52
33	3,76	3,17	1,52	0,234	1202,5	1116,4	3,86	3,28	2,18	1200,6	1115,8	3,76	3,22	1,49	1,52
34	4,13	3,31	1,92	0,549	1166,9	1101,0	4,18	3,30	3,19	1160,7	1096,2	4,15	3,31	1,87	1,80
35	3,87	3,26	1,60	0,246	1200,8	1115,6	3,88	3,28	2,24	1198,0	1113,1	3,78	3,21	1,52	1,54
36	4,15	3,47	1,82	0,242	1169,7	1113,6	4,16	3,49	2,38	1163,8	1110,7	4,12	3,46	1,77	1,78
37	3,79	3,21	1,51	0,228	1200,2	1117,0	3,88	3,31	2,14	1195,5	1113,3	3,81	3,23	1,54	1,56
38	3,82	3,24	1,51	0,233	1199,6	1116,8	3,89	3,31	2,15	1196,3	1117,5	3,80	3,28	1,51	1,55
39	3,81	3,23	1,51	0,234	1200,1	1116,9	3,88	3,31	2,14	1193,9	1113,7	3,82	3,25	1,55	1,57
40	4,23	3,53	1,85	0,245	1159,9	1116,0	4,25	3,61	2,21	1156,9	1108,0	4,19	3,48	1,83	1,83

Os resultados obtidos nesta etapa são apresentados na Tabela 4.8 .

TABELA 4.8 - Resumo dos resultados obtidos, na Terceira Etapa.

	%CE		%C		%Si		
Dados	**CAP**	**IM**	**CAP**	**IM**	**CAP**	**IM (TL)**	**IM (TL&TS)**
Coeficiente da Regressão Linear	0,98	0,98	0,94	0,97	0,25	0,88	0,91
Média das diferenças entre sensores e Laboratório	-0,05	0,00	-0,02	0,00	-0,93	0,00	0,00
Desvio padrão das diferenças entre sensores e Laboratório	0,06	0,05	0,05	0,04	0,35	0,08	0,07
Maior diferença negativa entre laboratório e sensores	-0,16	-0,08	-0,10	-0,08	-1,60	-0,19	-0,13
Maior diferença positiva entre laboratório e sensores	0,06	0,13	0,10	0,09	-0,45	0,19	0,16

Equações obtidas com as regressões:

$$\mathbf{\%CE} = 15{,}559568 + [T_L \,.\, (-0{,}009830)] \tag{4.15}$$

$$\mathbf{\%C} = -0{,}410325 + [T_L \,.\, (-0{,}008057) + T_S \,.\, 0{,}011925] \tag{4.16}$$

$$\mathbf{\%Si}_{f(liquidus\ e\ solidus)} = 15{,}666400 + [T_L \,.\, (-0{,}006809) + T_S \,.\, (-0{,}005379)] \tag{4.17}$$

$$\mathbf{\%Si}_{f(liquidus)} = 10{,}122075 + [T_L \,.\, (-0{,}007166)] \tag{4.18}$$

Os resultados obtidos nesta etapa são apresentados nas Figuras 4.16 a 4.21 .

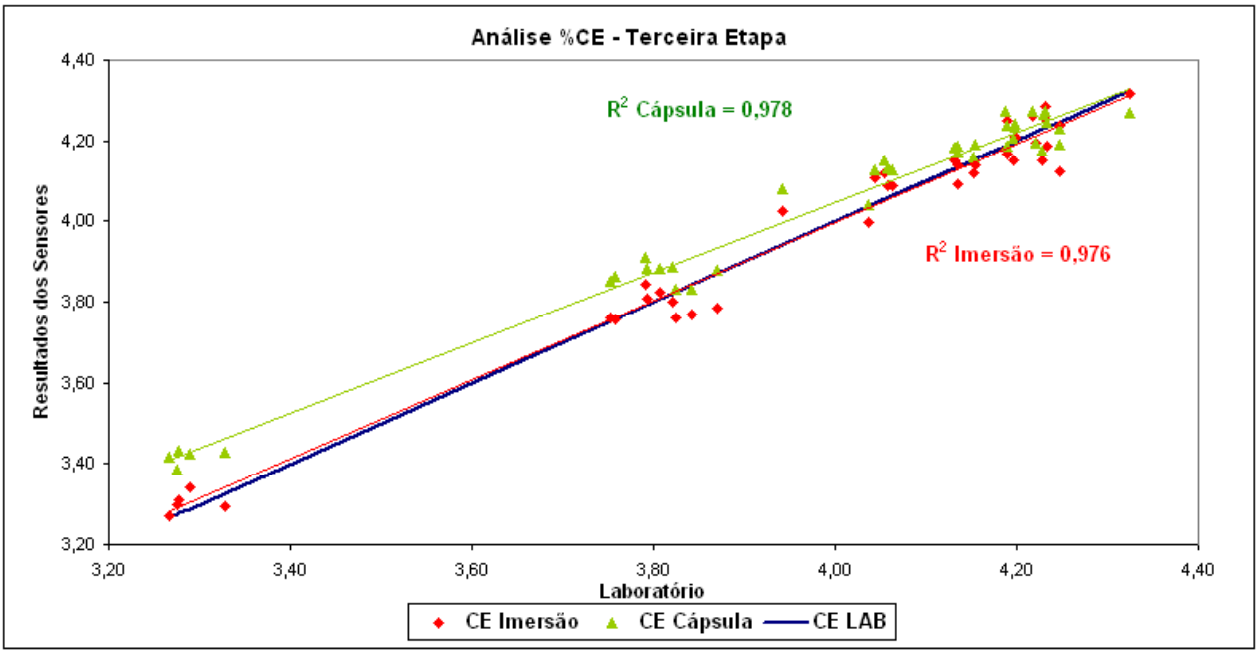


FIGURA 4.16 - Gráfico de análise dos resultados de %CE, na Terceira Etapa.

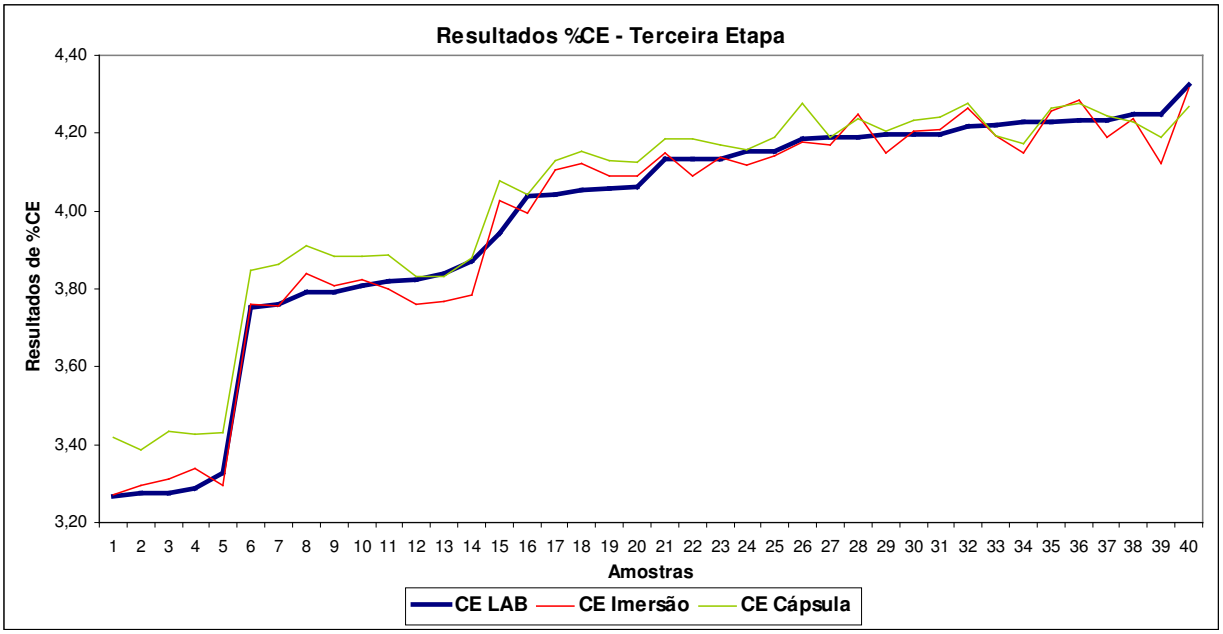


FIGURA 4.17 - Gráfico dos resultados de %CE, na Terceira Etapa.

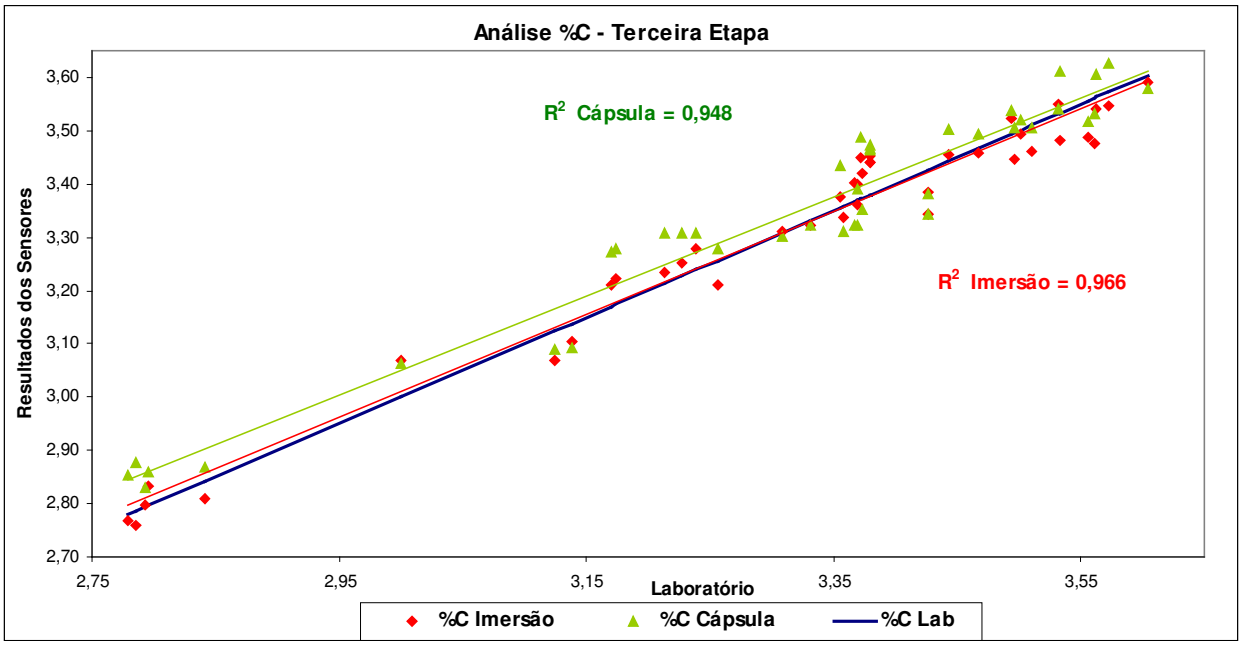


FIGURA 4.18 - Gráfico de análise dos resultados de %C, na Terceira Etapa.

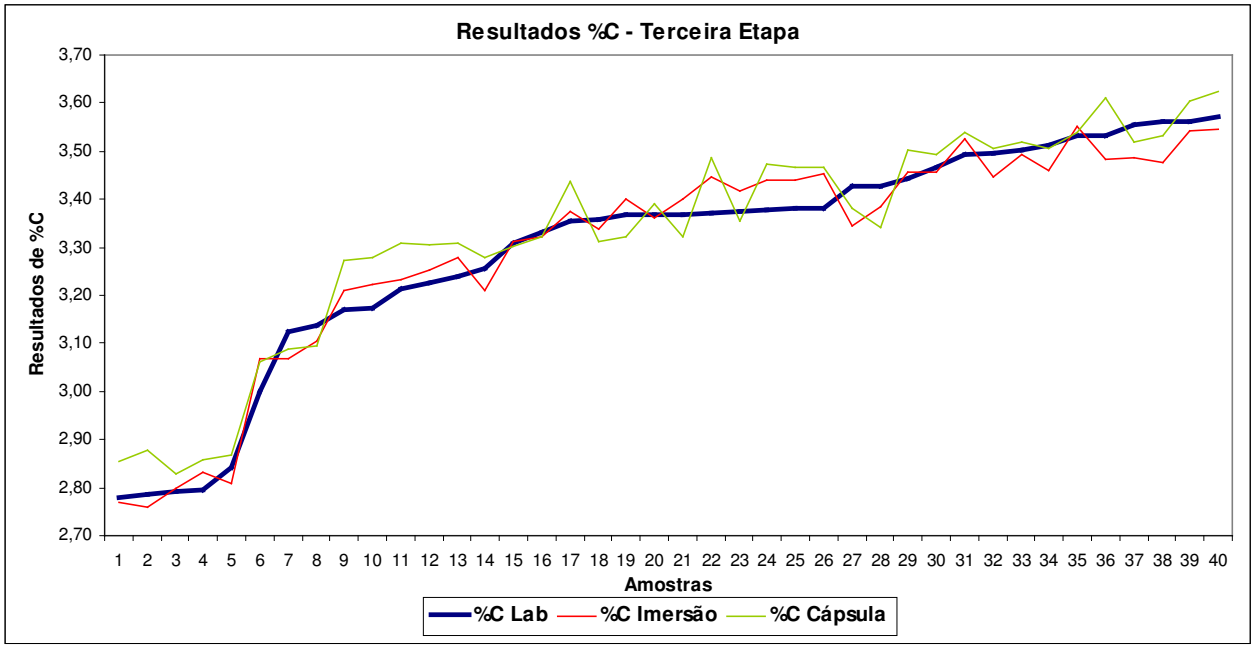


FIGURA 4.19 - Gráfico dos resultados de %C, na Terceira Etapa.

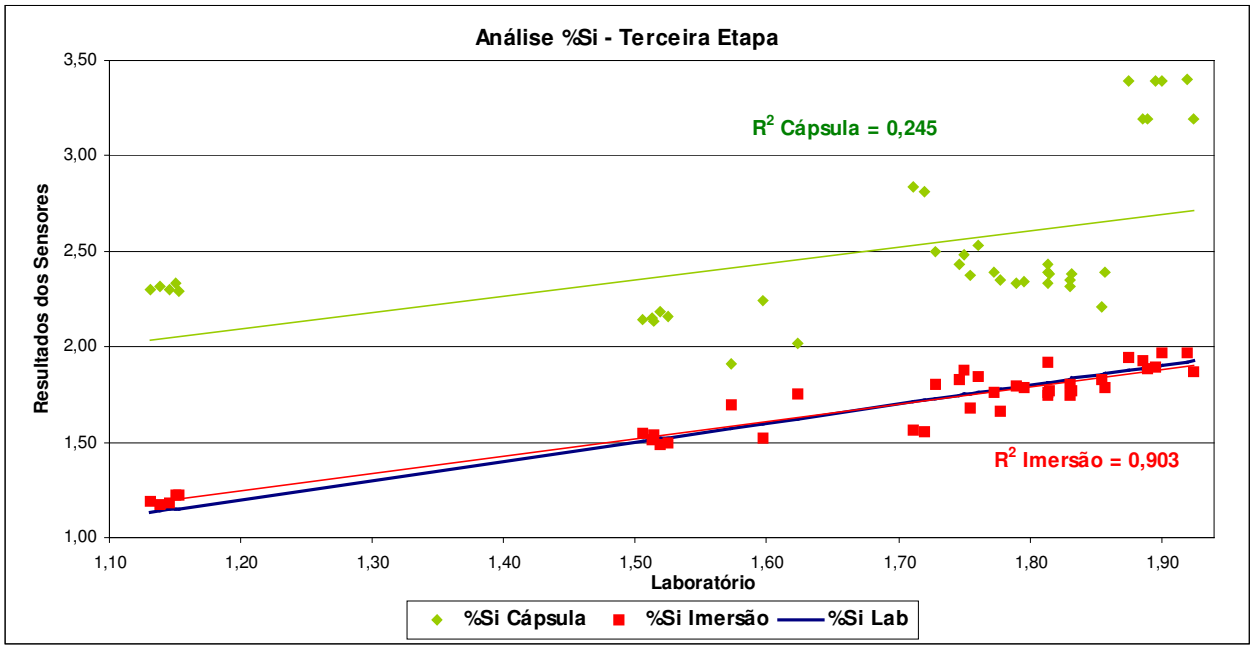


FIGURA 4.20 - Gráfico de análise dos resultados de %Si, na Terceira Etapa.

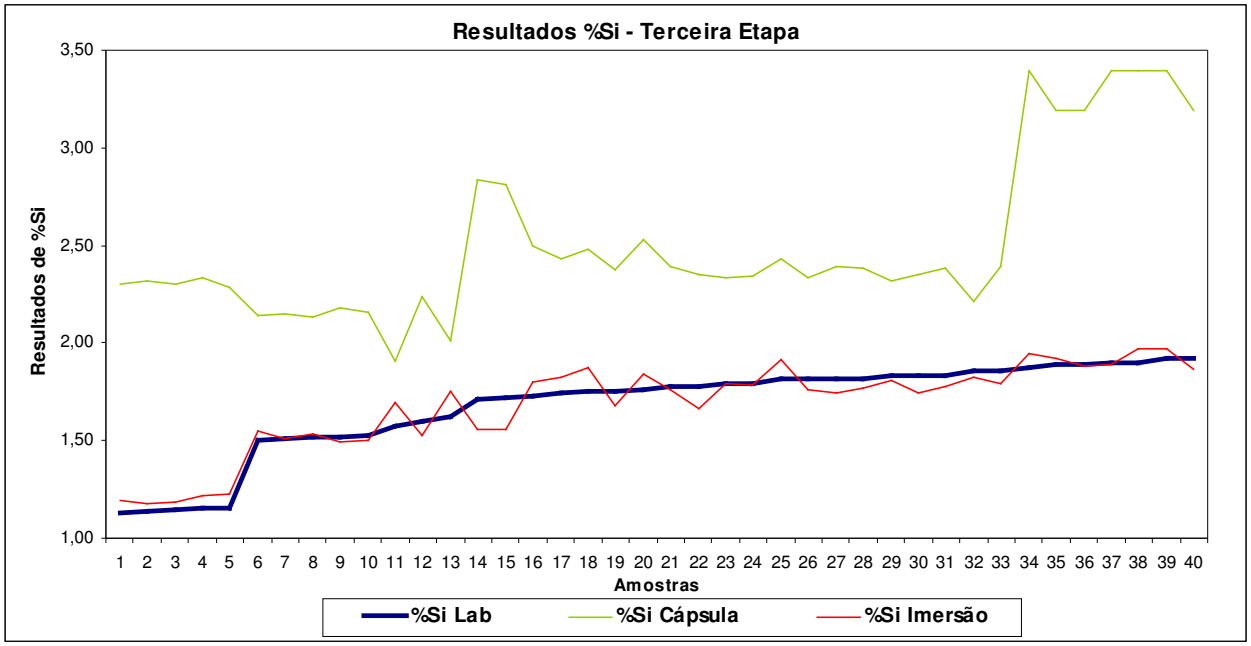


FIGURA 4.21 - Gráfico dos resultados de %Si, na Terceira Etapa.

4.3. CURVAS DE RESFRIAMENTOS

Foram realizadas comparações entre o resfriamento do sensor de imersão e a cápsula. Os gráficos com resultados dessas comparações, são apresentados nas Figuras 4.22 a 4.25 .

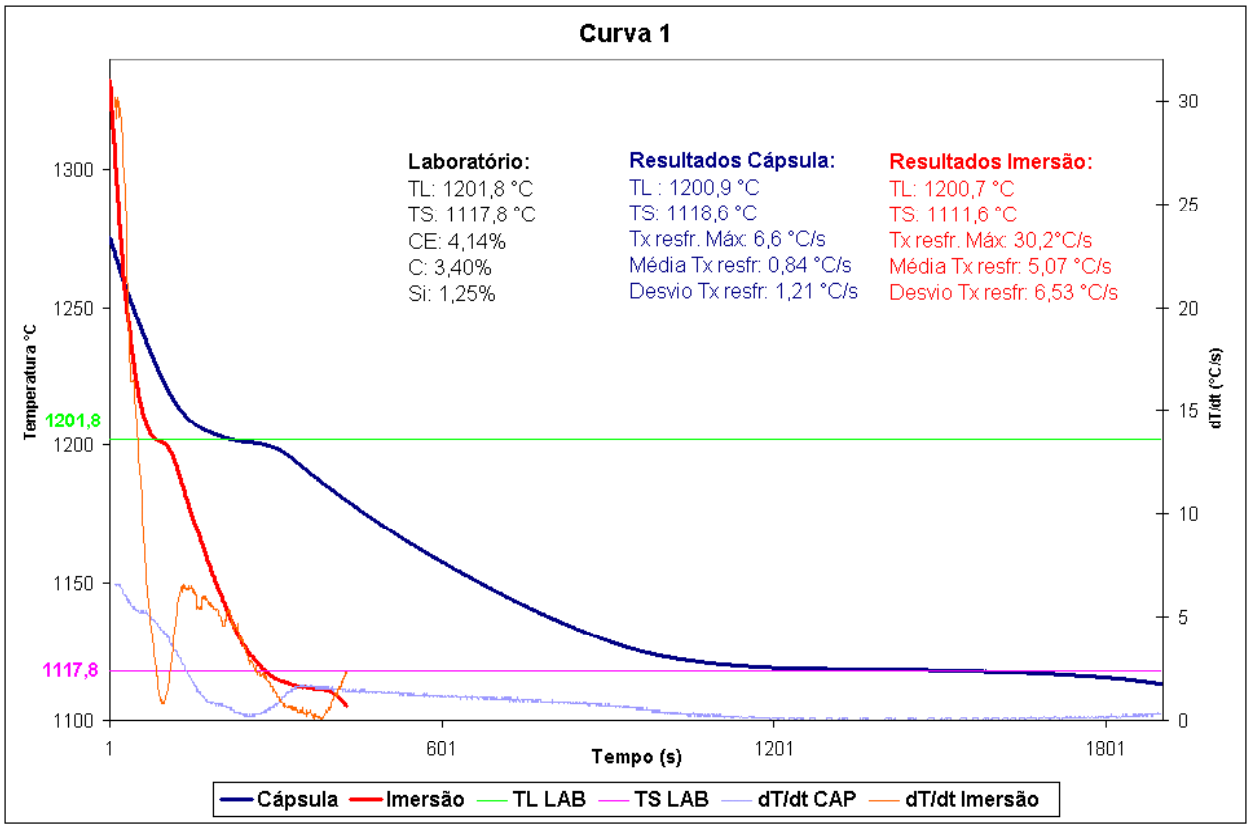


FIGURA 4.22 – Curva de resfriamento comparativa Cápsula x Imersão, exemplo 1.

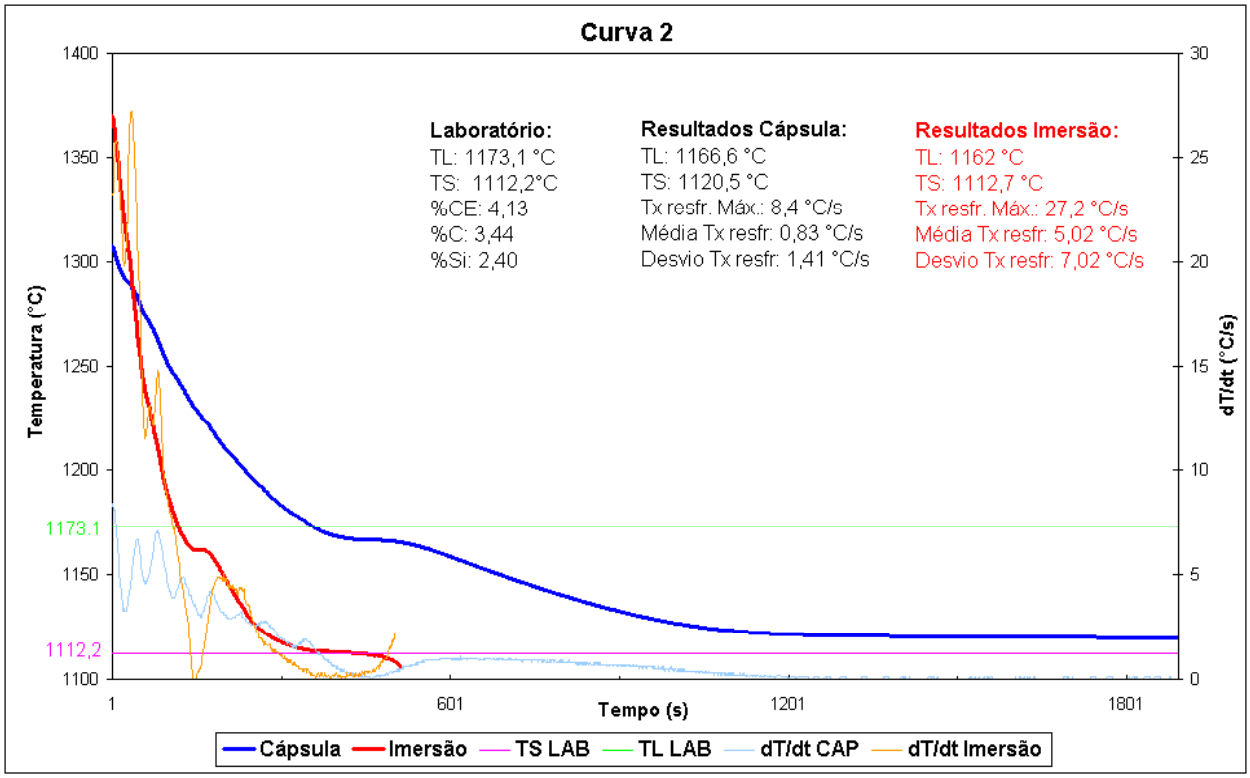


FIGURA 4.23 – Curva de resfriamento comparativa Cápsula x Imersão, exemplo 2.

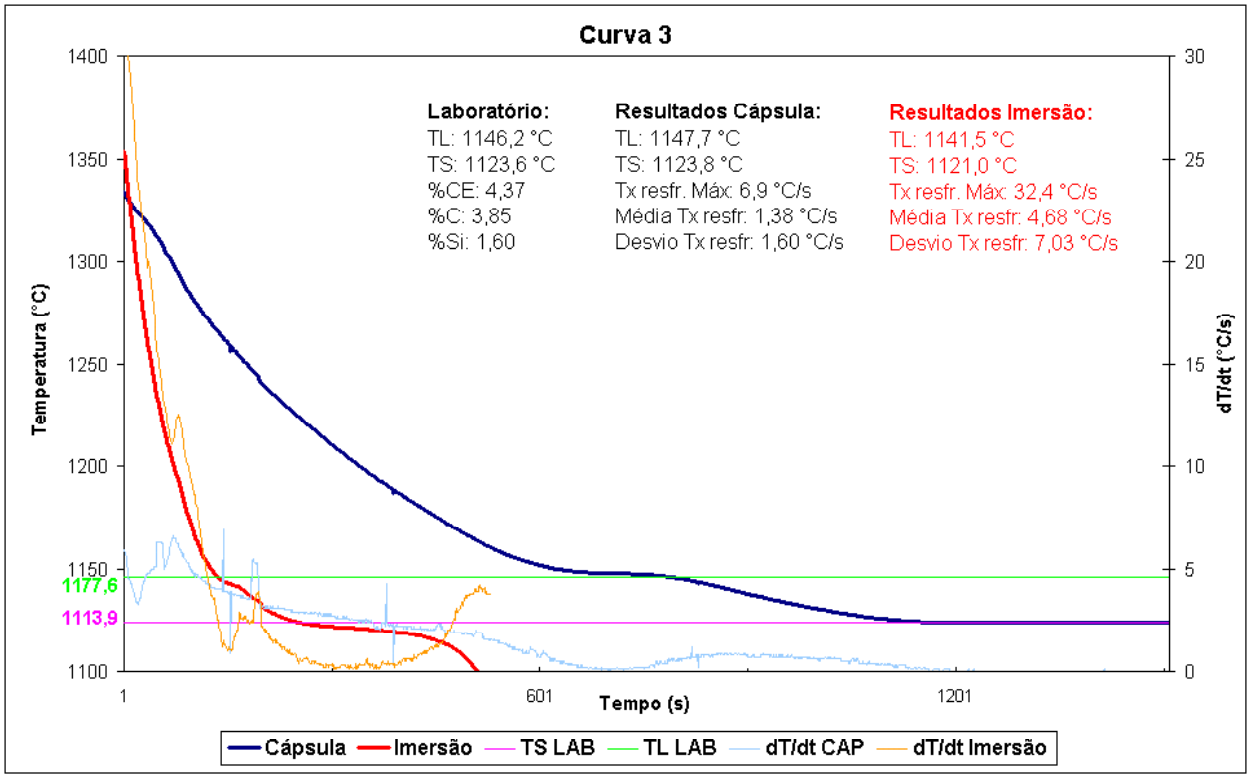


FIGURA 4.24 – Curva de resfriamento comparativa Cápsula x Imersão, exemplo 3.

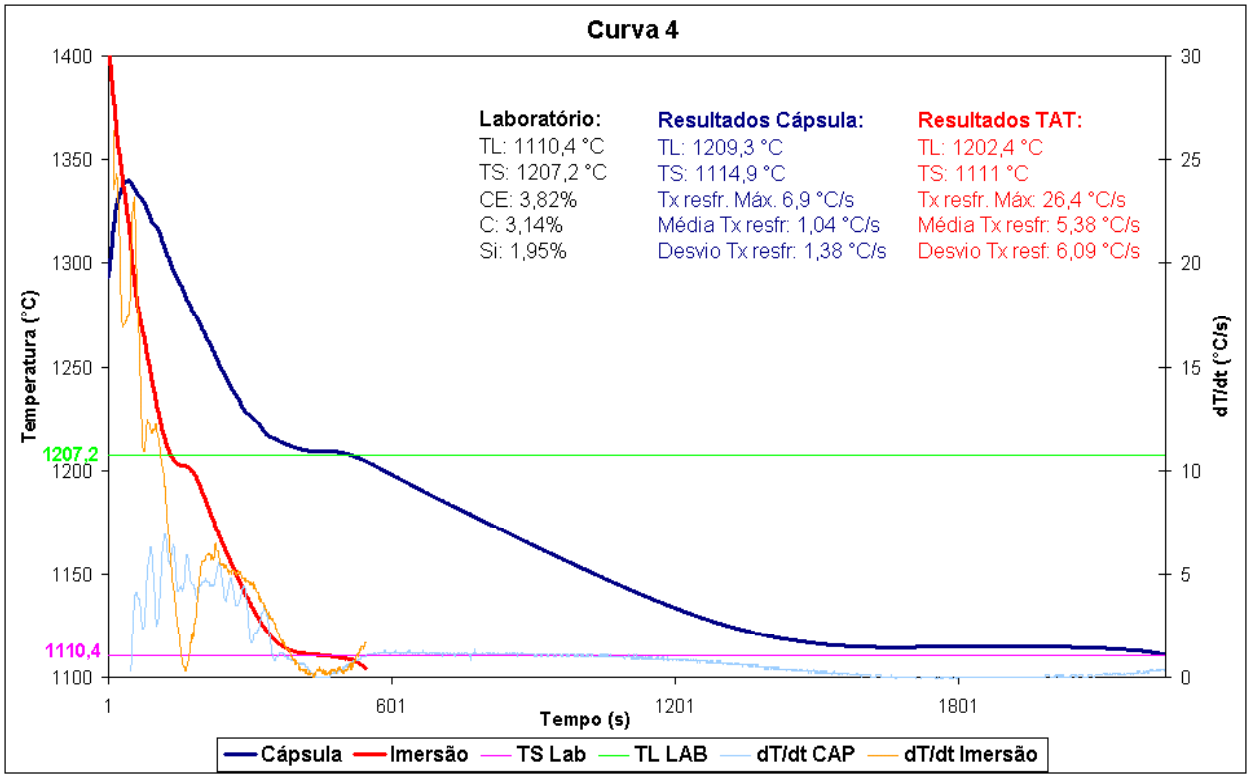


FIGURA 4.25 – Curva de resfriamento comparativa Cápsula x Imersão, exemplo 4.

4.4. ANÁLISES DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.4.1. ANÁLISE QUÍMICA PELA ANÁLISE TÉRMICA

4.4.1.a- Quanto à determinação dos teores de %CE e C:

- Os valores do coeficiente de regressão linear (R^2) apresentados pelo sensor de imersão, foram iguais ou melhores que os valores obtidos pela cápsula. *A única exceção foi o valor de R^2 para a %C na segunda etapa, porém o valor é muito próximo (-0,02).*

- As médias das diferenças entre o sensor de imersão e os resultados do laboratório sempre tenderam a zero.

- Os desvios-padrão das diferenças entre os resultados do novo sensor e os do laboratório foram sempre menores para o sensor de imersão face aos resultados levantados pela cápsula. *A exceção foi o valor de desvio-padrão para a %C na segunda etapa, porém os valores também são próximos (0 e 0,03).*

- As amplitudes dos desvios em relação ao laboratório foram menores para o sensor de imersão.

4.4.1.b- Quanto à determinação do teor de %Si:

- O valor do R^2 apresentado pela cápsula na primeira etapa foi melhor que o sensor de imersão. Na segunda etapa, a cápsula foi melhor para a análise tradicional (utilizando apenas o valor de temperatura *liquidus*), e igual para a análise utilizando as temperaturas *liquidus* e *solidus*. Porém, na terceira etapa, os valores apresentados pelo sensor de imersão foram muito melhores que os valores da cápsula.

- As médias das diferenças entre o sensor de imersão e os resultados do laboratório, sempre tenderam a zero.

- Os desvios-padrão das diferenças entre os valores obtidos pelo sensor e os resultados de laboratório, foram iguais ou menores para o sensor de imersão comparativamente aos mesmos resultados da cápsula. *A única exceção foi o valor de desvio-padrão para a análise utilizando-se apenas a temperatura liquidus, na segunda etapa.*

- As amplitudes dos desvios em relação aos resultados de laboratório foram menores para o sensor de imersão. *A exceção foi a diferença apresentada pela análise utilizando-se apenas a temperatura liquidus, na segunda etapa.*

4.4.1.c- Observações:

- Nos gráficos pode-se notar que os resultados resultantes de medidas com o sensor por imersão estão mais próximos ou mais coerentes em relação ao laboratório.

- Os resultados de %Si melhoram muito para o sensor de imersão, quando são utilizados os valores das temperaturas *liquidus* e *solidus*, para fazer a regressão linear. Este fato pode ser devido à alta taxa de resfriamento típico desse sensor, o que não permite formar um patamar de temperatura *liquidus* definido, como na cápsula.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

A análise dos resultados experimentais obtidos em diferentes ambientes industriais de produção de componentes de ferro fundido e em distintas operações de produção, e também no dispositivo de solidificação unidirecional com molde maciço de aço carbono, e as correlações e comparações realizadas, permitem que sejam extraídas as seguintes conclusões:

5.1.1 – Os ensaios preliminares com o sensor térmico de imersão desenvolvido no presente trabalho e aplicado na análise de teores de Carbono Equivalente (CE), carbono e silício em amostras de ferro fundidos cinzento e nodular, apresentam um bom desempenho quando comparado com resultados de análise por espectroscopia de emissão óptica e ótima reprodutibilidade. Esses ensaios geraram as seguintes equações experimentais:

Ferros fundidos cinzentos:

$$\%CE = (-0{,}009928.T_L) + 15{,}82209 \;;$$

$$\%C = [(-0{,}006520.T_L) + (0{,}00218 \,.\, T_S) + 8{,}71568] \;;$$

$$\%Si = (CE - C) \,.\, 2{,}9213;$$

com a seguinte a composição química básica:

%CE	%C	%Si	%P
3,70	3,18	1,51	0,039
4,08	3,45	1,85	0,047

Ferros fundidos nodulares:

%CE = (-0,007019 . T_L) + 12,3615;

%C = [(-0,007457 . T_L) + (0,004395 . T_S) + 7,49729] ;

%Si = (CE - C) . 2,8811;

com a seguinte composição química básica:

%CE	%C	%Si	%P
4,06	3,62	0,99	0,032
4,27	3,87	1,45	0,049

5.1.2 – Os ensaios comparativos geraram as seguintes equações:

a. Primeira etapa (Fundição I):

%CE = 10,342441 + [T_L . (-0,0054568)] ;

%C = 13,787887 + [T_L . (-0,006186)] + [T_S . (-0,002924)] ;

%Si $_{f(liquidus)}$ = 1,505919 + (T_L . 0,002889) ;

%Si $_{f(liquidus\ e\ solidus)}$ = 1,30477 + [T_L . (-0,002986)] + [T_S . (-0,002630)]

em ferros fundidos com a seguinte composição química:

Variação	CE	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Mínimo	3,79	3,10	1,86	0,400	0,080	0,011	0,025	0,001	0,030
Máximo	3,95	3,30	1,99	0,550	0,100	0,020	0,050	0,100	0,065
Variação	Al	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	Mg	B
Mínimo									
Máximo	0,005	0,57	0,01	0,01	0,01	0,0001	0,005	0,001	-

b. Segunda etapa (Fundição II):

%CE = 9,079876 + [T_L . (-0,004356)] ;

%C = -1,275834 + [T_L . (-0,006891)] + (T_S . 0,011351) ;

%Si $_{f(liquidus)}$ = -12,720558 + (T_L . 0,012559) ;

%Si $_{f(liquidus\ e\ solidus)}$ = 55,03223041 + (T_L . 0,005093201) + [T_S . (-0,053028711)]

em ferros fundidos com a seguinte composição química:

Variação	CE	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Mínimo	3,90	3,16	1,21	0,060	0,0827	0,011	0,010	0,001	0,001
Máximo	4,17	3,65	2,89	0,841	0,1120	0,020	0,025	0,017	0,004
Variação	Al	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	Mg	B
Mínimo		0,014	0,0110	0,0083			0,0005		0,0007
Máximo	0,005	0,577	0,0135	0,0124	0,01	0,0001	0,0313	0,001	0,0009

c. Terceira etapa (Fundição III):

$$\%CE = 15{,}559568 + (T_L \,.\, -0{,}009830)$$

$$\%C = -0{,}410325 + (T_L \,.\, -0{,}008057) + (T_S \,.\, 0{,}011925)$$

$$\%Si_{f(liquidus\ e\ solidus)} = 15{,}666400 + (T_L \,.\, -0{,}006809) + (T_S \,.\, -0{,}005379)$$

$$\%Si_{f(liquidus)} = 10{,}122075 + (T_L \,.\, -0{,}007166)$$

Em ferros fundidos com a composição química, conforme tabela a seguir:

Variação	CE	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
Mínimo	3,27	2,779	1,131	0,462	0,115	0,032	0,329	0,215	0,02	0,013
Máximo	4,44	3,767	1,937	0,796	0,696	0,102	1,184	0,342	0,054	0,324
Variação	Ti	Sn	V	Al	Mg	Nb	B	W	Pb	Fe
Mínimo	0,009	0,007	0,009	0,004	0	0,006	0,002	0,008	0,023	91,91
Máximo	0,031	0,021	0,015	0,24	0,001	0,012	0,005	0,014	0,221	94,57

5.1.3- A análise comparativa desenvolvida entre resultados obtidos pelo sensor de imersão e o sensor tipo cápsula, tradicionalmente utilizado em indústrias de fundição, evidencia que na grande maioria das situações analisadas os resultados obtidos pelo sensor de imersão, tanto para teores de CE, carbono ou silício, são mais próximos aos determinados por espectroscopia de emissão óptica, o que atesta a confiabilidade do sensor desenvolvido.

5.1.4- Os resultados de %Si melhoram consideravelmente (conforme apresentado nas tabelas 4.4, 4.6 e 4.8) para o sensor de imersão, quando são usados ambos os valores das temperaturas de transformação, T_L e T_S, para fazer a regressão linear. Este fato é decorrente das taxas de resfriamento mais rápidas típicas desse sensor, quando comparadas àquelas observadas em análises com a cápsula-padrão.

5.1.5- O tempo de análise do sensor por imersão é aproximadamente quatro vezes mais rápido que o tempo da cápsula sensora. Isso propicia:

- maior rapidez na obtenção de resultados e conseqüente economia de energia elétrica; e
- menor tempo de exposição do operador ao calor e radiação do forno de fusão.

5.1.6- O método utilizado para a determinação dos coeficientes de transferência de calor metal/molde, h_i, e molde/ambiente, h_{amb}, em função do tempo, e que utiliza o confronto teórico experimental de perfis de temperatura, demonstra ser confiável e resulta nas seguintes equações experimentais para a solidificação de um ferro fundido hipoeutético em coquilha de aço-carbono:

$$h_{amb} = 3{,}75(t)^{+0{,}337}$$

$$h_i = 3.600(t)^{-0{,}005}$$

onde t [s] e h [$Wm^{-2}K^{-1}$].

Cabe ressaltar a importância da determinação destes coeficientes para a solidificação de ferros fundidos em coquilhas, que até então eram inexistentes na literatura. A disponibilização desses coeficientes permite a simulação de variáveis térmicas na solidificação dos ferros fundidos, possibilitando o aprofundamento de correlações entre essas variáveis e a estrutura final de solidificação e, consequentemente, com as características mecânicas finais do componente fundido.

5.1.7- A análise térmica desenvolvida no dispositivo de solidificação unidirecional permite ainda a determinação dos perfis de taxas de resfriamento à frente da isoterma *liquidus*, que é uma importante variável térmica de solidificação e que permite que possam ser estabelecidas correlações com a microestrutura decorrente.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.2.1- Existem na literatura diversos trabalhos que correlacionam características das curvas de resfriamento, com propriedades físicas do ferro fundido tais como: intensidade de nucleação, esferoidização, determinação da nodularidade, previsão da forma da grafita e outras. Todos esses trabalhos foram realizados utilizando cápsulas de análise. Sugere-se realizar estes estudos, utilizando o sensor por imersão.

5.2.2- Desenvolver estudos experimentais de análise térmica para caracterização da evolução térmica na solidificação de diferentes tipos de ferros-fundidos e composições químicas de interesse industrial.

5.2.3- Determinar os perfis transitórios de transferência de calor molde/ambiente (h_{amb}) e metal/molde (h_i) para aquelas composições utilizadas em peças coquilhadas.

5.2.4- Realizar simulações numéricas para o levantamento de perfis das taxas de resfriamento em peças de ferro fundido coquilhadas e desenvolver correlações entre essas taxas e características microestruturais, como por exemplo, a forma e distribuição de veios e nódulos de grafita.

5.2.5- Desenvolver um estudo teórico/experimental sobre a profundidade da camada de ferro fundido branco induzida por efeito de coquilhamento e as taxas de resfriamento numericamente determinadas a partir de valores experimentais de h_i e h_{amb}.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6589**: Peças em ferro fundido cinzento classificadas conforme a resistência à tração. São Paulo, 1986.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A 247**: Rec.Pratice for evaluating the microstructure of graphite in gray iron. Philadelphia, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A 48**: Standard Specification for Gray Iron Castings. Philadelphia, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **STP 470B**: Manual on the use of thermocouples in temperature measurement. Philadelphia, 1980. p.258.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A 247**: Rec.Pratice for evaluating the microstructure of graphite in gray iron. Philadelphia, 2006.

BACKERUD, L.; NILSSON, K.; STEEN, H. Study of nucleation and growth of graphite in magnesium-treated cast iron by means of thermal analysis; **Metallurgy of Cast Iron**, 1974, p. 625-637.

BURNS, G. W. et al. Temperature- Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90. National Institute of Standards. and Technology, **Monograph 175** (1993) US Government Printing Office, Washington, DC.

CABRAL, P. Breve História da Medição de Temperaturas. **Qualiatria**, Portugal, n. 24, Jan/Mar. 1995. Disponível em: http://www.help-temperatura.com.br/html/interesse/files/Historia MedicaoTemperatura.PDF. Acesso em 24.08.2006.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª ed. São Paulo: ABM, 2005. 518 p.

DAYONG LI et al. New method for rapid evaluation of spheroidisation and inoculation grade of hypereutectic cast iron; **International Journal of Cast Metals Research**, 2004, v. 17, n. 3, p.152-156.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. v. **DIN 1691**: Flake graphite cast iron (grey cast iron). General information on the selection of material and design. Guide values of mechanical and physical properties. Berlim, 1985.

DIÓSZEGI, A.; SVENSSON, I. L. On the Problem of Thermal Analysis of Solidification. **Materials Science and Engineering A**, v. 413-414, pp. 474-479, 2005.

DOEPP, R., SCHWENKEL S. Contribution to the influence of chemical composition and cooling conditions on the eutectic solidification range of Fe–C–X-melts. **Materials Science and Engineering A**, v. 413–414, pp. 334–338, 2005.

DURAN, P.V. **Emprego de analise térmica na solidificação de ferros fundidos**. 1985. 86p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DURAN, P.V.; CASTELLO BRANCO, C.H.; KRAUSE, W. Correlação entre as curvas de resfriamento de análise térmica e a intensidade de nucleação de ferros fundidos nodulares hipereutéticos. **Metalurgia ABM**, v. 35(265), p. 839-843, Dez. 1979.

ECIL MET TEC LTDA., Piedade-SP. Jorge Ayrton da Silva, Djalma Domingues do Amaral e Artur Hess Junior. **Sensor de imersão descartável**. BR n. PI 0405278-1, 29 nov.2004.

ECIL PRODUTOS E SISTEMAS DE MEDIÇÃO E CONTROLE. Catálogo de Pirometria. Piedade, SP, 2002. 100p.

ECIL S.A. **Curso de Termometria**. São Paulo, 1979. 45p.

FERREIRA, I.L.; SPINELLI, J. E ; GARCIA, A. The Effect of Melt Temperature Profile on the Transient Metal/Mold Heat Transfer Coefficient During Solidification. **Materials Science and Engineering A**, v. 408, pp. 317-325, 2005.

FREDRIKSSON, H. Interpretation and Use of Cooling Curves (Thermal Analysis), **ASM Casting- Metals Handbook**, v.15, pp. 182-185, 1988.

FREIRE, L.A.C.; MARQUES, N.C.P. Evolução da análise térmica em ferros fundidos. **FMP Guia de Equipamentos e Insumos**, p. 77-85, Out. 1987.

FUOCO, R. et al. Interpretação de curvas de análise térmica de ferros fundidos com grafita vermicular; **Fundição & Matérias-Primas**, Jun/Jul/2000, Caderno Técnico pag.A-P.

FUOCO, R. et al. Otimização do uso de inoculantes em ferros fundidos cinzentos utilizando análise térmica, **CONAF 2005**, 2005.

GARCIA, A **Solidificação: Fundamentos e Aplicações**. Campinas –SP: Editora da UNICAMP, 2001, 399p.

HEINE, R. W; LOPER, C. R. On dendrites and eutetic cells in gray iron. **Modern Castings**. v. 56 (4): p. 185-191, Out 1969.

HEISSER, C., STURM, J. C. Casting Process Simulation of Compacted Graphite Iron. **AFS Transactions.** 2003. Paper 03-325.

HUMPHREYS, J. G. Effect of composition on the *liquidus* and eutectic temperatures and on the eutectic point of cast irons. **BCIRA Journal**, v. 9, p. 609-621, September 1961.

LOPER JR, C.R.; HEINE, R.W.; CHAUDARI, M.D. Thermal analysis for structure control; **Metallurgy of Cast Iron**, 1974, p. 639-653.

MARQUARD, R.; SORGER, H.; Mc DONALD, M. Crank it up: new materials create new possibilities. **Engine Technology International**, v.2, p. 58-60, 1998.

MOORE, A. Measurement of carbon equivalent *liquidus* value in hypereutectic flake graphite irons. **BCIRA Journal**, v. 19, p. 231-237, May 1971.

MÜLLER, A. **Solidificação e análise térmica dos metais**. Porto Alegre–RS: Editora da UFRGS, 2002, 278p.

OLAH, A.; SANTANA, P.; BERNARDINI, P. A. N. Avaliação de algumas variáveis do processo de nodularização "tampa intermediária". **Metalurgia-ABM**, v. 42(246), p. 515-520, 1986.

PEHLKE, R.D., JEYARAJAN, A., WADA, H. **Summary of Thermal Properties for Casting Alloys and Mold Materials**, The University of Michigan, December, 1982

POWER, R.L. et al. Thermocouple reference tables based on the IPTS 68. National. Bureau of Standards (US) **Monograph 125**. March, 1974. 410 p.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE J431**: Automotive Gray Iron Castings. Detroit, 2000.

SOUZA JUNIOR, R; PINOTTI JUNIOR, M. Novo Procedimento de Análise Térmica Aplicada à Determinação da Composição dos ferros fundidos. In CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS, 1994, São Paulo. **Anais**...São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1995. v. 3. p. 513-517.

SOUZA SANTOS, A.B.; CASTELLO BRANCO, C.H. **Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares.** 3 ed. São Paulo: IPT, 1989. 206 p.

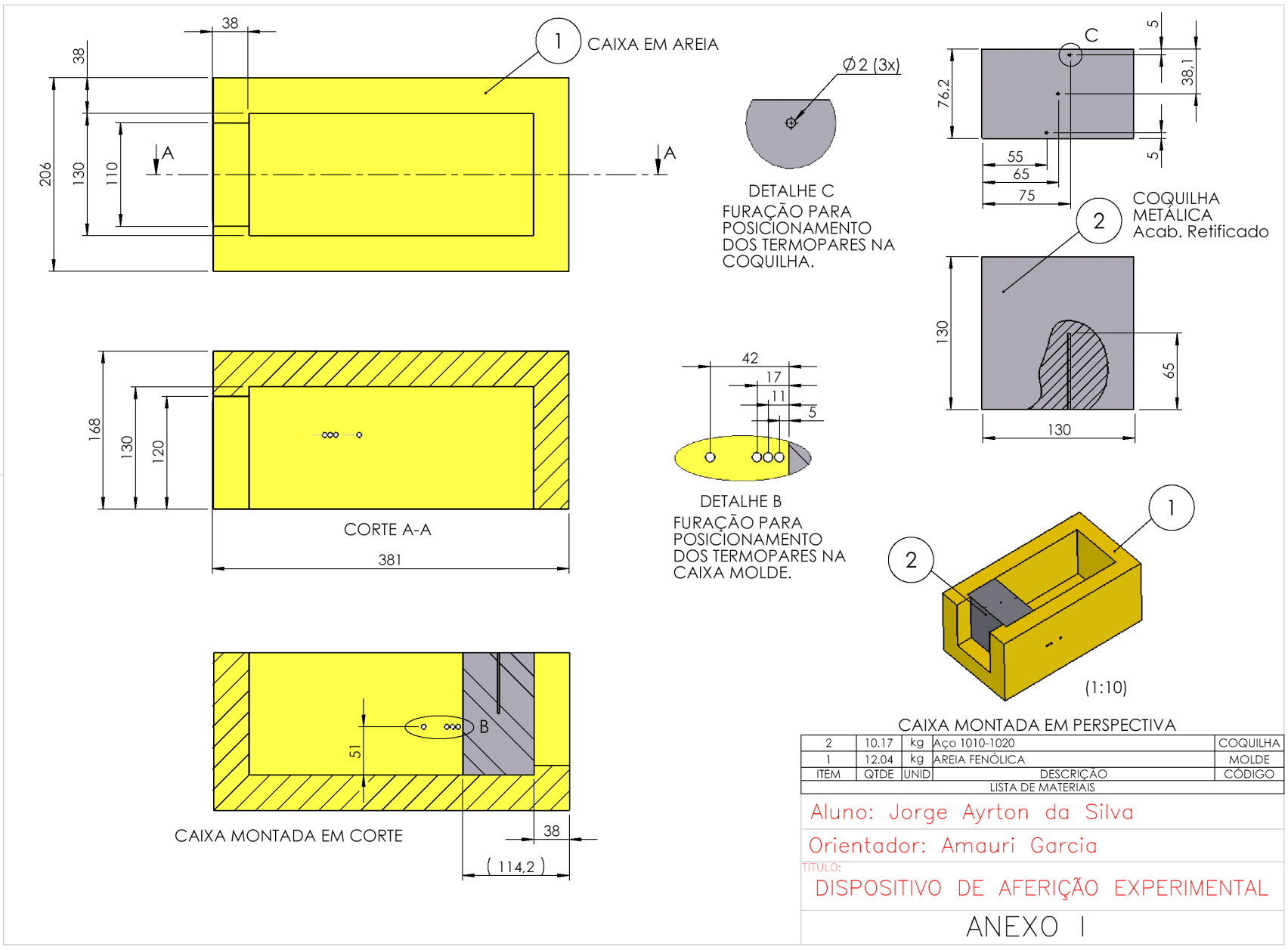
SPINELLI, J.E.; FERREIRA, I.L.; GARCIA, A. Evaluation of Heat Transfer Coefficients During Upward and Downward Solidification of Al-Si Alloys. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v.31, pp. 241-248, 2006.

STEFANESCU, D. M. **ASM Handbook**, 9 ed. ASM International, 1988, vol. 15, p. 629.

STEFANESCU, D. M. Solidification and modeling of cast iron - A short history of the defining moments. **Materials Science and Engineering A**, v. 413–414, pp. 322-333, 2005.

STIMSON, H. F. The International Temperature Scale of 1948, **J. Res. Nat. Stand.** (U.S.) 42, pp. 209-217 (1948) RP1962.

ANEXOS



ITEM	QTDE	UNID	DESCRIÇÃO	CÓDIGO
2	10.17	kg	Aço 1010-1020	COQUILHA
1	12.04	kg	AREIA FENÓLICA	MOLDE

LISTA DE MATERIAIS

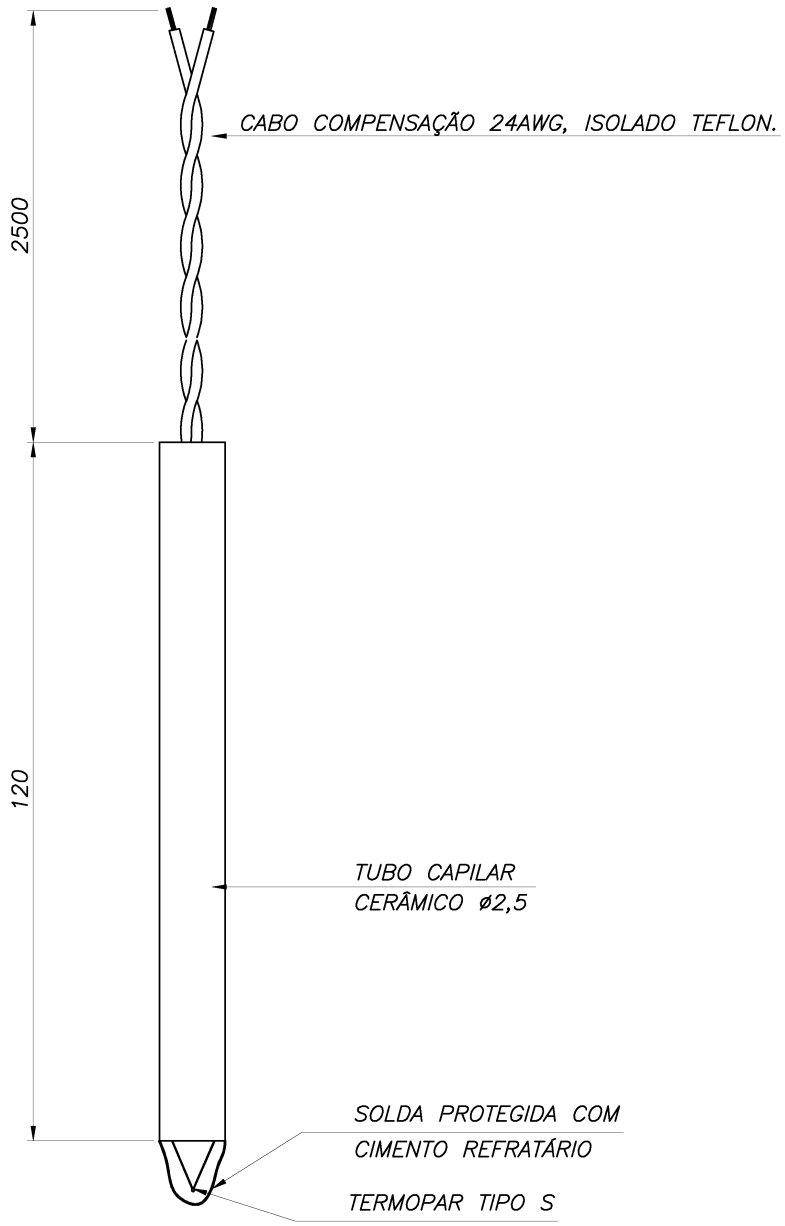
Aluno: Jorge Ayrton da Silva

Orientador: Amauri Garcia

TÍTULO:

DISPOSITIVO DE AFERIÇÃO EXPERIMENTAL

ANEXO I



NOTA:

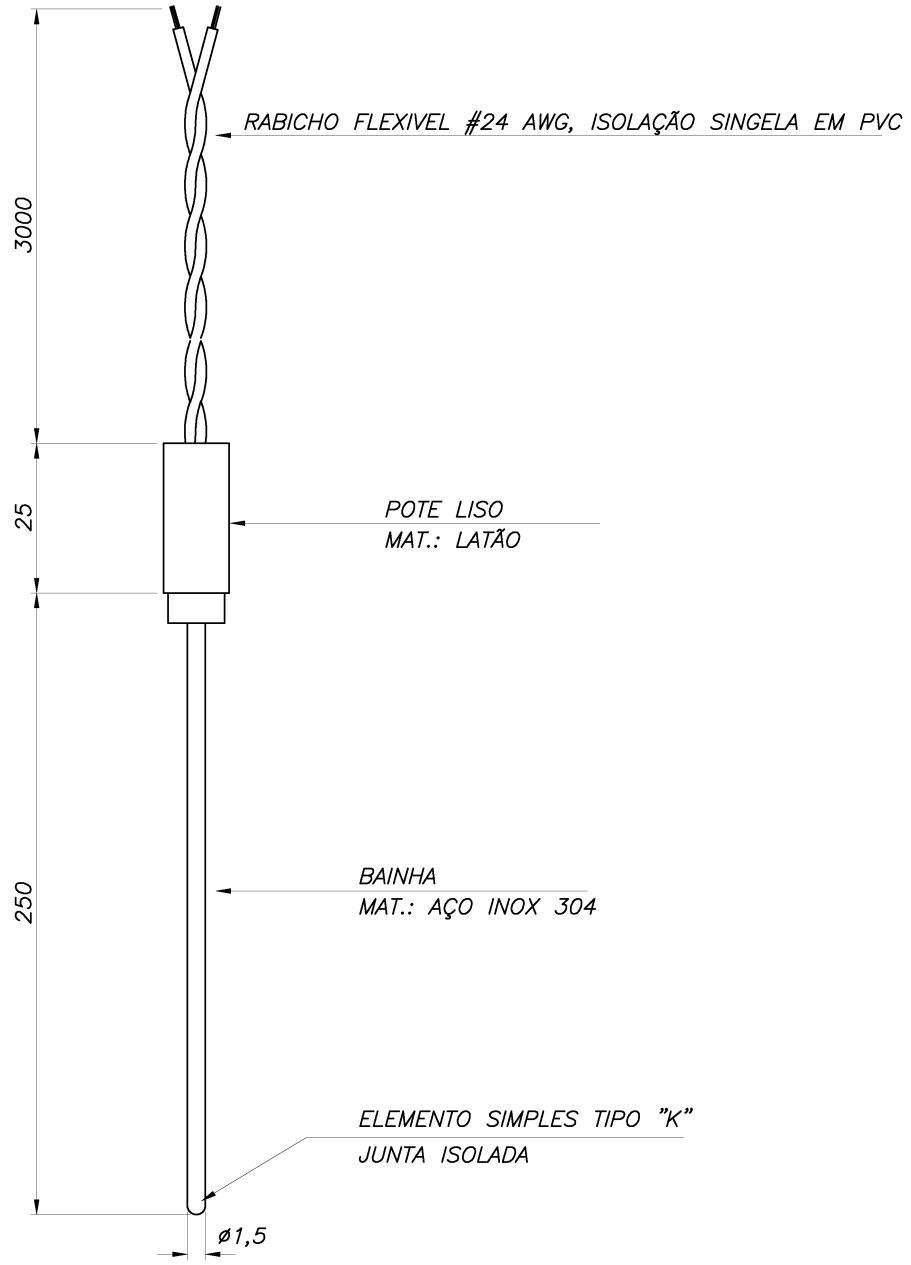
1. CATÁLOGO ECIL: CS13/S-S-27/710-0-00-120/F-250/S

Aluno: Jorge Ayrton da Silva

Orientador: Amauri Garcia

TÍTULO: TERMOPAR UTILIZADO NA CAIXA DE AREIA

ANEXO II



NOTA:

1. CATÁLOGO ECIL: MS11/K-S-00/304-15-S-250/PL-12/00/F-300

Aluno: Jorge Ayrton da Silva
Orientador: Amauri Garcia
TÍTULO: TERMOPAR UTILIZADO NA COQUILHA METÁLICA
ANEXO III

ANEXO IV

PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO PARA CONFRONTO COM DADOS LEVANTADOS NA SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL :

Parâmetro	Valor	Descrição/Unidade
Xm	0,076	Molde [m]
nm	301	*[mould nodes]*
Dxm	Xm/(nm-1)	*[m]*
Dtm	0,01	*[s]*
Km	30	Condutividade do molde [W /m.K]
Com	485	*Calor específico do molde [J / kg / K]*
rhom	7860	*Massa específica do molde em [kg / m^3]*
c1env	3,335	*Constante h_{amb} = c1env.t^(c2env) [W / m^2 / K]*
c2env	0,285	*Constante h_{amb}*
Xt	0,228	*Tamanho do molde em [m]*
N	901	
Dx	Xt/float (n-1)	
SimTime	400	*Tempo de simulação [s]*
Dt	0,01	*Tempo infinitesimal*
Jmax		*SimTime/dt + 1*
Tsup	160,0	*Superaquecimento em [K]*
Tinf	298,15	*Temperatura do Ar em [K]*
c1int	3500,0	*Constante hi, hi = c1int . t^ (-c2int) [W / m^2 / K]*
c2int	0,005	*Constante hi*
beta	1,0	*Constante de segregação equivalente a regra da Alavanca*
Gama	0,0	*Parâmetro de redistribuição de soluto*
Liege		Fe-3,9 wt%C
Co	3,9	*Concentração equivalente inicial*
Ceut	4,338	*Concentração eutético*
m	90,82558	*Inclinação da linha liquidus*
Ko	0,4579	*Coeficiente de partição*
$_{TL}$	1475	*Temperatura liquidus em [K]*
Teut	1428,16	*Temperatura eutética em [K]*
Ks	43	*Condutividade térmica sol em [W / m / K]*
kl	23	*Idem líquido*
cps	550	*Calor específico do sólido [J/ kg / K]*
Rhos	7350	*Massa específica do metal sólido [kg / m^3]*
Rhol	6947	*Idem para o líquido*
L	380626,3	*Calor latente da liga*

Bibliografia consultada: PEHLKE, JEYARAJAN, WADA (1982).