

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Departamento de Metalurgia  
Escola de Engenharia  
Centro de Tecnologia**

**APLICAÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA PARA  
COMPREENSÃO DO FENÔMENO DE SOLIDIFICAÇÃO NA  
LIGA de ALUMÍNIO 356.**

**Autor: Cristian Pohl Meinhardt**

**Orientador: Prof. Dr. Jaime Álvares Spim Jr.**

**Porto Alegre, Agosto de 2003.**

## Sumário:

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introdução .....                                                                                                                                | 4  |
| 2. Revisão Bibliográfica .....                                                                                                                     | 5  |
| 3. Apresentação da Liga 356 .....                                                                                                                  | 7  |
| 3.1. Características gerais da liga de fundição 356 .....                                                                                          | 7  |
| 3.2. Aplicações da liga 356 na indústria de fundidos .....                                                                                         | 8  |
| 3.3. Fabricação das ligas e as metodologias aplicadas na sua produção .....                                                                        | 9  |
| 3.4. Panorama de mercado: produtores e consumidores .....                                                                                          | 10 |
| 4. Estudo da Solidificação .....                                                                                                                   | 12 |
| 4.1. O fenômeno de solidificação na liga 356 .....                                                                                                 | 12 |
| 4.2. Influência da composição química na microestrutura do metal fundido .....                                                                     | 15 |
| 5. Princípios da análise térmica .....                                                                                                             | 16 |
| 5.1. Análise térmica no controle do processo de solidificação .....                                                                                | 18 |
| 6. Ensaios experimentais para verificação da influência da taxa de resfriamento nas características macro e microestruturais da liga 356 .....     | 20 |
| 6.1. Análise Macroestrutural .....                                                                                                                 | 21 |
| 6.2. Análise Microestrutural .....                                                                                                                 | 22 |
| 6.2.1. Identificação das fases microestruturais em MEV .....                                                                                       | 24 |
| 6.3. Formação macroestrutural e Curva de resfriamento vs. Taxa de solidificação .....                                                              | 27 |
| 7. Estudo da modelagem .....                                                                                                                       | 28 |
| 7.1. A modelagem numérica .....                                                                                                                    | 28 |
| 7.2. A modelagem numérica na indústria metalúrgica .....                                                                                           | 30 |
| 7.3. A modelagem numérica na indústria de fundição .....                                                                                           | 31 |
| Fundição, Térmica .....                                                                                                                            | 31 |
| 8. Estudos de Casos .....                                                                                                                          | 34 |
| 8.1. Estudo de Caso 1: Fundição de rodas em ligas de alumínio pelos processos de baixa pressão e de gravidade [38] .....                           | 34 |
| 8.2. Estudo de Caso 2: CAD/CAM permite significativa redução de peso e custos na Indústria David Brown Pumps [39] .....                            | 36 |
| 8.3. Estudo de Caso 3: Aplicação da simulação da porosidade em componente de suspensão automotiva em alumínio (Reprojeto de Componente) [40] ..... | 37 |
| 9. Modelo Matemático .....                                                                                                                         | 38 |
| 9.1. Análise Matemática da Solidificação .....                                                                                                     | 38 |
| 9.2. Analogia sistemas térmicos com circuitos elétricos .....                                                                                      | 42 |
| 10. Aplicação do Modelo Numérico na Peça de Referência .....                                                                                       | 44 |
| 10.1. Desenvolvimento de uma malha para representação da geometria estudada .....                                                                  | 44 |
| 10.1.1. Escolha da região da peça a ser aplicada a malha numérica .....                                                                            | 44 |
| 10.1.2. Geração de malha .....                                                                                                                     | 45 |
| 10.1.3. Condições de contorno utilizadas .....                                                                                                     | 45 |
| 10.1.4. Algoritmo desenvolvido .....                                                                                                               | 46 |
| 10.1.5. Algoritmo para contornos irregulares .....                                                                                                 | 47 |
| 10.1.6. Refino de malha .....                                                                                                                      | 48 |
| 10.2. Desenvolvimento das equações para o cálculo dos resistores e capacitores térmicos .....                                                      | 49 |
| 10.3. Programa de simulação desenvolvido .....                                                                                                     | 51 |
| 10.3.1. Condições Iniciais .....                                                                                                                   | 52 |
| 10.3.2. Propriedades do metal .....                                                                                                                | 52 |
| 10.3.3. Propriedades do molde (não utilizado) .....                                                                                                | 53 |
| 10.3.4. Monitorização da temperatura .....                                                                                                         | 53 |
| 10.3.5. Ajuste de Malha .....                                                                                                                      | 54 |
| 10.4. Ensaio experimental para aferição do modelo numérico desenvolvido .....                                                                      | 54 |
| 10.5. Resultados do programa desenvolvido .....                                                                                                    | 57 |

|                                                                                                     |                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 10.5.1. Curvas de resfriamento.....                                                                 | 57                                   |
| 10.5.2. Influência do refino de malha e das propriedades termofísicas na curva de resfriamento..... | 60                                   |
| 10.5.3. Análise da evolução das isothermas liquidus e solidus .....                                 | 69                                   |
| 10.5.3.1. Evolução das isothermas <i>liquidus</i> .....                                             | 69                                   |
| 10.5.3.2. Evolução das isothermas <i>solidus</i> .....                                              | <b>Erro! Indicador não definido.</b> |
| 10.6. Apresentação do programa comercial .....                                                      | 70                                   |
| 10.6.1. Ajustando Parâmetros do Sistema.....                                                        | 71                                   |
| 10.6.2. Curvas de Resfriamento .....                                                                | 71                                   |
| 10.6.3. Análises Térmicas de pós-processamento .....                                                | 72                                   |
| 10.7. Comparações entre o programa desenvolvido e o programa comercial.....                         | 72                                   |
| 11. Conclusão .....                                                                                 | 79                                   |
| 12. Agradecimentos .....                                                                            | 79                                   |
| 13. Bibliografia .....                                                                              | 80                                   |

# **1. Introdução**

A aplicação de recursos computacionais na indústria de fundição encontra-se em um estado de enorme avanço. O desenvolvimento de modelos matemáticos que simulem os fenômenos de transferência de calor e fluido, já não se apresenta mais como as maiores dificuldades neste contexto. Hoje em dia, os esforços dos profissionais que desenvolvem programas de simulação para a área da metalurgia, em especial para a fundição, concentram-se em gerar geometrias com a menor quantidade de elementos. O objetivo principal é a redução no tempo de simulação. Para ilustrar a problemática, em uma simulação de um bloco de motor, representado através de uma malha em elementos finitos com doze milhões de elementos, leva em média 72 horas para completar a simulação.

A cada dia que passa, concretiza-se a necessidade da implementação de programas que representem o fenômeno de solidificação como um todo, ou parte dele, na rotina de trabalho das empresas de fundição. É evidente a vantagem em se aplicar tais recursos. Pode-se citar a agilidade em mudar características de projeto, facilidade em representação e compreensão de fenômenos complexos, melhoria e desenvolvimento de novos processos e produtos, além da redução de tempo e custos. Deve-se salientar a crescente credibilidade nos resultados obtidos em simuladores, por parte dos clientes de fundição. Esta credibilidade torna a simulação um certificado de qualidade, pelo simples fato de serem solicitados relatórios sobre os resultados gerados pela simulação, antes de efetuar a compra de um lote de peças.

O trabalho desenvolvido pode ser dividido em duas partes. A primeira tem por principal objetivo realizar um estudo do fenômeno de solidificação da liga de alumínio 356. Nesta etapa também são abordadas características gerais da liga, aplicação na indústria de fundidos, importância econômica, principais características metalúrgicas, análises macro e microestruturais.

Na segunda parte deste trabalho procura-se demonstrar a importância da aplicação de ferramentais computacionais na melhoria de qualidade e produtividade de peças fundidas. Desenvolveu-se um programa numérico para simular a solidificação da liga 356. Neste programa aplicam-se coordenadas cilíndricas para representar tal geometria. Os resultados são comparados com o programa comercial SolidCast, da FiniteSolutions Inc., comprovando a eficiência da aplicação de uma coordenada adequada em reduzir a quantidade de elementos necessários para a representação da peça modelada.

## **2. Revisão Bibliográfica**

A revisão bibliográfica consiste de duas áreas de interesse. A primeira referente à tecnologia hoje desenvolvida para a geração de malhas em programas numéricos de simulação de fenômenos de transporte. E a segunda aborda as linhas de pesquisas atuais para modelagem do fenômeno de solidificação em processos de fundição.

Como já fora comentado na introdução, uma das áreas da ciência da modelagem numérica que recebe atualmente a maior concentração de esforços, por parte de seus profissionais, esta no pré-processamento. Mais especificamente na geração de malha ou no desenvolvimento de algoritmos computacionais para identificação de geometrias e acoplamento de malhas numéricas.

O único objetivo deste desenvolvimento está em que uma malha numérica, gerada por um simulador qualquer, representa tal geometria com o menor quantidade de elementos sem que se perca a precisão no cálculo do fenômeno em questão. O principal objetivo é a redução no tempo de simulação computacional.

A pesquisa bibliográfica revela que há poucos esforços para o desenvolvimento de programas em diferenças finitas, que identifiquem uma dada geometria e utilizem mais de uma coordenada para o acoplamento [1,2]. O desenvolvimento mais significativo está em programas que utilizam elementos finitos [3]. Neste contexto, pode-se dividir as malhas numéricas em dois tipos. Aquelas que utilizam elementos estruturados, ou seja, todos do mesmo tamanho e forma, ou malhas não estruturadas. [4] A vantagem em utilizar uma malha não estruturada, está no fato de permitir que elementos de maior volume representem determinadas regiões da malha em que não há a necessidade de um refino elevado. Isto é conseguido, somente correlacionando as características da geometria modelada com o método numérico abordado e fenômeno simulado.

A segunda abordagem da revisão bibliográfica, tem um vasto campo de pesquisa. Neste contexto, procura-se apresentar uma visão geral e atualizada da modelagem de fenômenos que envolvam a transferência de calor e solidificação. Também há uma preocupação em demonstrar qual estágio de desenvolvimento tecnológico em que os simuladores comerciais se encontram e, por fim, os novos rumos que tomarão as ferramentas computacionais utilizadas pela indústria de fundição [14, 15].

A modelagem da solidificação se popularizou por apresentar uma série de vantagens. Dentre as quais, a modelagem destaca-se por permitir a previsão do perfil térmico de uma peça ao longo do processo de fundição, como a localização dos pontos quentes, e validar os projetos de sistemas de alimentação e massalotagem.

A modelagem do fenômeno de solidificação pode ser dividida em duas abordagens. A primeira é referente à representação da transferência de calor e mudança de fase. Esta é denominada como uma visão macro do processo. [6,7] Para ficar clara a idéia, na modelagem macro não se considera qualquer fenômeno metalúrgico transcorridos durante o processo de solidificação. Para exemplificá-los, cita-se dois fenômenos: (a) distribuição química dos elementos que compõe a liga (segregação), e (b) composição e morfologia das fases formadas.

Na segunda abordagem, com linhas de pesquisa mais recentes, tem-se como foco principal à previsão microestrutural ao longo do processo de solidificação. [8,9,12,13]

Para modelar o fenômeno com uma visão macro, tem sido usualmente utilizado técnicas de elementos finitos [10], diferenças finitas [1,5,11], ou elementos de contorno. Esses modelos abordam duas aproximações: domínio duplo ou simples. No primeiro, as fases sólidas e líquidas são consideradas separadamente, isto requer um contínuo rastreamento da interface sólido-líquido, sendo mais aplicado para modelar a solidificação de metais puros e eutéticos. O segundo considera as fases homogêneas, variando continuamente as propriedades de uma fase para outra. Essa abordagem é mais utilizada para modelar a solidificação de ligas. [12]

A maior dificuldade em modelar, com a abordagem macro, está no fato de que o coeficiente de transferência de calor entre o metal e o molde, principal condição de contorno de tal processo, não é constante. Sabe-se que sua evolução depende de inúmeras características e propriedades do metal fundido, do molde e dos parâmetros de processo. Por apresentar inúmeras variáveis que influenciam

em seu comportamento, torna-se uma das principais dificuldades encontradas para simular com perfeição o fenômeno de solidificação.

A previsão da microestrutura, auxilia para estimar as propriedades mecânicas do fundido. Duas aproximações são utilizadas para prever a microestrutura de um fundido. A primeira recebe o nome de determinística e a segunda de probabilística. A aproximação determinística leva em consideração a nucleação e o crescimento enquanto que se resolvem as equações para a conservação de energia e distribuição de soluto. Os modelos baseados nesta aproximação são chamados de modelos macro-micro (MM). Eles usualmente fornecem informações sobre o tamanho dos grãos, espaçamento dendrítico, em diferentes locais do fundido. Além disso, uma previsão das curvas de resfriamento correspondente a tais locais. A aproximação probabilística utiliza a técnica de Monte-Carlo para prever a microestrutura. Os modelos MM, estão ganhando ímpeto para a previsão da solidificação em ligas Al-Si e ferro fundido. [12]

Muitos programas comerciais realizam aproximações grosseiras do fenômeno estudado. Neste trabalho, apresenta-se uma comparação, em que, fica evidente a hipótese realizada pelos simuladores comerciais e quão distantes estão da realidade do processo. Através da troca de experiências com profissionais da área, observa-se às inúmeras falhas dos simuladores ao tentar representar tais fenômenos e propriedades dos fundidos. Pode-se exemplificar com resultados completamente errôneos ao prever microestruturas em ferro fundido, além de outras características básicas, daquelas denominadas como a visão macro do processo. Nota-se, ainda uma grande dificuldade da simulação comercial, em prever determinados fenômenos e propriedades metalúrgicas transcorridos ao longo do processo de solidificação. Deve-se tomar muito cuidado ao acreditar cegamente nos resultados previstos por simuladores de solidificação. É imprescindível uma base de conhecimento sólida sobre o processo, para o correto aproveitamentos destes pacotes tecnológicos comerciais.

Mas sem dúvida, é uma ferramenta imprescindível para a agilização, otimização e redução de custos referente a todo o contexto que cerca a confecção de uma peça fundida, em que as empresas de fundição deverão submeter-se para manterem-se vivas em um mercado cada vez mais competitivo. A evolução da modelagem caminha em passos largos, isto pode ser observado nos centros de pesquisa ao redor de todo o mundo. Nota-se ainda um grande avanço por parte de centros de pesquisa e uma gradual aplicação destas inovações e melhorias, para representação de tais fenômenos complexos, em programas comerciais. Isto evidencia a importância da integração de empresas que desenvolvem pacotes de simulação com os centros de pesquisa.

A partir de uma revisão bibliográfica atualizada, observa-se que o foco da pesquisa está no desenvolvimento e aperfeiçoamento de modelos que representem os fenômenos complexos transcorridos no processo de fundição [16,17,18]. Estes, desenvolvidos para simular fenômenos específicos, são implementados nos tradicionais modelos de fluxo e transferência de calor. Pode-se citar, o exemplo da formação de porosidade levando em consideração as bolhas de gases e a diferença de pressão ocasionada pelo fluxo de metal líquido durante a solidificação. [16,17]. Outro foco em relevância é a investigação das características de fluxo do metal líquido ao passar por um filtro cerâmico [19,20]. Modelos de fluxo misto (lamelar e turbulento) estão sendo aplicados e melhorados para serem implementados em simuladores comerciais.

De elevada importância, a simulação apresenta um papel decisivo no desenvolvimento de novos processos de fundição [21] e re-projetos de componentes automotivos e ou, principalmente, a substituição por ligas mais leves, como o caso do braço de suspensão do *Cadillac*, onde a liga A356 substitui o aço fundido [16]. Os simuladores são utilizados para re-projetar o sistema de alimentação para a nova liga, além de realizar mudança na geometria do componente e verificar a influência sobre as propriedades mecânicas finais do fundido. A maioria dos artigos científicos publicados recentemente, utilizam a liga A356 na simulação, isto reforça a importância comercial desta liga.

Como conclusão da revisão bibliográfica fica clara a enorme contribuição, além do avanço em passos largos da modelagem numérica na indústria de fundição. A revisão atualizada, também demonstra a importância comercial no cenário mundial da liga em estudo neste trabalho.

### 3. Apresentação da Liga 356

#### 3.1. Características gerais da liga de fundição 356

A liga 356 é composta principalmente de alumínio, silício e magnésio. O ferro é uma impureza que deve ser rigorosamente controlada, pois reduz drasticamente as propriedades mecânicas. Em determinadas aplicações seu teor é de 0,12%. A presença do magnésio, entre 0,2 e 0,45%, permite uma ótima resposta ao tratamento térmico de envelhecimento. Neste tratamento ocorre o endurecimento por precipitação de partículas da fase  $Mg_2Si$ .

Com aproximadamente 7,0% de silício, a liga 356 apresenta uma solidificação hipoeutética. Sua estrutura é basicamente composta de uma rede dendrítica de alumínio primário e 55% de fase eutética. A grande quantidade de eutético é responsável pelas excelentes propriedades de fundição.

Através de um maior controle de impurezas, de tratamentos térmicos adequados, além de modificadores químicos que atuam na morfologia da fase eutética e elementos refinadores, atinge-se ótimas propriedades mecânicas e elevada resistência à corrosão em altas temperaturas.

Sua designação é conforme a *Aluminum Association (AA)*. Muitas designações pela AA, têm incluído uma letra como prefixo, identificando as ligas de qualidade *premium*. Estas contêm a concentração ótima de elementos que promovem endurecimento e um restrito controle de impurezas. No caso da liga 356, ao apresentar o prefixo A, recebe o título de qualidade *premium* para fundidos em areia e moldes permanentes.

A variação na composição química, além das principais propriedades mecânicas, quando fundida em molde de areia ou permanente, no estado bruto de fusão ou tratada termicamente são observadas nas **Tabelas 1 e 2**. A **Tabela 2** também demonstra uma comparação com a liga 413.0, sua principal concorrente no país para a fabricação de rodas leves.

**Tabela 1.** Variação da composição química na liga 356.0, conforme a AA [22].

| AA N°  | Fund.  | Al | Si      | Fe       | Cu       | Mn       | Mg        | Zn       | Ti       |
|--------|--------|----|---------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| 356.0  | A*e P* | 93 | 6,5-7,5 | Máx 0,60 | Máx 0,25 | Máx 0,35 | 0,2-0,45  | Máx 0,35 | Máx 0,25 |
| A356.0 | A*e P* | 93 | 6,5-7,5 | Máx 0,20 | Máx 0,20 | Máx 0,10 | 0,25 0,45 | Máx 0,10 | Máx 0,20 |

**Tabela 2.** Propriedades mecânicas típicas para a liga 356.0 e sua principal concorrente nacional [22].

| AA N°  | Trat. | Fundição | LRT* [MPa] | LE** [MPa] | A50*** [%] | D**** [HB] |
|--------|-------|----------|------------|------------|------------|------------|
| 356.0  | F     | A        | 131        |            | 2          | 40-70      |
| 356.0  | T6    | A        | 228        | 165        | 3,5        | 55-85      |
| A356.0 | T6    | A        | 234        | 165        | 3,5        | 70-105     |
| 356.0  | F     | P        | 145        |            | 3          | 40-70      |
| 356.0  | T6    | P        | 262        | 185        | 5          | 65-95      |
| A356.0 | T61   | P        | 260        | 195        | 5          | 70-100     |
| 413.0  | F     | DC       | 296        | 145        | 2,5        | ---        |
| A413.0 | F     | DC       | 290        | 131        | 3,5        | ---        |

\*A = molde de areia. P = molde permanente. DC = Die Casting (Fundição sob pressão). F = estado bruto de fusão. T = tratada termicamente. LRT = Limite de resistência à tração. LE = Limite de escoamento. A50 = Alongamento em 50 mm. D = Dureza.

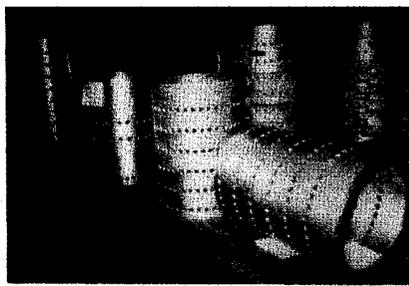
### 3.2. Aplicações da liga 356 na indústria de fundidos

A liga 356 tem despertado especial interesse da indústria aeroespacial, automobilística, e militar. Seu grande potencial de aplicação está em componentes onde a relação peso/resistência tem elevada importância.

Na fabricação de fundidos, os processos em areia e molde permanente recebem o maior destaque para a liga 356. Entretanto, são encontradas diversas outras aplicações, como: microfusão, *plaster* e *die casting* (baixa pressão). Na **Figura 1** observa-se exemplos de aplicações para componentes de alta responsabilidade, como: peças para aeronaves (a e d), rotores para processos de enriquecimento de urânio (b), cabeçotes de um pequeno bloco de motor (f), rodas leves (g), componentes de navio (c) e equipamento militar (e).



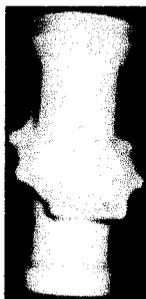
(a)



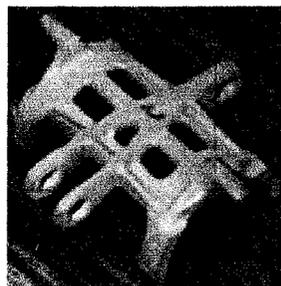
(b)



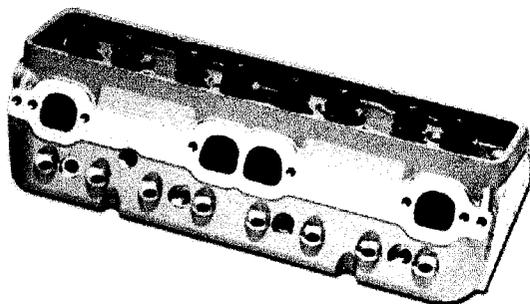
(c)



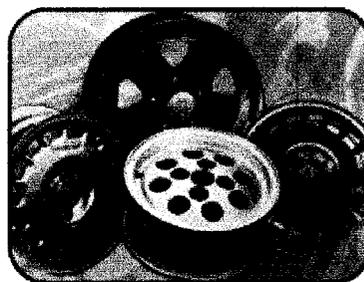
(d)



(e)



(f)



(g)

**Figura 1.** (a) Flaps da aeronave 737; (b) Rotores e estatores utilizados no processo de enriquecimento de Urânio por difusão gasosa [23]; (c) Luva de abastecimento de combustível para navios (fundição em areia);(d) duto de combustível da aeronavel F22 Raptor (microfusão); (e) assento para metralhadora MK-38 25 mm (*plaster*) [24] (f) Cabeçote de motor para o veículo Chevy-GM; [25]; (g) Roda leve (fundição sob baixa pressão e molde permanente) [26].

A **Tabela 3** apresenta uma comparação das propriedades de fundição para diversas ligas de alumínio fundidas em areia. A melhor avaliação recebe o valor de 1 e 5 para as piores. Na fundição em molde permanente os valores não se alteram. Fica evidente que a liga 356 apresenta propriedades superiores em comparação com as outras famílias de ligas alumínio para fundição. Isto justifica o título de qualidade *premium*, recebido pela liga.

**Tabela 3.** Comparação das propriedades de fundição para as ligas de alumínio fundidas em areia. O valor 1 recebe a melhor avaliação e 5 a pior. [22]

| AA N°  | Composição principal | Resistência à trinca quente | Espessura de parede | Fluidez | Tendência ao rechupe | Resistência à corrosão | Usinabilidade | Soldabilidade |
|--------|----------------------|-----------------------------|---------------------|---------|----------------------|------------------------|---------------|---------------|
| 201.0  | 4,6Cu0,35Mg          | 4                           | 3                   | 3       | 4                    | 4                      | 1             | 2             |
| 319.0  | 6Si3,5Cu             | 2                           | 2                   | 2       | 2                    | 3                      | 3             | 2             |
| A356.0 | 7Si0,35Mg            | 1                           | 1                   | 1       | 1                    | 2                      | 3             | 2             |
| A390.0 | 17Si4,5Cu0,55Mg      | 3                           | 3                   | 3       | 3                    | 2                      | 4             | 2             |
| 512.0  | 1,8Si4Mg             | 3                           | 4                   | 4       | 4                    | 1                      | 2             | 4             |
| 707.0  | 2,1Mg4,25Zn          | 5                           | 4                   | 4       | 4                    | 2                      | 1             | 4             |
| 850.0  | 1Cu6,25Sn            | 4                           | 4                   | 4       | 4                    | 3                      | 1             | 4             |

No Brasil, a liga 356 é basicamente utilizada para a fabricação de rodas tratáveis termicamente. Sua principal concorrente é a liga 413. Esta tem em sua composição 11 % de silício e não contém magnésio, além de não ser tratável termicamente. O uso de uma liga ou de outra depende da cultura e tradição de cada montadora, e inclusive, é influenciada pela tradição de cada país. Por exemplo, no Japão a liga 356 tem a maior preferência.

### **3.3. Fabricação das ligas e as metodologias aplicadas na sua produção**

Na fabricação de alumínio e suas ligas existem dois tipos de produtores. Os primários e os secundários. Os produtores primários são empresas que a partir da alumina calcinada, transformam-na em alumínio metálico. Através de um processo de redução, realizado em cubas eletrolíticas a altas temperaturas. Neste processo, o alumínio se deposita no fundo da cuba, sendo extraído por sucção para cadinhos, que transferem o metal líquido à fundição para a obtenção do alumínio primário.

Na forma de lingotes, vergalhões, placas e tarugos, o alumínio está pronto para a transformação em indústrias que atendem diversos setores. Estes lingotes servem de insumo para a fabricação de ligas mães e de ligas comerciais, como a 356. [27] No Brasil existem dois produtores primários que também fabricam a liga 356. São eles Alcoa e BHP Billipon.

Os produtores secundários são empresas de reciclagem de alumínio. Utilizam como matéria-prima às ligas mães e refugos obtidos na fabricação de chapas, perfis e laminados. Além da sucata gerada por produtos com vida útil curta, como é o caso das latas de bebidas. Assim, produzem a liga 356 e diversas outras com importância comercial. Normalmente utilizam fornos rotativos para a etapa de fusão.

### 3.4. Panorama de mercado: produtores e consumidores

O Brasil é o sexto maior produtor de alumínio primário. A produção é composta por doze usinas, espalhadas pelas regiões norte, centro-oeste e sudeste do país. Em abril deste ano, produziu 115,9 mil toneladas de alumínio primário, deste total, 12,34 mil toneladas transformam-se em peças fundidas, equivalentes a 10,65 % da produção. [28]

Mensalmente, são exportadas 2,5 mil toneladas da liga 356, e 1,0 mil toneladas são consumidas pelo mercado interno. Essas quantidades são relativas as produções por parte das duas empresas de alumínio primário, citadas anteriormente. Os produtores secundários produzem, 250 toneladas mensais da liga 356. Pode-se considerar que metade desta quantidade é exportada. Então os dados de produção e consumo mensais nacionais para liga 356, são apresentados na **Tabela 4**.

**Tabela 4.** Produção e consumo nacionais da liga 356 em toneladas/mês.

| <b>Mercado</b>    | <b>Interno</b> | <b>Exportação</b> | <b>Total</b> |
|-------------------|----------------|-------------------|--------------|
| <b>Produtores</b> |                |                   |              |
| Primários         | 1000           | 2500              | <b>3500</b>  |
| Secundários       | 125            | 125               | <b>250</b>   |
| <b>Total</b>      | <b>1125</b>    | <b>2625</b>       | <b>3750</b>  |

O mercado de rodas leves, principal consumidora da liga 356 no país, é dividido entre montadoras (M), *after market* (AM) e exportação (E). As rodas do tipo *after-market* são aqueles modelos não originais, em que o consumidor compra um carro e posteriormente troca-as por um modelo mais arrojado. O *after-market* utiliza mais a liga 413.

A **Tabela 5** apresenta os dados de consumo das ligas 356 e 413, por parte dos fabricantes de rodas, no cenário nacional. O consumo interno da liga 356, atinge 1031,5 toneladas/mês, isto representa 8,35% da quantidade de fundidos em ligas de alumínio no Brasil. [28]

**Tabela 5.** Consumo das ligas 356 e 413, por parte dos produtores de rodas nacionais.

| <b>Consumo das ligas 356 e 305 SAE, pelos produtores de rodas, em toneladas/mês</b> |               |               |                |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|----------------|
|                                                                                     | <b>356</b>    | <b>413</b>    | <b>Mercado</b> |
| <b>Grandes fabricantes</b>                                                          | 1025          | 1025          | M, AM, E.      |
| <b>Pequenos fabricantes</b>                                                         | 6,5           | 413,5         | AM,E           |
| <b>Totais</b>                                                                       | <b>1031,5</b> | <b>1438,5</b> |                |

Em geral, as ligas 356 e 413 possuem um teor de ferro máximo de 0,25%, para a aplicação em rodas. A 356 é ainda mais rigorosa, para alguns produtores o teor de ferro máximo esta na faixa de 0,12%.

As **Tabelas 6 e 7** apresentam a produção de fundidos no país. Realizando uma análise de mercado, conclui-se qual a importância da produção de fundidos em metais não ferrosos para a economia nacional.

Tabela 6. Dados sobre a produção de fundidos no Brasil. [41]

| PRODUÇÃO DE FUNDIDOS (t) |               |               |              |                       |                       |              |
|--------------------------|---------------|---------------|--------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| METAIS                   | PERÍODOS      |               |              |                       |                       |              |
|                          | ABR/03<br>(A) | ABR/02<br>(B) | A/B%         | JAN-<br>ABR/03<br>(D) | JAN-<br>ABR/02<br>(E) | D/E%         |
| 1) Ferro Total           | 156.893       | 152.245       | 3,1          | 627.191               | 548.651               | 14,3         |
| 2) Aço Total             | 9.000         | 7.673         | 17,3         | 35.973                | 27.424                | 31,2         |
| 3) Não Ferrosos          | 14.885        | 13.642        | 9,1          | 57.629                | 43.181                | 33,56        |
| 3.1) Cobre               | 1.581         | 1.190         | 32,9         | 5.262                 | 3675                  | 43,2         |
| 3.2) Zinco               | 589           | 730           | (19,3)       | 2.252                 | 2.596                 | (13,3)       |
| 3.3) Alumínio            | <b>12.344</b> | <b>11.141</b> | <b>10,8</b>  | <b>48.650</b>         | <b>34.961</b>         | <b>39,2</b>  |
| 3.4) Magnésio            | 371           | 581           | (36,1)       | 1.465                 | 1.949                 | (24,8)       |
| 5) Total Geral           | 180.778       | 173.560       | 4,2          | 720.793               | 619.256               | 16,4         |
| 6) Produção Dia/t        | 9.039         | 8.678         | 4,2          | 8.684                 | 7.461                 | 16,4         |
| 7) Alumínio/Total        | <b>6,83%</b>  | <b>6,42%</b>  | <b>0,41%</b> | <b>6,75%</b>          | <b>5,64%</b>          | <b>1,11%</b> |
| 8) Alumínio/Não Ferrosos | <b>82,93%</b> | <b>81,67%</b> | <b>1,26%</b> | <b>84,42%</b>         | <b>80,96%</b>         | <b>3,46%</b> |

Tabela 7. Dados sobre a exportação de fundidos no Brasil e o valor agregado. Fonte: ABIFA

| EXPORTAÇÃO (t)              |                |                |                |                       |                       |               |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| METAIS                      | PERÍODOS       |                |                |                       |                       |               |
|                             | ABR/03<br>(A)  | ABR/02<br>(B)  | A/B%           | JAN-<br>ABR/03<br>(D) | JAN-<br>ABR/02<br>(E) | D/E%          |
| 1) Ferro                    | 27.429         | 22.701         | 20,8           | 103.550               | 79.262                | 30,6          |
| 2) Aço                      | 1.425          | 1.452          | (1,9)          | 5961                  | 5.988                 | (0,5)         |
| 3) Não Ferrosos             | <b>1.769</b>   | <b>1.504</b>   | <b>17,6</b>    | <b>5.667</b>          | <b>5.555</b>          | <b>2,0</b>    |
| 4) Total Geral              | 30.623         | 25.657         | 19,4           | 115.178               | 90.805                | 26,8          |
|                             | <b>5,77</b>    | <b>5,86</b>    | <b>(0,09)</b>  | <b>4,92</b>           | <b>6,12</b>           | <b>(1,19)</b> |
| EXPORTAÇÃO (mil US\$ - FOB) |                |                |                |                       |                       |               |
| 1) Ferro                    | 36.454,7       | 27.239,8       | 33,8           | 137.653,8             | 96.970,2              | 42,0          |
| 2) Aço                      | 3.352,1        | 2.973,5        | 12,7           | 14.034,8              | 12.377,3              | 13,4          |
| 3) Não Ferrosos             | <b>5.631,9</b> | <b>5.613,8</b> | <b>0,3</b>     | <b>19.788,2</b>       | <b>19.050,7</b>       | <b>3,9</b>    |
| 4) Total Geral              | 45.438,7       | 35.827,1       | 26,8           | 171.476,8             | 128.398,2             | 33,6          |
|                             | <b>12,39</b>   | <b>15,67</b>   | <b>(3,28)</b>  | <b>11,54</b>          | <b>14,84</b>          | <b>(3,3)</b>  |
| VALOR AGREGADO (mil US\$/t) |                |                |                |                       |                       |               |
| 1) Ferro                    | 1,33           | 1,20           | 8,33           | 1,33                  | 1,22                  | 9,02          |
| 2) Aço                      | 2,38           | 2,04           | 16,67          | 2,38                  | 2,08                  | 14,42         |
| 3) Não Ferrosos             | <b>3,22</b>    | <b>3,70</b>    | <b>(12,97)</b> | <b>3,45</b>           | <b>3,45</b>           | <b>0,00</b>   |

O valor agregado na exportação de fundidos em metais não-ferrosos, ou seja, o preço pago pela tonelada de metal não-ferroso exportado, supera os valores para os fundidos em metais ferrosos. Para cada tonelada de fundido não-ferroso exportado, deve-se exportar 2,42 toneladas de ferro fundido ou 1,35 toneladas de aço fundido, para obter as mesmas grandezas monetárias.

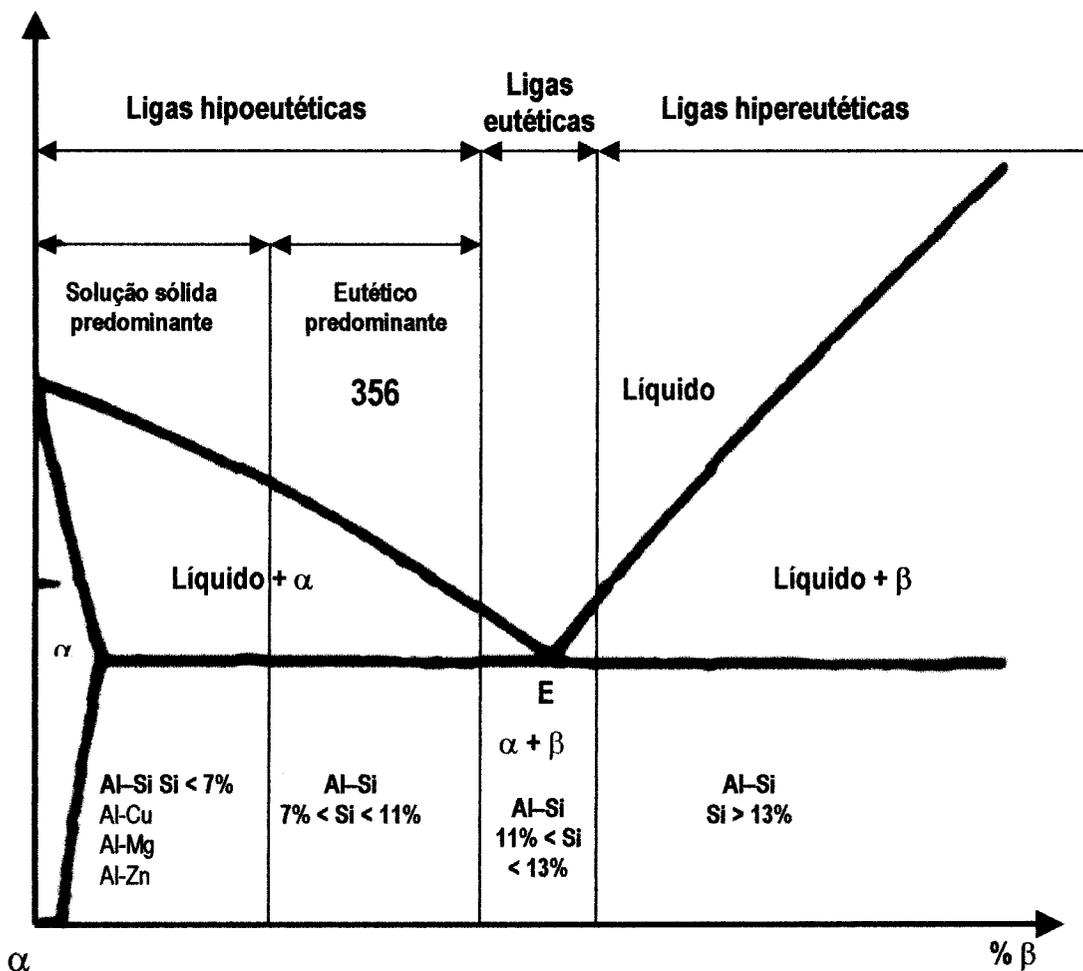
Ao realizar uma análise dos dados das tabelas acima, nota-se que a produção de fundidos não-ferrosos representa 8,23% do total de fundidos produzidos no país, enquanto que a exportação representando 5,77% do total exportado. Em valores isto equivale a 12,39% do total. Como o alumínio representa 82,93% da produção de fundidos não-ferrosos, fica clara a extrema importância deste metal

e de suas ligas na economia do país. Os esforços devem concentrar-se no aumento da produção de fundidos não-ferrosos e conseqüente crescimento nas exportações.

## 4. Estudo da Solidificação

### 4.1. O fenômeno de solidificação na liga 356

O estudo da solidificação das ligas de alumínio com importância industrial concentram-se sobre as ligas binárias. Praticamente, todas essas ligas apresentam diagrama de equilíbrio com miscibilidade parcial no estado sólido, formação de uma solução sólida primária e uma mistura eutética. Deste modo, as ligas industriais de alumínio podem ser agrupadas segundo o diagrama esquematizado na **Figura 2**.



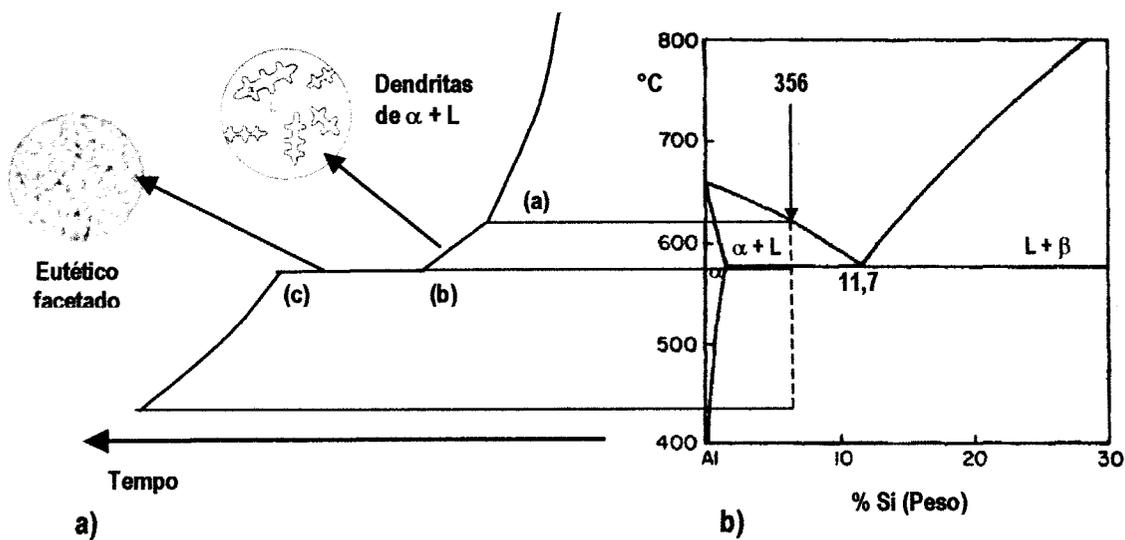
**Figura 2.** Representação esquemática do diagrama de equilíbrio binário para as ligas de alumínio com importância industrial. [29]

Na solidificação da liga 356, considera-se o diagrama de equilíbrio do sistema binário alumínio-silício, **Figura 3b**. Este diagrama coloca em evidência um eutético, com teor de silício da ordem de 11,7% e duas soluções sólidas alfa ( $\alpha$ ) e beta ( $\beta$ ). Na temperatura eutética de 577 °C, o domínio da solução sólida  $\alpha$  se estende de 0 a 1,95% de silício. A solução  $\beta$  é delimitada por um teor máximo da ordem de 2% de alumínio. É válido lembrar que as porcentagens são relativas ao peso da liga.

Em média, a liga 356 apresenta 7,0% de silício. Sua solidificação é caracterizada por um comportamento hipoeutético com mistura predominantemente eutética, conforme apresenta o diagrama acima. Apesar da liga 356 apresentar grande porcentagem de estrutura eutética quando solidificada (55%), esta tem uma composição afastada do eutético, apresentando um intervalo de solidificação na

ordem de 36 °C. Como conseqüência, sua solidificação tende a se realizar por camadas espessas. [29,30,31]

A curva de resfriamento é uma combinação de duas curvas típicas: ligas de solução sólida e eutética. Na **Figura 3a** pode-se observar a curva de resfriamento ideal para a liga de estudo. O resfriamento primário inicia-se na temperatura *liquidus* (ponto a) com o crescimento da rede dendrítica de alumínio primário ( $\alpha$ ). À medida que à frente de solidificação avança, o soluto, que neste caso é o silício, é rejeitado pelo sólido formado, segregando-o para o líquido. Conseqüentemente, a próxima porção de líquido a solidificar terá uma composição química diferente do sólido anteriormente formado. No momento em que o líquido atinge a composição eutética (ponto b), a solidificação continua ao longo do patamar eutético (b-c), com a formação de duas fases simultaneamente (alumínio rico em soluto ( $\beta$ ) e silício puro). A solidificação estará completa somente no ponto (c). [32]



**Figura 3.** Diagrama de fases Al-Si, ilustrando a solidificação da liga 356, demonstrando a curva de solidificação ideal e as fases formadas.

O desenvolvimento de modelos matemáticos que representem a transferência de calor incluindo a mudança de fase, apresenta uma grande complexidade de cálculos. O motivo está nas condições de contorno não-lineares e na liberação contínua de calor latente, além da dependência das propriedades físicas do metal como função da temperatura.

Na solidificação de uma liga binária observam-se as fases líquida e sólida separadas por uma fase pastosa definida pela temperatura *liquidus* e pela temperatura *solidus*. Os pesquisadores *Voller* e *Swaminathan* apresentam em seu trabalho a variação da condutividade térmica ( $k$ ) e do calor específico ( $c$ ) da liga, dentro da região pastosa dado por uma mistura ponderada das constantes sólida e líquida.

$$k_p = (1 - g) \cdot k_s + g \cdot k_l \quad (1)$$

$$c_p = (1 - g) \cdot c_s + g \cdot c_l \quad (2)$$

Os subscritos  $s$ ,  $l$  e  $p$  representam as fases sólida, líquida e pastosa respectivamente, e ' $g$ ' corresponde ao volume de fração líquida local.

As simplificações introduzidas por *Voller* e *Song* são de grande importância para a análise numérica de fenômenos térmicos que envolvem a transformação de fase. Assumindo que o valor absoluto do calor específico no sólido e no líquido para a liga de trabalho, equivalem a valores bastante próximos, e que a fração volumétrica do constituinte é melhor representado pela fração sólida formada, o termo de geração de calor na mudança de fase, pode-se aproximar, com resultados bastante satisfatórios de:

$$\dot{q} = \rho.L. \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (3)$$

A fração sólida formada pode ser função de uma série de parâmetros envolvidos no sistema de fundição. No entanto em inúmeros casos é razoável assumir a variação da fração sólida como função apenas da temperatura, isto é:

$$f_s = f(T) \text{ para } T_S < T < T_L \quad (4)$$

A formulação correta de  $f(T)$  consiste na dependência dos constituintes internos da liga e da forma com que interagem na solidificação do sistema. As formulações mais importantes são dadas por:

- 1- Regra da Alavanca
- 2- Modelo de Scheil
- 3- Modelo de Brody e Flemings
- 4- Modelo de Clyne e Kurz
- 5- Modelo de Onaka

As condições de solidificação verificadas na prática não conduzem a situações de equilíbrio termodinâmico em todo sistema metálico. Para situações em que a difusão do soluto no sólido pode ser desprezada e que a ação da convecção no metal líquido assegura completa mistura do soluto, o tratamento clássico de Scheil é o mais adequado.

$$f_s = 1 - \left( \frac{T_f - T}{T_f - T_l} \right)^{-\beta} \quad (5)$$

onde:  $\beta = \left( \frac{1}{1 - k} \right) \quad (6)$

O tratamento de Scheil conduz a resultados muito próximos de situações práticas que conduzem a solidificação dendrítica, onde analisa a condição de segregação máxima. [33] Executando-se um balanço de massas, para um avanço de volume solidificado  $df_s$ , pode-se obter o perfil de concentração de soluto de uma amostra de composição nominal  $C_0$ .

$$C_s = k.C_0.(1 - f_s)^{k-1} \quad (7)$$

onde:  $C_s$  = Composição do sólido na interface sólido-líquido;

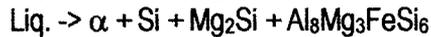
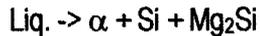
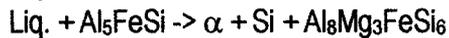
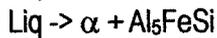
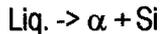
Segundo Garcia [34], para as ligas binárias, pode-se definir o coeficiente de distribuição no equilíbrio ( $k$ ), como a relação entre a concentração de soluto no sólido ( $C_s$ ), e a correspondente concentração de soluto no líquido ( $C_L$ ), ou seja:

$$k = \frac{C_s}{C_L} \quad (8)$$

Os diagramas de fases permitem a determinação do coeficiente de distribuição no equilíbrio em função da concentração de soluto e da temperatura. Para uma situação idealizada, onde as linhas *solidus* e *liquidus* são retas, o coeficiente de distribuição é constante. Observando o diagrama de equilíbrio para a liga binária Al-Si, obtém-se o coeficiente de partição igual a 0,13.

## 4.2. Influência da composição química na microestrutura do metal fundido

Ao longo do progresso da solidificação, várias reações em não-equilíbrio podem ocorrer no líquido interdendrítico dependendo da taxa de resfriamento e da quantidade de impurezas (principalmente ferro e manganês) no metal líquido. Um estudo aprofundado por *Backerud* e sua equipe revelam as seguintes equações para a liga A356.



A composição química do metal fundido tem uma significativa influência na microestrutura e nas propriedades mecânicas do componente fundido. Nas ligas Al-Si de importância comercial, existe um número natural de impurezas e muito esforço deve ser exercido para minimizar essa concentração, com o objetivo de produzir fundidos de qualidade *premium*. O ferro é provavelmente um dos mais importantes elementos para ser controlado, pois este forma um intermetálico quebradiço, prejudicando seriamente a ductilidade da liga. Muitas combinações ricas em ferro podem se formar durante a solidificação da fundido, incluindo grandes plaquetas de  $\beta$  ( $\text{FeSiAl}_5$ ), partículas em forma de escrituras chinesas ( $\text{Fe, Mn}$ ) $_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$  e  $\pi$  ( $\text{Al}_8\text{FeMg}_3\text{Si}_6$ ) fases. A redução da ductilidade, resistência à fratura e propriedades de fadiga nas ligas contendo ferro é atribuída à precipitação das agulhas de  $\text{FeSiAl}_5$ .

O efeito deletério do ferro pode ser contornado por iniciar com uma carga com baixo teor de ferro, minimizando a absorção do ferro durante a fusão e espera, aumentando a taxa de resfriamento e realizando devidas adições no metal fundido. O elemento mais comum para neutralizar os efeitos do ferro é o manganês; menos comum adicionado com cobalto, berílio e cromo. As adições desses elementos causam mudanças na morfologia da fase do ferro do tipo plaqueta para partículas na forma de escrituras chinesas. Estudos recentes indicam que, mesmo com a ausência de neutralizadores do ferro, a morfologia da fase pode ser alterada sobre-aquecendo o metal apropriadamente. Por exemplo, os resultados indicam que a fase contendo ferro cristaliza predominantemente com escrituras chinesas ao invés de plaquetas quando o metal é sobre-aquecido entre 850 – 900 °C por pequenos períodos.[35]

## 5. Princípios da análise térmica

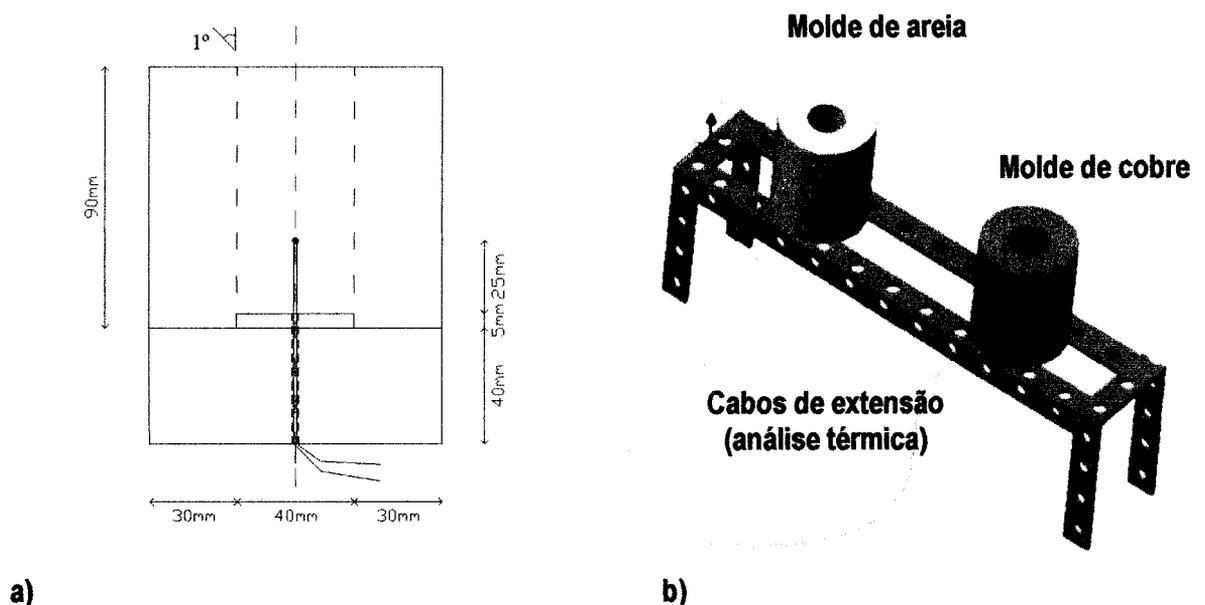
Conforme Gruzleski [32], na análise térmica a temperatura de uma amostra em solidificação é armazenada desde o resfriamento a partir do estado completamente líquido, através da região de solidificação, até completamente sólido. O resultado da plotagem da temperatura vs. o tempo é denominado de curva de resfriamento.

A importância em analisar uma curva de resfriamento está na capacidade de identificar características básicas de um metal em solidificação, como por exemplo às temperaturas de transformação. Por outro lado, a análise térmica possibilita prever o tamanho de grão, modificação eutética, formação de fases, composição química, enfim, diagnosticar e controlar o complexo comportamento de uma liga submetida ao processo de fundição.

Basicamente todos os equipamentos para análise térmica consistem em um copo de amostragem, um microcomputador para aquisição de dados, e um programa apropriado para realizar análises.

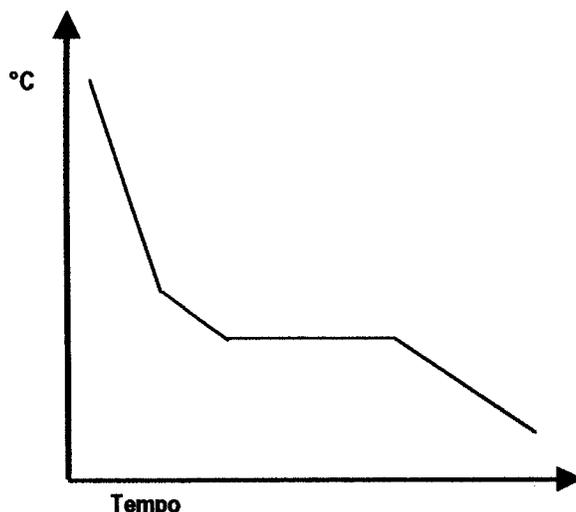
Neste trabalho, todas as análises térmicas foram realizadas utilizando-se termopares do tipo K (Chromel/Alumel), de bitola 14, revestidos com pó cerâmico e capa protetora de aço inoxidável. O sistema de aquisição de dados é composto de um microcomputador Pentium 100 MHz com 197 MB de memória RAM. As informações foram obtidas através da placa de conversão A/D, de 12 bits. Para análise e leitura dos dados captados pela placa de aquisição utilizou-se o programa SAD32, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS.

Com o objetivo de obter os pontos de transformação, além de verificar a influência das condições de resfriamento nas formações macro e ou microestrutural da liga estudada, utilizou-se o sistema de fundição cilíndrico anteriormente desenvolvido no laboratório [36]. O sistema, observado na **Figura 4b**, é composto de um molde confeccionado em areia aglomerada com resina e outro em cobre. Cada molde possui coeficientes de extração de calor distintos. Os termopares foram inseridos em posições centrais do molde, a meia altura, conforme a **Figura 4a**.



**Figura 4.** a) Corte longitudinal no molde, mostrando o posicionamento do termopar. b) Sistema de fundição utilizado para realizar a análise térmica, com o objetivo de identificar os pontos de transformação, além de obter corpos de prova para analisar a macro e microestrutura da liga 356.

A forma da curva de resfriamento depende, principalmente, da composição química e da taxa de resfriamento submetida durante o processo de solidificação. Para uma liga hipoeutética, o caso da 356, tem-se a curva de resfriamento idealizada conforme a **Figura 5**.



**Figura 5.** Curva de resfriamento ideal para uma liga hipoeutética. [32]

Quando materiais reais são considerados existem duas importantes diferenças. A reação de solidificação usualmente requer um super-resfriamento, para que o processo de solidificação inicie. Este super-resfriamento, que representa a força termodinâmica motriz, aparece na curva de resfriamento como uma queda na temperatura abaixo da temperatura de equilíbrio para a reação. Uma vez que a solidificação inicia, o calor latente é liberado e a temperatura aumenta a valores próximos a temperatura de solidificação. Este processo de reaquecimento é conhecido como recalescência. O super-resfriamento que acompanha a recalescência é usualmente associado com a solidificação da fase primária e eutética.

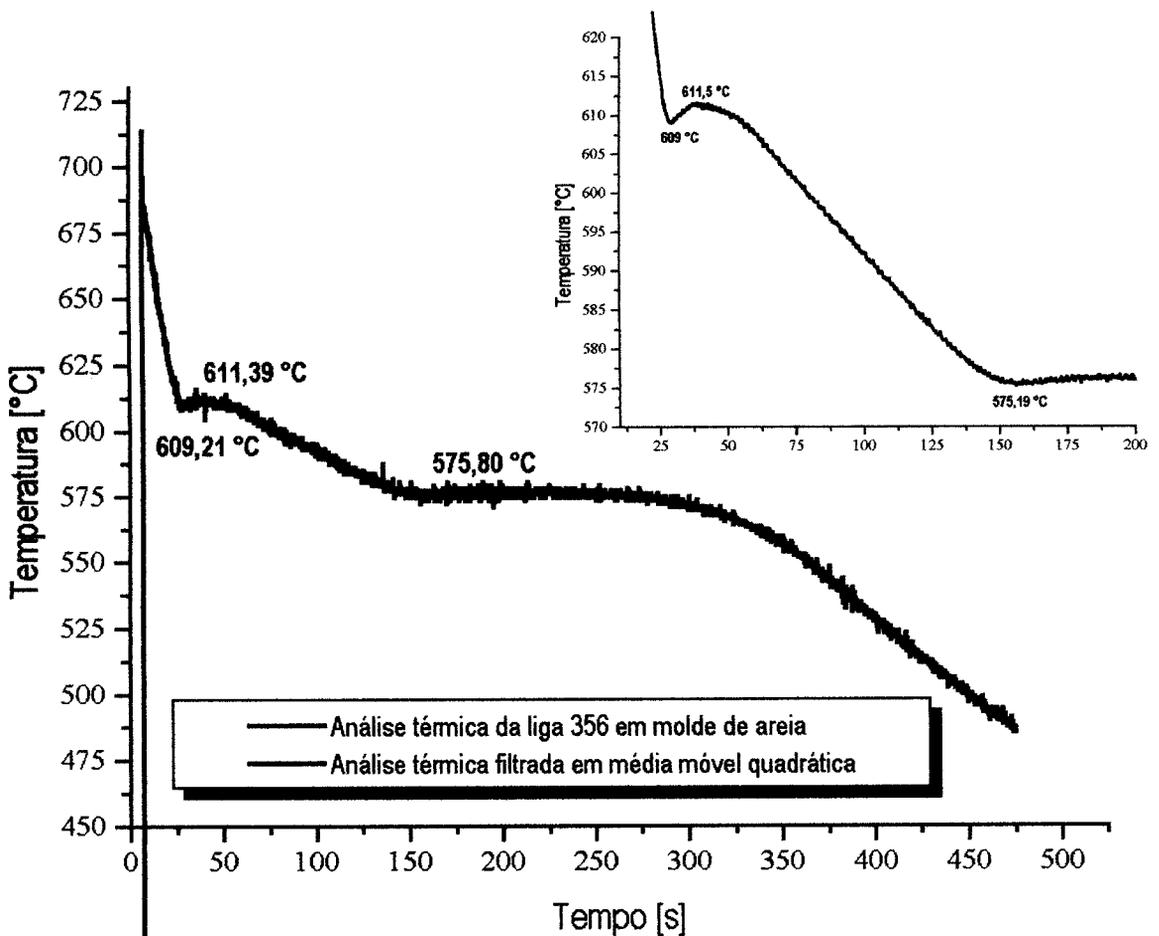
Uma segunda diferença, está na complexidade química das atuais ligas comerciais. Curvas ideais, como a observada na **Figura 5** são reais somente para ligas binárias. A maioria das ligas fundidas são multicomponentes e contem uma série de fases sólidas, todas as quais podem ter um efeito sobre a forma da curva de resfriamento. Uma curva de resfriamento real pode então ser considerada mais complexa.

Na **Figura 6** observa-se à análise térmica obtida experimentalmente para a liga 356 fundida em molde cilíndrico de areia. Neste gráfico, a curva está plotada de duas maneiras. A curva, em preto, representa os dados originais adquiridos pelo sistema de instrumentação. Enquanto que a curva em azul, representa a curva original após realizada uma filtragem pela média móvel quadrática. Esta é usualmente utilizada para melhorar a apresentação e análises dos dados.

A curva reflete a forma genérica para as ligas hipoeutéticas. Entretanto, demonstra a existência do super-resfriamento  $\Delta\theta$ , associado com a formação da fase primária e o  $\Delta\theta_E$ , este associado com o início de solidificação eutética. A magnitude destes super-resfriamentos é importante na avaliação da microestrutura bruta de solidificação. A **Tabela 8** demonstra as temperaturas de transformação e os valores dos super-resfriamentos obtidos para a liga 356 fundida em molde de areia.

**Tabela 8.** Temperaturas de transformação e valores de super-resfriamento para a liga 356 obtidos via análise térmica através do sistema de fundição cilíndrico [32].

| <b>Temperaturas de transformação e valores de super-resfriamento para a liga 356</b> |            |            |                       |            |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|-----------------------|------------|------------|
| $\Delta\theta$ [°C]                                                                  | $T_0$ [°C] | $T_I$ [°C] | $\Delta\theta_E$ [°C] | $T_1$ [°C] | $T_E$ [°C] |
| 2,36                                                                                 | 609,14     | 611,5      | 0,61                  | 575,19     | 575,80     |
|                                                                                      |            |            |                       |            |            |



**Figura 6.** Curva de resfriamento obtida via análise térmica para a liga 356 fundida em molde cilíndrico de areia [36]. Em destaque pode-se observar a recalescência associada à solidificação da fase primária e eutética.

## 5.1. Análise térmica no controle do processo de solidificação

Desde a descoberta do termopar, foram feitas inúmeras tentativas de utilizar as informações contidas numa curva de resfriamento para aumentar o grau de conhecimento metalúrgico das reações envolvidas durante o processo de solidificação. Modernamente, com o advento da computação, essas informações fazem parte do cotidiano e asseguram o controle estatístico de processo e os procedimentos para a garantia da qualidade nas fundições competitivas. [Muller]

Na solidificação das ligas de alumínio contendo silício, além do tamanho de grão, é importante monitorar a forma com que o Si aparece na reação eutética (lamelar, acicular ou globular).

Para determinação do tamanho de grão uma porção da curva de resfriamento associada com o início da solidificação primária é utilizada. No metal fundido que contém um grande número de núcleos, haverá uma pequena barreira para a nucleação, e a curva de resfriamento se parecerá com a curva ideal da **Figura 5**. Este tipo de curva usualmente indica uma material de granulometria fina. Se poucos núcleos estão presentes, então um mensurável super-resfriamento será necessário para dar início à solidificação dos grãos primários, e a curva se parecerá com a curva experimental, da **Figura 6**. Grandes valores de  $\Delta\theta$  são encontrados quando o tamanho de grão é grande, e valores de  $\Delta\theta$  próximos de zero são típicos de materiais com grãos finos.

Quando uma liga é modificada, três características da curva de resfriamento podem ser mudadas: a temperatura do patamar eutético, o super-resfriamento necessário para iniciar a solidificação eutética, e o tempo de duração deste super-resfriamento. Com a modificação, a temperatura do eutético diminui, o super-resfriamento para a nucleação do eutético é aumentado, e o período deste super-resfriamento alonga-se.

A característica mais utilizada no controle da modificação é a queda na temperatura eutética. Na liga A356, uma completa modificação irá abaixar esta temperatura em 6 – 8 °C de um estado não modificado. Sabendo que a temperatura eutética é de fácil medição, esta é mais amplamente aplicada pelas fundições para avaliar se um fundido foi apropriadamente modificado

Hoje em dia, encontram-se diversos equipamentos patenteados, em que utilizam a análise térmica para o controle de processos industriais. Pode-se citar o caso do *SinteCast*. Este equipamento, utiliza a análise térmica para identificar o grau de modificação necessária para a realização do ferro fundido de grafita compacta, utilizada para a confecção de blocos de motores. Através desta análise é possível quantificar a quantidade de elementos necessários que deve ser adicionado a liga metálica para obter as melhores qualidades.

Apesar de existirem diversos equipamentos industriais, há um campo vasto para a análise térmica atuar. Não diretamente na liga metálica, mas nos componentes que constituem os diversos equipamentos de fundição, como por exemplo o lingotamento contínuo.

## 6. Ensaios experimentais para verificação da influência da taxa de resfriamento nas características macro e microestruturais da liga 356

Para verificar a influência das condições de resfriamento nas formações macro e ou microestrutural da liga 356, utilizou-se o sistema de fundição cilíndrico, anteriormente comentado. Foram fundidos lingotes cilíndricos em moldes de areia e cobre. Dois ensaios experimentais foram realizados. Nestes, obtiveram-se as curvas de resfriamento para as diferentes taxas de solidificação, além da aquisição de corpos de prova para realização das análises macro e microestruturais.

Na **Tabela 9**, são demonstrados os principais dados experimentais. Para a confecção dos moldes em areia aglomerada com resina, utilizou-se um misturador de areias apropriado, disponível no laboratório. Na prática, um tempo de mistura de 30 s entre cada resina adicionada foi considerado. A **Tabela 10** apresenta a composição dos moldes preparados.

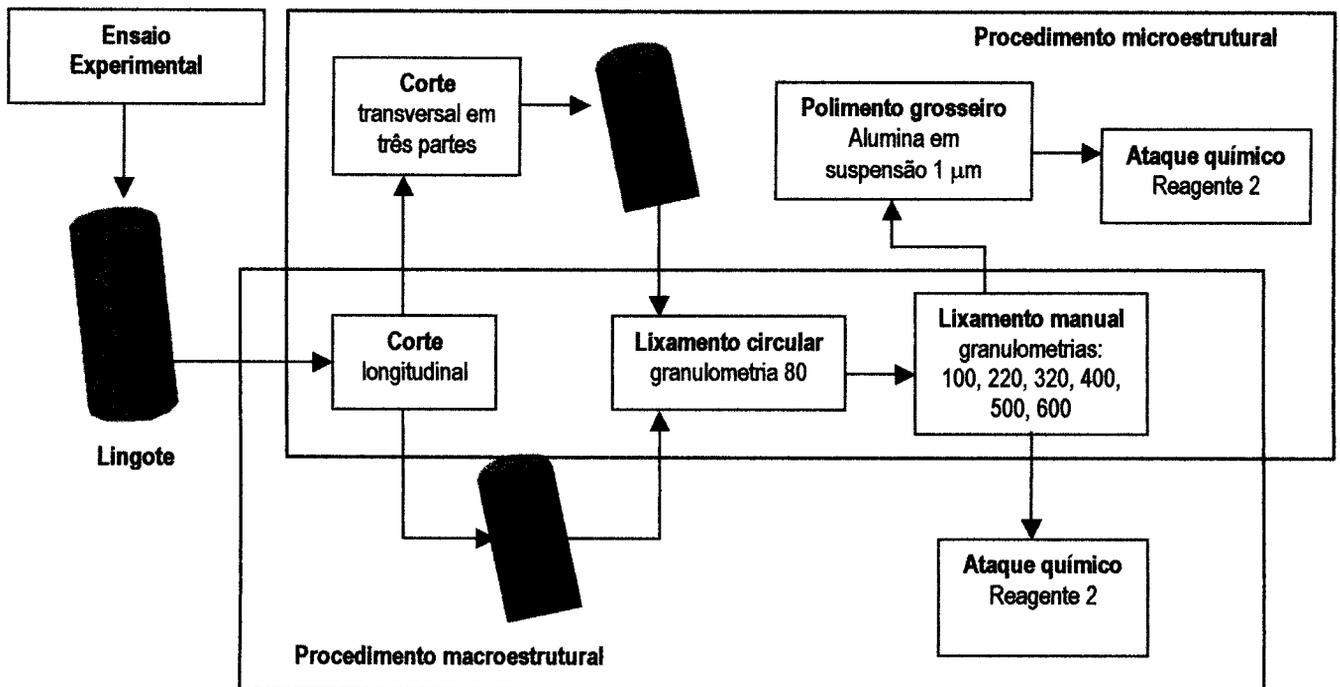
Os procedimentos para realização destas análises se desenvolveram conforme o fluxograma da **Figura 7**. As composições dos reagentes químicos utilizados na revelação macro e microestrutural são demonstrados na **Tabela 11**.

**Tabela 9.** Dados experimentais dos ensaios realizados com a liga 356.

| Ensaios | Carga (g) | Temperatura Ambiente [°C] | Temperatura de Vazamento [°C] | Objetivo                                                |
|---------|-----------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 01      | 627,00    | 17                        | 670 °C                        | 2 corpos de prova para análise macro e micro estrutural |
| 02      | 650,00    | 22 °C                     | 674 °C                        | Análises térmicas                                       |

**Tabela 10.** Composição química dos moldes confeccionados em areia aglomerada com resina.

| Ensaios | Areia (g) | Resina 1 [g] | Resina 2 [g] | Catalisador [g] |
|---------|-----------|--------------|--------------|-----------------|
| 01      | 2000,00   | 14,00        | 14,00        | 1,4             |
| 02      | 2300,00   | 15,10        | 15,10        | 1,51            |



**Figura 7.** Fluxograma ilustrativo dos procedimentos realizados para análise macro e microestrutural.

**Tabela 11.** Reagentes Químicos utilizados para revelação das macros e microestruturas [37].

| Reagente 01 – Macroestrutura |             | Reagente 02 – Microestrutura |             |
|------------------------------|-------------|------------------------------|-------------|
| Composição química           | % em volume | Composição química           | % em volume |
| HF (48%)                     | 15 %        | HF (48%)                     | 5 %         |
| HCl                          | 45 %        | HCl                          | 1,5 %       |
| HNO <sub>3</sub>             | 15 %        | HNO <sub>3</sub>             | 3 %         |
| H <sub>2</sub> O             | 25 %        | H <sub>2</sub> O             | 90,5 %      |

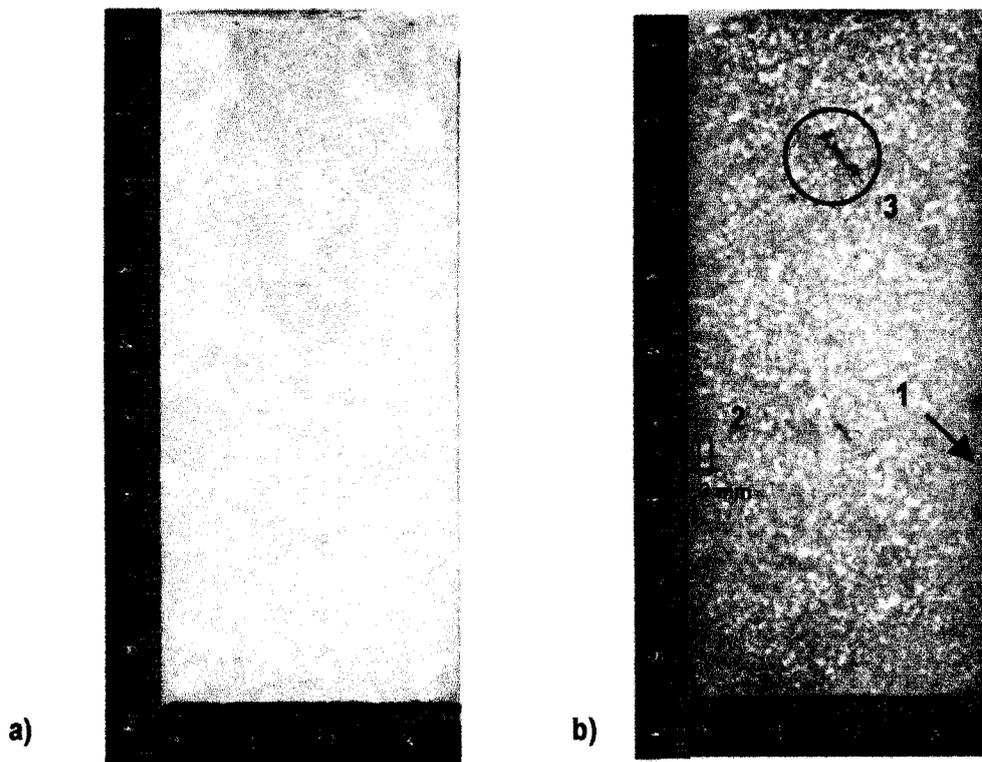
A liga 356 foi gentilmente cedida pela Sulina de Metais SA. Esta foi fornecida na forma de lingote, com o peso de 8,0 kg. O lingote apresenta composição química conforme a **Tabela 12**. A classificação da liga de acordo com as normas estabelecidas pela *Aluminum Association (AA)* é a 356.1.

**Tabela 12.** Composição química obtida através de análise espectrométrica do lingote da liga 356.

|         | %Si  | %Fe  | %Cu  | %Mn  | %Mg  | %Zn   | %Sn   | %Ti   | %Al   |
|---------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Lingote | 6,51 | 0,48 | 0,20 | 0,19 | 0,23 | 0,089 | <0,01 | 0,066 | 92,19 |

### 6.1. Análise Macroestrutural

Nesta análise procura-se comparar o refino de grão provocado ao aumentar a taxa de solidificação. As **Figuras 8a e 8b** apresentam as imagens digitalizadas das macrografias em tamanho real. A macroestrutura do lingote fundido em areia, **Figura 8a**, não apresenta zona coquilhada ou colunar. Os grãos são todos equiaxiais, com o tamanho variando de 1 a 4 mm. A seção esta repleta de microrechupes interdendríticos, confirmando a tendência da liga em apresentar um grande intervalo de solidificação pastosa. No lingote fundido em molde de cobre, a macroestrutura, **Figura 8b**, revela uma zona de grãos coquilhados na ordem de 1 mm e uma zona de grãos colunares de 2 mm. Os grãos equiaxiais variam de 0,2 a 1 mm de tamanho. O aumento da taxa de solidificação demonstra uma influencia na redução nos rechupes interdendríticos, porém há a formação de macrorechupe (3).

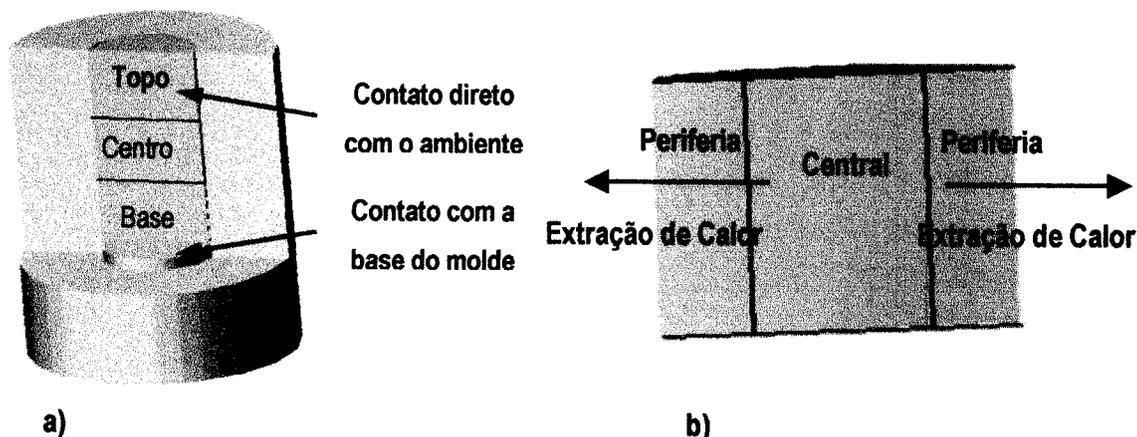


**Figura 8.** a) A macrografia do lingote fundido em areia, estrutura de grão equiaxiais na ordem de 1 a 4 mm; b) macrográfica do lingote fundido em cobre, observa-se uma fina zona coquilhada (1) e colunar (2), além da redução de rechupes interdendríticos, porém há a formação de macrorechupe (3).

É importante considerar que a liga 356 apresenta 0,066% de Ti, este é um conhecido refinador de grão. Os elementos refinadores além de promover sítios de nucleação, apresentam diversas vantagens que melhoram a qualidade do fundido. Dentre as quais, destaca-se o aumento na quantidade de grão equiaxiais, redistribuição e redução da porosidade, aumento na resistência a trincas a quente e melhoria nas propriedades de preenchimento. [32]

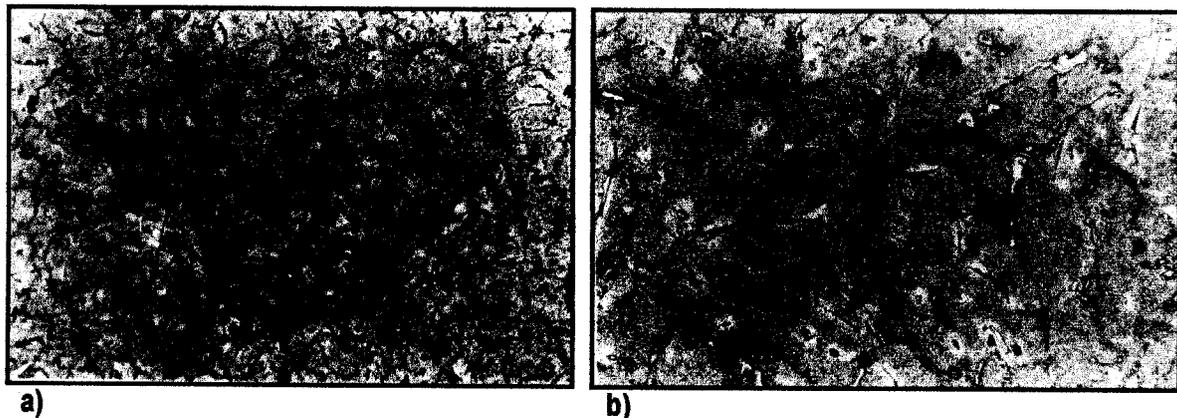
## 6.2. Análise Microestrutural

A análise microestrutural refere-se à região central do lingote. Esta escolha deve-se a condições mais homogêneas na extração de calor. Pode-se observar que as regiões da base e topo do lingote são influenciadas pela base do molde e pelo contato direto do metal com o ambiente, alterando a extração de calor durante a solidificação. Também se deve considerar que a região do topo é influenciada pelo rechupe de contração. A Figura 9a demonstra as regiões anteriormente comentadas. Na região central do lingote analisou-se duas regiões distintas. A periferia e o centro, **Figura 9b**.



**Figura 9.** Ilustração da seção do lingote em que foram realizadas as análises microestruturais. a) Corte longitudinal do sistema de fundição demonstrando a variação na taxa de solidificação provocada pelas diferentes condições de extração de calor; b) Seção central do lingote representando as regiões analisadas.

As **Figuras 10a até 15b** demonstram fotos das microestruturas analisadas por microscopia ótica. Na seqüência observada procura-se realizar uma comparação entre a formação microestrutural ao fundir a liga 356 em molde de areia e de cobre. O objetivo é identificar as fases formadas, observando suas características e alterações devido à modificação na taxa de extração de calor.



**Figura 10.** a) Micrografia da região periférica fundida em molde de cobre, aumento de 100 vezes. Rede dendrítica e fase eutética; b) Micrografia da região periférica fundida em molde de areia, aumento de 100 vezes. Fase eutética, (1) silício e (2) agulhas do intermetálico FeSiAl<sub>5</sub>.

Nas **Figuras 10a e 10b**, observadas acima, demonstram as regiões periféricas com 100 vezes de aumento. Nota-se um refino de 04 a 05 vezes ao fundir a liga em molde de cobre. Em ambas microestruturas é fácil identificar a rede dendrítica de alumínio primário (fase  $\gamma$ ) e a fase eutética. Na microestrutura formada em baixas taxas de solidificação (molde de areia) são possíveis identificar o silício (fase brilhosa) e poucas fases em forma de agulhas, nestas o ferro está presente geralmente na forma de  $\text{FeSiAl}_5$ .

Na **Figura 11** observa-se a micrografia da região central da amostra, fundida em molde de areia. Nota-se que a diminuição da extração de calor da periferia para o centro, gera uma maior formação das fases contendo ferro, no formato de agulhas.

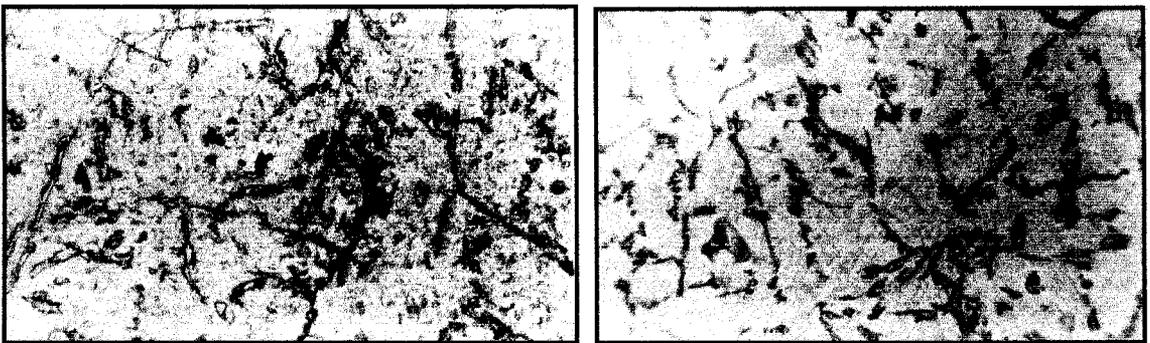


**Figura 11.** Micrografia da região central, fundida em molde de areia, aumento de 100 vezes. Em destaque estão as agulhas grossas do intermetálico  $\text{FeSiAl}_5$ .

Com taxas de resfriamento baixas, as agulhas de  $\text{FeSiAl}_5$  são grossas e estão concentradas no contorno de grão onde promove uma fratura frágil. Em taxas altas de resfriamento, as partículas de  $\text{FeSiAl}_5$  são bem menores e com uma distribuição mais uniforme.

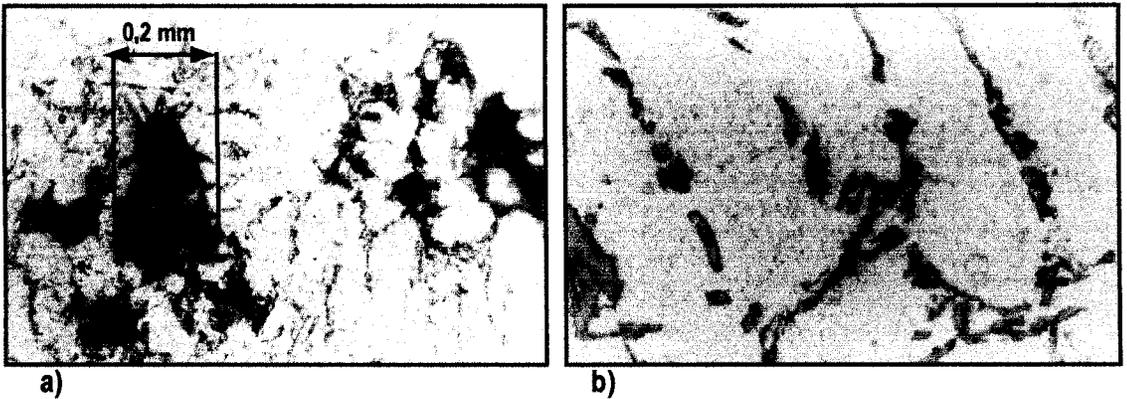
Nas ligas Al-Si, uma estrutura eutética irregular é observada. Ocorre um crescimento não facetado do alumínio em conjunto com os cristais facetados de silício. Isto depende das condições de crescimento (velocidade da interface e gradientes de temperatura) e a concentração no metal líquido. A fase do silício pode adotar uma variedade de morfologias. A baixas taxas de resfriamento, o silício está presente sobre a forma grosseira, acicular e lamelas interconectadas. As lamelas agem como iniciadores de trincas, e conseqüentemente a modo de fratura é frágil. A transição de lamelas para fibras ocorre em taxas de crescimento acima de 1 mm/s. A forma de fibra do silício minimiza a concentração de tensões, melhorando substancialmente a ductilidade em amostras rapidamente solidificadas. [32]

A tendência para a modificação morfológica da estrutura eutética pode ser observada nas **Figuras 12a e 12b**, onde observam-se as microestruturas fundidas em molde de areia e de cobre, com um aumento de 200 e 500 vezes, respectivamente. Ambas são relativas a região central do lingote.



**a)** Micrografia da região central fundida em molde de areia, aumento de 200 vezes; **b)** Micrografia da região central fundida em molde de cobre, aumento de 500 vezes.

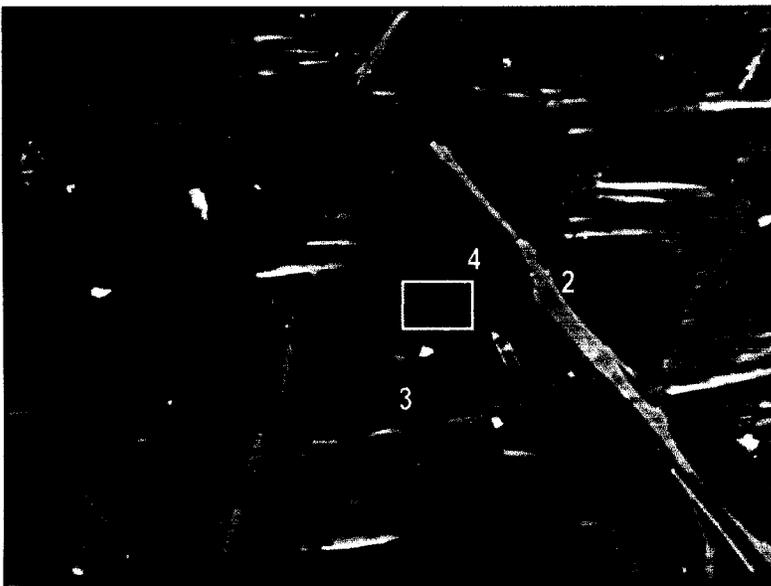
Na **Figura 13a** observam-se microrechupes interdendríticos com o tamanho de 0,2 mm. Este formado em baixas taxas de extração de calor (molde de areia) é observado com um aumento de 100 vezes. Na **Figura 13b** observa-se a microestrutura do lingote fundido no molde de cobre com um aumento de 1000 vezes. O objetivo é a mera curiosidade que move os estudantes de engenharia metalúrgica. É possível identificar a morfologia lamelar do silício além de observar elementos solúveis nas dendritas de alumínio primário.



**Figura 13.** a) Micrografia da região central fundida em molde de areia, aumento de 100 vezes. Tem por objetivo apresentar os microrechupes interdendríticos formados a baixas taxas de extração de calor; b) Micrografia da região central fundida em molde de cobre, aumento de 1000 vezes. Identifica-se a morfologia lamelar do silício e elementos solúveis nas dendritas de alumínio primário.

### 6.2.1. Identificação das fases microestruturais em MEV

Para complementação da análise microestrutural e identificação das fases formados observou-se no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), disponível no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), sob a supervisão do Prof. Francisco Kiss, duas amostras. A primeira, **Figura 14**, demonstra uma análise na região central do lingote sem ataque.



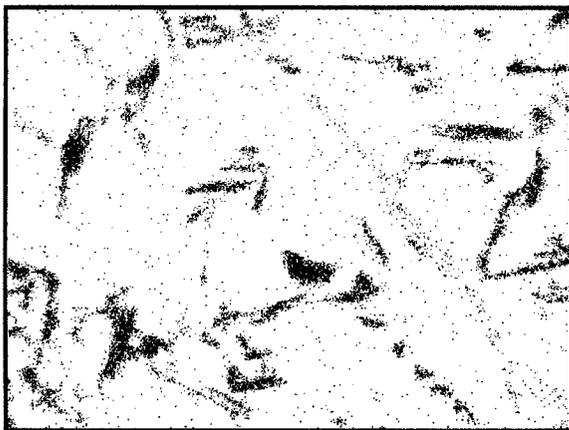
**Figura 14.** Microestrutura da região central do lingote fundido em molde de areia, sem ataque. A observação foi realizada em MEV com objetivo de identificar a composição das fases formadas. (2) Agulhas de  $\text{FeSiAl}_5$ , (3) Lâminas de silício; (4) Matriz

A composição química das fases formadas podem ser observadas na **Tabela 13**.

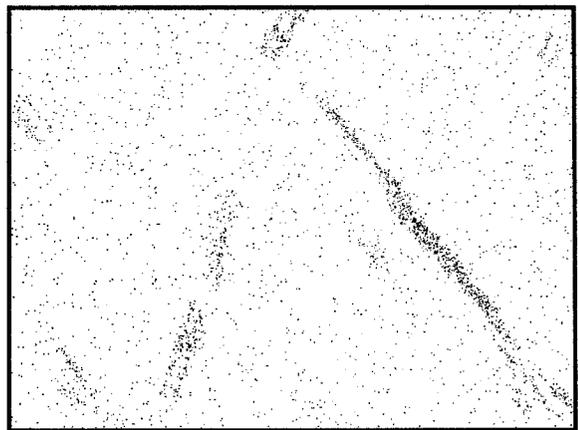
**Tabela 13.** Composição química das fases formadas, observadas na **Figura 14**.

| Composição Química e Identificação de Fases através de MEV |        |        |        |       |
|------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|-------|
| Fases Identificadas                                        | Al [%] | Si [%] | Mg [%] | Fe[%] |
| 1) Média (toda a janela)                                   | 76,37  | 21,97  | 1,60   | 0,59  |
| 2) Agulhas                                                 | 90,80  | 4,80   | 1,19   | 3,22  |
| 3) Lâminas de silício                                      | 3,92   | 94,96  | 1,00   | 0,12  |
| 4) Matriz                                                  | 95,23  | 3,31   | 1,21   | 0,25  |

Através dos recursos disponíveis no M.E.V. é possível realizar uma varredura de maneira a identificar em que regiões da microestrutura encontram-se os elementos de interesse. Nas **Figuras 15a** e **15b**, observam-se a localização do silício e do ferro na microestrutura observada na **Figura 14**.



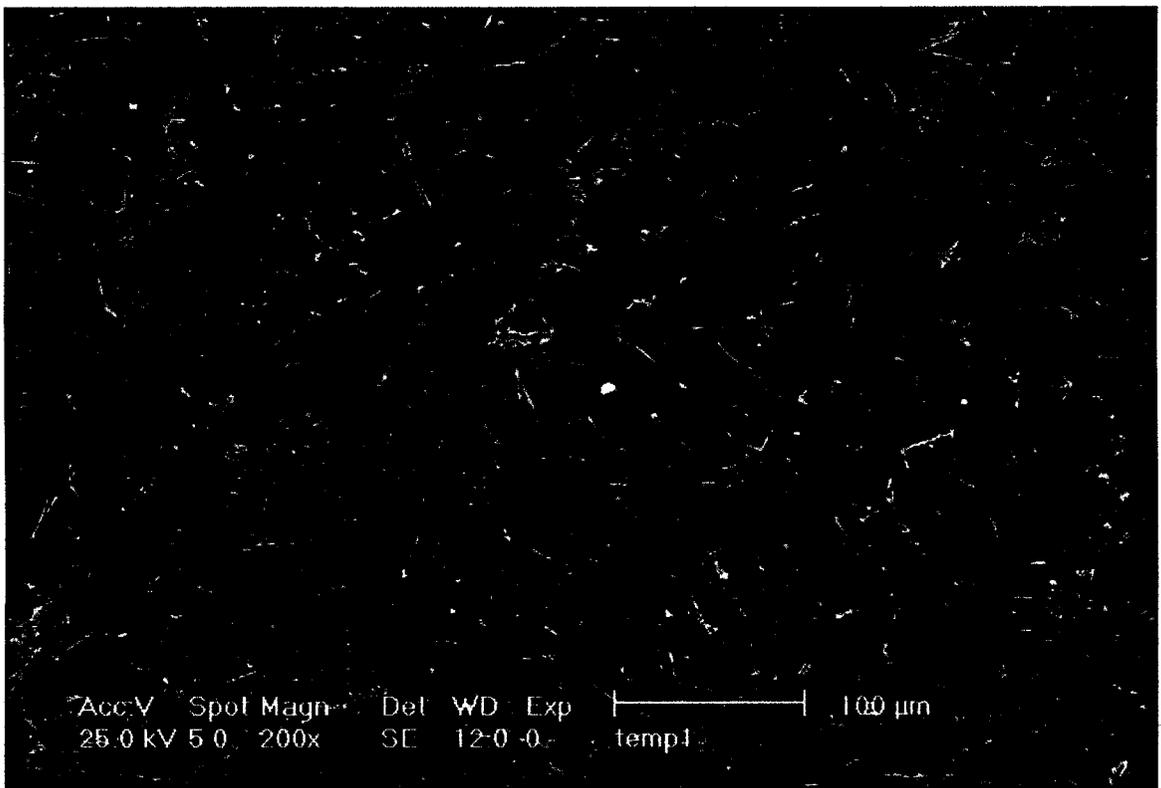
a)



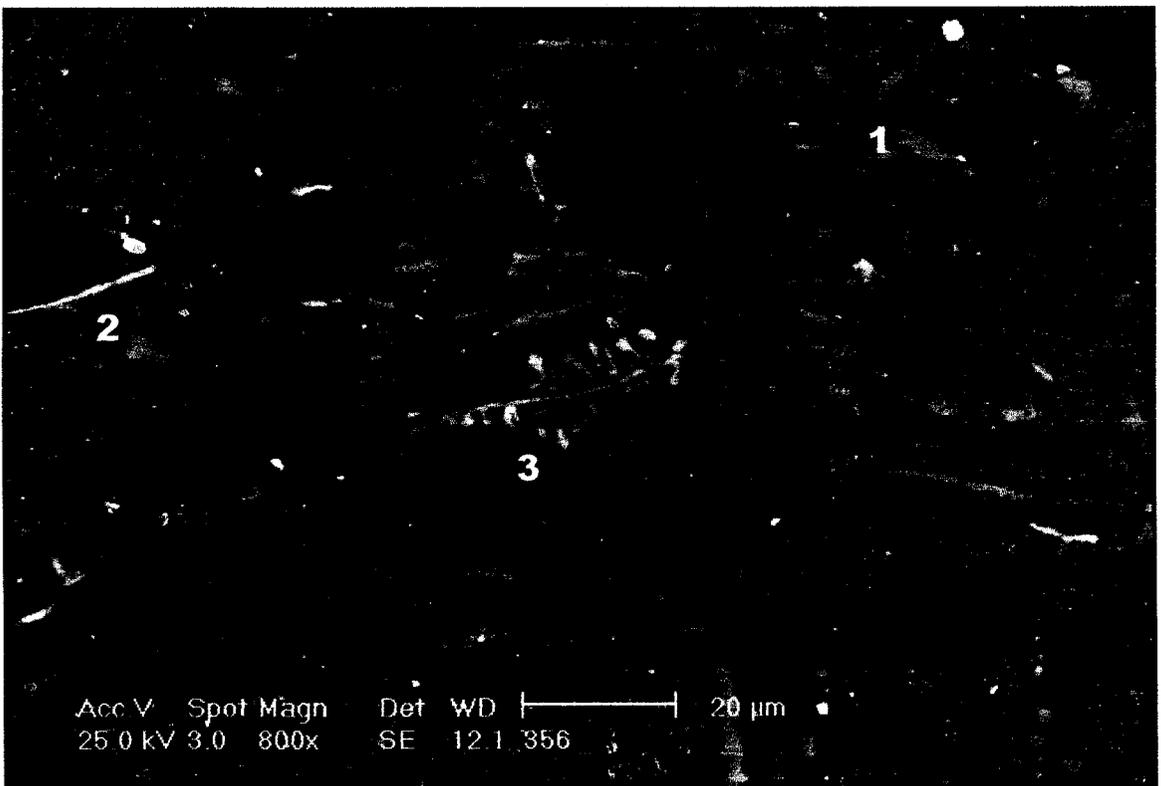
b)

**Figura 15.** Identificação da distribuição dos elementos silício (a) e do ferro (b) na microestrutura observada na **Figura 14**.

Na análise microestrutural via M.E.V, da seção do lingote fundido em molde de cobre (posição central), observada na **Figura 16**, pode-se identificar a rede dendrítica de alumínio primário ( $\alpha$ ) e a distribuição das partículas de eutético interdendrítico, com um aumento de 200 vezes. Com um aumento de 800 vezes, **Figura 17**, são possíveis de identificar as finas agulhas do intermetálico formado com o ferro (2), as lamelas de silício (1) e a fase em forma de escritura chinesa (3). Esta última é formada pela adição de manganês. Através de uma varredura da localização do elemento manganês, na **Figura 17**, não demonstrado neste trabalho, é possível observar que este elemento está presente no contorno da fase. Conclui-se, que este elemento modifica a tensão superficial da fase, transformando a morfologia das agulhas do intermetálico  $AlSiFe_5$ .



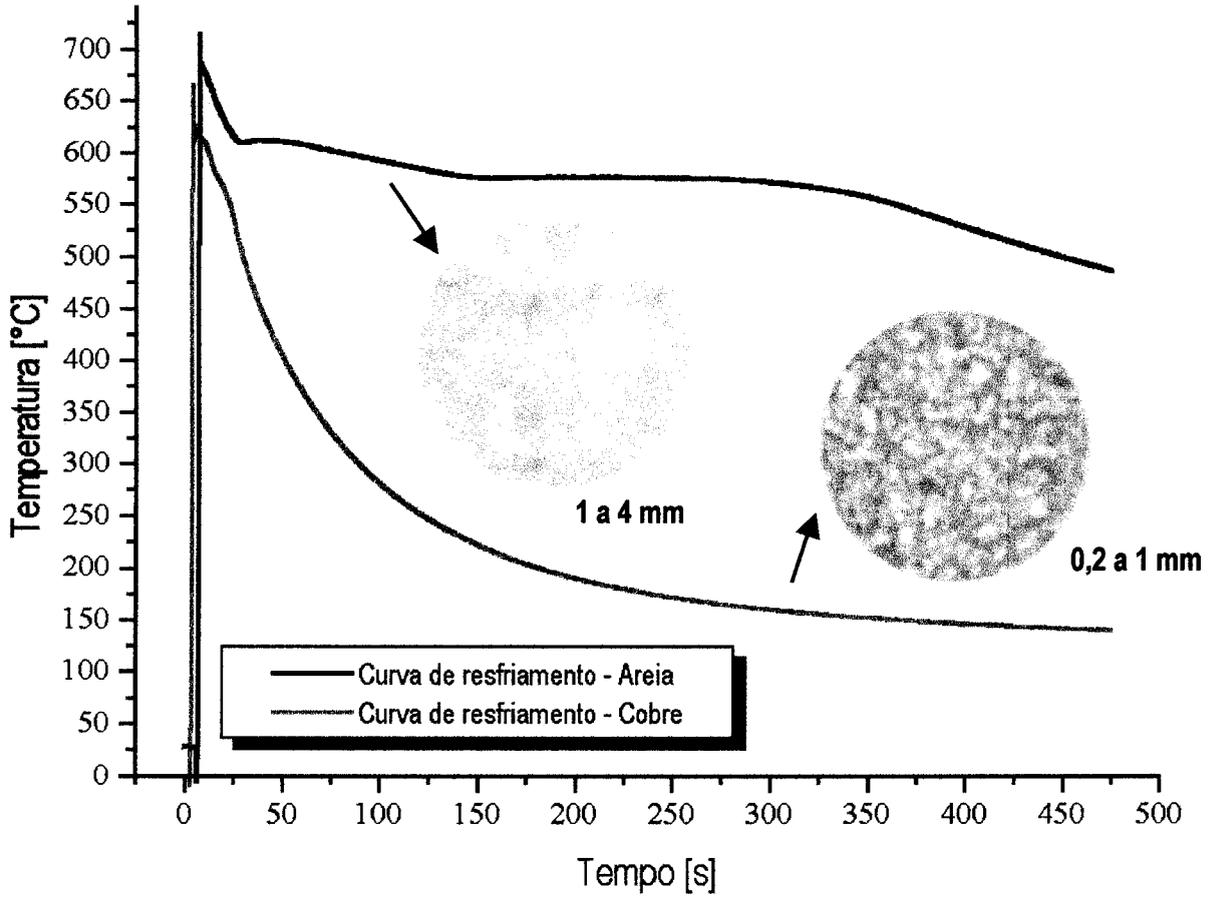
**Figura 16.** Microestrutura da região central do lingote fundido em molde de cobre, com ataque. A observação foi realizada em MEV com aumento de 200 vezes.



**Figura 17.** Microestrutura da região central do lingote fundido em molde de cobre, com ataque. A observação foi realizada em MEV com aumento de 800 vezes. (1) Lâminas de silício; (2) agulhas do intermetálico  $\text{FeSiAl}_5$ ; (3) Fase em forma de escrita chinesa, morfologia da agulha da fase (2) modificada pela adição de manganês,  $(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$ .

### 6.3. Formação macroestrutural e Curva de resfriamento vs. Taxa de solidificação

A **Figura 18** mostra a influência da taxa de resfriamento sobre a forma da curva de resfriamento e a macroestrutura formada. Ao fundir a liga 356 em molde cilíndrico de areia, observa-se que a forma da curva de resfriamento (curva preta) obedece às curvas encontradas na literatura para uma liga hipoeutética ideal. Onde é facilmente identificado o início de formação da fase primária (dendritas de alumínio), a região pastosa e o patamar eutético. Ao realizar o experimento em molde de cobre, fica clara a influência da taxa de solidificação sobre o formato da curva de resfriamento (curva laranja), chegando a suprimir os pontos de transformação, facilmente identificados na análise térmica a baixas taxas de extração de calor.



**Figura 18.** Curvas de resfriamento para diferentes taxas de extração de calor. Macroestrutura formada e respectivo tamanho de grão.

## 7. Estudo da modelagem

### 7.1. A modelagem numérica

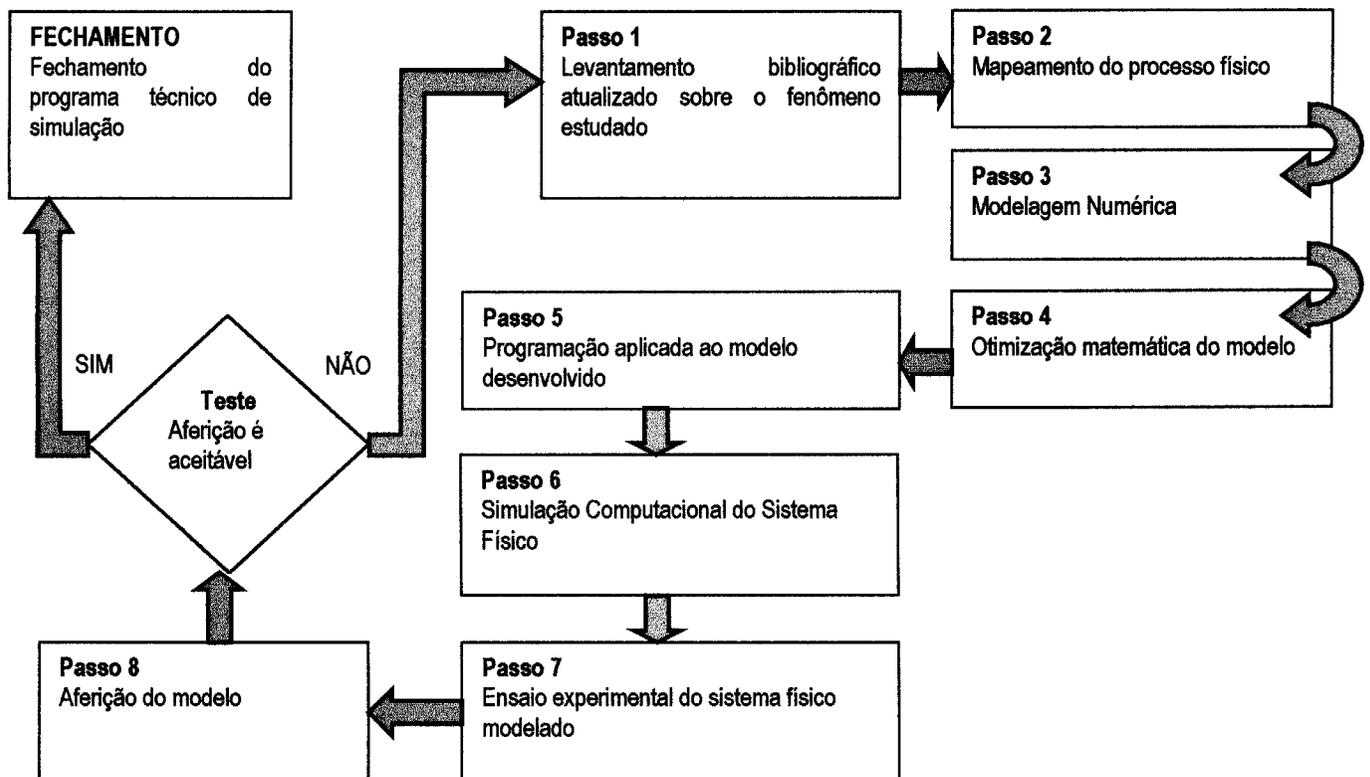
Já faz algumas décadas, que os engenheiros utilizam os modelos matemáticos, como uma ferramenta capaz de descrever fenômenos físicos completos, ou parte deles. A primeira conferência mundial, que teve como tema principal a modelagem matemática do fluxo de calor relativo a processos metalúrgicos ocorreu em Londres no ano de 1969. De lá para cá muito tem sido feito nesta área. O enorme crescimento da indústria de computadores, consolidada em 1982, a mecânica de fluidos computacional para a resolução de problemas de processos de deformação, solidificação e fabricação de ferro e aço. [15]

São diversos os fatores que levam profissionais a modelarem processos. Entre quais, a constante necessidade industrial por inovação tecnológica em produtos e processos produtivos, o aumento das especificações de qualidade, redução de tempo e custos de projeto, além da necessidade de compreender e controlar uma variedade de processos industriais complexos, são os principais motivos.

O início da modelagem de um processo industrial, dá-se com a formação de uma equipe de trabalho, com o objetivo final de solucionar um problema específico. Geralmente, experiências confusas são apresentadas para a equipe, e a partir de um conhecimento sólido das leis que regem tal processo, constroem o modelo matemático, composto de equações diferenciais e condições de contorno. A solução do modelo é obtida aplicando-se métodos numéricos adequados.

Estando pronto o modelo numérico, este é implementado em linguagem de programação, surgindo então, o programa. A partir desta etapa, os profissionais devem aferir e melhorar continuamente o trabalho desenvolvido.

Na **Figura 19**, o fluxograma ilustra as etapas para a confecção de um programa numérico de simulação.

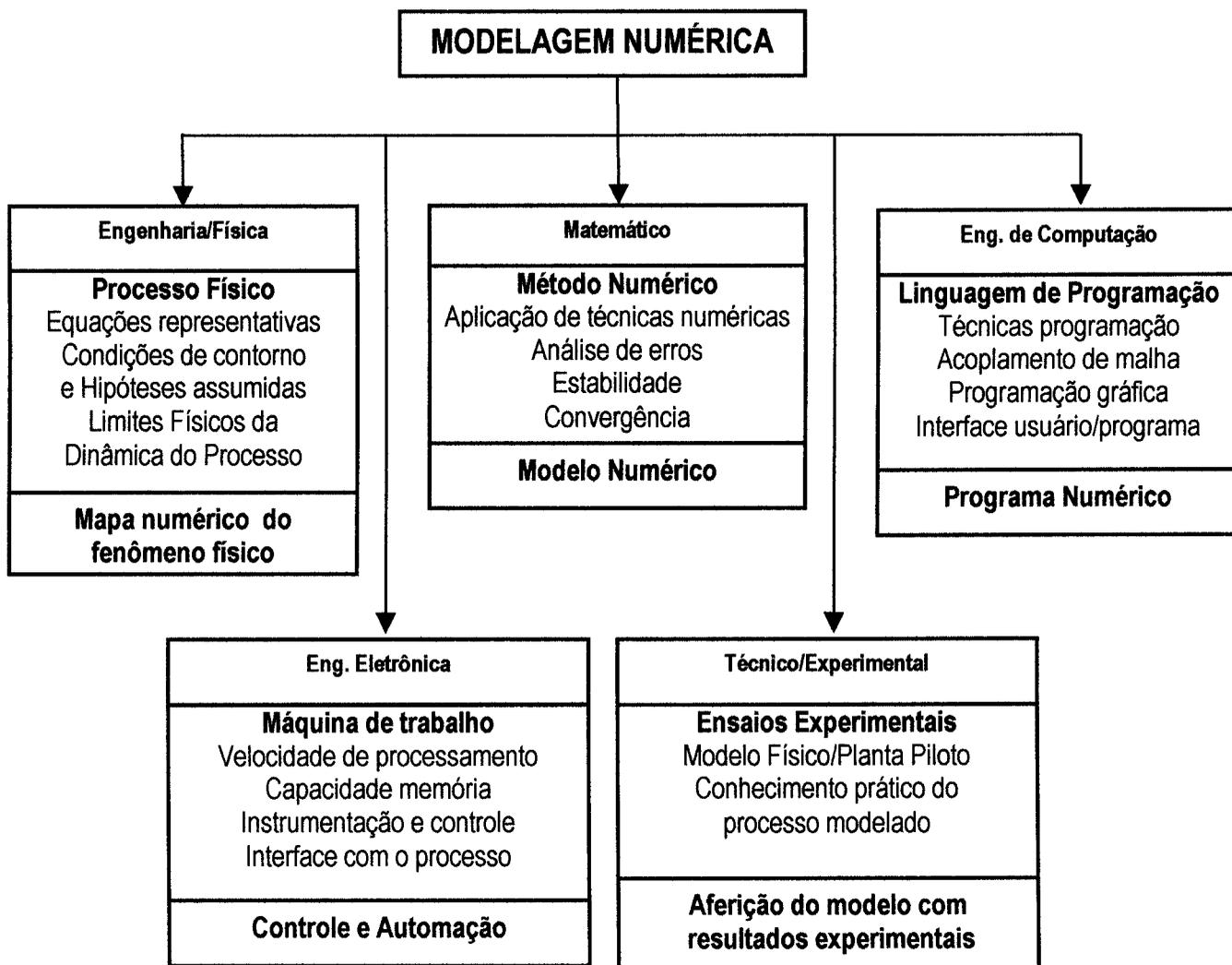


**Figura 19.** Passos para o desenvolvimento de programas de simulação de processos físicos envolvendo a modelagem matemática.

Uma equipe de profissionais é geralmente composta de técnicos, engenheiros e programadores. Este caráter interdisciplinar, conforme ilustra o fluxograma da **Figura 20**, torna-se a formação de uma equipe equilibrada uma de suas principais dificuldades. Outra grande dificuldade, está na seleção das condições de contorno e hipóteses assumidas pelo modelo. Somente técnicos e engenheiros com renomada experiência no fenômeno estudado, poderão realizar esta seleção com coerência, sem prejudicar os resultados gerados pelo modelo.

Hoje em dia, a velocidade com que se dá a evolução das ferramentas computacionais, é algo impressionante. O mesmo deve ser feito pelos profissionais da modelagem. A busca de novas tecnologias, deve ser tarefa de suma importância e rotineira.

A modelagem de um processo industrial é uma tarefa requer um longo tempo de estudo e resultados em longo prazo. A maioria das indústrias não tem um centro de pesquisa voltado para o estudo dos fenômenos transcorridos em seus mais diversos processos. Com isto faz-se necessário à integração com os centros de pesquisas ou universidades. E infelizmente aí está outra dificuldade, senão a maior delas, o pouco investimento no panorama da pesquisa brasileira.



**Figura 20.** O fluxograma ilustra a multidisciplinaridade necessária ao formar uma equipe de profissionais com objetivo de modelar um determinado processo industrial.

## 7.2. A modelagem numérica na indústria metalúrgica

Ao longo dos últimos trinta anos a modelagem numérica dos mais diferentes e variados tipos de processos da indústria metal-mecânica, tem sido utilizada como uma poderosa ferramenta para a minimização dos custos de produção e a elevação da qualidade de uma ampla diversidade de produtos. A evolução acentuada da indústria de informática e o aumento da capacidade de processamento e sistemas de *hardware*, tem continuamente permitido aos modelistas o desenvolvimento de programas cada vez mais capazes de responder com grande velocidade os problemas, defeitos e as imperfeições de projetos, eliminando definitivamente as antigas e ultrapassadas metodologias de tentativa e erro.

Em processos metalúrgicos que envolvem uma gama de fenômenos complexos, como as operações em uma máquina de lingotamento contínuo ou o funcionamento de um alto-forno, nota-se claramente a importância da modelagem numérica. A experiência operacional atinge um determinado limite onde a resolução de certos problemas não é mais possível sem a utilização de ferramentas computacionais de alta performance em análises numéricas. Somente com a utilização da simulação o engenheiro usufrui um melhor entendimento e visualização do fenômeno transcorrido. E por conseqüência, utilizando-a inicialmente como uma ferramenta de análise, a partir de uma atuação ou automatização de processo, o engenheiro ajusta os parâmetros de processo com o objetivo de atingir um determinado equilíbrio ou minimizar e até eliminar um determinado defeito.

Pode-se afirmar que o berço da utilização de modelos matemáticos para a previsão dos fenômenos transcorridos nos processos industriais metalúrgicos, está na indústria siderúrgica. Os japoneses recebem o mérito de serem os primeiros e atuais líderes na simulação numérica do comportamento de alto-fornos. A aplicação desta tecnologia, aprofundou a visão dos engenheiros sobre os fenômenos transcorridos durante o processo, resultando em uma nova etapa que sucede a simulação, onde o principal objetivo é o controle global do processo.

É muito interessante a relação entre a simulação e o parque industrial. Primeiramente, podemos realizar uma tentativa de descrição do parque industrial metalúrgico nacional. Este é constituído de empresas de pequeno, médio e grande porte. Em todas as três classes mencionadas, temos os mais diversos perfis de empresas, ou seja, existem indústrias onde o seu ramo de mercado sustenta um processo praticamente artesanal, onde o conhecimento técnico está concentrado em seu corpo técnico e não há aplicação e desenvolvimento de novas tecnologias. A outras empresas, em que o mercado e também o tipo de produto fabricado, exigem que estas sejam extremamente competitivas, utilizando recursos de última geração, e uma contínua melhoria de processo.

Pegando como exemplo, uma indústria de fundição de médio porte, a maior preocupação dos engenheiros é o saneamento de inúmeros problemas internos, que nada tem haver com a simulação. Tais problemas, geralmente focam-se sobre a linha de produção, no sentido de controle e repetibilidade do processo. Normalmente, estas empresas têm um engenheiro projetista, com ampla experiência, que realiza o trabalho do desenvolvimento do sistema de alimentação das peças produzidas, é claro que a simulação auxilia o seu trabalho, porém a visão da empresa está em sanear os inúmeros problemas relacionados à produção.

No Brasil, de maneira lenta, mas progressiva, vêm crescendo a utilização de simuladores na indústria metal-mecânica. Entre diversos motivos pelos quais a modelagem não tem um maior emprego, pode-se citar: a falta de conhecimento sobre o assunto, e o custo elevado dos programas de simulação.

### 7.3. A modelagem numérica na indústria de fundição

Durante as últimas décadas, a modelagem matemática de processos metalúrgicos, tem alcançado posições de relevante consideração técnica e forte interesse industrial. O avanço tecnológico, mencionado anteriormente, tem permitido o estudo e a aplicação de modelos de significativa complexidade estrutural, entre os quais o mapeamento matemático integral de um processo específico torna-se perfeitamente possível nos dias atuais. Sistemas de modelo desenvolvidos sobre complexas rotinas tridimensionais capazes de mapear numericamente fluxo de fluido e calor, transporte de massa, análise de tensões mecânicas, efeito de contração térmica, formação de poros e defeitos nos fundidos, crescimento de grão, segregação, por fim todo o comportamento físico de um processo de fundição, dentro do qual ocorrem simultaneamente diversos tipos de fenômenos aparentemente distintos.

A simulação numérica tem por objetivo final prever a formação de defeitos e fornecer ao projetista, dados e informações, que conduzirão a um projeto otimizado em termos de falhas. Outra grande vantagem da modelagem numérica se refere ao fato da economia de insumos dentro da indústria, a redução dos custos de produção e aumento na velocidade em se obter um projeto qualificado.

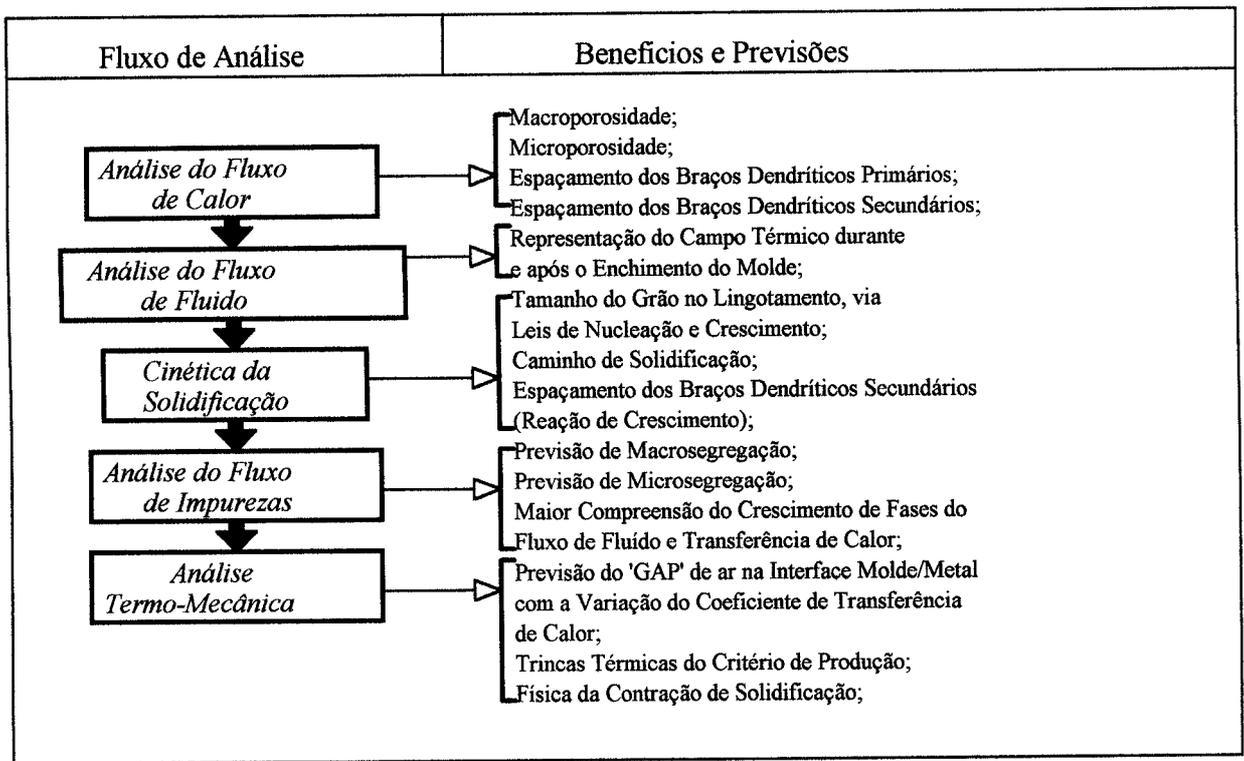
Alguns dos programas de fundição mais importantes, disponíveis no mercado atualmente, encontram-se dispostos na **Tabela 14**. É importante destacar que o custo médio dos pacotes descritos na **Tabela 14**, varia no mercado na ordem de U\$5,000 a U\$100,000, sendo assim inacessíveis às empresas de pequeno e médio porte.

**Tabela 14.** Relação de Pacotes Numéricos utilizados na Modelagem de Processos

| Nome        | Aplicação                                                                 | Técnica Numérica    |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| AMESH       | Fundição                                                                  | .....               |
| ANSYS       | Estrutural, Térmica, Elétrica e Magnética                                 | Elementos Finitos   |
| ABAQUS      | Estrutural (não Linear), Térmica                                          | Elementos Finitos   |
| NASTRAN     | Estrutural                                                                | Elementos Finitos   |
| FIDAP       | Dinâmica de Fluidos                                                       | Elementos Finitos   |
| PROCAST     | Fundição                                                                  | .....               |
| FLOW 3-D    | Dinâmica de Fluidos                                                       | Elementos Finitos   |
| FLOWTRAN    | Simulação de Fluxo Geométrico                                             | .....               |
| PATRAN      | Modelagem de Sólidos, Pré e Pós-Processamento                             | .....               |
| RAPID/CAST  | Fundição                                                                  | .....               |
| SOLIDCAST   | Fundição, Térmica                                                         | Diferenças Finitas  |
| MAGMASOFT   | Fundição, Térmica, Crescimento de Grão, Estrutura de Fundição, Enchimento | Elementos Finitos   |
| CONIFERCAST | Fundição, Térmica, Crescimento de Grão, Estrutura de Fundição, Enchimento | Elementos Finitos   |
| CRACK X     | Lingotamentio Contínuo, Térmico,                                          | Diferenças Finitas, |
| INALC       | Lingotamentio Contínuo, Térmico, Inteligência artificial                  | Diferenças Finitas, |
| CFX         | Mecânica de Fluidos, Térmico                                              | Elementos Finitos   |

A implementação gradativa dos computadores neste tipo de indústria surgiu devido à necessidade de melhoria de qualidade dos produtos manufaturados, exigindo análises complexas em relação aos diversos parâmetros envolvidos nos sistemas globais de fundição. Transientes térmicos, mudanças de fase, crescimento de microestrutura, contração do metal na interface metal/molde e efeitos do transporte de calor e de massa, são alguns dos principais fatores que envolvem todo um complexo processo de fundição. Tais parâmetros, hoje estudados por diversos autores, objetivam a compreensão física do processo, via uma análise matemática possível de ser implementada em programas computacionais que venham solucionar de forma rápida e eficiente, as melhores condições de trabalho para um determinado sistema de fundição, gerando assim um determinado produto de

características ótimas para sua aplicação. A Figura 21 é uma representação esquemática dos tipos fundamentais de análise, requeridos para a descrição completa de um processo de fundição.



**Figura 21** Tipos de Análises Avaliadas para Modelos de Processos de Solidificação e seus Benefícios.

O levantamento de todas as características envolvidas em um sistema de solidificação, desde a preparação da liga ou material utilizado até a sua eventual desmoldagem, deve ser minuciosamente acompanhado por uma base teórica, voltada aos principais problemas de efeito final do produto gerado. A quantidade de impurezas indesejáveis na preparação das ligas utilizadas, como o caso do Ferro na liga A356, deve ser acompanhada, podendo estas gerar imperfeições superficiais ou em casos mais críticos, núcleos de microtrincas que podem levar a peça à ruptura, se esta estiver sujeita a solicitações de esforços mecânicos cíclicos (rodas automotivas). O superaquecimento imposto ao metal líquido antes do vazamento é de importância clara, já que temperaturas de vazamento muito próximas à temperatura de solidificação podem gerar defeitos devido ao preenchimento incompleto do molde, uma vez que a queda de temperatura tende a elevar a viscosidade do metal líquido, e temperaturas de vazamento muito elevadas podem levar a uma solidificação muito lenta, gerando grãos muito grandes, elevando a ductilidade do material, ou conduzindo a um crescimento dendrítico alongado causando um acúmulo excessivo no volume das bolhas internas aos braços dendríticos.

A estrutura física do molde, material utilizado na sua confecção, características de lubrificante e pré-aquecimento antes do vazamento são fatores de importância na análise do processo de transferência de calor na interface metal/molde. Este conhecimento pode evitar imperfeições superficiais nas peças produzidas, bem como toda a análise em relação ao processo de solidificação e o acompanhamento dos fenômenos de transferência de calor nesta interface deve ser realizada visando o conhecimento da microestrutura formada nesta região da peça. As contrações inerentes ao material durante o processo de solidificação devem ser calculadas em projeto dimensional evitando falhas na peça após a desmoldagem final.

Todo o efeito da cinética de solidificação em relação ao desenvolvimento da nucleação, crescimento de grão e microestrutura formada é relacionado com a velocidade de solidificação e os gradientes térmicos envolvidos, podendo ser diretamente examinado por intermédio de modelos de solidificação. O efeito de rejeição de soluto sobre a previsão da macro e microsegregação é observado em função da análise do fluxo de espécies, onde modelos numéricos permitam não apenas a

simulação do efeito de transporte de calor, mas também o efeito do transporte de massa sob o envolvimento das movimentações térmicas internas ao material.

Contudo, um modelo matemático para ser prático deve observar o respeito às leis de desenvolvimento de fases, devendo este acompanhar a morfologia da interface sólido/líquido para materiais de composição simples e das interfaces sólido/intermediário/líquido para a composição de ligas binárias complexas. Todo o conhecimento sobre a formação de defeitos, segregação de soluto e desenvolvimento microestrutural são de importância fundamental para se desenvolver um modelo aplicado. A desmoldagem final também deve ser acompanhada por efeitos de modelo, uma vez que a retirada prematura do molde pode expor à peça a gradientes térmicos elevados, podendo gerar assim situações de empenamento em regiões finas da peça.

Finalmente, o conhecimento e levantamento da análise termo-mecânica, visando as características finais da peça, devem ser avaliadas sobre as previsões micro e macroestruturais do modelo, resultando eventualmente em aumento de qualidade do produto acabado.

Dentro de um escopo integral do sistema de solidificação, pode-se levantar como situações de importância os seguintes efeitos:

### **A) Efeitos de Ordem Macroestrutural:**

- ❑ Interface Metal/Molde;
- ❑ Formação de Poros;
- ❑ Mudança de Fase;
- ❑ Contração de Solidificação e Rechupe;
- ❑ Formação de Bolhas ou Aumento da Viscosidade com a Queda da Temperatura e Retenção de Bolhas Internas;
- ❑ Enchimento Completo de Molde;
- ❑ Porosidade Central e/ou Localizada em Peças de Geometria Complexa;
- ❑ Convecção na Mudança de Fase;
- ❑ Propriedades Térmicas do Molde e do Lubrificante;
- ❑ Defeitos Macroestruturais sob a Influência de Impurezas de Liga;
- ❑ Arraste de Escória;
- ❑ Influência do Superaquecimento no Metal Líquido.

### **B) Efeitos de Ordem Microestrutural**

- ❑ Tamanho de Grão;
- ❑ Microporosidade;
- ❑ Morfologia Dendrítica;
- ❑ Homogeneização das Propriedades da Liga ao Longo da Peça;
- ❑ Redistribuição Homogênea de Soluto;
- ❑ Defeitos de Ordem Microestrutural causados sob a Influência de Impurezas;
- ❑ Dependência das Propriedades Físicas com a Temperatura;
- ❑ Variação do Coeficiente de Microsegregação;
- ❑ Efeitos Relacionados à Região Intermediária ou Zona Pastosa em Ligas Binárias;
- ❑ Influência do Superaquecimento na Microestrutura da Peça.

Tais efeitos constituem de forma integrada os principais problemas associados à solidificação de ligas metálicas. Na literatura especializada encontram-se narrativas técnicas abordando cada um dos itens expostos anteriormente, mapeando os efeitos físicos sobre formulações matemáticas que representem um conhecimento global de análise. O plano final consiste em conduzir toda esta análise da solidificação ao desenvolvimento de algoritmos e programas numéricos que caracterizem simulações dentro de representações adequadas aos sistemas físicos do processo de fundição.

## 8. Estudos de Casos

Este capítulo tem por objetivo demonstrar aplicações da modelagem numérica na indústria de fundição. Os esforços principais na atual indústria têm duas metas principais: (a) produzir fundidos de melhor qualidade, e com menores taxas de refugo; além de (b) aumentar a produtividade.

A primeira meta pode ser alcançada ao se controlar certos parâmetros para assegurar a qualidade do metal. Uma boa prática de revestimento da panela e do tratamento do metal garante a mínima contaminação do metal líquido. Isto, seguido por uma transferência eficiente de panela, permite que o metal limpo alcance o molde com perdas mínimas de temperatura. A segunda meta requer perícia. Não é mais aceitável colocar um massalote muito grande no fundido, com o propósito de fazer a alimentação ou de vaziar o metal através de complexos sistemas de distribuição e ataque. As duas práticas reduzem o rendimento de um fundido geralmente para menos de 50%.

As exigências nessa indústria competitiva ditam que um fundido deve ser feito com a mínima quantidade de metal. Para isso ser controlado com exatidão, é preciso estabelecer um método para determinar se os menores alimentadores colocados corretamente, que produzirão fundidos em boas condições. Assim, o conhecimento técnico combinado com resultados simulados em computador, traça prognósticos de vazamento do metal para suprir a fundição com um pacote completo de programas indicando a prática mais eficiente para a confecção de fundido com baixo custo e alta qualidade. [26]

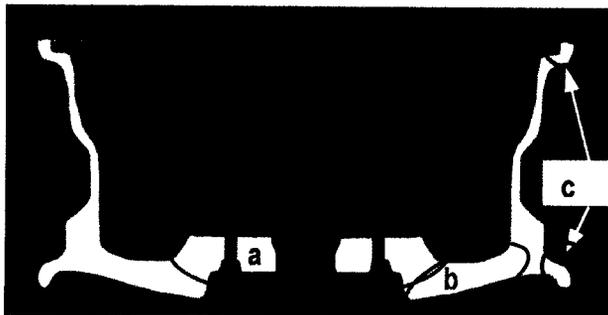
### 8.1. Estudo de Caso 1: Fundição de rodas em ligas de alumínio pelos processos de baixa pressão e de gravidade [38]

Para produzir rodas automotivas com alto desempenho é necessário combinar três propriedades mecânicas: O limite de escoamento, o limite de resistência e o alongamento. O limite de escoamento é aumentado devido a mecanismos de endurecimento. O alongamento ou ductilidade do material atrasa os mecanismos de fratura. A combinação destas duas propriedades aumenta a tenacidade e o limite de fadiga do material. Pela necessidade de se obter tais características mecânicas, além de um baixo peso específico, as rodas automotivas são produzidas com as ligas A356.0 e A413.0.

Uma roda está sujeita a altas rotações. Este tipo de aplicação gera um carregamento de alto ciclo. Conseqüentemente, a principal propriedade deste componente será a resistência à fadiga. Na **Figura 22**, destacam-se três regiões que recebem as maiores solicitações mecânicas em serviço. (a) Fixação do componente ao cubo de roda (fadiga); (b) Aleta (fadiga); (c) Borda do aro (impacto).

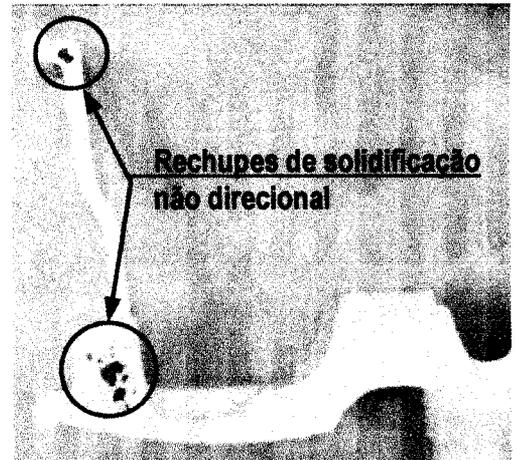
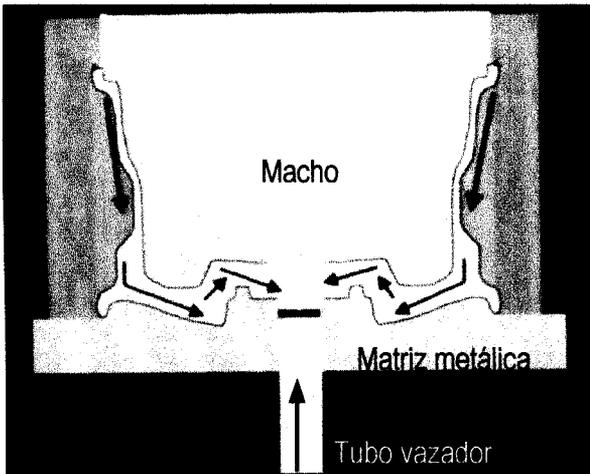
Para evitar ou atrasar a fratura devido à fadiga do material, os profissionais da área de fundição procuram eliminar ou reduzir os defeitos microestruturais. Estes promovem a concentração de tensões, sendo esta extremamente nociva à vida de fadiga do material. Como: porosidades, microporosidades, inclusões de óxidos, tamanho e morfologia alongada das fases ( $FeSiAl_5$ ), tratamento de modificação.

Neste contexto, é que se aplica a modelagem. A previsão das características térmicas de processo ao longo da solidificação é fundamental para identificar as regiões na peça em que formaram os defeitos citados acima. A partir de simuladores numéricos é possível projetar diversos sistemas de fundição e verificar qual será o mais eficiente para redução de tais defeitos.



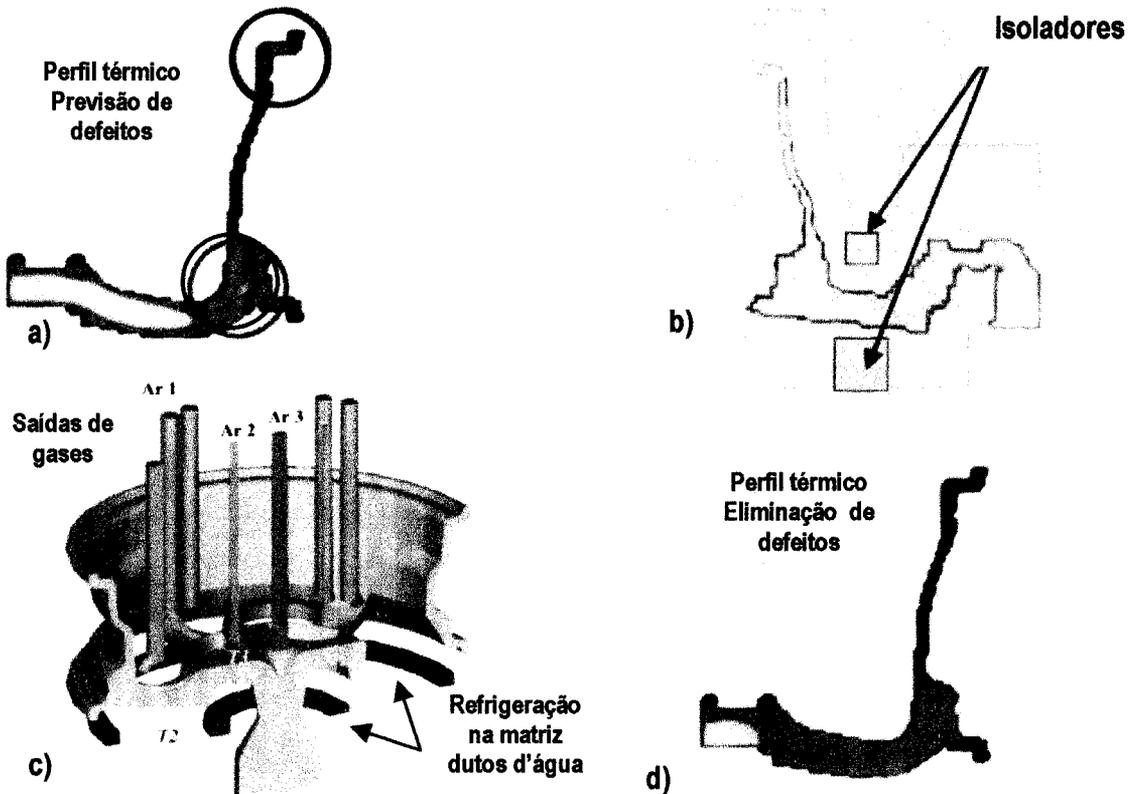
**Figura 22.** Perfil de um roda automotiva, representando as principais solicitações mecânicas em serviço. (a) Fixação do componente ao cubo de roda (fadiga); (b) Aleta (fadiga); (c) Borda do aro (impacto).

A produção de rodas fundidas pelo processo de baixa pressão, é geralmente realizada tendo como molde inferior uma matriz metálica, sendo que o enchimento é contra a gravidade realizado por um tubo vazador. O projeto de fundição deverá estabelecer uma solidificação direcional, **Figura 23a**, de maneira a reduzir a micro e macroporosidades provocadas por defeitos do tipo rechupes, **Figura 23b**.



**Figura 23.** a) Sistema de fundição para a produção de rodas fundidas pelo processo de baixa pressão, destacando a solidificação direcional que deverá ser estabelecida para evitar a formação de defeitos. (b) defeito de porosidade devido à solidificação não direcional.

A partir da análise das isothermas geradas pelo simulador, optou-se pela aplicação de isoladores em pontos estratégicos, e a utilização de dutos d'água para a refrigeração da matriz metálica, **Figura 24c**. Os resultados simulados, **Figuras 24a**, **24b** e **25d** demonstram o direcionamento da solidificação.



**Figura 24.** Resultados obtidos com a simulação e re-projeto de sistema de fundição. a) Perfil térmico demonstrando a formação de defeitos; b) Re-projeto com a utilização de isoladores térmicos; c) visualização de todo o sistema de fundição re-projetado, utilização de dutos d'água para resfriamento na matriz metálica e canais de ar, para a eliminação de gases.

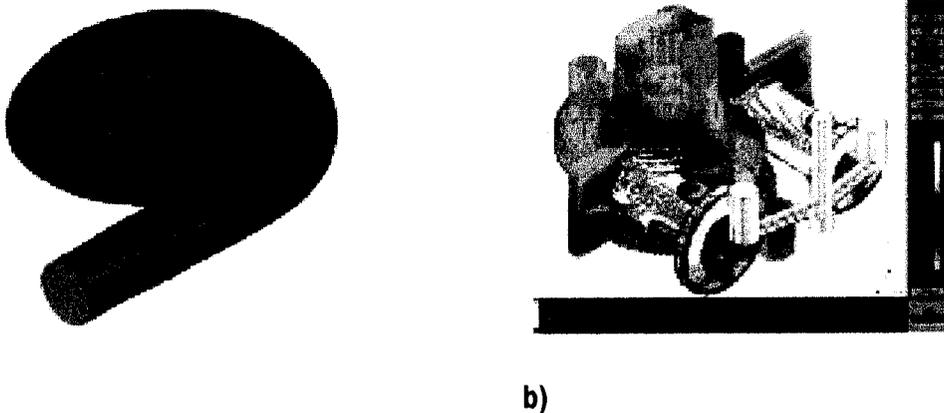
## 8.2. Estudo de Caso 2: CAD/CAM permite significativa redução de peso e custos na Indústria David Brown Pumps [39]

A simulação esta cada vez mais presente na indústria de fundição. Novas tecnologias são abordadas para aumentar a produtividade. Este conceito de projeto incorpora a redução significativa na espessura de parede em uma carcaça de uma bomba hidráulica. O fundido de 25 passa para 20 mm de espessura de parede. Para executar esta modificação, a indústria procura as mais avançadas técnicas de manufatura e projeto assistido por computador.

A Casting Technology International (CTI), identificou como sendo necessária para execução do projeto uma análise por elementos finitos e simulação do fenômeno de fundição, antes de produzir por prototipagem rápida os machos e moldes em larga escala, **Figura 25a**. As tarefas fundamentais eram avaliar primeiramente como uma redução substancial na seção da parede satisfaz as exigências de desempenho dentro do Instituto de Petróleo Americano (API) 610, e segundo, se os componentes podem ser fabricados atendendo prontamente as quantidades e exigências de custo.

O sistema de fundição foi simulado utilizando o MAGMASoft, **Figura 25b**. As simulações realizadas para verificar a influência da redução de parede na sanidade do fundido, realçaram a necessidade por alimentação adicional em uma área específica do componente. Entretanto, não há uma área disponível suficiente para colocar alimentadores ou massalotes. Depois das análises com o auxílio do simulador, uma quantia pequena de material foi somada para prover a superfície exigida.

Com o auxílio da simulação, os engenheiros da CTI que têm muitos anos de experiência prática em projetos de sistemas de alimentação e técnicas de produção de fundidos, descobriram e resolveram um problema de contração em uma área do fundido sem conexão com a seção de parede reduzida. Esta área foi considerada desprovida de alimentação metálica, assim o projeto de fundição foi modificado removendo o rechupe e conseqüentemente aumentando sua integridade.



**Figura 25.** a) machos e moldes produzidos em larga escala por prototipagem rápida; b) Simulação utilizando o simulador comercial *MAGMASoft*.

O projeto foi executado dentro dos prazos designados e mais rapidamente que teria sido possíveis usando métodos tradicionais. Mais importante, alcançou-se uma redução de peso significativo e conseqüentemente poupou custos em comparação com projetos anteriores. O fato que os protótipos de fundidos e os resultados dos testes estão de acordo com as predições do programa, dando para *David Brown Pumps* a confiança em aplicar técnicas simultâneas de engenharia assistida por computadores em projetos de futuros. Agora a companhia vê a criação de modelos sólidos 3D como um componente fundamental nas atividades de projeto e desenvolvimento, ajudando alcançar reduções de tempo e avanços de projetos melhores, com baixo custo para o cliente. O fundido atendeu as normas ASTM E446, nível I: padrão em Raio-X, e aprovado nas inspeções de líquidos penetrantes e partículas magnéticas.

### 8.3. Estudo de Caso 3: Aplicação da simulação da porosidade em componente de suspensão automotiva em alumínio (Reprojeto de Componente) [40]

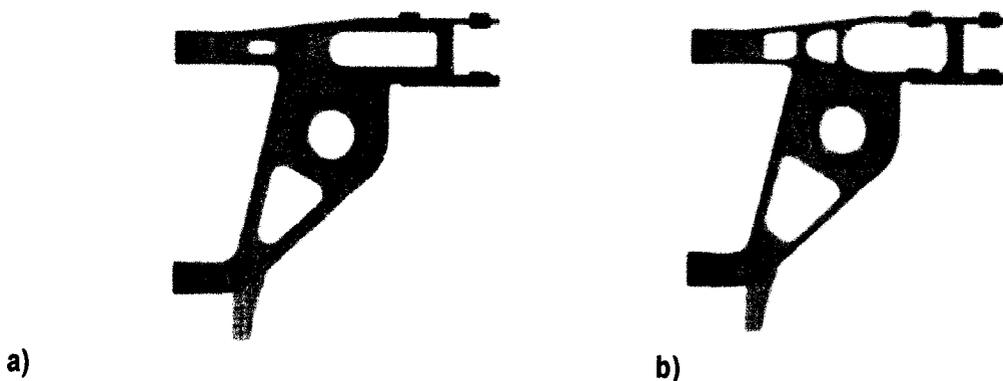
Este estudo de caso demonstra que o avanço nas técnicas de modelagem do fenômeno de solidificação, permitiu aplica-la na previsão da porosidade e re-projeto de um componente de suspensão automotiva em alumínio.

No passado, a modelagem da porosidade devido à contração era baseada em critérios como *hot spot* (pontos quentes) e em função do critério de *Niyama*. É importante observar, que estes são os mesmos métodos adotados pelo simulador comercial *SolidCast*. A simulação numérica da formação de porosidades tem sido pioneiramente estudada por *Kubo*, que demonstra a claramente o efeito dos gases contidos no metal em função da taxa de solidificação.

Durante os últimos cinco anos a *USAMP/USCAR Light Metal Division* tem estudado a estrutura do alumínio fundido é tornou-se obvio a necessidade de uma atualização nas tecnologias de modelagem.

O componente estudado foi um braço inferior da suspensão do *Cadillac*. O componente de aço fundido fora previamente convertido para a liga A356. A CLMP buscou determinar como alguma maior redução de peso alcançado pelo re-projeto afetaria as características mecânicas. Para isto decidiram utilizar a simulação computacional para predizer as conseqüências na mudança dos componentes.

A **Figura 26a** demonstra a geometria do componente antigo. Na **Figura 26b** é observado o componente re-projetado.



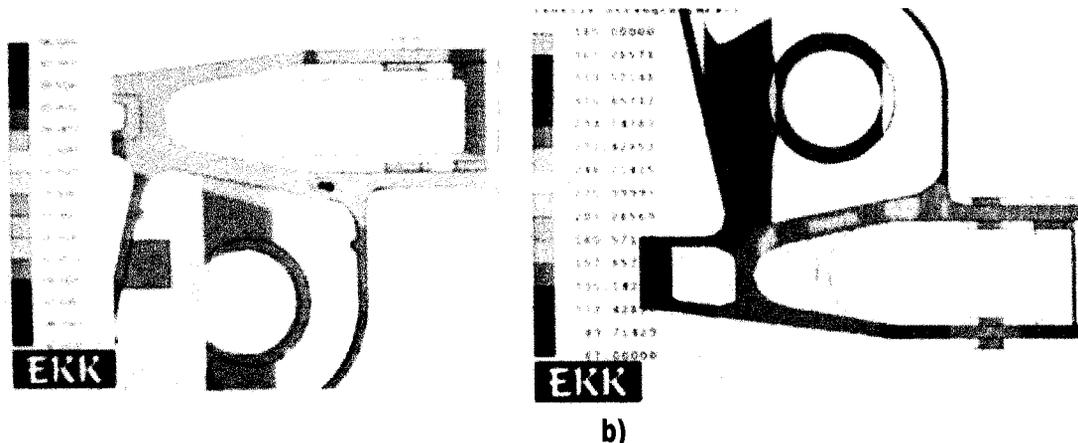
**Figura 26.** a) Geometria do componente antigo. b) componente re-projetado.

Nas **Figuras 27a** e **27b** observam-se os resultados de porosidade previstos pelo modelo numérico utilizando as leis desenvolvidas por *Kubo*. Na **Figura 27a**, a porosidade no projeto antigo é maior que 1%, enquanto há uma significativa redução da porosidade no componente re-projetado, **Figura 27b**.



**Figura 27.** Tamanho e distribuição da porosidade. a) Projeto antigo; b) Componente re-projetado.

Para avaliar a modificação nas propriedades mecânicas, provoca pelo re-projeto do componente, o simulador previu a resistência à tração, no antigo componente e na geometria re-projetada, **Figuras 28a e 28b**.



a) **Figura 28.** Visualização da resistência a tração em corte longitudinal no projeto antigo (a) e no componente re-projetado (b).

Entre 1995 e 2000, *USCAR Cast Light Metal Project (CLMP)* almejou reduzir o peso de vários componentes com o objetivo de aumentar a eficiência do combustível. As recentes descobertas deste projeto demonstram como a redução de peso ao re-projetar o componente influenciou para que se tenha um fundido com qualidades e propriedades mecânicas iguais ou superiores ao antigo projeto.

## 9. Modelo Matemático

### 9.1. Análise Matemática da Solidificação

A equação diferencial de grande interesse no fenômeno de solidificação, é conhecida como Equação Geral da Condução de Calor em Regime Transitório, dada por:

$$\rho.c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial y^2} + \frac{\partial T^2}{\partial z^2} \right) + \Phi \quad (9)$$

Para facilitar a apresentação e compreensão do modelo matemático e da analogia aplicada, o desenvolvimento do modelo será em coordenada cartesiana e unidirecional.

$$\rho.c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(x) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \Phi \quad (10)$$

Para a maioria dos materiais encontrados nos problemas de engenharia, vale como uma boa aproximação considerar uma média isotrópica das propriedades físicas do material, sendo assim, na **Equação 10** a condutividade térmica média do material é constante ao longo da linha de condução.

$$k(x) = k_{cte} = k \quad (11)$$

O termo  $\phi$  da equação de diferenças parciais, **Equação 10**, representa a geração interna de calor, associado à liberação de calor latente proveniente da transformação de fase e varia em função do efeito da taxa de fração solidificada, conforme a **Equação 12**:

$$\phi = \rho \cdot H \cdot \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (12)$$

Aplicando a **Equação 12** na **Equação 9**, chega-se em:

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho \cdot H \cdot \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (13)$$

matematicamente pode-se aproximar  $\left(\frac{\partial f_s}{\partial t}\right)$  por:

$$\frac{\partial f_s}{\partial t} = \frac{\partial f_s}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

onde a **Equação 13** transforma-se em:

$$\rho \cdot c' \frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (15)$$

sendo:

$$c' = \left( c - H \cdot \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \quad (16)$$

O termo  $\left( H \cdot \frac{\partial f_s}{\partial T} \right)$  na **Equação 16**, pode ser entendido como um pseudo calor específico, onde a velocidade de solidificação é controlada pela relação entre o pseudo calor específico que representa a liberação do calor latente do material na transformação de fase e o calor específico do material. O calor específico aparente do material representado por  $c'$ , toma a generalidade de incluir o efeito da liberação do calor gerado internamente.

A **Equação 15** representa a equação geral da condução de calor considerando o efeito da taxa de fração solidificada com a liberação do calor latente do material na transformação de fase líquido/sólido ao longo da solidificação de uma liga binária.

Considerando que não haja difusão no estado sólido e mistura completa no estado líquido, e que a variação da fração sólida é função apenas da temperatura, utiliza-se a formulação proposta por Scheil para representar a região pastosa da solidificação.

$$f_s = 1 - \left( \frac{T_f - T}{T_f - T_L} \right)^{\frac{1}{k_0 - 1}} \quad (17)$$

Em relação à variação das propriedades físicas do material nos diferentes estados, sólido, líquido e pastoso, é suficientemente aceitável a aproximação do seu valor, quando no estado pastoso, como sendo uma relação percentual entre a quantidade de sólido e líquido relativo aos seus valores quando líquido ou sólido, a exceção do calor específico, que deve ser balanceado com o calor latente, conforme a **Equação 18**:

$$c = (c_S - c_L) \cdot f_S \cdot c_L - L \cdot \frac{\partial f_S}{\partial T} \quad (18)$$

Aplicando-se a expansão de Taylor [5] para o método de diferenças finitas (MDF) e truncando as equações expandidas no termo de terceiro grau. Pode-se aproximar os termos diferenciais da Equação 15 pelos termos a Diferenças Finitas, supondo  $E(\Delta x^N) \cong 0$ , assim:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (19)$$

e

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1}^n - 2 \cdot T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2} \quad (20)$$

onde:

$$T_i^{n+1} = T(t_i + \Delta t, x_i) \quad (21)$$

$$T_i^n = T(t_i, x_i) \quad (22)$$

$$T_{i+1}^n = T(t_i, x_i + \Delta x) \quad (23)$$

$$T_{i-1}^n = T(t_i, x_i - \Delta x) \quad (24)$$

Sendo  $t_i$  e  $x_i$  a representação do tempo e espaço instantâneo.

Substituindo as **Equações 21 e 22** na **Equação 15**, esta se transforma em:

$$\rho \cdot c' \cdot \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = k \cdot \frac{T_{i+1}^n - 2 \cdot T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2} \quad (25)$$

considerando a difusividade térmica do metal [ $m^2/s$ ], como:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c'} \quad (26)$$

isolando  $T_i^{n+1}$  e substituindo a **Equação 25** na **Equação 26**, tem-se:

$$T_i^{n+1} = \alpha \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \cdot [T_{i+1}^n - 2.T_i^n + T_{i-1}^n] + T_i^n \quad (27)$$

considerando

$$\alpha \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} = \frac{1}{M}, \text{ e substituindo na } \mathbf{Equação 27}, \text{ tem-se}$$

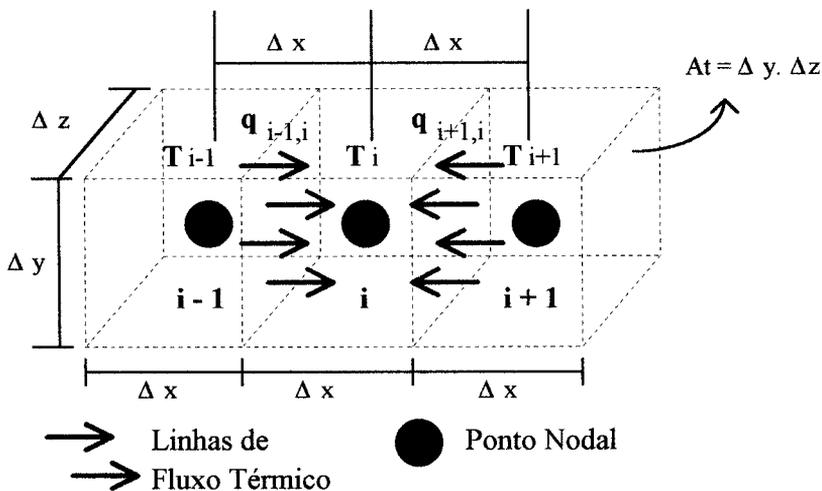
$$T_i^{n+1} = \frac{1}{M} \cdot T_{i-1}^n + \left(1 - \frac{2}{M}\right) \cdot T_i^n + \frac{1}{M} \cdot T_{i+1}^n \quad (28)$$

por considerações numéricas e termodinâmicas, estabelece o critério de estabilidade pelo método de diferenças finitas explícita. Para alcançar a estabilidade no programa numérico, deve-se respeitar o intervalo de iteração ( $\Delta t$ ), apresentado na condição abaixo:

$$\Delta t > \frac{\Delta x^2}{2 \cdot \alpha}$$

Multiplicando a **Equação 25** por ' $A_t \cdot x$ ' onde  $A_t$  é a área de passagem do fluxo térmico dado pela área finita  $y, z$ , conforme a **Figura 29**, chega-se em:

$$A_t \cdot \Delta x \cdot \rho \cdot c' \cdot \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = A_t \cdot k \cdot \frac{T_{i+1}^n - 2.T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x} \quad (29)$$



**Figura 29.** Representação Esquemática do MDF Aplicado ao Fenômeno de Transferência de Calor

## 9.2. Analogia sistemas térmicos com circuitos elétricos

O acúmulo de energia do elemento finito 'i' é caracterizado pela sua capacidade térmica, dado pela relação:

$$C_{ii} = A_t \cdot \Delta x_i \cdot \rho_i \cdot c_i \quad (30)$$

onde  $A_t \cdot x_i$  equivale ao volume finito do elemento 'i', e  $C_{ii}$  é a capacidade térmica do elemento.

O fluxo térmico entre os pontos centrais dos elementos finitos, tem como resistência de passagem um valor representado pelo inverso da condutividade térmica, dado por:

$$R_t = \frac{\Delta x}{k \cdot A_t} \quad (31)$$

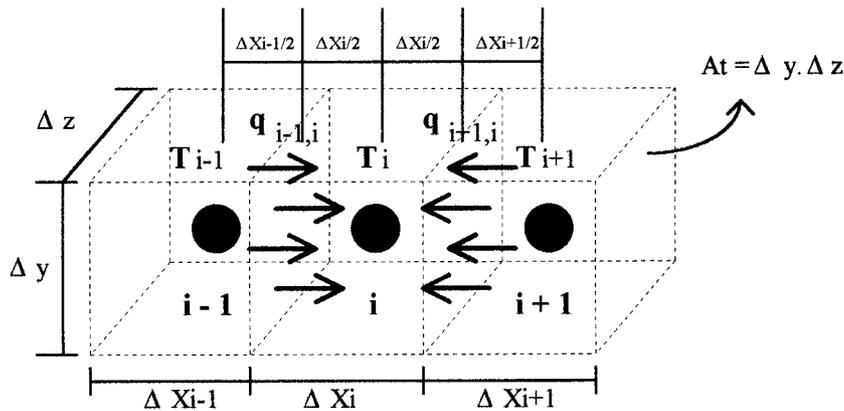
onde  $x$  equivale à distância percorrida pelo fluxo entre os pontos centrais. A resistência térmica pode ser especificada para o intervalo interior a cada semi-distância de elementos finitos individuais (i, i-1 e i+1) para diferentes distâncias finitas na direção 'x' ( $x_i, x_{i-1}, x_{i+1}$ ), conforme **Figura 30**.

Desta forma a resistência térmica no interior de cada elemento até a interface com o elemento adjacente é dada por:

$$R_{t_{i-1}} = \frac{\Delta x_{i-1}}{2 \cdot k_{i-1} \cdot A_t} \quad (32)$$

$$R_{t_i} = \frac{\Delta x_i}{2 \cdot k_i \cdot A_t} \quad (33)$$

$$R_{t_{i+1}} = \frac{\Delta x_{i+1}}{2 \cdot k_{i+1} \cdot A_t} \quad (34)$$



**Figura 30.** Individualização das distâncias Finitas para os Elementos Nodais do MDF

Generalizando a **Equação 29** com a substituição de **34, 33, 32 e 30**, chega-se em:

$$T_i^{n+1} = \frac{\Delta t}{C_t} \left( \frac{T_{i-1}^n}{R_{t_{i-1}} + R_{t_i}} + \frac{T_{i+1}^n}{R_{t_i} + R_{t_{i+1}}} \right) + \left[ 1 - \frac{\Delta t}{C_t} \left( \frac{1}{R_{t_{i-1}} + R_{t_i}} + \frac{1}{R_{t_i} + R_{t_{i+1}}} \right) \right] \cdot T_i^n$$

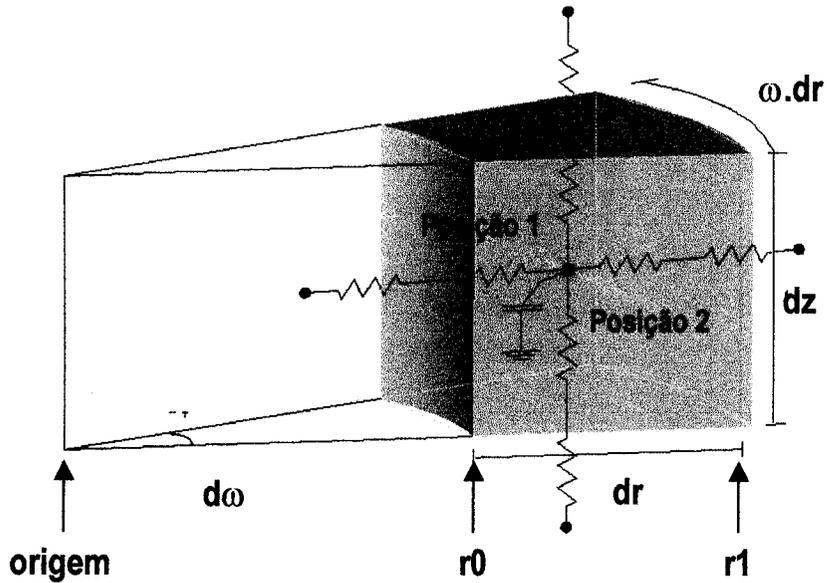
a **Equação 35**, acima, pode ser escrita de forma simplificada por:

$$T_i^{n+1} = \frac{\Delta t}{\tau_{di}} \cdot T_{i-1}^n + \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau_{dqi}}\right) \cdot T_i^n + \frac{\Delta t}{\tau_{qi}} \cdot T_{i+1}^n \quad (36)$$

A **Equação 36** corresponde à equação de solução do M.D.F. na forma explícita de trabalho. Mantendo-se a analogia, para um sistema bidimensional, tem-se a **Equação 37**:

$$T_{i,j}^{n+1} = \frac{\Delta t}{\tau_{i-1,j}} \cdot T_{i-1,j}^n + \frac{\Delta t}{\tau_{i+1,j}} \cdot T_{i+1,j}^n + \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau_{i,j}}\right) \cdot T_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{\tau_{i,j-1}} \cdot T_{i,j-1}^n + \frac{\Delta t}{\tau_{i,j+1}} \cdot T_{i,j+1}^n$$

Aplicando-se em um sistema de coordenadas cilíndricas, que utiliza-se o elemento diferencial representado na **Figura 31**.



**Figura 31.** Elemento Diferencial Cilíndrico.

Aplicando-se a analogia, a resistência térmica do material fica representada pela **Equação 38**:

$$Rt = \frac{\ln(r_1 / r_0)}{k \cdot d\phi \cdot dz} \quad [\text{K/W}] \quad (38)$$

Para o capacitor térmico, tem-se:

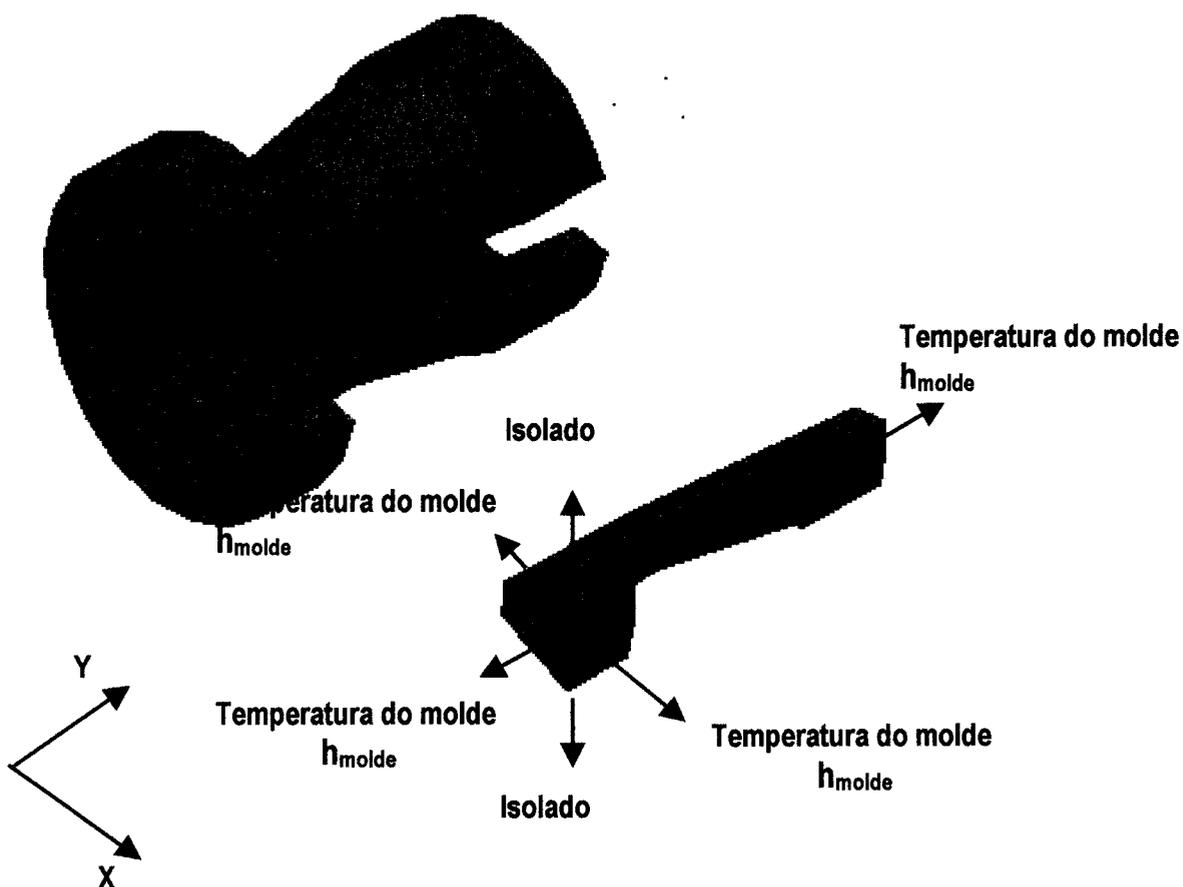
$$Ct = \rho \cdot c' \cdot Vol = \rho \cdot c' \cdot \left( \pi \frac{r_1^2 - r_0^2}{2} \cdot d\phi \cdot dz \right) \quad (39)$$

## 10. Aplicação do Modelo Numérico na Peça de Referência

### 10.1. Desenvolvimento de uma malha para representação da geometria estudada

#### 10.1.1. Escolha da região da peça a ser aplicada a malha numérica

O fator decisivo para a escolha da peça, **Figura 32**, anteriormente apresentada, está no fato desta apresentar uma geometria com simetria de revolução, que facilita a aplicação do modelo proposto. Realizando-se uma análise tridimensional da transferência de calor na peça, observa-se não ser necessária a utilização de uma malha numérica para representar toda a geometria, mas somente em uma fatia desta, é satisfatório para representar o fenômeno de transferência de calor, de maneira global. Esta consideração somente será válida considerando-se uma igualdade nas condições para a extração de calor ao redor da mesma.



**Figura 32.** Ilustração representando a fatia da peça a ser modelada e suas respectivas condições de contorno para a transferência de calor (temperatura e coeficiente de transferência de calor).

### 10.1.2. Geração de malha

O acoplamento de uma malha em geometria complexa tem como característica ser uma das etapas mais difíceis de projeto. Devido à dificuldade em desenvolver programas que identifique uma determinada geometria e acople uma malha da melhor maneira possível, a coordenada cartesiana é unanimidade nos programas comerciais de simulação para indústria de fundição.

Com coordenadas cartesianas necessita-se um elevado refino, para representar com fidelidade a geometria desejada. O resultado é um grande número de elementos, e conseqüentemente, elevado tempo de processamento, além da exigir alta capacidade de máquina para realizar a simulação.

Para gerar a malha em que o conjunto de seus elementos constitua com fidelidade fatia da peça estudada, com redução na quantidade de elementos sem perda de precisão, a aplicação de coordenadas cilíndricas é a melhor opção.

### 10.1.3. Condições de contorno utilizadas

Para a construção da malha faz-se necessária à determinação de alguns parâmetros geométricos. Estes constituirão as condições de contorno para o desenvolvimento do algoritmo de acoplamento, inserido no programa de simulação desenvolvido. Os parâmetros estão listados abaixo e podem ser visualizados na ilustração da **Figura 33**.

- $Lx = 26,30$  mm.
- $Lz = 115,00$  mm.
- Coeficiente Angular da curva  $R1 = 11,16$ .
- Coeficiente Angular da curva  $R2 = 6,35$ .
- $C1 = 9,96$  mm.
- $H1 = 20,70$  mm.
- $H2 = 46,29$  mm.
- $H3 = 48,65$  mm.
- $Lr = 19,80$  mm (raio interno distância do centro do sistema de coordenadas cilíndricas a peça).
- $Nfi = 100$ . (número de divisões em  $360^\circ$ )

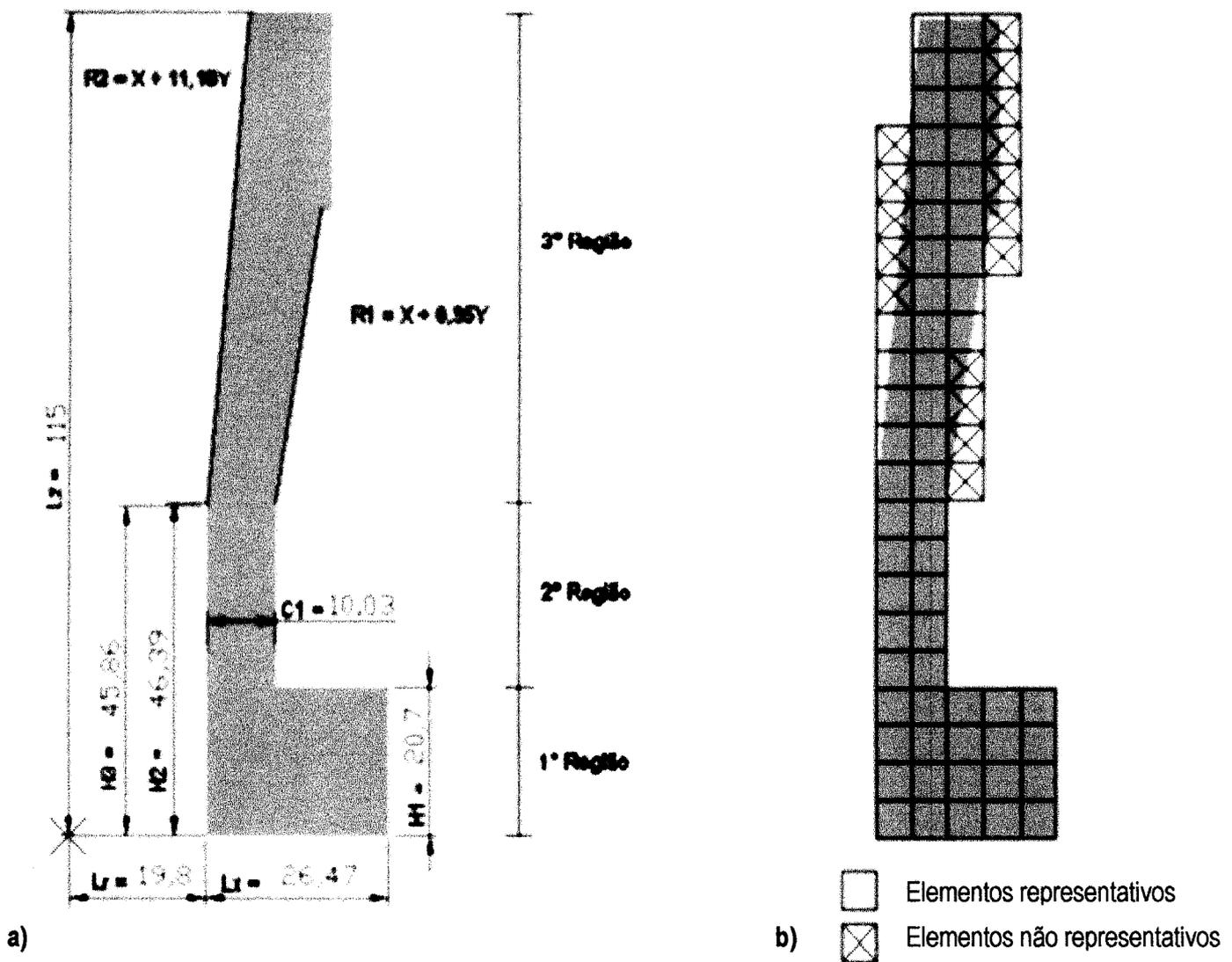
### 10.1.4. Algoritmo desenvolvido

O algoritmo desenvolvido inicia-se dividindo a fatia da peça em três regiões distintas. O algoritmo apóia-se nas condições de contornos para delimitar as limites geométricos de cada região.

Na primeira região foi fixada a origem do sistema de coordenadas, além de ser o ponto inicial do acoplamento. A partir de um valor estipulado pelo usuário realiza-se um refino em  $L_x$ , determinando-se o tamanho do elemento de volume.

A segunda região não apresenta nenhuma característica relevante. Na terceira região pode-se observar uma configuração geométrica irregular, sendo delimitada por duas curvas. Estas geometrias são denominadas contornos irregulares, e acarretam um erro numérico ou erro de acoplamento bastante sensível ao refino de malha utilizado.

Na **Figura 33a** são apresentadas a fatia da peça modelada e as condições de contorno geométricas inseridas no programa desenvolvido. A ilustração da **Figura 33b** representa o acoplamento de malha gerado pelo algoritmo desenvolvido ao adotar um refino de 05 elementos em  $L_x$ .

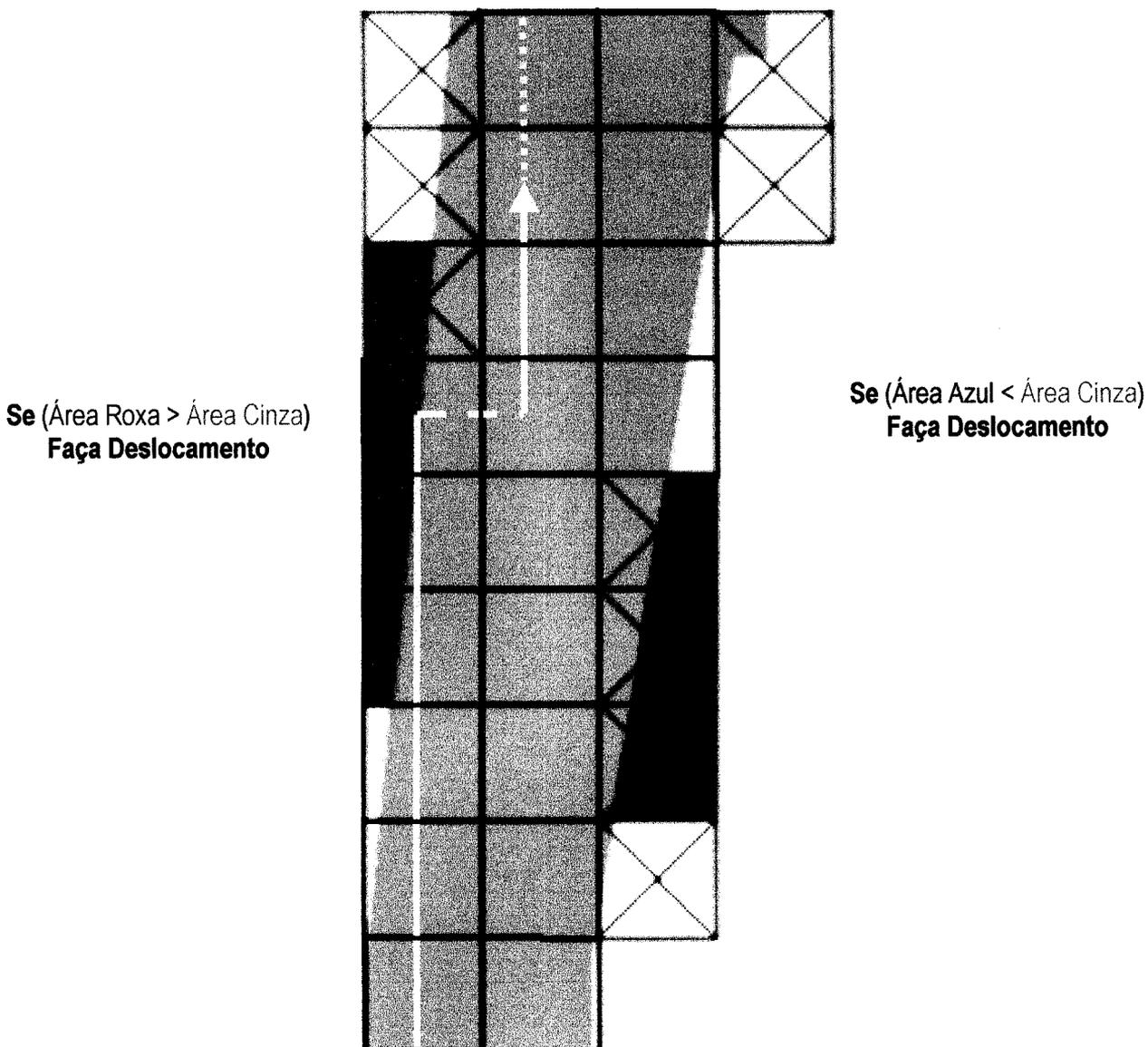


**Figura 33.** Ilustração representando a fatia da peça modelada. a) condições de contorno geométricas inseridas no programa desenvolvido; b) representação do acoplamento de malha gerado pelo algoritmo desenvolvido ao adotar um refino de 05 elementos em  $L_x$ .

### 10.1.5. Algoritmo para contornos irregulares

Para gerar uma malha em contornos irregulares, identificando as melhores condições de acoplamento, desenvolveram-se comparações entre as áreas cortadas pelas duas curvas que delimitam a terceira região. Se a comparação não for favorável a minimização do erro numérico, o algoritmo desloca o elemento de volume para uma posição que melhor represente a geometria.

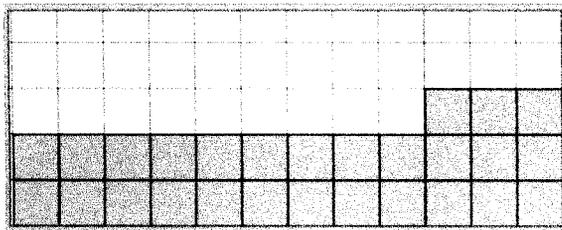
Na **Figura 34**, a ilustração representa o mecanismo de funcionamento do algoritmo desenvolvido para o acoplamento em contornos irregulares.



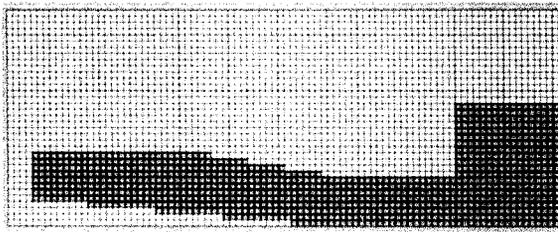
**Figura 34.** Ilustração representando o mecanismo de funcionamento do algoritmo desenvolvido para o acoplamento em contornos irregulares.

### 10.1.6. Refino de malha

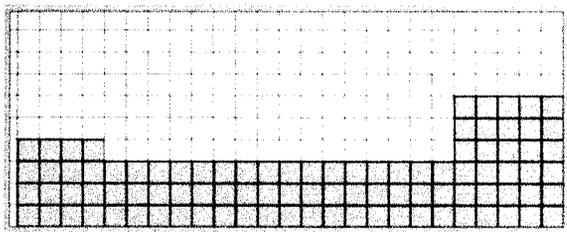
Os erros numéricos provem do acoplamento de malha nos contornos irregulares dos corpos físicos mapeados. O algoritmo desenvolvido gera uma malha, minimizando este erro, independentemente do refino adotado. Ao refinar a malha, o programa representa com maior fidelidade à fatia da peça modelada, conseqüentemente, o erro numérico diminui. As **Figuras 35a** até **35f** apresentam as malhas geradas pelo programa de simulação, observando a quantidade de elementos e seus respectivos erros numéricos. Na **Figura 35g** observa-se uma foto da seção da peça em tamanho real.



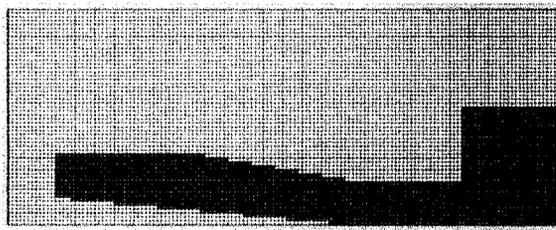
a)  $\Sigma = 27$  e E.N. = 40,04 %.



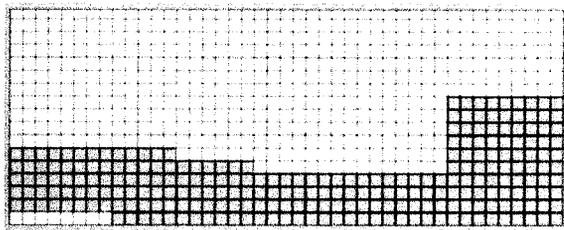
d)  $\Sigma = 942$  e E.N. = 12,38 %.



b)  $\Sigma = 94$  e E.N. = 16,87 %.



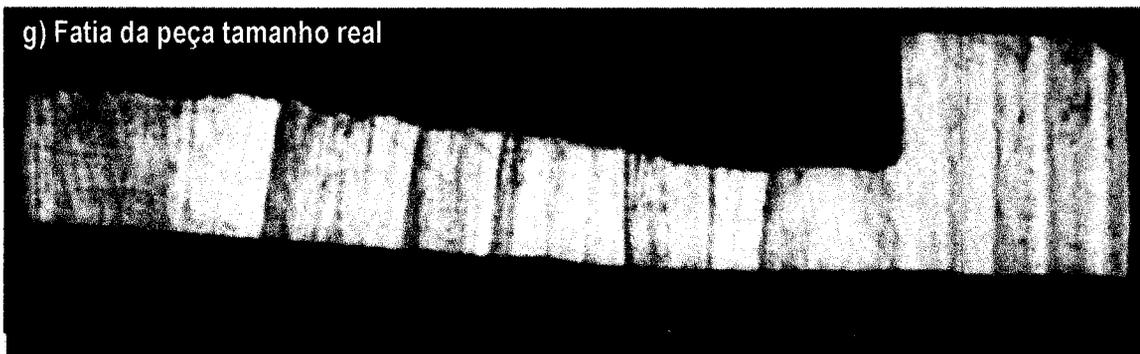
e)  $\Sigma = 2027$  e E.N. = 7,60 %.



c)  $\Sigma = 250$  e E.N. = 16,81 %.



f)  $\Sigma = 8035$  e E.N. = 6,77 %.



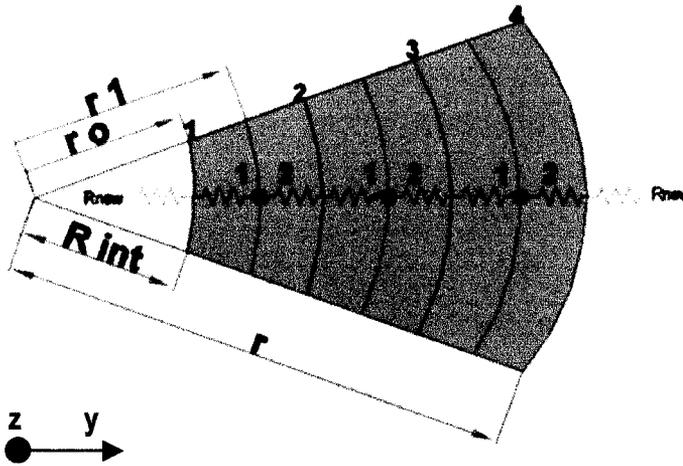
**Figura 35.** Malhas geradas pelo programa de simulação desenvolvido. Números de elementos e seus respectivos erros numéricos. a) 27 e 40,04%; b) 94 e 16,87%; c) 250 e 16,81%; d) 942 e 12,38%; e) 2027 e 7,60%; f) 8035 e 6,77%; g) fatia da peça em tamanho real.

## 10.2. Desenvolvimento das equações para o cálculo dos resistores e capacitores térmicos

Em uma malha numérica é fundamental saber com exatidão a posição em que se encontra cada elemento. Na analogia utilizada, o cálculo dos resistores térmicos varia conforme a área de passagem do fluxo de calor e esta depende dos valores de  $r_0$  e  $r_1$ . Entretanto, os valores de  $r_0$  e  $r_1$  dependem da posição do resistor dentro de cada elemento, além da localização deste na malha.

Dois equações são desenvolvidas para estabelecer  $r_0$  e  $r_1$ . Essas consideram o raio do macho ( $R_{int}$ ) e a variação de um contador "n", representando a posição do elemento corrente. No cálculo de  $r_0$  e  $r_1$  para os resistores na posição 1 utiliza-se às **Equações 40 e 41**. Já para a posição 2, utiliza-se às **Equações 43 e 44**.

Com o objetivo de exemplificar o cálculo das resistências térmicas na direção do eixo y, as **Figuras 36 e 37** ilustram uma malha que descretiza a peça em três elementos nesta mesma direção. Para  $n = 1$  até  $N_r$ , sendo  $N_r = 4$ , a resistência térmica, na posição 1 é dada pela **Equação 42**.



**Figura 36.** Representação de  $r_0$  e  $r_1$  para o cálculo dos resistores na posição 1, na direção do eixo y.

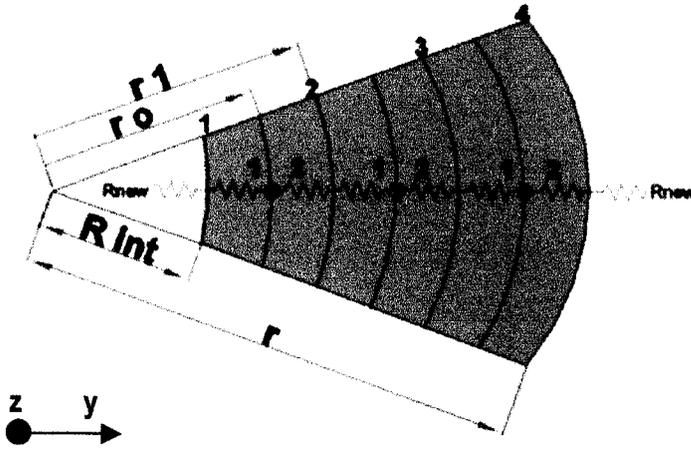
$$r_0 = R_{int} + (n - 1)dr \quad (40)$$

$$r_1 = r_0 + \frac{1}{2}dr \quad (41)$$

Substituindo as **Equações 40 e 41** na **Equação 38**, tem-se:

$$R_{t_{n,1}} = \frac{\ln \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{dr}{R_{int} + (n-1)dr} \right) \right)}{k \cdot d\phi \cdot dz} \quad (42)$$

A resistência térmica na direção do eixo y, considerando o resistor na posição 2, **Figura 36** é dada pela **Equação 45**:



**Figura 36.** Representação de  $r_0$  e  $r_1$  para o cálculo dos resistores na posição 2, na direção do eixo y.

$$r_0 = R_{\text{int}} + \frac{(2n-1)}{2} dr \quad (43)$$

$$r_1 = r_0 + \frac{1}{2} dr \quad (44)$$

Substituindo as **Equações 43 e 44** na **Equação 38**, tem-se:

$$Rt_{n,2} = \frac{\ln \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{dr}{R_{\text{int}} + \left( \frac{2n-1}{2} \right) dr} \right) \right)}{k \cdot d\phi \cdot dz} \quad (45)$$

No caso do cálculo da resistência térmica na direção do eixo z, não é necessário considerar a posição dos resistores, pois a área de passagem do fluxo de calor é a mesma. Somente faz-se necessário considerar a posição em que se encontra o elemento. Na **Equação 48**, tem-se a resistência térmica na direção do eixo z. Para estabelecer os valores de  $r_0$  e  $r_1$  para o cálculo do resistor térmico no eixo z, utiliza-se às **Equações 46 e 47**.

$$r_1 = r_0 + dr \quad (46)$$

$$r_0 = R_{\text{int}} + (n-1)dr \quad (47)$$

$$Rt_{n,z} = \frac{\ln\left(1 + \frac{dr}{R_{int} + (n-1)dr}\right)}{k \cdot d\varphi \cdot dz} \quad (48)$$

O cálculo da resistência newtoniana relativa ao coeficiente de transferência de calor entre a peça e o molde é dado pela **Equação 49**:

$$R_{n,new} = \frac{1}{h_{new} \cdot \text{Área}} = \frac{1}{h_{new} \cdot (R_{int} + (n-1)dr) d\varphi \cdot dz} \quad (49)$$

Para o cálculo do capacitor térmico faz-se somente necessário o conhecer a posição do elemento dentro da malha numérica. Assim efetua-se o cálculo do volume do elemento diferencial corretamente. Substituindo as equações **46** e **47** na **Equação 39**, tem-se a equação, que descreve o capacitor térmico:

$$Ct_n = \frac{\rho \cdot c \cdot d\varphi \cdot dz \cdot ((2R_{int} + (2n-1)dr)dr)}{2} \quad (50)$$

### **10.3. Programa de simulação desenvolvido**

Para o desenvolvimento do programa de simulação utilizou-se a linguagem de programação C++. O compilador utilizado foi o C++ *Builder 5.0*, da *Borland Inc*. Este compilador trabalha com a linguagem de programação orientada a objetos, que facilita o desenvolvimento de programas em ambiente windows.

A técnica de programação adotada foi dividir a programa em algoritmos menores. Estes algoritmos, denominados de rotinas, constituem o código fonte, organizado sob a forma de funções. As diversas funções do programa, trabalham em conjunto e são armazenadas em arquivos. Ao realizar a compilação, o *Builder* utiliza todos os arquivos para gerar um arquivo executável, este identificado pela extensão "exe". Ao clicar no arquivo executável, o computador executará o programa desenvolvido, apresentando na tela, a interface gráfica, observada na **Figura 37**.

O programa numérico para simulação da solidificação em coordenadas cilíndricas levou um ano e meio para ser finalizado.

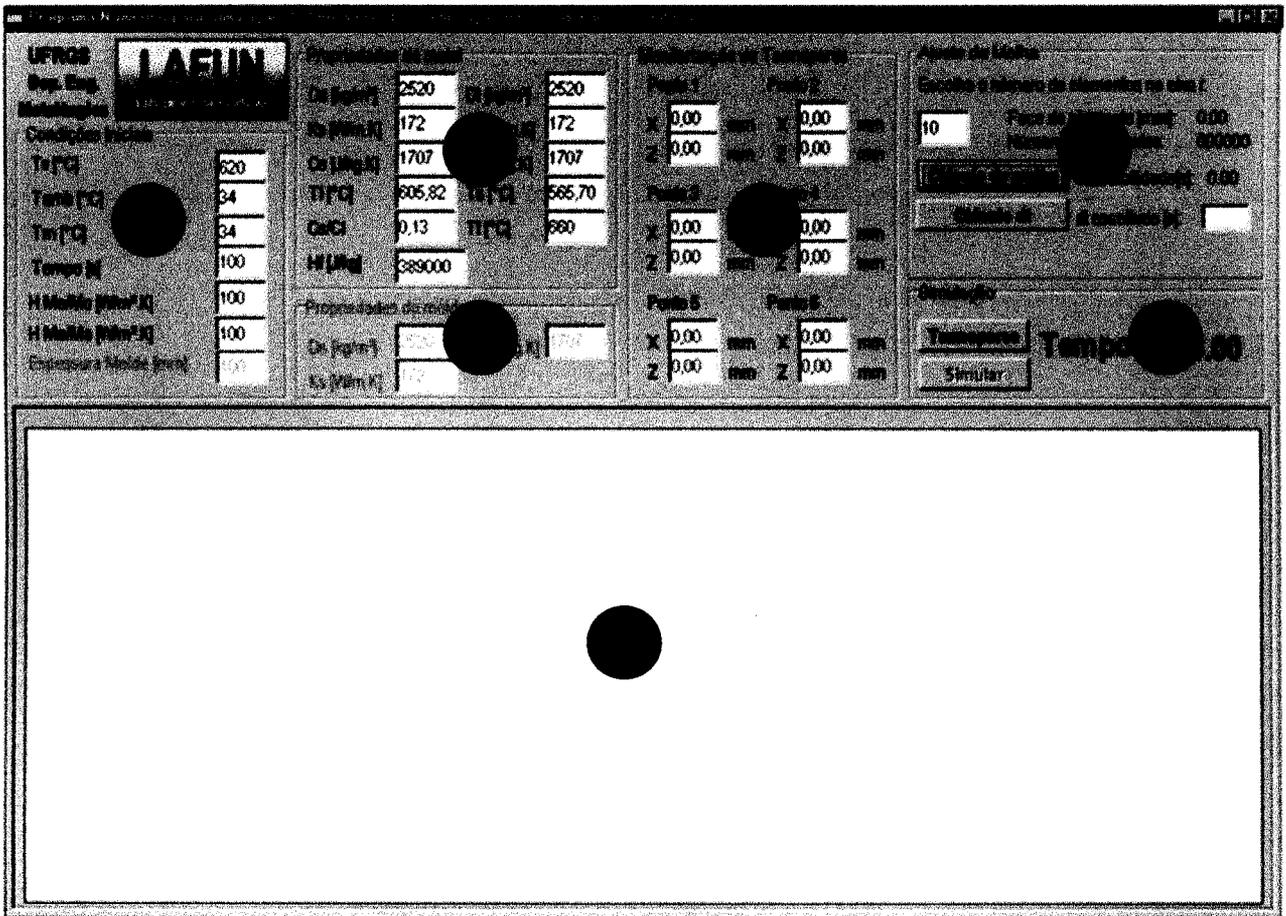


Figura 37. Interface em ambiente windows do programa de simulação desenvolvido.

### 10.3.1. Condições Iniciais

Neste grupo de dados, o usuário determina as condições térmicas, temporais, além dos coeficientes de transferência de calor envolvidos na simulação. Os dados inseridos pelo usuário são listados abaixo.

- ❑ Temperatura de Vazamento –  $T_v$  [°C]
- ❑ Temperatura Ambiente –  $T_{amb}$  [°C]
- ❑ Tempo de simulação – Tempo [s]
- ❑ Coeficiente de Transferência de Calor Newtoniano entre o Metal e o Molde –  $H_{Me/Mo}$  [W/m<sup>2</sup>.K]
- ❑ Coeficiente de Transferência de Calor Newtoniano entre o Metal e o Macho –  $H_{Me/Ma}$  [W/m<sup>2</sup>.K]
- ❑ Espessura do Molde – Espessura Molde [mm] (não utilizado)

### 10.3.2. Propriedades do metal

Neste grupo, o usuário determina as propriedades termofísicas do metal a ser simulado. Como:

- ❑ Densidade Sólida –  $D_s$  [kg/m<sup>3</sup>]
- ❑ Densidade Líquida –  $D_l$  [kg/m<sup>3</sup>]
- ❑ Condutividade Térmica Sólida –  $K_s$  [W/m.K]
- ❑ Condutividade Térmica Líquida –  $K_l$  [W/m.K]

- ❑ Calor Específico Sólido – Cs [J/kg.K]
- ❑ Calor Específico Líquido – Cl [J/kg.K]
- ❑ Temperatura Liquidus – Tl [°C]
- ❑ Temperatura Solidus – Ts [°C]
- ❑ Temperatura de fusão do metal base - Tf [°C]
- ❑ Coeficiente de Partição – Cs/Cl
- ❑ Calor Latente de Fusão – Hf [J/kg]

### 10.3.3. Propriedades do molde (não utilizado)

Neste grupo de informações, o usuário determina as propriedades termofísicas do molde a ser simulado.

- ❑ Densidade Sólida – Ds [kg/m<sup>3</sup>]
- ❑ Condutividade Térmica Sólida – Ks [W/m.K]
- ❑ Calor Específico Sólido – Cs [J/kg.K]

### 10.3.4. Monitorização da temperatura

O usuário tem a possibilidade de acompanhar a evolução térmica em seis pontos distintos da peça simultaneamente, Figura 38. Em cada ponto, indica-se a posição, de acordo com as coordenadas X (mm) e Z (mm), referenciadas na origem do sistema. O programa gera um arquivo de extensão “.dat”, contendo a evolução térmica nos respectivos pontos.

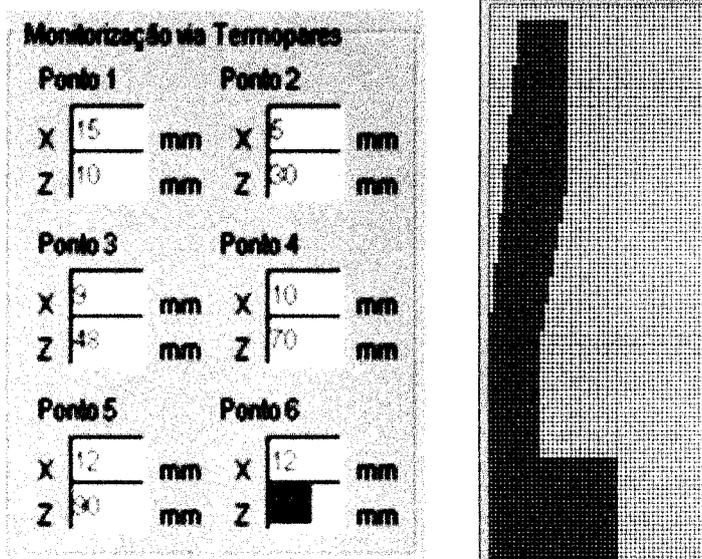
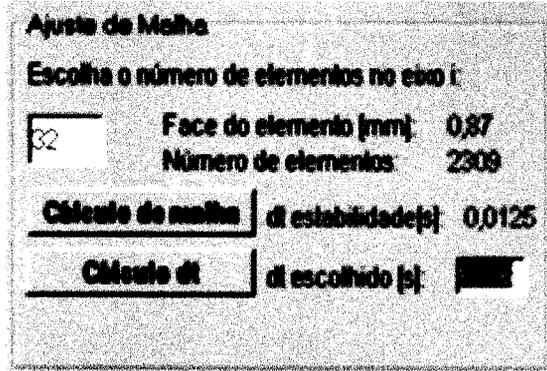


Figura 38. Monitorização da evolução térmica em pontos específicos da peça.

### 10.3.5. Ajuste de Malha

No ajuste de malha, determina-se o refino adotado para acoplar a malha numérica à geometria da peça. A partir de um valor estipulado pelo usuário, realiza-se um refino em Lx, determinando-se o tamanho do elemento de volume. Conhecendo-se este tamanho e as condições de contornos utilizadas, o algoritmo desenvolvido gera a malha e apresenta na tela.

Neste grupo, **Figura 39**, o programa apresenta informações sobre o tamanho do elemento, quantidade de elementos que formam a malha e o intervalo de tempo (dt) necessário para estabilizar os cálculos iterativos. Para concluir, o usuário deve determinar um dt menor que o dt de estabilidade.



**Figura 39.** Grupo de opções para o ajuste da malha no programa desenvolvido.

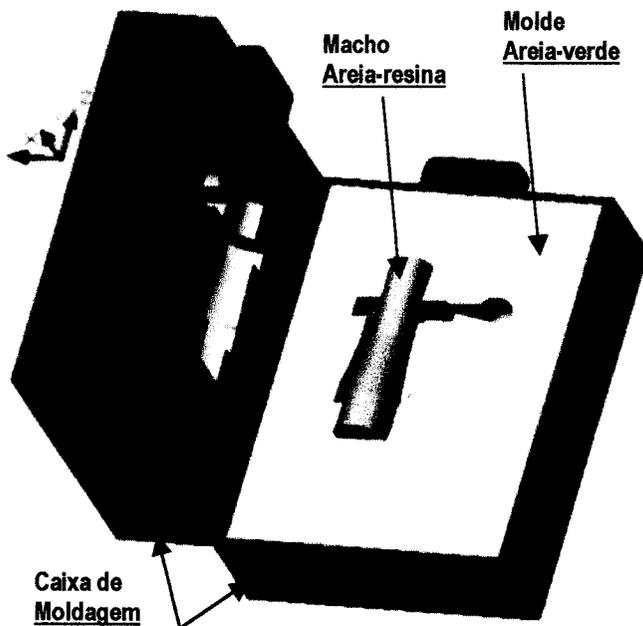
### 10.4. Ensaio experimental para aferição do modelo numérico desenvolvido

Para a aferição do programa numérico desenvolvido, um bocal de mangueira de incêndio foi utilizado como peça de estudo, **Figura 40**. A escolha deu-se pelo fato desta apresentar uma geometria cilíndrica de revolução, que facilita a aplicação do modelo proposto. Além da formação específica de defeitos como: rechupe, microrechupe e trincas térmicas, os quais estão diretamente relacionados com a evolução térmica da peça, e que o programa desenvolvido é capaz de prever. Para atender as especificações de qualidade na produção desta peça, necessita-se fundidos com ótimas características de estanqueidade. Esta propriedade está diretamente relacionada com os defeitos anteriormente citados.



**Figura 40.** Bocal de mangueira, utilizado como peça de referência, evidenciando a fatia que será aplicada o modelo desenvolvido.

Confeccionou-se o molde em areia verde em uma caixa de ferro fundido bipartida, com as seguintes dimensões: 400 x 300 x 200 mm, conforme a ilustração da **Figura 41**. O molde que conforma a cavidade interna da peça, comumente conhecido como macho, foi confeccionado com areia aglomerada com resina. A **Tabela 42** apresenta os valores das propriedades termofísicas e a composições das misturas utilizadas.

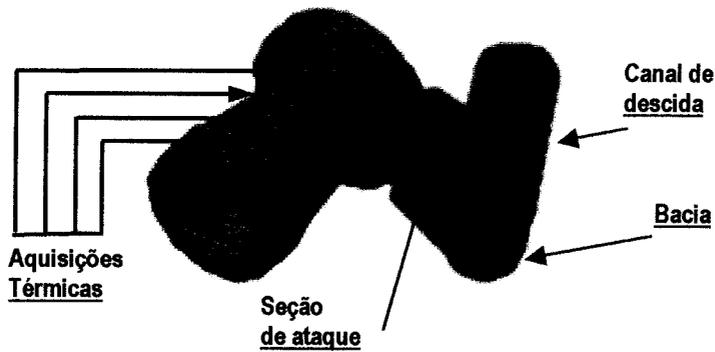


**Figura 41.** Representação da caixa de moldagem, contendo o molde em areia verde e o macho utilizado no processo moldagem.

| <b>Propriedades termo-físicas</b> | <b>Molde Areia Verde</b> | <b>Macho</b> |
|-----------------------------------|--------------------------|--------------|
| Condutividade Térmica [W/m.K]     | 12,55                    | 12,55        |
| Calor Específico [J/kg.K]         | 1050,00                  | 1050,00      |
| Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]    | 1540,00                  | 1540,00      |
| <b>Composição</b>                 | <b>Molde Areia Verde</b> | <b>Macho</b> |
| Areia [kg]                        | 24,00                    | 6,00         |
| Água [% peso]                     | 600 ml                   | 0,00         |
| Bentonita [% peso]                | 0,00*                    | 0,00         |
| Resina 1 [% peso]                 | 0,00                     | 0,6          |
| Resina 2 [% peso]                 | 0,00                     | 0,6          |
| Catalisador [% peso]              | 0,00                     | 1,0          |
| Tempo de mistura [min]            | 20                       | 15           |

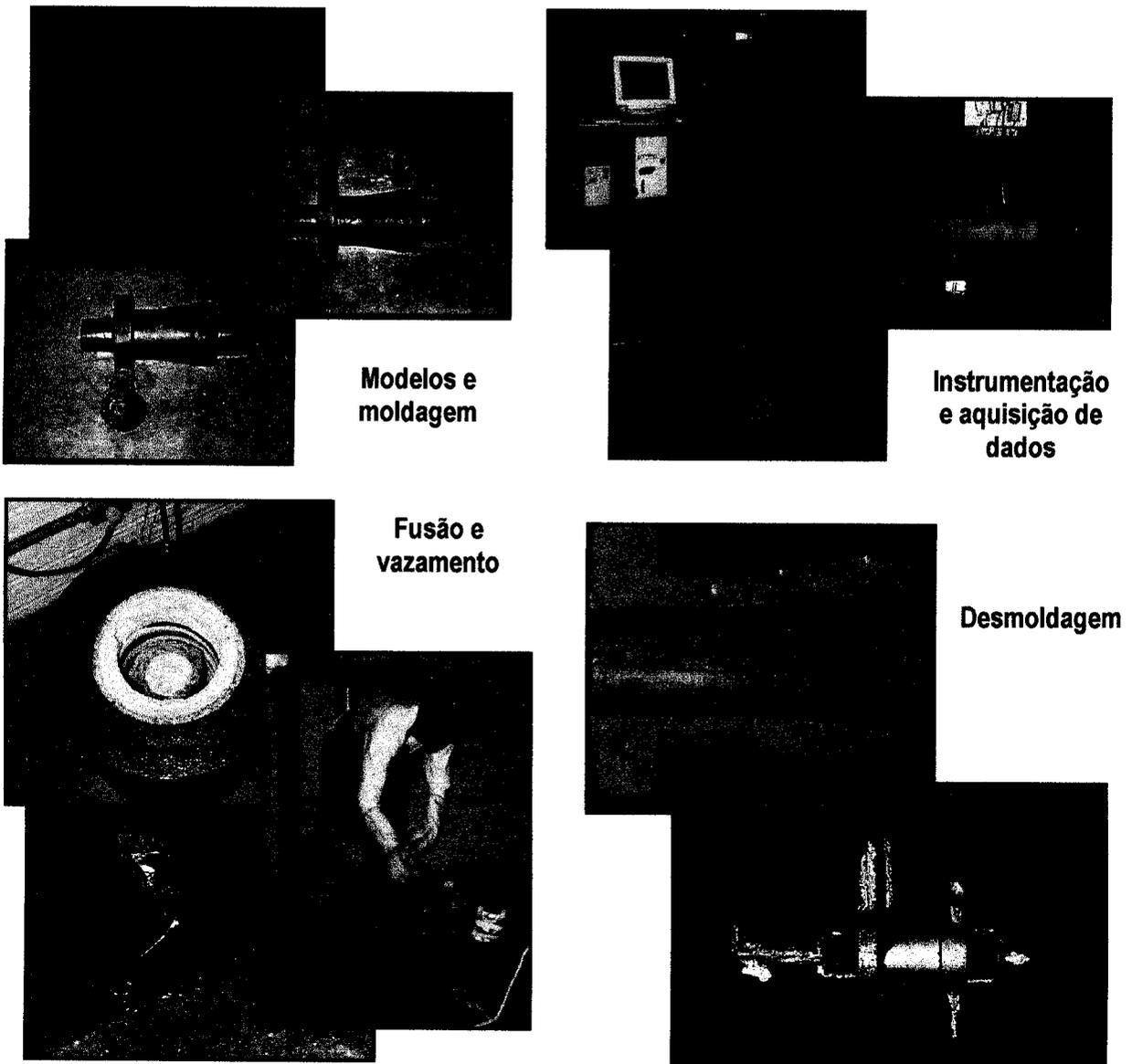
**Tabela 42.** Propriedades termofísicas dos materiais do molde e do macho e suas respectivas composições.

O sistema de alimentação é composto de um canal de descida cilíndrico com 10 cm de altura e 4 cm de diâmetro, uma bacia com a mesma dimensão radial e uma seção de ataque igual a 4 cm<sup>2</sup>. O canal de descida, também tem a função de massalote. Seu dimensionamento e localização têm por princípio básico a sanidade da peça fundida, além de proporcionar um menor efeito sobre as análises térmicas realizadas em pontos específicos da peça. Na **Figura 42** pode-se observar o sistema de alimentação descrito, destacado-se o sistema de alimentação na cor azul.



**Figura 42.** Sistema de alimentação utilizado nos ensaios experimentais realizados.

Para a fusão da liga, utilizou-se um forno de resistência elétrica do tipo poço. Nos diversos ensaios experimentais realizados, utilizou-se um cadinho de grafite do tipo AG10 com capacidade máxima de 1,2 L, previamente limpo, antes de cada carregamento. Na **Figura 43** é observada uma seqüência de fotos ilustrando os ensaios experimentais realizados.



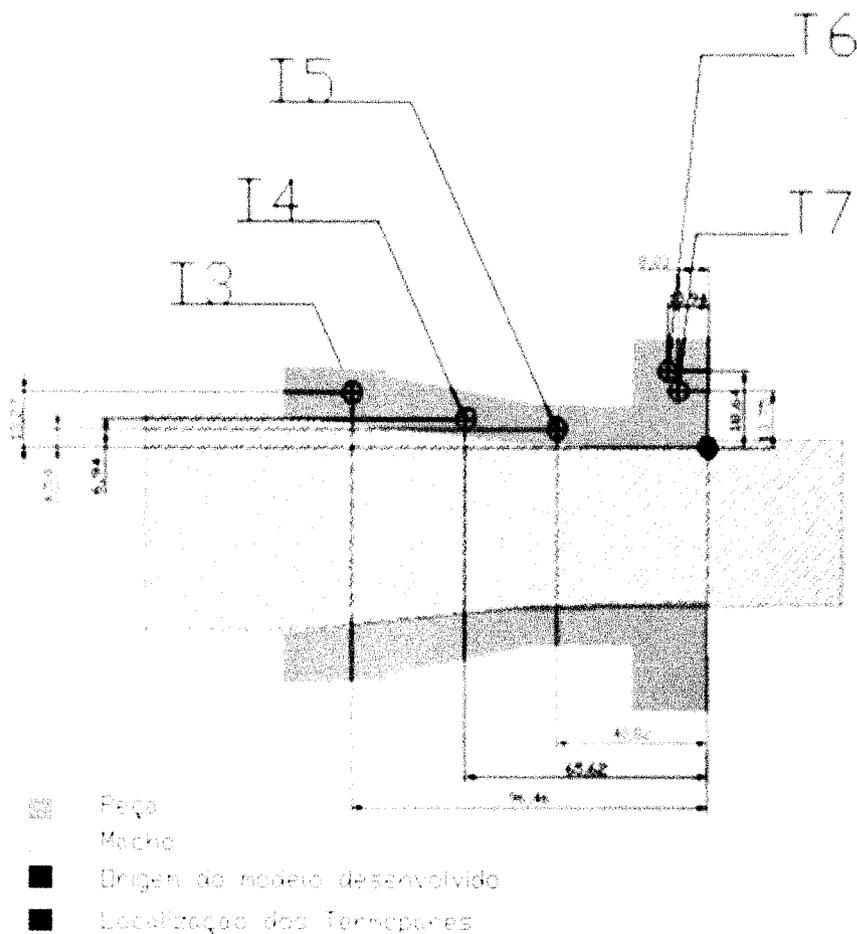
**Figura 43.** Seqüência de fotos ilustrando os ensaios experimentais realizados.

## 10.5. Resultados do programa desenvolvido

Para verificar a validade dos resultados gerados no programa desenvolvido realizaram-se ensaios experimentais. A aquisição de dados, a partir de termopares inseridos em posições específicas do metal, permitiu levantar as curvas de resfriamento do ensaio realizado. A partir destas análises térmicas, obteve-se os parâmetros como: temperatura de vazamento, temperatura *liquidus* e temperatura *solidus*. Estes parâmetros foram utilizados para realizar as simulações.

### 10.5.1. Curvas de resfriamento

Neste trabalho, são demonstrados somente os resultados do primeiro ensaio experimental, o fato deve-se aos resultados semelhantes obtidos. Utilizaram-se 1300 g de liga. Cinco termopares foram posicionados em regiões distintas no interior da peça, conforme observado na **Figura 44**. A temperatura ambiente encontrava-se em 14 °C e a temperatura de vazamento foi de 670 °C.



**Figura 44.** Posicionamento dos termopares no sistema de fundição utilizado no ensaio experimental 01.

Após a desmoldagem a peça foi cortada longitudinalmente com o objetivo de determinar a exata posição dos termopares e verificar a formação de algum defeito que influenciasse na análise térmica experimental.

As curvas de resfriamento obtidas através dos termopares 03 e 07 demonstraram temperaturas muito baixas. Observando a peça seccionada a região do termopar 03 não apresenta nenhum defeito, mas na região do termopar 07, apresenta um defeito, do tipo bolha de gás. Nos termopares 04 e 06 as curvas de resfriamento apresentaram um comportamento normal, sem ocorrer qualquer defeito de solidificação nestas regiões. No termopar 05 a curva de resfriamento apresenta um comportamento normal, porém nesta região, a peça apresenta um defeito, do tipo bolha de gás. Assim as curvas experimentais obtidas pelos termopares 03 e 07 foram descartadas.

A **Tabela 43** apresenta as propriedades termofísicas [37] e os parâmetros experimentais, utilizados na simulação com o programa desenvolvido. Para o coeficiente de extração de calor entre o metal e o molde, utilizou-se  $100 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

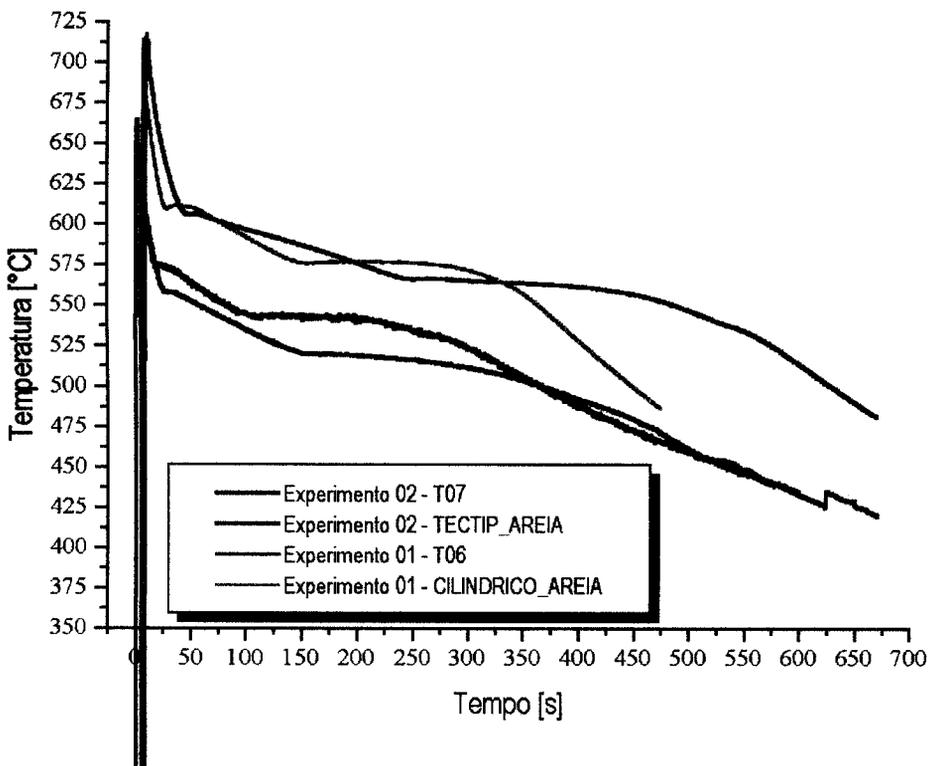
**Tabela 43.** Propriedades termofísicas [37] e parâmetros experimentais utilizados na simulação com o programa desenvolvido.

| <b>Propriedades Termofísicas</b>                                                  | <b>A356</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Massa específica do líquido [ $\text{kg/m}^3$ ]                                   | 2387        |
| Massa específica do sólido [ $\text{kg/m}^3$ ]                                    | 2690        |
| Condutividade térmica do líquido [ $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ]                    | 110,6       |
| Condutividade térmica do sólido [ $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ]                     | 172,8       |
| Calor específico do líquido [ $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ]                        | 1257,4      |
| Calor específico do sólido [ $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ]                         | 1707        |
| Calor latente de fusão [ $\text{KJ/kg}$ ]                                         | 389         |
| Temperatura liquidus [ $^{\circ}\text{C}$ ] (parâmetro experimental)              | 615         |
| Temperatura solidus [ $^{\circ}\text{C}$ ] (parâmetro experimental)               | 555         |
| <b>Condições de contorno do sistema</b>                                           |             |
| Temperatura de vazamento [ $^{\circ}\text{C}$ ] (parâmetro experimental)          | 650         |
| Temperatura ambiente [ $^{\circ}\text{C}$ ] (parâmetro experimental)              | 14          |
| Temperatura do molde [ $^{\circ}\text{C}$ ] (parâmetro experimental)              | 14          |
| Coeficiente de transferência de calor metal/molde [ $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ] | 100         |

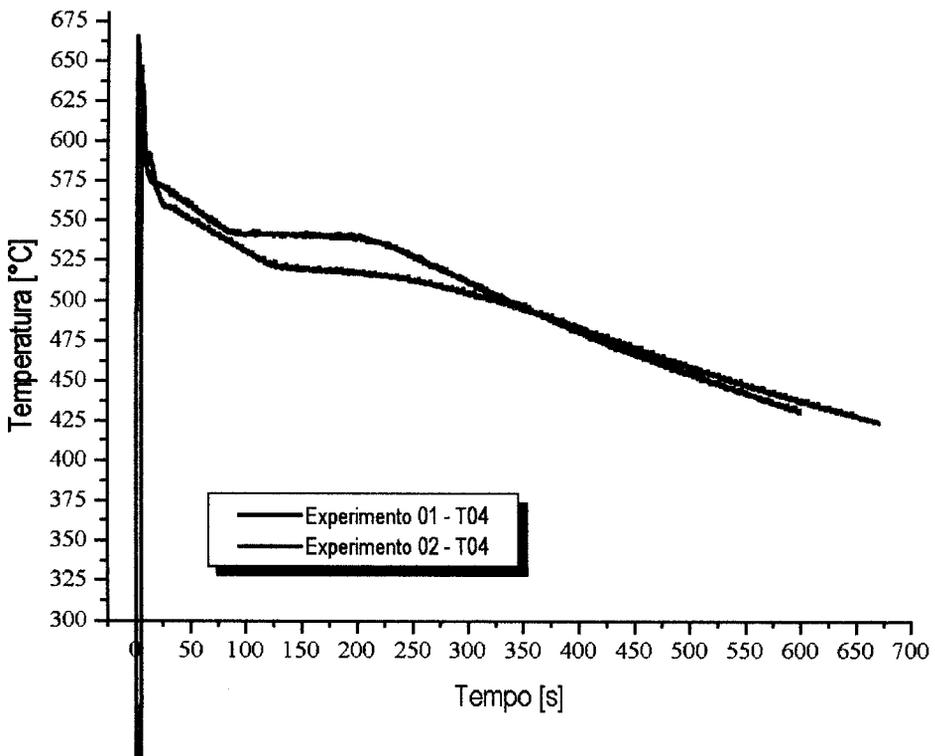
É importante relatar que ao realizar a análise térmica nos ensaios experimentais realizados com a peça de referência, a curva de resfriamento demonstrou temperaturas abaixo das obtidas nas análises térmicas realizadas no molde cilíndrico de areia e no copo de análise térmica comercial do tipo TecTip. O curioso é que no segundo ensaio experimental, onde a liga 356 foi vazada no copo de análise térmico e logo depois vazado no molde que conforma o bocal, o resultado foi o mesmo obtido no primeiro ensaio experimental. Assim, as temperaturas de transformação utilizadas para realizar a simulação, foram as obtidas nas análises térmicas realizadas nos ensaios experimentais em que se fundiu a peça de referência.

Na **Figura 45** observam-se as análises térmicas obtidas nos dois ensaios experimentais. As curvas de resfriamento obtidas com copo de análise térmica comercial (cor preta) e no molde cilíndrico de areia (cor cinza) estão elevadas em relação às curvas obtidas inserindo-se termopares na peça de referência (cor azul e vermelha).

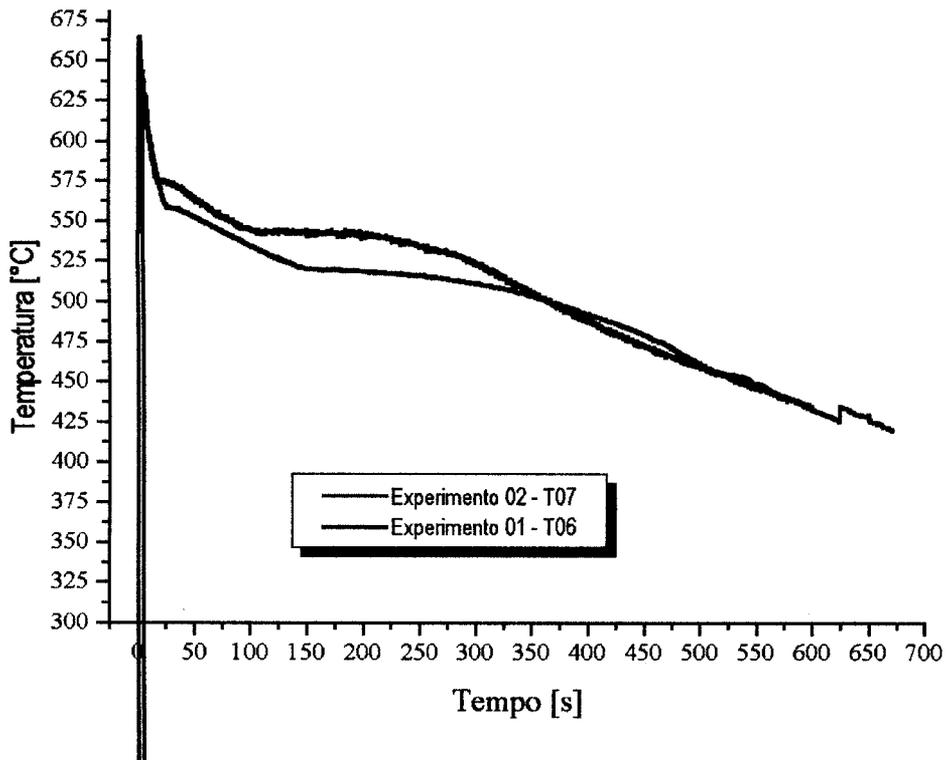
Nas **Figuras 46 e 47** são observadas as curvas de resfriamentos obtidas nos dois ensaios experimentais. Estas foram obtidas em regiões semelhantes na peça de referência. Isto demonstra não haver discordâncias nos ensaios experimentais realizados.



**Figura 45.** Curvas de resfriamento obtidas nos ensaios experimentais realizados. Observa-se que as curva obtida através dos copos de análise térmica estão mais elevadas que as obtidas na peça de referência.



**Figura 46.** Curvas de resfriamento obtidas nos dois ensaios experimentais realizados, onde se instrumentou regiões semelhantes da a peça de referência (Termopar 04). O objetivo é comparar se houve alguma mudança nas temperaturas de transformação.



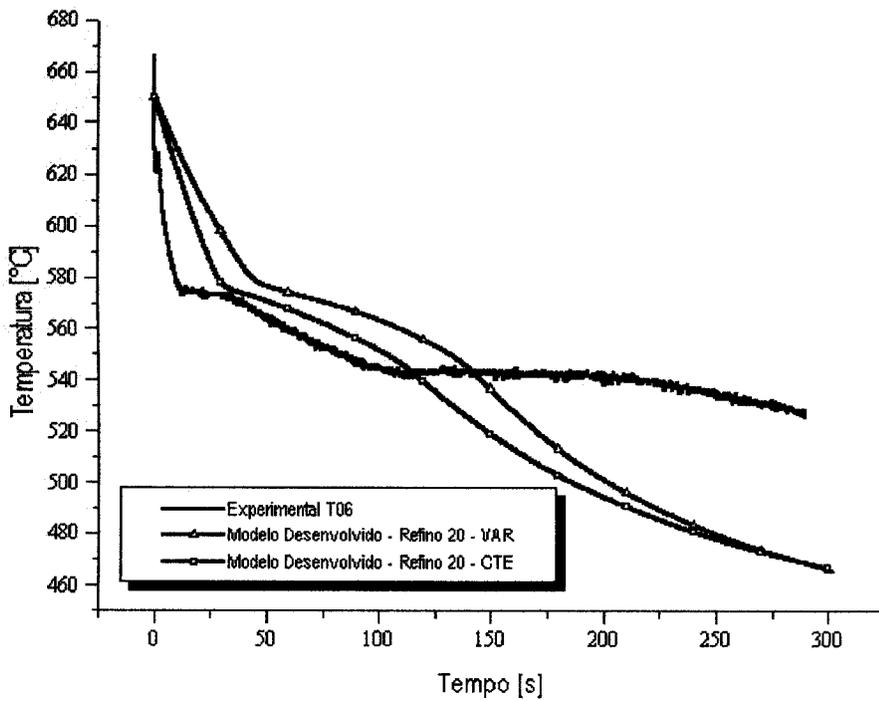
**Figura 47.** Curvas de resfriamento obtidas nos dois ensaios experimentais realizados, onde se instrumentou regiões semelhantes da a peça de referência (Termopar 06 e 07). O objetivo é comparar se houve alguma mudança nas temperaturas de transformação.

### 10.5.2. Influência do refino de malha e das propriedades termofísicas na curva de resfriamento

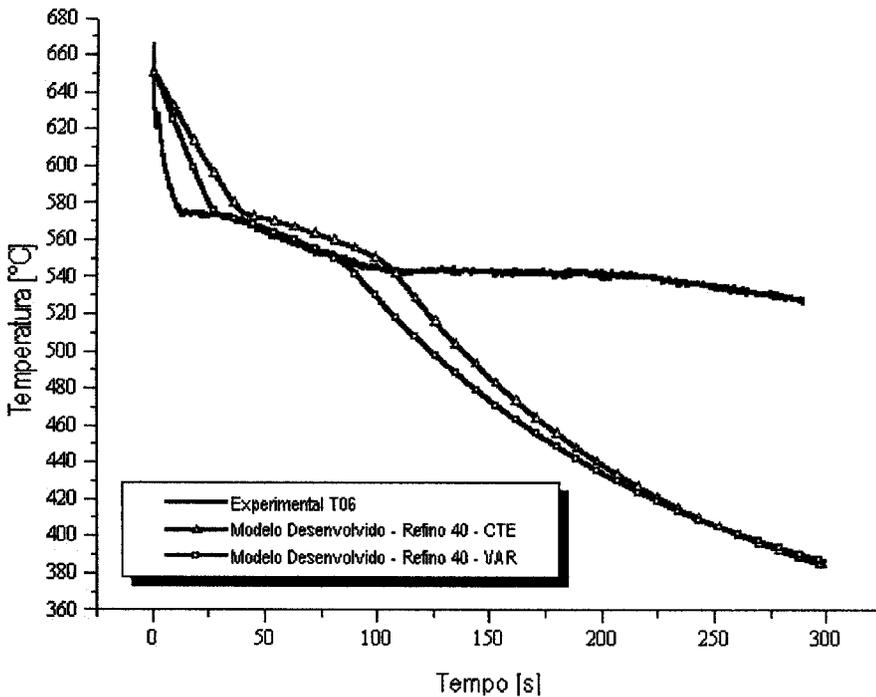
Para realizar uma comparação entre as curvas de resfriamento obtidas com o programa desenvolvido e os resultados experimentais, dois parâmetros foram considerados. O refino de malha e as propriedades termofísicas do metal. Com o objetivo de correlacionar a influência do erro de acoplamento na previsão do fenômeno de solidificação, realizou-se a simulação com três refinamentos. Usaram-se 942, 3012 e 8035 elementos para compor a malha numérica representando a fatia da peça simulada. Os resultados simulados foram comparados com as curvas experimentais obtidas através dos termopares 04, 05 e 06.

Com o objetivo de analisar a influência das propriedades termofísicas na previsão do fenômeno de solidificação, utilizou-se duas configurações. A primeira chamada de CTE, onde a fase sólida e líquida contém as mesmas propriedades. E a segunda chamada de VAR, em que as propriedades variam para cada fase do metal.

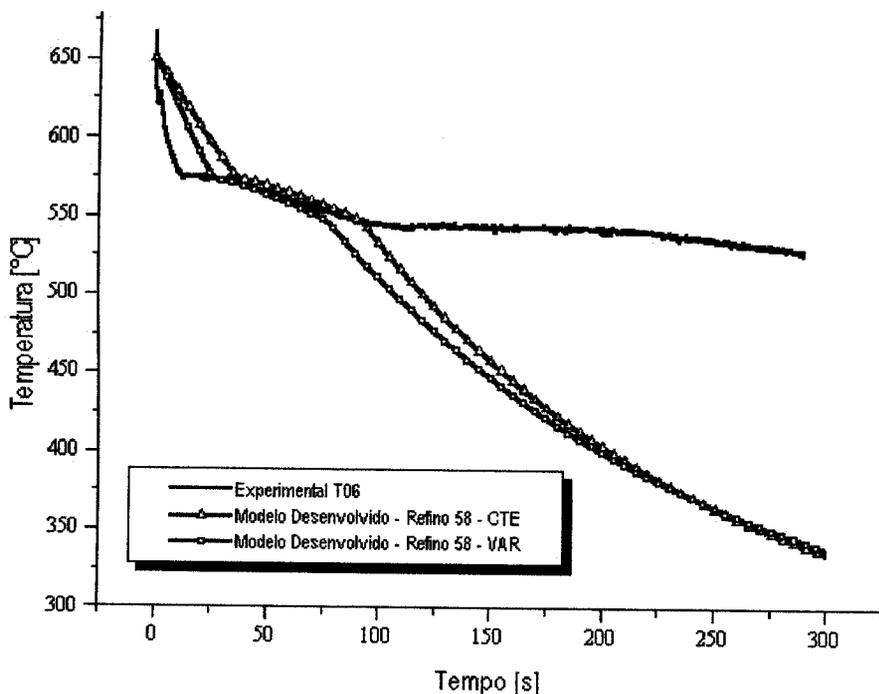
As **Figuras 48, 53 e 58**, apresentam as análises térmicas, nas quais o programa desenvolvido utiliza um refino de 20 elementos, gerando um erro numérico de 12,38 %. Os resultados obtidos na simulação são comparados com os dados experimentais obtidos pelos termopares 06, 04 e 05, respectivamente. As **Figuras 49, 54 e 59** apresentam a mesma comparação, porém o refino adotado é de 40 elementos. Neste caso, o erro numérico é reduzido para 7,99 %. Nas **Figuras 50, 55 e 60** as comparações são realizadas com um refino de 58 elementos. Neste caso, o erro numérico é reduzido para 6,77 %.



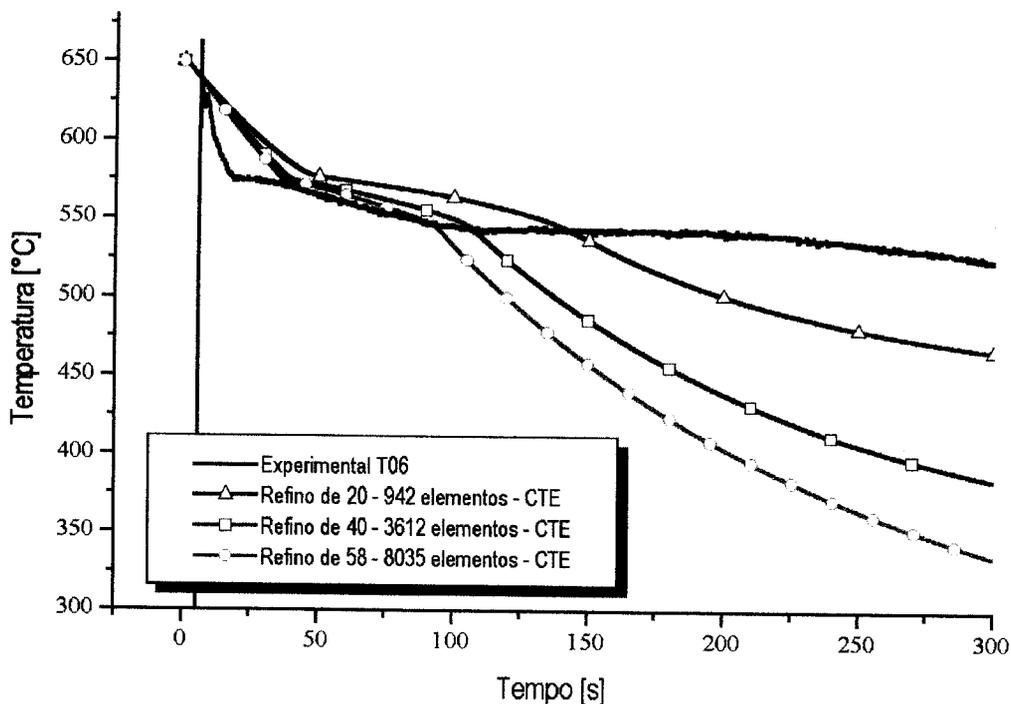
**Figura 48.** Comparação entre as análises térmicas experimentais (termopar 06) e geradas no programa desenvolvido. A malha é composta por 942 elementos, representando um erro numérico de 12,38 %. A influência das propriedades termofísicas do metal também é demonstrada.



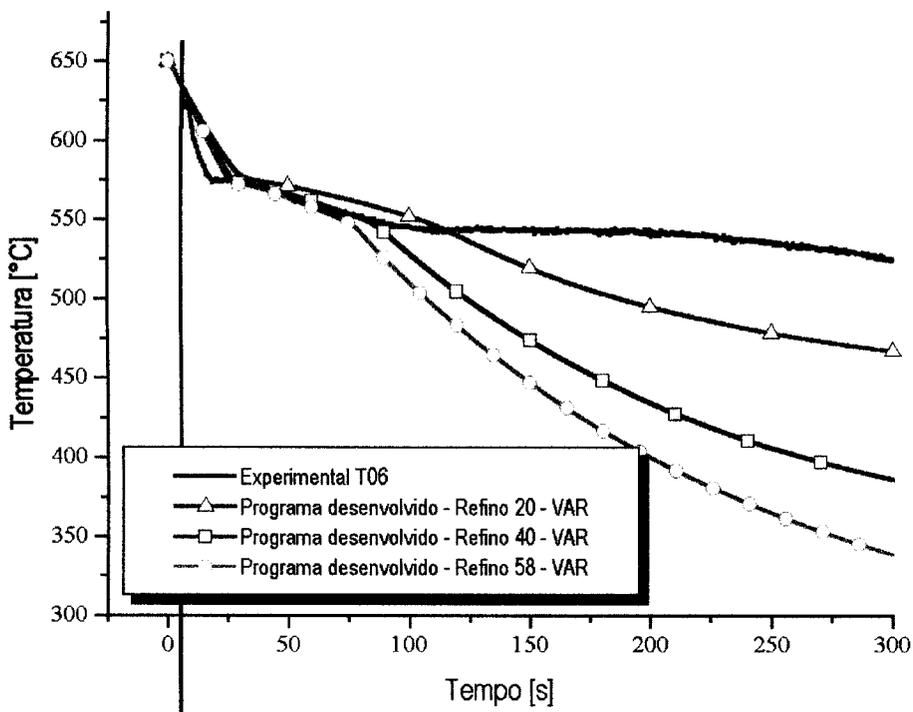
**Figura 49.** Comparação entre as análises térmicas experimentais (termopar 06) e geradas no programa desenvolvido. A malha é composta por 3612 elementos, representando um erro numérico de 7,99 %. A influência das propriedades termofísicas do metal também é demonstrada.



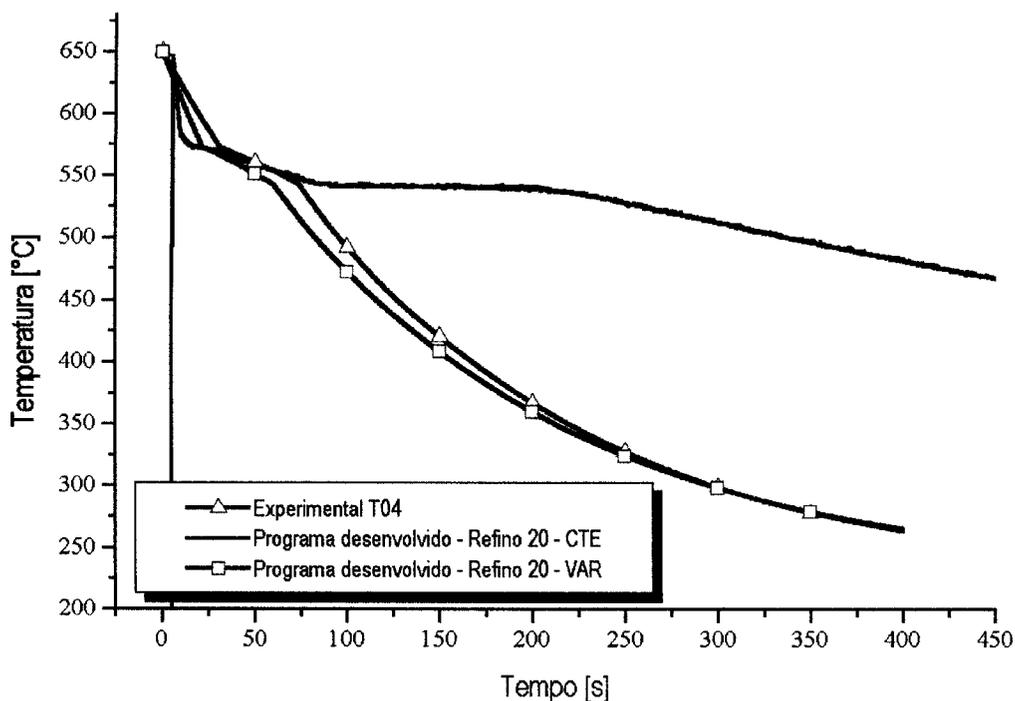
**Figura 50.** Comparação entre as análises térmicas experimentais (termopar 06) e geradas no programa desenvolvido. A malha é composta por 8035 elementos, representando um erro numérico de 6,77 %. A influência das propriedades termofísicas do metal também é demonstrada.



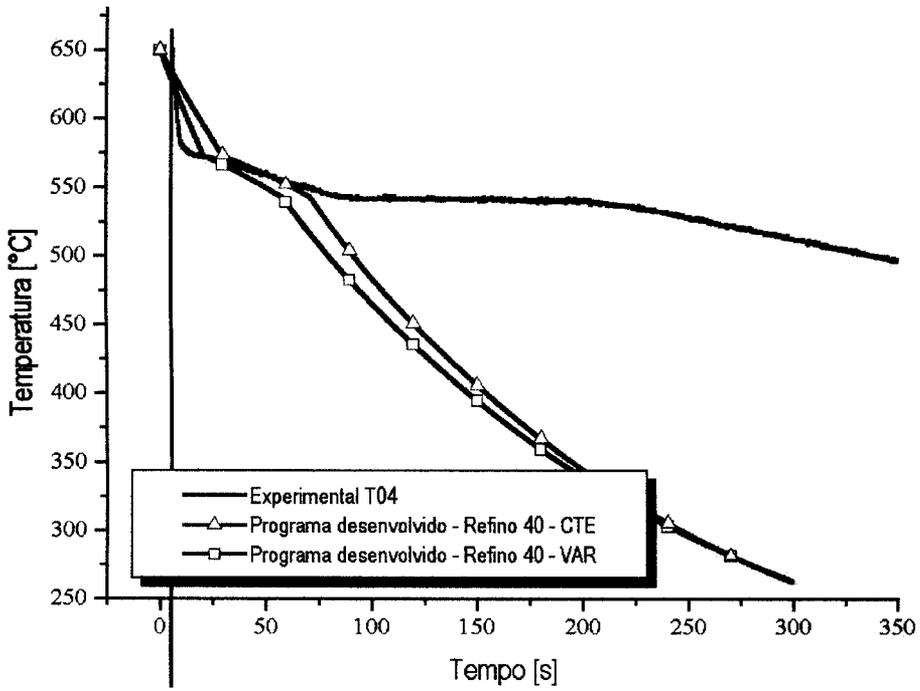
**Figura 51.** Comparação entre a curva de resfriamento experimental (termopar 06) e as simuladas no programa desenvolvido. Nesta análise, diferentes refinamentos são usados e as propriedades termofísicas do metal no estado líquido são iguais para o estado sólido.



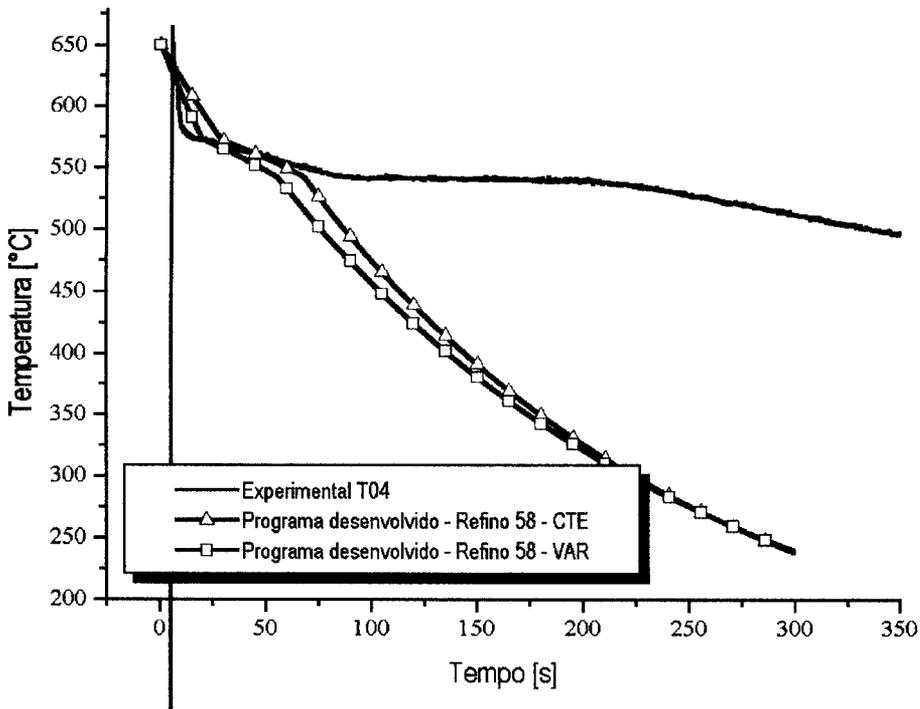
**Figura 52.** Comparação entre a curva de resfriamento experimental (termopar 06) e as simuladas no programa desenvolvido. Nesta análise, diferentes refinamentos são usados e as propriedades termofísicas são distintas para os estados sólido e líquido do metal.



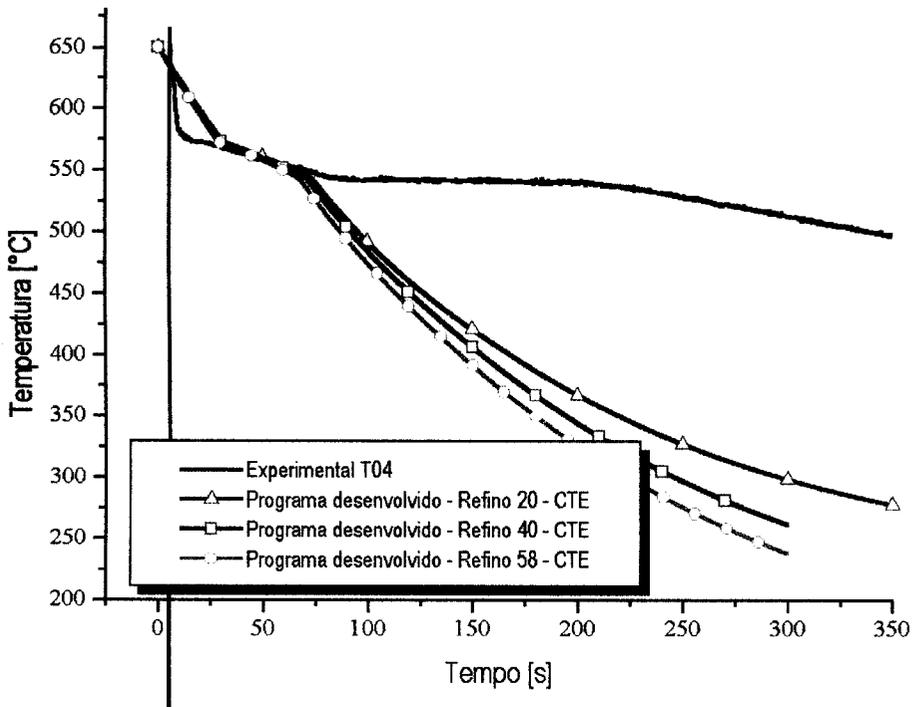
**Figura 53.** Comparação entre as análises térmicas experimentais (termopar 04) e geradas no programa desenvolvido. A malha é composta por 942 elementos, representando um erro numérico de 12,38%. A influência das propriedades termofísicas do metal também é demonstrada.



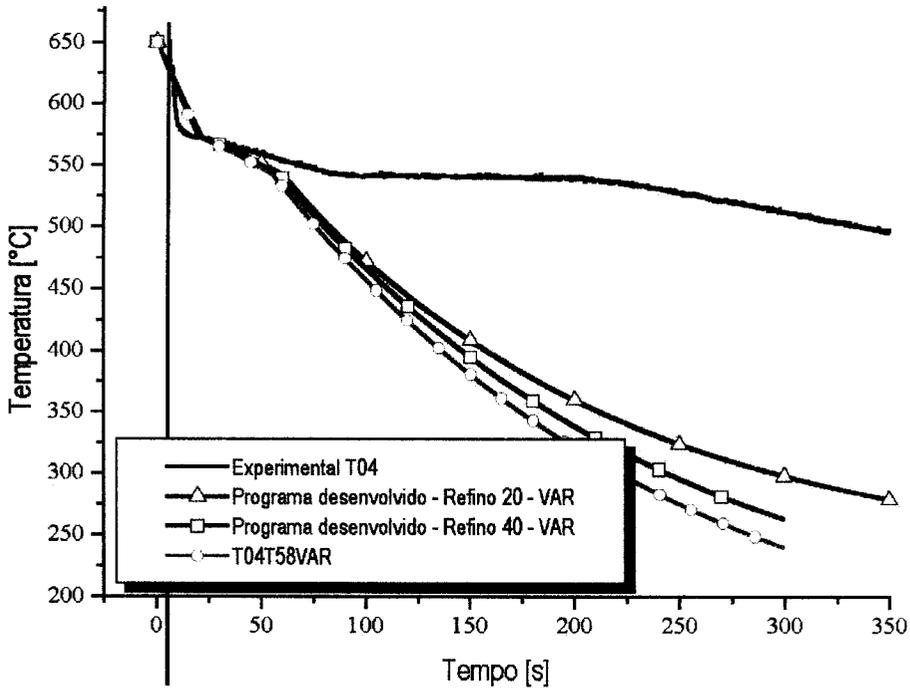
**Figura 54.** Comparação entre as análises térmicas experimentais (termopar 04) e geradas no programa desenvolvido. A malha é composta por 3612 elementos, representando um erro numérico de 7,99 %. A influência das propriedades termofísicas do metal também é demonstrada.



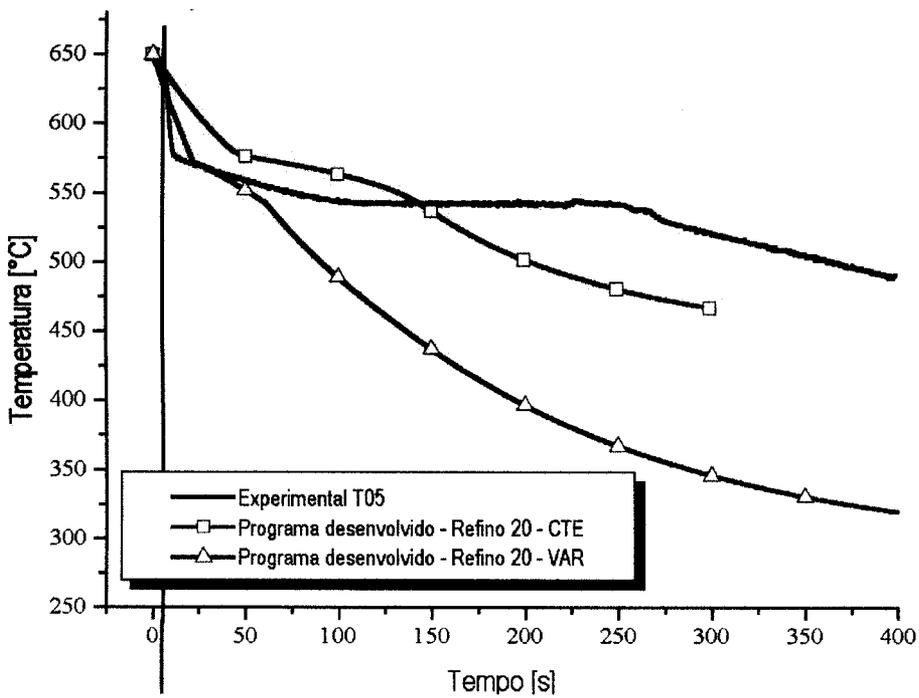
**Figura 55.** Comparação entre as análises térmicas experimentais (termopar 04) e geradas no programa desenvolvido. A malha é composta por 8035 elementos, representando um erro numérico de 6,77 %. A influência das propriedades termofísicas do metal também é demonstrada.



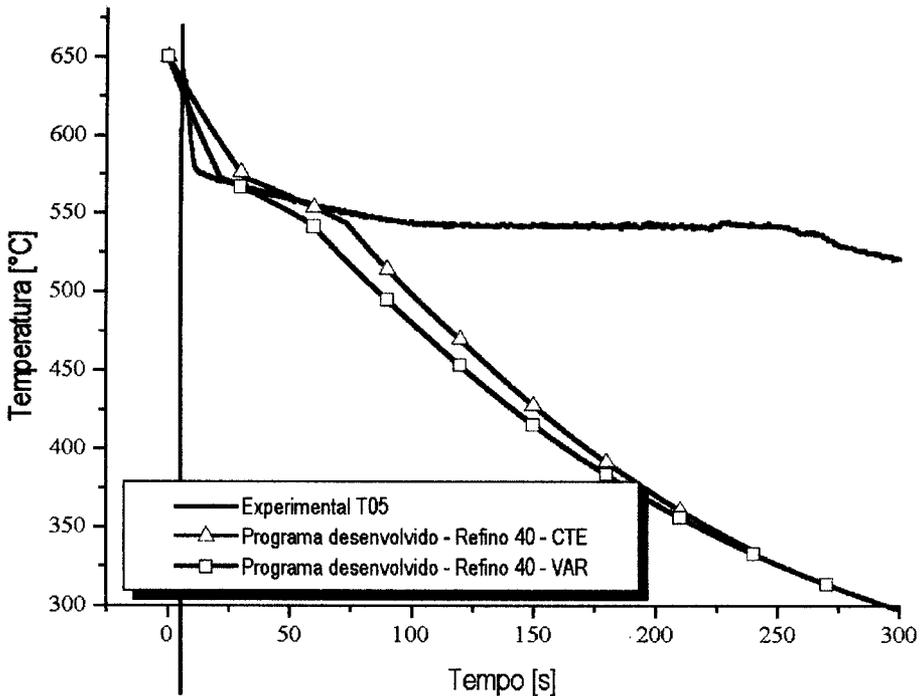
**Figura 56.** Comparação entre a curva de resfriamento experimental (termopar 04) e as simuladas no programa desenvolvido. Nesta análise, diferentes refinos são usados e as propriedades termofísicas do metal no estado líquido são iguais para o estado sólido.



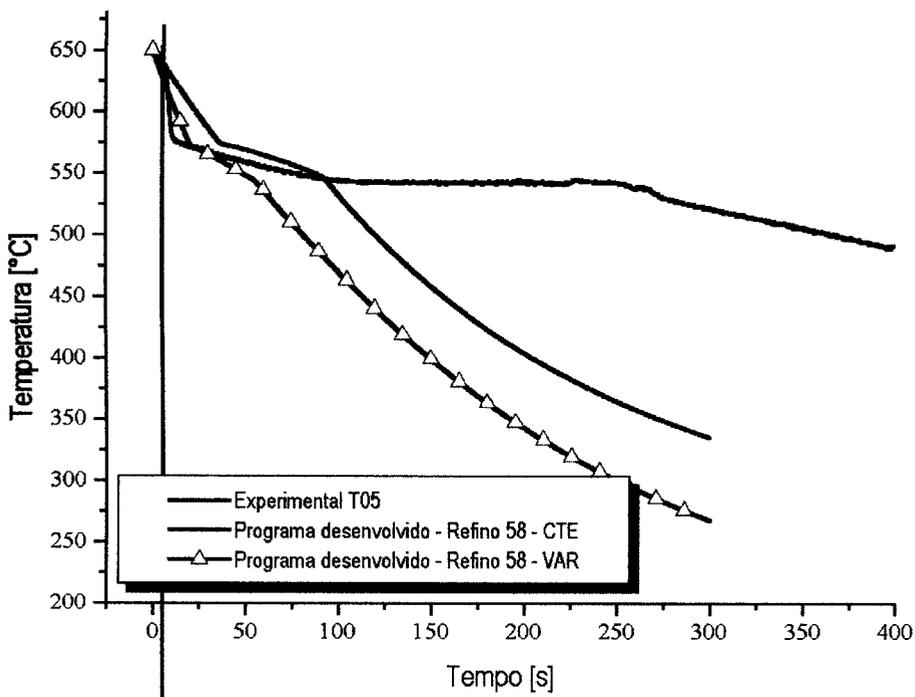
**Figura 57.** Comparação entre a curva de resfriamento experimental (termopar 04) e as simuladas no programa desenvolvido. Nesta análise, diferentes refinos são usados e as propriedades termofísicas são distintas para os estados sólido e líquido do metal.



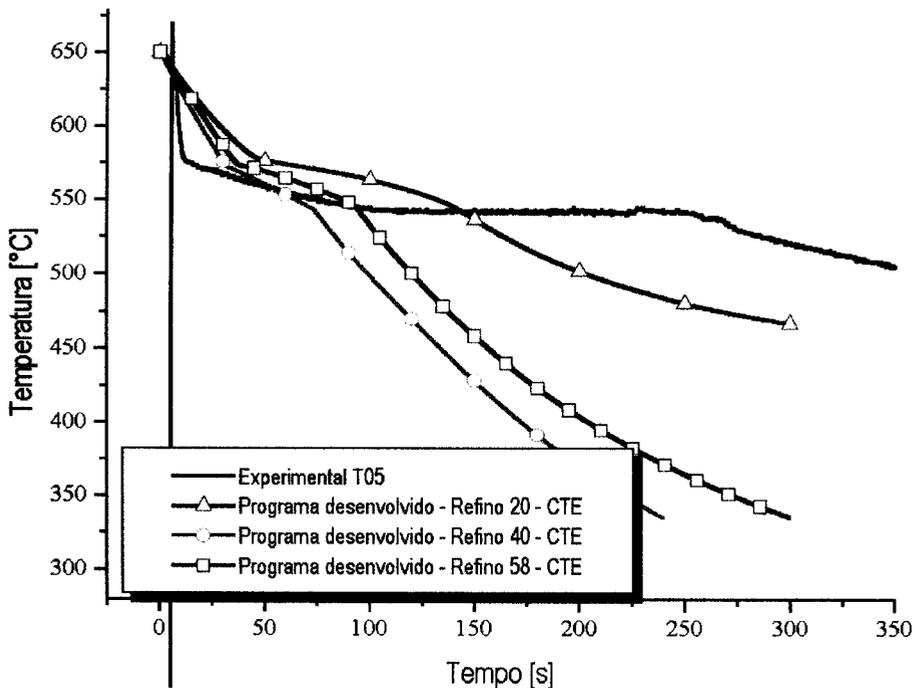
**Figura 58.** Comparação entre as análises térmicas experimentais (termopar 05) e geradas no programa desenvolvido. A malha é composta por 942 elementos, representando um erro numérico de 12,38 %. A influência das propriedades termofísicas do metal também é demonstrada.



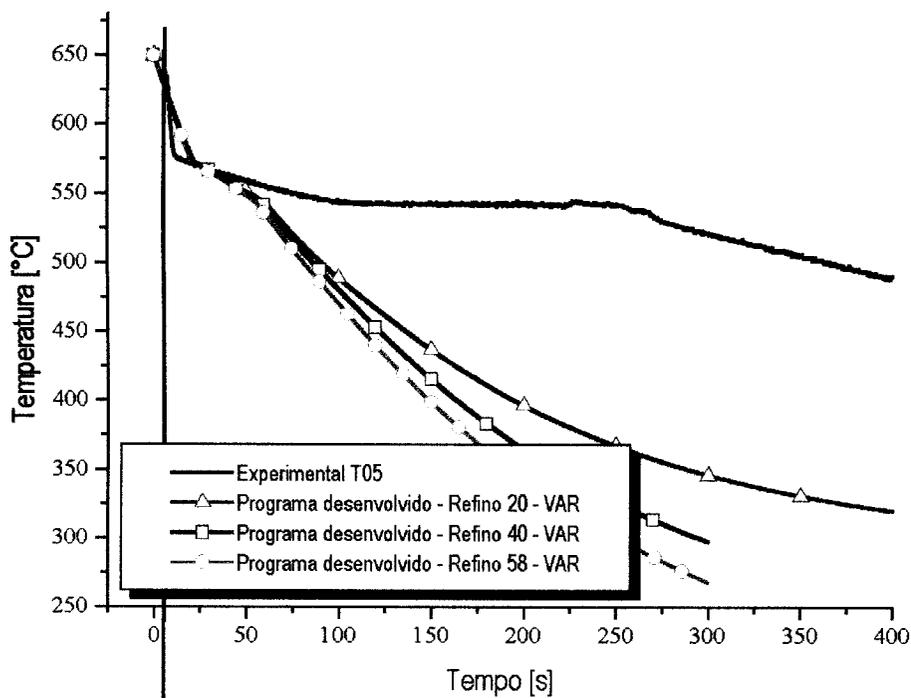
**Figura 59.** Comparação entre as análises térmicas experimentais (termopar 05) e geradas no programa desenvolvido. A malha é composta por 3612 elementos, representando um erro numérico de 7,99 %. A influência das propriedades termofísicas do metal também é demonstrada.



**Figura 60.** Comparação entre as análises térmicas experimentais (termopar 05) e geradas no programa desenvolvido. A malha é composta por 8035 elementos, representando um erro numérico de 6,77 %. A influência das propriedades termofísicas do metal também é demonstrada.



**Figura 61.** Comparação entre a curva de resfriamento experimental (termopar 05) e as simuladas no programa desenvolvido. Nesta análise, diferentes refinamentos são usados e as propriedades termofísicas do metal no estado líquido são iguais para o estado sólido.



**Figura 62.** Comparação entre a curva de resfriamento experimental (termopar 05) e as simuladas no programa desenvolvido. Nesta análise, diferentes refinamentos são usados e as propriedades termofísicas são distintas para os estados sólido e líquido do metal.

Realizando uma análise dos gráficos apresentados, conclui-se que houve uma boa correlação entre os resultados simulados e a curva de resfriamento experimental obtida através do termopar 06. Nas curvas de resfriamento simuladas nas posições dos termopares 04 e 05, observa-se que o programa desenvolvido tende a solidificar mais rapidamente, ou seja, a solidificação na região pastosa é menor. Isto é atribuído a alguns fatores.

Primeiramente, deve-se ao fato de serem regiões de espessura fina, conseqüentemente, intensifica o efeito do gap de ar, ou da redução progressiva do coeficiente de extração de calor, ao longo da solidificação, este efeito não é considerado pelo programa desenvolvido.

Em segundo lugar, e complementando a colocação anterior, o programa trabalha com um coeficiente de extração de calor constante de  $100 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , então ao simulamos, consideramos um contato perfeito entre as paredes do metal e do molde, assim a extração de calor é acentuada em regiões de pequena massa.

E finalmente, o molde não é modelado e sua superfície de contato com o metal, está sempre a temperatura ambiente. Isto favorece uma solidificação mais rápida.

Na região do termopar 06, o programa desenvolvido, demonstrou resultados satisfatórios, pois apesar dos fatores colocados acima, esta região possui mais massa, ou seja mais calor para ser extraído, sendo assim a última a ser solidificada.

As comparações comprovam que o erro numérico provocado pelo acoplamento de uma malha grosseira a geometria estudada, modifica significativamente a previsão do fenômeno de solidificação.

Nas **Figuras 51 e 52**, escolheu-se os dados experimentais obtidos com o termopar 06 para melhor representar a comparação com os resultados simulados. Observa-se uma grande variação da curva de resfriamento quando aumentasse o refino de malha, passando a usar 40 e 58 elementos ao invés do 20 elementos. A redução do erro numérico é de 12,38 % para 7,99 e 6,81 %. Este resultado evidencia a influência do erro numérico na simulação do fenômeno de solidificação. No caso dos refinamentos de 40 e

58 elementos, não há uma acentuada redução do erro numérico e isto é observado nos resultados das simulações realizadas.

As **Figuras 56 e 57**, apresentam os dados experimentais obtidos com o termopar 04 em comparação com os resultados simulados para diferentes refinamentos. Observa-se não haver qualquer melhoria na representação do fenômeno de transferência de calor devido ao refinamento de malha.

Nas **Figuras 61 e 62**, a mesma comparação é realizada, mas com os dados experimentais obtidos com o termopar 05. Observa-se uma pequena melhoria na representação do fenômeno estudado, com o refinamento de malha.

Deve-se destacar que para a comparação entre os refinamentos adotados, os que apresentam significativa melhoria utilizam a configuração de propriedades termofísicas CTE, enquanto que a configuração VAR apresenta pouca variação, ou praticamente nenhuma nos casos dos termopares 04 e 05. As análises demonstram que as propriedades termofísicas do metal também apresentam uma relevante influência no fenômeno estudado. As melhores correlações foram obtidas utilizando-se as propriedades termofísicas distintas para os estados sólido e líquido do metal. Isto, comprova que a lei de Scheil representa o fenômeno de solidificação na região pastosa, em ligas com baixa difusão do soluto no estado sólido.

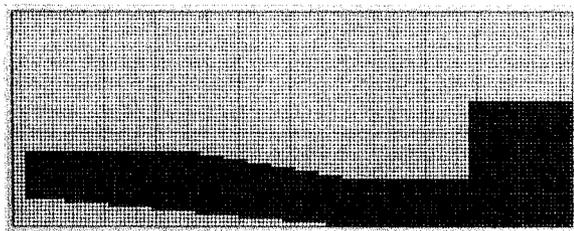
### 10.5.3. Análise da evolução das isothermas *liquidus* e *solidus*

Uma das análises pós-processamento mais comumente utilizadas por programas de simulação para examinar as características de solidificação de um sistema de fundição, são as evoluções das isothermas *liquidus* e *solidus*. Ao visualizá-las, o profissional da área de fundição obtém o perfil geométrico do avanço da frente de solidificação. Sua correta interpretação, identifica o caminho e a direcionalidade da solidificação, além da possibilidade da formação de defeitos correlacionados com a alimentação de metal líquido, como macro e micro-rechupes.

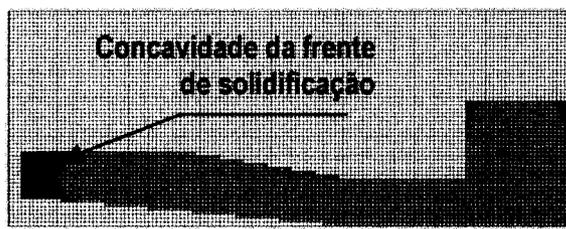
Ao realizar esta mesma análise, porém, considerando o tempo transcorrido durante a solidificação, obtém-se um mapa dos tempos e taxas de solidificação em toda a peça. Essas informações são de grande utilidade para prever o tamanho dos braços dendríticos formados. Estes são diretamente correlacionados com as propriedades mecânicas do fundido.

#### 10.5.3.1. Evolução das isothermas *liquidus* e *solidus*

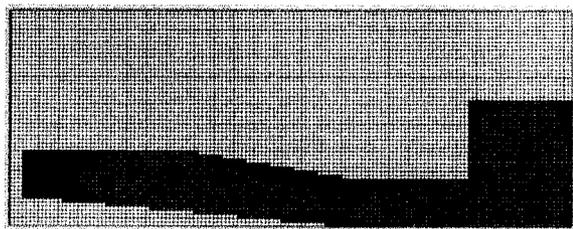
Nas **Figuras 63 até 68**, pode-se observar o perfil das isothermas *liquidus* geradas pelo programa desenvolvido. As **Figuras 69 até 74** apresentam o perfil da isoterma *solidus*.



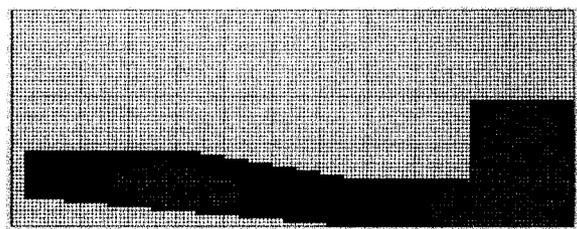
**Figura 63.** Isotherma *liquidus* em 2,00 s.



**Figura 64.** Isotherma *liquidus* 3,21 s.



**Figura 65.** Isotherma *liquidus* em 4,17 s.



**Figura 66.** Isotherma *liquidus* em 3,58 s.

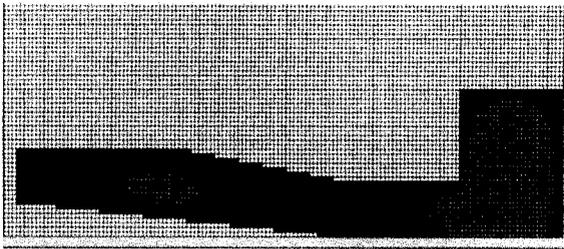


Figura 67. Isoterma *liquidus* em 3,98 s.

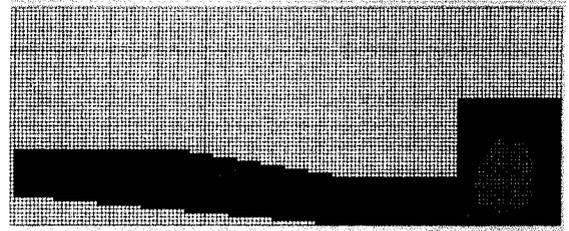


Figura 68. Isoterma *liquidus* em 5,64 s.

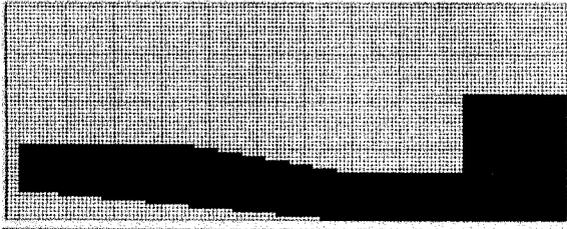


Figura 69. Isoterma *solidus* em 46,86 s.

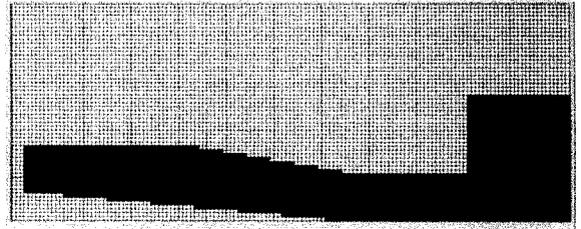


Figura 70. Isoterma *solidus* em 55,41 s.

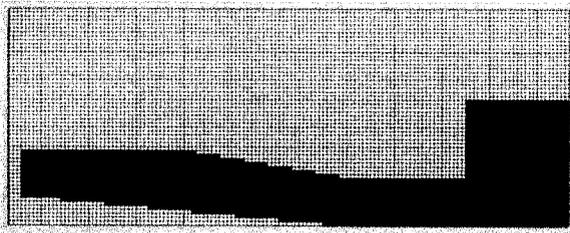


Figura 71. Isoterma *solidus* em 60,94s.



Figura 72. Isoterma *solidus* em 62,06 s.

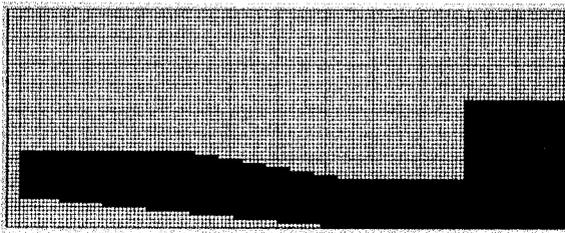


Figura 73. Isoterma *solidus* em 73,90 s.

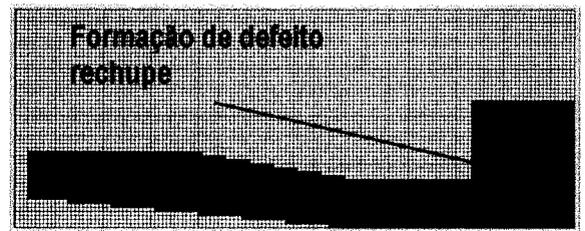


Figura 74. Isoterma *solidus* em 76,88 s.

## 10.6. Apresentação do programa comercial

O programa comercial *SolidCast*, é de origem americana, desenvolvido pela *FiniteSolutions Inc.* O laboratório de fundição, vem utilizando-o a aproximadamente dois anos, com o exclusivo objetivo de comparação e aferição dos modelos desenvolvidos. Este programa tem por características resolver a transferência de calor para sistemas de fundição por gravidade em moldes de areia, moldes cerâmicos e fundição sobre matriz metálica. O programa não leva em consideração fenômenos de transporte. Para a simulação da solidificação da liga em estudo, demonstra utilizar simplesmente uma regra linear que liga a temperatura *liquidus* com a temperatura *solidus*, e não a regra de Scheil que melhor representaria o fenômeno de solidificação da liga 356. Isto sem mencionar a solidificação eutética transcorrida.

### 10.6.1. Ajustando Parâmetros do Sistema

**Fração Sólida Crítica (FSC):** Ao iniciar a solidificação, o metal torna-se mais viscoso e pastoso, se em um determinado ponto do fundido atingir a fração sólida crítica, assumise o metal líquido para de se mover completamente, prejudicando a alimentação da microcavidades formadas durante a solidificação. Para ligas de alumínio este valor é aproximadamente de 35 %.

**Ponto de Niyama:** O critério de Niyama constitui no grandiente térmico dividido pela raiza quadrada da taxa de solidificação. Esse valor indica o grau de solidificação direcional e a probabilidade da formação de rechupes. Para as ligas de alumínio este valor se aproxima de 50 %.

**Contração de Solidificação:** Porcentagem de contração que o metal sofre durante a solidificação. Para ligas de alumínio este valor é aproximadamente de (-) 7 %.

**Escolha da liga fundida:** As propriedades termofísicas utilizadas pelo programa comercial podem ser obtidas por um banco de dados ou adicionadas pelo usuário para uma nova liga. No programa desenvolvido utilizam-se as mesmas propriedades, porém no *SolidCast*, não há distinção entre propriedades do estado líquido e sólido. Então, para a simulação comercial, as propriedades termofísicas são constantes ao longo de todo o processo de solidificação. Há uma informação a mais que deverá ser adicionada no programa comercial, o tempo de enchimento. Muito provavelmente, o programa espera este intervalo de tempo para iniciar a extração de calor, assim a extração parte do molde completamente cheio.

### 10.6.2. Curvas de Resfriamento

Conforme comentado anteriormente, o *SolidCast*, desenvolve uma curva de resfriamento traçando uma linha entre as temperatura *liquidus* e *solidus*. Se recordarmos os conceitos vistos nos **Capítulos 4** e **5**, observamos que esta representação do fenomeno de solidificação está bastante distante da realidade. Entretanto, o simulador é uma poderosa ferramenta para os profissionais da área de fundição. Na Figura 75, observa-se a curva de resfriamento utilizada pelo programa para a liga 356.

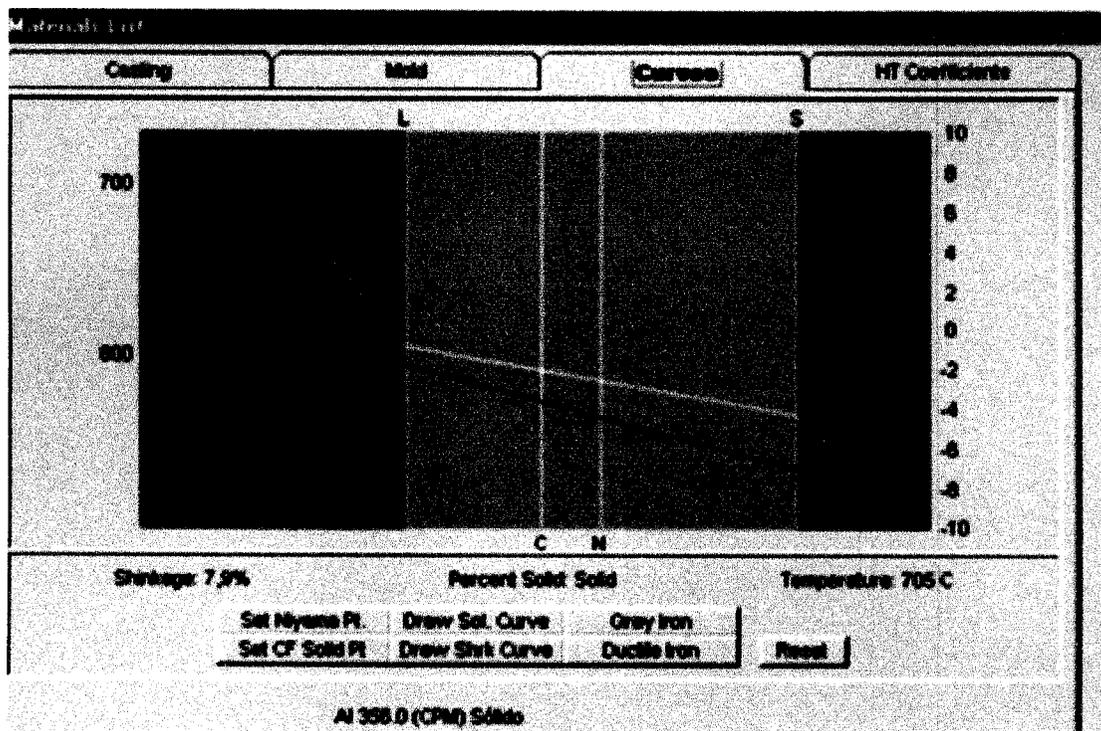


Figura 75. Representação de como o programa trabalha com as curvas de resfriamento.

**Selecionando o material para o molde:** O programa contém um banco de dados com os dados termofísicos requeridos para moldes do tipo normais, exotérmicos, ou internos (machos).

**Determinação dos coeficientes de extração de calor:** Os coeficientes de extração de calor indicam como se dá a transferência de calor através da superfície ou em partes internas do sistema de fundição. Para aplicações em areia ou em microfusão, deve-se considerar somente de que maneira o calor é transferido para o exterior a partir da superfície do molde. Os coeficientes internos ficam mascarados pela baixa condutividade térmica do material que compõe o molde. Para fundições em areia sugere-se o valor de 1,5 BTU/hr-sqrt-F.

**Geração de malha:** Para gerar a malha você pode selecionar o número de elementos ou o tamanho do elemento (mm). O sistema poderá criar um molde ao redor do fundido se você selecionar a opção *rectangular*, para molde em caixa, ou *Shell*, para moldes em casca cerâmica. Ou ainda a opção *none*, onde não há construção de um molde, neste caso o usuário deverá importar uma geometria representando o molde, previamente modelada em um sistema do tipo CAD.

### **10.6.3. Análises Térmicas de pós-processamento**

**Tempo de Solidificação:** Determina em quantos minutos é necessário para solidificar completamente.

**Tempo de Fração Crítica de Solidificação:** Tempo para atingir a fração sólida crítica.

**Densidade:** Cálculo baseado na contração e no resultado da alimentação de metal líquido, levado em consideração durante a solidificação. Para as ligas de alumínio prevê a formação de drosses e macroporosidades, a microporosidade estrutural devido a estagnação do metal líquido durante a solidificação é mais bem prevista pelo critério de Niyama ou FCC.

**Gradiente Térmico:** Dá uma idéia de quão direcional está a solidificação. Tem a desvantagem de não ser um critério comparativo, pois seus valores diferem para cada geometria de peça.

**Taxa de Solidificação:** Relaciona com a qualidade do fundido. Indica o grau de refino de grão, segregação para o contorno de grão, além de identificar regiões com pobres propriedades mecânicas.

**Pontos quentes:** Identifica centros térmicos ou pontos quentes no fundido, através da comparação do tempo de solidificação ou o tempo de fração sólida crítica.

**Critério FCC:** Prevê microporosidades em ligas de alumínio.

Todas essas análises são obtidas através da curva de resfriamento. Então podem ser facilmente aplicadas ao programa desenvolvido.

## **10.7. Comparações entre o programa desenvolvido e o programa comercial**

Para efeito de comparação, foi desenvolvido no programa comercial *SolidCast*, o mesmo ambiente do experimento. Os parâmetros termofísicos e experimentais foram idênticos aos usados para as simulações realizadas no programa desenvolvido. Apenas dois parâmetros devem ser considerados a mais no programa comercial. Estes são: as propriedades termofísicas do molde [37] e o tempo para enchimento do molde. É importante destacar que o programa comercial não utiliza propriedades termofísicas distintas para os estados sólido e líquido do metal. Na **Tabela 44**, estão listados os parâmetros necessários para gerar as simulações.

| <b>Propriedades Termofísicas</b>                                         | <b>A356</b> | <b>Molde</b> |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------|
| Massa específica do líquido [kg/m <sup>3</sup> ]                         | -           |              |
| Massa específica do sólido [kg/m <sup>3</sup> ]                          | 2690        | 1521,71      |
| Condutividade térmica do líquido [W/m.K]                                 | -           |              |
| Condutividade térmica do sólido [W/m.K]                                  | 172,8       | 0,5897       |
| Calor específico do líquido [J/kg.K]                                     | -           |              |
| Calor específico do sólido [J/kg.K]                                      | 1707        | 1075,28      |
| Calor latente de fusão [KJ/kg]                                           | 389         |              |
| Temperatura liquidus [°C] (parâmetro experimental)                       | 615         |              |
| Temperatura solidus [°C] (parâmetro experimental)                        | 555         |              |
| Condições de contorno do sistema                                         |             |              |
| Temperatura de vazamento [°C] (parâmetro experimental)                   | 650         |              |
| Temperatura ambiente [°C] (parâmetro experimental)                       | 14          |              |
| Temperatura do molde [°C] (parâmetro experimental)                       | 14          |              |
| Tempo de enchimento do molde [s] (parâmetro experimental)                | 5,94        |              |
| Coefficiente de transferência de calor metal/molde [W/m <sup>2</sup> .K] | 100         |              |

**Tabela 44.** Propriedades termofísicas [37] e parâmetros experimentais utilizados na simulação com o programa comercial *SolidCast*.

Nas comparações realizadas procurou-se demonstrar as diferenças entre o modelo aplicado no programa desenvolvido e no comercial em representar o fenômeno de solidificação do sistema de fundição estudado.

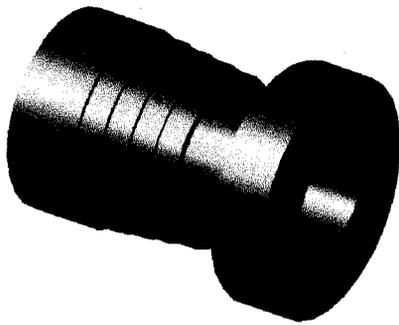
As comparações abordam as coordenadas utilizadas em ambos programas para gerar a malha representativa da geometria da peça estudada. Neste contexto, as malhas geradas pelo programa comercial contiveram quantidades de elementos próximos aos gerados pelo programa desenvolvido. Esta comparação é realizada através da representação 3D da geometria da peça e das análises térmicas simuladas. Outra comparação é realizada apresentando as evoluções das isotermas liquidus e solidus.

### **10.7.1. Comparação entre coordenadas cartesianas e cilíndricas na representação geométrica da peça de referência**

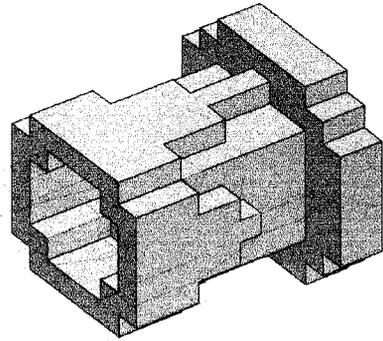
Devido à dificuldade em desenvolver programas que identifiquem determinadas características da geometria da peça a ser modelada e acople uma malha numérica que a represente com um baixo erro numérico e pouca quantidade de elementos, a coordenada cartesiana é unanimidade nos programas comerciais de simulação para indústria de fundição. Ao aplicar uma coordenada cartesiana sobre uma geometria complexa, ou até mesmo, uma geometria simples, como a peça de referência, porém de simetria cilíndrica, a quantidade de elementos necessários para representar com fidelidade tal geometria é alta.

Através de uma comparação entre o modelo aplicado em coordenada cilíndrica e o programa comercial, que utiliza coordenada cartesiana, comprova a importância no aprofundamento do estudo no desenvolvimento de algoritmos para o acoplamento de coordenadas adequadas em geometrias de peças da indústria de fundição.

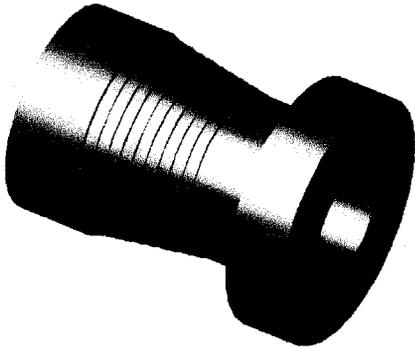
A **Figura 76**, apresenta uma das geometrias geradas por ambos simuladores. Nota-se que com, aproximadamente, o mesmo número de elementos, o programa desenvolvido representa com maior fidelidade à geometria da peça modelada. A variação do refino de malha em coordenadas cartesianas não provoca o mesmo efeito observado em coordenadas cilíndricas.



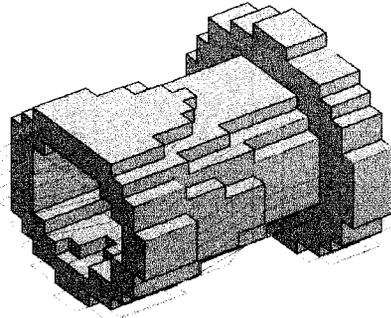
a) 942 Elementos



b) 891 Elementos



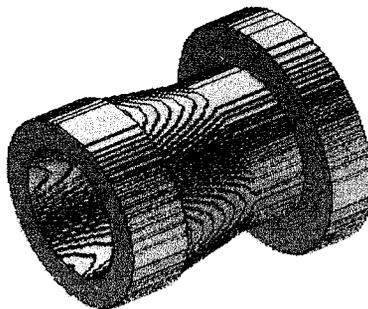
c) 3779 Elementos



d) 3528 Elementos

**Figura 76.** Comparação entre as coordenadas cartesianas e cilíndricas para representação da geometria estudada. a e c) Programa desenvolvido; b e d) programa comercial *SolidCast*.

Para representar com fidelidade tal geometria, o *SolidCast* necessita 1 milhão de elementos, **Figura 77**, enquanto que o programa desenvolvido requer 3779 elementos para uma representação muito satisfatória.

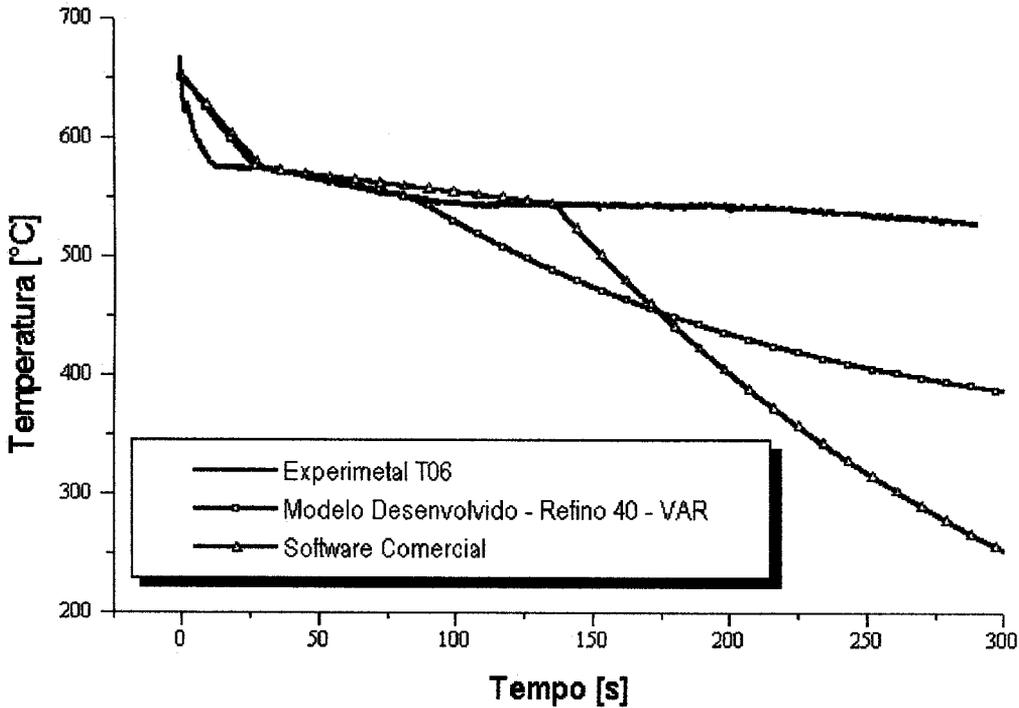


**Figura 77.** Representação da geometria simulada no programa comercial *SolidCast*, com a utilização de 1 milhão de elementos.

No modelo aplicado pelo programa desenvolvido, a peça é fatiada em 100 pedaços, para realizar uma comparação mais justa, não considerando a quantidade de elementos simulados, mas o total de elementos para representar tal geometria em três dimensões, o programa desenvolvido utilizaria 377.900 elementos. Isto equivale a 2,67 vezes menos elementos que o programa comercial.

### 10.7.2. Comparação das curvas de resfriamento simuladas

As curvas de solidificação geradas pelo programa desenvolvido e no comercial em comparação com os resultados experimentais, **Figura 78**, comprovam a eficiência do modelo numérico para sistema cilíndrico. Observa-se uma melhor aproximação dos resultados obtidos pelo modelo desenvolvido aos gerados experimentalmente.



**Figura 78.** Comparação entre as curvas de resfriamento obtidas através da simulação em software comercial e modelo desenvolvido com os resultados experimentais.

### 10.7.3. Comparação da evolução das isothermas liquidus e solidus.

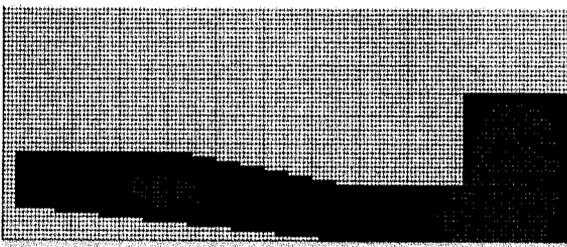
A comparação das isothermas *liquidus* e *solidus* gerados pelo programa comercial e pelo programa desenvolvido apresentam os mesmos defeitos formados Porém, os tempos são bem diferenciados. Nas Figuras 79 e 80 observam-se as evoluções das isothermas no programa comercial e nas Figuras 81 e 82. as evoluções geradas pelo simulador desenvolvido.



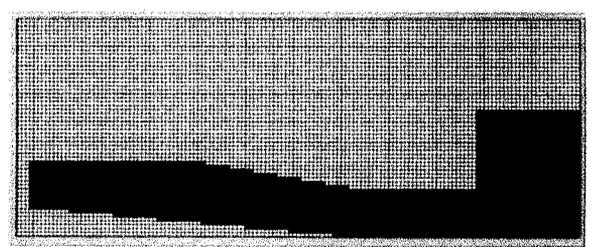
**Figura 79.** Tempo *Liquidus*: 0,41 min. = 24,6 s.



**Figura 80.** Tempo *Solidus*: 5,01 min. = 300,6 s.



**Figura 81.** Tempo *Liquidus*: 4,17 s.



**Figura 82.** Tempo *Solidus*: 62,06 s.

## **10.8. Desenvolvimento de um sistema de fundição para produção da peça de referência com a sanidade requerida.**

Ao projetar um sistema de alimentação, primeiramente, define-se que condições de sanidade desejam-se obter. A perfeita saúde de todas as partes de uma peça fundida é muito difícil de ser obtida, conseqüentemente muito dispendiosa, e nem sempre se justifica para a sua utilização.

Neste contexto, a simulação tem um papel muito importante. Utilizando como exemplo a produção de virabrequins em ferro fundido, os profissionais responsáveis pelo projeto de tais sistemas de alimentação, utilizam simuladores comerciais, para obter uma boa estimativa do grau de sanidade da peça a ser produzida.

Os resultados da simulação possibilitam localizar a região de menor sanidade da peça. Para o exemplo do virabrequim, o simulador prevê na região do eixo central tem-se a maior quantidade de defeitos. Estes, dentro de parâmetros pré-determinados pelo cliente, não prejudicam em sua aplicação.

Dependendo da composição da liga, esta pode solidificar por camadas finas ou por camadas espessas. No caso de ligas que solidificam em camadas espessas, por exemplo a A356.0, ou com grande intervalo de solidificação, forma-se, lentamente, uma casca sólida e o estado pastoso estende-se a toda a peça. A tendência é para a formação de rechupes interdendríticos com contornos complexos e de microrechupes dispersos em toda a peça.

A integridade final do produto solidificado depende fundamentalmente da microestrutura formada, tão bem como dos defeitos inerentes, os quais são determinados durante a solidificação. O tratamento numérico dado à previsão da microestrutura e à formação de defeitos durante a solidificação é a análise mais complicada de um sistema de fundição, pois para cada tipo de liga incorrem efeitos muitos particulares. Pode-se citar alguns parâmetros obtidos nos simuladores numéricos: ① Tamanho de grão; ② Espaçamento dos braços interdendríticos secundários e espaçamento eutético; ③ Características do tamanho de poros e distribuição de porosidades; ④ Microporosidade devido ao fluxo de fluido interdendrítico e ⑤ Mapeamento morfológico ao longo da solidificação

Em geral a proporção do EBD é diretamente relacionada com o tempo local de solidificação ou média da taxa de resfriamento durante a solidificação. Altas taxas de resfriamento ou baixos tempos de solidificação local, representam pequenos EBD além de reduzido grau de microsegregação associada.

O tamanho de grão é determinado pela medida do tempo requerido para o resfriamento da temperatura de vazamento da liga até a temperatura onde as pontas dendríticas tocam umas nas outras (Temperatura Crítica de Nucleação).

Outro grande problema que deve ser analisado no efeito da solidificação consiste na microsegregação. A homogeneidade das características finais obtidas depende fundamentalmente deste fator, e a distribuição do soluto no sólido e no líquido em função das condições de solidificação e a cinética de crescimento da liga envolvida devem ser estudados na garantia de gerar produtos de qualidade aceitável. Os parâmetros de influência crítica no efeito da microsegregação, são:

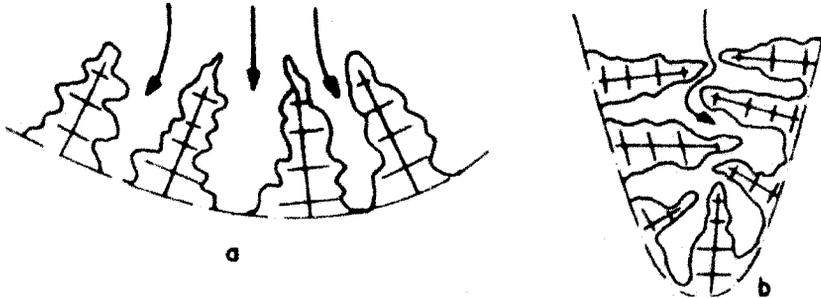
- Coeficiente do Equilíbrio de Partição;
- Taxa de Resfriamento;
- Difusividade do Sólido;

## Utilidade dos resfriadores e dos massalotes – Solidificação dirigida

Para evitar a formação de rechupes, uma primeira solução é aumentar a velocidade de resfriamento da parte maciça de uma peça. Com o auxílio de um resfriador as isothermas não se fecham, permitindo que o metal líquido continue a compensar o efeito da contração de solidificação.

Outra solução é colocar um massalote em cima da parte maciça. Controlando o caminho das isothermas de solidificação dentro de uma peça, é possível melhorar a qualidade de um fundido e conseguir que a última parte de metal líquido se solidifique no massalote.

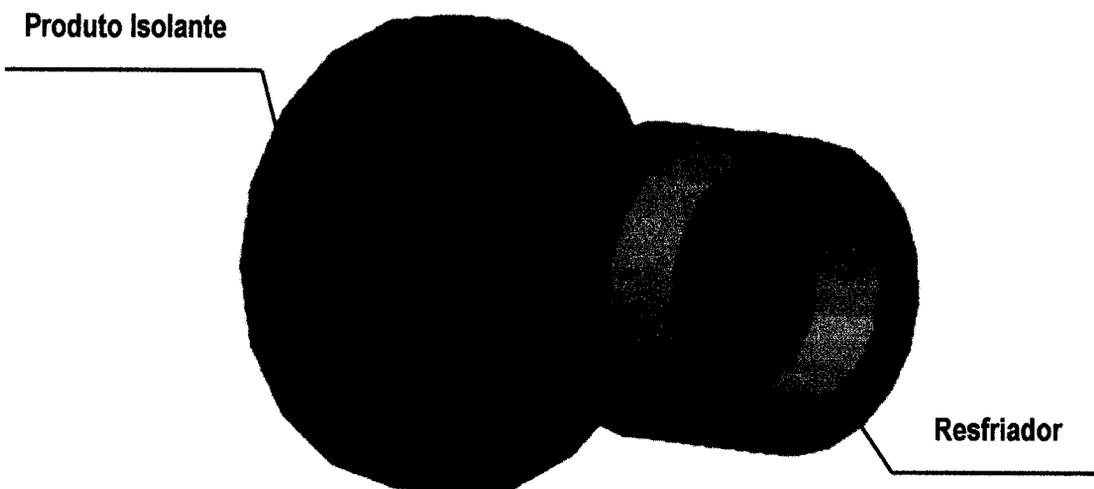
Na **Figura 83** observa-se o efeito da concavidade da frente de solidificação na alimentação interdendrítica.



**Figura 83.** Efeito da concavidade da frente de solidificação na alimentação interdendrítica. a) Concavidade aberta. Facilita a alimentação de metal líquido entre as dendritas que estão crescendo. b) Concavidade fechada. Demonstrando uma das causas da formação de rechupes interdendríticos, pela falta de alimentação interdendrítica.

## Sistema de fundição modelado

Com o objetivo de desenvolver um sistema de fundição que reproduza as propriedades requeridas para assegurar a qualidade da peça fundida, modelou-se um sistema composto de um anel de resfriamento e um produto isolante na região oposta. Os coeficientes de extração de calor são 1000 e 0,0001 W/m<sup>2</sup>.K, respectivamente. Para o molde utilizou-se um coeficiente de 100 W/m<sup>2</sup>.K. Observa-se na **Figura 84** o sistema de alimentação modelado.



**Figura 84.** Sistema de fundição modelado para produzir a peça de referência com a sanidade requerida.

A partir da visualização das isotermas de início e fim de solidificação, **Figuras 85** até **97**, percebe-se uma mudança no comportamento da frente de solidificação.

A isoterma *liquidus*, apresenta uma concavidade inicial nula, ao longo de seu avanço a concavidade se mantém relativamente aberta. A maior diferença nota-se na isoterma de fim de solidificação. A concavidade da frente se mantém praticamente nula durante todo o processo e o rechupe central, anteriormente previsto, não se forma mais.

Este sistema evita a formação de microrechupes interdendríticos. A minimização deste defeito aumenta a resistência mecânica, habilitando a peça para a sua aplicação.



**Figura 85.** Isoterma *liquidus*  $t = 0,71$  s.



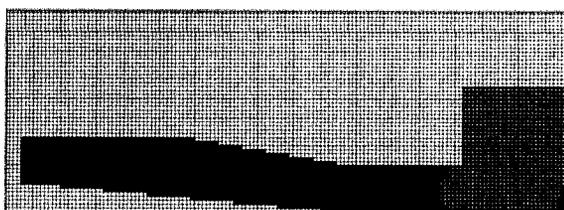
**Figura 86.** Isoterma *liquidus*  $t = 2,32$  s.



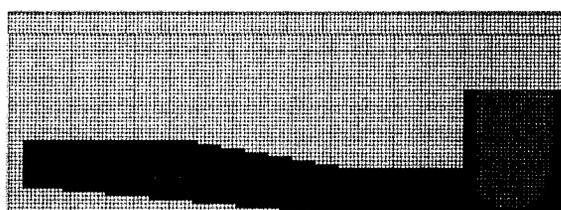
**Figura 87.** Isoterma *liquidus*  $t = 2,89$  s.



**Figura 88.** Isoterma *liquidus*  $t = 3,16$  s.



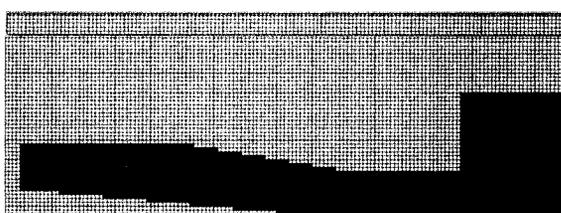
**Figura 89.** Isoterma *liquidus*  $t = 4,43$  s.



**Figura 90.** Isoterma *liquidus*  $t = 6,83$  s.



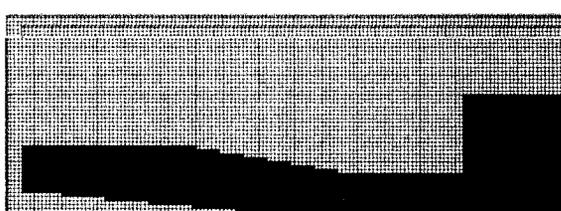
**Figura 91.** Isoterma *liquidus*  $t = 9,09$  s.



**Figura 92.** Isoterma *solidus*  $t = 17,96$  s.



**Figura 93.** Isoterma *solidus*  $t = 26,68$  s.



**Figura 94.** Isoterma *solidus*  $t = 37,74$  s.

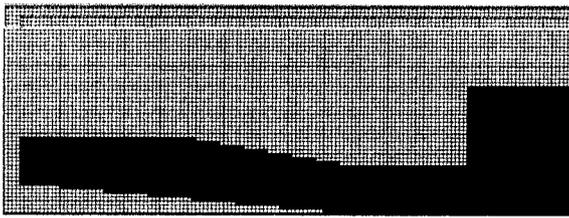


Figura 95. Isotherma solidus  $t = 43,40$  s.

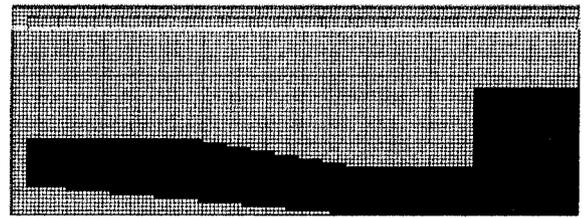


Figura 96. Isotherma solidus  $t = 48,36$  s.

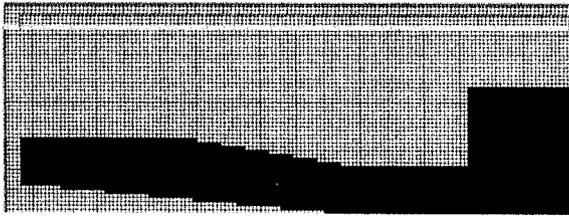


Figura 97. Isotherma solidus  $t = 72,33$  s.

## 11. Conclusão

Realizando uma análise dos resultados observados, curvas de reasfriamento, representação da evolução morfológica das frentes de início e fim de solidificação, além da malha representando a geometria modelada, conclui-se que houve uma boa correlação entre os resultados simulados e os obtidos nos ensaios experimentais.

Deve-se lavar em consideração alguns fatores que influenciam a transferência de calor durante a solidificação, estes não utilizados no simulador desenvolvido, e por conseqüência, alteram os resultados simulados, como: (a) o efeito do *gap* de ar, este reduz progressivamente o coeficiente de extração de calor, ao longo da solidificação; (b) a utilização de coeficiente de extração de calor constante de  $100 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e (c) o fato de não ser modelado o molde, significando que este mantém sua temperatura constante ao longo do processo.

Conclui-se com este trabalho a extrema importância da ferramenta computacional, denominada modelagem numérica, para o auxílio dos profissionais da área metal-mecânica e principalmente, para os profissionais da área de fundição. Ressaltando a crescente necessidade de utilizar coordenadas adequadas para representar as geometrias modeladas, com a menor quantidade de elementos, tendo como exclusivo objetivo reduzir o tempo de simulação.

## 12. Agradecimentos

Agradeço por este trabalho a todas as pessoas que formei uma grande amizade ao longo dos meus cinco anos e meio de graduação no curso de Engenharia Metalúrgica. Tem a obrigação de mencionar, aqueles que foram de fundamental importância em minha vida acadêmica. Agradeço de coração aos professores: Lurdes Müller, Frederico Dick, Nestor Heck, Afonso Reguly, Antonio Vilela, Ivo Schneider, Francisco Kiss e Telmo Strohaecker.

Este trabalho foi desenvolvido com os conhecimentos adquiridos nas fundições que trabalhei, através da ajuda e conversas com muitos engenheiros que conheci (em especial ao Eng. Everton da Sulina de Metais e ao Eng. Marco Borguerth, da Alcoa), além de muitas horas de estudo e dos diversos trabalhos realizados no Laboratório de Fundição. Neste, fiz muitos amigos e quero agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Jaime Álvares Spim Jr., em nome dos Professores, Pesquisadores e Funcionários que o compõe.

Não posso deixar de mencionar aquele que divido a responsabilidade pelo diversos trabalhos realizados e principalmente pelo programa numérico desenvolvido e apresentado neste trabalho. Ao colega Vinicius Karlinski de Barcellos, que de certa forma representa todos os meus colegas e amigos conquistados durante a graduação, muito abrigado.

Porto Alegre, 31 de Julho de 2003.

### 13. Bibliografia

- [1] SPIM, J. A.; et all; **"An optimization of The finite difference method for modeling solidification of complex shaped domains"**, Materials Engineering Department, State University of Campinas, UNICAMP PO Box 6122, 13083-970 – Campinas, S. P. Brazil; Journal of the Braz.Soc. Mechanical Sciences - RBCM, V.XIX, No. 3, 392-409, (1997);
- [2] SPIM, J. A.; et all; **"Numerical analysis of solidification of complex shaped bodies: coupling of mesh elements of different geometries"**, Materials Engineering Department, State University of Campinas, UNICAMP PO Box 6122, 13083-970 – Campinas, S. P. Brazil; Materials Science and Engineering A277 (2000) 198-205.
- [3] DOLSAK, B.; et all; **"Finite element mesh design expert system"**, Faculty of Mechanical Engineering, University of Mirobor, Smetonova 17, SI-2000 Maribor, Slovenia Knowledge-Based System 15 (2002) 315-322.
- [4] REXROTH, C. H.; et all; **"Exploiting the flexibility of unstructured grids for computing complex flow patterns more precisely"**; Lehrstuhl und Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Universität Karlsruhe (TH), D-76128 Karlsruhe, Germany; International Journal of Heat and Fluid Flow, V.19 (1998) 439-445.
- [5] SPIM, J. A.; **"Aplicação da modelagem matemática na definição integral da solidificação para projeto ou reprogramação de sistemas de fundição"**, Tese de doutorado; UNICAMP/FEM/DEMA, 241 págs., Jan (1996).
- [6] PEHLKE, R. D.; et all; **"Metal-mold interfacial heat transfer"**, University of Michigan, Ann Arbor, MI; Metallurgical and Materials Transactions B, V.16B, 585-594, (1985);
- [7] OHTSUKA, Y.; et all; **"Application of a computer simulation system to aluminum permanent mold castings"**, Toyota Motor Co. Ltd., Aichi-ken, Japan; AFS Transactions, V.89, 635-646, (1982).
- [8] KURZ, W.; et all; **"Solidification microstructures: Recent developments, future directions"**, Acta Materialia, V. 48, 43-70 (2000).
- [9] NASTAC, L.; **"Numerical modeling of solidification morphologies and segregation patterns in cast dendritic alloys"**, Concurrent Technologies Corporation, 100 CTC Drive, Johnstown, PA 15904-1935, USA; Acta Materialia, V. 47, N° 17, 4253-4262 (1999).
- [10] BRIMACOMBE, J.K.; **"Mathematical model of the thermal processing of steel ingots: Part I. Heat flow model"**; The Center for Metallurgical Process Engineering at the University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada; Metallurgical and Materials Transactions B, V. 18B, 119-130, (1987);
- [11] LALLY, B. et. all., **"Finite Difference Heat-Transfer Modeling for Continuous Casting"**, Department of Metallurgical Engineering and Materials Science and the Department of Chemical Engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213; Metallurgical and Materials Transactions B. V.21B, 761-770, (1990).
- [12] VENKATARAMANI, R.; et all; **"Microestrutural modeling of solidification in A356 alloy"**, Center for Near-Net Shape Processing of Materials, Ryerson Polytechnic University, Toronto, Canada, M5B 2K3; Materials Characterization Vol. 35, 175-194 (1995).
- [13] Dissertação Pítol
- [14] DALLMER, D. A.; **"Use of the Computer in the Foundry"**; Cast Metals System, Inc., Naperville, IL; AFS Transactions, V.175, 757-764, (1984);
- [15] SZEKELY, J.; **"Some perspectives on Mathematical Modeling of Metals Processing Operations"**, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridgem, MA, USA; Ironmaking and Steelmaking, V.16, 183-192 (1989).
- [16] KUBO, K.; et all; **"An application of porosity simulation to an aluminum automotive suspension component"**, EKK Japan Ltd., Tochigi, Japão; AFS Transactions, V.110, 223-236 (2002).
- [17] LI, K., D.; et all; **"A modified mechanism of porosity formation in A356 alloy permanent mold castings"**, Department of Materials Science and Engineering of National Cheng Kung University., Tainan, Taiwan 701; AFS Transactions, V.110, 331-338 (2002).

- [18] SADAYAPPAN, M.; et al; **"How the Marangoni force is important for the hot tearing tendency"**, Materials Technology Lab. (CANMET); Ottawa, ON, Canada; AFS Transactions, V.110, 375-381 (2002).
- [19] CAMPBELL, J.; et al; **"Metal flow through a filter system"**, Department of Materials Processing School of Engineering, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham, England; AFS Transactions, V.110, 19-35 (2002).
- [20] GEBELIN, J., C.; et al; **"Modelling filters in light alloy casting processes"**, The University of Birmingham, Birmingham, UK; AFS Transactions, V.110, 109-119 (2002).
- [21] BAKHTIYAROV, S., I.; et al; **"Numerical and experimental study of aluminum casting in vacuum-sealed step molding"**, Auburn University., Auburn, Alabama; AFS Transactions, V.110, 55-66 (2002).
- [22] **"Aluminum, Properties and Physical Metallurgy"**, Aluminum Association, American Society for Metals, Metals Park; Ohio; EUA; 1984.
- [23] Proceedings of The Two Day Conference on International Molten Aluminum Processing, California; 17-18 Feb.; 1986.
- [24] The American Metalcasting Consortium – <http://www.amc.atcorp.org>
- [25] Trick Flow Kenny Duttweiler Signature Series 23 Degree Aluminum Cylinder Heads – <http://www.trickflow.com>
- [26] Foseco Industrial & Comercial Ltda. – <http://www.foseco.com.br>
- [27] Informativo Metalúrgico – <http://www.infomet.com.br>
- [28] ABAL – Associação Brasileira de Alumínio – <http://abal.com.br>
- [29] SENAI-MG, "Metalurgia das Ligas de Alumínio", Publicação Técnica; Fundação; N° 09; V. 01; SENAI – Departamento Regional de Minas Gerais; Belo Horizonte; 1987.
- [30] SENAI-MG, "Metalurgia das Ligas de Alumínio", Publicação Técnica; Fundação; N° 09; V. 02; SENAI – Departamento Regional de Minas Gerais; Belo Horizonte; 1987.
- [31] SENAI-MG, "Determinação dos Sistemas de Massalotes e Canais", Publicação Técnica; Fundação; N° 17; V. 02; SENAI – Departamento Regional de Minas Gerais; Belo Horizonte; 1987.
- [32] GRUZLESKI, J., E.; CLOSSET, B., M., **"The Treatment of Liquid Aluminum – Silicon Alloys"**, The American Foundrymen's Society Inc., 1990.
- [33] SPIM, J. A.; **"A modelagem numérica nos processos de engenharia"**, Curso de modelagem numérica, Capítulo 1, Laboratório de Fundição, UFRGS, Jun (2001).
- [34] GARCIA, A.; **"Solidificação - Fundamentos e Aplicações"**, Campinas, SP – Editora da Unicamp, 2001.
- [35] SHIVKUMAR
- [36] PITOL, A., B.; **"Trabalho de Diplomação em Engenharia Metalúrgica"**; UFRGS
- [37] Metals Handbooks, Manuals, "Metallography and Microestruturas", V.9, 1992, American Society for Metals. Handbook Committee
- [38] FUOCO, R.; CORREA, E. R.; CAVALCANTI, A. H.; **"Fundição de rodas de alumínio pelos processos de baixa pressão e de gravidade"**; IPT, Cintec –Fundição; Joinville; Set. 2002.
- [39] Casting Technology International – David Brown Pumps – <http://www.castingsdev.com>
- [40] KUBO, K.; McLAUGHLIN, M.; KIM, C. W.; **"An Application of Porosity Simulation to an Aluminum Automotive Suspension Component"**, EKK Inc., Walled Lake, Michigan; AFS Transactions Vol. 110, Part 1; 223-236 (2002).
- [41] ABIFA – Associação Brasileira de Fundição – <http://abifa.com.br>
- [42] FOLLE, E. **"Trabalho de Diplomação em Engenharia Mecatrônica"**, PUC, 2002.