



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

RAYSON WILBER ALMEIDA VIEIRA

**ANÁLISE NUMÉRICA NO SOFTWARE ANSYS DA SOLIDIFICAÇÃO
DAS LIGAS Al-4,5%Cu E Al-15%Cu.**

MARABÁ-PA
2013

RAYSON WILBER ALMEIDA VIEIRA

**ANÁLISE NUMÉRICA NO SOFTWARE ANSYS DA SOLIDIFICAÇÃO
DAS LIGAS Al-4,5%Cu E Al-15%Cu.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento as exigências para obtenção do grau em Bacharel em Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. M.Sc. Luis Fernando Nazaré Marques.

MARABÁ-PA
2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II da UFPA. CAMAR, Marabá, PA

Vieira, Rayson Wilber Almeida

Análise numérica no software ANSYS da solidificação das ligas Al-4,5%Cu e Al-15%Cu / Rayson Wilber Almeida Vieira ; orientador, Luis Fernando Nazaré Marques. — 2013.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá, 2013.

1. Solidificação. 2. Ligas de alumínio. 3. Ligas de cobre. 4. Calor - Transmissão. 5. ANSYS (Sistema de computador) - Simulação por computador. I. Marques, Luis Fernando Nazaré, orient. II. Título.

CDD: 21. ed.: 669.94

RAYSON WILBER ALMEIDA VIEIRA

**ANÁLISE NUMÉRICA NO SOFTWARE ANSYS DA SOLIDIFICAÇÃO
DAS LIGAS Al-4,5%Cu E Al-15%Cu.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento as exigências para obtenção do grau em Bacharel em Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. M.Sc. Luis Fernando Nazaré Marques.

Data de aprovação: ___/___/_____.

Conceito: _____

Bancada Examinadora:

_____ - Orientador
Prof. M.Sc. Luis Fernando Nazaré Marques

_____ - Membro Interno
Prof. Márcio Paulo de Araújo Mafra

_____ - Membro FAFIS
Prof. Dr. Luiz Moreira Gomes

MARABÁ-PA
2013

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às pessoas que tem a maior parcela de responsabilidade por seu desenvolvimento, que me deram todo o suporte e incentivo, que me mostraram o caminho e definiram os valores aos quais devo seguir, aqueles que me deram tudo, e não pediram nada em troca, o amor incondicional, aos meus pais, Reis e Eunice.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, que me deu tudo.

Aos meus pais pelo amor e apoio incondicionais.

Aos meus amigos, sobretudo, os da turma FEMAT 07 que tornaram inesquecíveis estes quase 6 anos de curso. Em especial agradeço a Ayla Jardânia (A Conectada), Lilian Carolina (A Soneca), Otiniel de Sousa (O Cabeça), Renata Monteiro (A Apaixonada) e Vinicius Paes (O Mudinho) que são amigos que carregarei por toda a minha vida e foram responsáveis por proporcionar as melhores lembranças que tenho de todo o curso.

Aos docentes, que mais que professores, são mestres que guiaram a mim e meus colegas pelo tortuoso e gratificante caminho da graduação.

E a todos aqueles que não foram citados, mas foram cada um à sua maneira, fundamentais na minha caminhada.

RESUMO

O software ANSYS é utilizado como ferramenta para realização da simulação e obtenção das curvas numéricas do processo de resfriamento de ligas Al-Cu. O ANSYS é um programa que utiliza o método de elementos finitos para a resolução de diversos problemas na área da engenharia, e esse trabalho explora a sua aplicação na área de transferência de calor, mais especificamente, no processo de solidificação, através de simulações, das ligas Al-4,5%Cu e Al-15%Cu. No presente trabalho é realizada a comparação das curvas de resfriamento numéricas e experimentais do processo de solidificação de peças metálicas para as referidas ligas. O modelo numérico utilizado na simulação respondeu de maneira coerente aos resultados obtidos permitindo a previsão da estrutura solidificada através da observação da evolução da temperatura em diversos pontos do material durante todo processo.

Palavras-chave: Simulação, transferência de calor, solidificação.

ABSTRACT

The ANSYS software is used as a tool to perform the simulation and obtain the numerical curves of the cooling process of Al-Cu alloys. The ANSYS is a program that uses the finite element method to solve various problems in the engineering field, and this work explores the application on area of heat transfer, specifically in the solidification process, through simulation, of Al-4,5%Cu and Al-15%Cu alloys. In the present work is carried out to compare the cooling curves of numerical and experimental solidification process of metal parts for these alloys. The numerical model used in the simulation respond coherently to the results allowing solidified structure prediction by observing the evolution of the temperature of the material at various points throughout the process.

Keywords: simulation, heat transfer, solidification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação das microestruturas de solidificação e a influência do superesfriamento em cada uma delas.	17
Figura 2. Diferentes modos de transferência de calor na interface metal/molde.....	19
Figura 3. Diagrama de fases Al-Cu.	23
Figura 3. Representação esquemática do molde e lingote.	24
Figura 4. a) Lingote totalmente resfriado b) Molde em aço ABNT 1045.	25
Figura 5. Imagens do processo de corte e pesagem.	25
Figura 6. Interface do programa Data Control.	26
Figura 7. Termopares utilizados na mensuração térmica.	26
Figura 8. Vazamento das ligas	28
Figura 9. Fluxograma dos procedimentos experimentais.....	28
Figura 10. Interface do software ANSYS.....	29
Figura 11. Geometrias dos modelos criadas no ANSYS.	30
Figura 12. Curvas experimentais da solidificação da liga Al-4,5%Cu.....	34
Figura 13. Curvas experimentais da solidificação da liga Al-15%Cu.....	34
Figura 14. Representação do modelo com malha e seus respectivos nós.	35
Figura 15. Comparação das curvas numéricas x experimentais para a solidificação da liga Al-4,5%Cu.....	36
Figura 16. Comparação das curvas numéricas x experimentais para a solidificação da liga Al-15%Cu.....	36
Figura 17. Etapas inicial, intermediaria e final de solidificação da liga Al-4,5%Cu.	38
Figura 18. Etapas Inicial, intermediaria e final de solidificação da liga Al-15%Cu.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades termo físicas dos metais utilizados	22
Tabela 2. Propriedades Termo-Físicas das ligas Al-Cu.	23
Tabela 3. Propriedades termo-físicas do molde de aço ABNT 1045.....	25
Tabela 4. Temperaturas obtidas em cada nível de simulação.	35
Tabela 5. Variação das curvas numéricas x experimentais da liga Al-4,5%Cu ao longo do tempo.....	37
Tabela 6. Variação das curvas numéricas x experimentais da liga Al-15%Cu ao longo do tempo.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$\{q\}$	Vetor fluxo de calor
$\{v\}$	Vetor operador
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
c_p	Calor específico
h_i	Coefficiente de transferência de calor newtoniano
k	Condutividade térmica
\ddot{q}	Quantidade de calor gerado por unidade de volume
q_n	Fluxo de calor do material para o molde
T	Temperatura
t	Tempo
T_{im}	Temperatura na superfície do molde
T_{is}	Temperatura na superfície do material
T_l	Temperatura <i>liquidus</i>
T_v	Temperatura de vazamento
γ_{nl}	Energia superficial na interface nucleador-liquido
γ_{ns}	Energia superficial na interface nucleador-sólido
γ_{sl}	Energia superficial na interface sólido-liquido
Δx	Tamanho do gap simulado
ρ	Densidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	13
2.1. OBJETIVOS GERAIS.....	13
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1. SOLIDIFICAÇÃO.....	14
3.1.1. Nucleação Homogênea	14
3.1.2. Nucleação Heterogênea	15
3.1.3. Microestruturas de Solidificação	16
3.1.4. Transferência Newtoniana	18
3.2. Simulação e Otimização Computacional na Engenharia.....	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1. Características dos materiais das ligas Al-Cu	22
4.2. Ligas Alumínio-Cobre	22
4.3. Equipamentos Utilizados.....	24
4.3.1. Moldes e Cadinhos	24
4.3.2. Mecanismos de Corte e Pesagem	25
4.3.3. Mecanismos de Aquisição de Dados	26
4.4. Verificação de Conformidade das Ligas	27
4.5. Vazamento e Coleta de Dados.....	27
4.6. Simulação Computacional.....	29
4.6.1. Condições de contorno e simplificações adotadas	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
6. CONCLUSÃO	40
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1. INTRODUÇÃO

O processo de fundição consiste na fabricação de peças metálicas por meio do preenchimento, com metal líquido, de um molde cuja cavidade apresenta dimensões similares às da peça que se deseja produzir^[1].

A produção global de fundidos é de 90 milhões de toneladas. Até a eclosão da crise financeira internacional, no fim de 2008, a indústria de fundição vinha mostrando crescimento consistente, de 4,5% ao ano, desde 2000. Com a crise, a produção de fundidos apresentou decréscimo de 2% se comparado a 2007 – a primeira queda em oito anos^[1]. É notável o crescimento da produção de fundidos em mercados emergentes. Essa é uma tendência natural, advinda do crescimento dessas economias e das pressões ambientais maiores nos países desenvolvidos, que forçam a transferência da produção poluidora para países em que a legislação ambiental é menos restritiva. Globalmente, a indústria automotiva é a maior cliente do setor de fundição, representando cerca de 40% das vendas. Nos Estados Unidos e no Japão, esse percentual é de, respectivamente, 31% e 50%. No Brasil, a indústria automotiva responde por 58% das vendas dos fundidos em geral, chegando a 75% quando se analisa apenas a venda de fundidos em alumínio^[1].

Nos últimos 15 anos, a produção de alumínio no Brasil cresceu à taxa média de 3,9% ao ano, sendo de 3,2% ao ano na produção de metal primário e 10% ao ano a partir da reciclagem. O consumo aparente de produtos semimanufaturados no país elevou-se à taxa média anual de 6,4%. As exportações apresentaram avanço ainda mais expressivo, de 10,4% ao ano, o que viabilizou a elevação da oferta nacional desses produtos a um ritmo acelerado (7% anuais). Essa expansão expressiva da indústria do alumínio no Brasil se deu num ambiente de crescimento econômico relativamente baixo^[2].

A solidificação do metal durante a fundição é uma parte crítica de todo o processo de manufatura do produto, sendo influenciada por uma série de variáveis que necessitam de um controle rigoroso para que se possa obter um resultado satisfatório. O estudo dos processos de solidificação é importante pela sua aplicação em diversos campos da engenharia, como solidificação de metais e ligas metálicas em processos metalúrgicos de fundição. Especificamente no campo da metalurgia, é evidente a sua importância já que, com exceção de peças sinterizadas, todos os

metais passam, em alguma etapa de seu processamento, por um processo de fusão e solidificação, seja na fabricação de peças fundidas em moldes com a forma desejada, seja na produção de lingotes para posterior conformação^[3].

Dentre inúmeras possibilidades, fica cada vez mais notória a convergência quanto ao uso de tecnologias computacionais para o desenvolvimento e controle dos processos de produção, em que o tempo de desenvolvimento se tornou crucial nesses dias de alta concorrência. A aplicação de ferramentas de otimização deixou de ser um adicional para ser considerada imprescindível, quase uma garantia de competitividade. Sua natureza multifísica permite simulações de fenômenos de origem estrutural, fluida, térmica e eletromagnética presentes no desenvolvimento de diversos produtos, o que reduz a possibilidade de erros no processo. Sua aplicação nas mais intrincadas etapas da operação facilita a tomada de decisões aos engenheiros e projetistas, diminui custos de produção e contribui para o desenvolvimento de produtos de alta qualidade. A simulação pode substituir algumas etapas do desenvolvimento de produto, não eliminando a necessidade de testes físicos e químicos, mas os complementa.

Diante disto, será realizada a comparação entre os modelos computacional e experimental para que se possa analisar os perfis térmicos de cada um e fazer a verificação da validade das simulações computacionais no controle de processos de solidificação mediante o vazamento das ligas Al-4,5%Cu e Al-15%Cu em uma lingoteira de geometria cilíndrica.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

Objetivou-se mediante ao estudo da solidificação das ligas Al-4,5%Cu e Al-15%Cu em molde de geometria cilíndrica obter os perfis térmicos gerados no decorrer do processo de solidificação possibilitando assim realizar o confronto dos dados experimentais e computacionais obtidos através da simulação pelo software comercial ANSYS.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Utilizando os resultados experimentais e computacionais objetivou-se:

- Comparar a curvas de resfriamento obtidas experimentalmente com as obtidas através de simulação computacional;
- Aferir o modelo numérico sob as condições práticas de solidificação;
- Gerar dados e gráficos relacionando temperatura e tempo que demostrem o avanço da solidificação das ligas de alumínio em um ambiente tridimensional.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. SOLIDIFICAÇÃO

A solidificação é umas das mais importantes maneiras de processamento que podem ser aplicadas com efetividade no que se refere aos metais e suas ligas. De maneira geral ela se dá em duas etapas principais, denominadas de nucleação, onde há a formação de núcleos estáveis no líquido, e crescimento, onde os núcleos formados originam cristais, e formam uma estrutura de grão. A princípio formam-se pequenos núcleos sólidos no seio do líquido, que posteriormente crescem simultaneamente. O processo ocorre gradativamente até que todo o material seja um sólido.

Existem uma série de fatores termodinâmicos, térmicos, químicos e cinéticos inerentes às transformações de nível atômico que ocorrem durante todo o processo de solidificação e que o tornam bastante complexo, sendo necessária a observação de cada um destes fatores de maneira atenta para que se alcance um resultado o mais próximo possível do pretendido inicialmente. A estrutura formada após a solidificação determina as propriedades do produto final e essa estrutura é ainda mais importante nos produtos acabados ou semi-acabados produzidos por fundição^[4].

3.1.1. Nucleação Homogênea

Na eventualidade do líquido apresentar a mesma temperatura em todos os pontos e de não existirem pontos de nucleação preferenciais, como partículas estranhas e superfícies sólidas, como em um molde, a nucleação vai ocorrer uniformemente no líquido^[5]. Este processo denomina-se de nucleação homogênea e o movimento aleatório dos átomos é o suficiente para iniciar o processo.

A relação entre a temperatura e o raio crítico depende das propriedades do material: energia de superfície da interface sólido-líquido, calor latente de fusão, e temperatura de fusão. Quanto mais elevada a temperatura de superfície, mais difícil será a formação de uma partícula sólida no líquido. No entanto isto é equilibrado pela energia liberada devido ao calor latente de fusão, que se for elevada, faz com que seja mais fácil a formação do sólido^[3,5].

Quando a estrutura de equilíbrio de um vazado contém fases múltiplas, intencionalmente (tipo eutéticos), ou não (como as inclusões), a fase que apresenta o menor raio crítico é provável que seja a do primeiro núcleo que se forma. Estas partículas podem então estimular a nucleação do outro material.

3.1.2. Nucleação Heterogênea

Em consequência da facilidade com que ocorre nucleação heterogênea sobre um material sólido pré-existente no seio do líquido, a nucleação homogênea praticamente nunca acontece. A condição necessária para que a nucleação heterogênea seja eficiente é que a energia de superfície da interface nucleador-sólido, γ_{ns} , seja inferior à soma das energias de superfície das interfaces nucleador-líquido, γ_{nl} e da interface sólido-líquido, γ_{sl} ^[3,6]:

$$\gamma_{ns} < \gamma_{nl} + \gamma_{sl} \quad (01)$$

Caso esta condição não se verifique, não ocorre redução da energia de superfície total quando uma unidade de área do nucleador é coberta por sólido.

O grau de super-resfriamento necessário para a nucleação heterogênea é muito menor do que o necessário para a nucleação homogênea^[5]. No entanto, as energias das interfaces sólido-líquido são frequentemente elevadas devido ao grande grau de desorientação atômica, o que origina elevadas energias de deformação. Desta forma nem todos os corpos estranhos em um líquido são favoráveis para a nucleação. As partículas usadas comercialmente como agentes nucleadores apresentam uma dimensão cristalina semelhante à do sólido que vai nuclear. (Ex.: partículas de boreto de titânio TiB_2 são usadas como agentes nucleadores em ligas de alumínio e partículas de carboneto de titânio (TiC) usadas na fundição de aços).

Na prática, a maioria dos metais fundidos contém diferentes tipos de partículas estranhas, cuja capacidade de induzir a nucleação heterogênea varia. As partículas mais adequadas deverão reduzir o super-resfriamento para apenas alguns graus. As partículas cujo ângulo de contato é pequeno, pelo líquido tendem a ser bons locais para a nucleação heterogênea. Dependendo do grau de super-resfriamento local, um número diferente de partículas pode funcionar como núcleantes.

Em um processo de fundição, locais óbvios para nucleação heterogênea são as paredes do molde. Apesar do material do molde poder não ser um bom nucleador heterogêneo, a temperatura inicial do molde será sempre significativamente mais baixa do que a do material que está sendo vazado. Neste caso o super-resfriamento criado assegura a ocorrência de nucleação heterogênea na parede do molde^[3].

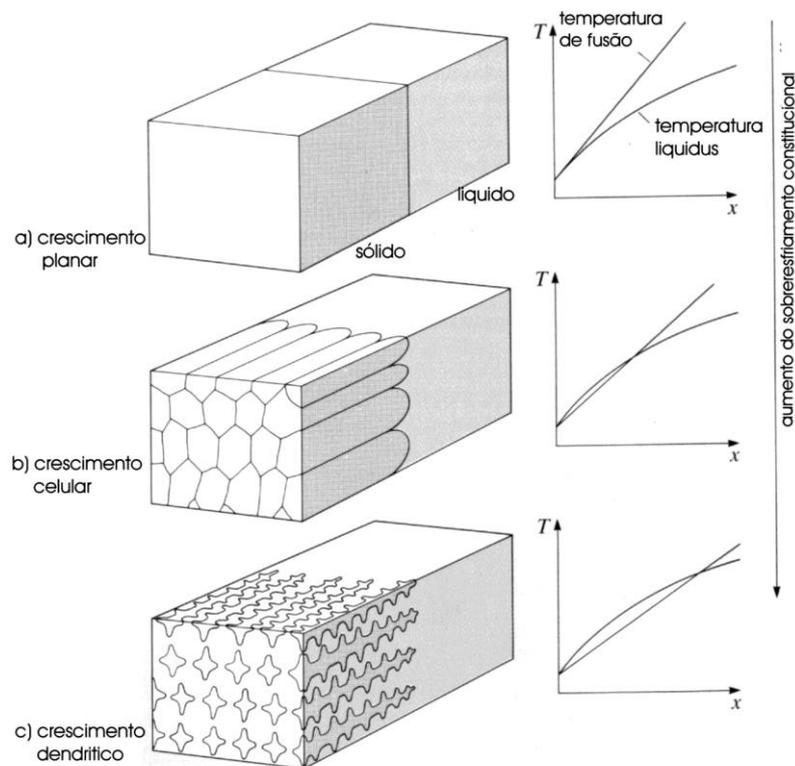
3.1.3. Microestruturas de Solidificação

Apesar dos metais, após solidificados, passarem por diversos tratamentos térmicos, químicos e processos de conformação visando otimiza-los e conferir-lhes características adequadas para as aplicações a que serão destinados, a solidificação ainda é uma etapa primordial e o seu controle adequado permitirá a obtenção de um metal com propriedades superiores aquelas que possam ser fornecidas por qualquer processamento posterior. A estrutura que se forma imediatamente após a solidificação determina as propriedades do produto final, não somente no caso de peças de fundição que já apresentam essencialmente a forma definitiva, mas também naqueles produtos que serão trabalhados para a produção de chapas, fios e forjados.

As variadas configurações microestruturais resultantes de processos de solidificação tem origem na movimentação da interface sólido/líquido^[4]. Se a liga metálica se encontra em condições ideais e solidifica-se em condições de equilíbrio termodinâmico, a interface irá se estabilizar na forma planar, porém, a ocorrência de instabilidades nesta frente resulta em sua degeneração e ainda, em interferência em alguns pontos localizados na frente sólida. Estas instabilidades decorrem de um superesfriamento constitucional e dependem da relação entre o gradiente de temperatura, à frente desta interface, e da velocidade de deslocamento da mesma. Assim a frente de solidificação pode se alterar de planar para celular ou dendrítica^[3,4].

A morfologia de crescimento varia através da taxa de solidificação local e do gradiente de temperatura. Para baixas taxas de solidificação, o soluto tem tempo para se difundir desde a interface até ao seio do líquido, dando origem a um crescimento planar. Para elevadas taxas de solidificação, o soluto concentra-se na interface, criando um potencial para o superesfriamento constitucional^[6]. Somado a isto, se o gradiente de temperatura local no líquido for suficientemente baixo, ocorrerá superesfriamento constitucional e crescimento, ou seja instabilidade da interface.

Figura 1. Representação das microestruturas de solidificação e a influência do superesfriamento em cada uma delas.



Fonte: [3]

A figura 1 demonstra três situações distintas onde a temperatura do líquido varia com a distância à interface, em consequência do acúmulo de soluto. Quando o gradiente de temperatura é elevado, figura.1 a), não ocorre superesfriamento constitucional e o crescimento é planar. Na segunda situação, figura.1 b), o gradiente de temperatura é suficientemente baixo para provocar um pequeno grau de superesfriamento constitucional, levando a um crescimento colunar. Já no último caso, figura .1 c), o gradiente de temperatura é baixo, mas o superesfriamento constitucional é elevado, obtendo crescimento dendrítico.

O crescimento celular é definido pela ocorrência de grãos alongados com baixa velocidade de crescimento e perpendiculares ao fluxo de calor. Com o incremento da velocidade de avanço celular, esta evolui na forma de uma estrutura ramificada, com crescimento de braços laterais definidos por direções preferenciais de crescimento, determinadas pela estrutura atômica do material^[3]. Estas estruturas ramificadas são denominadas dendritas. A ocorrência de fenômenos como rejeição de soluto e instabilidade térmica, induzem ao crescimento de braços dendríticos em direções

diferentes a do braço dendrítico primário. Estas ramificações dos braços dendríticos primário são denominadas braços dendríticos secundários e podem servir de substrato para a formação de novos braços dendríticos, no caso terciário, e assim sucessivamente.

Na maioria dos produtos fundidos com estruturas dendríticas, as dendritas quebram à medida que crescem. Quanto mais finas as dendritas, mais facilmente quebram. Assim, uma alta taxa de solidificação, que origina estruturas dendríticas finas, forma grãos pequenos e conseqüentemente materiais duros e resistentes. Apesar dos benefícios que um tamanho de grão fino traz para produtos trabalhados, em produtos fundidos uma estrutura refinada pode influenciar negativamente as propriedades mecânicas devido à nucleação de poros. Isto ocorre porque, apesar de todos os produtos trabalhados terem sido fundidos inicialmente, o trabalho a quente homogeneiza segregações e fecha poros, decorrentes do processamento inicial do material. Nestas condições contornos de grão de altos ângulo são frequentemente as barreiras mais significativas à movimentação de discordâncias presentes na microestrutura^[4].

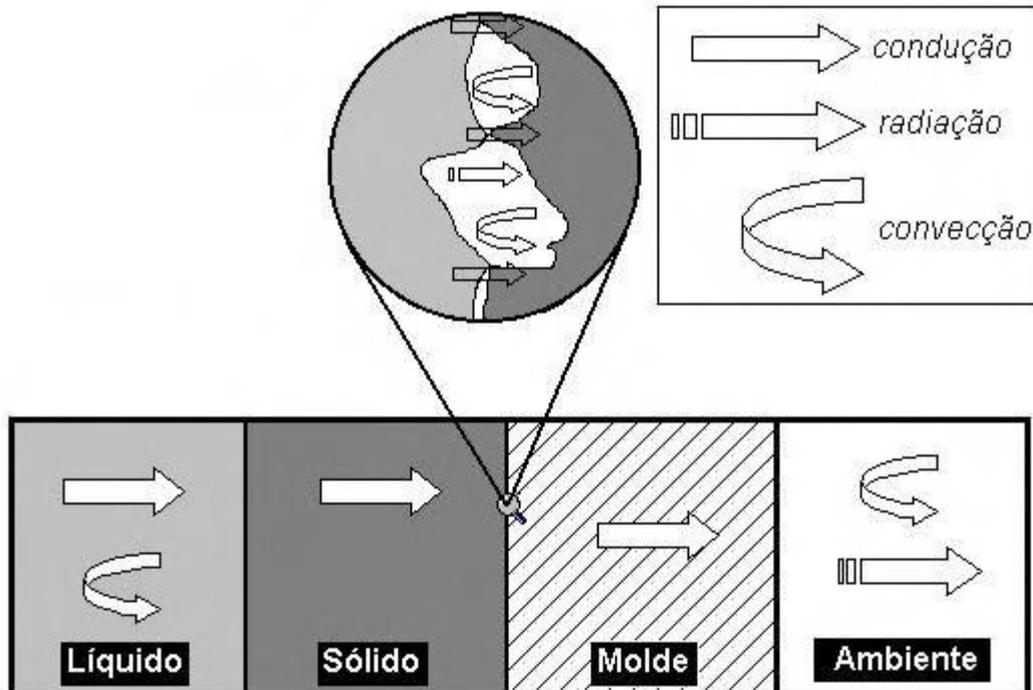
3.1.4. Transferência Newtoniana

Durante a solidificação o material líquido, ao ser vazado, entra em contato com as paredes internas do molde e nessa fronteira metal/molde haverá uma resistência térmica de contato. Essa resistência é decorrente de vários fatores, tais como: a afinidade físico química entre material do molde e material a ser solidificado não é perfeita e como conseqüência o molhamento da parede interna do molde pelo líquido não é completo; a rugosidade interna do molde conferida pela usinagem de acabamento gera uma microgeometria superficial que propicia o surgimento de poucos pontos de contato intercalados por regiões de separação física metal/molde^[3,4].

A utilização de lubrificantes para facilitar a desmoldagem provoca a formação de uma película de separação entre material e molde; após a formação de uma certa camada solidificada a contração de solidificação provoca um aumento na separação física entre o material sólido e o molde. Nessas condições, a transferência de calor na junção material/molde se dá por condução nos pontos de contato e através dos gases

aprisionados pelos espaços criados, e também por convecção e radiação entre as duas superfícies separadas como pode ser visto na figura 2.

Figura 2. Diferentes modos de transferência de calor na interface metal/molde



Fonte: [4]

Newton propôs que essas superfícies de separação fossem perfeitamente planas e paralelas, sendo esse espaço preenchido por um certo gás, denominado *gap* [4]. Assim o fluxo de calor é definido:

$$q_n = h_i (T_{is} - T_{im}) \quad (02)$$

Onde:

q_n = fluxo de calor do material para o molde (W/m²);

h_i = coeficiente de transferência de calor material/molde (W/m²K);

T_{is} = temperatura na superfície do material (K);

T_{im} = temperatura na superfície do molde (K);

Seria ideal que a superfície dos fundidos fosse perfeitamente lisa e livre de irregularidades, mas na prática não é isso que acontece, mostram vários graus de

rugosidade, devido a condição superficial do molde, a fenômenos ligados a temperatura, a tensão de escoamento e a reações químicas. Além disso, a solidificação na superfície do molde, combinada com a turbulência durante o enchimento podem dar origem a turbulências e a gotas frias. A rugosidade superficial é, portanto, controlada primeiramente pela escolha dos materiais de moldagem, pela condição da superfície do molde, por recobrimentos superficiais e pelas temperaturas do molde e de vazamento. E mais, o escoamento turbulento durante o enchimento pode conduzir a várias imperfeições superficiais, oxidação e formação de drosses (partículas de metal ocluídas num filme de óxido).

3.2. Simulação e Otimização Computacional na Engenharia

A simulação computacional começou a ser efetivamente utilizada na década de 60 pelo governo dos Estados Unidos da América para fins militares. Com o sucesso obtido nesta área ela rapidamente se expandiu para outros mercados chegando conseqüentemente na área de Engenharia^[7]. A Engenharia automotiva foi a primeira a adotar de maneira mais significativa a simulação computacional, utilizando-a para otimizar o desempenho aerodinâmico de seus automóveis com simulações em tuneis de vento. Hoje a simulação computacional já é usada em larga escala na engenharia de alto desempenho, onde as condições de trabalho dos seus produtos tornariam muito caros testes em situações reais, como é o caso da indústria aeronáutica e automobilística. Embora a simulação não elimine a necessidade de testes com o produtos reais, ela reduz significativamente os custos de produção limitando e direcionando-os para as áreas de maior necessidade de averiguação.

Dentre os softwares de simulação que abrangem a área térmica alguns dos mais utilizados são o ANSYS, Ideal, MARC e MITAS – II^[8]. O Ideal se destaca por ter todo seu desenvolvimento voltado para área da simulação térmica com a vantagem de ter um baixo custo e ser de fácil usabilidade, possuindo, entretanto, uma menor precisão se comparado com seus concorrentes. O software ANSYS por sua vez tem custo elevado e é o software de uso mais complexo dentre os acima citados, e apesar de não ser especificamente voltado pro campo da simulação térmica já que abrange diversas outras áreas, possui uma ótima precisão e formidável capacidade de pós

processamento, produzindo gráficos e relatórios detalhados, o que permite uma análise de resultados mais completa.

O ANSYS oferece soluções de engenharia para conjuntos de simulação que necessitam de um complexo processo de design. Empresas de uma grande variedade de indústrias, dentre elas se podemos destacar a automobilística, usam o software ANSYS porque ele possui ferramentas para submeter um produto virtual por uma série de procedimentos rigorosos (como bater um carro em uma parede de tijolos, ou correr por vários anos em uma estrada de asfalto) antes que o mesmo se torne um objeto físico. Desde a sua fundação há mais de 40 anos atrás, ANSYS tornou-se a maior produtora de software de simulação. O software possui algoritmos que espelham as leis da física, permitindo que o programa modele virtualmente qualquer coisa. O software ANSYS pode fazer simulações considerando diversas propriedades dos materiais, tais como propriedades mecânicas, térmicas, eletromagnéticas, simulações com fluidos (líquidos e gases), dentre outros^[9].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Características dos materiais das ligas Al-Cu

As ligas foram confeccionadas com alumínio e cobre (tabela 1) comercialmente puros, sendo o primeiro proveniente da ALBRÁS cuja porcentagem de pureza varia de 99,7% a 99,9%, e cobre originário de trocadores de calor.

Tabela 1. Propriedades termo físicas dos metais utilizados

Propriedades	Alumínio	Cobre
Densidade (Kg/m³)	2.550	8.382
Condutividade Térmica (W/mK)	213	330
Calor Latente de Fusão (J/Kg)	397.500	205.000
Ponto de Fusão (K)	932,85	1.355,85

Fonte: [3,8] Adaptado.

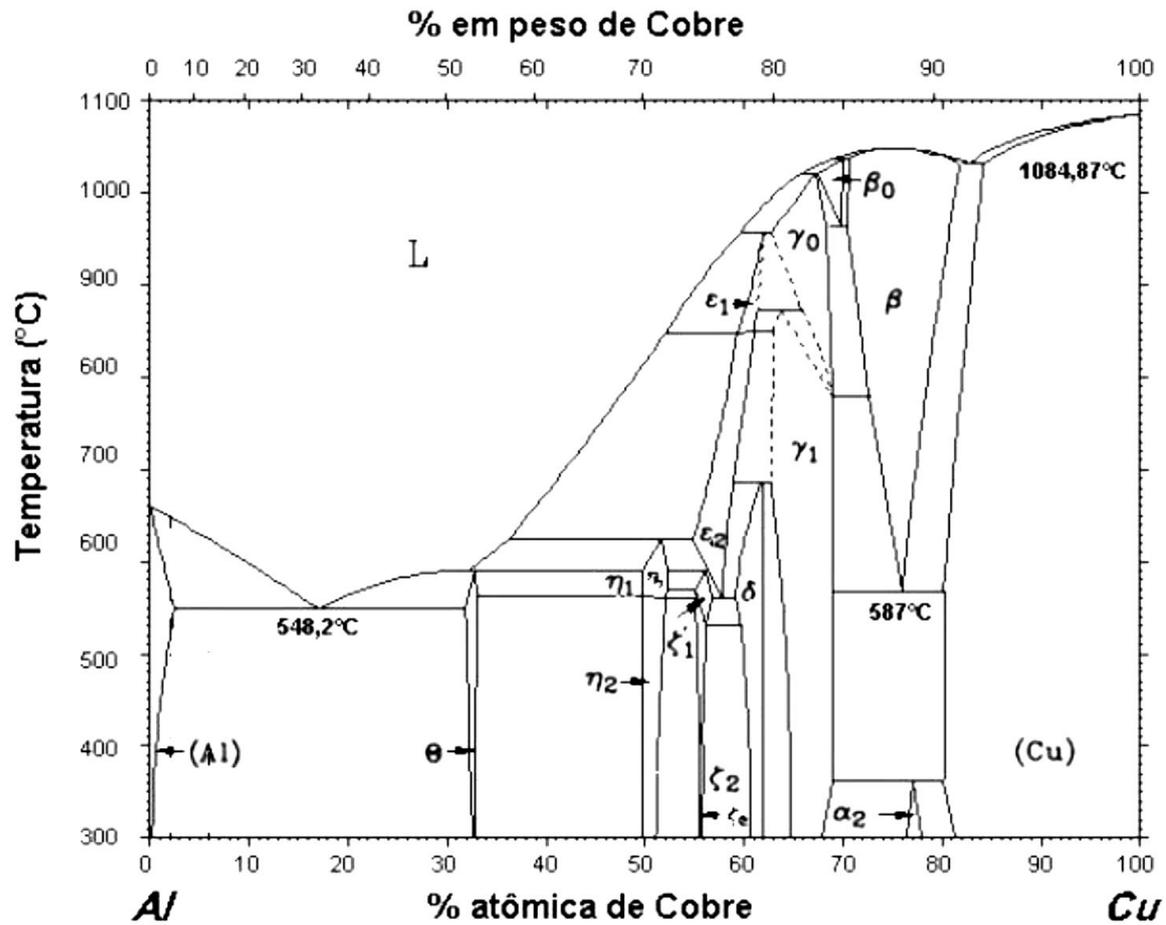
4.2. Ligas Alumínio-Cobre

As ligas de alumínio que possuem o cobre como elemento de liga possuem a nomenclatura 2XXX, na qual o segundo dígito representa elemento de liga adicional ou ainda modificação no limite de impurezas e os dois últimos dígitos representam somente ligas diferentes do mesmo grupo^[8].

As ligas de alumínio das séries aeronáuticas (ligas das séries 2XXX e 7XXX) possuem como características principais os elevados níveis de resistência mecânica que, aliadas a baixa densidade do metal e a facilidade de conformação e usinagem, transformam o alumínio em uma das melhores opções para a fabricação de dispositivos e estruturas aeronáuticas.

Entretanto, as ligas destas séries são deficientes em relação a soldabilidade e a resistência à corrosão^[8]. A resistência à corrosão pode ser em algumas ligas compensada com revestimentos superficiais metálicas (ALCLAD), porém a soldabilidade é uma limitação real. Ela é possível de ser efetuada para reparos ou em pequenas regiões, porém soldagens longas não são recomendadas para ligas destas duas séries.

Figura 3. Diagrama de fases Al-Cu.



Fonte: [4,8] Adaptado.

As ligas escolhidas para o experimento foram a liga Al-4,5%Cu e a liga Al-15%Cu, as quais podemos observar no diagrama de fases Al-Cu na figura 3 e suas propriedades na tabela 2.

Tabela 2. Propriedades Termo-Físicas das ligas Al-Cu.

Propriedades	Al-4,5%Cu	Al-15%Cu
Temperatura Liquidus (K)	918	888
Condutividade Térmica (s) (W/mK)	193	179
Calor Especifico (s) (J/KgK)	1.092	1.080
Densidade (Kg/m ³)	2.680	2.910
Calor Latente (J/Kg)	381.900	374.270

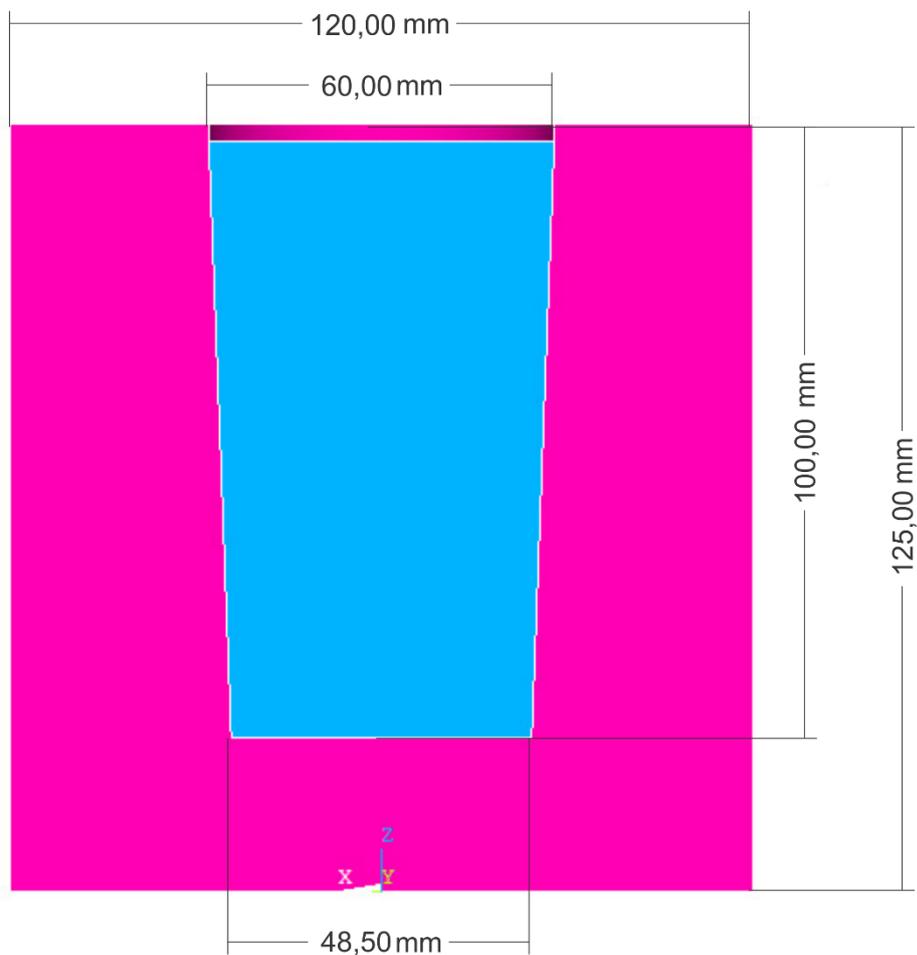
Fonte: [3,8] Adaptado.

4.3. Equipamentos Utilizados

4.3.1. Moldes e Cadinhos

Foram utilizados cadinhos de carvão de silício para a fundição dos metais e preparação das ligas, que foram previamente sinterizados a aproximadamente 1000 °C por um período de uma hora, para promover a eliminação de matéria orgânica e a impregnação do mesmo por alcatrão. O Molde utilizado para o vazamento do metal é cilíndrico e foi confeccionado em aço ABNT 1045 cujas propriedades podem ser vistas na tabela 3, e possui diâmetro externo de 120 mm e diâmetro interno de 60 mm, altura de 100 mm na parte interna correspondente ao molde e altura de 125 mm a partir de sua base. As figuras 3 e 4 possuem uma representação esquemática do lingote produzido através deste molde e imagens do lingote e do molde.

Figura 3. Representação esquemática do molde e lingote.



Fonte: Autor.

Figura 4. a) Lingote totalmente resfriado b) Molde em aço ABNT 1045.



Fonte: Autor

Tabela 3. Propriedades termo-físicas do molde de aço ABNT 1045.

Densidade (Kg/m ³)	Calor Especifico (J/KgK)	Condutividade Térmica (W/mK)
8.020	528	33

Fonte: [8]

4.3.2. Mecanismos de Corte e Pesagem

O alumínio e o cobre para confecção das ligas, foi cortado em uma Serra Fita Starrett Modelo St-3720 até atingir o volume necessário para ser mensurado em uma balança digital MARTE VX 8200S, com carga máxima de 8.200 g e mínima de 5 g e com precisão de 0,1 g, como pode ser visto na figura 5.

Figura 5. Imagens do processo de corte e pesagem.

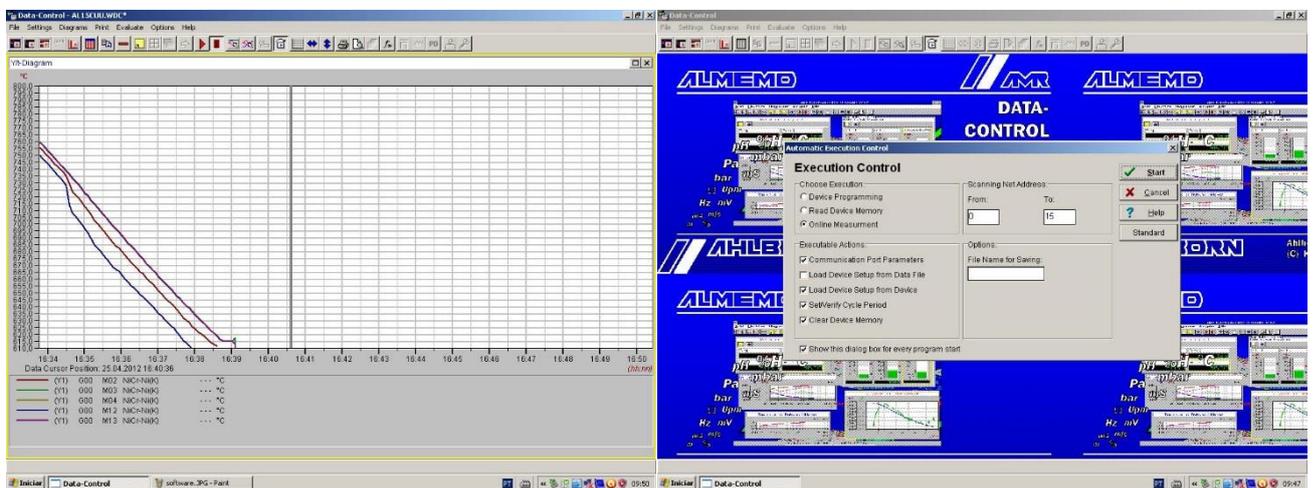


Fonte: Autor.

4.3.3. Mecanismos de Aquisição de Dados.

Para mensurar a temperatura durante a solidificação das ligas foram utilizados termopares do tipo K de NiCr-Ni (figura 7). A extensão utilizada foi composta de adaptadores e cabos específicos para cada termopar. As leituras das temperaturas mensuradas pelos termopares foram realizadas por um computador Celeron® CPU 420@ 1.61 GHz, 0,99 GB de RAM, auxiliado pelo programa DATA CONTROL 4.11 (figura 6) responsável por reconhecer os termopares, e gerar as curvas experimentais dos eventos térmicos ocorridos ao longo do processo de verificação da conformidade da liga e solidificação na lingoteira de geometria desejada.

Figura 6. Interface do programa Data Control.



Fonte: Autor

Figura 7. Termopares utilizados na mensuração térmica.



Fonte: Autor

4.4. Verificação de Conformidade das Ligas

A aferição da liga e quantidade de seus respectivos componentes é feita verificando-se a temperatura líquidus, que é a temperatura onde começa a solidificação durante o resfriamento, e é uma característica particular de cada liga. No entanto é necessário estar atento pois durante o processo de fundição, ocorre à formação de óxidos, devido ao contato do metal líquido com oxigênio, o que acaba por gerar perdas, se fazendo necessária à retirada do oxido sobrenadante e uma posterior correção, mediante o monitoramento da temperatura líquidus. Alterações deste valor, que sejam discordantes com as demonstradas no diagrama de fases mostram que houve perda de metal e é necessária a adição de alumínio e/ou cobre, para que se possa atingir a composição nominal da liga.

Assim, as etapas de produção da liga foram o dimensionamento das quantidades de alumínio e cobre utilizados, corte e pesagem dos metais, sinterização e adição de desmoldante em um cadinho de carbetto de silício, fundição do metal hospedeiro (alumínio), adição do cobre, verificação da Temperatura líquidus, retificação da liga se necessário e vazamento.

4.5. Vazamento e Coleta de Dados

Os dois cadinhos contendo respectivamente as ligas em conformidade Al-4,5%Cu e Al-15%Cu foram colocados um de cada vez em um forno para que cada liga fundisse. Foi necessário aquecer a lingoteira à temperatura de 300 °C, haja vista que vazar as ligas em um molde com temperatura baixa pode ser perigoso devido à grande variação de energia provocada pelo contato inicial molde/metal, provocando perda de material através de respingos, prejudicando assim a coleta de dados, devido a uma possível alteração na posição dos termopares dentro do molde.

Durante a coleta foram utilizados quatro termopares, dos quais três foram dispostos ao longo da lingoteira e um foi utilizado para verificar a T_v das ligas, este parâmetro definido a um valor aproximadamente 10% maior que a T_l das ligas em utilizadas. Ainda assim a temperatura de vazamento pode sofrer variações,

considerando que às condições experimentais e a dinâmica de enchimento possam afetar este parâmetro.

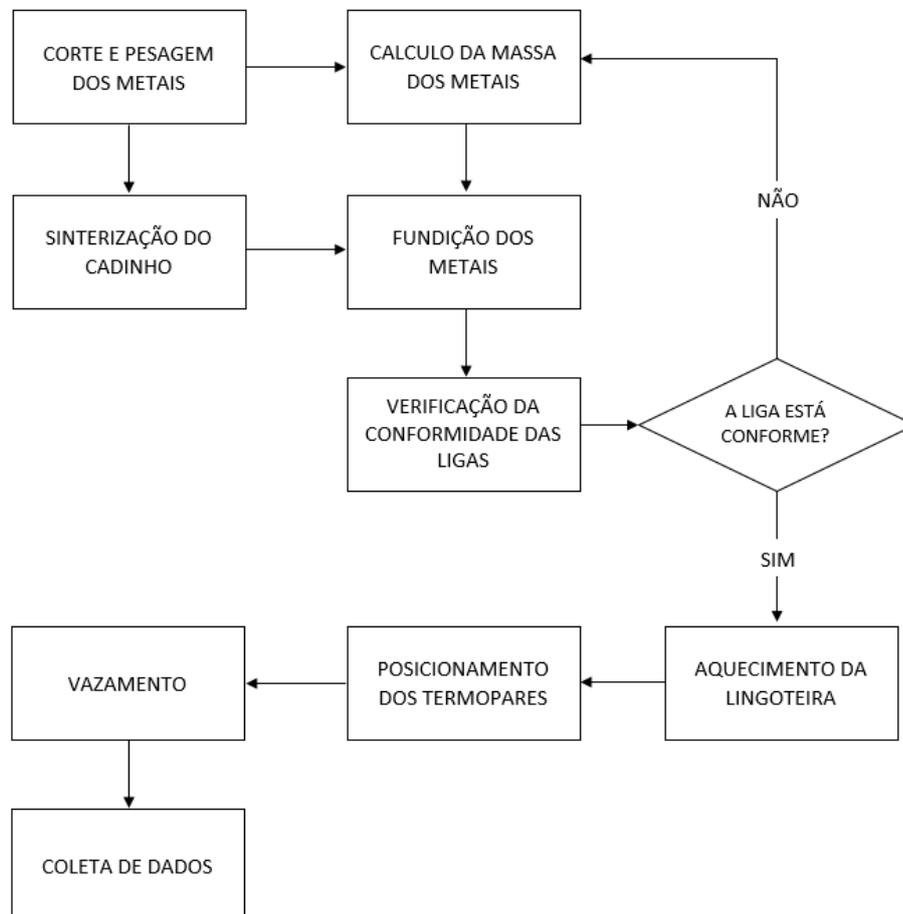
Figura 8. Vazamento das ligas



Fonte: Autor.

Podemos ver a seguir, na figura 9, um fluxograma representando todo o procedimento experimental descrito até aqui.

Figura 9. Fluxograma dos procedimentos experimentais.



Fonte: Autor

4.6. Simulação Computacional

O software utilizado na simulação foi o ANSYS (figura 9), que utiliza o Método de Elementos Finitos para a resolução de problemas de natureza mecânica, térmica e eletromagnética, para elementos de geometria de alta complexidade e que necessitam de uma análise de dados mais completa, por meio de gráficos e relatórios detalhados.

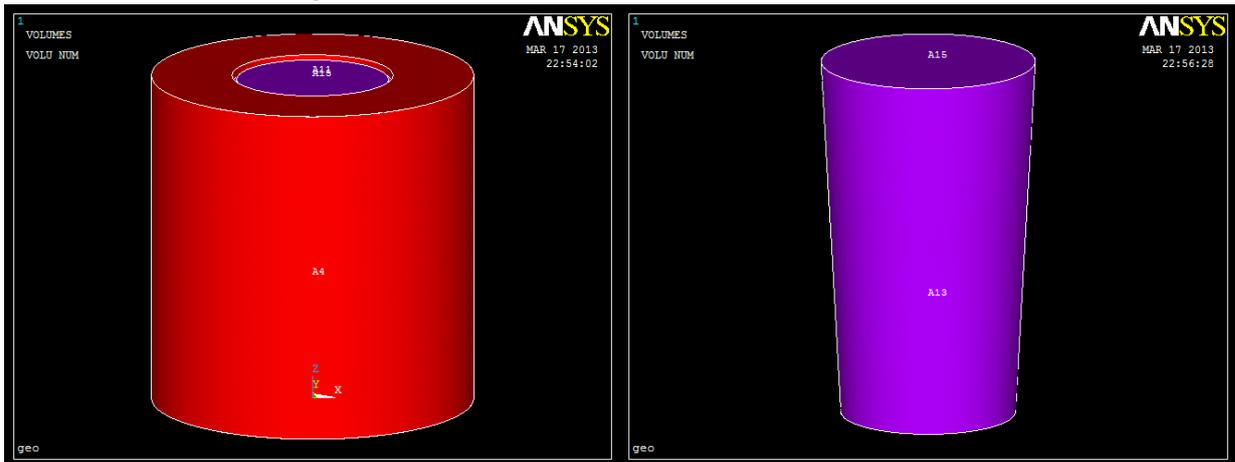
Figura 10. Interface do software ANSYS.



Fonte: Autor.

A construção do modelo a ser utilizado é a parte mais demorada no desenvolvimento da simulação. Primeiro deve-se definir alguns parâmetros, como o tipo de elemento a ser utilizado na simulação, dentre os mais de 100 disponíveis. Para isso é necessário analisar o tipo de simulação a ser feito, bidimensional ou tridimensional, e características necessárias aos elementos, como os graus de liberdade. A parte da construção da geometria do elemento é a mais demorada, haja vista que deve haver certa fidelidade na construção do modelo, no entanto simplificações e alterações podem ser adotadas de modo a otimizar a simulação, levando em conta que quanto mais complexa a geometria em questão, maior será a quantidade de nós na malha do modelo final.

Figura 11. Geometrias dos modelos criadas no ANSYS.



Fonte: Autor.

As propriedades adotadas para os elementos utilizados na simulação podem ser lineares, não-lineares, isotrópicas, anisotrópicas, constantes ou dependentes da temperatura. O modelo pode conter vários conjuntos de propriedades para diferentes materiais utilizados na simulação simultaneamente. A malhagem do modelo pode ser feita de maneira geral com uma distância pré-definida entre nós, ou de maneira específica, com mais nós nas áreas de maior interesse na simulação. Por fim, deve-se definir as condições iniciais e de contorno, e os intervalos de tempo da simulação.

A análise térmica desenvolvida pelo ANSYS calcula a distribuição de temperatura e parâmetros térmicos relacionadas em um sistema ou componente. Os parâmetros térmicos de interesse são:

- distribuição de temperatura;
- quantidade de calor ganha ou perdida;
- gradientes térmicos;
- fluxos de calor.

A base para a análise térmica no ANSYS é a equação de balanço de calor obtida a partir do princípio da conservação de energia (03).

$$\rho \cdot c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{q\} = \ddot{q} \quad (03)$$

Onde:

ρ = densidade

c_p = calor específico

T = temperatura

t = tempo

$\{L\} = \left(\frac{\partial}{\partial X}, \frac{\partial}{\partial Y}, \frac{\partial}{\partial Z} \right)$ = vetor operador

$\{V\} = (V_x, V_y, V_z)$ = vetor velocidade para transporte de calor

$\{q\}$ = vetor fluxo de calor

\ddot{q} = quantidade de calor gerado por unidade de volume.

A simulação pelo método de elementos finitos calcula as temperaturas nodais e a partir dessas obtém outros parâmetros térmicos.

O programa trabalha com os três principais modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Além dos modos de transferência de calor pode-se simular efeitos como transformações de fase e geração interna de energia. A liberação do calor latente durante a solidificação não pode ser trabalhada de maneira direta dentro programa sendo necessário ser tratada através do método da entalpia.

O ANSYS pode realizar a análise térmica tanto em regime transiente como em regime estacionário. Esse trabalho trata o processo de solidificação como um processo de regime transiente, adotando o tempo de simulação de 425 segundos, tempo este suficiente para observar a completa solidificação do lingote no modelo proposto.

A simulação foi realizada em quatro níveis de malhagem diferentes de modo que pudesse se verificar a convergência dos resultados obtidos. A malha foi refinada em pontos específicos do modelo, como nas bordas dos elementos e na interface metal/molde, visando otimizar os resultados sem contudo aumentar demasiadamente o tempo de simulação.

4.6.1. Condições de contorno e simplificações adotadas.

Para a execução da simulação computacional foram utilizadas as seguintes condições de contorno e simplificações:

- Desconsideração da dinâmica de vazamento;
- Fluxo de calor tridimensional;
- Coeficiente de transferência de calor newtoniano constante;
- Propriedades do metal sólido e líquido diferentes;
- Condução na região interna do lingote e do molde;
- Convecção de ar na borda superior do lingote, na borda superior e laterais do molde;
- Utilização de um 3º material na interface metal/molde, para simular o *gap*.
- Utilização de uma geometria genérica do molde para diminuir a quantidade de nós totais, reduzindo o tempo de processamento.

No processo real de solidificação, o contato térmico, na interface metal/molde, não é perfeito devido a contração do metal líquido após a transformação de fase, no entanto essa contração do metal, e conseqüentemente o *gap*, não são considerados pelo ANSYS, que considera contato perfeito entre os metais e transferência de calor apenas por condução, sendo a convecção tratada apenas na interface entre o molde e o meio que o envolve.

De modo a minimizar o erro da simulação, foi introduzido entre o metal e o molde um terceiro material^[10], ou pode-se dizer um segmento do molde, de espessura muito pequena, cujo coeficiente de transferência de calor Newtoniano é transformado em condutibilidade térmica relacionando-se as equações de condução e convecção:

Equação da condução:

$$q = \frac{k}{\Delta x} (T_1 - T_2) \quad (04)$$

Equação da convecção:

$$q = h_i(T_1 - T_2) \quad (05)$$

Obtendo-se:

$$\frac{k}{\Delta x} = h_i \quad \text{e,} \quad k = h_i \cdot \Delta x , \quad (06)$$

Onde:

h_i = coeficiente de transferência de calor material/molde (W/m²K);

k = condutibilidade térmica [W/K.m];

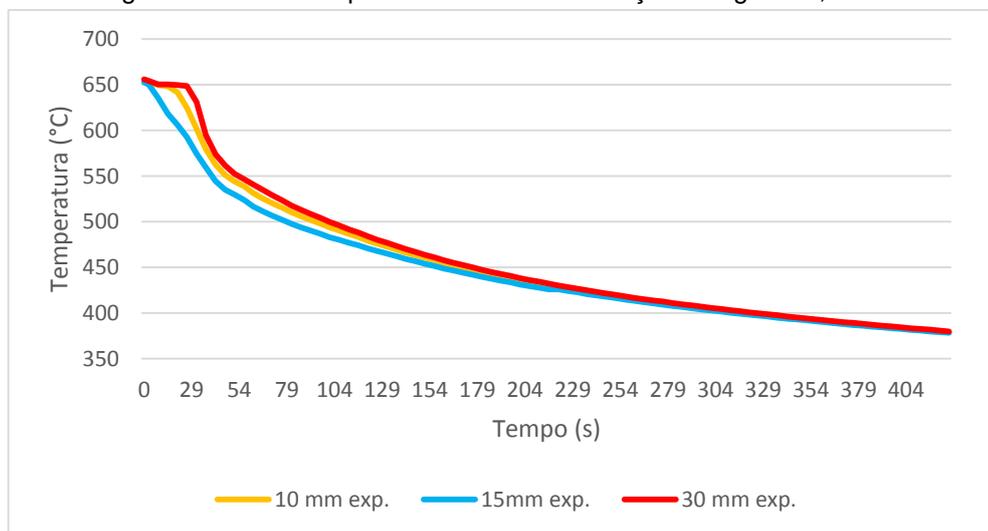
Δx = tamanho do gap simulado [m]

Para cada caso, o coeficiente de transferência h_i é transformado em condutibilidade térmica, pela equação (06), que é atribuída como uma das propriedades do material que compõem o pequeno espaço, entre o material e o molde, criado em cada modelo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

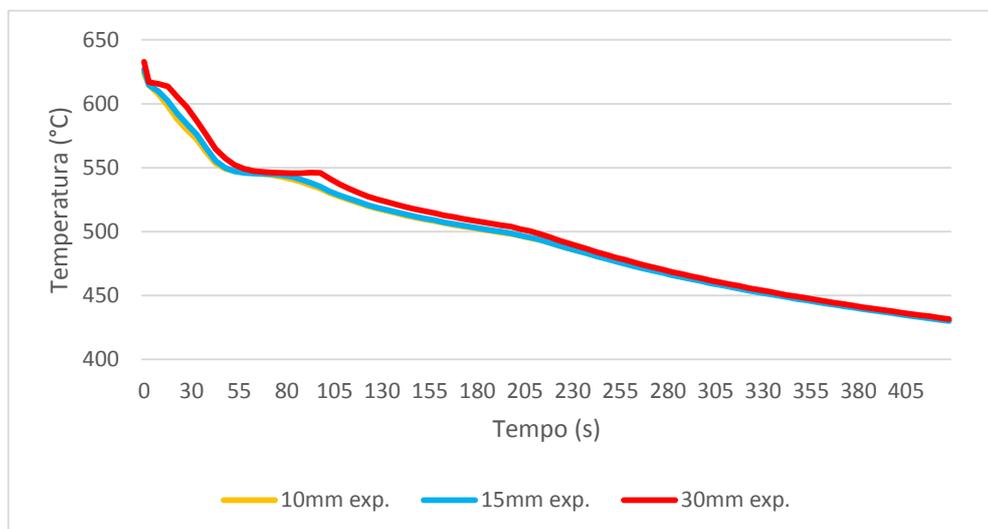
As curvas obtida experimentalmente para as ligas Al-4,5%Cu e Al-15%Cu (figura 12 e 13), seguiram o comportamento proposto pelo diagrama de fases das ligas Al-Cu, sendo monitoradas por um tempo de 425 segundos após o vazamento, que foi realizado em uma temperatura aproximadamente 10% superior à temperatura liquidus. Durante a experiência, monitorou-se a evolução térmica das ligas em solidificação através de termopares posicionados em três pontos diferentes: a 10mm, a 15mm e a 30mm da interface metal/molde, no centro do cilindro.

Figura 12. Curvas experimentais da solidificação da liga Al-4,5%Cu.



Fonte: Autor

Figura 13. Curvas experimentais da solidificação da liga Al-15%Cu.



Fonte: Autor

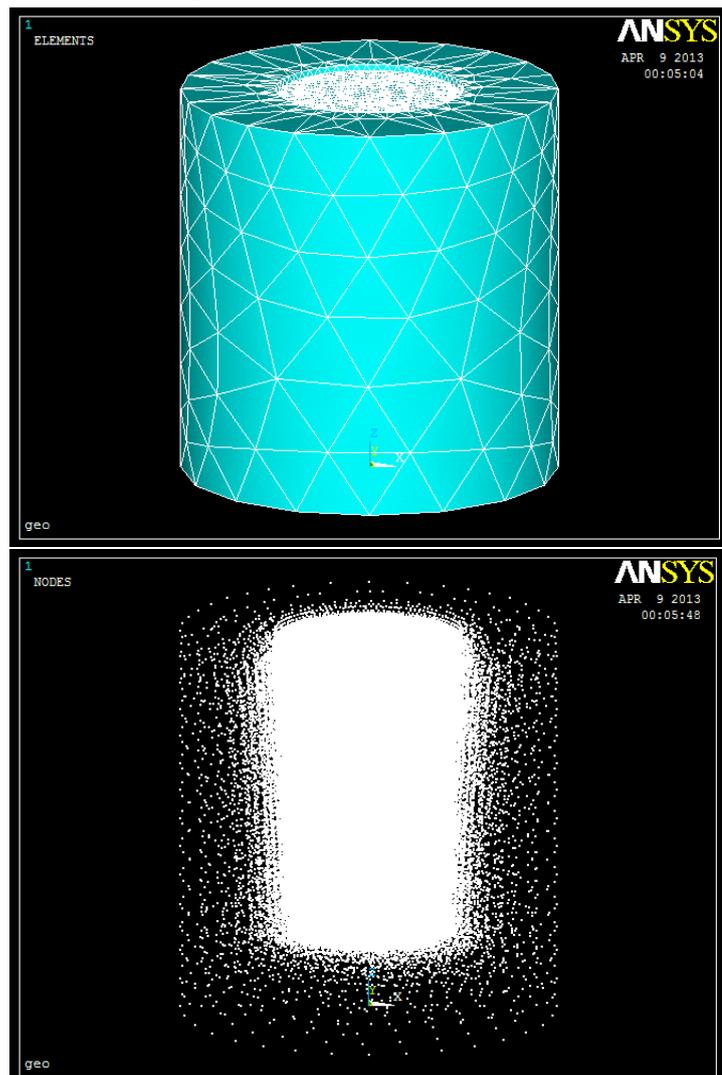
Os modelos foram gerados no ANSYS utilizando uma malha com 270.003 nós após confirmação da convergência dos valores resultantes (tabela 4).

Tabela 4. Temperaturas obtidas em cada nível de simulação.

Quantidade de Nós	Temperatura Final da simulação 30mm Liga Al-4,5%Cu (°C)	Temperatura Final da simulação 30mm Liga Al-15%Cu (°C)
6.877	355,93	413,71
20.708	374,71	424,96
94.295	374,68	424,94
270.003	374,61	424,89

Fonte: Autor.

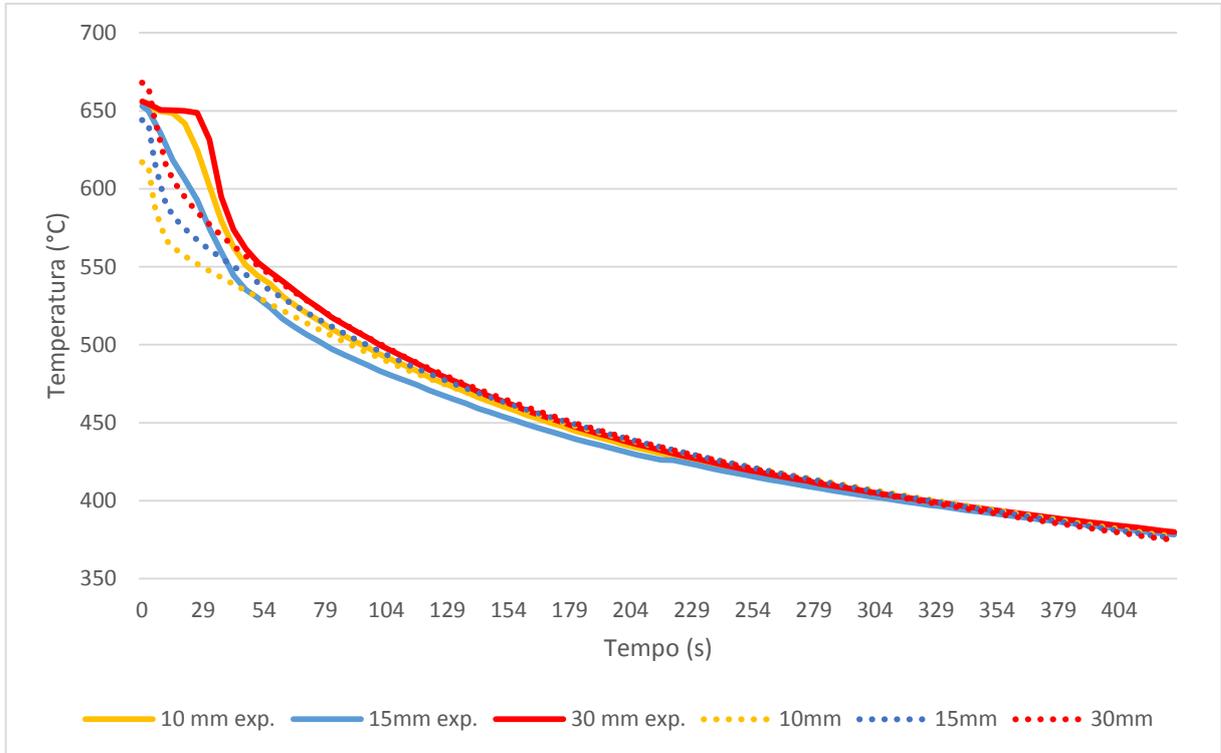
Figura 14. Representação do modelo com malha e seus respectivos nós.



Fonte: Autor.

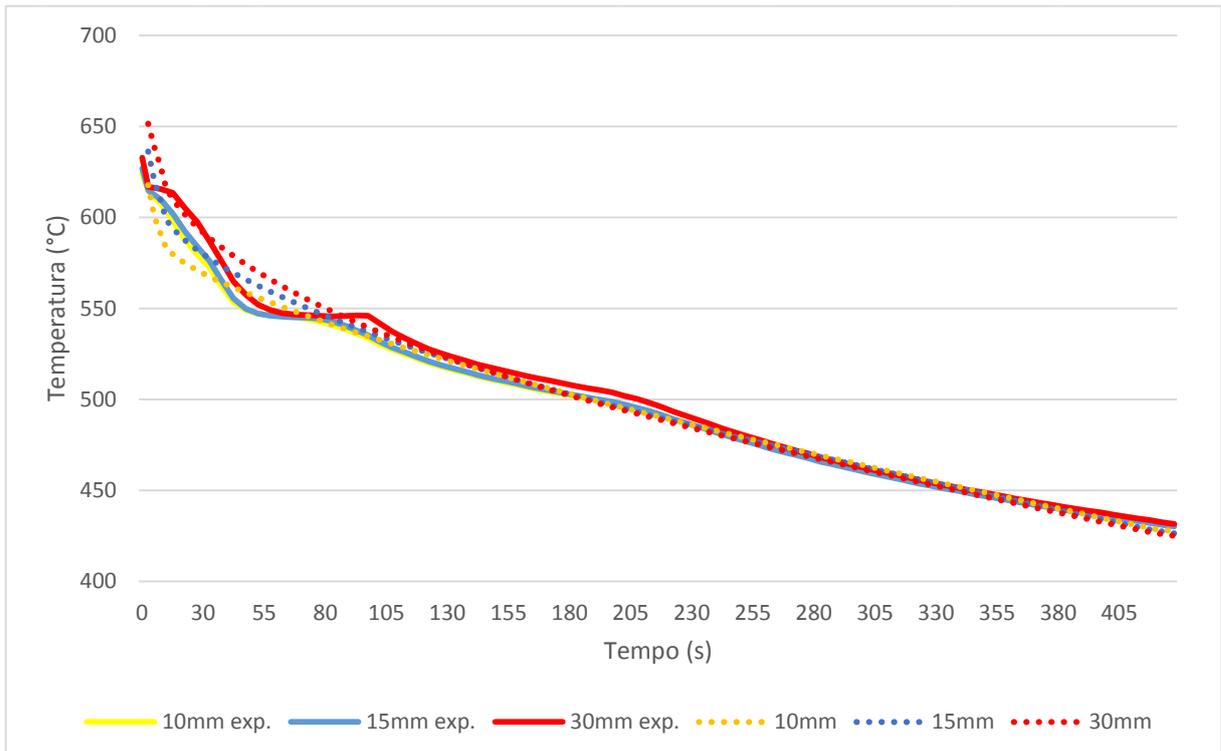
As curvas numéricas de resfriamento das ligas Al-4,5%Cu e Al-15%Cu obtidas através da simulação são confrontadas a seguir nas figuras 13 e 14, com as curvas obtidas experimentalmente.

Figura 15. Comparação das curvas numéricas x experimentais para a solidificação da liga Al-4,5%Cu.



Fonte: Autor

Figura 16. Comparação das curvas numéricas x experimentais para a solidificação da liga Al-15%Cu.



Fonte: Autor

Os parâmetros utilizados na simulação foram condutividade térmica, calor específico e densidade dos materiais, todas as propriedades variando com a temperatura. Foi utilizado um valor constante para representar a condutividade do terceiro material adotado para simular o gap na interface metal/molde. O coeficiente convectivo de transferência de calor na parte superior e externa do molde, e superior do lingote foi considerado constante.

Como podemos notar nas figuras 13 e 14 os valores numéricos obtidos através da simulação da solidificação para as ligas Al-4,5%Cu e Al-15%Cu apresentam valores muito próximos dos obtidos experimentalmente. Os valores ligeiramente distantes ao início da solidificação, que podem ser observados nas tabelas 5 e 6, podem ser atribuídos a dinâmica de vazamento e a alta liberação de energia pelo contato inicial entre metal líquido e molde, apesar de seu aquecimento a 300 °C visando minimizar os efeitos deste evento.

Tabela 5. Variação das curvas numéricas x experimentais da liga Al-4,5%Cu ao longo do tempo.

Variação da temperatura numérica x experimental liga Al-4,5%Cu (%)					
Posição/Tempo	0 s	85 s	170 s	255 s	425 s
10 mm	5,80	0,41	0,79	1,09	0,53
15 mm	1,38	3,19	2,36	1,55	0,58
30 mm	1,83	0,53	0,73	0,52	1,39

Fonte: Autor

Tabela 6. Variação das curvas numéricas x experimentais da liga Al-15%Cu ao longo do tempo.

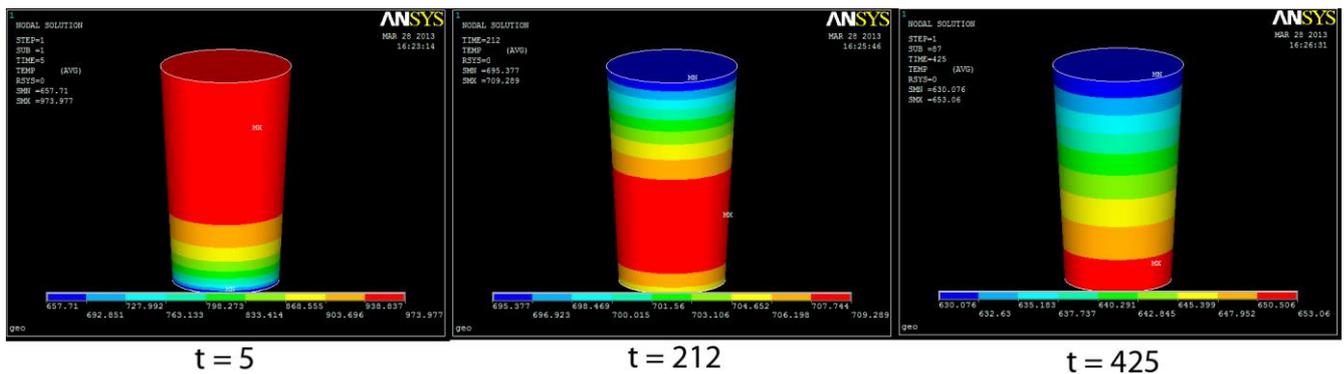
Variação da temperatura numérica x experimental liga Al-15%Cu (%)					
Posição/Tempo	0 s	85 s	170 s	255 s	425 s
10 mm	0,52	0,23	0,49	0,59	0,79
15 mm	3,51	0,48	0,36	0,49	0,88
30 mm	5,60	0,20	0,78	0,40	1,54

Fonte: Autor

A utilização do software ANSYS para obtenção dos modelos computacionais apresenta vantagens devido as suas ferramentas de pós - processamento, que permitem analisar, através de imagens que representam a peça em sua forma real, a

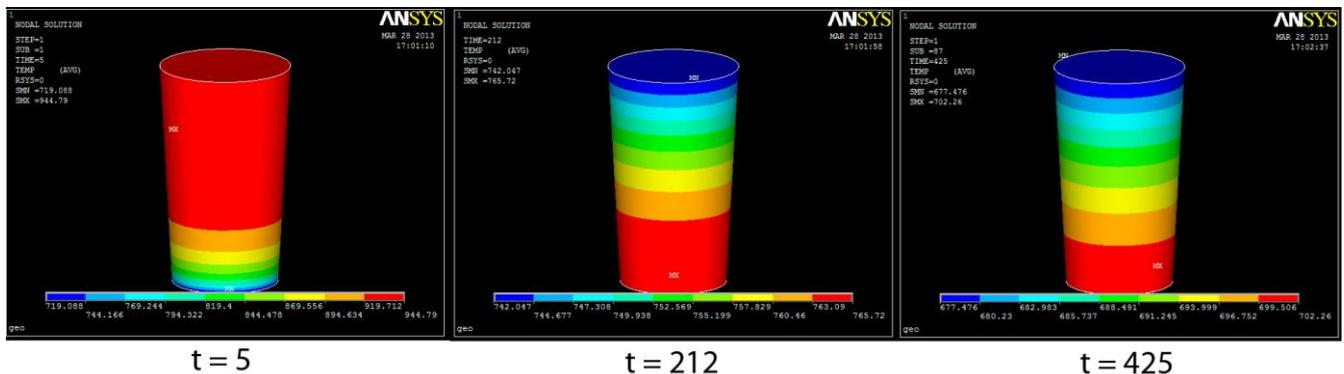
evolução da solidificação em função do tempo. Podemos ver nas figura 15 e 16 as peças simuladas em determinados instantes mostrando a evolução do processo de solidificação. Nesse caso, os intervalos de temperatura compreendem intervalos específicos para cada etapa, mas dependendo do objetivo pode-se obter qualquer coloração desejada para determinado intervalo de temperatura, facilitando a análise de todo o processo.

Figura 17. Etapas inicial, intermediaria e final de solidificação da liga Al-4,5%Cu.



Fonte: Autor.

Figura 18. Etapas Inicial, intermediaria e final de solidificação da liga Al-15%Cu.



Fonte: Autor.

Uma série de fatores interferem sobre o resultado teórico, como por exemplo as propriedades do material metálico utilizado, as condições de contorno adotadas pelo modelo numérico da simulação, as propriedades do molde e os coeficiente de transferência de calor nas interfaces metal/molde e molde/meio envolvente. As propriedades, tanto no estado líquido como no sólido, dos materiais metálicos são dependentes da temperatura e nem sempre são totalmente conhecidas. Em ambos os estados encontram-se valores diferentes das propriedades termofísicas em diferentes fontes, devido a isso podem surgir erros nos resultados teóricos, pois o grau de precisão dos dados utilizados em qualquer modelagem matemática é de suma importância, influenciando diretamente os resultados de maneira significativa.

As condições de contorno e simplificações adotadas também devem ser consideradas ao se analisar os resultados. O molde possui em sua base uma espessura maior, atingindo em torno de 140 mm, fator este desconsiderado para diminuir a quantidade de nós da malha, visto que o ganho de precisão por sua adoção no modelo computacional não seria compensado pelo consumo de recursos necessários para a solução do modelo com os nós adicionais proporcionados pela geometria mais rebuscada que seria utilizada. O terceiro material usado para simular o gap é uma aproximação da transferência de calor newtoniana que ocorre na interface metal/molde que é necessária, pois o ANSYS considera o contato entre os metais na interface perfeito, o que resultaria em um resfriamento mais rápido das ligas em solidificação no modelo computacional. Apesar de fornecer uma aproximação satisfatória, as propriedades do gap simulado estão sujeitas a possíveis variações se comparadas com as condições experimentais. O coeficiente de transferência de calor por convecção também é uma condição de contorno adotada que pode não estar representando totalmente a realidade. O valor desse coeficiente é considerado como sendo constante, entretanto pode sofrer variações devido a um possível aumento da temperatura ambiente ao redor do molde que, no caso da simulação, não se altera.

6. CONCLUSÃO

Considerando os resultados experimentais obtidos e comparando-os com os resultados das simulações executadas com o ANSYS conclui-se que o programa pode efetuar, com uma boa margem de segurança, a modelagem tridimensional de processos de solidificação de ligas metálicas. Apesar de em alguns pontos os resultados apresentarem algumas diferenças entre as curvas numéricas e experimentais, pode-se dizer que não houve comprometimento dos resultados até o final da solidificação.

O programa apresenta uma série de vantagens relacionadas ao pré e pós - processamento que tornam conveniente a sua utilização, como a possibilidade da utilização de elementos de geometria mais complexa, e amplas possibilidades de análise de dados pós processamento, que vão desde análises gráficas de cada etapa da simulação, animações e relatórios detalhados da temperatura e dos gradientes térmicos de cada nó individualmente se necessário. Apesar de suas limitações com relação a simulações térmicas referentes a solidificação, o software foi capaz de recriar de maneira satisfatória o efeito do gap na interface metal/molde e, portanto, pode-se considerar que o ANSYS pode ser utilizado na determinação de valores de coeficientes de transferência de calor newtoniano. A partir de propriedades físicas bem definidas de ligas metálicas e resultados experimentais de processos de solidificação, o programa pode avaliar, se necessário, esse coeficiente a partir do ajuste de curvas teóricas a curvas de solidificação obtidas experimentalmente.

Assim, conclui-se que, os resultados obtidos nas simulações realizadas pelo programa nos casos analisados foram satisfatórios e podem ser, portanto, utilizadas nos cálculos de vários parâmetros importantes que determinam as propriedades de uma peça que passou por um processo de fundição, como por exemplo, os tempos de solidificação local e conseqüentemente as distâncias entre os espaçamentos interdendríticos, na otimização de processos de fundição quanto a forma de vazamento, grau ideal de superaquecimento, e tipos de material de moldes utilizados, dentre outros.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar coeficientes de transferência de calor variáveis com a temperatura e/ou tempo no modelo numérico.
- Analisar a evolução do gap sob diferentes condições de resfriamento.
- Determinar valores de coeficiente de transferência de calor newtoniano a partir do ajuste das curvas numéricas com as curvas de solidificação obtidas experimentalmente.
- Desenvolver um modelo que inclua propriedades térmicas e mecânicas simultaneamente, de modo a prever a propriedades estruturais do material solidificado, como sua contração durante o resfriamento, por exemplo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CASSOTI, B. P.; FILHO, E. D. B.; CASTRO, P. C. **Industria de fundição: situação atual e perspectivas**. BNDES Setorial 33, p. 121-162, 2010.
- [2] Revista Alumínio. **Perspectivas do mercado de alumínio**. Disponível em: < <http://www.revistaaluminio.com.br/recicla-inovacao/11/artigo210562-1.asp>>. Acesso em: Mar. 2013.
- [3] GARCIA, A, **Solidificação: fundamentos e aplicações**, Unicamp, Editora da UNICAMP, Campinas-SP, 2001.
- [4] BOEIRA, A. P. **Análise numérica e experimental da solidificação das ligas Al 3,5%Cu e AA356**. Dissertação de mestrado (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - Rio Grande do Sul, 2002.
- [5] JUNIOR, C. R, **Modelagem Matemática, Simulação e Otimização do Processo de Solidificação**. Tese de Doutorado (Doutorado) – UNICAMP/FEM/DERMA, Campinas, 1988.
- [6] QUARESMA, J.M.V., **Correlação entre as condições de solidificação, microestrutura, e resistência mecânica**, Teses de Doutorado (Doutorado) - UNICAMP/FEM/DERMA, Campinas, 1999.
- [7] PINHO, A. F; MORAIS, N. S. **Utilização da simulação computacional combinada à Técnica de otimização em um processo produtivo**. Revista P&D em Engenharia de Produção V. 08 N. 02, p. 88-101, 2010.
- [8] METALS HANDBOOK – Casting, **ASM Internacional**, V.15, Metals Park, OH, 1998.
- [9] CHIANG, T. Y.; et al. **Thermal Analysis of Heterogeneous 3-D ICs with Various Integration Scenarios**. Disponível em: http://www.ee.ucla.edu/~chui/papers/IEDM2001_0681.pdf. Acesso em: Nov. 2012.
- [10] ANDRADE, S. R.; SANTOS, R. G. **Utilização do método de elementos finitos na simulação de processos de solidificação de ligas metálicas**. Artigo Científico - UNICAMP/FEM/DERMA, Campinas.