

## ANÁLISE COMPUTACIONAL NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DAS TAXAS DE RESFRIAMENTO DE LIGAS DE ALUMÍNIO ENDURECÍVEIS POR PRECIPITAÇÃO EXPOSTAS AO ENSAIO DE TEMPERABILIDADE JOMINY<sup>1</sup>

*Lorenzo Marzari Félix<sup>2</sup>*  
*Luiz Francisco Rodrigues Venturini<sup>2</sup>*  
*Felipe Leite Silva<sup>3</sup>*  
*Flávia Belló Artuso<sup>4</sup>*  
*Inácio da Fontoura Limberger<sup>5</sup>*  
*Carlos Henrique de Andrade Molenda<sup>5</sup>*

### Resumo

O avanço dos processos de tratamentos térmico das ligas de alumínio comerciais vem aumentando a facilidade de produção de itens mais resistentes e baratos. A eficiência do tratamento térmico depende do nível de solubilização dos elementos de liga, anteriormente ao envelhecimento artificial, influenciando na formação dos precipitados que causam o aumento da resistência mecânica. Neste trabalho foram determinadas as curvas de resfriamento de três pontos do corpo de prova das ligas de alumínio 6351-T6, 6151-T6 e 2219-T6, simuladas por um modelo numérico-computacional e também obtidas experimentalmente durante o ensaio Jominy. Para a análise computacional numérica foram considerados os fenômenos de convecção natural em torno do corpo de prova e convecção forçada devido ao jato de água incidente, utilizando condições de contorno extraídas da bibliografia. Para a análise experimental corpos de prova foram submetidos ao ensaio de temperabilidade conforme a norma ASTM A255-10, sendo feita a aquisição da temperatura com termopares do tipo K inseridos no interior dos corpos de prova em diferentes regiões. Quando comparados os resultados calculados com os obtidos experimentalmente, estes estão em desacordo, atribuído a não inclusão da turbulência da água na modelação numérica utilizada.

**Palavras-chave:** Ensaio Jominy; Ligas de alumínio; Análise numérica; Curva de resfriamento.

### NUMERICAL COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF COOLING RATES OF ALUMINUM ALLOYS HARDENABLE BY PRECIPITATION TESTING ON JOMINY TEST

#### Abstract

Process advances in aluminum alloys heat treatment increases the feasibility to produce cheaper and stronger products. The efficiency of the heat treatment processes depends on the solubility level of the alloy prior to the artificial aging process affecting the precipitate formation that increases the material mechanical strength. In this work it was determined the cooling curves in three points of the specimen of aluminum alloys 6351-T6, 6151-T6 e 2219-T6 in a numeric computational model and also through experimental data obtained during Jominy end-quench test. In the numerical computational analysis it was considered only the natural convection phenomena around the specimen and forced convection from the water stream incident using boundary conditions extracted from bibliography. In the experimental analysis the specimens were submitted to hardenability test covered by standard ASTM A255-10 and the temperature was obtained using type K thermocouples placed inside the specimen in three different regions. The calculated results disagree with the experimental results achieved. This was attributed to the exclusion of water turbulence in the used numerical model.

**Key-words:** Jominy test; Aluminum alloys; Numerical analysis; Cooling curve.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Mecânico. Pós-graduando. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil.*

<sup>3</sup> *Engenheiro Mecânico. Professor. Instituto Federal Rio Grande do Sul, Ibirubá, RS, Brasil..*

<sup>4</sup> *Graduanda em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS, Brasil.*

<sup>5</sup> *Engenheiro Mecânico. Professor Dr., Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 A avaliação do Alumínio Frente às Necessidades

Dentro da indústria automotiva, de aeronaves, de vagões ferroviários e de embarcações cada vez mais o alumínio e suas ligas vem sendo utilizados com o intuito de reduzir o peso e com isso dar maior autonomia reduzindo o consumo de combustível, permitindo velocidades maiores e também dando maior capacidade de carga. Seguindo esta tendência, a indústria de beneficiamento do alumínio vem melhorando a qualidade das ligas e introduzindo no mercado novas ligas com propriedades mecânicas cada vez melhores. Algumas destas ligas podem ter suas propriedades mecânicas melhoradas por meio de tratamentos térmicos enquanto outras utilizam o encruamento. Devido às exigências e das altas solicitações mecânicas a que as ligas de alumínio podem ser submetidas, são adicionadas em muitas delas elementos que ao se associarem podem formar compostos que melhorem as propriedades mecânicas, que em contrapartida podem prejudicar o uso de processos de soldagem com fusão do material.

Neste trabalho foram escolhidas três ligas de alumínio tratáveis termicamente e que são indicadas para trabalhos onde possivelmente a sua estrutura seja afetada devido à alterações de temperatura. Foram realizados ensaios Jominy em corpos de prova instrumentados com termopares do tipo K para avaliar as velocidades de resfriamento em posições pré-determinadas e posteriormente foram feitas simulações usando *softwares* apropriados de simulação numérica para determinar as velocidades de resfriamento para cada uma destas regiões, simulando o ensaio Jominy.

### 1.2 O ensaio Jominy Aplicado a Ligas de Alumínio

A temperabilidade em aços é frequentemente determinada através do ensaio de temperabilidade de Jominy (de têmpera de extremidade – end-quench). O corpo de prova para o ensaio de Jominy e os procedimentos para a realização do ensaio de temperabilidade são normalizados segundo a norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), a norma ASTM A 255,<sup>(1)</sup> que padroniza todos os parâmetros referentes a este ensaio.

No ensaio de Jominy, a amostra depois de austenitizada (para aços) é colocada em um dispositivo de fixação, e faz-se incidir rapidamente um jato de água em uma das extremidades da amostra. Esta água deve estar a uma temperatura entre 5 e 30°C, arrefecendo o corpo de prova por aproximadamente 10 minutos.

Para avaliar a temperabilidade, retifica-se duas superfícies lisas em lados opostos do corpo de prova e efetuam-se medições de dureza Rockwell C ao longo dessas duas superfícies, até 63 mm desde a extremidade temperada.

O ensaio de temperabilidade Jominy também pode ser aplicado para ligas de alumínio, observando-se a temperatura de solubilização para a liga que irá sofrer este ensaio.

Newkirk e Mackenzie<sup>(2)</sup> usaram em seu experimento uma liga de alumínio 7075-T6 usando um corpo de prova de 37 mm de diâmetro e uma liga 7050-T7451, com corpo de prova de 75 mm de diâmetro, ambas as barras extrudadas. Pode-se notar que os diâmetros dos corpos de prova não estão conforme a norma ASTM A

255. Os corpos de prova foram solubilizados durante uma hora a 471°C, e após resfriados no equipamento de arrefecimento.

As taxas de resfriamento em três pontos do corpo de prova durante o ensaio Jominy para as duas ligas foram obtidas instalando-se termopares do tipo K, posicionados distantes de 3,2 mm, 38,1 mm e 76,2 mm da extremidade de arrefecimento, em furos radiais feitos na superfície dos corpos de prova, com profundidade de 12 mm. Os termopares foram inseridos juntamente com os corpos de prova no forno onde as amostras foram solubilizadas. A Figura 1 apresenta a queda de temperatura em função do tempo para uma das ligas de alumínio. Não foi especificada qual liga foi utilizada.

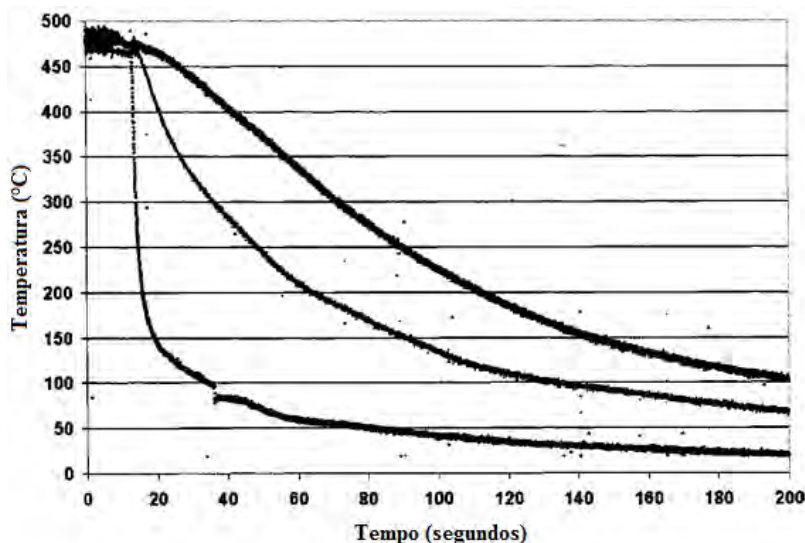


Figura 1: Queda de temperatura em função do tempo para uma das ligas de alumínio.<sup>(2)</sup>

Os dados de temperatura foram obtidos em intervalos de tempo de 0,2 s.

A curva mais acentuada corresponde aos dados de temperatura obtidos pelo termopar fixado a 3,2 mm da face de retirada de calor, conforme pode-se observar na Figura .

### 1.3 A Simulação Numérica Aplicada à Transferência de Calor

O modelo numérico utilizado neste trabalho é um modelo padrão de um programa de simulação numérica comercial. O programa utiliza um modelo geométrico em três dimensões para criar uma malha de elementos discretos. As propriedades do sistema então são inseridas no modelo criado automaticamente para que a rotina de cálculos seja executada.

As propriedades do sistema englobam as temperaturas utilizadas nos ensaios, as dimensões e geometrias do aparato do experimento, as propriedades dos materiais e os coeficientes de transferência de calor do sistema.

As temperaturas do ensaio dependem das temperaturas indicadas para solubilização dos elementos de liga em cada material estudado e será abordado em um item a seguir. As dimensões e geometrias do aparato são fixas e estão dispostas no item Materiais e Métodos. As propriedades dos materiais são particulares para cada liga e podem apresentar significativas mudanças nas taxas de resfriamento.

Os coeficientes de transferência de calor do sistema foram determinados seguindo a teoria da transferência de calor para casos específicos como descritas

na bibliografia. Os casos aplicados referem-se a elementos específicos utilizados no aparato experimental. A convecção natural em um corpo cilíndrico aquecido referente as laterais do corpo de prova e a convecção natural em uma placa aquecida referente as chapas de alumínio de apoio e de aço utilizada como suporte para o corpo de prova foram obtidas através de uma solução analítica que utiliza-se do número de Rayleigh e no número de Nusselt médio para determinar um coeficiente de transferência de calor global que será aplicado às regiões de fronteira metal-ar.

O coeficiente de transferência de calor para a convecção forçada referente ao jato de água foi derivado do utilizado por Le Masson et al.<sup>(3)</sup> O resultado obtido pelo autor referido resultou em uma superestimativa de retirada de calor, então um valor mais conservador de 10.000 W/m<sup>2</sup>K foi aplicado.

Um passo a passo detalhado dos cálculos realizados e as hipóteses feitas para chegar aos coeficientes de transferência de calor estão disponíveis no trabalho completo de Félix.<sup>(4)</sup>

## 1.4 Objetivo

Pretende-se, neste trabalho, apresentar resultados das taxas de retirada de calor obtidos experimentalmente através do ensaio Jominy e através de simulação numérica deste ensaio, para efeito de comparação entre estes estudos da retirada de calor em diferentes pontos dos corpos de prova.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Três ligas de alumínio, 6351-T6, 6151-T6 e 2219-T6 foram submetidas a ensaios experimentais e simulação numérica do ensaio Jominy. Serão abordadas as técnicas realizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

### 2.1 Análise Química

A determinação da composição química foi realizada por espectrometria de massa, visando identificar as ligas para que a determinação dos parâmetros de ensaio sejam corretamente definidos. As regiões das amostras analisadas possuíam espessuras de aproximadamente 10 mm e foram previamente desbastadas com lixas de granulometria 80. Cada material foi analisado em três regiões distintas.

### 2.2 O Ensaio Jominy Aplicado às Ligas

A partir de barras com diâmetro igual a 25,4 mm foram seccionadas pequenas barras de cada liga com comprimento de 100 mm cada, caracterizando os corpos de prova para o ensaio Jominy.

Na extremidade oposta à face de arrefecimento de cada uma das barras foi soldada através de processo de soldagem TIG uma chapa de alumínio composta pela liga 6351-T6. Esta chapa tem as seguintes dimensões: 3 mm de espessura; 50 mm de comprimento; 19 mm de largura. Esta chapa tem como única finalidade apoiar o corpo de prova ao equipamento de ensaio.

O corpo de prova finalizado e pronto para o ensaio pode ser observado na Figura.



Figura 2: Corpo de prova pronto para o ensaio.

Para realizar o tratamento de solubilização das ligas escolhidas foi necessário determinar a temperatura em que estas ligas sofrem tal tratamento e o tempo de manutenção em tal temperatura.

As temperaturas de solubilização para as ligas eleitas, assim como o tempo de forno, podem ser observadas no Quadro 1.

Quadro 1: Temperaturas e tempo de solubilização para as ligas utilizadas<sup>(5)</sup>

Material	Temperatura de solubilização (°C)	Tempo de forno (horas)
6351-T6	504	4
6151-T6	515	4
2219-T6	535	4

Estando o forno na temperatura desejada, o tempo de solubilização acima descrito foi realizado como sendo o tempo entre inserir a peça no forno e retirá-la para o próximo procedimento. Dessa forma, o tempo adotado engloba a rampa de aquecimento da peça e o tempo de solubilização em si. Ou seja, o tempo de solubilização propriamente dito é menor que o tempo descrito na tabela.

Após o tempo em que os corpos de prova permaneceram no forno para o tratamento de solubilização foi realizado o arrefecimento destes corpos de prova no equipamento para o ensaio Jominy. Conforme a norma ASTM A 255-10<sup>(1)</sup> a temperatura da água durante o ensaio deve estar entre 5 e 30°C. A temperatura da água de arrefecimento era de 20,5°C.

Os corpos de prova foram resfriados durante cinco minutos, até atingirem uma temperatura próxima a temperatura ambiente.

### 2.3 Obtenção das Curvas de Resfriamento Durante o Ensaio Jominy para as Ligas Estudadas

Para a obtenção das temperaturas de resfriamento em função do tempo de ensaio dos corpos de prova em determinados pontos dos mesmos, foram feitos três furos para a alocação dos termopares. Os furos com dois milímetros de diâmetro foram feitos na face oposta a face de incidência da água. O centro de cada furo ficou posicionado a quatro milímetros do centro do corpo de prova, sendo que cada furo ficou defasado do outro em 120°.

A profundidade de cada furo é diferenciada, pois a posição para a aquisição dos dados relativos à temperatura é diferente. O termopar que ficou mais próximo da superfície de arrefecimento ficou alocado a 4 mm desta superfície (Ponto 1), sendo a



outra altura de leitura de temperatura de 20 mm (Ponto 2) e a outra de 50 mm (Ponto 3). A Figura representa o posicionamento dos termopares no corpo de prova.

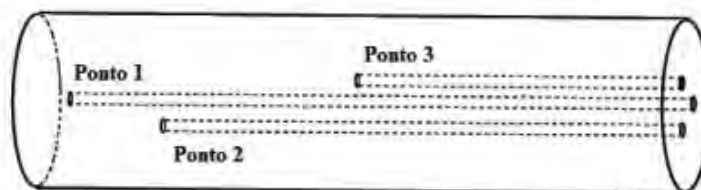


Figura 3: Posicionamento dos termopares do corpo de prova.

As curvas de resfriamento foram obtidas através de um termopar tipo K conectado a uma placa de aquisição de sinais Picotech, modelo TC-08. O software utilizado para acompanhamento dos dados foi o Picolog 5.21.5.

## 2.4 A Simulação Numérica do Ensaio Jominy

O ensaio Jominy é um problema simples de transferência de calor. O ensaio montado consiste em uma barra cilíndrica (corpo de prova) montado sobre uma chapa de aço que serve como apoio ao mecanismo do ensaio. Como discutido anteriormente, uma chapa de alumínio foi soldada a todos corpos de prova para facilitar a fabricação dos mesmos.

As dimensões do aparato estão listadas abaixo:

- dimensões do corpo de prova: 100 mm de altura; 25,4 mm de diâmetro;
- dimensões da chapa de alumínio que serviu de apoio: 50 mm de comprimento, 19 mm de largura, 3 mm de espessura;
- dimensões da chapa do equipamento onde o corpo de prova fica apoiado: 190 mm de comprimento, 92 mm de largura, 2 mm de espessura. Esta chapa possui um furo central passante de 26 mm.

Após atingir uma temperatura de solubilização que varia entre cada liga utilizada neste trabalho, um jato de água incidente é a fonte de retirada de calor. A norma ASTM A 255-10 cita que o ensaio de temperabilidade Jominy é um ensaio de retirada de calor unidirecional, ou seja, o calor irá ser retirado dos corpos de prova unicamente pela interface atingida pela corrente de água. Outros fatores, porém, impactam na taxa de resfriamento dos corpos de prova e devem ser considerados na hora de calcular os resultados da transferência de calor pelo modelo numérico. Na prática, a retirada de calor é preferencialmente orientada na direção da face atingida pelo jato de água que é complementada pela perda de calor devido a radiação e a convecção do ar em contato com a barra e as chapas auxiliares.

Tabela 1: Propriedades dos materiais utilizados no aparato experimental

Material/Liga	6351 T6 <sup>(6)</sup>	6151 T6 <sup>(6)</sup>	2219 T6 <sup>(7)</sup>	Aço SAE 1020 <sup>(6)</sup>
Calor específico (J/g°C)	0,89	0,895	0,864	0,486
Condutividade térmica (W/m°C)	176	171	126	51,9
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,71	2,71	2,84	7,87
Temperatura Liquidus (°C)	777	649	643	298
Emissividade	0,2	-	-	-
Coeficiente de Poisson	0,33	0,33	0,33	0,29

## 2.5 Determinação da Difusividade Térmica

A difusividade térmica é uma propriedade do material fundamental na determinação das taxas de resfriamento ou aquecimento dos materiais em processos que térmicos. A velocidade da penetração do calor no interior das peças utilizadas no trabalho é afetada por vários fatores que são inter-relacionados em uma relação matemática segundo a fórmula abaixo.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

Para este trabalho, a difusividade térmica das diferentes ligas de alumínio foi determinada analiticamente através dos dados já expostos retirados da bibliografia. A difusividade térmica afeta diretamente a capacidade dos materiais sofrerem o processo de endurecimento por precipitação, pois afeta diretamente as taxas de resfriamento das peças, principalmente em regiões distantes da face de retirada de calor. Os elementos de liga afetam tanto a capacidade de formar precipitados, como a cinética da difusão dos elementos de liga e as temperaturas durante o tratamento térmico. Por isso, cada liga foi analisada separadamente para facilitar o discernimento dos fatores que afetam a precipitação ideal dos compostos intermetálicos. Os valores utilizados na simulação encontram-se na Tabela 2.

**Tabela 2:** Difusividade térmica dos materiais utilizados no aparato experimental

Material/Liga	6351 T6	6151 T6	2219 T6
Difusividade térmica (m <sup>2</sup> /s)	0,72971x10 <sup>-4</sup>	0,70502x10 <sup>-4</sup>	0,51345x10 <sup>-4</sup>

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Análise Química

Os resultados obtidos nos ensaios espectrométricos são apresentados no Quadro 2.

**Quadro 2:** Porcentagem em peso dos elementos químicos observados nas ligas através de espectroscopia de massa.

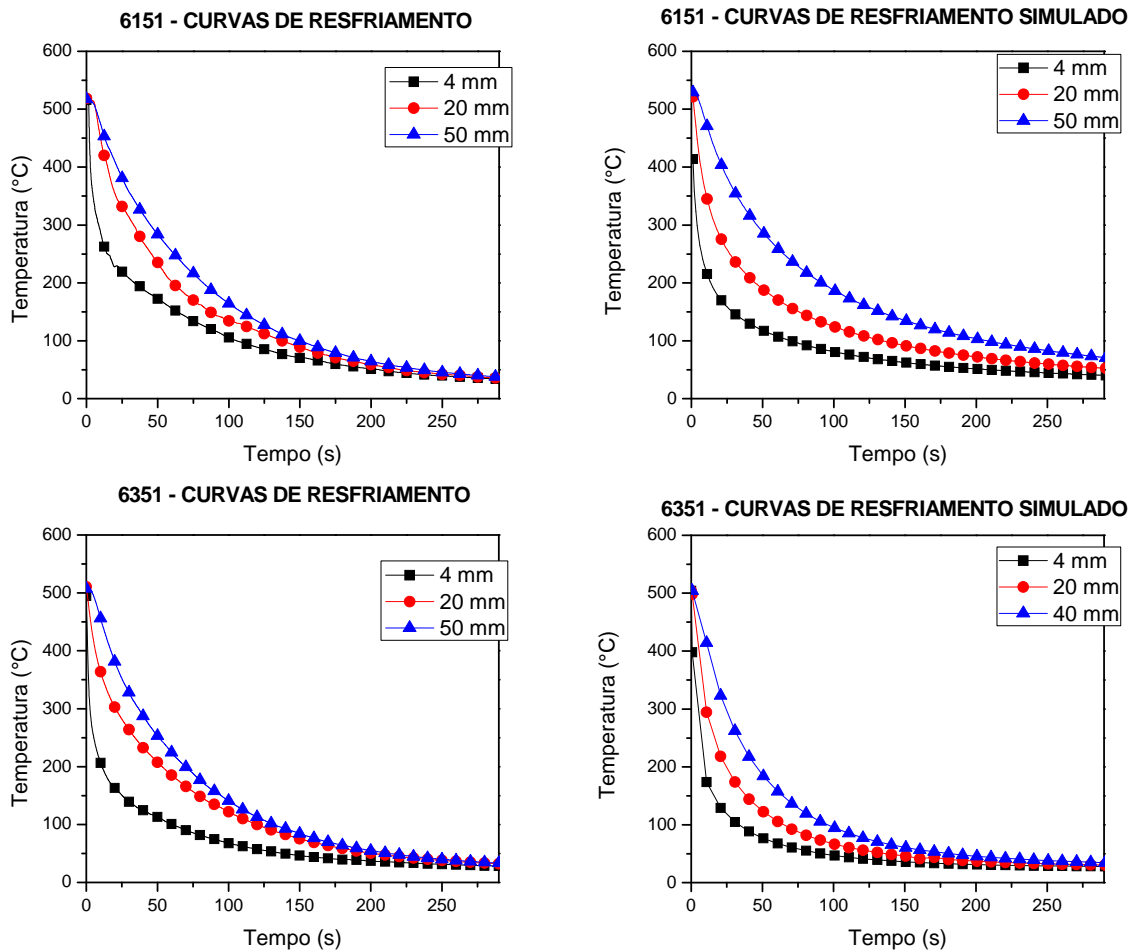
Elemento	6351-T6	6151-T6	2219-T6
Si	1,320%	1,010%	0,034%
Fe	0,196%	0,377%	0,103%
Cu	0,108%	0,249%	6,470%
Mn	0,489%	0,065%	0,340%
Mg	0,416%	0,720%	0,0046%

### 3.2 Comparação das Curvas de Resfriamento Obtidas Experimentalmente e Numericamente

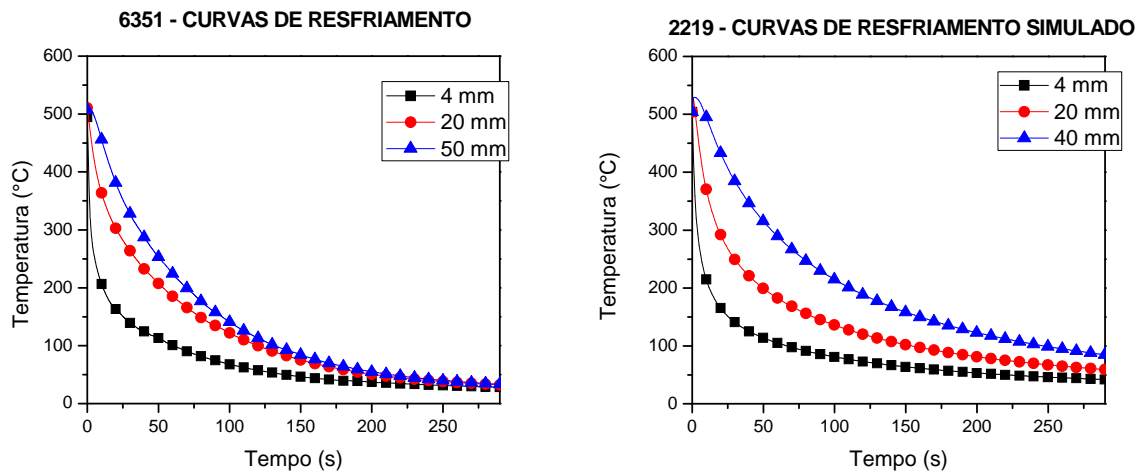
Na Figura são apresentadas as curvas de resfriamento dos corpos de prova das três ligas estudadas. São apresentados os resultados de temperatura em função do tempo para as três distâncias a partir da face de resfriamento, sendo que a retirada de calor é mais acentuada na região situada a 4 mm da face de arrefecimento.

Observa-se que as curvas de resfriamento das ligas da série 6XXX são semelhantes e resfriam mais rapidamente do que a liga da série 2XXX. As taxas de resfriamento para as diferentes distâncias são maiores nas as ligas 6XXX do que as taxas de resfriamento para a liga 2XXX, evidenciando uma notável influência dos elementos de liga na velocidade de resfriamento. A taxa de resfriamento no ponto mais próximo a face de arrefecimento é próxima para as três ligas estudadas, sendo difícil notar a diferença visualmente.

À direita na Figura 4 estão as curvas obtidas com o modelo numérico supracitado. A forma das curvas de temperatura estão em concordância com o esperado devido a diferença entre as difusividades térmicas e se apresentam na mesma ordem, com a liga 6351 sendo resfriada mais rapidamente e a liga 2219 apresentando as menores taxas de resfriamento e as curvas mais separadas nos pontos de referência utilizado na construção dos gráficos.







**Figura 3:** Curvas de resfriamento para as três ligas estudadas. À esquerda o histograma apresenta as curvas obtidas experimentalmente e a direita as curvas obtidas através do modelo numérico.

Em relação aos valores absolutos em temperatura e tempo, há uma discordância em relação às duas curvas do mesmo material. Alguns pontos de referência apresentam uma diferença muito pequena, por exemplo, as curvas do ponto a 50 mm da face de arrefecimento da liga 6351 ou o ponto a 4 mm da curva da liga 6151 enquanto outros apresentam grande variação, principalmente nos pontos médios, a 20 mm da face de arrefecimento.

Essas variações são provenientes das diversas considerações tomadas durante a inserção dos dados no modelo numérico bem como as variações naturais que ocorrem em procedimentos experimentais. Os valores das propriedades utilizados para as diversas ligas, retirados da bibliografia, referem-se às propriedades da liga na condição T6 e a uma temperatura fixa. Os valores, porém, são variáveis com a temperatura em que o corpo de prova se encontra em cada instante bem como a condição dos elementos de liga, microestrutura e meio ambiente. As variações da composição química entre as barras utilizadas e os valores do material utilizado para a aquisição das propriedades também adiciona um desvio dos valores utilizados no modelo. O valor da retirada de calor através do jato de água, porém, pode ter sido a maior influência nas variações encontradas entre os valores absolutos devido a turbulência formada no contato com a superfície de retirada de calor não ter sido considerada no presente modelo numérico.

## 4 CONCLUSÃO

Como demonstrado no desenvolvimento desse trabalho, é possível aproximar os valores de um modelo numérico daqueles obtidos através da retirada de dados de um processo experimental. Apesar de os valores demonstrados nos resultados numéricos não serem exatos para todos os pontos, não significa que sua determinação não é utilizável. A partir dos dados obtidos, é possível fazer iterações no modelo utilizado e corrigir os erros induzidos pelos fatores discutidos no item 3.2. O valor de retirada de calor devido a incidência do jato de água pode ser ajustado a partir dos valores experimentais para ser mais preciso que aquele baseado na experiência passada por autores na bibliografia.

Para trabalhos futuros é possível determinar ajustes para as ligas estudadas e algumas boas práticas de estudo para novas ligas de alumínio de interesse. A partir da determinação precisa das taxas através de simulação numérica é possível

levantar o histórico térmico para outros pontos com diferentes taxas de resfriamento e correlacioná-las com diferentes microestruturas e propriedades mecânicas.

## REFERÊNCIAS

- 1 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A255: Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel. 1999. 26 p.
- 2 NEWKIRK, J. W.; MACKENZIE, D. S. The Jominy end quench for light-weight alloy development. Journal of Materials Engineering and Performance. v, 9, n. 4, p. 408-415, agosto 2000.
- 3 LE MASSON, P. *et al.* A numerical study for the estimation of a convection heat transfer coefficient during a metallurgical “Jominy end-quench” test. International Journal of Thermal Sciences. v. 41, n. 6, p. 517e Sc, maio 2012.
- 4 FÉLIX, L. M. Aplicação do ensaio Jominy a ligas de alumínio. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica).86f. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2010.
- 5 MATWEB. In Matweb Material Property Data. Disponível em: <[www.matweb.com/](http://www.matweb.com/)>. Acesso em 20 de dez. de 2012
- 6 MakeltFrom.com. 2219-T6 Aluminum. Disponível em: <[www.makeitfrom.com/material-data/?for=2219-t6-Aluminum](http://www.makeitfrom.com/material-data/?for=2219-t6-Aluminum)>. Acesso em: 22 de dez. de 2012.