

Determinação da Curva Experimental da Velocidade da Isotherma Liquidus na Solidificação de Ligas Diluídas da Série 6XXX Solidificadas Unidirecionalmente

AUTORES: **Aline Emanuelle Albuquerque Moreira**

Ulisses Rodrigues

Thiago Cunha

Kleber Agustin Sabat da Cruz

José Maria do Vale Quaresma

RESUMO

Durante o processo de solidificação, os parâmetros térmicos e operacionais são decisivos para a formação estrutural de produtos fundidos, causando um reflexo no comportamento mecânico do material. Os parâmetros térmicos são a taxa local de resfriamento, gradiente térmico e a velocidade de solidificação, os quais influem em parâmetros estruturais como tamanho de grão e espaçamentos interdendríticos. O estudo da relação entre parâmetros térmicos e estruturais é de grande importância para sistemas metálicos de significativo valor industrial como os da série 6XXX, já que a configuração da microestrutura influenciará nas propriedades mecânicas do material. Neste trabalho, obteve-se a curva experimental da velocidade da isoterma liquidus através do mapeamento térmico durante o processo de solidificação unidirecional de ligas do sistema ternário Al-Mg-Si, onde variou-se o teor de silício nas concentrações de 0,4, 0,6, 0,8, 1,0 buscando verificar a magnitude da influência do teor de silício na cinemática do processo de transformação sólido-líquido. O mapeamento térmico foi feito através de termopares localizados em cinco pontos pré-determinados no metal, tomando como referência a interface metal/molde. As curvas de resfriamento registraram uma variação na sua configuração a medida que o teor de silício foi variado, assim como a curva da velocidade, onde a medida que se aumentou o silício, observou-se uma redução na velocidade da isoterma liquidus.

Palavras-Chave: Solidificação unidirecional, Ligas Al-Mg-Si, Velocidade da Isotherma liquidus

INTRODUÇÃO

A maioria dos produtos metálicos, exceto aqueles fabricados pelo processo de metalurgia do pó, passam pelo processo de solidificação, em algum estágio de sua fabricação. Um material metálico no estado sólido apresenta forma e volume definidos, além de resistência e propriedades mecânicas finitas. No estado líquido, por sua vez, os metais possuem um volume definido mas adquirem as formas dos recipientes que os contêm devido às baixas resistências ao cisalhamento.

Na transformação sólido-líquido, parâmetros operacionais como a temperatura de vazamento, material e dimensões do molde e os coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde e na interface molde/ambiente, e parâmetros térmicos tais como velocidade de solidificação, gradientes térmicos e a taxa local de resfriamento correlacionam-se estreitamente, e descrevem a maneira como esta transformação vai ocorrer, influenciando na formação estrutural do material, formação esta que refletirá nas suas propriedades mecânicas. Uma vez observada essa correlação, torna-se possível adquirir mecanismos que possibilitem monitorar as propriedades mecânicas do material, em função das condições de solidificação ajustadas.

OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo, descrever a obtenção experimental da curva da velocidade da isoterma *liquidus* (V_L) de ligas diluídas do sistema 6XXX na faixa das ligas 6101/6201, variando o teor de silício. Avaliar a modificação que a configuração da curva da velocidade teve, a medida que o teor de silício foi variado.

ESTUDOS PRELIMINARES

A isoterma liquidus corresponde ao conjunto de pontos onde se localiza, num determinado instante, as pontas das dendritas formadas no metal líquido, devido à instabilidade, a qual é criada na interface sólido/líquido devido ao acúmulo de soluto.

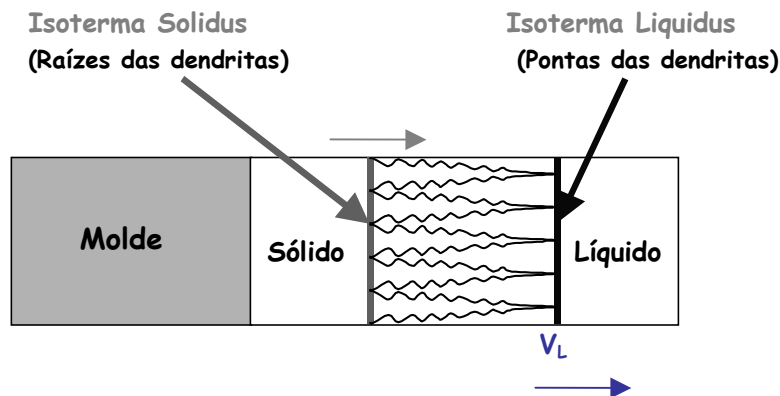


Figura 01 – Representação esquemática das isothermas características durante a solidificação : V_L - Velocidade de deslocamento da Isotherma *liquidus*; [OSÓRIO; 2000]

Encontram-se na literatura diversos trabalhos que obtiveram a relação experimental da velocidade da isoterma *liquidus* (V_L) com o tempo e com a distância da interface metal/molde para uma série de ligas de grande importância para a tecnologia de fundição, utilizando a mesma metodologia usada neste trabalho [SANTOS, 1997; OSÓRIO *et al*, 1998; QUARESMA,1999; ROCHA, 2003].

O teor de soluto de uma liga exerce uma significativa influência nos parâmetros e variáveis atuantes no processo de solidificação. Em alguns trabalhos, testemunhou-se a mudança do perfil transitório dos coeficientes de transferência de calor com o teor de soluto, onde se concluiu que a influência da concentração de soluto não pode ser generalizada e depende de cada sistema metal/molde específico [QUARESMA & SANTOS, 1986, 1997, 1998, 2000; ROCHA, 2003]. Sabendo da relação entre a velocidade de soldificação e o coeficiente interfacial de transferência de calor, torna-se interessante a realização de estudos que mostrem a mudança da curva da velocidade da isoterma liquidus com a composição química da liga, não só para sistemas Al-Cu, Zn-Al e Pb-Sn, mas, também, abordando outros sistemas metálicos de grande interesse industrial, como é o caso de ligas Al-Mg-Si.

As ligas da série 6XXX, são ligas ternárias tratáveis termicamente, contendo como principais elementos o magnésio e o silício. Combinam características como boa resistência à corrosão e trabalhabilidade e boa soldabilidade. A adição de silício e magnésio pode variar de 0,3 até 1,2% em peso. Este trabalho estudou as ligas do sistema 6XXX na faixa das ligas 6101/6201.

Tabela 01 – Limites composicionais admissíveis das ligas 6101 e 6201

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	B
6101	0,3 a 0,7	0,5	0,1	0,03	0,35 a 0,8	0,03	0,1	0,06
6201	0,6 a 1,2	0,5	0,1	0,03	0,6 a 0,9	0,03	0,1	0,06

A aplicação industrial das ligas da série 6XXX está em produtos extrudados de uso arquitetônico, laminados de uso na indústria automobilística e de laminados e trefilados para a produção de fios e cabos para o transporte de energia elétrica. No Estado do Pará, atualmente as ligas 6101/6201 são utilizadas como matéria-prima para fabricação de fios com intuito da produção de cabos para transporte de energia elétrica.

MATERIAIS E MÉTODOS

As ligas estudadas neste trabalho foram produzidas no laboratório de Fundição da Universidade Federal do Pará (LABFUN-UFGPA), e foram vazadas em um aparato experimental chamado de câmara de vazamento. Na sua montagem, utilizou-se um bloco de aço SAE 1010 com 63mm de espessura, o qual funcionou como molde e fonte extratora da energia térmica proveniente do metal fundido, vazado no espaço interno da câmara. O acabamento da superfície interna do bloco foi dado através de jato de areia, visando a

remoção de material proveniente da oxidação para não interferir na eficiência do contato metal/molde. As outras paredes são constituídas de um material cerâmico à base de sílica, objetivando a orientação do fluxo de calor para o bloco de aço, gerando um sistema de fluxo de calor unidirecional. A temperatura de vazamento foi de 700°C e o vazamento foi feito da maneira mostrada na Figura 02B.

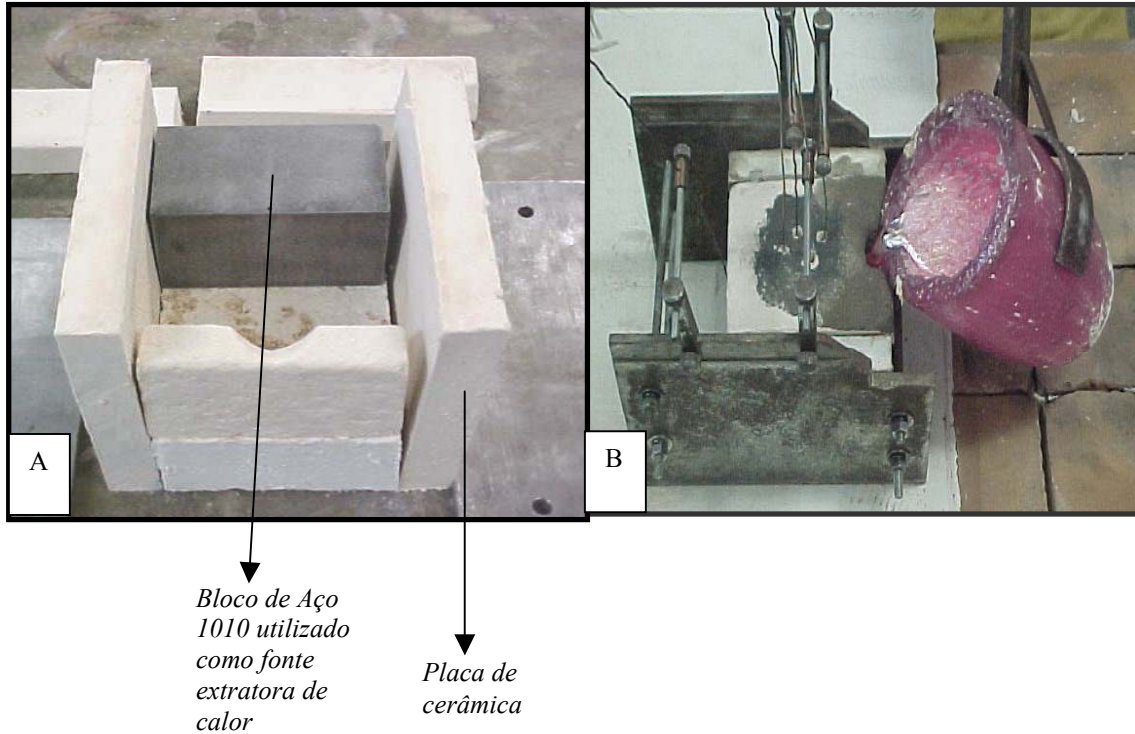


Figura 02 – Câmara de Vazamento usada neste trabalho (A) Detalhe sem a parte superior; (B) No momento do Vazamento.

Após a obtenção dos lingotes, fez-se a análise química das ligas em um espectrômetro de massa mostrado na Figura 03. As composições químicas das ligas correspondentes são apresentadas na tabela 02.

Tabela 02 – Composição química das Ligas produzidas – Média Três Análises

LIGAS	IDENTIFICAÇÃO	Si	Fe	Mg	OUTROS	Al
Al-0,6Mg-0,4Si	AMS-04	0,382	0,170	0,617	0,043	98,78
Al-0,6Mg-0,6Si	AMS-06	0,593	0,155	0,605	0,059	98,58
Al-0,6Mg-0,8Si	AMS-08	0,813	0,154	0,612	0,021	98,39
Al-0,6Mg-1,0Si	AMS-1.0	1,021	0,158	0,620	0,024	98,17



Figura 03 – Espectrômetro de massa utilizado neste estudo para a análise química (Equipamento pertencente à ALUBAR METAIS E CABOS)

Durante a solidificação na câmara, seis termopares foram posicionados de acordo com a figura 04, objetivando construir a curva de resfriamento. Os termopares estavam conectados a um sistema de aquisição de dados, o qual registrou toda a variação térmica desde o momento do vazamento até o processo de solidificação estar consumado. Após a etapa de solidificação, o aquisitor de dados foi interfaceado a um computador, para o qual os dados foram enviados. No computador, os dados foram tratados em um programa de construção de gráficos (*Origin 5.0 - Microcal®*) para a plotagem dos perfis térmicos. O sistema de aquisição de dados é mostrado na Figura 04.

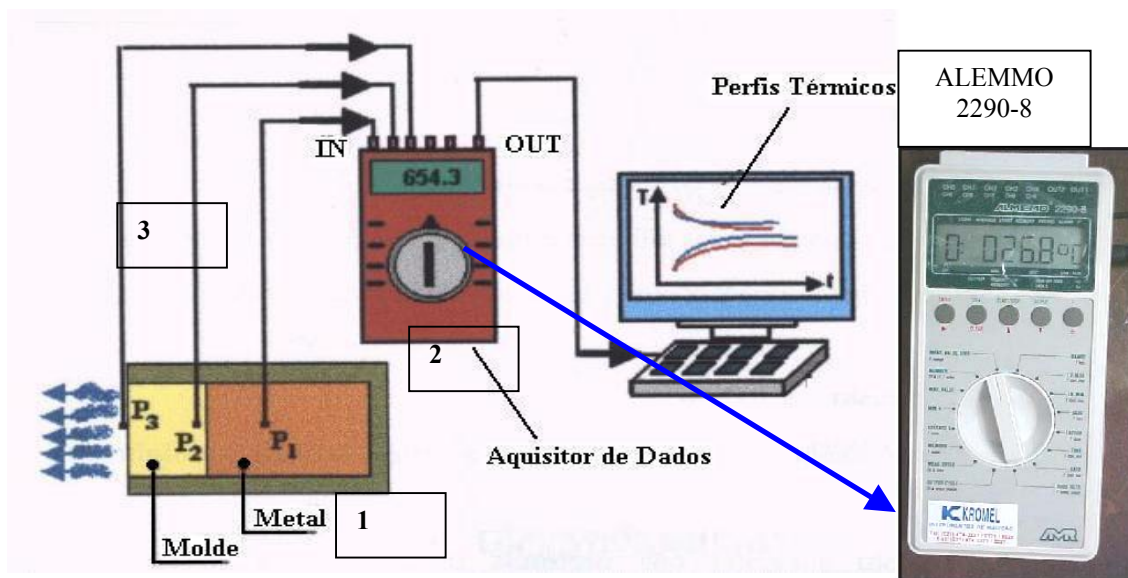


Figura 04 – Representação esquemática do sistema de aquisição de dados; (1) Câmara de vazamento; (2) Aquisitor de dados; (3) Termopares

Os termopares foram posicionados de acordo com a Figura 05A, os mesmos estavam conectados no aquisitor de dados. Na Figura 05B tem-se a foto da câmara de vazamento usada neste estudo.

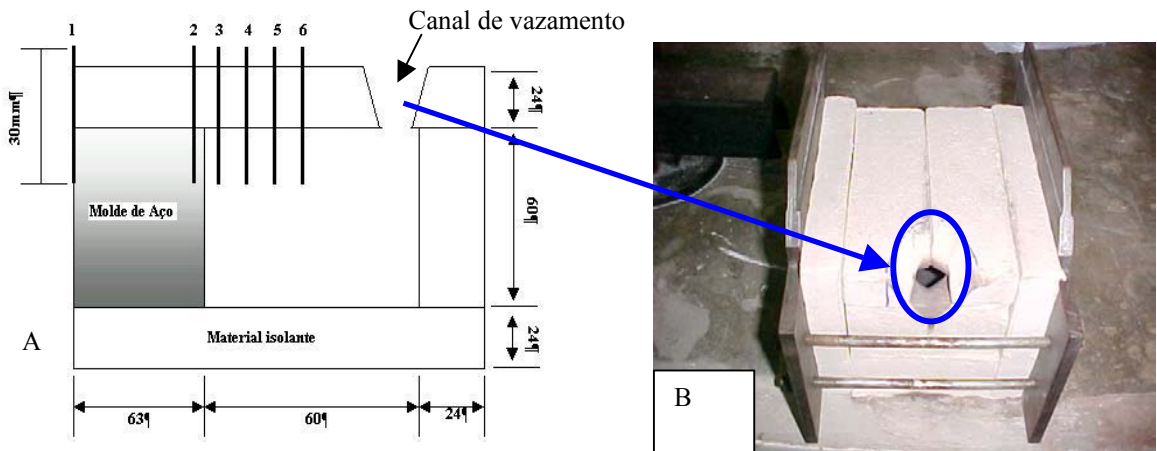


Figura 05 – (A) Representação da posição dos termopares em uma corte lateral da câmara: 1 – Interface molde/ambiente; 2 – No molde a 3mm da interface; No metal : 3 – 5mm; 4- 15mm,; 5 – 22,5mm; 6-37,5mm da interface metal/molde; (B) Foto da Câmara de Vazamento.

Neste trabalho, considerou-se que a liga binária Al-0,6Mg foi modificada com silício nos teores iguais a 0,4%; 0,6%; 0,8% e 1,0% Si. Portanto, para a obtenção do tempo de passagem da isoterma liquidus, identificou-se a temperatura liquidus correspondente àquele binário através do software específico (*Thermocalc*). Na figura 06, tem-se a localização da temperatura liquidus do binário Al-0,6Mg no diagrama de fases Al-Mg.

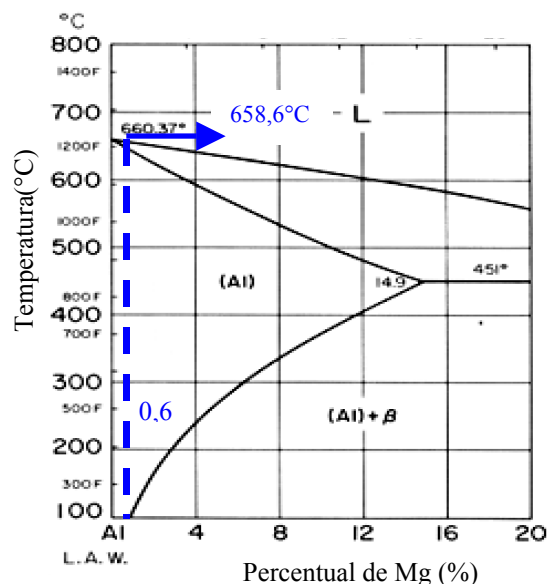


Figura 06 – Diagrama de fases Al-Mg [METAL'S HANDBOOK]

Após a identificação da temperatura *liquidus*, traçou-se a isoterma correspondente à esta temperatura nas curvas de resfriamento. A isoterma intercepta cada curva, a qual é proveniente de cada termopar posicionado no metal, gerando pares (posição da interface metal/molde, tempo), já que se sabe a posição de cada termopar, a partir da interface metal/molde. Após isto, os pares foram submetidos a uma análise de regressão não-linear, onde obtiveram-se equações que relacionam a posição com o tempo do tipo $P = C.t^n$. As equações $P=f(t)$ foram derivadas segunda a relação $V_L = dP/dt$, obtendo a equação que descreve a curva da velocidade em função do tempo $V=f(t)$. Conhecendo a relação $P=f(t)$ e $V_L=f(t)$, obteve-se a relação $V_L=f(P)$. A seqüência utilizada na obtenção da relação experimental da velocidade é mostrada na Figura 07.

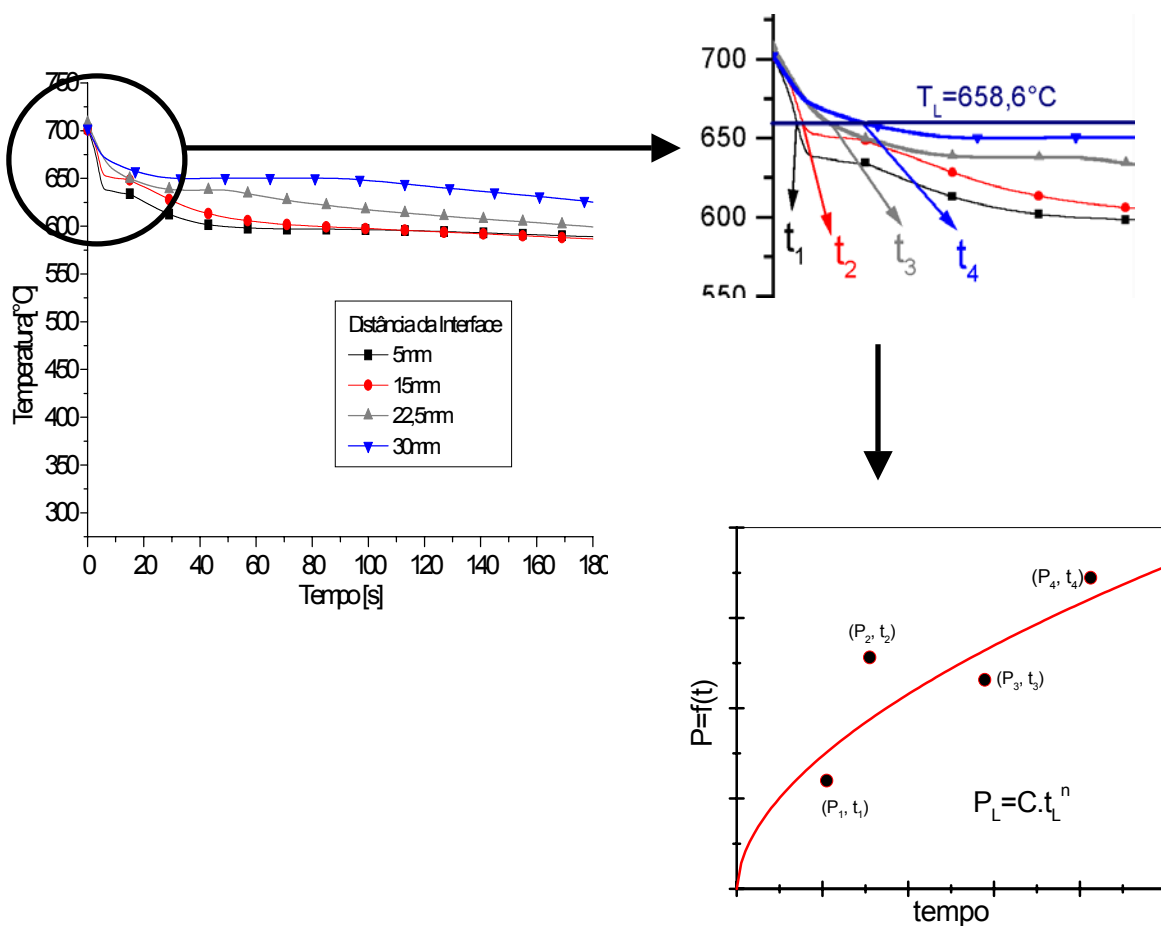


Figura 07 –Diagrama esquemático representando a seqüência que mostra a obtenção da curva $P_L = C.t^n$

RESULTADOS OBTIDOS

Nas Figuras 08, observam-se os perfis térmicos das quatro ligas, obtidos experimentalmente por intermédio do vazamento e registro da variação da temperatura em função do tempo, utilizando-se dos equipamentos, sistema experimental e procedimentos citados na secção de materiais e métodos.

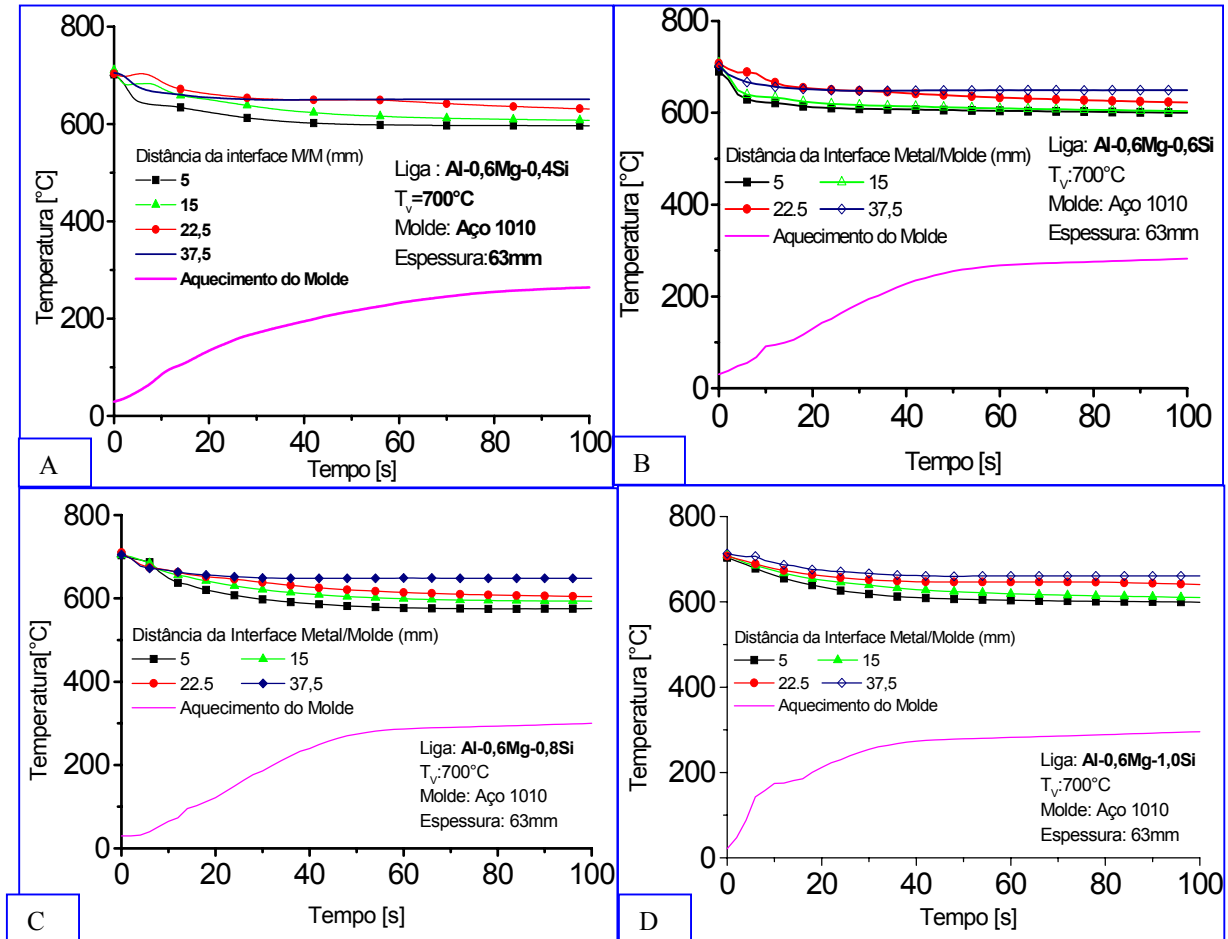


Figura 08 –Perfis térmicos obtidos experimentalmente. Al-0,6Mg (A) 0,4%Si; (B) 0,6%Si; (C)0,8%Si e (D) 1,0%Si

A partir dos perfis térmicos experimentais, foram obtidas as curvas que descrevem a variação da velocidade da isoterma *liquidus* com a distância da interface metal/molde. Primeiramente, fez-se a determinação da relação posição e tempo de passagem da isoterma *liquidus*, o resultado está mostrado na Figura 09. Na figura 09, pode ser observado que a curva correspondente à liga com 1,0 % de silício demonstra que o processo de solidificação foi mais lento, quando comparado com as outras composições.

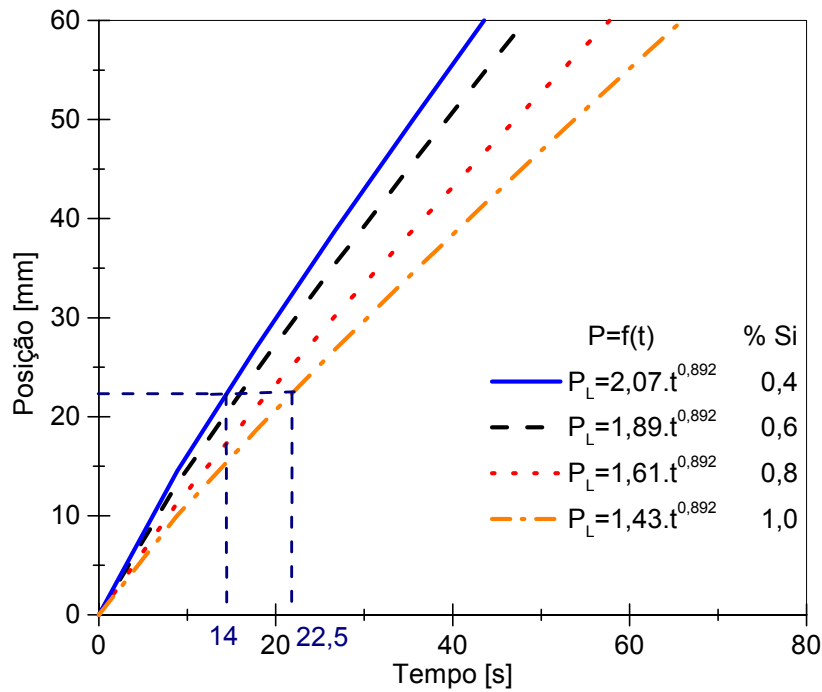


Figura 09 – Curvas que mostram a relação posição e tempo de passagem da isoterma *liquidus* para as ligas com diferentes teores de silício.

Objetivando evidenciar a diferença entre as velocidades das ligas estudadas, na Figura 09, traça-se uma horizontal cortando as curvas. Encontram-se os tempos de aproximadamente 14 e 22,5 s para as ligas com 0,4% Si e 1,0%Si.. Este fato denota que o aumento do teor de silício afetou a cinética do processo de solidificação.

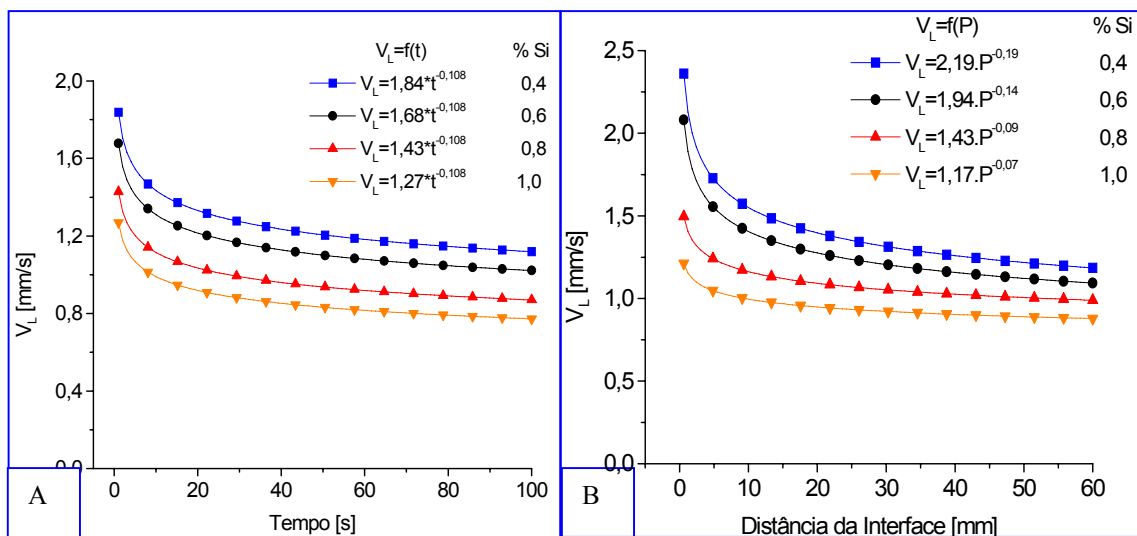


Figura 10 – Curvas que descrevem a variação da velocidade da isoterma *liquidus* (V_L) com (A) tempo; (B) Distância da interface

Nos gráficos da Figura 10 constata-se mais uma vez que a curva correspondente à liga com 1,0% de silício apresentou valores mais baixos de velocidade (V_L) demonstrando que o processo foi sensivelmente mais lento quando comparado ao da solidificação das outras ligas.

CONCLUSÕES

As relações experimentais obtidas entre velocidade de deslocamento da isoterma liquidus e a posição da interface metal/molde para as ligas estudadas neste trabalho, levando-se em conta as condições operacionais impostas neste estudo, são apresentadas na tabela abaixo.

Tabela 03 – Equações da velocidade obtidas neste estudo

Liga	$V_L = C.P_L^{-n}$
AMS 04	$V_L = 2,19.P_L^{-0,19}$
AMS06	$V_L = 1,94.P_L^{-0,14}$
AMS08	$V_L = 1,43.P_L^{0,09}$
AMS1,0	$V_L = 1,17.P_L^{-0,07}$
AMS1,2	$V_L = 0,97.P_L^{-0,06}$

De acordo com os resultados, a solidificação da liga com 1,0% Si foi mais lenta. Isto deve-se a molhabilidade, propriedade que está associada à fluidez. A fluidez provavelmente tendeu a aumentar à medida que o teor de silício cresceu na liga, sendo maior para a liga com 1,0 % silício. A maior molhabilidade provocou um contato cada vez mais íntimo nos instantes iniciais da solidificação, gerando uma camada solidificada inicial mais espessa e, conseqüentemente, mais resistente à pressão metalostática atuante pelo metal fundido. Como conseqüência resultante, tem-se gap's de ar cada vez maiores na interface metal/molde, levando a menores valores da velocidade de avanço da isoterma *liquidus*, devido ao crescimento da resistência térmica naquela interface.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

QUARESMA, J. M. V.; Santos, C. A.; Garcia A. – “Correlation Between unsteady-state solidification conditions, dendrite spacing and Mechanical Properties”, Metallurgical and Materials Transactions, v. 31 A, pp. 31673178 - 2000

OSÓRIO, W. R. R. Correlação entre condições de solidificação, microestrutura e propriedades mecânicas de ligas Zn-Al. - **Dissertação de Mestrado** – UNICAMP-FEM-DEMA, Campinas, 2000

ROCHA, O. F. L. – Análise Teórico-Experimental da Transição Celular-Dendrítica e da Evolução da Morfologia Dendrítica na Solidificação Unidirecional em Condições de Fluxo de Calor Transitório – **Tese de Doutorado** - UNICAMP-FEM-DEMA – 2003