

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO MOLDE METÁLICO SOBRE A TAXA DE EXTRAÇÃO DE CALOR DURANTE A SOLIDIFICAÇÃO E SOBRE A ESTRUTURA INTERNA FORMADA EM UMA PLACA DE ALUMÍNIO

Rômulo Diêgo Marinho Siqueira, romulodiegoms@hotmail.com¹

Ricardo Medeiros Rodrigues, ricardo.medeiros@engmecanico.com¹

Bruno Alencar Carneiro, brunoalnk@hotmail.com¹

Dalmir dos Santos Matos, matosengenharia.ma@gmail.com¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Av. Getúlio Vargas, nº 04- Monte Castelo - São Luis-MA, CEP 65025-001, Brasil.

Resumo: O processo de solidificação dos metais está intimamente ligado às condições de extração de calor através das paredes do molde. A eficiência dessa extração depende de fatores como a condutividade térmica do material e a temperatura inicial do molde. Na indústria PANELAR são utilizados lingoteiras de ferro fundido para fundição de placas de alumínio, sendo cada molde utilizado cerca de seis vezes variando da temperatura ambiente até quase 400°C durante o processo. Essa variação de temperatura causa a heterogeneidade da extração de calor, bem como das microestruturas resultantes podendo vir a comprometer a qualidade final do processo. Das seis diferentes temperaturas iniciais que foram analisadas as microestruturas mostraram pouca variação do tamanho dos grãos sendo, portanto possível à fundição de mais de seis placas por dia, possibilitando assim maiores lucros para a empresa.

Palavras-chave: alumínio, metalografia, extração de calor.

1. INTRODUÇÃO

O processo de solidificação dos metais depende fundamentalmente das condições de extração de calor através das paredes dos moldes (FILHO, 1978 e OHNO, 1994). A eficiência dessa extração de calor por sua vez, depende entre outros fatores, da condutividade térmica e da temperatura de utilização do molde no início do processo de solidificação.

Quanto menor for a temperatura do molde metálico e, consequentemente, maior o gradiente térmico entre a temperatura inicial do metal líquido e a temperatura do molde, maior será a taxa de extração de calor e por conseguinte mais acelerada será a solidificação (FILHO, 1978 e OHNO, 1994). A estrutura interna de solidificação é assim, uma função direta dessas condições supra.

Entende-se aqui como estrutura interna do metal solidificado, as características físicas dos grãos: Coquilhados, Colunares e Equiaxiais; (ALCOA, 1987; MOFFATT, 1972; MALISHEV, 1970 e, VAN VLACK, 1970), formados durante os processos de solidificação conforme ilustrado na Fig 1.

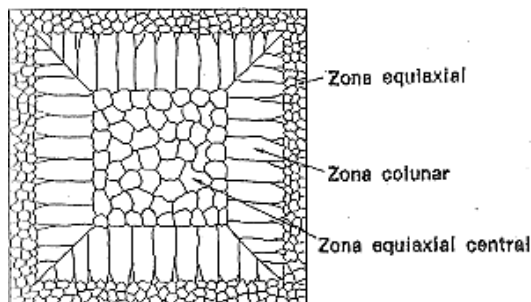


Figura 1. Esquema da estrutura interna de metais solidificados (adaptado de OHNO, 1994)

A espessura da camada de grãos coquilhados, que se forma tão logo o metal líquido entre em contato com as paredes internas do molde, cresce com a maior taxa de extração do calor (ALCOA, 1987; MOFFATT, 1972; MALISHEV, 1970 e, VAN VLACK, 1970). Essa região responde em parte pela resistência da camada superficial das peças metálicas a susceptibilidade da ocorrência de trincas ou fissuras superficiais durante os processos de solidificação, conformação mecânica e tratamentos térmicos respectivamente.

Já os grãos colunares ou dendríticos, que se formam tão logo cesse a formação dos grãos coquilhados, são alongados e perpendiculares às paredes do molde. Crescem, pois no sentido contrário a extração do calor e a sua dimensão é tanto maior quanto mais lenta for a taxa de extração de calor. Corresponde a uma região frágil a deformação mecânica (ALCOA, 1987; MOFFATT, 1972; MALISHEV, 1970 e, VAN VLACK, 1970).

A camada de grãos equiaxiais, que se formam na região central das peças, é resultante do aumento de soluto e quebra dos grãos colunares. Coincide com a região de formação da segregação central própria dos processos de solidificação (ALCOA, 1987; MOFFATT, 1972; MALISHEV, 1970 e, VAN VLACK, 1970).

Em casos especiais pode ser encontrar a chamada zona equiaxial coquilhada composta de grãos finos de cristais equiaxiais. Esta camada ocorre quando existe super-resfriamento próximo as paredes do molde ocorrendo então nucleação copiosa e formação de pequenos cristais (OHNO, 1994).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento ocorreu na unidade de Fundição da empresa PANELAR, produtora de utensílios domésticos em alumínio, localizada em São Luís, onde se utilizou o alumínio comercialmente puro líquido proveniente dos fornos cadinhos (GALDINO, 2004).

Foi utilizado um termômetro infravermelho da fabricante ICEL MANAUS, modelo TD-990 para as tomadas de temperatura, visto o risco de se utilizar termopares de contato nestas condições. Do manual do mesmo se obtém que a exatidão para temperaturas de 20o a 500 oC é de $\pm 1,0\% + 1$ oC. Já para temperaturas de 500 a 1000 oC a exatidão é de $\pm 1,5\%$ (ICEL MANAUS, 2010).

Foram selecionadas placas de alumínio lingotadas em seis diferentes condições de extração de calor, a partir da variação da temperatura dos moldes metálicos (lingoteiras). Utilizando o termômetro infravermelho foram determinadas as temperaturas do molde e do lingote.

Após a solidificação e resfriamento das correspondentes placas, as mesmas foram numeradas de um a seis, sendo catalogadas amostras A, B, C, D, E, F, G obtidas no plano da secção horizontal no meio de cada placa, a partir da região central até as superfícies das faces maior e menor da placa, conforme croqui na Fig. 2 abaixo.

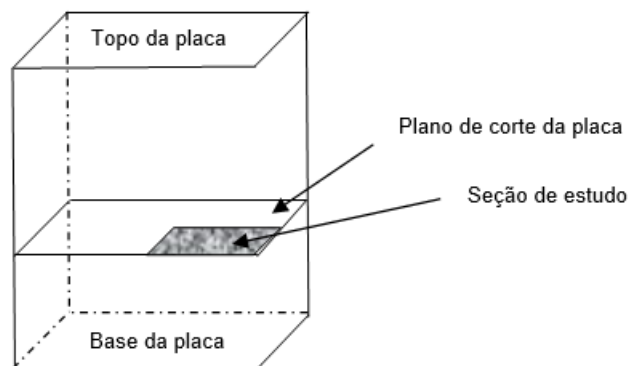


Figura 2. Esquema da seção de corte das placas de alumínio para obtenção das amostras para análise.

Foram preparadas as superfícies planas horizontais de cada amostra para identificação das microestruturas internas (zonas: coquilhada, colunar e equiaxial) das placas e posteriormente fotografadas.

O preparo das amostras passou pelos processos de corte, onde a seção de trabalho foi subdividida em 7 partes iguais de aproximadamente 2,4cm de altura, 2cm de comprimento e 0,5cm de espessura, embutimento com resina acrílica, lixamento com lixas de granulação 100, 120, 220, 320, 400, 500, 600, 1200 e 2000, além de polimento com alumina de granulação 1 μ m (George F. Vander Voort, 2007). Após isso se realizou um ataque químico para se melhor exibir os contornos de grão, utilizando-se o regente de Keller, composto de 4 ml de HF, 6ml de HCL, 10ml de HNO₃ e 190ml de água destilada (George F. Vander Voort, 2004).

Foram identificadas e registradas através de fotografias as respectivas microestruturas no microscópio eletrônico Nikon Eclipse LV100 com um aumento de cento e cinquenta vezes das amostras A, D e G que representam a porção inicial, intermediária e final da seção de estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Da tomada de dados inicial para o experimento, foi inicialmente registrada a temperatura ambiente de 35,4 oC e em seguida foram medidas as temperaturas do forno (Figura 3) se obtendo 814,5 °C bem como a tomada das temperaturas dos moldes (Figura 4) e placas, sendo estas tomadas após a solidificação. Foi utilizado o coeficiente de

emissividade $\epsilon=0.8$ para a lingoteira por ser de ferro oxidado, o coeficiente de $\epsilon=0.46$ para os lingotes de alumínio dada sua oxidação pela alta temperatura e contato com o oxigênio atmosférico por fim foi usado $\epsilon=1$ para o forno que por sua incandescência tem comportamento similar ao de um corpo negro (Minkina, 2009). Foi registrado um tempo médio de resfriamento de 160 segundos devido ao ciclo de processo de enchimento e retirada das placas ser o mesmo em todas as lingoteiras da empresa. Através destes dados foi formada a Tabela 1 com as temperaturas aproximadas dos moldes e das placas logo após sua solidificação:



Figura 3. Tomada de temperatura do forno

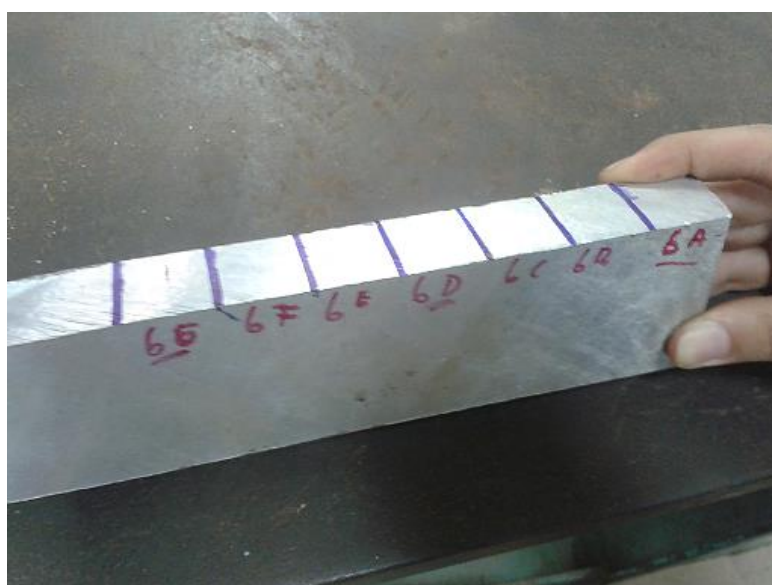


Figura 4. Tomada de temperatura nas lingoteiras

Tabela 1. Temperaturas dos moldes e placas nas 6 rodadas

Rodada	Lingote (°C)	Lingoteira (°C)
1 ^a	413,0	34,5
2 ^a	435,7	170,8
3 ^a	449,5	247,6
4 ^a	483,2	292,2
5 ^a	503,3	338,9
6 ^a	539,1	370,3

A segunda etapa do trabalho consistiu no preparo e análise das amostras. Foram retiradas dezoito amostras no total, sendo três de cada lingote das regiões internas, central e final de um dos lados, respectivamente as amostras A, D e G, a fim de acompanhar a evolução de a estrutura granular (Fig. 5 e Fig. 6).

**Figura 5. Divisão da seção de trabalho e amostras aproveitadas****Figura 6. Amostras estudadas**

Foram retiradas 10 fotografias da microestrutura de cada amostra, no sentido que vai de uma parede a outra no molde (sentido de crescimento das dendritas). Para efeito de comparação na Fig. 7 temos as fotografias das microestruturas da região central de cada amostra (escala de 20 μm).

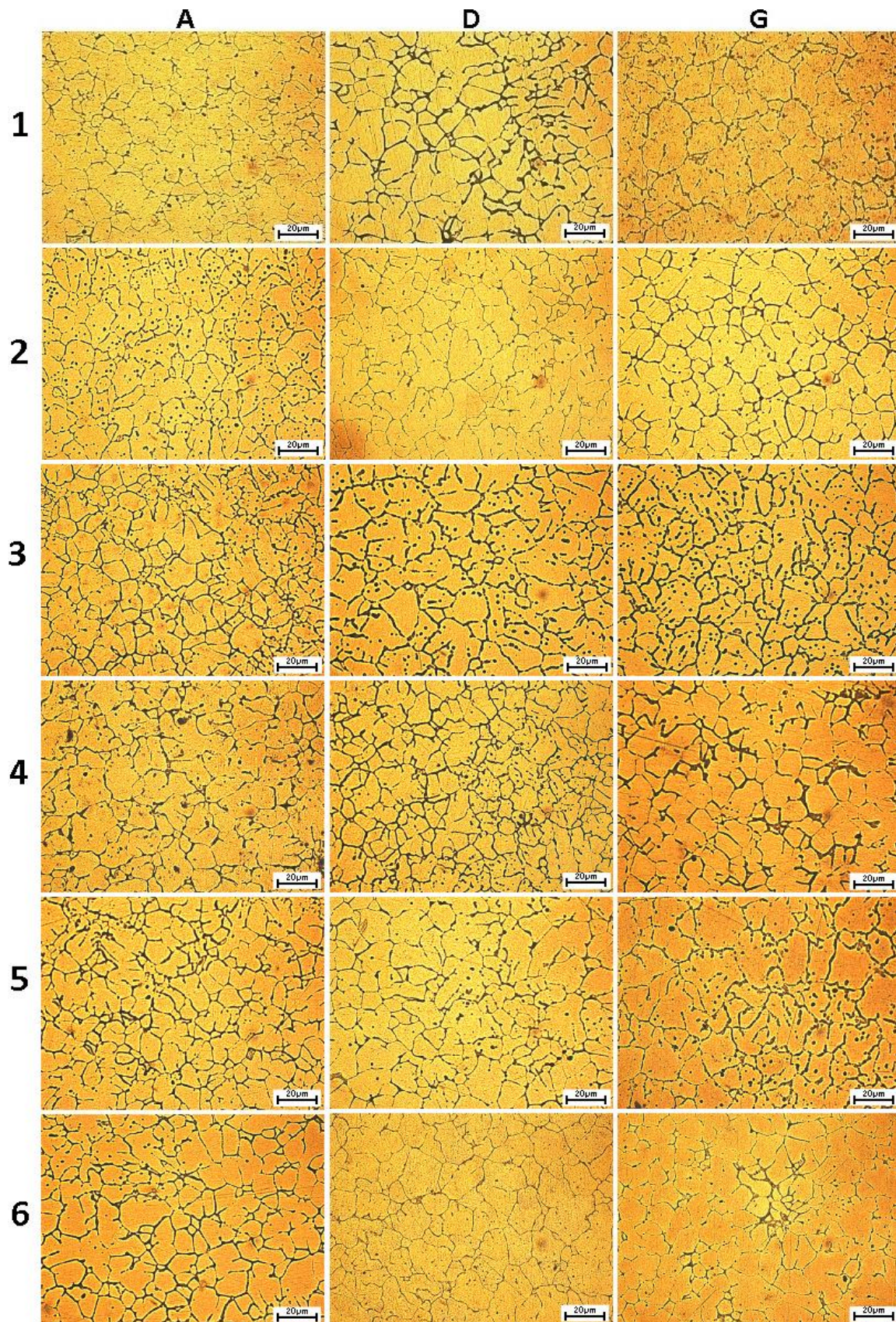


Figura 7. Comparativo das micro-estruturas das amostras

A análise detalhada dos resultados mostrou pouca diferença no tamanho dos grãos, que variaram entre 20 a 25 μm em todas as amostras sendo todos de formação equiaxial coquilhada. Este fato pode ser facilmente explicado pela relativa pouca espessura do lingote em relação a sua superfície de contato com o molde ocorrendo então super-resfriamento e por consequência nucleação copiosa em praticamente toda a sua extensão (OHNO, 1994).

Utilizando-se o software Excel © pode-se traçar um gráfico e equação (Fig. 8) para prever quantos ciclos se podem realizar antes da lingoteira e lingote atingirem a temperatura de fusão do alumínio, 660 °C, para o tempo médio de solidificação estudado de 160 segundos. Esta temperatura é estipulada, pois acima da mesma a taxa de extração de calor fugiria das condições iniciais analisadas, bem como o tempo de solidificação seria demasiadamente elevado. Foi utilizado para o lingote o ajuste uma curva polinomial de grau 5 e para a lingoteira uma curva logarítmica para assim se obter os maiores valores de R^2 . Foi utilizando o mesmo software feita a previsão para as temperaturas até 30 ciclos.

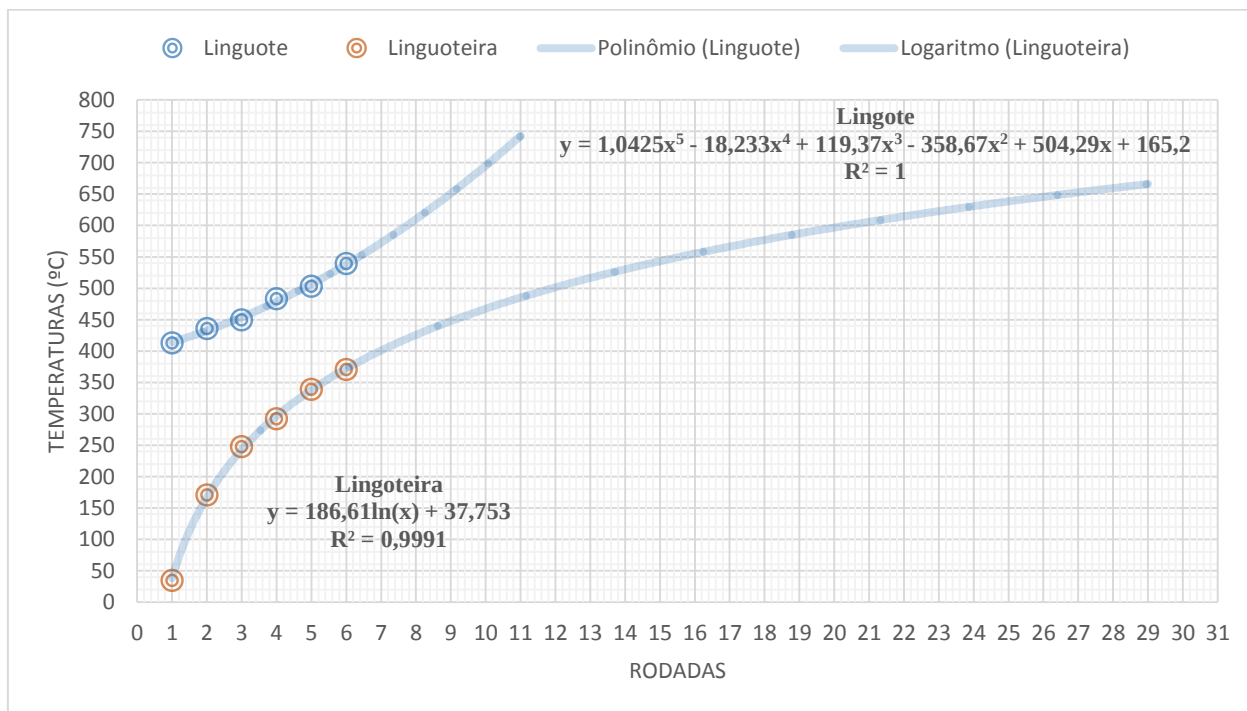


Figura 8. Gráfico e Equação das Temperaturas X Rodadas das amostras

Do gráfico se obtém que até nove ciclos o lingote ainda se encontra abaixo dos 660°C. A lingoteira por sua vez facilmente ultrapassa os vinte ciclos antes de atingir essa temperatura.

4. CONCLUSÃO

Os dados mostram que a temperatura pouco influencia a microestrutura dos casos analisados dada a pequena espessura do lingote em relação a grande área de troca de calor. O estudo também aponta para a possibilidade de aumentar a quantidade de ciclos de produção de lingotes de seis para no mínimo nove, o que aumenta em 50% a produção diária da empresa diminuindo assim a necessidade de se ligar o forno da mesma gerando não apenas lucros como menos impactos ambientais. Com estudos posteriores pode-se aumentar ainda mais esta produtividade visto que a lingoteira ultrapassa os vinte ciclos antes de atingir a temperatura de fusão do alumínio o que representa caso se possa trabalhar com um tempo maior de resfriamento para o lingote um aumento excepcional na produção.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço a ajuda dos professores Dr. Raimundo Nonato Barroso e Dr. Valdemar Silva Leal que durante toda a pesquisa foram de grande ajuda tanto técnica quanto motivacional. Agradeço também a Alonso Rogério Ferreira da PANELAR, pois sem sua autorização esta pesquisa sequer teria começado.

6. REFERÊNCIAS

- ALCOA. Physical Metallurgy of Aluminium. EUA. Aluminium Company of America, 1987.
 FILHO, Maurício Prates Campos. Solidificação e Fundição de Metais e Suas Ligas. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1978.

- GALDINO, Laécio Gomes. Otimização do Processo de Laminação de Alumínio Pela Inclusão do Recozimento Intermediário. São Luís, 2004. Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Industrial Mecânica – CEFET MA, 2004.
- ICEL MANAUS, Manual de Instruções do Termômetro Digital Infravermelho TD-990. 2010.
- MOFFATT, William, PERSALL, George. W. e, WULFF, John. Ciência e Materiais. Vol. 1 – Estrutura. Rio de Janeiro. JC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1972.
- MALISHEV, A., NIKOLAIEV, G. e, SHUVALOV, Y. Tecnologia dos Metais. São Paulo. Editora Mestre JEU, 1970.
- MINKINA, Waldemar, DUDZIK, Sebastian. Infrared Thermography, Errors and Uncertainties. United Kingdom. Wiley, 2009.
- OHNO, Atsumi. Solidificação dos Metais. São Paulo. Livraria Ciência e Tecnologia LTDA, 1994.
- OLIVEIRA, Raimundo Nonato Barroso de. Influência do Fluxo de Aço na Formação de Inclusões no Lingotamento Indireto de Aço Acalmado. Belo Horizonte, 1983. Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Minas Gerais, 1983.
- VANDER VOORT, George F. Metallography and Microestruturas, ASM Internacional, 2004.
- VANDER VOORT, George F. Metallography, Principles and Practice. ASM Internacional, 2007.
- VAN VLACK, Lawrence, H. Princípios de Ciência dos Materiais. São Paulo. Editora Edgard Blucher LTDA, 1970.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

INFLUENCE OF TEMPERATURE OF THE MOLD ON THE RATE OF HEAT DURING SOLIDIFICATION AND ON THE INTERNAL STRUCTURE FORMED ON A ALUMINUM PLATE

Rômulo Diêgo Marinho Siqueira, romulodiegos@hotmail.com¹
Ricardo Medeiros Rodrigues, ricardo.medeiros@engmecanico.com¹
Bruno Alencar Carneiro, brunoalnk@hotmail.com¹
Dalmir dos Santos Matos, matosengenharia.ma@gmail.com¹

¹Federal Institute of Education, Science and Technology of Maranhão, Av. Getúlio Vargas, nº 04- Monte Castelo - São Luís-MA, CEP 65025-001, Brazil.

Abstract. The solidification process of metals is closely related to conditions of heat extraction through the walls of the mold. The efficiency of this extraction depends on factors such as the thermal conductivity and the initial temperature of the mold. In the company PANELAR are used in the industry cast iron ingot molds for casting aluminum plates, each mold used about six times ranging from room temperature to almost 400 ° C during the process. This temperature variation causes the heterogeneity of heat extraction as well as the resultant microstructures can compromise the quality of the final process. From the six different initial temperatures, were analyzed microstructures showing little variation in grain size, so it is possible to casting more than six plates per day, thus enabling higher profits for the company.

Keywords: aluminum, metallography, heat extraction.