

Correlação entre Propriedades Mecânicas e Características Macroestruturais em Ligas de Al-Cu

Felipe Dorneles Zulian ¹
Marcos Giovane de Quevedo Rijo ²
Leonardo Missiaggia³
Daniel Almeida Hecktheuer⁴
Alexandre Pitol Boeira⁵

Resumo: Tendo em vista a importância da correlação das propriedades mecânicas com a morfologia macroestrutural e as condições de solidificação, objetiva-se, neste trabalho, o desenvolvimento de um sistema experimental que possibilite a análise global da relação entre propriedades mecânicas, determinadas por meio de ensaios de dureza e relações experimentais, presentes na literatura, com características morfológicas dos grãos da estrutura bruta de solidificação de liga Al-4,5%Cu. Os resultados indicam uma forte relação destas variáveis e, particular interesse, na associação do tamanho de grão, que se mostrou consideravelmente menos sensível do que a morfologia em relação à propriedade mecânica. Também, verifica-se que em altas taxas de extração de calor, existe a tendência de redução da quantidade de poros.

Palavras-chave: microporosidade, solidificação, ligas de Alumínio

Abstract: Considering the importance of the mechanical properties correlation with a microstructure morphology and the solidification conditions, we developed a experimental system that allows the global analysis of the relation between the mechanical proprieties, that were found in hardness test and experimental relations, presented on the

¹ Técnico em Mecânica – IFSul – Campus Passo Fundo; ² Tecnólogo em Automação Industrial – Professor do Curso Técnico em Mecânica – Campus Passo Fundo; ³ Tecnólogo em Automação Industrial – Professor do Curso Técnico em Mecânica – Campus Passo Fundo; ⁴ Engenheiro Mecânico – Professor do Curso Técnico em Mecânica – IFSul – Campus Passo Fundo; ⁵ Engenheiro Metalurgista – Professor do Curso Técnico em Mecânica - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense – Campus Passo Fundo

specific literature, with the morphological characteristics of AL-4,5%Cu solidification structure grains. The results have shown a strong relation between this variables and, specially, in the size of grain organization, that showed less importance than the morphology towards the mechanical property. We could verify that in high extractions of heat there is a tendency of a pore reduction.

1. Introdução

Embora o Brasil ocupe a sexta posição entre os maiores produtores de alumínio, sua indústria de transformação, em especial o setor de fundição, encontra-se tecnicamente muito dependente dos grandes pólos mundiais de desenvolvimento tecnológico. A importância do setor é principalmente caracterizada por uma ávida procura pela substituição de componentes automobilísticos produzidos com materiais ferrosos, objetivando-se um menor peso nos veículos e conseqüentemente um menor consumo de combustível [Lee, 2001]. Estes fatores tornam a indústria nacional de fundidos, considerada pequena se comparada às grandes multinacionais do setor, em grande defasagem, uma vez que precisa compensar a baixa produtividade com o aumento da produção, tornando-se assim cada vez menos capaz de adquirir novas tecnologias. A dependência nacional no setor é evidenciada quando se observa a origem dos melhores fornecedores de matérias-primas, insumos e máquinas necessárias para a fundição de alumínio. Uma melhor caracterização de todas as etapas do processo produtivo induz à possibilidade da implementação de novas rotinas visando à melhora da produtividade. Esta caracterização passa, obrigatoriamente, pela otimização dos sistemas de controle, capacitação dos recursos humanos e seleção de matérias primas e insumos [Boeira, 2006].

Na busca pela melhor qualidade e produtividade do fundido de alumínio, inserem-se a correta especificação em relação às propriedades físicas, mecânicas e estéticas do produto. Tais fatores são diretamente dependentes das condições metalúrgicas do produto. Essas condições são resumidas na melhor distribuição, forma e homogeneização do tamanho dos grãos, na presença de elementos e compostos na estrutura da matriz, bem como a incidência de algum tipo de defeito [Campbell, 2003]. Normalmente as melhores condições estruturais são atingidas por meio de através processos térmicos, físicos ou químicos aplicados ao material. Porém, agregam custos demasiados ao produto uma vez que, geralmente, dependem tempo e energia. Algumas práticas que visam à diminuição destes custos têm sido tomadas durante o processo produtivo, por exemplo, a adição de elementos nucleantes ao banho e a utilização de moldes metálicos, coquilhas, ao invés de moldes de areia.

Solidificação

É fato conhecido na indústria de fundição que variadas morfologias estruturais se formem como função da amplitude de condições operacionais e formas de crescimento que podem ser aplicadas ao volume de metal líquido no processo de solidificação. Sabe-se também que parâmetros estruturais são influenciados fortemente pelo comportamento térmico do sistema metal/molde, resultando em uma estreita correlação entre variáveis térmicas do processo e as estruturas

resultantes de solidificação [Santos, 2001].

A forma da estrutura de solidificação depende das condições de resfriamento e da composição da liga. As fases resultantes das transformações são função da nucleação, do crescimento ou pela combinação de ambas [Boettinger, 2000]. Geralmente, a solidificação conduz a dois tipos morfológicos característicos, colunar e equiaxial [Kurz, 2001]. Na revelação macroestrutural de lingotes, comumente encontram-se estas diferentes estruturas distribuídas de uma forma bem característica, sendo uma região periférica, em contato direto com o molde, formada de grãos equiaxiais de granulometria reduzida, seguida de uma região intermediária de grãos alongados unidirecionalmente conhecida por grãos colunares e, por fim, uma região central de grãos equiaxiais de tamanho maior aos encontrados na periferia. Gandin [2000] relata uma quarta camada superficial dendrítica, formada no topo dos lingotes, ou seja, na interface metal/ar. Tal arranjo pode ser visualizado no desenho esquemático da Figura 1. Após a nucleação de cristais, em um líquido isotérmico superesfriado, ocorre, geralmente, o crescimento de cristais equiaxiais, ou seja, crescimento e fluxo térmico em todas as direções. Já o crescimento colunar, dá-se preferencialmente em uma direção, assim como os fluxos térmicos, extremamente unidirecionais, pelo menos localmente [Kurz, 2001]. A geração de uma pequena camada de grãos equiaxiais junto às paredes do molde, zona coquilhada, esta associada às altas taxas de resfriamento oriundas da elevada diferença de temperatura entre o molde e o metal [Kurz, 1992]. Estes pequenos grãos de orientação randômica nucleados a partir da parede do molde, rapidamente começam a se desenvolver em direções cristalográficas preferenciais até o momento que um crescimento competitivo entre eles permite o desenvolvimento destes em direções paralelas ao fluxo de calor. A região existente entre a ponta da dendrita e o local onde o líquido remanescente se solidifica é definido como região bifásica ou pastosa e está associada ao gradiente da temperatura e à evolução do resfriamento em condições fora do equilíbrio. Com o incremento da taxa de resfriamento ocorre um aumento do comprimento e uma diminuição da espessura de grãos colunares [Ares, 2002].

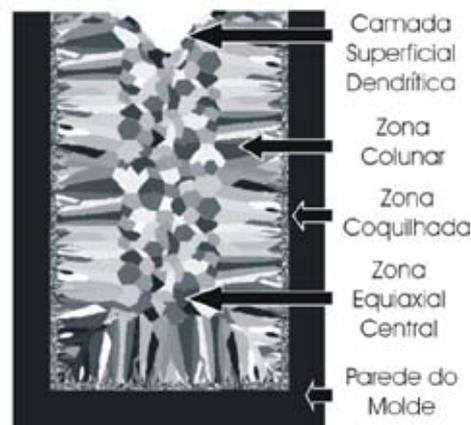


Figura 1 - Diferentes regiões macroestruturais comumente obtidas em seções longitudinais de lingotes fundidos.

Um exemplo típico de utilização de crescimento colunar é o da fabricação de lâminas de turbinas para motores a jato [Garcia, 2001]. Para essa aplicação é muito mais interessante a obtenção de lâminas monocristalinas, devido ao fenômeno de fluência que é fortemente dependente do mecanismo de deslizamento dos contornos dos grãos.

Propriedades Mecânicas

Quando da análise conjunta de fatores macroestruturais com propriedades mecânicas, insere-se, primeiramente, a relação de Petch [1953], que relaciona o tamanho do grão cristalino com o limite de escoamento do material [Lasalmonie/Strudel, 1986; Kurzydowski et alli, 1996; Torster et alli, 1997]. Encontra-se também a associação destes parâmetros em conjunto com a segregação interdendrítica [Ishida, 1996]. A influência do tamanho de grão nas características mecânicas está associada ao efeito da distribuição de porosidades, inclusões e produtos segregados, etc. Por exemplo, a maioria das fases mais frágeis precipita, tardiamente, no processo de solidificação e acomodam-se, preferencialmente nos contornos de grãos e, juntamente com a ação de outros parâmetros estruturais, são responsáveis pela resposta mecânica inferior das estruturas constituídas de granulação mais grosseira. Considerando a análise de fenômenos provenientes da solidificação, os contornos de grãos estão intimamente associados aos espaçamentos interdendríticos e, sob o ponto de vista científico e tecnológico, os espaçamentos interdendríticos têm grande importância, já que eles exercem influência sobre as propriedades mecânicas tanto de componentes fundidos quanto daqueles trabalhados mecanicamente. Existem vários trabalhos que propõem modelos analíticos e experimentais, correlacionando o crescimento dendrítico primário e secundário, ora com parâmetros térmicos, tais como gradiente térmico, velocidade de crescimento e tempo local de solidificação e ora relacionado com a resposta mecânica da estrutura bruta de solidificação [Flemings, 1974; Kurz & Fisher, 1984; Quaresma, 1999, Osório e Garcia, 2002, Siqueira, 2003; Rocha, Siqueira, Garcia, 2003A/B]. O trabalho desenvolvido por Quaresma e colaboradores [Quaresma, 2000] demonstra a influência dos espaçamentos dendríticos secundários na resistência mecânica de ligas do sistema binário Al-Cu. A análise foi feita utilizando-se o ensaio de tração para obter os valores de limites de resistência à tração, correspondentes a diferentes posições com relação à interface do metal com o molde. Constata-se que, quanto mais refinada a microestrutura, maior é o valor do limite de resistência à tração e do limite de escoamento, ou seja, espaçamentos dendríticos secundários menores apresentam maiores valores de resistência mecânica.

Por muitos anos, foi costume basear a resistência de peças na resistência à tração, adequadamente reduzida por um fator de segurança. A tendência atual é para uma aproximação mais racional a fim de se basear o projeto estático de metais dúcteis na tensão limite de escoamento. Entretanto, devido à longa

prática do uso da resistência à tração para determinar a resistência dos materiais, ela tornou-se uma propriedade muito familiar e, como tal, é uma identificação muito útil de um material, da mesma maneira que a composição química para identificar um metal ou uma liga. Além do mais, por ser uma propriedade bem reprodutível e de fácil obtenção, ela é útil para fins de especificações e para o controle de qualidade de um produto.

Embora a relação de Pecht [1953] aparentemente, resolva as questões de propriedades mecânicas interligadas com parâmetros microestruturais, ela torna-se particularmente ineficiente quando da consideração de parâmetros macroestruturais desenvolvidos por produtos fundidos. A literatura também apresenta escasso material com este tipo de relacionamento.

Materiais e Métodos

O metal de trabalho é o alumínio ligado Al-4,5%Cu (TL: 640°C e TS:540°C), e o sistema de fundição utilizado no experimento é composto de uma caixa de fundição bipartida, dotada de três cavidades convenientemente adaptadas para favorecer formas e intensidades diferentes de extração de calor, conforme evidenciado pela Figura 2 e esquematizado pela Figura 3.



Figura 2: Aparato experimental evidenciando as três cavidades dos moldes, sendo, da esquerda para a direita: base de cobre, somente areia e lateral de aço.

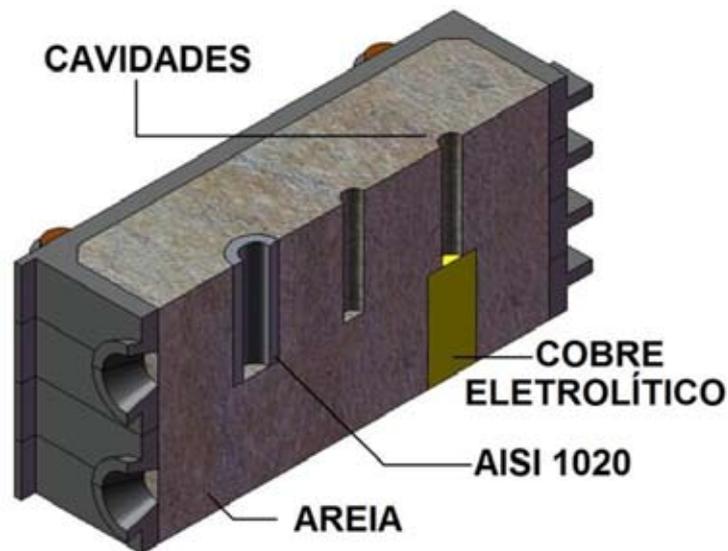


Figura 3: Desenho esquemático, em corte, das configurações das cavidades do molde sendo, da esquerda para a direita: lateral de aço, somente areia e base de cobre.

A inserção de um bloco de cobre eletrolítico na base de uma das cavidades, doravante denominada Molde Coquilha Base, favorece uma solidificação unidirecional ascendente, ao passo que, o cilindro de aço AISI 1020 (Molde Coquilha Lateral) indica uma solidificação radial acentuada. Como situação oposta à forte extração de calor dos moldes anteriores, inseriu-se uma cavidade em areia (Molde em Areia), sem favorecimento acentuado do aumento da velocidade de solidificação, somente areia. A temperatura de vazamento é controlada pela temperatura de sobreaquecimento do forno. A composição da areia verde, em peso, indica 2,9% de bentonita, 0,5% de amido (Mogul) e 2% de água, sendo a areia sílica o balanço. Nos procedimentos metalográficos utilizou-se água régia fluorada (HF48%:15%, HCl: 45%; HNO₃: 15% e H₂O: 25%) e, para a análise de dureza, uma máquina universal de ensaio de dureza Brinell (carga: 60kgf, tempo: 15s, diâmetro da esfera: 25mm).

$$\sigma = \alpha \cdot HB \quad [1]$$

A equação [01] indica a relação entre dureza Brinell (HB) e o Limite de Resistência à Tração (σ), e o coeficiente (constante experimental) utilizado (α) é 4,00 [Garcia, 2000].

Resultados e Discussões

A macroestrutura obtida no experimento composto de um molde completamente de areia (Figura 4) apresenta uma estrutura completamente equiaxial, com grãos grosseiros na base e grãos mais refinados na parte superior do lingote, numa relação aproximada de 50% em altura. Ainda, apresenta, visualmente, poros maiores na região de granulometria fina. Os valores de dureza e por consequência, limite de resistência à tração, apresentam-se igualmente distribuídos. Identifica-se nesse sistema um resfriamento extensivo [Veinik, 1968], no qual se assume uma nucleação e posterior crescimento em todo o volume do líquido superesfriado. A Figura 5 representa o Molde Coquilha Base e apresenta uma região colunar com 9 a 10 mm com dureza alta, uma granulometria equiaxial central grosseira com baixa quantidade de poros, em detrimento a uma região equiaxial central superior com granulometria fina e alta quantidade de poros. A distribuição de granulometria, entre fina e grosseira, se dá em aproximadamente 75% de granulometria grosseira. A Figura 6 apresenta a macroestrutura do Molde Coquilha Lateral e indica uma região colunar de aproximadamente 5mm, uma granulometria equiaxial central fina, reduzida quantidade de poros e elevada dureza na região colunar. Salienta-se uma baixa incidência de solda fria neste lingote (não verificado na figura). Em detalhe, é indicado, na Figura 6, a verificação das durezas na secção transversal do lingote.

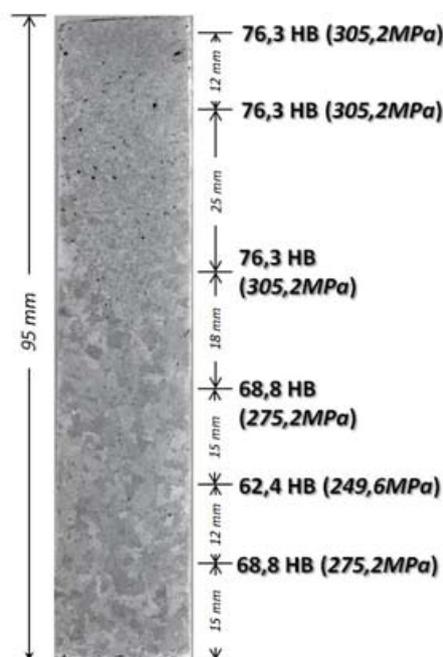


Figura 4: Macroestrutura do Molde em Areia, com as respectivas durezas e Limites de Resistência Mecânica;

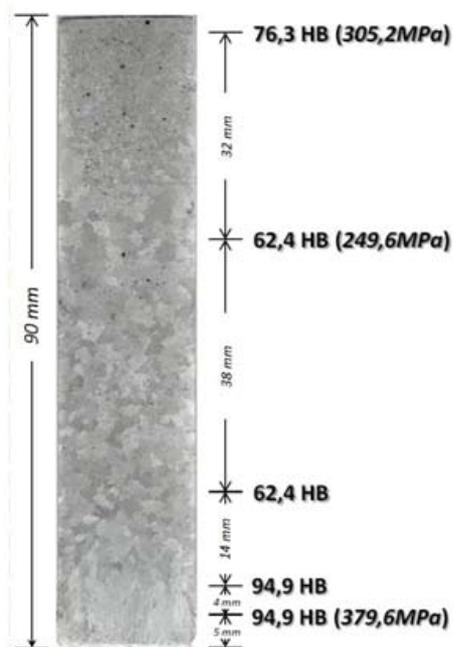


Figura 5: Macroestrutura do Molde Coquilha Base, com as respectivas durezas e Limites de Resistência Mecânica;

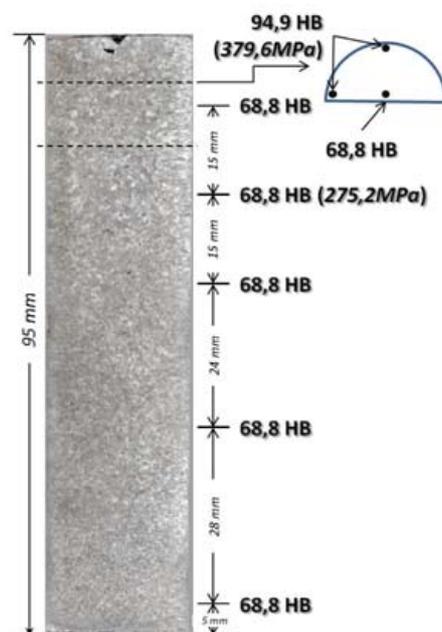


Figura 6: Macroestrutura do Molde Coquilha Lateral, com as respectivas durezas e Limites de Resistência Mecânica;

Uma análise global dos resultados indica que a dureza não variou, significativamente, (assim como o limite de resistência à tração) em função das granulometria dos grãos, no entanto a dureza mostra-se mais sensível à região macrográfica em que se situa, sendo em regiões colunares durezas maiores. Essa análise encontra amparo na literatura, na medida em que regiões colunares, freqüentemente, apresentam espaçamentos dendríticos menores, quando comparados às suas respectivas regiões equiaxiais. Outra análise comparativa pertinente pode ser ressaltada em relação a uma maior extração de calor desdobrando-se em uma menor quantidade de poros.

Conclusão

O sistema experimental proposto mostrou-se eficaz ao estudo das variáveis de solidificação frente às diferentes condições mecânicas obtidas e, verifica-se, ainda, que em altas taxas de extração de calor existe a tendência de redução da quantidade de poros.

Referências

- ARES, Alicia. GUEIJMAN, S.F. SCHVEZOV, C.E. Semi-empirical Modeling For Columnar And Equiaxed Growth Of Alloys. *Journal of Crystal Growth*, V.241, 235-240, 2002.
- BOEIRA, Alexandre Pitol. *Macrosegregação e formação de poros na solidificação de ligas Al-Cu: Modelagem Numérica e Desenvolvimento Experimental*. Campinas. UNICAMP, 2006. Tese, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006.
- BOETTINGER, William. CORIELL, S.R. GREER, A.L., KARMA, A. KURZ, W. RAPPAZ, M. TRIVEDI, R. Solidification Microstructures: Recent Developments, Future Directions. *Acta Materialia*, V.48, 43-70, 2000.
- CAMPBELL, John. *Castings: The New Metallurgy of Cast Metals*. 2.ed., United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2003.
- DONELAN P. Modelling Microstructural and Mechanical Properties of Ferritic Ductile Cast Iron. *Materials Science Technologies*, 16, 261-269, 2000.
- FLEMINGS, Merton. *Solidification Processing*, New York: McGraw-Hill, 1974.
- GANDIN, Charles-André. Experimental Study of the Transition from Constrained to Unconstrained Growth During Directional Solidification. *ISIJ International*, V.40, N.10, 971-979, 2000.
- GARCIA, Amauri. *Solidificação: Fundamentos e Aplicações*. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2001.
- GARCIA, Amauri. Spim Jr., J, Santos, C.A. *Ensaio dos Materiais*. São Paulo: Editora LTC, 2000.
- ISHIDA, Kainor. Effect of Grain Size on Grain Boundary Segregation, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 235, 244-249, 1996.
- KURZ, Wilfried. FISSHER, David. *Fundamentals of Solidification*. Switzerland Trans Tech Publications Ltd., 1992.
- KURZ, Wilfried. Bezençon, C. Gäumann, M., Columnar to Equiaxed Transition in Solidification Processing, *Science and Technology of Advanced Materials*, V. 2, 185-191, 2001.
- KURZYDŁOWSKI K. John. RALPH B. BUCKI J. J. GARBACZ A. The grain boundary character distribution effect on the flow stress of polycrystals: The influence of crystal lattice texture. *Materials Science Engineering*, A205, 127-132, 1996.
- LASALMONIE, A. and Strudel, J. Influence of Grain-Size on the Mechanical Behavior of some high-strength Materials, *Journal of Materials Science*, 21, 1837-1852, 1986.
- LEE, Chirazi. See, D., "Modeling Microporosity in Aluminium-Silicon Alloys: a review", *Journal of Light Metals*, V. 1, pp.15-30, 2001.
- OSÓRIO Wislei Riuper. and Garcia A., "Modeling Dendritic Structure and Mechanical Properties of Zn-Al Alloys as a Function of Solidification Conditions", *Materials Science Engineering*, A325, 103-111, 2002
- PETCH N. J. The Cleavage Strength of Polycrystals. *Journal of Iron Steel Institute*, 174, 25-28, 1953
- QUARESMA, João Nazareno Nonato. *Correlação entre Condições de Solidificação, Microestrutura e Resistência Mecânica*. Campinas. UNICAMP, 1999. Tese, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999.

QUARESMA, João Nazareno Nonato. Santos, C. A., Garcia, A. Correlation Between Unsteady-State Solidification Conditions, Dendrite Spacings, and Mechanical Properties of Al-Cu Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v.31A, 3167-3177, 2000.

ROCHA, Otávio. Siqueira C. A.; Garcia, A. Heat flow parameters affecting dendrite spacings during unsteady state solidification of Sn-Pb and Al-Cu alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, v.34A, 995-1006, 2003 (A).

ROCHA, Otávio. Siqueira C. A.; Garcia, A. Cellular/dendritic transition during unsteady-state unidirectional solidification of Sn-Pb alloys. *Materials Science Engineering A*, v.347, n.1-2, p.59 - 69, 2003 (B).

SANTOS, Carlos Alexandre. Quaresma, J.M.V. & Garcia, A., "Determination of Transient Interfacial Heat Transfer Coefficients in Chill Mold Castings", *Journal of Alloys and Compounds*, V.319, pp. 174-186, (2001).

SIQUEIRA, Claudio André. Cheung, N., Garcia, A. "The Columnar to Equiaxed Transition During Solidification of Sn-Pb Alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, v.351, 126-134, 2003.

TORSTER, Baumeister. Albrecht, J., Lutjering, G., Helm, D. and Daeubler, M.A. – Influence of Grain Size and Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of the Nickel-Base Superalloy U720LI, *Material Science Engineering A*, vol. 234-236, 189-192, 1997.

VEINIK, A.I. *Thermodynamics for the Foundryman*. United Kingdom: MacLaren and Sons Ltd., 1968.