

# SOLIDIFICAÇÃO



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Reitor

JOSÉ TADEU JORGE

Coordenador Geral da Universidade

ALVARO PENTEADO CRÓSTA



Conselho Editorial

Presidente

EDUARDO GUIMARÃES

ELINTON ADAMI CHAIM – ESDRAS RODRIGUES SILVA

GUITA GRIN DEBERT – JULIO CESAR HADLER NETO

LUIZ FRANCISCO DIAS – MARCO AURÉLIO CREMASCO

RICARDO ANTUNES – SEDI HIRANO

Amauri Garcia

**SOLIDIFICAÇÃO**  
*Fundamentos e aplicações*

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS DA UNICAMP  
DIRETORIA DE TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO

---

Garcia, Amauri

G165s Solidificação: fundamentos e aplicações / Amauri Garcia. – 2ª ed. –  
Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2007.

1. Solidificação. 2. Fundição. 3. Ligas (metalurgia). I. Título.

CDD 669.94

671.25

ISBN 978-85-268-0782-2

620.16

---

Índices para catálogo sistemático:

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| 1. Solidificação      | 669.94 |
| 2. Fundição           | 671.25 |
| 3. Ligas (metalurgia) | 620.16 |

Copyright © by Amauri Garcia  
Copyright © 2011 by Editora da Unicamp

1ª edição, 2001

2ª reimpressão da 2ª edição, 2016

Direitos reservados e protegidos pela lei 9.610 de 19.2.1998.  
É proibida a reprodução total ou parcial sem autorização,  
por escrito, dos detentores dos direitos.

Printed in Brazil.  
Foi feito o depósito legal.

Direitos reservados à

Editora da Unicamp  
Rua Caio Graco Prado, 50 – Campus Unicamp  
CEP 13083-892 – Campinas – SP – Brasil  
Tel./Fax: (19) 3521-7718/7728  
www.editoraunicamp.com.br – vendas@editora.unicamp.br

*Este trabalho é dedicado a dois educadores exemplares:  
meus pais, Elza Pimentel Garcia e Agostinho Garcia.*



## **AGRADECIMENTOS**

Desejo expressar meus agradecimentos a todos os professores e pesquisadores que tiveram resultados de seus trabalhos de pesquisa e teses, desenvolvidos na Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, incorporados a este texto. Quero também registrar um especial agradecimento aos membros de nossa equipe de pesquisa que colaboraram com conteúdo, sugestões e revisões deste texto: professora Maria Clara Filippini Ierardi, professor Jaime Alvares Spim Jr., professor José Maria do Vale Quaresma, Maria Joana da Silva, Carlos Alexandre dos Santos, Noé Cheung, Marcolino Fernandes Neto e ao Marco Olívio Sotelo pela execução de figuras. Agradeço também à Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), pela concessão de um período sabático para o desenvolvimento deste trabalho, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelas bolsas de pesquisa concedidas, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelos vários projetos de pesquisa e bolsas para pós-graduandos concedidos e pelo auxílio publicação para editoração deste livro.





## APRESENTAÇÃO

O presente texto é dirigido principalmente aos estudantes de graduação e pós-graduação em engenharia mecânica (modalidade materiais e processos de fabricação), engenharia de materiais e engenharia metalúrgica, cursos de especialização em fundição e lingotamento, além de servir de consulta a profissionais atuantes nas indústrias de fundição e siderúrgicas. Ao longo de mais de 25 anos de atuação em pesquisa na área de solidificação de materiais, foi gerado um volume apreciável de resultados de pesquisa por uma equipe bastante atuante na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, muitos desses resultados consolidados em trabalhos de mestrado e doutorado, além de publicações diversas, a maioria devidamente relacionada na Bibliografia desse texto. Esses resultados, devidamente compilados e sistematizados, foram gradativamente incorporados aos aspectos fundamentais da solidificação e utilizados ao longo de muitos anos no ensino de graduação e pós-graduação. A vivência dessas experiências didáticas culminou com a atual formatação desse texto, em que, sempre que cabível, foram incorporadas aplicações tecnológicas centradas no fenômeno da solidificação.

O assunto é desenvolvido de modo conciso quanto possível, com ilustrações e desenvolvimentos matemáticos apresentados de forma a facilitar, ao máximo, a compreensão dos fenômenos envolvidos. Na Introdução, aborda-se a inserção da solidificação nos processos de manufatura e destaca-se sua aplicação em processos menos convencionais como na purificação e crescimento de cristais, nos tratamentos por refusão com *laser* e na obtenção de produtos semi-acabados por solidificação rápida. Nos capítulos 2 e 3, analisa-se os estágios iniciais da solidificação com a formação dos núcleos sólidos a partir do líquido resfriado, o crescimento desses núcleos e a conseqüente rejeição e redistribuição do soluto que acompanha essa etapa do processo. A purificação de materiais, baseada em um princípio básico da rejeição de soluto, e que possibilitou o desenvolvimento de semicondutores ultra-puros que conduziram ao espetacular desenvolvimento da indústria de componentes eletrônicos, é enfocada no Capítulo 4. A análise matemática da solidificação, sob o ponto de vista da transferência de calor, é abordada no Capítulo 5 por meio de modelos analíticos e de uma abordagem numérica introdutória. Enfoca-se também a aplicação desses tratamentos matemáticos na modelagem do processo de lingotamento contínuo de aços, essencial para o controle operacional desse processo na indústria siderúrgica. O espectro possível de estruturas de solidificação, seus parâmetros de controle e propriedades decorrentes são analisados nos capítulos 6, 7 e 8. Finalmente, o Capítulo 9 aborda a incidência de defeitos inerentes ao processo e que

decorrem desde a manipulação do material no estado líquido até a sua completa solidificação.

Exercícios resolvidos e exemplos são incluídos sempre que possível ao longo do texto, no sentido da fixação dos fenômenos analisados e para facilitar a aplicação das ferramentas de cálculo disponíveis. No final do texto, inclui-se uma lista de exercícios sugeridos, que devem ser resolvidos à medida que os capítulos são percorridos, para que se obtenha um máximo aproveitamento nos assuntos analisados.

*Amauri Garcia*  
Campinas, janeiro de 2000

# SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| SIMBOLOGIA .....   | 15 |
| Capítulo 1 — INTRODUÇÃO .....  | 19 |
| 1.1 A inserção da solidificação nos processos de manufatura .....                            | 19 |
| 1.2 Estrutura de solidificação e propriedades .....  | 21 |
| 1.3 Outras aplicações da solidificação .....   | 24 |
| <i>Purificação de materiais e crescimento de cristais</i> .....                              | 24 |
| <i>Tratamentos superficiais por refusão com laser</i> .....                                  | 25 |
| <i>Obtenção de produtos quase acabados por solidificação rápida</i> .....                    | 26 |
| Capítulo 2 — NUCLEAÇÃO E CRESCIMENTO .....   | 29 |
| 2.1 O ponto de fusão .....   | 29 |
| <i>Superaquecimento e super-resfriamento</i> .....   | 31 |
| 2.2 O intervalo de solidificação .....   | 33 |
| 2.3 Nucleação homogênea .....  | 35 |
| <i>Taxa de nucleação</i> .....   | 39 |
| <i>Super-resfriamento máximo</i> .....   | 40 |
| 2.4 Nucleação heterogênea .....  | 43 |
| <i>Taxa de nucleação</i> .....   | 46 |
| <i>Agentes nucleantes</i> .....  | 46 |
| <i>Nucleação dinâmica</i> .....  | 49 |
| 2.5 Crescimento na interface sólido/líquido .....  | 50 |
| <i>Velocidades de crescimento</i> .....  | 53 |
| Capítulo 3 — REDISTRIBUIÇÃO DE SOLUTO .....  | 57 |
| 3.1 O coeficiente de redistribuição .....  | 57 |
| 3.2 Solidificação em condições de equilíbrio .....   | 59 |
| <i>Regra da Alavanca</i> .....   | 60 |
| 3.3 Solidificação fora do equilíbrio .....   | 61 |
| <i>Mistura de soluto no líquido apenas por difusão</i> .....                                 | 61 |
| <i>Mistura completa de soluto no líquido sem difusão no sólido</i> .....                     | 64 |
| <i>Mistura completa de soluto no líquido com difusão no sólido</i> .....                     | 67 |
| <i>Solução clássica de Brody e Flemings (Brody, 1966)</i> .....                              | 67 |
| <i>Mistura completa de soluto no líquido sem difusão no sólido (Equação de Scheil)</i> ..... | 71 |
| <i>Elevada mobilidade do soluto no estado sólido (Regra da Alavanca)</i> .....               | 71 |
| <i>Solução de Clyne-Kurz (Clyne, 1981)</i> .....   | 72 |
| <i>Solução de Ohnaka (Ohnaka, 1986)</i> .....  | 72 |
| <i>Soluções de Kobayashi (Kobayashi, 1988)</i> .....   | 73 |
| <i>Mistura parcial de soluto no líquido</i> .....  | 76 |
| 3.4. Evolução do perfil de soluto na solidificação: análise comparativa de soluções .....    | 78 |
| CAPÍTULO 4 — FUSÃO ZONAL .....   | 81 |
| <i>Nivelamento zonal</i> .....   | 81 |
| <i>Refino zonal</i> .....  | 81 |
| <i>Dopagem seletiva</i> .....  | 81 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.1 Solidificação normal e determinação do coeficiente de redistribuição do soluto .....                                  | 83  |
| <i>Determinação do coeficiente de redistribuição de soluto</i> .....  | 84  |
| 4.2 Refino zonal .....  | 86  |
| <i>Distribuição de soluto na primeira passada</i> .....   | 88  |
| <i>Distribuição do soluto para múltiplas passadas</i> .....   | 92  |
| <i>Perfil-limite de distribuição de soluto</i> .....  | 96  |
| 4.3 Otimização da fusão zonal .....   | 101 |
| <i>Coefficiente efetivo de redistribuição de soluto (<math>k_{ef}</math>)</i> .....                                       | 104 |
| <i>Velocidade de deslocamento da zona líquida (<math>v</math>)</i> .....  | 104 |
| <i>Tamanho da zona líquida (<math>l</math>)</i> .....   | 105 |
| 4.4 Aspectos experimentais de refino zonal .....  | 106 |
| <i>Refino zonal</i> .....   | 108 |
| <i>Recipientes para acondicionamento do material</i> .....  | 108 |
| <i>Atmosfera controlada e agitação do líquido</i> .....   | 108 |
| <i>Aquecimento</i> .....  | 110 |
| 4.5 Crescimento de cristais .....   | 111 |
| <i>Solidificação normal</i> .....   | 111 |
| <i>Refino zonal</i> .....   | 113 |
| <i>Crescimento Czochralski</i> .....  | 114 |
| Capítulo 5 — TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLIDIFICAÇÃO .....  | 117 |
| 5.1 Modos de transferência de calor .....   | 119 |
| <i>Condução</i> .....   | 119 |
| <i>Convecção</i> .....  | 121 |
| <i>Radiação</i> .....   | 122 |
| <i>Transferência newtoniana</i> .....   | 123 |
| 5.2 Propriedades térmicas e analogia entre circuitos térmicos e elétricos .....   | 125 |
| <i>Difusividade térmica</i> .....   | 125 |
| <i>Difusividade de calor</i> .....  | 125 |
| <i>Módulo de Biot</i> .....   | 126 |
| <i>Módulo de Fourier</i> .....  | 126 |
| <i>Analogia entre circuitos térmicos e elétricos</i> .....  | 126 |
| 5.3 Análise matemática da solidificação .....   | 130 |
| <i>Modelo analítico para solidificação com frente plana</i> .....   | 130 |
| <i>Cinética de solidificação</i> .....  | 133 |
| <i>Perfil térmico</i> .....   | 134 |
| <i>Determinação da temperatura de equilíbrio na interface metal/molde</i> .....   | 136 |
| <i>Determinação da constante de solidificação</i> .....   | 137 |
| <i>Determinação da parcela virtual de espessura do molde (<math>E_0</math>)</i> .....                                     | 140 |
| <i>Determinação da espessura virtual previamente solidificada (<math>S_0</math>)</i> .....                                | 142 |
| <i>Determinação dos coeficientes de transferência de calor (<math>h_{im}</math> e <math>h_{is}</math>)</i> .....          | 142 |
| <i>Síntese das equações representativas do modelo analítico com frente plana de solidificação</i> .....                   | 143 |
| <i>Modelo analítico para solidificação em um intervalo de temperaturas: ligas binárias</i> .....                          | 149 |
| <i>A inserção de coeficientes de transferência de calor metal/molde variáveis nos modelos analíticos</i> .....            | 155 |
| <i>A aplicação do modelo analítico na solidificação sob condições de fluxo de calor radial: cilindros e esferas</i> ..... | 158 |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Métodos numéricos na análise da solidificação</i> .....  | 165 |
| <i>Tratamento de interfaces</i> .....   | 168 |
| <i>Tratamento para materiais diferentes em contato</i> .....  | 170 |
| <i>Tratamento da liberação do calor latente</i> .....   | 171 |
| <i>Solidificação de ligas binárias em um intervalo de temperaturas</i> .....  | 176 |
| 5.4 Determinação dos coeficientes de transferência de calor molde/ambiente  |     |
| $(h_{a_{mb}})$ e metal/molde $(h_i)$ .....  | 180 |
| <i>Interface molde/ambiente</i> .....   | 180 |
| <i>Interface metal/molde</i> .....  | 186 |
| <i>Determinação de <math>h_i</math> através da cinética da solidificação unidirecional</i> .....                                    | 187 |
| <i>Determinação de <math>h_i</math> através do confronto teórico-experimental de perfis térmicos</i> .....                          | 190 |
| <i>Determinação de <math>h_i</math> através de medidas de temperaturas e vazão em moldes refrigerados</i> .....                     | 191 |
| 5.5 Transferência de calor e solidificação no processo de lingotamento contínuo .....   | 193 |
| Capítulo 6 — SOLIDIFICAÇÃO DE LIGAS MONOFÁSICAS .....   | 201 |
| 6.1 A estabilidade da interface sólido/líquido .....  | 201 |
| 6.2 Estrutura celular .....   | 209 |
| 6.3 Estrutura dendrítica .....  | 214 |
| 6.4 Modelos de crescimento celular e dendrítico .....   | 222 |
| <i>Espaçamentos celulares</i> .....   | 222 |
| <i>Espaçamentos dendríticos primários (EDP)</i> .....   | 226 |
| <i>EDP na solidificação em condições de fluxo de calor estacionário</i> .....   | 227 |
| <i>Modelo de Hunt (Hunt, 1979)</i> .....  | 228 |
| <i>Modelo de Kurz e Fisher (Kurz, 1981)</i> .....   | 228 |
| <i>EDP na solidificação sob condições de fluxo de calor transitório</i> .....   | 229 |
| <i>Espaçamentos dendríticos secundários (EDS) na solidificação em condições de fluxos de calor transitório e estacionário</i> ..... | 230 |
| <i>Modelo de Feurer (Feurer, 1977)</i> .....  | 233 |
| <i>Modelo de Kirkaldy et al. (Kirkaldy, 1995)</i> .....   | 233 |
| 6.5 Parâmetros térmicos de controle do crescimento celular ou dendrítico em condições de fluxo de calor transitório .....           | 236 |
| <i>Tempo local de solidificação <math>(t_{sl})</math></i> .....   | 237 |
| <i>Velocidade da ponta da dendrita <math>(v_L)</math></i> .....   | 240 |
| <i>Gradiente térmico no líquido junto à isoterma liquidus <math>(G_L)</math></i> .....  | 240 |
| <i>Determinação do coeficiente de transferência de calor metal/molde <math>(h_i)</math> através de medidas dos EDS</i> .....        | 241 |
| Capítulo 7 — SOLIDIFICAÇÃO DE LIGAS POLIFÁSICAS .....   | 243 |
| 7.1 Ligas eutéticas .....   | 243 |
| <i>Microestruturas de ligas eutéticas</i> .....   | 244 |
| <i>Estruturas regulares</i> .....   | 245 |
| <i>Estruturas regulares complexas</i> .....   | 246 |
| <i>Estruturas irregulares</i> .....   | 246 |
| 7.2 Crescimento de eutéticos regulares .....  | 249 |
| 7.3 Estabilidade da interface eutética .....  | 256 |
| <i>Eutéticos binários puros</i> .....   | 256 |
| <i>Eutéticos binários impuros</i> .....   | 257 |
| <i>Estruturas eutéticas obtidas a partir de ligas pró-eutéticas</i> .....   | 258 |

|  |     |
|--|-----|
| 7.4 Modificação de eutéticos .....   | 260 |
| <i>Eutético alumínio-silício</i> .....   | 260 |
| <i>Eutético ferro-carbono</i> .....  | 264 |
| 7.5 Ligas peritéticas .....  | 266 |
| <i>Solidificação de ligas peritéticas fora do equilíbrio</i> .....                                     | 269 |
| 7.6 Ligas monotéticas .....  | 271 |
| <i>Solidificação direcional de ligas monotéticas em condições de fluxo de calor estacionário</i> ..... | 274 |
| Capítulo 8 — MACROESTRUTURAS DE SOLIDIFICAÇÃO .....  | 279 |
| 8.1 Contração volumétrica na solidificação .....   | 279 |
| 8.2 Zonas coquilhada, colunar e equiaxial .....  | 281 |
| 8.3 A transição colunar-equiaxial .....  | 290 |
| 8.4 Controle da macroestrutura .....   | 295 |
| 8.5 Propriedades mecânicas de estruturas colunares e equiaxiais .....                                  | 303 |
| Capítulo 9 — FLUXO DE LÍQUIDO, SEGREGAÇÃO E DEFEITOS .....   | 315 |
| 9.1 Fluidez de metais líquidos .....   | 316 |
| 9.2 Convecção no líquido .....   | 321 |
| 9.3 Fluxo de líquido interdendrítico .....   | 323 |
| 9.4 Microsegregação .....  | 326 |
| <i>Microsegregação intercelular</i> .....  | 326 |
| <i>Microsegregação interdendrítica</i> .....   | 331 |
| <i>Microsegregação intergranular</i> .....   | 339 |
| 9.5 Macrossegregação .....   | 340 |
| <i>Segregação normal</i> .....   | 340 |
| <i>Segregação por gravidade</i> .....  | 342 |
| <i>Segregação inversa</i> .....  | 342 |
| <i>Formação de estrias</i> .....   | 349 |
| <i>Formação de canais</i> .....  | 351 |
| 9.6 Segregação em lingotes industriais .....   | 353 |
| <i>Estrutura de solidificação</i> .....  | 356 |
| <i>Fluxo de metal líquido</i> .....  | 356 |
| 9.7 Homogeneização .....   | 356 |
| 9.8 Defeitos originados na solidificação .....   | 359 |
| <i>Porosidades</i> .....   | 360 |
| <i>Bolhas</i> .....  | 363 |
| <i>Inclusões</i> .....   | 365 |
| <i>Trincas de contração</i> .....  | 367 |
| <i>Gotas frias</i> .....   | 369 |
| EXERCÍCIOS SUGERIDOS .....   | 371 |
| Apêndice 1 — FUNÇÃO ERRO .....   | 385 |
| Apêndice 2 — PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE ALGUNS MATERIAIS .....                                       | 389 |
| BIBLIOGRAFIA .....   | 391 |

## SIMBOLOGIA

| Símbolo         | Significado                              | Unidades                  |
|-----------------|--|---------------------------|
| A               | Área                                     | m <sup>2</sup>            |
| B <sub>i</sub>  | Módulo de Biot –equação 5.14             | adimensional              |
| C               | Concentração                             | % em peso                 |
| C <sub>E</sub>  | Concentração eutética                    | % em peso                 |
| C <sub>S</sub>  | Concentração de soluto no sólido         | % em peso                 |
| C <sub>L</sub>  | Concentração de soluto no líquido        | % em peso                 |
| C <sub>0</sub>  | Concentração nominal de uma liga         | % em peso                 |
| D               | Coeficiente de difusão no líquido        | m <sup>2</sup> /s         |
| D <sub>S</sub>  | Coeficiente de difusão no sólido         | m <sup>2</sup> /s         |
| E <sub>0</sub>  | Camada virtual –equação 5.98             | m                         |
| F               | Energia livre                            | J/m <sup>3</sup>          |
| F <sub>0</sub>  | Módulo de Fourier –equação 5.15          | adimensional              |
| G               | Gradiente térmico                        | K/m                       |
| H               | Entalpia                                 | J/m <sup>3</sup>          |
| I               | Taxa de nucleação                        | Núcleos/ m <sup>3</sup> s |
| I <sub>S</sub>  | Índice de microsegregação –equação 9.30  | adimensional              |
| J               | Fluxo de massa                           | % m/s                     |
| K               | Condutividade térmica                    | W/mK                      |
| L               | Calor latente de fusão                   | J/kg                      |
| L               | Comprimento da amostra– capítulos 3 e 4  | m                         |
| L <sub>0</sub>  | Camada virtual –equação 5.97             | m                         |
| M               | Parâmetro material/molde –equação 5.13   | adimensional              |
| $\bar{M}$       | Parâmetro modelo de Feurer –equação 6.30 | cm <sup>3</sup> /s        |
| M'              | Módulo definido na equação 5.123         | adimensional              |
| M' <sub>S</sub> | Módulo de superfície –equação 5.128      | adimensional              |
| N               | Parâmetro material/molde –equação 5.34   | adimensional              |
| P               | Pressão                                  | Pa                        |
| Q               | Quantidade de calor                      | J                         |
| R               | Relação volume/área –equação 5.100       | m                         |
| R <sub>t</sub>  | Resistência térmica –equação 5.17        | m <sup>2</sup> K/W        |
| S               | Entropia                                 | J/m <sup>3</sup> K        |
| S               | Espessura solidificada                   | m                         |

|           |  |                 |
|-----------|--|-----------------|
| $S_L$     | Posição da isoterma <i>liquidus</i>            | m               |
| $S_0$     | Camada virtual – equação 5.96                  | m               |
| $S_s$     | Posição da isoterma <i>solidus</i>             | m               |
| Ste       | Número de Stefan = $[c_s(T_f - T_0)]/L$        | adimensional    |
| T         | Temperatura                                    | K               |
| $T_E$     | Temperatura eutética                           | K               |
| $T_f$     | Temperatura de fusão                           | K               |
| $T_{liq}$ | Temperatura <i>liquidus</i>                    | K               |
| $T_m$     | Temperatura monotética                         | K               |
| $T_{sol}$ | Temperatura <i>solidus</i>                     | K               |
| $T_p$     | Temperatura peritética                         | K               |
| $T_V$     | Temperatura de vazamento                       | K               |
| $\dot{T}$ | Taxa de resfriamento                           | K/s             |
| V         | Volume   | $m^3$           |
| X         | Distância relativa (capítulo 4)                | adimensional    |
| a         | Difusividade térmica – equação 5.11            | $m^2/s$         |
| b         | Difusividade de calor – equação 5.12           | $Ws^{1/2}/m^2K$ |
| c         | Calor específico                               | J/kgK           |
| d         | Densidade                                      | $kg/m^3$        |
| $f_L$     | Fração de líquido em peso                      | adimensional    |
| $f_s$     | Fração de sólido em peso                       | adimensional    |
| g         | Fração volumétrica                             | adimensional    |
| h         | Coefficiente de transferência de calor         | $W/m^2K$        |
| k         | Coefficiente de distribuição de soluto         | adimensional    |
| k         | Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ | J/K             |
| l         | Comprimento da zona líquida                    | m               |
| m         | Massa  | kg              |
| m         | Parâmetro do material – equação 5.61           | adimensional    |
| m         | Inclinação da linha <i>liquidus</i>            | K/ % em peso    |
| $m'$      | Parâmetro da liga – equação 5.93               | adimensional    |
| $\dot{m}$ | Vazão  | l/s             |
| n         | Parâmetro do material – equação 5.42           | adimensional    |
| $n'$      | Parâmetro da liga – equação 5.92               | adimensional    |
| q         | Fluxo de calor                                 | $W/m^2$         |
| r         | Raio   | m               |
| t         | Tempo  | s               |
| $t_{SL}$  | Tempo local de solidificação                   | s               |



|                         |   |                                 |
|-------------------------|---|---------------------------------|
| $u$                     | Velocidade de lingotamento contínuo                       | m/s                             |
| $v$                     | Velocidade de deslocamento de interface                   | m/s                             |
| $v_L$                   | Velocidade da isoterma <i>liquidus</i>                    | m/s                             |
| $v_S$                   | Velocidade da isoterma <i>solidus</i>                     | m/s                             |
| $x$                     | Coordenada de distância                                   | m                               |
| $y$                     | Coordenada de distância                                   | m                               |
| $z$                     | Coordenada de distância                                   | m                               |
| $\alpha$                | Constante de Jackson –equação 2.36                        | adimensional                    |
| $\alpha$                | Constante de Brody-Flemings –equação 3.35                 | adimensional                    |
| $\alpha$                | Cte da cinética de solidificação – equação 5.74           | s/m <sup>2</sup>                |
| $\alpha_S$              | Cte da cinética da isoterma <i>solidus</i> –equação 5.87  | s/m <sup>2</sup>                |
| $\alpha_L$              | Cte da cinética da isoterma <i>liquidus</i> –equação 5.89 | s/m <sup>2</sup>                |
| $\beta$                 | Cte da cinética de solidificação –equação 5.74            | s/m                             |
| $\beta_S$               | Cte da cinética da isoterma <i>solidus</i> –equação 5.87  | s/m                             |
| $\beta_L$               | Cte da cinética da isoterma <i>liquidus</i> –equação 5.89 | s/m                             |
| $\beta$                 | Cte da cinética de solidificação –equação 5.77            | s/m                             |
| $\Gamma$                | Coefficiente de Gibbs-Thomson- equação 6.11               | Km                              |
| $\delta$                | Camada limite de difusão                                  | m                               |
| $\delta$                | Cte da cinética da isoterma <i>solidus</i> –equação 5.87  | s                               |
| $\delta$                | Alongamento   | %                               |
| $\delta_t$              | Índice de microsegregação residual                        | adimensional                    |
| $\Delta S$              | Entropia de fusão –equação 2.8                            | J/kgK                           |
| $\Delta T$              | Super-resfriamento  | K                               |
| $\Delta T_{SL}$         | Intervalo de solidificação                                | K                               |
| $\Delta T_V$            | Superaquecimento  | K                               |
| $\gamma$                | Contração de solidificação –equação 9.11                  | adimensional                    |
| $\varepsilon$           | Emissividade  | adimensional                    |
| $\theta$                | Ângulo  | °                               |
| $\theta_C$ e $\theta_c$ | Funções correção geométrica –equações 5.113/114           | adimensional                    |
| $\lambda$               | Espaçamento celular ou dendrítico ou eutético             | m                               |
| $\lambda$               | Relação calor latente/ calor específico                   | K                               |
| $\sigma$                | Energia superficial                                       | J/m <sup>2</sup>                |
| $\sigma$                | Constante de Stefan- Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8}$     | W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> |
| $\sigma_u$              | Limite de resistência à tração                            | MPa                             |
| $\phi$                  | Constante de solidificação –equação 5.61                  | adimensional                    |
| $\phi_1$                | Cte cinética da isoterma <i>solidus</i> –equação 5.94/95  | adimensional                    |
| $\phi_2$                | Cte cinética da isoterma <i>liquidus</i> –equação 5.94/95 | adimensional                    |

## Sub-índices

amb – ambiente

c – convectivo ou cilindro

e – esfera

i – interface

L – líquido ou *liquidus*

liq – liquidus

m – molde

r – radiativo

S – sólido ou *solidus*

sol – *solidus*

SL – sólido/líquido

## Superíndices

' - relativo ao sistema virtual no Capítulo 5

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 A inserção da solidificação nos processos de manufatura

A solidificação é um fenômeno de transformação de fases bastante familiar e associado à nossa rotina diária, desde a simples produção de cubos de gelo até o manuseio de utensílios e componentes, os quais, quase que invariavelmente, passaram por um estágio de solidificação durante a sua fabricação. Na história da humanidade, a fundição de peças de materiais metálicos pode quase ser considerada uma tecnologia pré-histórica, mesmo sabendo-se que os primeiros registros arqueológicos surgiram razoavelmente tarde. Não se sabe exatamente quando foram obtidas as primeiras peças metálicas fundidas, mas os registros indicam que isso ocorreu no período compreendido entre 5000 e 3000 a.C., ou seja, no período imediatamente anterior à Idade do Bronze. As análises químicas dos objetos encontrados revelaram que foram produzidos a partir de cobre nativo. Desde então e progressivamente, a fundição passou a estar cada vez mais presente na história da evolução da humanidade, passando pelo aparecimento do ferro fundido na China em 600 a.C. e seu surgimento na Europa no século XV, embora sua utilização como material estrutural só tenha ocorrido de forma extensiva no século XVIII na Inglaterra.

Uma análise global dos atuais processos de manufatura de peças e componentes metálicos mostra que, com exceção dos artigos produzidos por técnicas de metalurgia do pó, todos os demais passam, pelo menos uma vez, pelo processo de solidificação, conforme mostra o esquema da Figura 1.1. Com a fusão dos metais há uma queda abrupta na viscosidade, de tal maneira que pode-se essencialmente acomodar o metal líquido em um molde de determinada geometria para proporcionar o formato de uma peça semi-acabada. Isso faz com que a fundição constitua a rota mais econômica na conformação de uma peça metálica, desde que o ponto de fusão não seja extremamente elevado. Já o lingotamento consiste no vazamento do metal líquido em moldes de geometrias mais simples, por exemplo com seções quadradas, retangulares ou cilíndricas, e exigirá um maior dispêndio de energia para que processos de conformação plástica, tais como laminação, forjamento, extrusão, dêem o formato necessário à peça. Uma rota alternativa consiste nos processos de solidificação rápida, que são principalmente adequados à produção de seções de dimensões mais restritas como fios, filamentos, tiras e fitas metálicas. O fluxograma da Figura 1.1 mostra ainda que, mesmo após a conformação do produto semi-acabado, a solidificação pode ainda estar presente na etapa de acabamento do produto. De utilização

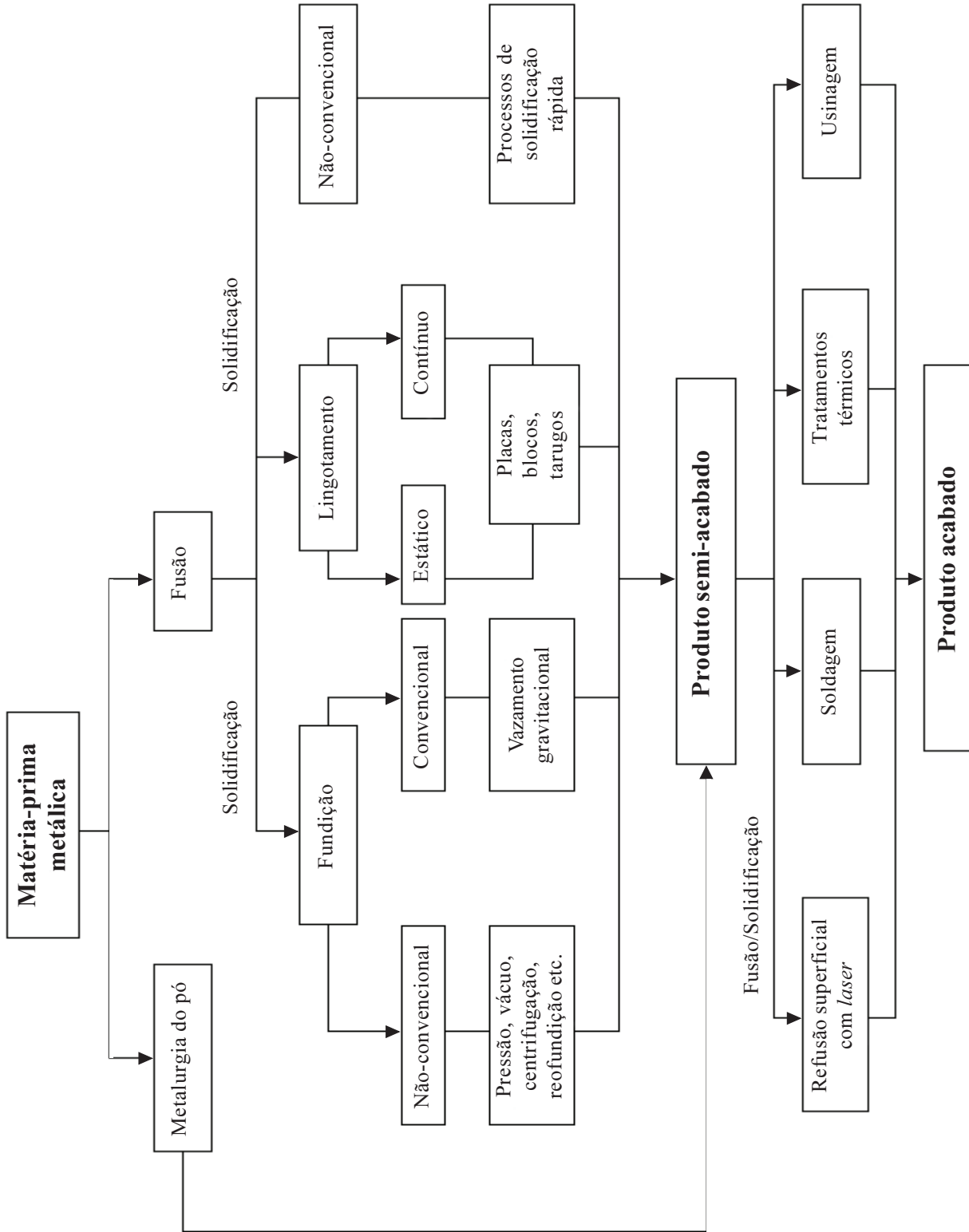


Figura 1.1 — Opções de fabricação de produtos metálicos.