

Índice

Agradecimentos	IX
Prefácio	XI

Capítulo I

Introdução	1
1 - Referência histórica	2
2 - Definição de tecnologia de fundição	5
3 - Classificação dos processos de fundição	5
4 - Processo normal para obtenção de peças fundidas	7
5 - Selecção de processos de fundição, função dos metais e suas ligas	10
6 - Factores que influem na precisão das peças de fundição	12
6.1 - Fases que influem na precisão nas peças de fundição	13
6.2 - Processos disponíveis para melhorar a precisão das peças de fundição	16
6.3 - Factores de custo inerentes ao aumento da precisão nas peças de fundição	19
6.4 - Considerações finais sobre a precisão das peças obtidas por fundição	20

Capítulo II

Processos de fundição com moldações perdidas	21
1 - Processos de fundição com areia e aglomerantes inorgânicos	21
1.1 - O processo de moldação em "areia verde"	21
1.1.1 - Propriedades exigidas às areias de moldação	24
1.1.2 - Propriedades e características das areias para moldação	25
1.1.3 - Técnicas usadas na preparação das moldações em areia	30
1.1.4 - Ensaios das areias de moldação	33
1.1.5 - Técnicas e equipamentos para preparação das areias	44
1.1.6 - Artíficos de moldação	46
1.1.7 - Moldação com Cércea	48

1.2 - O processo de moldação Silicato de Sódio/CO ₂	49
1.2.1 - Capacidades e limitações do processo	52
1.3 - O processo de moldação com sistema Alumina-Fosfato	53
2 - Processos de fundição de precisão com areia e aglomerantes orgânicos	54
2.1 - Moldação com resinas	54
2.1.1 - Materiais constituintes das moldações de "Shell Moulding"	54
2.1.2 - Processo de obter a moldação de Shell Moulding	55
2.1.3 - Propriedades térmicas das moldações de Shell Moulding	60
2.1.4 - Processo de Shell Moulding sob vácuo	61
2.1.5 - O processo Shell Moulding CLAS	62
2.1.6 - Capacidades e limitações do processo	63
2.1.7 - Exemplos de peças obtidas pelo processo de Shell Moulding	65
2.2 - O processo de moldação por presa a frio, de caixa fria e de caixa quente	66
2.2.1 - Processos de presa a frio	67
2.2.2 - Processos de caixa fria	70
2.2.3 - Processos de caixa quente	72
2.2.4 - Técnicas para obter as moldações para vazamento	73
2.2.5 - Características das moldações	74
2.2.6 - Capacidades e limitações do processo	74
2.3 - O processo de moldação "Cosworth"	75
2.3.1 - Materiais e técnicas para obter as moldações	76
2.3.2 - Características das moldações do processo Cosworth	77
2.3.3 - Capacidades e limitações do processo	77
2.4 - O processo ColShell	79
2.5 - O processo Zeus	79
3 - Processos de precisão em fundição com areias não aglomeradas	79
3.1 - O processo de fundição por evaporação do modelo "EPC"	80
3.1.1 - Materiais e técnicas para obter as moldações	80
3.1.2 - Características das moldações "EPC"	85
3.1.3 - Capacidades e limitações do processo "EPC"	88
3.1.4 - Processo "EPC" com moldação magnética	90
3.2 - O processo de moldação em vácuo ou processo -V	91
3.2.1 - Materiais e técnicas para obter as moldações	91
3.2.2 - Características das moldações	92
3.2.3 - Capacidades e limitações do processo	93

4 - Processo de fundição de precisão com moldações em gesso	95
4.1 - Materiais e técnicas para obter as moldações	96
4.2 - Características das moldações	97
4.3 - Capacidades e limitações do processo	98
5 - Processo de precisão em fundição com moldações em material cerâmico	100
5.1 - Materiais e técnicas para obter as moldações do processo Shaw	100
5.2 - Características das moldações do processo Shaw	101
5.3 - Capacidades e limitações do processo Shaw	102
6 - Processo de precisão em fundição com modelos perdidos	104
6.1 - O processo de moldação por "cera perdida"	104
6.1.1 - Materiais e técnicas para obter as moldações	105
6.1.2 - Características das moldações	118
6.1.3 - Capacidades e limitações do processo	127
6.2 - O processo de fundição "Investment Casting" contra-gravidade	129
6.2.1 - Materiais e técnicas para obter as moldações	129
6.2.2 - Características do processo técnico	130
6.2.3 - Capacidades e limitações dos processos	131
6.3 - O processo de moldação em "CS" com modelo evaporável	133
6.3.1 - Materiais e técnicas para obter as moldações "CS"	133
6.3.2 - Características das moldações "CS"	133
6.3.3 - Capacidades e limitações do processo	134

Capítulo III

Processos de fundição com moldações permanentes	137
1 - Processos de fundição em moldações permanentes ou em coquilha metálica	137
1.2 - Ligas que se podem vaziar por este processo	139
1.2.1 - Temperatura de vazamento	139
1.2.2 - Razões por que se exige baixo ponto de fusão	141
1.2.3 - Intervalo de solidificação	141
1.3 - Respiração da moldação	141
1.4 - Enxertos	142
1.5 - Ejectores	144

1.6 - Cálculo de parâmetros fundamentais de projecto das moldações	144
1.6.1 - Cálculo da força de fecho das moldações metálicas	145
1.6.2 - Determinação da pressão de injeção	145
1.6.3 - Determinação da velocidade de injeção	145
1.6.4 - Cálculo das secções dos canais de gitagem	146
1.7 - Elementos para cálculo e projecto de machos	152
1.7.1 - Classificação dos machos	154
1.7.2 - Força de extracção dos machos	156
1.8 - Controlo da temperatura de vazamento e da moldação metálica	162
1.8.1 - Influência da temperatura do molde	165
1.8.2 - Controlo da temperatura da moldação metálica	166
1.9 - Vida do molde permanente metálico	167
1.9.1 - Revestimento do molde para aumentar a vida útil	171
1.10 - Possibilidades da fundição em moldação metálica	174
2 - Fundição sob pressão	174
2.1 - Fundição sob pressão de centrifugação	174
2.1.1 - Fundição centrífuga propriamente dita	174
2.1.2 - Fundição semi-centrifugada	175
2.1.3 - Fundição sob pressão devida à centrifugação	176
2.1.4 - Variação da pressão no vazamento por centrifugação	177
2.2 - Fundição sob pressão de injeção	180
2.2.1 - Máquinas de injeção	181
2.2.2 - Capacidades do processo de injeção em moldações permanentes	185
3 - Processo de vazamento por gravidade em moldações permanentes metálicas	186
3.1 - Tipos de moldações metálicas por gravidade e baixa pressão	187
3.2 - Projecto de moldações metálicas para vazamento por gravidade	191
3.3 - Sistema de gitagem dos moldes metálicos para vazamento por gravidade	194
3.4 - Defeitos de vazamento e solidificação nas peças em moldações metálicas	196
3.5 - Remoção das peças das moldações permanentes	196
3.6 - Projecto de peças para vazamento em moldações permanentes	197
3.7 - Precisão dimensional das peças vazadas em moldações permanentes	198

3.8 - Acabamento superficial das peças vazadas em moldações permanentes	200
3.9 - Defeitos nas peças vazadas em moldações permanentes	201
3.10 - Custo de fundição em moldações metálicas vazadas por gravidade	201
3.11 - Capacidades do processo de vazamento em moldações permanentes	202
4 - Fundição contínua em moldes metálicos	203
4.1 - Aspectos históricos da fundição contínua	204
4.2 - Fundição contínua do aço	205
4.2.1 - Descrição geral do processo	205
4.2.2 - Disposição de uma fundição de vazamento contínuo	207
4.2.3 - Desenvolvimento do processo e da máquina	208
4.2.4 - Melhoramentos da produtividade	211
4.2.5 - Melhoramentos da qualidade	212
4.3 - Fundição contínua horizontal	213
4.4 - Fundição contínua de materiais não ferrosos	213
4.5 - Outros processos de fundição contínua	214
4.6 - Futuros desenvolvimentos da fundição contínua	216
5 - Processo de vazamento "Griffin" em moldações permanentes de Grafite	216

Capítulo IV

Elementos para o projecto de peças de fundição	219
1 - Objectivos funcionais de forma	219
1.1 - Destino da Peça	220
1.2 - Resistência dos materiais das peças aos esforços mecânicos	221
1.3 - Apresentação estética do desenho da peça vazada	227
1.4 - O traçado para maquinagem	230
2 - Determinação dos materiais função das suas propriedades mecânicas	237
2.1 - Classificação das ligas metálicas em função das suas propriedades e aplicações	238
3 - Contabilização do factor de contracção das ligas metálicas	245
4 - Variação gradual das secções das peças	248
5 - Espessuras mínimas das paredes	249
6 - Formação de rechupes de contracção nos pontos quentes	259
7 - Pormenores construtivos para evitar fissuras e fendas de contracção	261

8 - Traçado para evitar a retenção de ar e de gases.....	264
9 - Projecto de modelos e moldes	266
9.1 - Linhas de apartação da moldação	266
9.2 - Atribuição de ângulos de saída	270
9.3 - Economia associada ao traçado.....	273
9.4 - Economias associadas à construção de modelos	275
9.5 - Economia associada ao fabrico da moldação.....	277
10- Seleção da posição espacial da peça fundida na moldação	280
11- Variações dimensionais e tolerâncias	282
11.1 - Variáveis dos processos	283
11.2 - Distorção na fundição	286
11.3 - Fundição em moldação de areia	288
11.4 - Influência nas dimensões das variáveis de produção	289
11.5 - Moldações com resinas auto-secativas	291
11.6 - Fundição em matriz metálica sob pressão (Die casting)	292
11.7 - Fundição em moldações permanentes	293
11.8 - Processo de cera perdida	294
11.9 - Fundição com modelos de espuma evaporável (Evaporative foam)	296
11.10 - Fundição "Shell Moulding"	297
11.11 - Fundição "Plaster Moulding" (Gesso)	298
12- Dimensionamento e toleranciamento na fundição	299
13- Desenho de projecto por computador para simulação e fabrico CAD/CAM	301
14- Projecto e fabrico rápido de protótipos para fundição	303

Capítulo V

Sistemas de gitagem e de alimentação de peças de fundição	309
1 - Generalidades	309
2 - Defeitos a evitar no enchimento e na alimentação	311
3 - Sistemas de alimentação das peças vazadas	314
3.1 - Generalidades	314
3.2 - Transmissão de calor ao longo do tempo para solidificação	317
3.2.1 - Análise do processo de transferência de calor	320
3.2.2 - Cálculo do tempo de solidificação pela regra de Chvorinov	326
3.2.3 - Conclusões da regra de Chvorinov	327
3.2.4 - Discussão quantitativa da regra de Chvorinov	328
3.3 - Sistema de gitagem de alimentação	335

3.4 - Tipos de alimentadores	337
3.5 - Localização dos alimentadores	339
3.6 - Raios de acção dos alimentadores	340
3.7 - Cálculo da dimensão dos alimentadores	344
3.7.1 - Determinação do módulo e da zona a alimentar	344
3.7.2 - Determinação do raio de acção dos alimentadores	345
3.7.3 - Módulos de arrefecimento dos alimentadores	345
3.7.4 - Volume do alimentador para compensar a contracção do metal da peça	346
3.8 - Exemplo de cálculo de gitagem de alimentação	349
4 - Sistemas de gitagem para enchimento das moldações	351
4.1 - Variáveis de projecto	352
4.2 - Princípios do escoamento dos fluidos	355
4.2.1 - Teorema de Bernoulli	355
4.2.2 - A lei da continuidade do caudal	359
4.2.3 - Forma ideal e prática da coluna de enchimento	359
4.2.4 - Redução de secção dos canais para regularização do caudal	361
4.3 - Efeitos da quantidade de movimento	362
4.3.1 - Número de Reynold e tipos de escoamento	362
4.3.2 - Mudanças bruscas da secção transversal do canal de escoamento	363
4.3.3 - Mudanças súbitas na direcção de escoamento	364
4.3.4 - Aumento da extensão do canal de distribuição	365
4.3.5 - Processo de igualização de fluxos nos canais de ataque	365
4.4 - Elementos para o projecto do sistema de gitagem de enchimento	367
4.4.1 - Canal de distribuição e canal de ataque	367
4.4.2 - Sistemas pressurizados versus sistemas não pressurizados	368
4.4.3 - Sistema vertical versus sistema horizontal de enchimento	369
4.5 - Tempo máximo admissível de enchimento	370
4.6 - Filtros cerâmicos no sistema de gitagem de enchimento	373
4.7 - Exemplo de cálculo de gitagem de enchimento	379

Capítulo VI

Metalurgia da fundição, solidificação de metais e suas ligas	383
--	-----

1 - Introdução	383
2 - Nucleação e crescimento de cristais	384
2.1 - Nucleação homogénea	384
2.2 - Nucleação heterogénea	391
2.3 - Inoculantes para refinamento do grão	394
3 - Fluxo de metal líquido	396
3.1 - Determinação da vazabilidade dos metais fundidos	397
4 - Macroestruturas de fundição	399
4.1 - Zona coquilhada	400
4.2 - Zona colunar	401
4.3 - Zona equiaxial central	401
4.4 - Controlo das macroestruturas de fundição	402
4.4.1 - Controlo da nucleação	403
4.4.2 - Controlo por refino dinâmico do grão estrutural	403
4.4.3 - Influência dos parâmetros de controlo na macroestrutura	404
5 - Segregações em peças fundidas	405
5.1 - Microsegregações	406
5.1.1 - Microsegregação celular	406
5.1.2 - Microsegregação no contorno do grão	407
5.1.3 - Microsegregação interdendrítica	407
5.2 - Macrosegregação	408
5.2.1 - Macrosegregação normal	408
5.2.2 - Macrosegregação inversa	409
5.2.3 - Macrosegregação por fibragem	409
5.2.4 - Macrosegregação por gravidade	410
Capítulo VII	
Fusão de metais e tratamentos de elaboração	411
1 - Introdução	411
2 - Classificação dos fornos	411
2.1 - Quanto à qualidade do material que se pretende obter	412
2.2 - Quanto ao tipo de construção	412
2.3 - Quanto ao processo de aquecimento	412
2.4 - Quanto ao tipo de refractário	413
3 - Constituição e funcionamento do forno de cuba ou "Cubilote"	413
3.1 - Nota histórica	414
3.2 - Constituição de um forno de cubilote	414

3.3 - Constituição das cargas	416
3.3.1 - Cama de Coque	416
3.3.2 - Cargas de Coque	417
3.3.3 - Carga Metálica	417
3.3.4 - Carga de Fundente	417
3.4 - Reacções exotérmicas e endotérmicas com o coque	417
3.5 - Balanços Térmicos	420
3.6 - Vantagens e inconvenientes dos cubilotes básicos	421
3.7 - Optimização do rendimento dos cubilotes	422
3.8 - Produção horária de um cubilote	424
3.9 - Cadinho de recolha	425
4 - Constituição e funcionamento dos "Altos Fornos" e instalações anexas	425
4.1 - Constituição de um alto forno e seu funcionamento	425
4.2 - Equipamentos ambientais despoiradores	426
4.3 - Sistema de recuperação de energia	427
4.4 - Movimentação de materiais	427
5 - Constituição e funcionamento de "Convertidores" para o aço	427
5.1 - Definição de Convertidor e seu funcionamento	427
5.2 - Tipos de Convertidores e sua constituição	428
5.3 - Reacções metalúrgicas	430
6 - Constituição e funcionamento do forno "Siemens-Martin"	431
6.1 - Características do forno Siemens - Martin	432
6.2 - Modo de operação e sua constituição	432
6.3 - Tipo de combustível usado nestes fornos	433
6.4 - Acção afinadora da escória - reacções metalúrgicas	434
6.5 - Rendimento do forno Siemens - Martin	434
7 - Constituição e funcionamento dos fornos de cadinho	434
7.1 - Características dos fornos de cadinho	434
7.2 - Classificação dos fornos de cadinho quanto ao tipo de construção	435
7.3 - Materiais de construção dos cadinhos	435
7.4 - Modos de aquecimento dos cadinhos	436
7.5 - Rendimento dos fornos de cadinho	436
8 - Fornos cilíndricos rotativos ou oscilantes	436
9 - Funcionamento dos fornos de energia eléctrica	437
9.1 - Classificação dos fornos eléctricos	437
9.2 - Fornos eléctricos de resistência	437
9.3 - Fornos eléctricos de arco	438
9.4 - Fornos eléctricos de indução	439

10- Perspectivas dos meios de fusão e de elaboração	441
11- Estabelecimento da lotação do forno de Cubilote	442
12- Cálculo da lotação dos fornos de Cubilote	444
12.1- Coeficientes de correcção	444
12.2- Método das aproximações sucessivas	445
12.3- Método dos teores equivalentes	446
12.3.1- Grau de saturação eutéctico de "Hanemann"	446
12.3.2- Fluidéz Equivalente em Carbono	447
12.3.3- Equivalente em Carbono	447
12.4- Parte não metálica da lotação	448

Capítulo VIII

Controlo da qualidade dos processos e das peças vazadas	449
1 - Introdução	449
2 - Caracterização dos materiais da moldação	450
3 - Caracterização dos defeitos nas peças vazadas	451
3.1 - Classificação dos defeitos das peças vazadas	452
4 - Processos de controlo da qualidade das peças vazadas	455
4.1 - Controlo para verificação dimensional da forma	456
4.2 - Controlo do metal fundido e da sua composição	456
4.3 - Controlo para análise química e metalúrgica	457
4.4 - Controlo das propriedades físicas e mecânicas	459
4.4.1 - Controlo de volume e peso das peças vazadas	459
4.4.2 - Controlo da dureza das peças vazadas	460
4.4.3 - Controlo da resistência mecânica das peças vazadas às tensões	461
5 - Controlo não destrutivo das peças de fundição	461
5.1 - Controlo das peças vazadas por inspecção visual	463
5.2 - Controlo por líquidos penetrantes	464
5.3 - Controlo por magnetoscopia	465
5.4 - Controlo por correntes induzidas	467
5.5 - Controlo por radiografia por radiação X e γ	469
5.6 - Controlo por ultrasons	471
5.7 - Outras técnicas de controlo não destrutivo	473
6 - Selecção do controlo não destrutivo por material constituinte das peças vazadas	474
6.1 - Selecção do controlo não destrutivo das peças ferrosas	474
6.1.1 - Selecção do controlo não destrutivo de peças em ferro cinzento	475

6.1.2 - Selecção do controlo não destrutivo de peças em ferro maleável	477
6.1.3 - Selecção do controlo não destrutivo de peças em ferro dúctil	477
6.2 - Selecção do controlo não destrutivo de peças em ligas de Alumínio	478
6.3 - Selecção do controlo não destrutivo de peças em ligas de Cobre	481
7 - Controlo da qualidade dimensional das peças vazadas	483
7.1 - Importância do controlo estatístico das dimensões	484
7.2 - Controlo dimensional assistido por computador	485
7.2.1 - Equipamentos para o controlo dimensional de peças vazadas	485
7.2.2 - Processo de mediação das peças vazadas	486
7.3 - Processos estatísticos de controlo de qualidade na fundição	487
7.4 - Análise estatística da qualidade das peças vazadas	490
7.5 - Outras aplicações para a inspecção assistida por computador	492

Capítulo IX

Processos tecnológicos avançados aplicados à solidificação de peças de fundição	495
1 - Processo de solidificação unidireccional de peças vazadas	496
1.1 - Efeitos metalúrgicos das estruturas colunares	496
1.2 - Produção de peças fundidas por solidificação unidireccional	499
1.3 - Defeitos resultantes da solidificação direccional	502
1.4 - Outros processos de solidificação direccional	503
2 - Processo de solidificação para crescimento de monocristais	504
2.1 - Metalurgia da fundição de monocristais	504
2.2 - Processo de fundição de monocristais	505
3 - Processo de fundição com solidificação sob pressão	
" squeeze Casting"	507
3.1 - Descrição do processo de fundição sob pressão " squeeze Casting"	508
3.2 - Parâmetros do processo de fundição sob pressão " squeeze Casting"	510
3.3 - Controlo de qualidade das peças obtidas por fundição " squeeze Casting"	512
3.4 - Micro estrutura das peças fundidas por " squeeze Casting"	514

3.5 - Compósitos de matriz metálica vazada com fundição "Squeeze Casting"	515
3.6 - Capacidades do processo "Squeeze Casting"	516
4 - Processo de recristalização de fundidos sob pressão isostática a quente "HIPing"	518
5 - Enformação de metais semi-sólidos	520
5.1 - Introdução	520
5.2 - Vantagens dos processos de enformação de metais semi-sólidos	521
5.3 - Processos de enformação semi-sólida	522
5.3.1 - Processo de enformação de metais semi-sólidos por "Reofundição"	522
5.3.2 - Processo de enformação de metais semi-sólidos por "Tixofundição"	524
6 - Fundição magnetohidrodinâmica (MHD)	525
6.1 - Processos de controlo da MHD	526
Bibliografia	529