

FRANCISCO SILVA (COORDENADOR)
FLÁVIO BARTOLOMEU
TERESA DUARTE
JORGE LINO ALVES
GEORGINA MIRANDA
RUI NETO
ANTÓNIO BASTOS PEREIRA
CARLOS RELVAS
LEONARDO SANTANA
MIGUEL TERROSO

**TECNOLOGIAS,
MATERIAIS
E APLICAÇÕES**

IMPRESSÃO 3D



AUTORES

Francisco Silva (Coordenador)

Flávio Bartolomeu

Teresa Duarte

Jorge Lino Alves

Georgina Miranda

Rui Neto

António Bastos Pereira

Carlos Relvas

Leonardo Santana

Miguel Terroso

TÍTULO

IMPRESSÃO 3D – Tecnologias, materiais e aplicações

EDIÇÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

Praça da Corujeira n.º 38 4300-144 PORTO

geral@quanticaeditora.pt

CHANCELA

Engebook – Conteúdos de Engenharia

DISTRIBUIÇÃO

Booki – Conteúdos Especializados

Tel. 220 104 872 · Fax 220 104 871 · info@booki.pt – www.booki.pt

PARCEIRO DE COMUNICAÇÃO

Robótica - Revista Técnico-científica de Automação, Controlo e

Instrumentação - www.robotica.pt

APOIO

REIMAN, Lda . www.reiman.pt

CENTIMFE – Centro Tecnológico da Indústria de Moldes,

Ferramentas Especiais e Plásticos . www.centimfe.com .

www.3dprinting.centimfe.com

GISLOTICA – Projeto e Fabrico de Sistemas Mecânicos, Lda ·

www.gislotica.pt

SPM - Sociedade Portuguesa de Materiais . www.spmateriais.pt

ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto - Instituto

Politécnico do Porto . www.isep.ipp.pt

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto .

www.fe.up.pt

UA - Universidade de Aveiro . www.ua.pt

UMinho - Universidade do Minho . www.uminho.pt

IPCA - Instituto Politécnico do Cávado e do Ave . www.ipca.pt

REVISÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

DESIGN

Catarina Moreira

Delineatura – Design de Comunicação – www.delineatura.pt

IMPRESSÃO

Julho, 2023

DEPÓSITO LEGAL

508248/22



A **cópia ilegal** viola os direitos dos autores.

Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2023 | Todos os direitos reservados

a Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda. para a língua portuguesa.

A reprodução desta obra, no todo ou em parte, por fotocópia ou qualquer outro meio, seja eletrónico, mecânico ou outros, sem prévia autorização escrita do Editor e do Autor, é ilícita e passível de procedimento judicial contra o infrator.

Este livro encontra-se em conformidade com o novo Acordo Ortográfico de 1990, respeitando as suas indicações genéricas e assumindo algumas opções específicas.

CDU

681.6 Máquinas e equipamento de reprodução gráfica

621.7 Tecnologia mecânica em geral: processos, ferramentas, máquinas, equipamentos

ISBN

Papel 9789899101593

E-book 9789899101609

Catálogo da Publicação

Família Engenharia Mecânica

Subfamília Tecnologia/Fabrico

ÍNDICE

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| NOTA DE ABERTURA | XIII |
| PREFÁCIO | XVII |
| 1. INTRODUÇÃO E PRINCÍPIOS BÁSICOS | 21 |
| 1.1. Princípios básicos da fabricação aditiva (FA) | 23 |
| 1.2. Terminologia (ISO/ASTM 52900:2015)..... | 24 |
| 1.3. Requisitos e recomendações para o projeto de peças por FA (ISO/ASTM 52910:2018)..... | 26 |
| 1.4. Classificação dos processos e materiais (ISO 1729-2:2015)..... | 32 |
| 1.5. Vantagens e desvantagens da fabricação aditiva | 37 |
| 1.6. Evolução do mercado e campos de aplicação..... | 43 |
| Referências..... | 49 |
| 2. EVOLUÇÃO CRONOLÓGICA DO PROCESSO E CASOS DE SUCESSO | 51 |
| 2.1. Evolução cronológica do FA..... | 53 |
| 2.2. Casos de sucesso no FA | 58 |
| Referências..... | 68 |
| 3. SEQUÊNCIA DE OPERAÇÕES EM FABRICO ADITIVO | 69 |
| 3.1. Desenho modelo 3D..... | 71 |
| 3.2. Conversão de ficheiros para o formato STL..... | 73 |
| 3.3. Transferência dos ficheiros para o equipamento de FA..... | 76 |
| 3.4. Parametrização do equipamento de FA | 78 |
| 3.5. Construção dos componentes através de FA..... | 81 |
| 3.6. Pós-processamento de componentes obtidos através de FA..... | 83 |
| 3.6.1. Remoção de suportes | 84 |
| 3.6.2. Lixagem..... | 84 |
| 3.6.3. Granalhagem | 86 |
| 3.6.4. Pintura..... | 88 |
| 3.6.5. Imersão em água ou solventes (<i>Dipping</i>)..... | 89 |
| 3.6.6. Suavização através de vapor (<i>Vapour smoothing</i>) | 90 |
| 3.6.7. Revestimento com epóxido | 91 |
| 3.6.8. Remoção do pó..... | 92 |
| 3.6.9. Remoção de componentes..... | 93 |
| 3.6.10. Relaxação de tensões / Tratamento térmico..... | 94 |
| 3.6.11. Prensagem isostática a quente | 96 |
| 3.6.12. Maquinagem | 98 |
| 3.6.13. Tratamentos superficiais | 99 |
| 3.6.14. Inspeção e testes | 102 |
| Referências..... | 105 |
| 4. PARÂMETROS NO FABRICO ADITIVO..... | 107 |
| 4.1. Estudo de parâmetros utilizados essencialmente em processos baseados em leite de pó | 111 |

| | | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1.1. | Potência <i>laser</i> | 113 |
| 4.1.2. | Espaçamento de varrimento..... | 116 |
| 4.1.3. | Velocidade de varrimento | 118 |
| 4.1.4. | Estratégia de deposição..... | 120 |
| 4.1.4.1. | Estratégia de via única/traço único..... | 121 |
| 4.1.4.2. | Estratégia de "vaivém" | 122 |
| 4.1.4.3. | Estratégia de tabuleiro de xadrez | 122 |
| 4.1.4.4. | Estratégia de contorno e núcleo | 122 |
| 4.1.4.5. | Estratégia de pré-sinterização..... | 122 |
| 4.1.5. | Espessura da camada..... | 123 |
| 4.1.6. | Dimensão do pó | 124 |
| 4.1.7. | Diâmetro da projeção do feixe <i>laser</i> na superfície (<i>spot diameter</i>) | 125 |
| 4.2. | Influências cruzadas de parâmetros de deposição em FA em processos de leite de pó..... | 127 |
| 4.3. | Parâmetros relativos à tecnologia FDM..... | 137 |
| 4.3.1. | Orientação de construção | 138 |
| 4.3.2. | Espessura da camada..... | 139 |
| 4.3.3. | Ângulo/orientação de varrimento (<i>raster</i>) | 139 |
| 4.3.4. | Diâmetro do bico de extrusão/deposição | 140 |
| 4.3.5. | Velocidade de impressão | 141 |
| 4.3.6. | Temperatura de extrusão | 141 |
| 4.3.7. | Temperatura da plataforma..... | 142 |
| 4.3.8. | Densidade e estilo de preenchimento | 142 |
| 4.3.9. | Largura de varrimento..... | 143 |
| 4.3.10. | Espaço vazio..... | 143 |
| 4.3.11. | Orientação de varrimento..... | 144 |
| 4.3.12. | Espessura do contorno | 144 |
| | Referências..... | 148 |
| 5. | SIMULAÇÃO E FÍSICA DO FABRICO ADITIVO | 151 |
| 5.1. | A importância da física do processo para a previsão da microestrutura e propriedades..... | 154 |
| 5.2. | A importância dos parâmetros do processo na microestrutura e propriedades..... | 164 |
| | Referências..... | 169 |
| 6. | ENGENHARIA INVERSA NO PROJETO DE COMPONENTES | 171 |
| 6.1. | Engenharia Inversa: conceito..... | 173 |
| 6.2. | Tecnologias de levantamento de forma | 174 |
| 6.2.1. | Por contato..... | 175 |
| 6.2.2. | Sem contato | 177 |
| 6.2.2.1. | Fotogrametria..... | 177 |
| 6.2.2.2. | Projeção de luz estruturada..... | 179 |
| 6.2.2.3. | Perfilometria <i>laser</i> | 182 |
| 6.3. | Engenharia Inversa e a Medicina | 184 |
| | Referências..... | 191 |

| | | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7. | TECNOLOGIAS PARA FA COM POLÍMEROS E COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA..... | 195 |
| 7.1. | Estereolitografia (SLA) | 197 |
| 7.1.1. | Materiais para SLA..... | 198 |
| 7.1.2. | Áreas de aplicação | 199 |
| 7.1.3. | Vantagens e Desvantagens | 199 |
| 7.2. | Projeção Digital de Luz (<i>Digital Light Processing-DLP</i>) | 199 |
| 7.2.1. | Materiais para DLP | 200 |
| 7.2.2. | Áreas de aplicação | 201 |
| 7.2.3. | Vantagens e Desvantagens | 201 |
| 7.3. | Sistema de Luz Digital (<i>Digital Light Synthesis</i>) | 202 |
| 7.4. | Sinterização Seletiva por Laser (<i>Selective Laser Sintering-SLS</i>)..... | 203 |
| 7.4.1. | Materiais para SLS..... | 204 |
| 7.4.2. | Áreas de aplicação | 204 |
| 7.4.3. | Vantagens e Desvantagens | 205 |
| 7.5. | Modelação por Extrusão e Deposição de Plástico (<i>Fused Deposition Modelling-FDM</i>)..... | 205 |
| 7.5.1. | Materiais para FDM | 207 |
| 7.5.2. | Áreas de aplicação | 207 |
| 7.5.3. | Vantagens e Desvantagens | 208 |
| 7.6. | Jato de Material (<i>Material Jetting-MJ</i>)..... | 209 |
| 7.6.1. | Materiais para MJ | 210 |
| 7.6.2. | Áreas de aplicação | 211 |
| 7.6.3. | Vantagens e Desvantagens | 212 |
| 7.7. | Processo por Jato de Cola (<i>Binder Jetting printing process-BJ</i>)..... | 212 |
| 7.7.1. | Materiais para BJ..... | 213 |
| 7.7.2. | Áreas de aplicação | 214 |
| 7.7.3. | Vantagens e Desvantagens | 214 |
| 7.8. | Tecnologia <i>Multi Jet Fusion</i> (MJF) | 215 |
| 7.8.1. | Materiais para MJF | 216 |
| 7.8.2. | Áreas de aplicação | 216 |
| 7.8.3. | Vantagens e Desvantagens | 217 |
| 7.9. | <i>Laminated Object Manufacturing</i> (LOM) e <i>Selective Deposition Lamination</i> (SDL) .. | 218 |
| 7.9.1. | Materiais para LOM..... | 219 |
| 7.9.2. | Áreas de aplicação | 220 |
| 7.9.3. | Vantagens e Desvantagens | 220 |
| | Referências..... | 221 |
| | Bibliografia de consulta | 221 |
| | Referências de figuras e tabelas | 222 |
| 8. | TECNOLOGIAS DE FABRICO ADITIVO DE METAIS | 223 |
| 8.1. | Fusão de leito de pó..... | 228 |
| 8.1.1. | Fusão por Feixe de Eletrões (<i>Electron Beam Melting – EBM</i>)..... | 228 |
| 8.1.2. | Fusão Seletiva por Laser (<i>Selective Laser Melting – SLM</i>) | 230 |
| 8.2. | Deposição por energia direcionada..... | 239 |
| 8.2.1. | Deposição <i>Laser Direta</i> (<i>Direct Laser Deposition – DLD</i>)..... | 242 |
| 8.2.2. | Comparando a Deposição <i>Laser Direta</i> com EBM e SLM | 248 |

| | | |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.3. | Deposição de aglutinante em leito de pó (<i>Binder Jetting – BJ</i>) | 250 |
| 8.4. | Adição ultrasónica de lâminas (<i>Ultrasonic additive manufacturing – UAM</i>) | 253 |
| 8.5. | Deposição aditiva usando fricção (<i>Additive Friction Stir Deposition – AFSD</i>) | 256 |
| | Referências..... | 259 |
| | Referências de figuras e tabelas | 260 |
| 9. | TECNOLOGIAS PARA FABRICO ADITIVO COM CERÂMICOS | 261 |
| 9.1. | Introdução | 265 |
| 9.2. | Generalidades do processamento por FA de materiais cerâmicos | 267 |
| 9.3. | Tecnologias de FA de materiais cerâmicos..... | 272 |
| 9.3.1. | Tecnologias indiretas de FA | 272 |
| 9.3.1.1. | Impressão 3D baseada em Pó (P-3DP)..... | 272 |
| 9.3.1.2. | Sinterização Seletiva a Laser à base de pó (P-SLS)..... | 276 |
| 9.3.1.3. | Estereolitografia (SL)..... | 279 |
| 9.3.1.4. | Processos que utilizam barbotinas: S-3DP e S-SLS | 282 |
| 9.3.1.5. | Fabrico de Objetos Laminados (LOM) | 284 |
| 9.3.2. | Tecnologias diretas de FA | 285 |
| 9.3.2.1. | Impressão Direta por Jato de Tinta (DIP)..... | 285 |
| 9.3.2.2. | Impressão 3D por Extrusão de Filamento: Robocasting, Gravação Direta de Tinta (DIW), Modelação por Deposição Fundida (FDM) | 286 |
| 9.3.3. | Tecnologias de FA negativas | 293 |
| 9.4. | Desenvolvimentos futuros | 295 |
| | Referências..... | 297 |
| 10. | FABRICO ADITIVO DE COMPONENTES MULTIMATERIAL | 299 |
| 10.1. | Conceito e vantagens..... | 301 |
| 10.2. | Materiais, processos e aplicações..... | 304 |
| 10.2.1. | Multimaterial de matriz polimérica..... | 304 |
| 10.2.2. | Multimaterial metal-cerâmico | 310 |
| 10.2.3. | Multimaterial metal-metal..... | 314 |
| 10.3. | Principais desafios e trabalho futuro | 319 |
| | Referências..... | 323 |
| 11. | FABRICO HÍBRIDO | 325 |
| 11.1. | Conceito e vantagens | 327 |
| 11.2. | Equipamentos e exemplos práticos | 331 |
| 11.3. | Desafios futuros..... | 336 |
| | Referências..... | 339 |
| | Referências de figuras e tabelas | 339 |
| 12. | TECNOLOGIA DE CONVERSÃO DE MODELOS..... | 341 |
| 12.1. | Conversão direta..... | 343 |
| 12.2. | Conversão indireta..... | 345 |
| 12.2.1. | Moldes em silicone | 346 |
| 12.2.2. | Moldes rígidos em resina | 347 |
| 12.2.3. | Injeção de ceras | 349 |
| 12.2.4. | Fabrico das carapaças | 349 |
| 12.3. | Conversão de protótipos em peças plásticas..... | 351 |

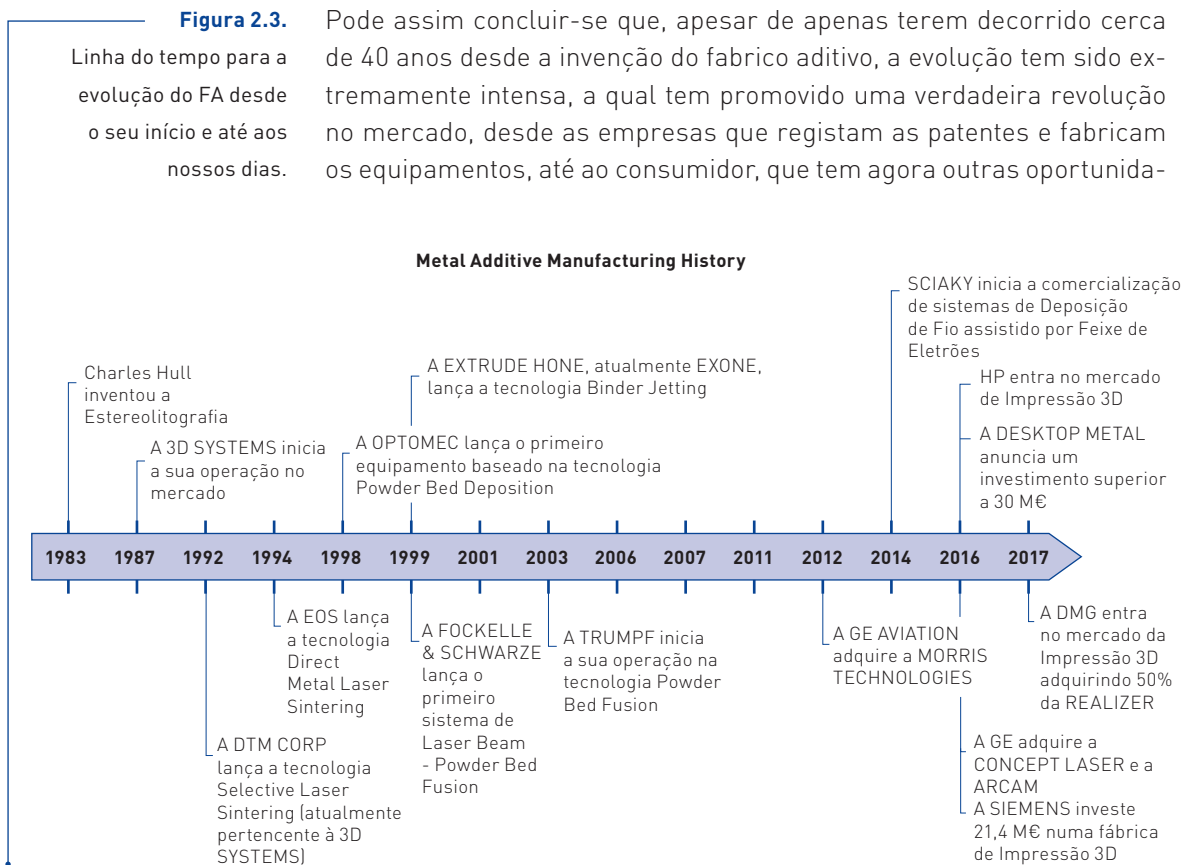
| | | |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 12.4. | Conversão de protótipos em peças metálicas | 353 |
| 12.5. | Conversão de protótipos em peças cerâmicas e de vidro..... | 354 |
| | Referências..... | 356 |
| 13. | ÁREAS DE APLICAÇÃO DO FABRICO ADITIVO..... | 357 |
| 13.1. | Indústria do calçado | 359 |
| 13.2. | Arquitetura e construção civil | 363 |
| 13.3. | Design industrial..... | 365 |
| 13.4. | Covid-19 | 367 |
| 13.5. | Design de moda | 370 |
| 13.6. | Indústria de torneiras..... | 372 |
| 13.7. | Ourivesaria, joalheria e bijuteria | 373 |
| 13.8. | Indústria de transportes..... | 374 |
| 13.9. | Indústria de fundição..... | 376 |
| 13.10. | Indústria da cerâmica decorativa e sanitária..... | 377 |
| 13.11. | Área médica..... | 379 |
| 13.12. | Indústria alimentar..... | 382 |
| 13.13. | Ensino e investigação | 383 |
| 13.14. | Indústria de madeiras | 384 |
| 13.15. | Indústria Náutica | 385 |
| 13.16. | Automação Industrial e robótica | 386 |
| 13.17. | Industria de moldes..... | 387 |
| 13.18. | Indústria aeronáutica..... | 387 |
| | Referências de figuras e tabelas | 389 |
| 14. | GUIA PARA A SELEÇÃO DO PROCESSO MAIS ADEQUADO | 391 |
| 14.1. | Seleção do processo em função da natureza do material | 393 |
| 14.2. | Seleção do processo em função da utilização..... | 394 |
| 14.3. | Seleção do processo em função da aparência visual..... | 395 |
| 14.4. | Seleção do processo pelas capacidades produtivas | 396 |
| | Referências..... | 399 |
| | Outras bibliografia consultada..... | 399 |
| 15. | APLICAÇÕES INFORMÁTICAS PARA FABRICAÇÃO ADITIVA E PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D..... | 401 |
| 15.1. | Introdução | 403 |
| 15.2. | Sistema de fatiamento e geração das camadas do objeto..... | 405 |
| 15.3. | Parâmetros de impressão 3D..... | 406 |
| 15.3.1. | Altura da camada de impressão 3D..... | 406 |
| 15.3.2. | Largura da linha..... | 407 |
| 15.3.3. | Espessura da parede do modelo | 408 |
| 15.3.4. | Preenchimento da superfície interna (<i>Infill</i>) | 408 |
| 15.3.4.1. | Padroes de <i>infill</i> | 408 |
| 15.3.4.2. | Porcentagem de preenchimento..... | 410 |
| 15.3.5. | Configuração e geração de estruturas de suporte..... | 411 |
| 15.3.5.1. | Parâmetros de configuração das estruturas de suporte..... | 412 |
| 15.3.6. | Configurações de adesão à plataforma de construção..... | 414 |
| 15.3.6.1. | Aba (<i>Brim</i>) | 415 |

| | | |
|------------|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 15.3.6.2. | Jangada (<i>Raft</i>)..... | 416 |
| 15.3.6.3. | Saia (<i>skirt</i>)..... | 416 |
| 15.3.7. | Configuração do material de impressão | 417 |
| 15.3.7.1. | Diâmetro do Filamento..... | 417 |
| 15.3.7.2. | Fluxo | 417 |
| 15.3.7.3. | Temperatura de impressão | 417 |
| 15.3.7.4. | Outros parâmetros | 418 |
| 15.3.8. | Configuração de velocidade de extrusão..... | 419 |
| 15.3.9. | Velocidade de movimentos no vazio | 420 |
| | Referências..... | 421 |
| | Referências de figuras e tabelas | 421 |
| 16. | OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA | 423 |
| 16.1. | Conceito de otimização topológica e aplicabilidade ao FA..... | 425 |
| 16.2. | Exemplo de aplicação da otimização topológica | 431 |
| 16.3. | Resultados de outros casos de estudo..... | 439 |
| | Referências..... | 440 |
| 17. | MÉTODOS DE TESTE EM COMPONENTES OBTIDOS POR FABRICO ADITIVO | 441 |
| 17.1 | Controlo | 444 |
| 17.2. | Ensaio de componentes obtidos por FA | 445 |
| 17.2.1. | Aparência | 446 |
| 17.2.2. | Textura superficial | 447 |
| 17.2.3. | Cor..... | 447 |
| 17.2.4. | Dimensões e tolerâncias dimensionais e geométricas | 448 |
| 17.2.5. | Dureza | 448 |
| 17.2.6. | Resistência à tração..... | 451 |
| 17.2.7. | Resistência ao impacto..... | 456 |
| 17.2.8. | Resistência à compressão | 458 |
| 17.2.9. | Resistência à flexão | 459 |
| 17.2.10. | Resistência à fadiga..... | 460 |
| 17.2.11. | Fluência..... | 463 |
| 17.2.12. | Envelhecimento | 464 |
| 17.2.13. | Coefficiente de atrito e desgaste | 464 |
| 17.2.14. | Resistência ao corte..... | 466 |
| 17.2.15. | Resistência à propagação de uma fenda..... | 468 |
| 17.2.16. | Densidade | 469 |
| 17.2.17. | Exame radiográfico e tomografia computadorizada | 470 |
| 17.2.18. | Líquidos penetrantes | 472 |
| 17.2.19. | Magnetoscopia | 473 |
| | Referências..... | 478 |
| 18. | DEFEITOS NA IMPRESSÃO 3D DE METAIS EM LEITO DE PÓ..... | 481 |
| 18.1. | Defeitos no FA de metais em leito de pó | 484 |
| 18.1.1. | Porosidade | 484 |
| 18.1.2. | Fissuração..... | 489 |
| 18.1.2.1. | Fissuração na solidificação | 490 |

| | | |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------|
| 18.1.2.2. | Fissuração de liquação..... | 494 |
| 18.1.2.3. | Fissuração por baixa ductilidade | 494 |
| 18.1.2.4. | Fissuração no reaquecimento após produção | 495 |
| 18.1.2.5. | Fissuração por envelhecimento | 496 |
| 18.1.2.6. | Fissuração lamelar..... | 496 |
| 18.1.2.7. | Fissuração induzida pelo hidrogénio | 497 |
| 18.1.3. | Distorção e falta de precisão geométrica | 498 |
| 18.1.4. | Rugosidade..... | 499 |
| 18.1.5. | Perda de elementos de liga | 502 |
| | Referências..... | 504 |
| 19. | PERSPETIVAS DE MERCADO | 505 |
| 19.1. | Limitações atuais à evolução dos processos de FA e oportunidades..... | 509 |
| 19.2. | Perspetivas de crescimento para o FA..... | 511 |
| 19.2.1. | Indústria aeroespacial e aeronáutica | 512 |
| 19.2.2. | Indústria médica | 515 |
| 19.3. | Expectativas de desenvolvimento por classe de materiais | 517 |
| 19.3.1. | Expetativas para o FA com materiais poliméricos | 517 |
| 19.3.2. | Expetativas para o FA com ligas metálicas | 522 |
| | Referências..... | 526 |
| | ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS..... | DXXVII |
| | NOTAS SOBRE OS AUTORES | DXLV |

3D no espaço. Em 2015, a empresa sueca Cellink, apresenta comercialmente a primeira bio-tinta padronizada, extraída a partir de algas marinhas, chamada alginato não celulose. A bio-tinta pode ser usada para imprimir cartilagem de tecidos, perspetivando uma forte evolução na área da biomedicina e engenharia biomédica. Ainda nesse mesmo ano, a mesma empresa Cellink lança uma impressora com a designação 3D INKREDIBLE, capaz de realizar serviços de bioimpressão, criando um mercado acessível para bioimpressão. Em 2019, depois da maioria das patentes terem expirado e de terem surgido inúmeros projetos de código aberto, existem no mercado mais de 170 fabricantes de sistemas de impressão 3D em todo o mundo. Esta lista inclui empresas tais como a 3D Systems, Stratasys, Fusion3, Formlabs, Desktop Metal, Prusa e Voxel8, entre muitas outras. A evolução em novos materiais para FA está em constante evolução, desde o laboratório de Daniel Kelly onde são produzidos ossos por FA, até a *startup* francesa XtreeE, que imprime betão em 3D, revolucionando a indústria da construção. Efetivamente, no que diz respeito à aplicação do FA na construção civil, a impressão 3D de betão passou a ser real, e as famílias poderão começar a ter acesso a habitações construídas através de FA. O ano de 2018 ficou marcado pelo facto de uma família ter começado a habitar uma casa completamente realizada por FA. A casa tem 95 metros quadrados e estava perfeitamente habitável, tendo levado apenas dois dias para ser impressa/construída. De uma forma resumida, os factos atrás descritos podem ser sintetizados numa linha do tempo, conforme o ilustrado na Figura 2.3.

Figura 2.3. Linha do tempo para a evolução do FA desde o seu início e até aos nossos dias.

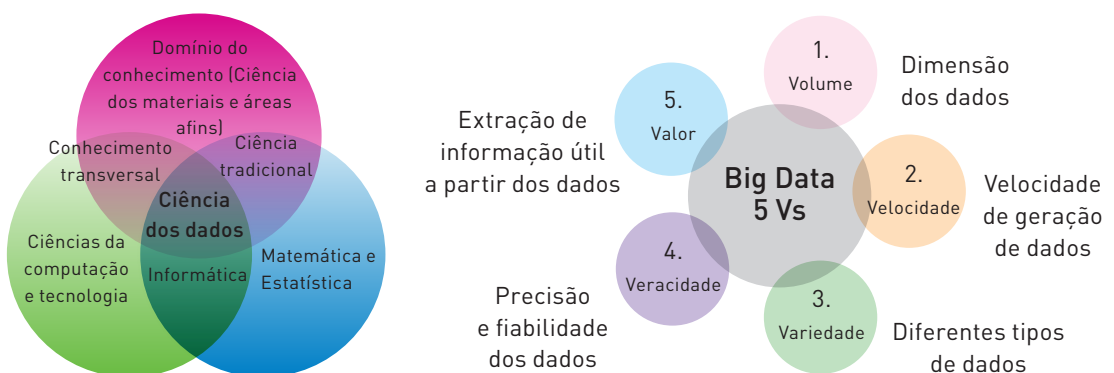


Algumas outras abordagens combinando os métodos orientados pela física e os de suporte experimental têm sido desenvolvidas, as quais são detalhadas por Smith *et al.* [28]. As abordagens baseadas na física fornecem uma série de vantagens e desvantagens que serão discutidas adiante. Outra possível abordagem para modelar a correlação entre parâmetros do processo, estruturas e propriedades no FA é a dos modelos baseados em dados, já atrás referidos, que indicam quais as propriedades previstas em função das condições programadas para o processo (por exemplo, parâmetros de processamento a *laser*, localização de uma peça na placa de impressão, fluxo de gás na impressora, etc.). Tais modelos utilizam técnicas específicas suportadas em bases de dados ou algoritmos de pesquisa de dados, por exemplo, para, em função de dados anteriormente reportados estabelecerem previsões para condições ainda não experimentadas, sendo capazes de prever o comportamento de componentes de metal que são fabricados usando parâmetros de processamento específicos, sem a necessidade de identificar explicitamente o modelo constitutivo que rege o seu comportamento. A modelação baseada em dados reportados pela ciência de materiais, abrange diferentes domínios do conhecimento, nomeadamente a ciência de materiais, matemática e estatística, ciência da computação e tecnologia. A geração de *big data* usada nessas técnicas deverá ser caracterizada pelos 'cinco V' (volume, velocidade, variedade, veracidade e valor) (Figura 5.2.). Só assim poderá ser gerado conhecimento que possa ser útil num curto espaço de tempo para novos desenvolvimentos, sendo este facilmente disseminado pela comunidade que possui efetivo interesse nesses dados.

Os métodos assentes em dados prévios, comumente usados na investigação das correlações entre parâmetros do processo, estruturas e propriedades no FA, incluem uma série de técnicas que imitam a inteligência humana, também conhecidas como inteligência artificial, a qual inclui novas vertentes como o estudo através de redes neuronais ou a aprendizagem por parte de máquinas. No entanto, devido aos processos de FA ainda serem muito recentes, mesmo existindo já muita investigação em torno dos mesmos, ainda não é possível ter a quantidade de dados necessários para que os modelos possam prever com margem de erro muito diminuta as propriedades de uma dada peça em fun-

Figura 5.2.

A importância dos dados no desenvolvimento de modelos de simulação.



Mas afinal, qual é princípio da fotogrametria? Para que a magia aconteça é necessário que se disponha de uma câmara fotográfica digital. O processo tem início com a preparação do projeto, tendo como base as particularidades do objeto a ser varrido, onde são definidos aspetos como os instrumentos a serem utilizados, a localização das câmaras ou o planeamento das fotografias a serem capturadas, com objetivo de se promover uma boa aquisição geométrica. A etapa seguinte consiste na obtenção das fotografias, as quais devem ser registadas de diferentes pontos de vistas, ou ângulos (Figura 6.4.). Uma vez obtidas as vistas 2D do elemento, o próximo passo é o tratamento das imagens num *software* especializado para fotogrametria. Com a determinação da posição das câmaras, relativa ao componente digitalizado, o sistema computacional faz o alinhamento das fotografias, conduzido por sobreposições e pontos homólogos entre cada uma delas e, com base no princípio de triangulação, combina essas características para a construção do modelo 3D, convertendo as fotografias numa nuvem de pontos. Em seguida, a nuvem de pontos é utilizada para criar malhas triangulares, a partir das quais se geram superfícies e por fim o CAD 3D (26–30). Um esquema do processo de fotogrametria é apresentado na Figura 6.5.

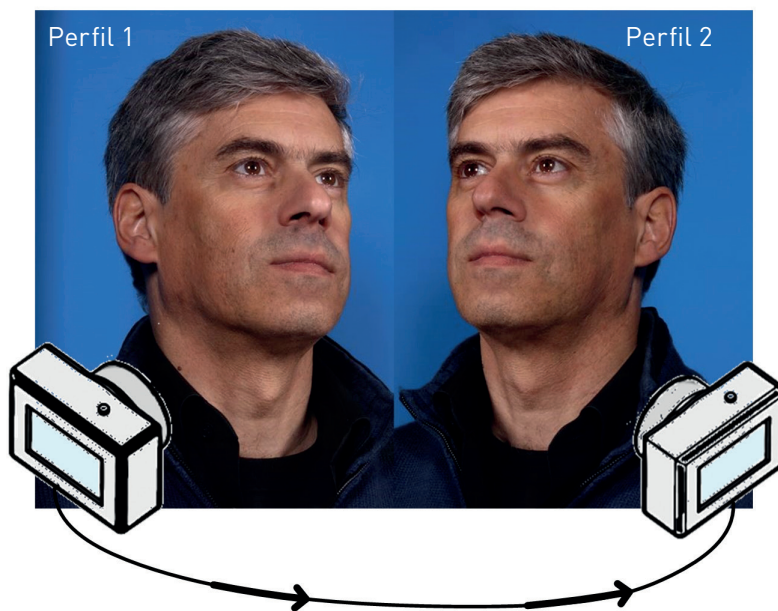


Figura 6.4.

A mesma face fotografada em diferentes ângulos.

A fotogrametria é uma tecnologia de varrimento 3D de fácil aplicação e de baixo custo, comprovada pela simplicidade dos equipamentos utilizados para a aquisição das imagens e pela variedade de *softwares* livres disponíveis para o processamento dos dados (COLMAP, Meshroom, Regard3D, VisualSFM, entre outros). Estes factos tornaram a técnica popular e acessível a um grande público, que não se limita a técnicos especializados (30–32). Relativamente aos equipamentos, o conceito de acessibilidade torna-se ainda maior, já que além das câmaras fo-

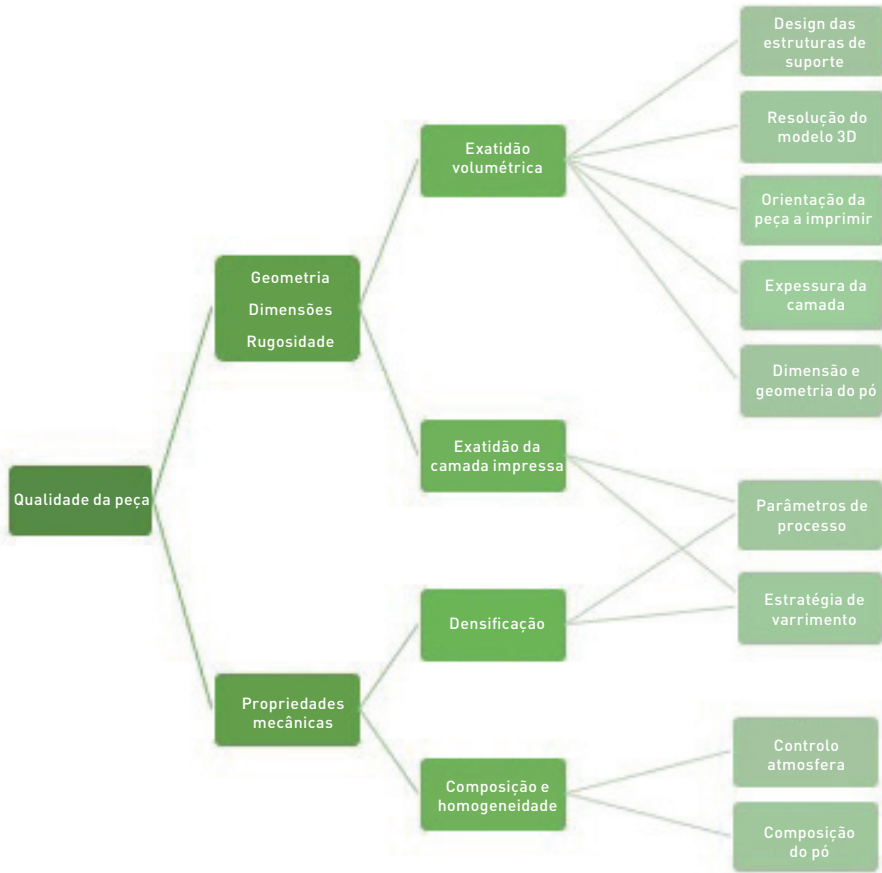


Figura 8.8. Principais variáveis, parâmetros e condições tecnológicas envolvidas no fabrico por SLM e sua influência na qualidade da peça.

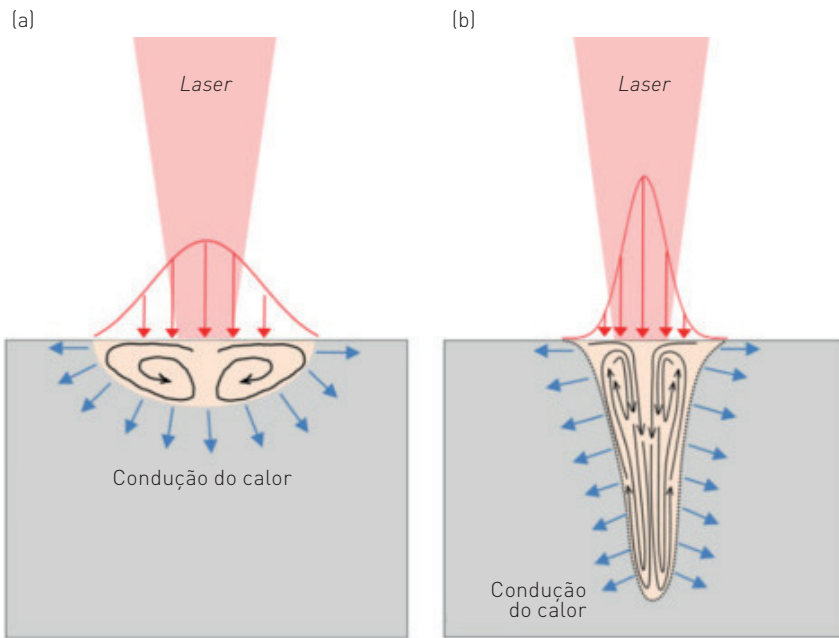


Figura 8.9. Mecanismos de formação da poça de fusão durante a Fusão Seletiva por *Laser*: (a) modo de condução e (b) modo keyhole (adaptado de Balbaa *et al.*, 2020)

Tabela 10.1. Componentes multimaterial produzidos através de fabrico aditivo: estudos, materiais, processos e propriedades.

| Composição | Processo | Diferenças nas propriedades | Referências |
|----------------------------------------------------------------|----------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Multimaterial de matriz polimérica | | | |
| PLA + Fibra de Carbono | FDM | Aumento da resistência à flexão e do módulo de elasticidade | (Tian, Liu, Yang, Wang, & Li, 2016) |
| ABS + Fibra de Carbono | FDM | Aumento da resistência mecânica e do módulo de elasticidade | (Tekinalp et al., 2014) |
| ABS + Cobre | FDM | Aumento da condutividade térmica e redução da resistência à tração | (Hwang, Reyes, Moon, Rumpf, & Kim, 2015) |
| PCL + TCP | FDM | Aumento da osteocondução, da bioactividade e da não-toxicidade | (Rai et al., 2004) |
| ABS + Al e Al2O3 numa matriz de Nylon | FDM | Redução do coeficiente de atrito | (Boparai, Singh, & Singh, 2015) |
| ABS + BaTiO3 and PP + CaTiO3 | FDM | Aumento da permissividade dielétrica e frequência de ressonância controlável | (Isakov et al., 2016) |
| Resina curada por UV + Al2O3 | SLA | Aumento da permissividade dielétrica | (Kurimoto et al., 2015) |
| Resina à base de acrilato + Micropartículas de diamante | DLP | Aumento da transferência de calor | (Kalsoom, Peristyy, Nesterenko, & Paull, 2016) |
| Multi-material de metal-cerâmico | | | |
| Aço 420 + TiC | SLM | Aumento da dureza e tensão de rutura, e diminuição da deformação | (Liu, Tang, Hu, Zhang, & Zhang, 2020) |
| Aço 420 + TiN | SLM | Aumento da dureza e tensão de rutura, e diminuição da deformação | (Zhao et al., 2019) |
| Aço 316 + WC-12%Co | LC | Aumento da dureza e diminuição do desgaste | (Balla, Bose, & Bandyopadhyay, 2010) |
| AZ91D + Al+SiC | LC | Aumento da dureza e diminuição do desgaste | (Zheng, Chen, & Lian, 2010) |
| Ti6Al4V + TiC | LMD | Aumento da dureza e tensão de rutura | (Li, Wang, Lin, & Liu, 2017) |
| Aço 316 + BN | LENS | Aumento da dureza e diminuição da porosidade | (Heer, Sahasrabudhe, Khanra, & Bandyopadhyay, 2017) |
| Aço 316 + YS-Zr | LENS | Aumento da dureza | (Balla, Bandyopadhyay, Bose, & Bandyopadhyay, 2007) |
| Titânio + Zircônia | LENS | Diminuição do desgaste e aumento da dureza e da adesão celular | (Balla, Xue, Bose, & Bandyopadhyay, 2009) |
| Multi-material de metal-metal | | | |
| Aço 316L + CuSn10 | SLM | Melhoria da capacidade de transferir calor | (Chen et al., 2020) |
| Ti6Al4V + NiTi | SLM | Potencial melhoria na relação mecanicobiológica entre osso e implante | (Bartolomeu, Costa, Alves, Miranda, & Silva, 2020) |
| Fe + Al-12Si | SLM | Aumento da dureza | (Demir & Previtali, 2017) |
| Inconel 718 + Cobre | LENS | Aumento da difusividade térmica | (Onuike, Heer, & Bandyopadhyay, 2018) |
| Inconel 718 + Ti6Al4V | LENS | Potencial melhoria para aplicações na indústria de energia | (Scaramuccia, Demir, Caprio, Tassa, & Previtali, 2020) |
| Ti6Al4V + CoCrMo | LENS | Aumento da dureza, da resistência ao desgaste e proliferação celular | (Espana, Balla, Bose, & Bandyopadhyay, 2010) |
| Aço 316L + Aço 430 | DED | Funcionalidade de magnetismo | (Heer & Bandyopadhyay, 2018) |

14.1. Seleção do processo em função da natureza do material

Quando se pretende fabricar uma peça ou componente por fabrico aditivo o primeiro critério a considerar deve ser o material no qual se pretende obter a peça, se esta vai ser em polímero, metal ou outro material.

No caso de se pretender obter a peça em polímero, deve-se analisar se esta pode ou deve ser num termoplástico e deste modo opta-se por fabricar a peça por FDM ou por SLS, mas no caso de se optar por fabricar a peça em resina, então as tecnologias recomendadas são a SLA, a DLP ou a *Material Jetting*. Recorde-se ainda que esta última tecnologia (MJ) permite o fabrico de peças em resinas digitais que apresentam as mesmas propriedades que alguns termoplásticos, como por exemplo o digital ABS e o digital PP.

No caso de se pretender obter uma peça metálica, devem-se considerar quais as tecnologias disponíveis para o processamento de determinado material. Por exemplo as ligas de titânio, níquel, crómio e etc, podem ser processadas por tecnologias de leito de pó (PBF) ou de deposição de energia (DED), já as ligas de alumínio não costumam ser processadas por tecnologias de DED, mas podem ser processadas por tecnologias de BMD (*Bound Metal Deposition*), as quais por sua vez não são utilizadas para processar peças obtidas em ligas de titânio.

A figura 14.1., pretende ajudar a expor as ligações entre a natureza do material pretendido para a peça e a tecnologia recomendada e vice versa.

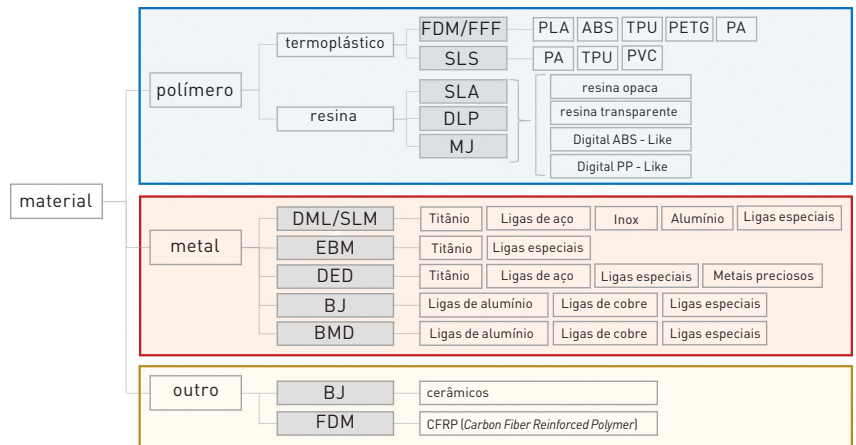


Figura 14.1. Seleção do processo em função do material pretendido [adaptado de Varotsis, 2018].

Figura 17.8.

Gráfico típico tensão-deformação de um metal submetido ao ensaio de tração.

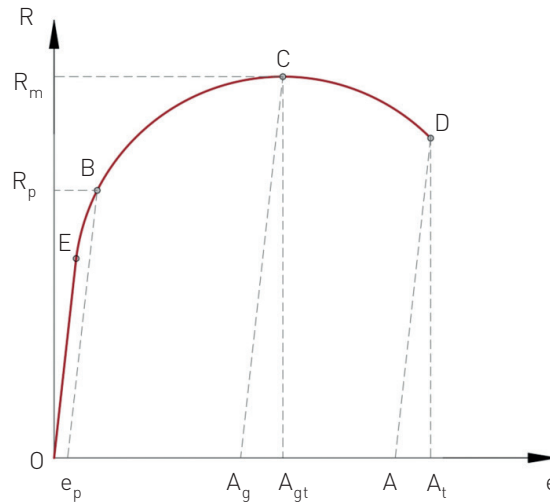


Tabela 17.2. Definições da nomenclatura usada na Figura 17.8, segundo a norma ISO 6892-1:2019.

| Nomenclatura | Definição |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| e (ou ε) | Extensão (ou deformação) |
| e_p | Extensão permanente especificada |
| A_g | Extensão permanente na força máxima |
| A_{gt} | Extensão total na força máxima |
| A | Extensão após rutura |
| A_t | Extensão total na rutura |
| O - E | Módulo de elasticidade (inclinação) |
| B | Ponto limite convencional de proporcionalidade (ou de elasticidade) |
| C | Ponto de força máxima |
| D | Ponto de rutura |
| R_p (ou σ_e) | Tensão limite convencional de proporcionalidade |
| R_m | Tensão de rutura |
| R (ou σ) | Tensão |

O declive da reta OE representa o módulo de elasticidade do material ou módulo de Young, E . No ponto E, atinge-se o limite do comportamento linear, sendo a tensão correspondente designada por tensão limite de proporcionalidade, a partir da qual, regra geral, não é aplicável a lei de Hooke (relação elástica) como lei constitutiva [Equação [17.6.]]. No ponto C, o material atinge a tensão máxima, no qual este começa a entrar em estrição. Convencionalmente, o limite elástico de um material ocorre no ponto B, correspondendo-lhe a denominada tensão limite de elasticidade, σ_e , também conhecida por tensão de cedência. As deformações elásticas não são permanentes, ou seja, quando a carga é retirada, o provete retorna ao seu formato original. A localização do ponto E é de difícil leitura, pelo que se convencionou definir a tensão limite de elasticidade σ_e a 0,2% de deformação como valor a utilizar em cálculos de engenharia.

Para garantir que há fusão total do pó, é normal recorrer ao modo *keyhole*, facto que invalida a utilização do parâmetro d (espessura) na equação [18.1]. Acresce que, para cada material e comprimento de onda de *laser*, há um valor ideal de energia, no qual a porosidade é mínima, razão que torna a formulação mais complexa. Surge assim a equação [18.2] [6].

$$DVE_f = C \frac{P}{v} \quad (18.2)$$

Onde:

– DVE_f é a reformulada densidade volumétrica de energia do feixe, em J/mm^3 .

– P é a potência do feixe, em W.

– v é a velocidade de deslocamento do feixe, em mm/s.

O valor de C depende do material e do feixe, e é calculado pela equação [18.3].

$$C = \frac{\beta}{h v \alpha \Phi} \quad (18.3)$$

Onde:

– β é a absorvidade, ou seja, é a fração de irradiação total incidente que é absorvida. É, portanto, um valor adimensional entre 0 e 1, sendo a quantidade restante repartida entre a refletividade e a transmissividade.

– h é o espaçamento entre feixes consecutivos durante o varrimento, em mm.

– Φ é o diâmetro do feixe, em mm.

– α é a difusividade térmica, em mm^2/s , e é dado pela equação [18.4].

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (18.4)$$

Onde:

– k é a condutividade do material, em $\frac{W}{mm K}$.

– ρ é a massa volúmica, em kg/mm^3 .

– C_p é o calor específico, em $\frac{J}{kg K}$.

De forma bastante interessante, verifica-se que para o FA de ligas de alumínio, a DVE_f é bastante baixa, na ordem dos $4 J/mm^3$. A principal razão é que, contrariamente ao que acontece na soldadura *laser* de alumínio, aqui a absorvidade do pó é muito alta, devido às múltiplas reflexões e absorções entre partículas [6]. Ainda assim, atendendo a que a DVE é normalmente da ordem dos $30 J/mm^3$ a $300 J/mm^3$ (ver, por exemplo, [7]), este é um assunto claramente em aberto e alvo de futuros estudos.

IMPRESSÃO TECNOLOGIAS, MATERIAIS E APLICAÇÕES

3D

FRANCISCO SILVA (COORDENADOR)
FLÁVIO BARTOLOMEU
TERESA DUARTE
JORGE LINO ALVES
GEORGINA MIRANDA
RUI NETO
ANTÓNIO BASTOS PEREIRA
CARLOS RELVAS
LEONARDO SANTANA
MIGUEL TERROSO

Sobre a obra

Esta obra pretende ser uma referência atualizada no âmbito da Manufatura/Fabrica Aditivo/Impressão 3D em Portugal, com uma perspetiva alargada quanto a tecnologias, materiais e aplicações, desenvolvida de forma integrada e com objetivos predominantemente pedagógicos.

O objetivo fundamental é que, acompanhando os desenvolvimentos tecnológicos e de mercado, esta obra possa cobrir as necessidades presentes em termos didáticos e científicos, podendo evoluir em edições futuras, de forma a manter-se atualizada e pertinente.

Sobre os autores

Coordenada pelo Prof. Francisco Silva (ISEP-IPP), esta obra conta com a participação de Professores especialistas nesta matéria, de instituições de ensino superior como a Universidade de Aveiro (UA), a Universidade do Porto (UP), a Universidade do Minho (UM), o Instituto Politécnico do Cávado e do Ave (IPCA), o Instituto Politécnico do Porto (IPP) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC/ Brasil).

Apoio

 **REIMAN**[®]

 **Centimfe**
Centro Tecnológico da Indústria de Moldes,
Ferramentas Especiais e Plásticos

 **Gistotica**
Mechanical Solutions

 **U. PORTO**
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

ISEP INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA DO PORTO

 universidade de aveiro
theoria poiesis praxis

 **SPM** 



 **IPCA**
INSTITUTO POLITÉCNICO
DO CÁVADO E DO AVE

Universidade do Minho



engebook