FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO
ESCOLA SUPERIOR DE ARTES E DESIGN DE MATOSINHOS

APLICAÇÃO DE PÓ DE MADEIRA NO FABRICO DE PROTÓTIPOS POR PROTOTIPAGEM RÁPIDA

RUI PEDRO OLIVEIRA SIMÕES
LICENCIADO EM ENGENHARIA MECÂNICA
pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em
Design Industrial

Dissertação realizada sob a supervisão de
Professor Doutor Fernando Jorge Lino Alves,
do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Novembro de 2006

Aos meus Pais, Irmã e Xai

Sumário

Em Portugal e, em especial, no seio do *cluste*r das indústrias de transformação da madeira existem empresas distintas. São autênticos ateliers de madeira, cuja especificidade dos trabalhos desenvolvidos, no que respeita ao uso de madeiras nobres (espécies de crescimento lento, de elevada densidade, com cores, texturas e odores peculiares) na produção de mobiliário, objectos e esculturas, colocam de parte o conceito de peça vulgar, muitas vezes associada ao uso daquele nobre material. Após concepção e produção, essas peças distinguem-se de outras pela sua beleza estética e pelo seu valor comercial.

Os modernos centros de maquinagem por controlo numérico (CNC´s), utilizados nessas empresas, permitem reproduzir facilmente, formas orgânicas de geometria complexa, frequentemente idealizadas por arquitectos, designers e artistas. Contudo, a sua operação conduz a desperdícios que não são devidamente valorizados, quando confrontados com o elevado custo das matérias-primas donde são provenientes. As inúmeras operações de desbaste necessárias à extracção da peça desejada do interior de um bloco de madeira maciça gera subprodutos, com um aspecto granular (semelhante a pós), cuja dimensão e forma variam em função da espécie arbórea utilizada assim como da geometria da ferramenta de corte, aplicada no processo.

O *background* tecnológico apreendido sobre a realidade actual da Impressão Tridimensional (3DP) assim como das suas principais limitações, e a lacuna existente na utilização de pós de madeiras nobres como material de construção de peças de índole artística, motivou o autor a substituir os pós de natureza polimérica por outros, de natureza lenho-celulósica (madeira) e, com recurso a eles, produzir novas peças, comercialmente competitivas, utilizando os princípios fundamentais do *fabrico rápido* em associação com as principais *tecnologias de conversão*.

Palavras-chave:
Madeira, Pó de Madeira, Fabrico Rápido e Desenvolvimento de Produto.

Abstract

In Portugal and inside the wood transforming industry *cluster* there are distinct companies, authentic *wood ateliers*, whose specificity of certain works, concerning the use of *noble woods* (woods from species with slow growth, high density, colours textures and smells very peculiars) in the production of furniture, objects and sculptures, put of side the *common artefact* concept, many times associated to the use of this noble material. After conception and production, these *parts* enhance themselves from others by aesthetic beauty and commercial value.

The modern numerical control centres (CNC´s), used in those companies, are able to reproduce, in a very easy way, organic shapes of complex geometry, frequently idealized by architects, designers and artists; however they produce leftovers that are not properly valorised, regarding the high cost of the raw materials. The innumerable roughing operations that are necessary to extract the desired part from the inside of the massive wood block generates sub-products with a granular aspect (like powder) which dimension and shape varies as function of the wood species, as well as the geometry of the cutting tool, employed in the process.

The acquired background about the actual technological reality of *3D Printing* and its limitations, and the existing gap of reusing leftovers (powders) of noble woods for production of artistic masterpieces, conduced the author to replace the plastic powder by others, of wood nature, and produce new challenging parts, using the principles of additive manufacturing.

Keywords:
Wood, Wood Powder, Rapid Manufacturing, Product Development.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, o meu reconhecimento ao Professor Fernando Jorge Lino Alves, cujos níveis pedagógicos e científicos mereciam certamente, de minha parte, uma resposta com outra qualidade. Pelos conselhos amigos e disponibilidade constante, o meu sincero muito obrigado.

Gostaria de agradecer a todos aqueles que integram a empresa Serafim Pereira Simões Sucessores, Lda. (SPSS Lda.), pelo apoio incondicional concedido e, sobretudo, ao meu Pai pela disponibilidade de meios materiais e tecnológicos necessários à concretização desta tese. Não posso deixar de frisar a qualidade do trabalho desenvolvido diariamente neste autêntico *atelier de carpintaria* que, em muito contribuiu e inspirou o tema abordado nesta dissertação.

Ao Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI), nomeadamente ao Sr. Eng.º. Rui Neto, director da Unidade de Fundição e Novas Tecnologias (CETCOFF) que, embora não tenha tido uma participação activa no trabalho desenvolvido contribuiu com a disponibilização de meios materiais e humanos, fundamentais à realização do trabalho em questão.

Quero agradecer particularmente aos Eng.os Paulo Nóvoa, Rui Félix e Ricardo Paiva, à Armanda Teixeira e ao Sr. Sertório, do CETCOFF, pela colaboração prestada ao longo da realização do trabalho experimental. A todos os que, integrando esta Unidade, são responsáveis pela boa dinâmica, imprescindível ao desenvolvimento de qualquer tipo de trabalho, manifesto igualmente o meu apreço.

Ao Sr. *Van Keer*, da multinacional *Dow Chemicals*, pela disponibilização de algumas amostras de resina fotosensível *Cyracure*™.

Agradeço ao Sr. *Beate Poulson*, da empresa alemã *Microdrop*, toda a informação disponibilizada sobre sistemas de deposição automática de fluidos.

Finalmente um agradecimento especial aos meus pais, irmã e amigos próximos pelo apoio, compreensão e paciência demonstrados perante a minha ausência ao longo da realização deste trabalho.

Índice Geral

Sumário v

Abstract vii

Agradecimentos ix

Índice Geral xi

Lista de Figuras xv

Lista de Tabelas xix

Lista de Símbolos xxi

Capítulo 1. Introdução 1

1.1 Inovação e desenvolvimento sustentável 1

1.2 Criação aditiva, um conceito intrínseco à natureza 14

1.3 Um material nobre, *a madeira* 19

1.3.1 A vitalidade do material 19

1.3.2 A aplicabilidade actual 21

1.4 A madeira no *design* de mobiliário e objectos 23

1.5 O papel da prototipagem rápida no desenvolvimento de novos produtos 34

1.5.1 Novos materiais 35

1.5.2 Aquisição de equipamento de PR *vs* aquisição de serviços de PR 36

1.5.3 Selecção de um equipamento de PR 37

1.5.4 Da Califórnia para o mundo 37

1.6 Objectivos do trabalho 39

Capítulo 2. A madeira como material de engenharia 43

2.1 A natureza da madeira 46

2.1.1 Formação do lenho 47

2.1.2 Fisiologia e crescimento das árvores 47

2.1.3 Estrutura anatómica do lenho 50

2.2 Textura da madeira 52

2.3 Propriedades sensitivas da madeira 53

2.3.1 Cor 53

2.3.2 Brilho 54

2.3.3 Gosto e cheiro 54

2.4 Características físicas e mecânicas da madeira 54

2.4.1 Características físicas 56

2.4.2 Características mecânicas 62

2.5 Preservação da madeira 65

2.6 Produtos derivados da madeira 68

2.6.1 Painéis de base madeira 68

2.6.2 Compósitos de fibras de madeira com termoplásticos (*WPC – Wood Plastic Composits*) 77

Capítulo 3. Desenvolvimento de modelos e protótipos 85

3.1 Modelos e protótipos 86

3.1.1 *Mockups*, modelos e protótipos *vs* maquetas 86

3.1.2 A tecnologia no *design* 87

3.1.3 A modelação 3D 87

3.1.4 Os protótipos e a tecnologia 89

3.2 Prototipagem rápida 90

3.2.1 Introdução 90

3.2.2 Processamento da informação gráfica 92

3.2.3 Processos de prototipagem rápida 93

3.2.3.1 Impressão tridimensional (*TDP*) 93

3.2.3.2 PolyJet 98

3.2.3.3 Sinterização selectiva por laser (SLS) 100

3.2.4 Tecnologias de conversão 103

3.2.4.1 Vazamento sob vácuo em moldes de silicone 103

3.3 Fabrico rápido 106

3.3.1 Âmbitos de aplicação 107

3.3.2 Liberdade no *design* 107

3.3.3 Aspectos económicos relacionadas com a produção personalizada 108

3.3.4 O "legado" da prototipagem rápida 109

3.3.5 O fabrico rápido como tecnologia disruptiva 110

Capítulo 4. Trabalho experimental 111

4.1 Deposição aleatória de *cianoacrilato* sobre pó de madeira 111

4.2 Simulação manual do processo de impressão tridimensional da *ZCorp*™ 112

4.2.1 Caracterização da resina de *poliéster* 112

4.2.2 Material utilizado no *set* de experiências 114

4.2.3 Preparação da resina 116

4.2.4 Preparação do pó de madeira 117

4.2.5 Caracterização do *set* experimental 118

4.2.6 Análise dos resultados obtidos 118

4.3 Vazamento em moldes de silicone – experiência com resinas de *poliéster* e *epoxídica* 120

4.3.1 Selecção de uma peça 120

4.3.2 Modelação tridimensional 122

4.3.3 Construção dos moldes em silicone 123

4.3.3.1 Preparação da caixa 123

4.3.3.2 Selecção e preparação do silicone 124

4.3.4 Caracterização do *set* experimental 126

4.3.5 Caracterização e preparação da resina *epóxica* 127

4.3.6 Análise dos resultados obtidos 129

4.4 Ensaio mecânico de flexão 132

4.4.1 Preparação do ensaio mecânico 133

4.4.2 Análise gráfica dos resultados obtidos 136

4.5 Complemento experimental com resina fotosensível 139

Capítulo 5. Equipamento de *fabrico rápido* 145

5.1 Deposição automática de fluidos 146

5.1.1 Conceitos fundamentais 146

5.1.2 Tecnologias disponíveis 149

5.2 Equipamento de *fabrico rápido* 152

5.2.1 Abordagens conceptuais de funcionamento 154

5.2.2 Abordagem formal do equipamento 158

Capítulo 6. Conclusões e considerações futuras 161

Bibliografia 165

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Contribuição do mundo empresarial *versus* mundo natural 3

Figura 1.2 – Incorporação de preocupações sustentáveis durante o processo de inovação 4

Figura 1.3 – Interesses internos e externos influenciam o processo de inovação 5

Figura 1.4 – Parâmetros condicionadores do processo criativo 6

Figura 1.5 – Atenuação do risco de mercado através da ponderação de visões externas 10

Figura 1.6 – Ribossomo, a "máquina" molecular 14

Figura 1.7 – Equipamento de PR *Z510 System*; exemplos de protótipos 18

Figura 1.8 – *Le petit cabanon* (*Le Corbusier*, 1950) 22

Figura 1.9 – Secretária Borboleta (*Henri Van de Velde*) 24

Figura 1.10 – Escrivaninha em madeira de carvalho (*Hoffmann,* 1905) 25

Figura 1.11 – Mesa (*Mackintosh*, 1918) 26

Figura 1.12 – *Chaise Longue* (*Alvar Aalto*) 28

Figura 1.13 – *Long Chair* (*Charles Eames*) 29

Figura 1.14 – Mesinha (*Carlo Mollino*) 30

Figura 1.15 – Cadeira C2 e Cómoda 1 (Álvaro Siza) 31

Figura 1.16 – Pavilhão *Serpentine* (Álvaro Siza e Souto Moura, 2005) 32

Figura 1.17 – Banco e Cadeira *Serpentine* (Álvaro Siza e Souto Moura, 2005) 33

Figura 1.18 – Unidades vendidas anualmente de sistemas de PR, a nível mundial 38

Figura 2.1 – Representação gráfica da humidade da madeira em equilíbrio higroscópico 44

Figura 2.2 – Representação esquemática da deformação segundo o tipo de corte 45

Figura 2.3 – Diferentes tipos de planos de corte de troncos de madeira 45

Figura 2.4 – Corte transversal do tronco duma árvore 47

Figura 2.5 – Cortes principais no tronco de uma árvore 49

Figura 2.6 – Estrutura anatómica das Resinosas 51

Figura 2.7 – Estrutura anatómica das Folhosas 52

Figura 2.8 – Contracção e distorção características de peças em madeira 59

Figura 2.9 – Painéis de partículas 73

Figura 2.10 – Painéis de partículas OSB (1) e sem orientação definida (2) 75

Figura 2.11 – Painéis de fibras de densidade média – MDF 75

Figura 2.12 – Painéis madeira-cimento 76

Figura 2.13 – Painéis em baquelite 77

Figura 2.14 – Exemplo de produtos derivados de *WPC* 82

Figura 3.1 – Equipamento de desenho 88

Figura 3.2 – Efeito de escada no fabrico de protótipos por prototipagem rápida 91

Figura 3.3 – Evolução do modelo CAD 3D até à obtenção do protótipo 92

Figura 3.4 – Sequência de operações necessárias num processo de impressão 3D 95

Figura 3.5 – Equipamento de PR *Z510 System*; exemplo de um protótipo 97

Figura 3.6 – Representação esquemática (adaptada) do processo *Polyjet*™ 98

Figura 3.7 – Representação esquemática do processo *High Viscosity Jetting* 99

Figura 3.8 – Equipamento de *PR Eden500V*™ (*Objet*); exemplo de um protótipo 100

Figura 3.9 – Representação de partículas metálicas revestidas c/ e s/ polímero 101

Figura 3.10 – Representação esquemática do processo *SLS* (*Materialise*) 101

Figura 3.11 – Ilustração de um banco obtido por *SLS* de pós de Poliamida (PA) 103

Figura 3.12 – *Sinterchair* ® (*Oliver Vogt e Hermann Weize Negger*, 2002) 108

Figura 4.1 – Representação esquemática da base de ensaios 115

Figura 4.2 – Representação esquemática dos domínios virtuais de deposição 115

Figura 4.3 – Representação esquemática da disposição concêntrica dos tubos em PVC 116

Figura 4.4 – Peça obtida numa experiência realizada com tubos de PVC 120

Figura 4.5 – Cómoda C3 (Álvaro Siza, 1990) 121

Figura 4.6 – Modelo 3D do puxador 122

Figura 4.7 – Protótipo do puxador em *SL* 122

Figura 4.8 – Representação esquemática da construção do molde em silicone 123

Figura 4.9 – Moldes em silicone do puxador 126

Figura 4.10 – Tensão *vs* deformação (anisotropia da madeira – 3 direcções principais) 137

Figura 4.11 – Tensão *vs* deformação (comparativo resina e resina + pó de madeira) 138

Figura 4.12 – Imagem estereográfica da zona de fractura de um provete composto1 138

Figura 4.13 – Variação da viscosidade com a temperatura 141

Figura 4.14 – Lâmpada *Ultra-Vitalux UV* (*Osram*); distribuição espectral de radiação 142

Figura 4.15 – Peça obtida por associação de pó de madeira e resina *Cyracure*™ 143

Figura 5.1 – Representação esquemática de um vidro capilar 146

Figura 5.2 – Imagem real de dos vidros capilares: c/ e s/ volume de armazenamento 147

Figura 5.3 – Imagem real (ampliada) de um orifício doseador de um vidro capilar 147

Figura 5.4 – S*canner* superficial a uma matriz de pontos (de resina) 148

Figura 5.5 – Representação esquemática da tecnologia *Nanojet*™ 149

Figura 5.6 – Representação esquemática da tecnologia *Dropjet*™ 150

Figura 5.7 – Circuito electrónico de uma etiqueta RFID (*Rádio Frequency Identification*) 151

Figura 5.8 – Diagrama funcional do equipamento de impressão 3D 152

Figura 5.9 – Esquematização do efeito de *Venturi* aplicado à cabeça de deposição 154

Figura 5.10 – Representação esquemática do processo de impressão 3D 156

Figura 5.11 – Representação conceptual do equipamento I3D *CREATIO® 100WP* 157

Figura 5.12 – Exemplos de peças a produzir pela *CREATIO® 100WP* 157

Figura 5.13 – Simulação computacional de um espaço curvo multi-dimensional 159

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Classificação das madeiras segundo o seu teor de humidade 57

Tabela 2.2 – Classificação das madeiras de acordo com o seu grau de retracção 59

Tabela 2.3 – Valores de densidade 61

Tabela 2.4 – Valores de dureza 64

Tabela 2.5 – Classificação das madeiras em função da força de rotura 65

Tabela 2.6 – Propriedades mecânicas de *WPC* – ensaio de tracção 81

Tabela 2.7 – Propriedades mecânicas de *WPC* – ensaio de flexão 81

Tabela 4.1 – Formulações possíveis realizar com a resina de poliéster 112

Tabela 4.2 – *Pot life* da resina de poliéster 114

Tabela 4.3 – Percentagens mássicas utilizadas na composição da resina de poliéster 117

Tabela 4.4 – Características do silicone VTX 950 – CAT 950 (MCP Ibéria, SA) 124

Tabela 4.5 – Percentagens mássicas utilizadas na composição da resina epoxídica 128

Tabela 4.6 – Dados técnicos relativos ao endurecedor D526 128

Tabela 4.7 – Propriedades físicas da mistura resina epoxídica+endurecedor 129

Tabela 4.8 – Caracterização e análise das experiências realizadas 129

Tabela 4.9 – Dimensões de referência para o método A 133

Tabela 4.10 – Dimensões características do provete em função da espessura h 134

Tabela 4.11 – Dimensões características do provete função da espessura h 134

Tabela 4.12 – Percentagens mássicas utilizadas na composição da resina *Cyracure*™ 142

Tabela 4.13 – Comparação das diferentes tecnologias de micro deposição de fluidos 150

Lista de Símbolos

3D	Tridimensional
ASS&E	Ambiente, Saúde, Segurança e Energia
CAD	*Computer Aided Design*
CAE	*Computer Aided Engineering*
CAM	*Computer Aided Manufacturing*
CETECOFF	Unidade de Fundição e Novas Tecnologias
FDM	*Fused Deposition Modeling*
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FR/RM	Fabrico Rápido/*Rapid Manufacturing*
GCV	Gestão de Ciclo de Vida
HDF	*High Density Fiberboard*
INEGI	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
LOM	*Layer Object Manufacturing*
MCV	Matriz de Ciclo de Vida
MDF	*Medium Density Fiberboard*
MIT	*Massachusetts Institute of Technology*
OSB	*Oriented Strand Board*
PMV	Preço Médio de Venda
PR/RP	Prototipagem Rápida/ *Rapid Prototyping*
RIM	*Reaction Injection Molding*

SL/SLA	*Estereolitography*
SLS	*Selective Laser Sintering*
TDP	*Three Dimensional Printing*
WBCSD	*World Business Council for Sustainable Development*
WPC	*Wood Plastic Composits*

Parâmetros utilizados na caracterização das principais propriedades físicas e mecânicas da madeira

a	Largura do provete	m
C	Retractilidade linear	%
C_h	Contracção volumétrica parcial	%
C_t	Contracção volumétrica total	%
d	Coeficiente de correcção	%
D_{15}	Densidade da madeira para o teor de humidade normal	kg m^{-3}
D_h	Densidade (aferida com base numa humidade de referência)	kg m^{-3}
E_r	Eficiência de um retardante	%
f	Profundidade da «mossa» do provete	mm
F	Força de rotura do provete por fendilhamento	N
F'_H	Força unitária de rotura por fendilhamento a H% de humidade	N m^{-1}
h	Teor em humidade da madeira seca ao ar	%
H	Teor em humidade	%
L_h	Comprimento do provete de madeira em verde	m
L_o	Comprimento do provete de madeira, seco em estufa, a 103± 2ºC	m
N	Dureza de um provete	1 mm^{-1}
P_h	Peso da madeira no estado natural	kg
P_o	Peso da madeira após seca em estufa, a 103± 2ºC	kg
V	Coeficiente de retractilidade volumétrica	%
V_h	Volume da madeira após seca ao ar	m^3

V_o	Volume da madeira, seca em estufa, a 103± 2ºC	m^3
V_v	Volume da madeira no estado verde	m^3
V_b	Volume aparente (aferido com base numa humidade de referência)	m^3

Parâmetros utilizados na caracterização do ensaio mecânico de flexão

E_f	Módulo de elasticidade à flexão	GPa
F	Carga aplicada	N
b	Espessura do provete	mm
L	Distância entre apoios	mm
s	Deflexão do ponto médio	mm
v	Velocidade de aplicação da carga	mm min^{-1}
ΔF	Variação absoluta da carga aplicada	N
Δs	Variação absoluta da deflexão do ponto médio	N
ε'	Parâmetro de correcção	–
σ_f	Tensão de flexão	MPa

Capítulo 1

Introdução

"Supply chains as Biological Systems?

In the natural world there is no waste. Detritus from one organism is food for another. In this way nature continues to cycle and recycle organically. Its only input is solar energy. Supply chains that take resources at the beginning and reject waste along the way and at the end are in this sense unsustainable. Part of business's innovative power must be directed to the creation of value cycles which more nearly mimic the way nature works [1]*."*

In, ITSS WBCSD Report (2002)

1.1 – Inovação e desenvolvimento sustentável

A inovação é fundamental para a criação de uma sociedade humana sustentável. Enquanto sociedade, não seremos capazes de ser bem sucedidos na criação de um mundo sustentável, se nos preocuparmos unicamente em ser mais eficientes naquilo que já fazemos.

No entanto, tecnologias inovadoras vão sendo descobertas, desenvolvidas e comercializadas num ambiente dominado por mercados, cadeias de fornecimento e redes de distribuição, a par de uma série de tendências perturbadoras, quer a nível social, quer ambiental: ecossistemas e sistemas de apoio social ameaçados, um afastamento cada vez maior entre ricos e pobres, acesso restrito às verdadeiras fontes de conhecimento, mesmo estando inseridos num mundo pleno de informação e de grandes preocupações com os efeitos da globalização.

A inovação e a tecnologia podem fazer parte da solução para reverter estas tendências negativas. Como? Cabe ao mundo empresarial encontrar a melhor estratégia, para que a

inovação tenha um impacto positivo sobre estas tendências e, ao mesmo tempo, crie valor para as empresas.

As empresas que já aderiram a novas tecnologias, aperceberam-se de que a inovação não se consubstancia no conceito de "negócio como de costume". A sociedade civil tem vindo a desempenhar um papel cada vez mais activo na determinação do que é aceitável e inaceitável. As pessoas temem o desconhecido, sobretudo quando acreditam que poderá afectar de forma adversa a saúde ou os sistemas sociais estabelecidos. Por conseguinte, o mundo empresarial deverá actuar no sentido de valorizar os processos de inovação perante os olhos dos agentes económicos e da sociedade [2].

Face ao exposto, uma questão torna-se evidente: Que medidas, o mundo empresarial deve tomar para, por um lado, compreender e antecipar as necessidades da sociedade e, por outro, os efeitos da inovação e das novas tecnologias?

A integração do conceito de sustentabilidade no processo de inovação empresarial, não como factor negativo ou limitador do processo criativo, mas como uma oportunidade, é extremamente vantajosa. As empresas, cujos produtos ou serviços são rapidamente aceites pela sociedade e que criam soluções para os problemas ambientais e sociais, serão beneficiadas. A longo prazo, essas serão as empresas que atingirão o sucesso [1,7].

A essência do trabalho apresentado resulta da compreensão e antecipação de necessidades encontradas em determinado nichos de mercado, nomeadamente aqueles que estão directamente relacionados com a indústria da madeira, e foca medidas que podem e devem ser tomadas para aumentar a eficiência da utilização desta nobre matéria-prima.

A Oportunidade

A esperança de vida aumentou, a disponibilidade dos recursos naturais mais do que se manteve ao nível da procura e as fontes de alimentação desafiaram a lógica malthusiana[1]. Contudo, os subprodutos da civilização moderna causam preocupações legítimas, como por exemplo: níveis elevados de dióxido de carbono na atmosfera, ecossistemas ameaçados e toxinas bio-acumuláveis persistentes. Embora a inovação e a criatividade sejam ainda fortemente valorizadas, muitos interrogam-se se as novas tecnologias não implicarão um aumento maior dos riscos do que dos benefícios.

[1] Pensamento clássico de Thomas Robert Malthus (1766 - 1834), economista inglês que escreveu sobre as condições económicas e sociais da Inglaterra entre os séculos XVIII e XIX, realçando aspectos demográficos e económicos: "o esgotamento dos recursos naturais impedem que toda a população alcance a felicidade, é preciso haver um equilíbrio entre o crescimento da população e a produção dos recursos de subsistência."

Os desafios com que o mundo empresarial se depara são, por um lado, criar as grandes inovações necessárias à existência humana sustentável e, por outro, assegurar a sua aceitação pela sociedade. Não é uma tarefa fácil. De acordo com o relatório *Future Markets* de 2002, publicado pela *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)* [S1], na evolução actual há sinais que conduzem a uma sociedade humana insustentável.

O mundo empresarial pode aumentar o seu contributo para o desenvolvimento sustentável, atendendo a diversas áreas fundamentais. Estas foram claramente estabelecidas nas publicações do WBCSD, "O Caso do Mundo Empresarial e o Desenvolvimento Sustentável" ("*The Business Case for Sustainable Development*") e "Cumprindo o prometido" ("*Walking the Talk*"). Se as contribuições do mundo empresarial nestas áreas alinharem pelas atitudes e expectativas da sociedade, os resultados terão uma maior probabilidade de serem sustentáveis [3,4].

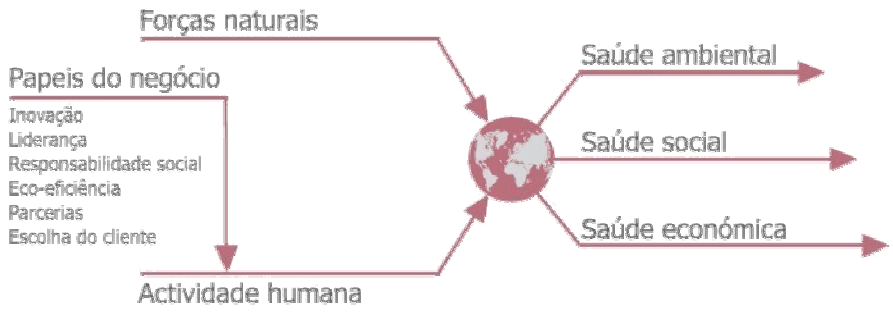


Figura 1.1 – A contribuição do mundo empresarial *versus* mundo natural [1]

O processo de inovação: visão macro

De facto, a função do mundo empresarial é transformar as ideias em produtos e serviços e encaminhá-los, da forma mais eficiente, para o mercado. Em última instância, o mercado determina o valor do produto ou do serviço e a eficácia da empresa em comercializá-lo. O desafio para o sucesso da empresa torna-se cada vez mais complexo, à medida que o mercado reconhece a importância crescente dos factores ecológico e social, a par do preço, qualidade e função.

O desafio consiste em examinar o processo de desenvolvimento e identificar aqueles factores e práticas que ajudarão a criar produtos e serviços mais sustentáveis. Que aspectos durante o processo são, de facto, fortemente influenciadores para introduzir ou reforçar os princípios da sustentabilidade? Os negócios bem sucedidos serão aqueles que, ao longo das

etapas principais de desenvolvimento, testarão as necessidades, valores e preocupações da sociedade, reduzindo o risco e aumentando as oportunidades de negócio.

Pode parecer fácil, mas há vários contratempos que podem surgir e, por vezes, ocorrem mesmo. Quer seja medo do desconhecido ou o risco de comprometer interesses concorrenciais, não é difícil encontrar explicações lógicas para pôr de lado as preocupações com a sustentabilidade. Portanto, a tentação é real e, quase sempre, obriga a fazer mais com menos recursos e a oferecer produtos e serviços mais rapidamente e a preços mais baixos.

Embora seja importante reconhecer que estas preocupações fazem parte da realidade actual das práticas empresariais, é também importante aceitar que os temas relacionados com a sustentabilidade estão inseridos na definição actual de sucesso empresarial.

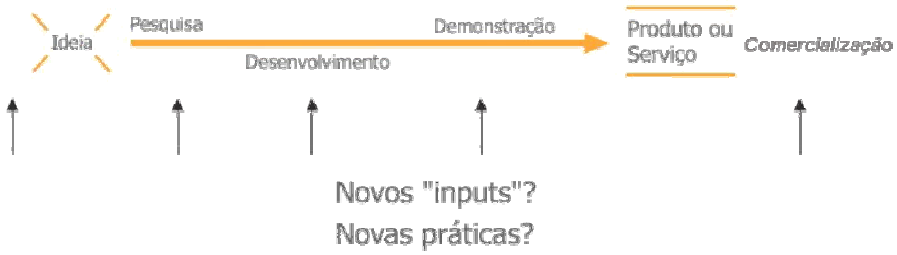


Figura 1.2 – Incorporação de preocupações sustentáveis durante o processo de inovação [1]

Inovação, investigação e desenvolvimento

As empresas estão a tornar-se "sem fronteiras", isto é, confiam, cada vez mais, em fornecedores externos de conhecimento e de componentes. Passaram a comprar as inovações e os conhecimentos práticos, através da constituição de redes de parcerias e alianças com institutos de investigação e outras empresas; deixaram de ser estruturas lineares, passando a funcionar como organizações em rede. O desafio está em saber estruturar as diferentes aprendizagens provenientes destas organizações virtuais, transformando-as em valor comercial.

A isto acresce o facto das aprendizagens de uma determinada fase do processo estarem frequentemente relacionadas com os estádios iniciais e os problemas que surgem posteriormente obrigarem, muitas vezes, a voltar à fase inicial para serem reexaminados. Por fim, um produto ou serviço surge sob a forma de teste-piloto ou em fase de demonstração, podendo ser já comercializado com sucesso, mas até aqui o processo é

confuso, pouco linear e caótico. Normalmente, é necessária mais do que uma "inovação" para permitir que um produto ou serviço chegue à fase de comercialização.

Uma inovação pode ser aplicável a uma cadeia de fornecimento existente ou mesmo levar à criação de uma outra. No entanto, uma cadeia de valor sofre influências indirectas e tem de tomar em consideração os vectores fundamentais que estão na base do produto ou do serviço. As influências podem ser formais, por exemplo, entidades reguladoras, certificadoras e grupos comerciais ou informais, tais como, interesse público, activistas ou comunidades circundantes. Compreender estes vectores, permitirá à empresa considerar a hipótese de oferecer produtos e serviços diferentes.

A inovação pode centrar-se em qualquer elemento da cadeia de fornecimento. De facto, uma inovação que a fortaleça, cria valor, tanto para o cliente como para as empresas, podendo, pois, intersectar a cadeia em qualquer ponto. Por outras palavras, o impacto da inovação não se limita às instalações próprias, uma vez que os clientes, fornecedores e mesmo os parceiros económicos podem beneficiar da inovação ao longo da cadeia de fornecimento.

Mais importante ainda a reter é o facto do processo de inovação/desenvolvimento poder ser enriquecido com as aprendizagens provenientes de qualquer ponto da cadeia de fornecimento, assim como das partes interessadas, externas a esta cadeia. Por exemplo, o objectivo clássico da pesquisa de mercado é identificar as necessidades não satisfeitas do cliente, especialmente quando, para as colmatar, podem utilizar-se as competências principais da empresa. O alargamento do âmbito da cadeia de valor, incluindo novos agentes económicos, ajudará o mundo empresarial a identificar e a responder a um leque mais vasto de sinais do mercado.

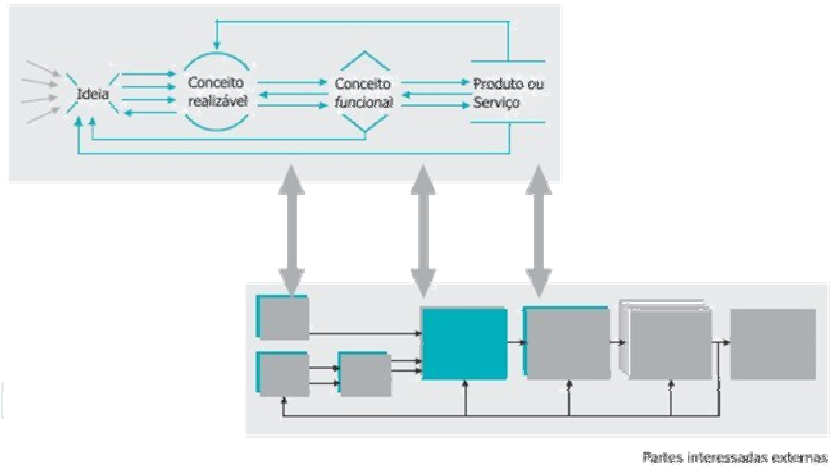


Figura 1.3 – Interesses internos e externos influenciam o processo de inovação [1]

Aspectos fundamentais da sustentabilidade na inovação

Algumas questões fundamentais devem ser consideradas durante qualquer processo de inovação e desenvolvimento, as quais não respondem a «como fazer?» (tal pode apenas ser respondido pela própria organização), pelo contrário, servem para desafiar a organização a procurar situações inerentes ao processo que podem ser alteradas, abrangendo o conceito de sustentabilidade.

Todas estas questões podem ser utilizadas para analisar de forma comparativa um sem número de etapas do processo de inovação; não têm uma ordem sequencial e, provavelmente, cada uma surgirá diversas vezes ao longo de todo o processo de desenvolvimento.

Aspecto 1: Como assegurar que a sustentabilidade faça parte do processo criativo?

A criatividade é o grande motor da inovação. Não há desenvolvimento sem ideias catalizadoras do processo criativo. Teoricamente, a inovação resulta da intersecção da criatividade, competência, visão global e liderança.



Figura 1.4 – Parâmetros condicionadores do processo criativo [1]

Visão e liderança são fundamentais para a criação de um negócio mais sustentável. De facto, são aspectos muito mais importantes do que as declarações de intenção no relatório anual ou nas placas penduradas nas paredes - representam o compromisso que se espera que a organização concretize. Em última análise, a visão e a liderança determinam quais as oportunidades a considerar e como as rentabilizar. Líderes, que transmitem às organizações

uma visão que incorpora a sustentabilidade, asseguram que esta seja parte nuclear do processo criativo.

A visão global consiste, entre outros aspectos, no carácter, crenças, experiência técnica, percepção das necessidades, consciencialização da cadeia de valor, interacções sociais e motivações pessoais. Por outras palavras, o modo como se apreende a situação ou o problema determina a forma como se irá enfrentá-lo e resolvê-lo [2,3].

Porém, esta visão não se limita a uma questão de formação técnica, constrói-se com base na compreensão dos assuntos, nos aspectos fundamentais da personalidade do inovador, para além do conhecimento técnico profundo, como, por exemplo, sobre o funcionamento do mercado, as necessidades reais e como as pessoas interagem. Se os responsáveis pelas «ideias luminosas» de um determinado negócio não estiverem conscientes das exigências e dos limites impostos pelos temas da sustentabilidade, então a visão global que transmitem e, por conseguinte, a criatividade, será limitada.

Alguns dirão que não se consegue ver aquilo em que ainda não se pensou. A introdução do conceito de sustentabilidade no processo criativo serve, exactamente, para ajudar aqueles que estão empenhadíssimos em compreender as diferentes perspectivas sobre os desafios actuais do mundo. Se conseguem ver os desafios, provavelmente conseguirão ver também as oportunidades e as soluções possíveis.

Aspecto 2: Como assegurar que os pressupostos da sustentabilidade façam parte da gestão dos processos de desenvolvimento?

O processo de desenvolvimento consiste numa série de desafios e decisões, que conduzem à conversão de uma ideia num valor financeiro. Qual o investimento necessário? Qual será a procura do mercado? Quais serão os custos de fornecer o produto ou serviço? Como proteger a vantagem competitiva? As decisões tomadas nas etapas iniciais do processo de desenvolvimento podem ser cruciais para irem ao encontro das expectativas corporativas e da sociedade e, desse modo, dos próprios objectivos financeiros. Muitas empresas têm processos formais para avaliar o potencial e o tema central da investigação antes de avançar com mais fundos ou fazer investimentos de capital. Estes processos de gestão faseados podiam, facilmente, incorporar critérios adicionais ou factores externos para facilitar a avaliação dos temas da sustentabilidade. Deveria haver sempre um processo de avaliação informal, pelo menos nas fases principais durante o período de desenvolvimento, mesmo para projectos pequenos.

Dois temas têm de ser tratados na gestão do processo de desenvolvimento, de modo a incorporar as questões da sustentabilidade. O primeiro tem a ver com a determinação do momento para realizar um processo de avaliação formal; o passo seguinte, prende-se com a determinação de como influenciar os processos existentes para gestão do desenvolvimento, de modo a incluir a sustentabilidade.

Os passos seguintes descrevem a abordagem global:

1. Na fase inicial de desenvolvimento e avaliação, confrontar a ideia contra critérios de sustentabilidade;

2. Na fase final do desenvolvimento, certificar de que a questão da sustentabilidade foi tratada;

3. Determinar o nível adequado de avaliação, para as fases intermédias do processo de desenvolvimento;

4. Assegurar que o processo de desenvolvimento inclui a exposição a opiniões externas.

A questão mais difícil é determinar a dimensão da avaliação da sustentabilidade para as fases intermédias. Não há uma resposta generalizada, porque não só os efeitos de cada desenvolvimento, como também a cultura e a receptividade são diferentes em cada organização.

Não é necessário começar a partir do nada. Empresas em todo o mundo desenvolveram já algumas primeiras abordagens para a integração de factores ambientais e sociais no processo de desenvolvimento. Algumas práticas interessantes, que podem ser aplicadas em diversas fases do processo de desenvolvimento ou cadeia de valor, serão ilustradas ao longo dos parágrafos que se seguem.

Muitas empresas adoptaram um processo, conhecido por «gestão faseada da investigação», para melhorar a produtividade e o cerne das actividades de investigação e desenvolvimento.

Esta abordagem divide as actividades de desenvolvimento em diversas fases e impõe que o financiamento de cada fase de desenvolvimento esteja condicionado ao cumprimento integral dos objectivos específicos da fase precedente. O projecto tem de atravessar «comportas», o que envolve a revisão dos objectivos específicos e a verificação de que o projecto se mantém relevante para o negócio.

Um processo deste género adapta-se bem à incorporação dos contributos dos agentes económicos e aos desafios das preocupações da sustentabilidade, tanto na fase de criação do objectivo, como nas revisões subsequentes.

Como bom exemplo corporativo de gestão faseada, podem ser comentadas as equipas de gestão do ciclo de vida da empresa 3M. As metas de desenvolvimento sustentável da 3M giram à volta da melhoria do desempenho ambiental dos seus produtos e processos, ao mesmo tempo que satisfazem melhor as necessidades dos clientes. Para garantir a responsabilização pelo produto, a 3M desenvolveu uma abordagem de ciclo de vida para a sustentabilidade. Com a ajuda de uma Matriz de Ciclo de Vida (MCV) e equipas de Gestão de Ciclo de Vida (GCV), a 3M garante que as suas unidades de negócio, para os produtos que fabricam, assumem uma abordagem conjunta em relação às questões do ambiente, saúde, segurança e energia (ASS&E).

As equipas de GCV são claramente constituídas para conduzir o desenvolvimento das ideias de investigação desde a fase inicial. Para além da investigação e dos interesses do negócio, a equipa inclui uma representação do ASS&E, garantindo, deste modo, uma atenção a questões, que, numa fase posterior de desenvolvimento, poderiam ser mais difíceis de resolver. Através desta metodologia, a 3M identifica os riscos e as oportunidades de melhoria, em todas as fases do processo de inovação.

Esta abordagem permite também identificar pequenas melhorias que conduzem a produtos mais sustentáveis durante o curso de desenvolvimento, mais uma vez facilitando a sua incorporação no produto final. Por exemplo, os clientes utilizadores de fita protectora de superfícies 3M no fabrico de lentes oftálmicas exigiram que a fita tivesse folhas soltas recicláveis. A 3M constituiu uma equipa de GCV para resolver a questão. O resultado foi uma fita sem papel, distribuída em rolos duplos, resultando numa redução de 40 % de resíduos sólidos para o cliente, custo reduzido de expedição para os rolos duplos e a quase eliminação da utilização de solvente na produção da fita.

A 3M consegue encontrar soluções mais eficientes e criar melhores produtos, através de uma abordagem abrangente para a solução de problemas. Em vez de resolverem um problema de cada vez, as equipas de GCV são capazes de lidar simultaneamente com questões relacionadas com a produção, fazer melhores escolhas de materiais, ir ao encontro das necessidades dos clientes de modo mais eficiente, e reduzir o desperdício pós-utilização criado pelos seus produtos [1,2,5].

Aspecto 3: Quando e como podem as perspectivas externas enriquecer os processos criativos e de desenvolvimento?

É possível reduzir o risco de introdução de novas tecnologias no mercado, se, numa fase inicial do desenvolvimento do projecto, se incluírem visões externas à empresa. Dificilmente existirá um negócio que introduza novos produtos ou serviços, sem, previamente, ter testado o mercado, uma vez que estar-se-ia a pôr em risco um investimento avultado. No entanto, quanto mais cedo, no processo de desenvolvimento forem consideradas as perspectivas externas, maior a probabilidade de se tratarem de visões técnicas e especializadas e menor a probabilidade de serem testados os impactos e preocupações da sociedade. No processo de desenvolvimento, a inclusão precoce de perspectivas críticas e leigas abre caminho a inovações mais bem conseguidas e permite evitar falhas de última hora na introdução no mercado. Estas falhas passam por: rejeição pura e simples do produto ou serviço, custos com despesas legais e de relações públicas, demoras na introdução no mercado, acrescidas dos custos de readaptação do produto ou serviço aos parâmetros aceitáveis pela sociedade [1,2].

Quando uma empresa procura pareceres de elementos externos à organização, podem ocorrer alguns problemas, embora as empresas, desde sempre, no decurso de processos de desenvolvimento, tenham testado e discutido questões de propriedade com consultores, especialistas, reguladores, líderes de associações civis, entre outros. O desafio está na identificação das partes envolvidas e no desenvolvimento de uma plataforma adequada à discussão, protegendo os interesses próprios.

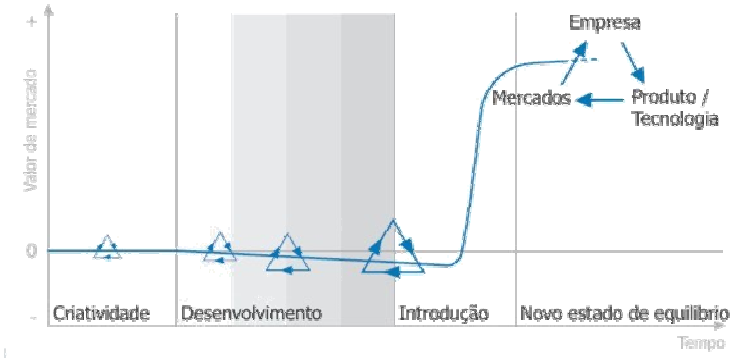


Figura 1.5 – Atenuação do risco de mercado através da ponderação de visões externas [1]

Importante é ainda saber como assegurar o envolvimento das pessoas que podem trazer benefícios ao negócio. É fundamental desenvolver uma relação de confiança, em que as

pessoas da organização comuniquem de forma franca e estejam dispostas a actuar de acordo com o aconselhamento ou, pelo menos, a explicar por que motivo decidiram não o fazer. Será talvez importante avançar para além do projecto em si e aprovar ou apoiar questões específicas das partes interessadas, como forma de criar condições para ganhar credibilidade e confiança de agentes externos relevantes que estejam cépticos.

Há várias abordagens disponíveis para envolver as partes interessadas. Por vezes, uma abordagem "*ad hoc"* resulta em «grande proveito/ baixo custo». Exemplos disso são:

– Encontros para explorar questões particulares com partes interessadas individualizadas;

– Projectos específicos;

– Negócios específicos.

Uma vez que estas nem sempre dão resultado, muitas organizações têm abordagens sistematizadas para garantir o envolvimento das partes interessadas, tais como:

– Apoio a determinadas organizações de grupos de interesse, em termos gerais ou em projectos específicos, de forma a construir uma relação sólida (favorecendo a reciprocidade da relação);

– Órgãos consultivos técnicos.

Tal como acontece com outras questões, a resposta certa não existe; cada organização tem de determinar qual a melhor solução para si própria e quais as necessidades específicas dos seus negócios.

Aspecto 4: Quais os processos com maior probabilidade de influenciar o valor do capital intelectual?

Actualmente, em diversas áreas do saber, a tecnologia desenvolve-se a um ritmo superior à capacidade de acompanhamento e compreensão da sociedade em geral. Este desfasamento entre as novas tecnologias e as decisões sociais e éticas acerca da sua utilização e aplicação aumentam o risco de introdução no mercado para os criadores dessa mesma tecnologia.

Esta questão é fácil de compreender quando se trata da área de biotecnologia, mas também pode ser antecipada noutros campos não relacionados com a saúde, como, por exemplo: nanotecnologia, comunicações e electrónica, entretenimento e software. Os desenvolvimentos actuais no âmbito da pesquisa das células pluripotenciais representam

uma das áreas em que os governos mais rapidamente actuam, numa tentativa de ciência e legislação caminharem a par. Nestes casos, com a ausência de regras e leis reguladoras definitivas, as empresas necessitam de ajuda para orientar o curso da inovação. Por vezes, o ritmo acelerado da inovação faz com que algumas possibilidades acabem por não ser aceites pela sociedade. As tecnologias que estão, neste momento, a ser desenvolvidas, podem vir a ter consequências inimagináveis para a sociedade humana. As empresas, cuja actividade se situa nestas áreas de investigação e desenvolvimento, têm de encontrar formas de descobrir as reacções sociais face a estas tecnologias, antes da sua entrada no circuito comercial. Por exemplo: terá uma empresa algo a ganhar com a patente de uma sequência genética humana, caso a sociedade não lhe permita a sua aplicação no registo da patente dos seus produtos?

Na fase precoce do processo de desenvolvimento, havendo indicações de alguma probabilidade de sucesso, tomam-se decisões sobre a protecção do conhecimento que está a ser criado. Muitas empresas vêem a propriedade intelectual como um bem – uma forma de beneficiar do valor actual do negócio e uma plataforma para futuros desenvolvimentos. De facto, como proteger a propriedade intelectual é uma questão importante para o sector empresarial. Tradicionalmente, os produtos resultantes de processos de inovação têm sido protegidos através de um de três esquemas básicos: i) patentes e direitos de autor, ii) sigilo, e iii) publicação em fonte de domínio público.

No entanto, as empresas que lidam com a protecção de tecnologias emergentes, entendem que as patentes ou não são necessárias ou, nalguns casos, são um contrato muito frágil com a sociedade civil. Estão a ser desenvolvidos novos modelos de capitalização de capital intelectual, cujo objectivo é criar valor, tanto para a sociedade como para o sector empresarial [1,6]. Um dos exemplos típicos é a arquitectura aberta dos novos sistemas operativos computacionais na indústria de software – *open source*.

Quando decide proteger os direitos de propriedade intelectual, a empresa tem de determinar quais os meios de protecção capazes de gerar mais valor para a sociedade e para o negócio. Se o registo de patente for a forma escolhida, a empresa deve analisar diferentes modelos para partilhar os benefícios com grupos específicos, garantindo, assim, uma distribuição mais equilibrada do valor.

A patente funciona como um dos pontos de um contrato estabelecido entre o inventor e a sociedade em geral. O *quid pro quo*[1] é: em troca dos direitos exclusivos sobre a invenção, durante um determinado período de tempo, o inventor expõe-na imediatamente. Através

[1] Expressão do latim que subentende um acordo mutuo entre as partes interessadas tendo por base a troca de um bem ou de um serviço.

desta revelação, a base para procurar melhorias e benefícios adicionais é deixada ao arbítrio da sociedade, cumprindo-se, assim, o estipulado no acordo.

Para além disso, a invenção para ser patenteada tem de ser submetida a uma avaliação de acordo com três critérios: É uma novidade? Trata-se de algo que não é óbvio para um especialista da área? É útil? Há outro requisito: não ser algo contrário à ordem pública, à moral e à legalidade.

Há já muitos anos que a protecção da propriedade intelectual tem sido efectuada através de patentes, como forma de fomentar a inovação e fornecer a base para a criação de novos negócios. Mesmo ainda antes de se criarem os sistemas de patentes, os inventores e os criativos tinham desenvolvido formas simples, mas eficazes, de proteger as suas invenções [4,6].

O Caminho a Seguir

Avançar com os primeiros passos não requer uma limpeza completa dos processos actuais. Pode progredir-se bastante, simplesmente através do alargamento dos sistemas actuais, integrando o conceito de sustentabilidade.

Eis a súmula dos pontos fulcrais tratados até aqui:

– Incluir a sustentabilidade entre os factores condutores do negócio (a "visão");

– Acrescentar estímulos adicionais (incluir questões sociais e ambientais), quer através da realização de fóruns de sensibilização para este tema, discutindo novos pontos de vista, quer através da criação de incubadoras de novos negócios, especialmente vocacionadas para o desenvolvimento sustentável, acrescentando, deste modo, alguns condimentos ao conjunto do negócio em causa;

– Insistir em projectos e progressos alcançáveis. Se se escolher e actuar de acordo com os estímulos certos, descobrir-se-á o poder inovador da organização sobre os problemas reais;

– Criar pontos de avaliação durante o processo de desenvolvimento (o "papel da gestão"). Apenas os próprios têm capacidade para definir o número de pontos de avaliação necessários, mas é preciso tomar medidas para assegurar que as intenções estão, de facto, a ser seguidas. Frequentemente, consegue-se influenciar e melhorar os processos existentes; outras vezes, optar-se-á por implementar revisões com determinados objectivos;

– Alargar a criatividade a toda a cadeia de valor, a qual, muitas vezes, é o primeiro passo e o mais fácil de dar fora da organização;

– Interrelacionar a inovação e os processos de desenvolvimento do negócio com as economias em vias de desenvolvimento, não apenas os serviços de marketing e vendas. Os colaboradores ligados à criação e concepção de novos produtos ou serviços encontrarão problemas fundamentalmente diferentes, assim como novas formas de os resolver, experiências, que, por sua vez, contribuirão para enriquecer o próprio potencial no mercado.

Por último, a integração da sustentabilidade e da inovação está directamente relacionada com o negócio e a sua gestão. O líder do negócio tem de certificar-se de que estes princípios estão a ser observados, caso contrário, há que forçar a sua incorporação na actividade diária do negócio. Ao fazê-lo, a qualidade da sua actividade económica sairá reforçada. Sustentavelmente!

1.2 – Criação aditiva, um conceito intrínseco à natureza

"…the logic for assembling an object will be built into the materials themselves. This is exactly how our bodies are made; a molecular machine called ribosome translates instructions from genes into the series of steps required to assemble all of the proteins in our bodies out of the twenty amino acids. The discovery of building with logic is actually a few billion years old; it's fundamental to the emergence of life.

The molecular machinery in a cell is based around the additive assembly of proteins by other proteins."

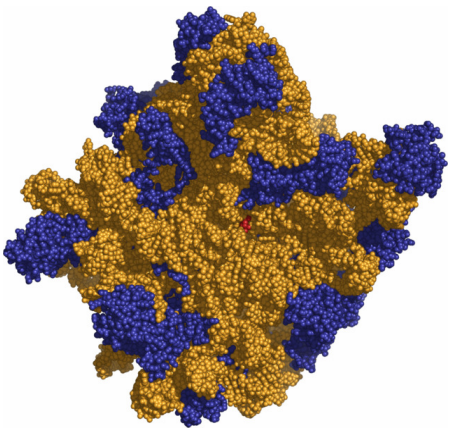


Figura 1.6 – *Ribossomo*, a "máquina" molecular [S2]

As tecnologias de fabrico por adição estão para as subtractivas como os oleiros estão para os escultores. Em vez de lascar sucessivamente um bloco de pedra até caracterizar a escultura na sua forma final, o oleiro acrescenta barro à sua obra, onde deseja e nas quantidades que necessita. Esta velha realidade encontra-se no cerne das mais recentes novidades no campo das tecnologias de produção.

As ferramentas de corte usadas em sistemas de produção de natureza subtractiva, necessariamente, geram desperdícios durante a produção de peças. É possível inverter eficientemente este processo produtivo, construindo as peças a partir do material em bruto que pode ser selectivamente injectado, ou projectado, ou extrudido, ou depositado, ou fundido, ou até mesmo moldado. Todas estas diferentes abordagens aditivas partem do nada e terminam em algo, cuja identidade pode ir de um simples protótipo a um sistema completamente funcional.

Contudo, a melhor forma de produzir sem originar qualquer tipo de desperdício é aquela que usa o seguinte principio – *Fabrico Equitativo*. Partindo de um determinado volume de material com uma dada forma inicial, a ideia prende-se com a aplicação de deformações sucessivas, aqui e ali, até atingir a forma pretendida sem remover qualquer quantidade de material desnecessário. Um exemplo é a *conformação por vácuo*, onde uma placa de um determinado material plástico é aquecida até amolecer e, posteriormente, é projectada contra uma cavidade moldante sob depressão[1]. Outra técnica que pode ser apontada como exemplo é a *moldação por sopro,* na qual ar comprimido é usado para projectar material amolecido contra o interior de um molde. É desta forma que as garrafas são produzidas. Rapidez e economia são qualidades inerentes a este tipo de processos, o que lhes confere primazia sobre outros métodos no que respeita à produção de vasilhame, vulgarmente utilizado no dia a dia [9,10].

Se o plástico for aquecido um pouco mais e sujeito a níveis de pressão superiores, adquire propriedades físicas semelhantes às dos líquidos, tornando-o susceptível de escoar para o interior de uma cavidade moldante. Isto é realizado na *moldação por injecção* para produzir volumes sólidos ao contrário de superfícies, e pode ser utilizado na produção em massa de objectos com geometrias de elevado grau de complexidade. Os moldes são geralmente construídos com um ou mais planos de apartação para facilmente retirar a peça após esta ter sido injectada. De modo a evitar que o plástico fluido escoe para fora do molde (fugas), segundo a(s) linha(s) de junta do(s) plano(s) de apartação, a máquina injectora aplica uma forte pressão sobre as diferentes metades tornando-as num todo compacto. Um fuso no interior de uma câmara aquecida derrete os grânulos de plástico até ficarem fluidos e impele-os para o canal de alimentação do molde.

[1] A *depressão* é provocada por uma bomba de vácuo que é acoplada através de um tubo à cavidade moldante.

Uma vez produzido um molde dedicado à moldação por injecção, uma quantidade apreciável de peças podem ser concebidas num abrir e fechar de olhos. É certo que pode demorar horas, dias e até mesmo meses para construir um molde, mas apenas alguns segundos para injectar uma determinada quantidade de plástico para o seu interior e obter a peça desejada. O tempo extra de concepção do molde fica assim diluído na capacidade produtiva do processo.

O desafio actual na evolução deste processo produtivo prende-se com a obtenção de superfícies isentas de qualquer tipo de defeitos[1] de modo a evitar, *a posteriori*, qualquer tipo de processamento e também com a redução do excesso de material que possa vir anexo à peça. A LEGO, uma empresa de referência cuja actividade económica e sucesso empresarial dependem, em larga escala, da moldação por injecção, afirma publicamente a importância do profissionalismo dos seus engenheiros/técnicos de moldes na qualidade dos seus produtos. Trabalham geralmente em ambientes, considerados por muitos críticos, autênticos "santuários internos", onde se dedicam exclusivamente ao projecto e concepção de moldes com acabamentos superficiais semelhantes ao de uma clara de ovo (cozido!) e tolerâncias características dos telescópios. Fazendo como deve ser, bem feito, o resultado traduz-se em peças de excelente qualidade sem qualquer necessidade de acabamento final. O contrário, resulta inevitavelmente numa quantidade em massa de produtos medíocres.

Muitos outros "ingredientes", para alem do plástico, podem ser injectados no molde com a finalidade de modificar as propriedades físicas do objecto a ser produzido. Esferas ocas adicionadas ao plástico contribuem para a redução da sua densidade e, por conseguinte, o seu peso. A adição de fibras potencia a resistência, atendendo ao seu comportamento especifico quando solicitadas à tracção. Componentes condutores de electricidade podem ser obtidos por inclusão de aditivos electricamente condutores. É igualmente possível usar este processo no fabrico de partes cerâmicas resistentes a altas temperaturas assim como partes metálicas de elevada resistência mecânica. Quando um pó cerâmico ou metálico, misturado com um agente aglutinador polimérico é injectado, produz-se aquilo que se denomina uma "peça em verde". Esta, posteriormente, pode ser aquecida e sinterizada para retirar o plástico indesejável e promover a fusão das partículas entre si, dando origem a uma peça sólida Quem diz uma diz muitas, uma vez que este processo é bem mais rápido que um outro qualquer processo de fresagem [9,10].

Se, por outro lado, o objectivo é produzir uma peça em vez de um milhão de peças, então a construção de moldes pode conduzir a tempos de execução, economicamente inviáveis. Um sem números de tecnologias de prototipagem rápida (PR) têm sido desenvolvidas

[1] Os defeitos podem surgir de imperfeições do próprio molde quer a nível das emendas (planos de apartação) quer a nível dos diferentes canais de ligação.

precisamente para contornar aquela questão, ou seja, produzir no mais curto tempo possível um protótipo para verificar as suas características formais e funcionais antes de avançar para a construção do molde definitivo. As tecnologias que permitem este tipo de abordagem têm subjacente o conceito de impressão tridimensional (impressão 3D), ou seja, as máquinas de PR têm um funcionamento semelhante ao das impressoras de jacto de tinta que, em vez de imagens bidimensionais produzem objectos tridimensionais.

Existem tantos processos de impressão 3D como produtores de equipamentos de impressão 3D (cada empresa constrói o seu negócio com base na apropriação de patentes dos seus próprios processos). Uma das tecnologias de impressão 3D projecta um raio laser sobre um polímero fluido que endurece (cura) quando o feixe atinge a superfície. Segundo este processo, o objecto é construído camada após camada, e o laser é usado para definir, localmente, cada corte transversal da peça. A parte emergente penetra no banho polimérico à medida que é construída. Uma outra funciona como um injector de deposição de cola 3D, projectando plástico derretido, através de um bocal móvel, no interior de uma câmara cuja temperatura é ligeiramente inferior à temperatura de fusão do material depositado, acelerando desta forma a sua solidificação.

Ainda de referir um outro processo que utiliza uma cabeça do tipo jacto-de-tinta para depositar ínfimas gotículas de um líquido aglutinador numa superfície formada por uma fina camada de um pó, também ele bastante fino. Esta deposição é feita selectivamente, tendo em conta o corte local correspondente, promovendo desta forma a agregação das partículas entre si. A construção do objecto é feita camada a camada, repetindo alternadamente os procedimentos: espalhamento do pó e deposição do agente aglutinador. Da mesma forma como uma imagem colorida bidimensional é impressa com o sistema de cores CMYK (*Cyan, Magenta, Yellow & blacK)*, partes tridimensionais coloridas podem ser também impressas se forem utilizados agentes aglutinadores com diferentes colorações. Uma outra vantagem deste processo é o facto de o pó não aglutinado poder servir como material de suporte a componentes parcialmente completos antes de serem estabelecidas as ligações aos seus suportes estruturais [10].

Apesar das suas inúmeras características apelativas no que respeita à liberdade de criação, este tipo de equipamentos evidencia também algumas limitações significativas: são comercializados a preços relativamente elevados quando comparados com as suas congéneres bidimensionais (impressoras), e a capacidade de reproduzir protótipos não é tão imediata quanto a designação da tecnologia o faz crer ("prototipagem rápida")! Os tempos de construção de um modelo complexo podem variar entre algumas horas a dias completos.

A imagem que se segue ilustra um dos equipamentos de impressão tridimensional da empresa norte americana *ZCorp*™ assim como alguns exemplos de protótipos possíveis de obter com ele.



Figura 1.7 – Equipamento de PR *Spectrum Z510 System*; exemplos de protótipos [S3]

No mercado de máquinas para a indústria, os equipamentos de prototipagem rápida ocupam um estranho lugar muitas vezes identificado pelos analistas como um *ghetto* tecnológico. Uma das razões para esta aparente descriminação prende-se com a designação escolhida para a tecnologia. Se em determinados tipos de negócio o objectivo é produzir algo em grandes quantidades então, produzir um protótipo não é mais do que um meio de se atingir, com qualidade, a produção em massa. As impressoras tridimensionais são encaradas actualmente como equipamentos que satisfazem determinados nichos de mercado nomeadamente o relacionado com o desenvolvimento de produtos. Contudo, a grande atenção neste momento está voltada para aquelas máquinas que produzem peças finais e fazem valer o investimento. Caso o protótipo seja o produto final e o objectivo seja a concepção de apenas uma unidade, então o investimento não terá a rentabilidade desejada.

Outra limitação da impressão tridimensional é o facto das partes produzidas serem completamente inactivas, amorfas. Após construção de um dado componente é ainda necessário adicionar outros tipos de componentes activos indispensáveis ao funcionamento de uma determinada aplicação. Vejamos um exemplo simples de contextualizar o que foi dito: imagine-se um globo que gira em torno de uma haste e que, por accionamento de um botão, mostra o fuso horário das cidades e ilumina-as. Para que o globo gire é necessário conectar um motor. O facto das cidades serem iluminadas obriga que fios eléctricos e *led's* sejam instalados. O fuso horário para ser mostrado implica a incorporação de uma placa de circuito impresso.

A barreira final a transpor na prototipagem rápida é a introdução de materiais, quer funcionais quer estruturais, com o intuito de produzir sistemas completamente funcionais. Pós e plásticos que conduzam electricidade podem ser usados na impressão de fios eléctricos, alguns semicondutores, com a capacidade de serem impressos, podem ser aplicados na deposição de circuitos lógicos, motores de indução podem ser construídos a partir de materiais magnéticos, combinações de ordem química podem funcionar como reservatórios de energia, etc. "Tintas" passíveis de ser impressas, contendo cada um deste novo tipo de materiais, estão a ser desenvolvidas e foram já testadas em laboratórios. A integração de todos aqueles materiais numa impressora é o caminho que levará à descoberta da máquina capaz de produzir seja o que for, e, portanto, o mais promissor [10].

Para lá dos limites da impressão tridimensional, a última inspiração no âmbito da criação aditiva é a biologia. Os bebés são seres que crescem e se desenvolvem ao contrário de serem talhados como alguns objectos. A máquina molecular existente numa célula baseia-se num processo aditivo de associação de diferentes proteínas. É com base neste conceito que novos materiais estão a ser desenvolvidos com o propósito de alcançar a lógica do funcionamento celular e com ela a capacidade de serem eles mesmos a definir o seu próprio desígnio. Actualmente, já foram ultrapassadas muitas das barreiras que irão permitir, em poucos anos, produzir rins para transplantes.

1.3 – Um material nobre, a *madeira*

"Sempre he creido que el proyecto es la distancia que media entre una idea inicial y una realidad construida. Los materiales y las técnicas constructivas, en nuestro caso las relativas a la madera, ocupan una parte importante de este processo proyectual [12]*."*

Carlos Ferrater (Barcelona, Maio 2000)

1.3.1 A vitalidade do material

Este capítulo é dedicado ao único material vivo que, vulgarmente, é utilizado em projectos de engenharia e arquitectura. É habitual que determinados materiais construtivos apresentem alterações comportamentais distintas ao longo da sua vida útil mas nunca de modo tão pronunciado como a madeira. As árvores, mesmo depois de cortadas, mantêm

os seus sinais vitais. Este facto deve ser considerado para perceber que, após o corte, o processo de formação do material não cessa, permanece activo.

No seio de algumas culturas, os ritos inerentes ao processo de substituição de peças deterioradas em construções em madeira são autênticos espectáculos cerimoniais que representam a prevalência da construção face a brevidade da vida terrena, seja esta animal ou vegetal.

Os indivíduos com a particularidade de terem nascido próximo de zonas madeireiras, arborizadas, recordam certamente a luz e a cor características deste tipo de espaços naturais. Não menos importante é o odor da madeira cortada e do seu subproduto, o serrim. São fragrâncias intensas que, embora não sendo muito duradoiras, definem o início de uma nova obra e confere-lhe um novo sentido, o olfacto, habitualmente subestimado neste tipo de profissão. São surpreendentes algumas propostas de arquitectos de renome mundial cujas obras visam prevalecer este sentido: edifícios itinerantes cujo odor permanece constante durante o seu período de vida útil. Esta foi a forma como *Zumthor* resolveu o pavilhão suíço concebido no âmbito da *Expo 2000*, em *Hannover*. Este projecto proporcionou uma experiência impar para os sentidos humanos onde o olfacto desempenhou um papel particular. Dois anos antes, na *Expo de Lisboa*, ***Regino Cruz***, arquitecto português, surpreende tudo e todos com o projecto do Pavilhão Atlântico, actualmente conhecido como Pavilhão Multiusos. A ideia de o construir remonta às primeiras discussões sobre o plano de urbanização da zona *Expo*. Ao contrário de outras cidades europeias, Lisboa não possuía uma sala polivalente para acolher espectáculos, congressos e acontecimentos desportivos de grande dimensão.

Os requisitos iniciais do projecto eram arrojados e, portanto, o projecto associado deveria exceder as expectativas. Foi assim que nasceu uma inovadora obra de arquitectura A configuração do Pavilhão Atlântico lembra uma nave espacial… mas a sua forma é também a do caranguejo-ferradura, espécie surgida há 200 milhões de anos. Misto de animal marinho e nave espacial, esta forma merecia uma estrutura que a suportasse, física e simbolicamente. Assim surgiu a ideia do travejamento em madeira para sustentar a cobertura, à maneira do cavername invertido de uma nau quinhentista. Numa exposição mundial que evoca os oceanos e as Descobertas, a madeira, melhor que o aço ou o betão, é a matéria-prima ideal.

Outro aspecto peculiar da madeira quando comparada com outros materiais é o da sua conservação e limpeza. O método escolhido com vista a este fim será determinante no seu processo evolutivo enquanto aplicação. No que respeita à conservação da madeira, pode dizer-se que os sistemas que se utilizam habitualmente tendem a escurecer o material, omitindo a sua coloração e textura naturais. Talvez as técnicas mais interessantes estejam a

desaparecer por requerem mais esforço e dedicação que as actuais. Porém, existem alguns sistemas que podem substitui-los parcialmente, como por exemplo óleos que pelo facto de serem de origem natural respeitam as propriedades da madeira.

Em oposição a esta linha de pensamento que procura deixar que a madeira respire e viva dentro de um estrutura imposta por uma dada construção, existe outra que procura combater as características heterogéneas da madeira: placas à base de fibras de madeira com agentes aglomerantes, folhas de madeira reconstituída, pavimentos laminados com revestimento a PVC, …o que leva a questionar a razão pela qual não se substitui de vez a madeira por elementos totalmente artificiais à semelhança do que se profetizou durante a década de 70. A resposta a esta questão evoca aspectos subjectivos que são alheios ao mundo industrial e determinantes no exercício da arquitectura: a madeira emana conforto, e traz calor ao espaço onde se insere, tornando-o acolhedor. Estas características mantêm-se inalteráveis se as técnicas actuais de conservação forem aplicadas ao material, proporcionando-lhe defesas para resistir a qualquer situação adversa. A madeira, como revestimento, permite assim esta ligação de intimidade que muitas obras requerem e que outros materiais não proporcionam [12].

Relativamente a este último aspecto intangível da madeira, uma palavra há a dizer sobre a capacidade do material como portador de significados: serviu como meio de suporte de expressão cultural em todas as civilizações, muito embora a maioria dessas peças tenham desaparecido com o passar dos tempos, fruto da sua característica perecível. De salientar ainda a sua utilização em estruturas de suporte a pinturas e obras de expressão plástica.

Hoje em dia a madeira continua a ser um importante veículo de expressão, tanto na sua forma mais natural como na aplicação mais elaborada. As imagens que se mostram ao longo deste capítulo são alusivas à vitalidade deste material intemporal.

1.3.2 A aplicabilidade actual

A madeira é um dos materiais mais antigos que tem sido aplicado em diversas áreas de construção. Por outro lado, é dos pouquíssimos materiais que podem ser considerados polivalentes. É usada como material estrutural e como revestimento exterior e interior, em laminados, em tectos e coberturas, em pavimentos (soalhos e *decks*), em mobiliário, em objectos de decoração, em esculturas, etc.

Algumas obras modernistas, construídas essencialmente em madeira, ficaram certamente na memória de muitos e constituem exemplos vivos que valem a pena recordar: *Le petit cabanon* em *Cap Martin* (França – *Cote d'Azur*), de *Le Corbusier (1950)*, como expressão da rusticidade

da madeira. Nela combinam-se tábuas e troncos de árvores para dar origem a uma construção em bruto. Em contraste com esta obra, a capela da Escola Técnica de *Otaniemi* (Finlândia)*, Heikki and Kaija Siren (1957)*, ao contrário da obra "tosca", reflecte algo mais subtil, aligeirado: as estruturas em madeira foram concebidas com secções e articulações que parecem estar para lá do limite daquilo que, intuitivamente, um observador comum entende como normal. A *Capilla del Bosque*, uma capela próxima a um cemitério a sul de Estocolmo, de *Asplund (1918-1920)*, onde a madeira desaparece por detrás das paredes estucadas mas percebe-se a sua existência. A casa de campo de *Gropius e Breuer (1939)* em *Wyland, Massachussetts*, apelidada de *Chamberlain Cottage*, estabelece um expressivo jogo de opostos: a madeira funciona como uma espécie de pele humana delicada, que envolve e protege um dos volumes. O outro volume, com estrutura em aço e revestido a vidro devolve uma sensação de nudez. Muitas outras construções em madeira poderiam aqui ser referidas mas ficam apenas estas por serem suficientemente sugestivas quanto à sua boa utilização [12].



Figura 1.8 – *Le petit cabanon (Le Corbusier, 1950)* [S4]

Hoje, as principais fontes de informação sobre este material nobre que é a madeira indicam que o seu principal campo de aplicação e investigação é no domínio dos revestimentos. Isto deve-se, por um lado, aos valores actuais da arquitectura contemporânea que identificam a madeira como uma segunda pele e por outro lado, à necessidade crescente de utilizar ou reutilizar os subprodutos derivados da madeira dando origem a novos materiais e, consequentemente, a novos campos de aplicação da madeira. O mundo de imagens ao qual somos afectos diariamente revela revestimentos magníficos os quais são quase sempre

protagonizados por diferentes derivados da madeira: contraplacados (normais ou de uso marítimo), compactos fenólicos de alta pressão, reciclados à base de cimento de madeira, pasta celulósica, baquelite, etc. Cada uma destas novas opções representa um desafio para qualquer arquitecto/designer que pretenda inovar no seu trabalho. Um conhecimento profundo das características destes novos materiais, quer a nível de manipulação, quer a nível de mecanização, ou até mesmo a nível de colocação em obra, permitirá ao utilizador um melhor aproveitamento funcional e expressivo dos mesmos. Exemplo disso é a placa à base de cimento e madeira, um material aparentemente grosseiro e frágil, mas, uma vez conhecidas as suas possibilidades de manipulação, podem obter-se revestimentos muito interessantes.

Uma das aplicações que sempre despertaram um certo interesse pela sua ambiguidade é a utilização de placas de base fenólica ou similares, como as utilizadas em cofragens para construção de muros e lajes de betão. Desta forma é possível reproduzir na superfície do betão as texturas peculiares da madeira

Uma informação mais detalhada acerca destes novos derivados da madeira será explicitada num capítulo subsequente.

1.4 - A madeira no *design* de mobiliário e objectos

Embora se saiba que desde os tempos mais ancestrais o homem utilizou móveis para sua maior comodidade, foi só a partir da civilização egípcia que foi possível encontrar documentação sobre o assunto. A informação existente é bastante extensa e dada a especificidade deste trabalho escrito optou-se por salientar apenas o período temporal que maior afinidade estabelece com a palavra *design*.

Arte Nova

Após mais de meio século de Historicismo e de exacerbado Ecletismo, a última década do século XIX assiste ao desenvolvimento não só na Europa, de uma tendência modernista ligada a todas as manifestações artísticas – desde a arquitectura à arte aplicada, da pintura à ilustração, da escultura às artes gráficas publicitárias – que respira uma renovação total, reivindicando a definição de um «novo» estilo. Embora se encontre com nomes diferentes em diversos países, é historicamente definido com a designação francesa de *Art Nouveau*,

que em Portugal é literalmente traduzido por *Arte Nova*. A decoração, geralmente inspirada em motivos florais, não serve apenas para realçar a beleza do móvel, mas também como um meio para chegar à forma. A par desta Arte Nova exuberante, existe uma outra feita de equilíbrio e de rigor elegante, caracterizada por uma decoração simples e por formas que se exprimem através de figuras geométricas elementares como o quadrado, o circulo e o rectângulo, preferindo as superfícies planas às esculpidas, as linhas verticais às sinuosas.

Embora aparentemente contraditórias, as duas tendências da Arte Nova inspiram-se nos mesmos ideais de renovação artística e exprimem, sob formas diferentes, teorias muito próximas, visando uma concepção dinâmica e unitária do espaço, em que todos os elementos do mobiliário, desde os puxadores aos móveis e às tapeçarias, revestem idêntica dignidade estética, num contexto em que cada objecto é estudado para o lugar que ocupa.

Partindo desta subdivisão inicial da Arte Nova, distinguiram-se quatro correntes específicas, ligadas às zonas geográficas onde se exprimiram. A primeira, que se desenvolveu na área franco-belga, caracteriza-se por um evidente simbolismo do conjunto; as linhas desenvolvem-se organicamente, muitas vezes a partir de um único ponto do móvel, vindo a transformar-se num elemento estrutural. As primeiras manifestações modernistas no continente europeu verificaram-se na Bélgica com a obra de Vítor Horta (1861-1947). As suas arquitecturas e os móveis que para elas desenha tendem a uma integração total do interior, desenvolvendo um desenho inspirado nas formas vegetais, sem nunca as reproduzir. Nos móveis, os elementos estruturais são muitas vezes dominantes, embora se submetam a um desenho delicado e elegante. A atenção dada à estrutura do móvel é também característica de *Henri Van de Velde* (figura 1.9). Arquitecto, pintor, *designer*, e escritor, exerce a sua actividade em toda a Europa e interessa-se pelos domínios da arte aplicada. Os seus móveis, embora não renunciando aos elementos decorativos, como na famosa secretária em borboleta, baseiam-se nas linhas de força que emanam da própria estrutura. A madeira é sempre utilizada de modo orgânico, respeitando as tensões das fibras; as cadeiras e as poltronas têm muitas vezes as costas com abertos e com travessas curvadas como nervuras em tensão [13,14].



Figura 1.9 – Secretária em *Borboleta* (*Henri Van de Velde*) [13]

A segunda, tipicamente francesa e representada pela escola de *Nancy*, está ligada a uma representação mais naturalista das formas animais e florais, que são usadas quer como decorações quer como elementos estruturais. O material utilizado, madeira, bronze, ferro forjado, surge completamente subjugado pela forma modelando-se como a argila em formas que engrossam, se contorcem, rebaixam e revelam bruscas diferenças de espessura.

A terceira corrente, encarnada pela escola inglesa de *Glasgow*, identifica-se com o uso da linha como elemento de simplificação absoluta, e de nítidas formas geométricas com uma verticalidade simbólica e um emprego muito rigoroso da cor. Os móveis de *Mackintosh* representam o que de mais inovador foi realizado nesses anos.

A quarta e última corrente desenvolve-se particularmente na região austro-alemã, manifestando uma tendência, de certo modo semelhante à inglesa, ligada à valorização da geometria elementar: o circulo e o quadrado. É apenas já no século XX que toma forma na Áustria um movimento modernista, a *Sezession*. Fundada em 1897 pelo pintor *Gustav Klimt* e pelos arquitectos *Hoffmann* e *Olbricht*, em breve começa a expor obras de arte aplicada num estilo caracterizado por uma linearidade seca e uma estrutura acentuadamente geométrica, muito próxima da obra do escocês *Mackintosh*. Os móveis de *Hoffmann* (figura 1.10) são geralmente de grande simplicidade de composição; das duas oficinas vienenses, fundadas com o pintor *Koloman Moser*, saem produtos fortemente caracterizados não só pela linha (muitas cadeiras e cadeirões são executados em faia curvada e construídos pela firma *Thonet*), mas também pela cor, branco e negro. *Olbricht*, pelo contrário, liga a sua decoração ao círculo utilizando-o livremente sobre as superfícies com um grafismo muitas vezes exuberante, mas de composição muito elegante [13,14].



Figura 1.10 – Escrivaninha em madeira de carvalho (*Hoffmann, 1905*) [14]

Art Déco

A *Art Déco*, também conhecida como Estilo 1925, toma o nome da *Exposition Internationale des Arts Décoratifs et Industriels*, inaugurada em Paris em 1925. Nesta mostra, a par de presenças fortemente inovadoras como o *espirit nouveau* de *Corbusier*, manifestam-se aquelas características de formas elegantes e sólidas, de cores vivas e decorações ricas com uma linha simplificada, quer no mobiliário, quer nos objectos que são típicos deste estilo. O largo emprego dos materiais raros e preciosos fazem da *Art Déco* um estilo luxuoso e frequentemente reservado, devido ao alto preço dos produtos manufacturados, a clientes ricos. A par deste nicho de produtos, são produzidos outros mais baratos que tornam este estilo popular, também apreciado pelas classes médias.

As aspirações a uma renovação que se manifestam nos primeiros anos do século XX correspondem, também porque em grande parte são a sua continuação, às duas tendências estéticas do modernismo tal como se exprimiram na *Arte Nova:* a geométrico-racional, interessada na produção industrial, e a ornamental, muito ligada ao artesanato e manifestando um interesse evidente pelos estilos do passado. A *Arte Déco* abrange as duas correntes e, segundo o artista que a concebe, pode inspirar-se por vezes mais numa do que na outra.

A figura 1.11 ilustra uma mesa oval, projectada por *Mackintosh,* com um tampo dobrável, que mostra a influência da Arte Nova de estrutura racional na *Art Déco.*



Figura 1.11 – Mesa (*Mackintosh*, 1918) [14]

O nascimento de movimentos artísticos explosivos, como o Cubismo (1907), o Futurismo (1909), o Expressionismo (1909) e a atracção por experiências revolucionárias no campo da arquitectura e do *design*, como o *Deutsher Werkbund (1907)*, a que se seguiram o grupo *De*

Stjil (1917), a *Bauhaus (1919)* e o *Espirit Nouveau (1925)*, tornam compreensível a extraordinária efervescência desses anos. Para restabelecer a supremacia francesa, então nitidamente reduzida, surge a ideia de fazer em 1915 uma grande exposição, que deveria acolher as obras do «novo» estilo. A guerra faz adiar o projecto, que se concretizará apenas em 1925 com o triunfo totalmente francês da *Art Déco* [13,14].

Olhando-a de perto, a *Art Déco* apresenta-se como um fenómeno composto, na medida em que os elementos que a caracterizam têm origens diversas (estilos), mas encontram-se misturados com grande habilidade. Uma das características da *Art Déco* é a recuperação do grande artesanato; voltam a estar em moda técnicas antigas, como a muito dispendiosa laca, que é substituída nas peças de menor valor pelo verniz sintético de produção industrial. Os móveis podem ser acolchoados, envernizados, polidos, embutidos ou recobertos de pergaminho e peles de animais, o que constitui o requinte máximo. São muitas as madeiras utilizadas neste período, desde o precioso ébano ao mogno mais tradicional; mas também o pau-santo, o sicómoro, a tuia, o freixo, o ácer, a palmeira. Não faltam ainda materiais como o aço cromado, o cristal e o ferro, que são utilizados em móveis de produção industrial.

O movimento moderno

O mobiliário escandinavo

Considerado marginal e subvalorizado até aos anos 40, *o design* dos países escandinavos – Suécia, Noruega, Finlândia e Dinamarca – afirma-se em todo o mundo graças a algumas características que fazem dele qualquer coisa de único, quer do ponto de vista formal, quer do de fabrico. Ligado a uma tradição de sólida qualidade artesanal, o mobiliário escandinavo de série não renuncia à união do conforto e da elegância. Obtém grande sucesso com o seu aspecto plano e funcional, sem excesso de fantasia, mas reflectindo um amor pelos materiais, sobretudo a madeira, que se transmite a quem o utiliza. O nível médio elevado da produção escandinava não impede a afirmação de grandes *designers* como *Kaare Klint, Arne Jacobsen e Alvar Aalto.* O dinamarquês *Kaare Klint (1888-1954)* representa em formas modernas a continuidade da tradição; nos seus móveis em *teca* é particularmente significativo o estudo do espaço interior em função dos objectos que aí serão colocados. *Arne Jacobson (1902-1971),* também dinamarquês como *Klint,* obtém um grande sucesso em 1952 com uma cadeira de três pernas com armação tubular cromada e com assento em contraplacado de faia. De 1959 são as poltronas *Ovo e Cisne,* de formas sintéticas e envolventes; o estofo é em espuma de borracha, revestida de tecido ou de pele, e a base de metal possui suporte giratório. *Alvar Aalto*, expoente da arquitectura orgânica, começa por desenhar os móveis para os edifícios que projecta. O seu objectivo é substituir a estrutura

fina e leve do tubo de aço, que não o satisfaz, pela madeira de bétula curvada e laminada sob o efeito da humidade, sem ter que recorrer ao vapor como sucedia com os móveis *Thonet*. É assim que nascem banquinhos, cadeiras, poltronas, mesas, carrinhos de chã, *chaises longues* figura 1.12), de desenho inconfundível, cujas juntas são muitas vezes feitas sem recorrer a elementos metálicos; estes móveis caracterizam-se pela leveza elegante das linhas e por um gosto extraordinário pelo material utilizado [13,14].



Figura 1.12 – *Chaise Longue (Alvar Aalto)* [S6]

Uma nova forma tecnológica

O *design* americano do período da guerra e dos anos seguintes orienta-se pela utilização dos recursos tecnológicos que se desenvolveram para fazer face às necessidades da época. Neste sentido trabalham *C. Eames, E. Saarinen, G. Nelson e H. Bertoia,* que com os seus móveis dão vida a um design formalmente exuberante, composto por superfícies puras, cores vivas, curvas amplas e espaços envolventes. Projectados para serem produzidos em série, estes móveis são executados com tecnologias avançadas, materiais novos, como o poliéster reforçado com fibra de vidro, o alumínio moldado sob pressão, a fibra de vidro, as resinas sintéticas. *Charles Eames (1904-1978) e Eero Saarien (1910-1961),* filho de *Eliel Saarien,* igualmente célebre, desenham conjuntamente em 1941 um tipo de cadeira tridimensional absolutamente novo, cuja forma em cálice será utilizada por muitos *designers* até aos primeiros anos da década de 60. O móvel mais conhecido desenhado por *Eames* é certamente a poltrona *longue chair* de 1956, cuja forma plástica envolvente oferece um alto

grau de conforto. A base é em alumínio moldado sob pressão, a estrutura em madeira de *pau-rosa* e o estofo de pele (figura 1.13) [14].



Figura 1.13 – *Long Chair (Charles Eames)* [S7]

O design italiano

Nos anos 30, com a afirmação na Europa da produção de móveis e objectos fabricados em série, toda uma geração de jovens arquitectos e *designers* italianos começa a conceber os interiores num espírito radicalmente novo. A atitude ambígua do fascismo para com os adeptos do moderno, permite, pelo menos até meados da década, a livre circulação de ideias progressistas, que se exprimem até nos edifícios oficiais, como a Casa *Del Fascio* em *Como,* projectada por *Giuseppe Terragni* em 1934. *Terragni* desenha uma série de móveis de execução elegante e requintada, em tubo cromado. A presença estimulante da Trienal favorece o intercâmbio de experiências amadurecidas em toda a Europa. O nascimento de revistas especializadas estimula o debate e encoraja a concepção de obras cada vez mais originais, utilizando o ferro e o aço, mas também materiais novos como o linóleo, a *masonite* e o vidro *securit*. É nesta época que se tornam famosos arquitectos como *Franco Albini*, *Gabriele Mucchi*, *Piero Bottoni*, *Luigi Figini* e *Gino Pollini*, que produzem móveis interessantes, de estrutura racional, mas ficando muitas vezes como protótipos. Entretanto, na Itália como na Alemanha, o processo anti liberalista, provoca um claro retorno aos estilos clássicos, com todo o seu cortejo de retórica, que no espaço de poucos anos varrerá todas a ilusões modernistas. No pós-guerra regista-se uma actividade febril, e a Trienal retoma a actividade, desempenhando um importante papel informativo no *design* internacional. Afirma-se um novo grupo de *designers*: *Osvalo Bors*ari, *Marco Zanuso, Ettore Sottsass, Carlo*

Mollino, Ico Parisi que se juntam aos veteranos *Ponti* e *Albini*. *Giò Ponti* continua a sua actividade com móveis de elegância notável, sempre ligado a um estudo atento dos materiais, como na famosa cadeira *Superleggera* de 1957, executada numa esbelta estrutura de *freixo* e com assento em cana da Índia. *Franco Albini* que se distingue antes da guerra com moveis fortemente marcados pela tecnologia, como a estranha estante em madeira, ferro e cristal de 1938, desenvolve posteriormente pesquisas pessoais utilizando também matérias naturais, como na série de poltronas em cana da Índia e *junco*, entre as quais a *Gala* de 1951. *Carlo Mollino (1905-1973)* é uma figura excêntrica e singular no panorama do *design* italiano. Os seus móveis, muito originais, apresentam-se, pela sua forma e estrutura, como autênticos objectos antropomórficos, cujas contorsões vão servir de apoios: é o caso, por exemplo, das mesas em que um único elemento curvo, em *contraplacado moldado*, obtido de uma única placa, e com várias aberturas sustém prateleiras de vidro de formas livres (figura 1.14) [14].

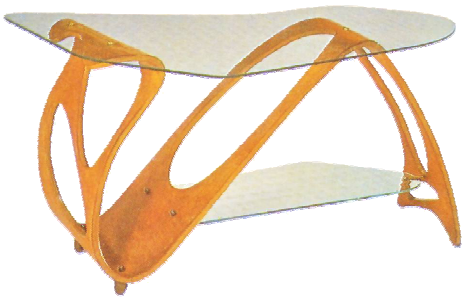


Figura 1.14 – *Mesinha (Carlo Mollino)* [14]

O design contemporâneo português

Sendo indiscutivelmente uma das marcas portuguesas mais universal, a sua fama chamou a atenção para uma corrente de arquitectos portugueses contemporâneos de grande qualidade, não sendo demais realçar a mundialmente famosa *Escola de Arquitectura do Porto* que fizeram da arquitectura um dos expoentes máximos da cultura portuguesa. Está-se a falar, entre outros nomes de *Fernando Távora*, *Eduardo Souto Moura*, *Gonçalo Byrne*, *Carrilho da Graça*.

No entanto, um destaca-se pela dedicação e empenho que sempre demonstrou no *design* de mobiliário, especialmente o concebido com recurso a materiais nobres. Com obra espalhada pelo mundo, Álvaro Siza é provavelmente o arquitecto mais premiado da actualidade, sendo de destacar o Prémio *Mies Vande Rohe* (1988), o Prémio *Alvar Aalto* (1988), o Prémio Príncipe de Gales da *Havard University* e o Prémio *Pritzker* (1992). Para

além das suas obras, tem participado em inúmeras exposições de mobiliário e objectos, peças essas que tem vindo a criar ao longo da sua longa carreira de cinquenta anos.

O grande objectivo de qualquer arquitecto é realizar uma obra completa, afirmando-se não só pela arquitectura como pela decoração e o mobiliário, prolongando o exterior pelo interior da obra.

O ilustre arquitecto português, Álvaro Siza, não escapa à regra e entre projectar arquitectura e viajar encontra o tempo para repensar e redesenhar objectos utilitários e o mobiliário com que se interage diariamente.

Essa sua actividade como *designer* de mobiliário e objectos é enaltecida pelo ICEP em 1997, numa série de exposições de *design* realizadas no Brasil (Rio de Janeiro, Curitiba e São Paulo), altura em que é editado também um livro com as suas obras mais relevantes. Entre as peças seleccionadas e no que respeita ao domínio do mobiliário, é notório o interesse do arquitecto pelos materiais naturais, nomeadamente a madeira e a pele (figura 1.15).

Entretanto, outros livros foram já publicados, com novas peças, o que realça o dinamismo e o sucesso do seu *design*.



Figura 1.15 – Cadeira C2 e Cómoda 1 (Álvaro Siza) [15]

Nas inúmeras exposições realizadas até ao momento é possível perceber a importância que para o seu autor tem a relação de complementaridade do objecto com o espaço, nas suas dimensões estética e funcional. Tal é posto em evidência através de uma sofisticada simplicidade, que é fruto de uma grande elaboração conceptual. A obra de *design* de Álvaro Siza tem merecido o maior apreço, afirmando-se com notável autonomia em relação à sua arquitectura.

Recentemente, Álvaro Siza Vieira e Eduardo Souto Moura, juntamente com o engenheiro *Cecil Balmond (ARUP)*, foram os autores do pavilhão temporário anexo à *Serpentine Gallery*, que abriu as suas portas ao público, em Londres, a 2 de Julho de 2005.

A *Serpentine Gallery* é uma das mais populares galerias públicas de arte contemporânea de Inglaterra, instalada num antigo pavilhão de chá de 1934, situada nos jardins de *Kensington* (Londres).

No desenho do pavilhão, Siza Vieira destacou o diálogo entre a nova estrutura e a linha neoclássica da galeria, a proximidade com a escala doméstica desse espaço expositivo, e a articulação entre os dois edifícios e o parque envolvente.

O pavilhão "multiusos" (café, espaço de leitura e debates e entretenimento nocturno), ilustrado na figura 1.15, assenta numa grelha rectangular distorcida de modo a criar uma forma dinâmica e curvilínea. Para o arquitecto, o edifício evoca o esqueleto de uma criatura, de coluna arqueada mas com as patas bem presas ao chão. A cobertura, feita num material translúcido, acentua ainda mais a relação do pavilhão com a paisagem envolvente.



Figura 1.15 – Pavilhão *Serpentine* 2005, Londres (Álvaro Siza e Souto Moura) [S5]

Uma observação mais atenta da estrutura permite inferir o desejo do arquitecto pela organicidade característica do local que muito habilmente é respeitada pelo material estrutural utilizado – a madeira.

O edifício constitui também uma prova de como é possível e gratificante coexistirem realidades como o *design* contemporâneo e inovações tecnológicas, com técnicas tradicionalmente elementares de construção.

O telhado assim como as paredes assemelham-se a uma malha rectangular de pontos, completamente distorcida, tendo sido concebida pela Unidade de Geometria Avançada da *ARUP*: a estrutura é composta por 427 barras de madeira laminada que se unem através de ligações do tipo "macho-fêmea", perfazendo uma galeria com um comprimento total, entre pontos extremos, de 17m. A cobertura foi revestida com 248 painéis de policarbonato.

O mobiliário integrante não foi esquecido. Aproveitando-se da organicidade estrutural do edifício, Álvaro Siza e Souto Moura projectaram cadeiras e bancos empilháveis, um conjunto de mesas (altas e baixas) assim como uma *Chaise Longue* com linhas fluidas que fazem lembrar a filosofia construtiva introduzida por *Alvar Aalto*. A madeira de bétula laminada foi o material utilizado na conformação dos diferentes componentes estruturais, e nos assentos e tampos das mesas, vidro acrílico *Frost*, o que permitiu estabelecer uma certa conformidade com a cobertura do edifico (figura 1.17).

O projecto do mobiliário, com denominação semelhante à do pavilhão, contou com uma participação 100% portuguesa, quer a nível de *design* quer a nível de desenvolvimento de produto e fabrico. Embora a maioria das empresas portuguesas ligadas ao sector possuam produção independente e direccionada para as massas (peças de autoria própria), onde a qualidade fica um pouco aquém das expectativas, existem outras que se dedicam "de corpo e alma" a nichos de mercado e a projectos desta índole, protagonizados quase sempre por arquitectos/*designers* influentes na realidade artística contemporânea. A flexibilidade produtiva e a qualidade dos produtos constituem, nestes casos particulares, parâmetros diferenciadores. Embora nem sempre populares, são estas as empresas que marcam a diferença e acrescentam valor ao que é português!



Figura 1.17 – Banco e Cadeira *Serpentine* (Álvaro Siza e Souto Moura, 2005) [cortesia SPSS Lda.]

O programa da *Serpentine Gallery Pavilion* promove assim a construção efémera de obras de arquitectos que, no seu percurso, têm vindo a expandir as barreiras dessa disciplina pela criatividade e experimentalismo dos seus projectos.

1.5 – O papel da prototipagem rápida no desenvolvimento de novos produtos

Se a possibilidade de visualizar um modelo tridimensional (3D) no computador, analisar encaixes, simular montagens, já representava um grande evolução nos processos de concepção, projecto e fabrico de produtos, perspective-se agora a possibilidade de ter o modelo físico nas mãos e de visualizar a sua forma, analisar detalhes, tocar e sentir a textura do produto, fotografar, fazer testes de campo, muito antes desse produto ser fabricado.

Isto já é hoje em dia possível graças a uma tecnologia denominada Prototipagem Rápida, conhecida também como *PR* (sigla do inglês *Rapid Prototyping*), que surgiu para automatizar a fabricação de protótipos a partir de informações do modelo 3D gerado em CAD, evitando assim os demorados processos manuais. Estima-se que a economia de tempo e dinheiro proporcionada pela prototipagem rápida na construção dos modelos seja da ordem de 70% a 80%.

A Prototipagem Rápida representa o processo de modelação físico de um *design* particular, usando para tal uma classe especial de equipamento tecnológico. Os sistemas de Prototipagem Rápida, "rapidamente" produzem modelos e peças protótipos a partir de ficheiros digitais em formato CAD 3D (. STL), de informação digital obtida por *scanners* 3D ou de sistemas digitalizadores, também 3D. Partindo de um abordagem aditiva de construção de modelos físicos, estes sistemas promovem a ligação de materiais líquidos, em pó e sólidos tipo folha de papel, a outros para constituir formas. Camada após camada, as máquinas de Prototipagem Rápida fabricam componentes em material plástico, cerâmico, celulósico (papel) e até mesmo metálico, a partir do "fino" corte local horizontal do modelo digital. Alguns críticos atentos a esta nova realidade acham que a designação *Free-Form Fabrication* é mais precisa na descrição da classe tecnológica, uma vez que as suas aplicações expandem para lá dos limites da expressão – *Fast Prototyping* [16,19].

Sendo uma extensão do modelo 3D digital, a Prototipagem Rápida está a revolucionar a indústria, oferecendo a possibilidade de lançar produtos no mercado de um modo mais célere. Além disso, a tecnologia está a ter impacto noutros domínios científicos como, por exemplo, na medicina, em particular, na especialidade dentária, na arqueologia e também na arquitectura. Proporciona aos médicos ferramentas que lhes permitem planear cirurgias, assim como produzir próteses; aos arqueólogos, recursos para a reconstrução de múmias e fósseis; aos arquitectos, facilidades acrescidas para construir maquetas. As aplicações nas áreas de medicina e odontologia, por exemplo, têm tanto potencial a ser explorado que algumas empresas têm o seu foco de vendas direccionado para esses segmentos [18].

A tecnologia está presente em todas as etapas dos processos de desenvolvimento e fabrico de produtos. É uma ferramenta essencial ao *design*, uma vez que, de modo relativamente rápido e a custos reduzidos, é possível produzir protótipos, que permitem aferir rapidamente, as qualidades formais e funcionais do objecto conceptual, evitando assim riscos desnecessários aquando a fase de fabrico.

Pode ainda funcionar como um meio de validação das referências formais do produto junto dos consumidores. Antes de dar inicio à sua integração num processo produtivo, a empresa pode sondar a opinião dos potenciais interessados e tomar medidas para que as sugestões obtidas possam ser integradas no produto. Assim a probabilidade de satisfação global será incrementada.

Antes de colocar o produto em linha de fabrico, o protótipo pode ser usado para fazer *benchmarking*, ouvir a opinião de especialistas de diversos segmentos – marketing, comercial, etc. Dependendo da necessidade, ainda na fase de protótipo é possível realizar sessões fotográficas e divulgação interna.

Já no processo de fabrico, a Prototipagem Rápida permite simular a resistência de uma peça ou conferir medidas e mecanismos de acoplamento. Deste modo testa-se a aptidão do material seleccionado relativamente ao projecto. O protótipo serve também como elemento de orçamentação. É bastante mais simples obter uma estimativa orçamental credível de um produto se for possível ter o seu homólogo protótipo em mãos.

Os protótipos obtidos através desta tecnologia têm ainda uma importância relevante nos testes funcionais. A título de exemplo pode referir-se a utilização desses modelos em testes prévios, como ensaios num túnel de vento para componentes aeronáuticos, estudos do coeficiente de penetração aerodinâmica de veículos ou análise foto-elástica para verificar pontos concentradores de tensões em peças [19].

1.5.1 Novos materiais

Independentemente dos avultados custos dos equipamentos e do pouco conhecimento sobre os seus benefícios por uma grande parte de potenciais utilizadores, a PR evolui a passos largos, oferecendo novas tecnologias e sofisticando cada vez mais a qualidade do material dos protótipos que, em alguns casos, podem ser usados como produto final.

O elevado grau de personalização requerido pelo mercado exige das indústrias cada vez mais flexibilidade nos processos de desenvolvimento e fabrico de produtos. Assim, a PR assume-se como uma solução para atender às novas demandas dos consumidores.

A produção de protótipos funcionais tornou-se possível graças à evolução dos novos materiais usados na geração dos modelos. De acordo com os especialistas, as máquinas continuam a evoluir, mas as investigações na área dos materiais avançam a um ritmo superior. Por isso, os esforços intelectuais centram-se nessa área.

O utilizador actual não sente tanto a necessidade de maior velocidade, mas de maior desempenho dos protótipos. Ele prefere que o seu modelo seja construído no mesmo material que o produto final, para fins de teste e de desempenho, do que ter uma peça em duas ou três horas, e não poder manuseá-la depois de concluída.

Existem testes em que o protótipo (componente) é colocado num determinado produto e testado em condições reais de funcionamento (como exemplo, imagine-se o depósito de combustível de um cortador de relva). Dependendo do material utilizado, moldes protótipo podem exibir resistência mecânica suficiente para poderem ser usados no fabrico de centenas ou milhares de produtos e dispensarem a realização do molde final obtido por tecnologias convencionais.

A vantagem desse processo é a redução de tempo para fabrico de moldes complexos relativamente ao modo convencional, aumentando ainda mais a vantagem das empresas face ao reduzido período de vida dos produtos. Uma pesquisa efectuada entre utilizadores mostrou que 37% dos protótipos hoje produzidos são utilizados para analisar montagens e para realizar testes funcionais, 26% são para visualização nas áreas de design e projecto e outros 26% são modelos de ferramentas e de fundição [16].

1.5.2 Aquisição de equipamento de PR *vs* aquisição de serviços de PR

Devido aos elevados preços dos equipamentos e à escassez da procura por protótipos existentes, algumas empresas que utilizam a Prototipagem Rápida optam pela contratação de serviços ao invés de adquirem máquinas, por ser mais vantajoso.

A PR para áreas onde o sigilo profissional é importante (design, industria automóvel, aeronáutica, joalharia, etc.) não deve ser realizada por outra empresa se atendermos às constantes preocupações relacionadas com a protecção da propriedade industrial. O ideal, neste tipo de situações particulares, é a empresa adquirir o seu próprio equipamento e produzir os seus protótipos "em casa".

Convém considerar também os níveis de procura por protótipos. Se forem reduzidos ou sazonais (1 de 10 em 10 meses, por exemplo), o prestador de serviços talvez seja a melhor

opção. Caso a produção seja moderada mas contínua, a aquisição de um equipamento pode revelar-se bastante proveitosa.

Um outro aspecto a ser levado em conta é o tempo que os *designers* e engenheiros terão de esperar para terem os modelos prontos. Mesmo que uma peça seja produzida numa questão de horas, num escritório de serviços pode levar uma semana devido à burocracia que envolve a solicitação do serviço.

A empresa deve ainda avaliar o custo/benefício do investimento, analisar como os seus protótipos são feitos através do processo convencional, contabilizar custos e compara-los com os protótipos obtidos via PR, considerando também o investimento do equipamento.

1.5.3 Selecção do um equipamento de PR

A decisão de compra do equipamento deve ser feita com muita atenção. O primeiro passo é analisar itens básicos como a precisão da máquina, materiais usados para produzir os modelos, a facilidade de operação, custo do equipamento e o custo de operação. Os futuros utilizadores precisam estar atentos ao facto de que a aquisição da máquina não envolve apenas a compra do equipamento em si. A empresa deve saber onde e como pretende usar os seus protótipos para poder seleccionar o equipamento e materiais adequados. Além do material usado para gerar os modelos, a empresa deve informar-se sobre o tipo de acabamento que o material possibilita, qual a vida útil dos protótipos e se o material traz riscos para a saúde e até se há necessidade de algum tipo de autorização ou licença por parte dos órgãos de saúde para o usar. Deve verificar ainda o tipo de infra-estrutura necessário para o bom funcionamento do equipamento. Existem no mercado sistemas que precisam de ambiente climatizado e fundação anti-vibração até sistemas que podem simplesmente ser colocados numa mesa e ligados à rede eléctrica [18].

1.5.4 Da Califórnia para o mundo

A indústria de Prototipagem Rápida nasceu timidamente na Califórnia (EUA), em 1988, através da *3D Systems* que, até 1992, era detentora de 90% do mercado. A realidade actual é bem diferente. Hoje, o mercado mundial conta com mais de 30 fabricantes actuando no sector. Aproximadamente 20 dessas empresas desenvolvem tecnologias derivadas da estereolitografia, lançada pela *3D Systems*. De acordo com o *Wohlers Report 2006* [18], da empresa de consultoria especializada na área de prototipagem, ferramentas e fabrico rápido, *Wohlers Associates*, a indústria de prototipagem rápida vendeu no mercado mundial, em

2005, um total de 3609 equipamentos. O número é baixo quando comparado com outros tipos de produto, mas representa um crescimento de 23.9% em relação ao ano de 2004, quando foram vendidas 2914 máquinas. Nesse mesmo período verificou-se um crescimento anual de vendas na ordem dos 55.7%, comparativamente a 2003. A prototipagem não é uma tecnologia das massas, por isso, é fácil perceber o entusiasmo dos fabricantes com a venda anual de 3609 equipamentos. A figura 1.18 ilustra uma clara tendência de crescimento das vendas anuais, a nível mundial, de sistemas de prototipagem rápida. Os valores apresentados para 2006 e 2007 são previsões obtidas pela *Wohlers Associates*, a qual estima um crescimento de 25.7% para aqueles dois anos.

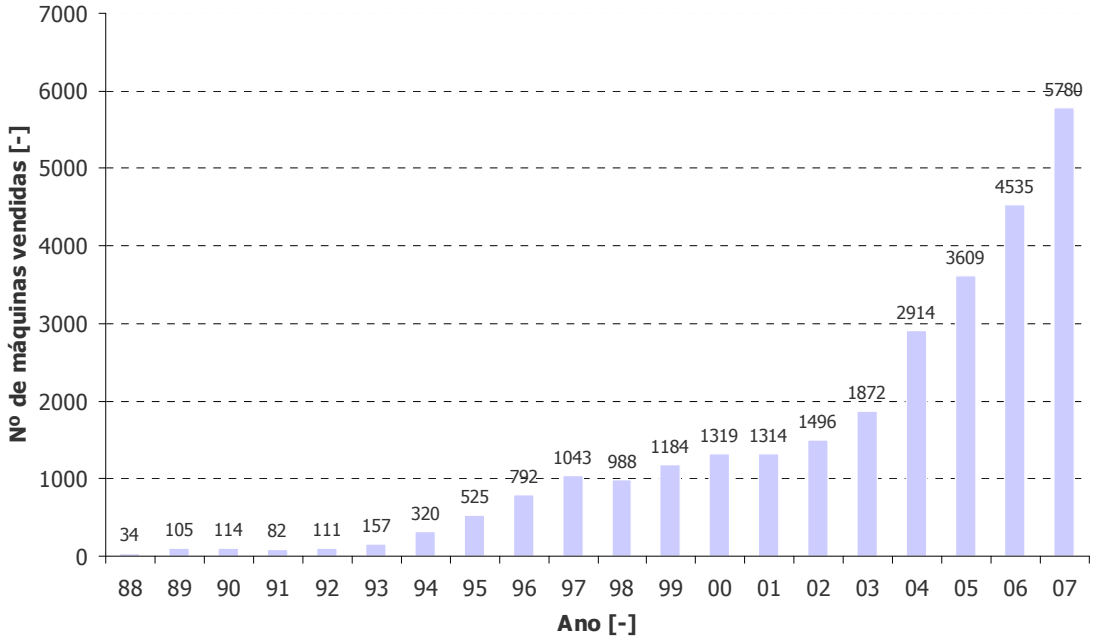


Figura 1.18 – Unidades vendidas anualmente de sistemas de PR, a nível mundial [18]

As máquinas fazem parte de um nicho de mercado e exigem um investimento elevado, mas dado o aumento de produtividade que proporcionam, pagam-se rapidamente se bem exploradas. O preço médio de venda (PMV) de um sistema aditivo tem vindo a diminuir, fruto da popularidade crescente que tem alcançado no seio do mundo industrial. Em 2005, o PMV fixou-se nos 68.004 euros, 22% inferior ao registado no período anual anterior – 87.109 euros. Ainda a título de referência, em 2001, o PMV situava-se nos 114.488 euros.

Quando a tecnologia foi lançada em 1988 tinha os seguintes objectivos:

– Diminuir o tempo de desenvolvimento de um produto – *time-to-market*;

– Minimizar problemas de engenharia como encaixes, montagens e interferências;

– Aumentar o período de vida útil do produto possibilitando alterações durante a fase conceptual;

– Reduzir o tempo de construção de um protótipo convencional.

Actualmente, além da melhoria contínua das metas pré estabelecidas, a tecnologia evolui em novas direcções, nomeadamente na do fabrico rápido – *Rapid Manufacturing* [18,20].

1.6 – Objectivos do trabalho

Em Portugal, mais especificamente, na zona Norte do país está concentrada a maior parte da indústria nacional de mobiliário. Na sua maioria são empresas que se dedicam ao trabalho em série havendo outras que se diferenciam pela diversidade de trabalhos que executam e pela capacidade de se adaptarem facilmente a novos mercado dentro do sector, tendo como filosofia base a *mass customization* (produção personalizada).

São autênticos ateliers de carpintaria cuja especificidade de determinados tipos de trabalhos em madeiras nobres (madeiras provenientes de espécies arbóreas com crescimento lento, de elevada densidade, com cores, texturas e odores muito peculiares – *Wengé, Pau-Santo, Ébano, IPÊ, Pau Rosa, Pau Cetim*, entre outras), nomeadamente a execução de mobiliário, objectos ornamentais e esculturas de autor, põe de parte o conceito de peça vulgar, muitas vezes associado à utilização daquele material. Depois de concebidas, produzidas e concluídas, estas peças destacam-se das demais pela sua beleza estética e pelo seu valor comercial.

O gosto pela arte e o desejo de apoiar o experimentalismo de projectos de arquitectura e design, nacionais ou internacionais, obriga à aquisição de equipamentos industriais, de apoio à produção, que permitam às empresas participantes uma maior flexibilidade e rapidez de concretização, atendendo à diversidade de propostas que muitas vezes se apresentam. Entre os recursos produtivos mais flexíveis destacam-se os centros de maquinagem de controlo numérico computorizado, vulgo CNC's.

A criatividade de algumas obras origina, por vezes, formas orgânicas, de geometria complexa, cuja produção acarreta desperdícios que não são devidamente valorizados, se atendermos ao elevado custo da matéria-prima. As inúmeras operações de desbaste, realizadas automaticamente por aqueles centros de maquinagem, que são necessárias para extrair a peça desejada do interior de um bloco de madeira maciça geram subprodutos sob

a forma de grânulos, cuja forma e dimensão variam consoante a espécie utilizada assim como a ferramenta de corte empregue no processo. Estes resíduos, apesar de dissociados do bloco original, continuam a ser madeira mas num outro estado. Um todo contínuo transforma-se assim num conjunto discreto de micro partículas que continuam a partilhar do mesmo estatuto de nobreza da madeira que a caracteriza no seu estado inicial.

Se, a partir de um bloco de madeira maciça, extraem-se peças de elevada qualidade e nobreza, por que não construir outras peças, igualmente nobres, mas a partir dos resíduos gerados aquando a produção das primeiras?

Esta questão conduziu a reflexões profundas sobre a natureza do material em questão e sobre o que de mais inovador se faz, actualmente, no mundo dos plásticos, nomeadamente no campo da Prototipagem Rápida e do Fabrico Rápido.

A possibilidade actual de se produzirem peças, a partir de pós e resinas projectadas por sistemas automáticos de deposição (*Microdrop*™), em equipamentos semelhantes a impressoras do tipo jacto de tinta, é real e apresenta já um desenvolvimento considerável. Os materiais de construção usados neste tipo de tecnologias são, na sua maioria, de natureza polimérica, os quais são produzidos especialmente para o equipamento onde irão ser utilizados. Daí a limitação da aplicabilidade dos processos existentes a outro tipo de materiais.

A consciencialização da realidade tecnológica actual ao nível da impressão tridimensional, das suas limitações e da necessidade em (re)utilizar desperdícios (pós) de madeiras nobres, usadas na produção de obras de índole artística, levaram a formulação da seguinte questão:

Se são já utilizados pós, embora estes de natureza polimérica, como material base na construção de protótipos e componentes, a partir de equipamentos específicos de impressão tridimensional, por que não substituir o pó plástico por um outro de natureza lenho celulósica, e construir com recurso a ele novas peças, usando o mesmo processo tecnológico ou outro adaptado?

Esta terá sido a questão principal que desplotou todo o interesse na elaboração de uma tese (este trabalho!) que foca a viabilidade tecnológica de se concretizarem novas peças à base de resíduos de madeira, nunca antes utilizados com vista a esse fim.

Numa tentativa de salvaguardar o respeito pelo meio ambiente e, por conseguinte, este material tão nobre que é a madeira, o autor estuda igualmente a viabilidade de implementar um novo processo produtivo, com base nas já existentes tecnologias de prototipagem rápida, para produzir peças/componentes finais, para a industria do mobiliário e dos objectos decorativos em madeira.

O trabalho que se apresenta tem como conceito base o princípio de sustentabilidade e mostra (mais) uma forma de *acrescentar valor à madeira, da árvore ao serrim*.

A indústria da Prototipagem Rápida, que evolui a passos largos em direcção à *Rapid Manufacturing* (Fabrico Rápido) surge aqui como o meio tecnológico ideal para atingir o objectivo proposto.

Acredita-se que a matéria-prima tem um potencial enorme de incorporação de valor, mesmo naquela forma que, na prática actual, é ineficientemente rentabilizado.

Rentabilizar não é só fazer o que já se faz habitualmente – melhor e mais barato. É preciso fazer mais com o que entra em fábrica e nem sempre os recursos tecnológicos disponíveis são suficientes para gerar mais valor. É necessário procurar incorporar mais transformação e mais aplicação para o desperdício, ou seja, avançar na cadeira de valor, desde a floresta até ao consumidor final. Para tal é preciso inovar, romper com padrões pré estabelecidos de fabrico e avançar com novas possibilidades produtivas, que agora podem ser consideradas utópicas mas que num futuro muito próximo poderão constituir uma realidade bem definida e economicamente viável.

Capítulo 2

A madeira como material de engenharia

Material de construção desde sempre, a madeira cumpre uma função tanto estrutural como de revestimento, e cuja procura cresce diariamente por ser, entre outras coisas, o único recurso natural renovável mediante o cultivo de florestas artificiais. Na sua utilização como revestimento, a investigação aporta continuamente novidades que melhoram os pontos mais débeis deste material, muito embora o sucesso da sua aplicabilidade esteja quase sempre relacionado com a escolha acertada da espécie e um bom desenho construtivo que respeite as suas características peculiares.

A madeira foi, provavelmente, o primeiro material usado pelo homem com fins estruturais e que, através do séculos, tem permitido a realização de obras de todo o tipo. Actualmente observa-se um interesse crescente por este material que se justifica, em grande parte, pela sua grande vitalidade. Com efeito, a madeira pode ser "plantada" e, mais tarde, colhida. É o único recurso natural renovável dotado de boas propriedades estruturais.

A madeira é um produto natural e provém do abate de árvores. Existe um grande número de espécies distintas, cerca de 30.000 (apenas 2000 possuem carácter comercial), o que faz com que dentro do mesmo material existam diferenças consideráveis com respeito às suas propriedades, que variam também segundo cada árvore dentro da mesma espécie. As madeiras podem dividir-se, muito genericamente, em macias e duras. As macias, na sua maioria, provêm das *Coníferas (ou Resinosas)* (abetos, pináceas, cedros, pinhos, etc.) e crescem em zonas frias e temperadas. A sua plantação e operação com fins comerciais dão-se, essencialmente, no hemisfério norte. Têm um crescimento relativamente rápido, dando lugar a troncos rectos que podem ser cultivados e sujeitos a abate em florestes artificiais. São geralmente macias e apresentam colorações relativamente claras. As árvores cuja

madeira é considerada dura (*Folhosas* ou *Frondosas*), crescem em zonas temperadas e tropicais. Apresentam uma maior gama de cores e texturas, sendo o crescimento mais lento.

É o único material vivo que, mesmo depois de isolado do tronco, permanece com vida e prova disso são os seus contínuos movimentos e as suas diferentes patologias. Independentemente do seu comportamento inconstante, merecem destaque as suas qualidades, quase sempre distintas – fibras, nós, cores. A sua estrutura é de natureza anisotrópica com uma direcção predominante claramente visível, o que condiciona as suas características mecânicas e físicas, diferentes nas três direcções principais: tangencial, radial e transversal.

Muitos dos problemas relacionados com a madeira prendem-se com a sua característica higroscópica, com a qual o material alcança o equilíbrio com o meio ambiente. Absorve ou elimina água consoante as condições de temperatura e humidade relativa do meio circundante, que pode ir desde a saturação da fibra, cerca de 30% de humidade nas paredes celulares, até ao equilíbrio com a humidade relativa do espaço envolvente. Na Península Ibérica considera-se humidade de equilíbrio uma humidade média de 13%, para aplicações exteriores, e cerca de 8% para a madeira que vai ser usada em interiores. Nestas condições, a madeira atingirá rapidamente o equilíbrio com o meio ambiente e permanecerá no seu local de uso sem que movimentos significativos de dilatação e contracção ocorram.

A figura seguinte ilustra um gráfico que permite determinar o teor de humidade da madeira para determinadas condições de humidade relativa e temperatura do ar ambiente.

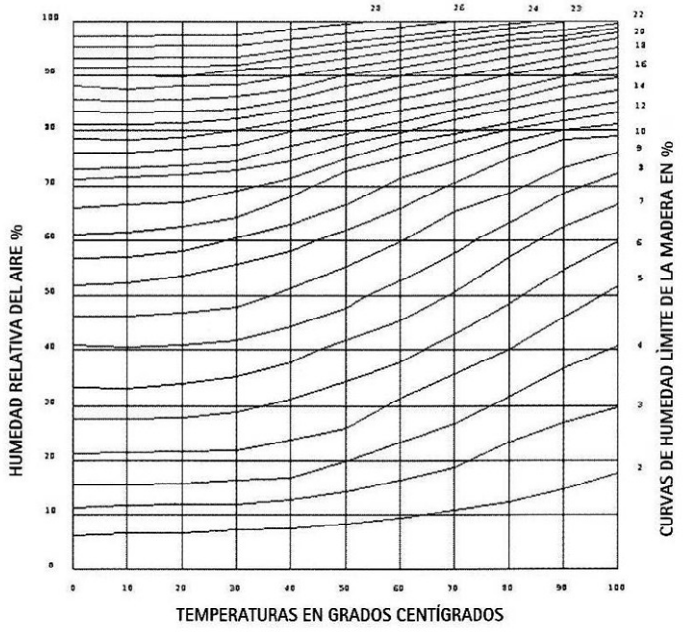


Figura 2.1 – Representação gráfica da humidade da madeira em equilíbrio higroscópico [12]

Este tipo de movimentos ocorrerá em maior ou menor grau de acordo com o modo de extracção da madeira tronco. Normalmente os movimentos de contracção têm lugar na direcção radial, ou seja, na direcção dos anéis de crescimento. De um modo geral, as contracções na direcção longitudinal são desprezáveis, quando comparadas com as outras duas direcções. As contracções segundo a direcção tangencial podem ser 1.5 a 2 vezes superiores às registadas na direcção radial, podendo ambas registar valores que podem variar entre 2% e 10%.

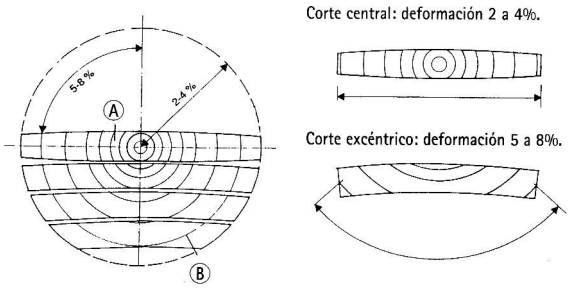


Figura 2.2 – Representação esquemática da deformação segundo o tipo de corte [12]

Daqui se deduz a importância do modo como a madeira é serrada. O tipo de corte é geralmente relativo aos anéis de crescimento e a sua geometria define o aspecto e estabilidade da madeira. A imagem seguinte ilustra tipos de corte habituais.

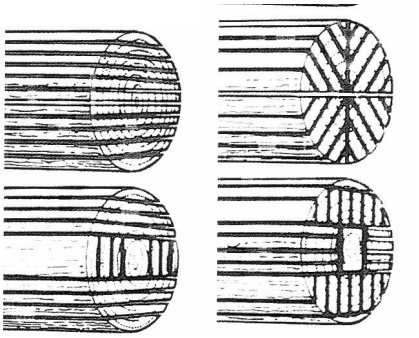


Figura 2.3 – Diferentes tipos de planos de corte de troncos de madeira [12]

Assim com o modo de corte, o momento de abate das árvores para extracção da madeira é também considerado um factor decisivo no seu comportamento. A melhor madeira é aquela que se extrai durante a época de Inverno, quando a actividade vegetativa é mais lenta e contém menos substâncias nutrientes, sendo, portanto, menos propensa a sofrer ataques de fungos e insectos.

2.1 A natureza da madeira

Sendo o mais antigo material de construção usado pelo homem, a madeira «é ao mesmo tempo, entre os muitos materiais básicos importantes, o mais e o menos conhecido» [21].

Apesar das inúmeras investigações realizadas até ao momento, a madeira continua a revelar-se como uma matéria-prima de natureza complexa, o que impõe, à partida, limitações significativas à sua utilização. A incerteza associada à variabilidade das suas principais propriedades com o tempo põe em causa a segurança e eficácia da sua aplicabilidade.

Abstraindo das particularidades de cada espécie, sempre que se proceder à eleição de uma madeira para determinada finalidade dever-se-á atender aos seguintes pontos fundamentais relativos a características que são comuns a todas as madeiras [21]:

1 – Os troncos apresentam, de um modo geral, uma estrutura predominante vertical e simetria radial;

2 – A madeira, independentemente da sua origem, apresenta uma estrutura celular. A composição química das paredes celulares é particularmente semelhante sendo os seus principais constituintes a celulose, os hidratos de carbono não celulósicos e a lenhina;

3 – Todas as espécies de madeira são anisotrópicas, isto é, apresentam propriedades físicas diferentes quando avaliadas em relação aos três eixos direccionais – longitudinal, radial e tangencial. Esta característica resulta da estrutura e orientação da celulose nas paredes das células, da forma alongada destas paredes e do arranjo longitudinal-radial das células relativamente aos eixos horizontal e vertical do tronco;

4 – A madeira é uma substância higroscópica, isto é, a sua humidade relativa varia em função das oscilações da temperatura ambiente e da humidade atmosférica. Considerando a sua natureza anisotrópica, estas flutuações da humidade relativa conduzem a alterações nas dimensões da madeira que são diferentes consoante o eixo direccional aferido. Tais alterações são relativamente pequenas na direcção longitudinal, mas consideráveis nas outras duas direcções;

5 – A madeira é permissiva ao ataque de agentes fungicidas e/ou bacterianos e insectos. O facto de ser inflamável torna-a susceptível de ser destruída pelo fogo, especialmente quando se encontra seca.

2.1.1 Formação do lenho

A madeira é um material heterogéneo cuja constituição se baseia num conjunto de células morfologicamente distintas. A sua estrutura e propriedades não são constantes, variando com a idade e condições de crescimento da árvore. O estudo anatómico do lenho, no qual de baseia a moderna tecnologia das madeiras deverá, portanto, iniciar-se por uma análise detalhada da própria formação do lenho.

2.1.2 Fisiologia e crescimento das árvores

Uma árvore compõe-se, essencialmente, de raiz, caule e copa. A raiz fixa a árvore ao solo e dele retira a água contendo sais minerais dissolvidos, que constitui a seiva bruta indispensável ao seu desenvolvimento. O caule, que no caso de uma árvore tem o nome de tronco, sustenta a copa e conduz, por capilaridade, tanto a seiva bruta, desde a raiz até às folhas da copa, como a seiva elaborada, das folhas para o lenho em crescimento. A copa é formada pelos ramos, folhas, flores e frutos. Nas folhas processa-se a transformação da seiva bruta em seiva elaborada. A madeira provém directamente do lenho dos vegetais superiores, árvores e certos arbustos. Como ilustra a Figura 1, a observação duma secção transversal dum tronco de árvore permite distinguir da periferia para o centro, as seguintes zonas (figura 2.4):

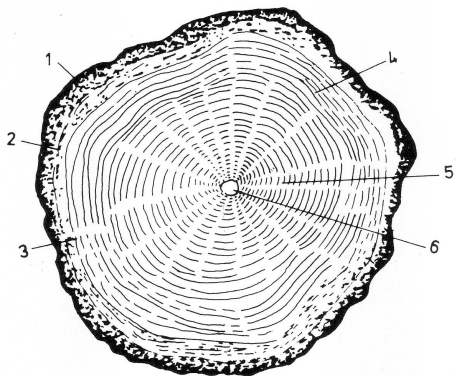


Figura 2.4 – Corte transversal do tronco duma árvore: 1 – Casca; 2 – Entrecasco; 3 – Câmbio; 4 – Borne; 5 – Cerne; 6 – Medula [21]

Casca

A sua função específica é proteger o lenho e conduzir a seiva que foi elaborada nas folhas. Nela distinguem-se duas camadas: uma externa, *epidérmica*, composta por tecido morto, designado *ritidoma*, e outra interna, formada por tecido vivo, condutora da seiva elaborada, e que é denominada *liber* ou *floema*. A casca tem ainda uma função protectora na medida em que protege os tecidos mais novos das incidências desfavoráveis dos factores ambientais, dos excessos de evaporação e de outros agentes adversos, como o fogo, as pragas e as doenças. Ao envelhecer, a casca fende-se, cai e renova-se. Geralmente, a casca não é interessante como material de construção. Todavia, existem algumas espécies, como o sobreiro, onde a casca, aqui designada cortiça, se apresenta bastante desenvolvida de tal forma que é possível extraí-la em *pranchas*. As suas excelentes propriedades termo-acústicas determinam o seu largo emprego como material de construção.

Câmbio

É uma camada muito fina, quase invisível, composta de tecidos vivos e situa-se entre a casca e o lenho. Tanto o liber como o câmbio são vitais para o crescimento da árvore, daí que o seu seccionamento, acidental ou intencionalmente provocado, ocasiona a morte do vegetal. No câmbio processa-se uma importante transformação: a dos açucares e amidos em celulose e lenhina, principais constituintes do tecido lenhoso. O crescimento transversal caracteriza-se pela adição de novas camadas concêntricas e periféricas resultantes da referida transformação no câmbio, *anéis de crescimento anual*. Nestes anéis reflectem-se as condições de desenvolvimento da árvore: largos e pouco diferenciados nas espécies tropicais de rápido crescimento; estreitos e bem distintos nas espécies típicas das zonas temperadas ou frias. Em cada um dos anéis que se formam ano a ano é possível distinguir duas camadas: uma de cor clara, com células longas de paredes finas, formada durante o período Primavera-Verão; e outra, de cor escura, com células estreitas e de paredes grossas, formada no decurso do período Verão-Outono. A primeira camada designa-se *lenho inicial* e a segunda *lenho tardio*. Os anéis de crescimento constituem uma ferramenta essencial na determinação da idade da árvore assim como no estudo da anisotropia da madeira. Daqui advém a razão por que, nos ensaios físico-mecânicos das madeiras, se consideram três direcções ou eixos principais (figura 2.5):

– Direcção transversal, perpendicular ao eixo longitudinal do caule;

– Direcção radial, ou direcção transversal radial aos anéis de crescimento;

– Direcção tangencial, ou direcção tangencial aos anéis de crescimento.

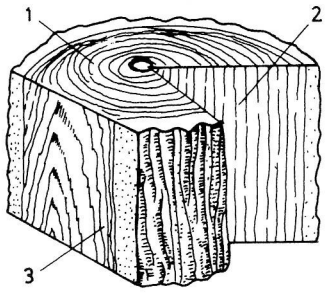


Figura 2.5 – Cortes principais no tronco de uma árvore: 1 – Transversal; 2 – Radial; 3 – Tangencial [21]

Lenho

É a base de sustentação e resistência das árvores onde, na sua parte viva, circula a seiva bruta. Constitui a parte útil do caule no que respeita ao fornecimento de matéria-prima lenhosa. Para a generalidade das espécies arbóreas o lenho apresenta duas camadas diferenciadas: o borne e o cerne. O borne constitui a camada externa e possui uma coloração mais clara que o cerne. É constituído por células vivas através das quais se processa a circulação da seiva bruta, por ascensão capilar, desde as raízes até à copa. O cerne, camada interior, apresenta cor mais escura que o borne e é constituído por células mortas. As modificações que ocorrem no borne promovem a formação e ampliação do cerne, e resultam dum progressivo e crescente espessamento das paredes celulares, provocado por sucessivas impregnações de lenhina, resinas, taninos e corantes. Em consequência desta transformação, o cerne apresenta uma mais elevada densidade, pois, sendo constituído por tecido morto (sem seiva, amido, açucares) não é facilmente atacado pelos agentes depredadores da madeira. Embora qualitativamente o borne seja inferior ao cerne, o seu aproveitamento é no entanto recomendável, quer do ponto de vista económico quer tecnológico, não só porque apresenta uma elevada proporção do tronco (25% a 60%), mas também porque é a parte que melhor se deixa impregnar pelos preservantes, além de que apresenta propriedades físico-mecâncias satisfatórias.

Medula

É o "miolo" central do tronco, facilmente identificável numa secção transversal, sendo constituído por tecido frouxo e esponjoso. Não tem resistência mecânica nem durabilidade, o que constitui um defeito sob o ponto de vista tecnológico.

Raios medulares

Anatomicamente são desenvolvimentos transversais radiais de tecido lenhoso. A sua função principal é o transporte e armazenamento de nutrientes [21,22].

2.1.3 Estrutura anatómica do lenho

A estrutura do lenho define, geralmente, as propriedades da madeira, muito embora nem sempre se possa explicar rigorosamente o comportamento tecnológico do material lenhoso. A sua constituição assenta numa multiplicidade de células elementares cujas dimensões, formas e arranjos são bastante diferenciados, consoante a sua localização no tronco e a espécie arbórea respectiva. O tecido lenhoso apresenta assim uma constituição diversificada, a qual confere um comportamento físico-mecânico e anisotrópico heterogéneos assim como uma evidente diferenciação nas propriedades de peças provenientes de espécies distintas e/ou provenientes de secções distintas no interior do mesmo toro. Para devidamente comentar o comportamento algo complexo do material lenhoso é indispensável ter conhecimento da sua estrutura fibro-anatómica.

O lenho das *Resinosas (Coníferas)* é constituído, principalmente, por células alongadas, de diâmetro praticamente uniforme, assemelhando-se a tubos muito finos, designados por traqueídos, que desempenham uma dupla função: condução da seiva e suporte mecânico (figura 2.6).

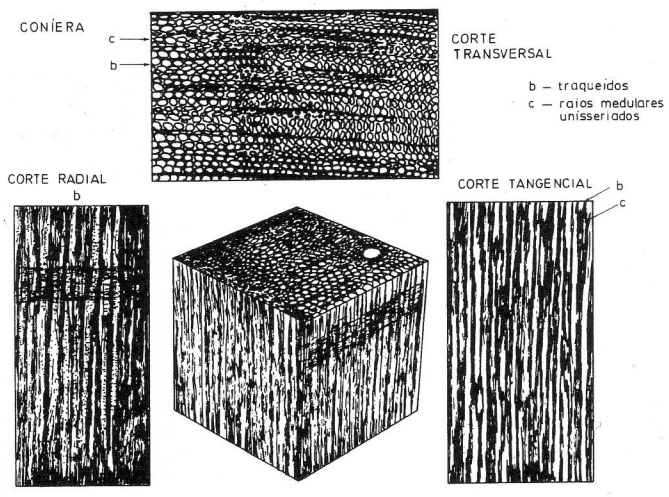


Figura 2.6 – Estrutura anatómica das Resinosas [21]

Um exame microscópico permite constatar além dos traqueídos, a existência de numerosas linhas finas e claras, desenvolvendo-se na direcção radial, os *raios modelares* ou *raios lenhosos*, que servem para a condução e/ou armazenamento de substâncias nutrientes, radialmente.

As Resinosas contêm ainda os chamados canais resinosos que podem ser observados à vista desarmada. Aparecem em cortes transversais do lenho como reduzidas aberturas ou pontuações mais escuras, normalmente impregnados de óleos e resinas.

O lenho das *Folhosas* difere do lenho das Resinosas por possuir traqueídos que, através da observação microscópica, aparecem como diminutas aberturas circulares ou poros. Em corte transversal, os vasos apresentam dimensão superior aos outros elementos fibrosos. A sua função específica prende-se com a condução da seiva bruta. A principal característica anatómica das Folhosas reside na existência de células fibrosas – fibras propriamente ditas – que formam o seu tecido lenhoso bem diferenciado. As fibras possuem menor diâmetro que os traqueídos das Resinosas e estão dispostas longitudinalmente no caule. Apresentam grande comprimento, extremidades fechadas e afiladas, diâmetros variados e reduzidos. Constituem o tecido de resistência e suporte das árvores. Os raios medulares nas Folhosas são muito mais desenvolvidos que os seus homólogos das Resinosas (ver figuras 2.6 e 2.7) [21].

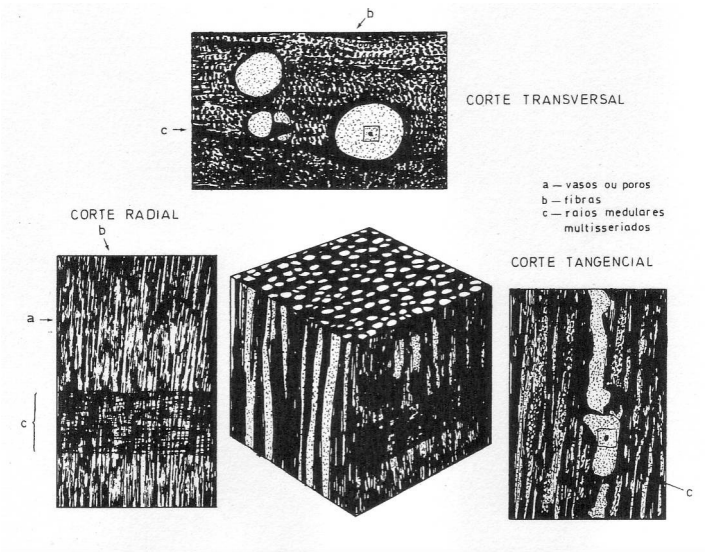


Figura 2.7 – Estrutura anatómica das Folhosas [21]

2.2 Textura da madeira

Quando se visualiza uma amostra de madeira importa apreciar a sua textura, ou mais correctamente, o seu grão. Assim, as madeiras que apresentam superfícies muito macias, *isentas de sulcos e poros*, como o Buxo, são denominadas de grão fino (textura fina), enquanto que outras, como os Carvalhos, com poros muito abertos e raios largos, são chamadas de grão grosseiro (textura grosseira).

As madeiras são ainda agrupadas em homogéneas (textura uniforme) ou heterogéneas (textura desigual), consoante os anéis de crescimento são pouco ou muito diferenciados.

Quando se procede a um corte longitudinal num toro de madeira, as meias metades resultantes podem apresentar superfícies de fractura desiguais, dependentes da disposição do *fio da madeira*, ou seja, da orientação e disposição relativa das fibras. Não raras as vezes é possível notar-se à superfície da casca ou do toro descascado marcas ou fendas helicoidais indicadoras de que as fibras, em vez de se alinharem paralelamente ao eixo do tronco (fio recto), se encontram inclinadas (fio torcido).

Também é do conhecimento geral que, por vezes, quando se desengrossa uma tábua (utilizando uma máquina de desengrosso ou até mesmo uma plaina manual), verifica-se o *arrepelamento* do tecido lenhoso em certas zonas. Este comportamento é quase sempre devido à presença de fibras que não estão dispostas paralelamente ao eixo, isto é, madeiras

sem fio recto, usualmente designadas por *madeiras revessas*. Além do fio recto e do fio torcido existe ainda o fio *ondulado*, o fio *revesso* e o fio *irregular*.

Na presença de uma amostra de madeira o que, normalmente, ressalta à vista é o desenho das formações correspondentes às camadas de crescimento, que formam o chamado *veio da madeira*. Se estas formações são relativamente rectilíneas e paralelas, o veio diz-se *recto*; se se dispõem em forma de V, o veio diz-se *espinhado*; por último, se os contornos das várias formações são sinuosos, o veio diz-se *ondulado* [21,22].

2.3 Propriedades sensitivas das madeiras

Constituem um valioso auxílio na sua identificação, todavia, o seu conhecimento visa a qualificação das madeiras com vista a uma adequada aplicação. Em seguida serão apresentadas as propriedades com maior interesse prático.

2.3.1 Cor

A cor, assim como o desenho, é uma característica relevante sob o ponto de vista estético (decorativo). A cor das madeiras provém, geralmente, da existência de substâncias colorantes que se depositam nos tecidos lenhosos. As Resinosas apresentam zonas mais claras de Primavera, contrastando com zonas acastanhadas, mais ou menos escuras, de Verão. Nas Folhosas, a diferença de cor entre aquelas duas estações não é significativa. Contudo, as madeiras das Folhosas variam de cor consoante a espécie, sendo algumas quase brancas, como certos Choupos e Plátanos, outras castanhas claras, como o Castanheiro e o Ulmeiro, outras mais escuras e manchadas, como a Nogueira e outras até pretas, como o Ébano e o Pau Preto africanos.

Quanto às madeiras tropicais, a gama de cores é muito mais variada, em virtude da heterogeneidade das condições morfológicas, solos e climas.

Quanto mais escura é a coloração da madeira, maior é a sua resistência a insectos e fungos. Isto deve-se, em parte, à presença das substâncias corantes que apresentam, muitas vezes, um elevado grau de toxidade, e ao facto de não integrarem as paredes das células.

2.3.2 Brilho

As madeiras dividem-se em *baças* e *lustrosas*. A *Faia*, a *Nogueira* e a maioria dos *Carvalhos* inserem-se no grupo das baças enquanto que o *Castanheiro*, o *Eucalipto*, o *Pau Cetim* (ou *Pau Amarelo*) e, mais expressivamente, o *Buxo*, são exemplos de madeiras lustrosas.

2.3.3 Gosto e cheiro

É comum afirmar-se que as madeiras não têm cheiro. Porém, em algumas espécies, a presença de determinadas substâncias voláteis conferem-lhes odores *sui-generis* As madeiras classificam-se então de inodoras, de que são exemplos a *Faia* e a *Nogueira*, e odoríferas, como o *Choupo* e o *Eucalipto* recentemente cortados. Nalguns casos o cheiro do cerne é duradouro e agradável, sendo as respectivas madeiras designadas aromáticas, como acontece com o *Sândalo*, a *Cânfora*, a *Riga Velha*, e outras. Ao invés, como sucede com alguns Choupos, ainda em verde, exalam odores incómodos. O gosto está directamente relacionado com o cheiro, sendo habitual atribuir-lhe um significado especial. A presença de tanino em certas espécies, como é o caso do *Castanheiro* e do *Carvalho*, atribui-lhes aplicabilidade específica no que respeita à produção de vasilhame para produtos espirituosos (vinhos, aguardentes, etc.) pois confere ao líquido armazenado um gosto peculiar [21,22].

2.4 Características físicas e mecânicas da madeira

A selecção de uma madeira com vista a uma determinada aplicação só será apropriada se forem devidamente aferidos com segurança os elementos que definem o seu comportamento físico, em geral, e a sua resistência mecânica em particular. O conhecimento destas grandezas é obtido a partir de ensaios tecnológicos da madeira que se pretende seleccionar. Todavia, estes testes deverão considerar todos os factores que afectam as características do material, quer os relacionados com as características inerentes ao próprio material, quer os tecnológicos derivados das técnicas aplicadas nos ensaios. Do rol de factores naturais determinantes dessas variações destacam-se os mais importantes:

– A espécie botânica da madeira. O comportamento físico-mecânico da madeira está directamente relacionado com a estrutura anatómica e a constituição dos tecidos lenhosos;

– A massa especifica aparente do material lenhoso. Constitui um índice definidor da distribuição e concentração do material lenhoso e está intimamente ligado com as demais propriedades;

– Posição relativa da peça no lenho. Os valores obtidos num ensaio tecnológico estão sujeitos a alterações consoante o local donde foi obtida a amostra: no cerne, no borne, na vizinhança das raízes ou na vizinhança da copa;

– Existência de defeitos. Estes defeitos podem provocar consideráveis disfunções no comportamento físico-mecânico da amostra ou provete, de acordo com a sua localização, dimensão e distribuição;

– Humidade. Tendo presente a estrutura anatómica da madeira e a sua constituição: fibras de paredes celulósicas hidrófilas, a impregnação de humidade origina alterações, por vezes acentuadas, nas suas propriedades, particularmente no que respeita à resistência mecânica. Esta será mínima quando a madeira estiver totalmente saturada, máxima quando estiver completamente seca e valores intermédios para teores de humidade situados entre os limites máximo e mínimo.

No que concerne aos factores tecnológicos, os mais importantes que resultam da forma de procedimento adoptada nos provetes são:

– Forma e dimensões da amostra;

– Orientação dos ensaios de prova em relação aos anéis de crescimento;

– Duração e modo de aplicação das cargas a suportar pelo material.

Os factores enunciados estão intimamente relacionados com a distribuição das tensões internas do material, que é variável com a sua forma e dimensões e o carácter anisotrópico resultante da sua estrutura fibrosa [21].

2.4.1 Características físicas

Humidade

Após o abate das árvores, a água permanece na madeira sob três formas: *água de constituição*, *água de impregnação* e *água livre*.

A água de constituição encontra-se combinada com alguns componentes da matéria lenhosa, na qual está naturalmente integrada. A sua eliminação só ocorre se a própria substância onde se insere for destruída.

A madeira quando se encontra completamente seca, isto é, *anidra*, a humidade existente corresponde unicamente à água de constituição. Para que uma peça em madeira possa atingir este estado, basta expô-la a uma temperatura média de 103ºC, durante um determinado período de tempo, até que o seu peso atinja um valor constante.

A água de impregnação encontra-se a preencher os espaços entre as paredes das células, que sendo hidrófilas sofrem um natural inchamento, o que origina alterações, mais ou menos significativas, no volume da peça, consoante o grau de humidade. O comportamento físico-mecânico da madeira é assim condicionado com a variação do teor da água de impregnação.

Quando as paredes das células se apresentam completamente saturadas de água de impregnação, sem contudo ocupar os espaços vazios intercelulares diz-se que a madeira atingiu o teor de humidade correspondente ao *ponto de saturação ao ar*. Após completa a impregnação das paredes das células, a água iniciará o enchimento dos vazios intercelulares, dando assim lugar ao aparecimento de água livre. É de assinalar que a sua presença não acarreta qualquer alteração no comportamento da madeira.

Quando a água livre se evapora por completo, a madeira atinge, como já se referiu, o ponto de saturação que, sendo variável com a espécie, alcança, em média, o valor de 30%. Ao proceder-se à secagem da madeira por exposição ao ar, verifica-se numa primeira fase a evaporação da água livre, seguindo-se depois a da água de impregnação.

A madeira atinge o estado de seca ao ar quando, uma vez colocada no meio ambiente natural durante algum tempo, não apresenta alteração do seu peso em duas pesagens consecutivas, efectuadas num lapso de tempo apreciável. Nestas circunstâncias, a madeira apresenta normalmente, um teor de humidade entre 13% e 17% [21,24].

Por este motivo, o denominado teor de humidade normal ou teor de humidade normalizado é utilizado em todos os ensaios que visam a determinação das características físico-mecânicas da madeira, de modo que os valores obtidos sejam susceptíveis de comparação[1]. A tabela 2.1 apresenta uma divisão da madeira por classes de acordo com o seu teor em humidade.

Tabela 2.1 – Classificação das madeiras segundo o seu teor de humidade [21]

Teor de humidade (%)	**Classe**
>30	Madeira verde
>23 e ≤30	Madeira semi-seca
>18 e ≤23	Madeira seca
>13 e ≤18	Madeira seca ao ar
>0 e ≤13	Madeira dessecada
=0	Madeira completamente seca

O método mais preciso para a determinação da humidade das madeiras, recorrendo a provetes, consiste em pesá-los primeiramente no estado natural da madeira (P_h) e, seguidamente após terem sido secos em estufa, a 103± 2ºC (P_0) O teor em humidade (H) é expresso, percentualmente, em relação ao peso seco, de acordo com a seguinte expressão:

$$H = \frac{P_h - P_o}{P_o}.100 \tag{3}$$

Retractilidade

Esta grandeza mede a retracção duma madeira e define-se como a alteração sofrida nas respectivas dimensões quando o teor de humidade da madeira passa do ponto de saturação do ar para o estado anidro. A retractilidade ou contracção das madeiras e o seu inchamento (vulgarmente conhecido como *trabalho das madeiras*) manifestam-se como consequência da alternância da dessorção e absorção de água observadas nas paredes das células.

Para efeito de qualificação de espécies lenhosas é comum considerar a *retractilidade volumétrica* e a *retractilidade linear*.

[1] Segundo as normas francesas, o valor adoptado para a humidade normal é de 15%. A Conferência Internacional de Tecnologia Mecânica das Madeiras (Genebra, 1949) estabeleceu o valor de 12%.

A retractilidade volumétrica é caracterizada por três grandezas distintas: a contracção volumétrica total, a contracção volumétrica registada quando o teor de humidade da madeira passa do valor correspondente ao estado de seca ao ar para o valor correspondente ao estado de seca em estufa e o coeficiente de retractilidade volumétrica.

A contracção volumétrica total (C_t) traduz a variação de volume (%) quando a madeira passa do estado verde (V_V) ao estado completamente seco em estufa (V_0):

$$C_t = \frac{V_v - V_o}{V_o}.100 \tag{4}$$

A contracção volumétrica da madeira, ocorrida desde o estado seca ao ar até ao estado de seca em estufa, designada também de contracção *volumétrica parcial*, exprime a variação percentual do volume desses dois patamares de humidade. O valor desta contracção é calculado da seguinte forma:

$$C_h = \frac{V_h - V_o}{V_o}.100 \tag{5}$$

O coeficiente de retractilidade volumétrica também chamado coeficiente de estabilidade (V) define-se como a variação registada no volume quando a humidade sofre uma variação de 1%. Calcula-se dividindo a contracção volumétrica parcial (C_h) pelo teor em humidade da madeira seca ao ar (h), de acordo com a expressão:

$$V = \frac{C_h}{h} \tag{6}$$

O conhecimento da retractilidade volumétrica das espécies arbóreas permite estabelecer uma classificação de acordo com o seu valor, e com base neles orientar a escolha das madeiras para os fins mais adequados. A tabela 2.2 mostra a classificação das madeiras em função do seu comportamento (estabilidade dimensional) face a variações de humidade.

Tabela 2.2 – Classificação de acordo com o grau de retracção das madeiras [12]

Coef. Contracção Volumétrica	Interpretação	Aplicações
0.15– 0.40	Pouco nervosa	Mobiliário
0.35– 0.49	Algo nervosas	Carpintaria
0.40– 0.55	Medianamente nervosas	Construção
0.55– 0.75	Nervosas	Construção (orient. radial)
0.75 – 1.00	Muito nervosas	Meios de humidade constante

A retractilidade linear do material lenhoso (*C*) é aferida mediante a utilização de provetes, retirados dos toros, em igual número e idêntica localização dos utilizados no cálculo da retractilidade volumétrica. Devem estar correctamente orientados em relação às fibras de modo a que cada direcção corresponda a uma das direcções principais: tangencial (anelar), radial (anelar) e axial (no sentido das fibras). Deste modo, as três contracções lineares são determinadas, em valor percentual, pela expressão:

$$C = \frac{L_h - L_o}{L_o}.100 \tag{7}$$

Ficam assim definidos os coeficientes de retractilidade linear ou *coeficientes de estabilidade linear* (tangencial, radial ou axial) que traduzem as variações lineares verificadas, respectivamente, nas dimensões tangencial, radial ou axial, quando a humidade sofre uma variação de 1%.

A figura 2.8 ilustra alguns efeitos anisotrópicos da retractilidade numa secção transversal dum toro de madeira, diversamente localizados, em relação aos anéis de crescimento.

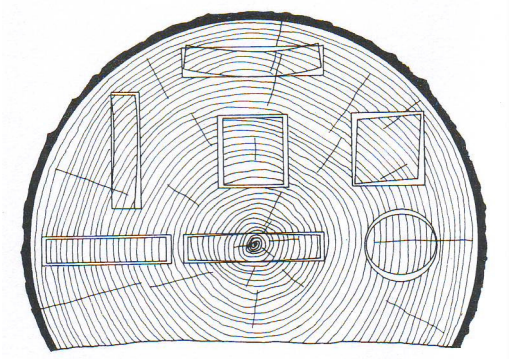


Figura 2.8 – Contracção e distorção características de peças em madeira [21]

São necessárias algumas medidas de precaução essenciais para atenuar os efeitos da retractilidade:

– Utilização de peças de madeira com teores de humidade compatíveis com o meio ambiente normal;

– Processos de serração adequados;

– Impregnação da madeira com óleos e resinas impermeabilizantes.

A primeira medida está intimamente relacionada com o facto da humidade da madeira tender para um equilíbrio com a humidade do meio ambiente através dos fenómenos de absorção e dessorção de água.

Estudos realizados no âmbito da secagem habilitam o traçado de curvas de equilíbrio higroscópico, que são extremamente úteis para a condução faseada da secagem artificial das madeiras em estufa, que é considerada indispensável [21,24].

Densidade

Esta grandeza mostra a relação entre a massa e o volume, geralmente referenciada a um conteúdo de humidade de referência. Nas madeiras a densidade (D_h) é, normalmente considerada em termos de massa específica aparente – peso (P_h) por unidade de volume aparente (V_h) – e é sempre referida ao teor de humidade com que foi determinada.

$$D_h = \frac{P_h}{V_h} \tag{7}$$

Um aspecto importante a considerar quando se determina a densidade de uma madeira é a quantidade de água que ela contém, ou seja, o seu *teor em humidade*. Tendo sido recentemente cortada (estado verde), a madeira pesa mais, por unidade de volume, que a mesma madeira depois de seca, o que significa que tem maior densidade.

Uma vez que o peso e o volume aparente são alterados pela humidade, a definição da massa especifica aparente só tem sentido quando referida a um teor constante de humidade. É sempre referida ou corrigida para o teor de humidade normal – 15% (D_{15}). A forma de correcção é feita aplicando a seguinte expressão.

$$D_{15} = D_h - d.(h - 15) \tag{8}$$

onde

D_h – densidade do provete com o teor de humidade que apresenta na altura da aferição;

h – teor em humidade do provete no momento da aferição do seu peso e volume;

d – coeficiente de correcção, definido com a variação da massa especifica aparente para uma alteração de 1% na humidade.

O coeficiente d é calculado com base na seguinte equação:

$$d = D_{h.}.\frac{(1 - V)}{100} \tag{9}$$

em que V é o coeficiente da retractilidade volumétrica da espécie em estudo.

A massa específica aparente constitui um índice definidor da capacidade da madeira, e expressa a maior ou menor concentração de massa, por unidade de volume aparente. Na tabela 2.3 apresenta-se uma classificação de madeiras – Coníferas e Frondosas, em função da respectiva densidade, determinada a 12% de humidade.

Tabela 2.3 – Valores de densidade [12]

Madeira	**Coníferas (kg/m3)**	**Frondosas (kg/m3)**
Muito ligeira	< 400	< 500
Ligeira	400 - 490	500 - 640
Semi-pesada	500 - 590	650 - 790
Pesada	600 - 700	800 - 950
Muito pesada	> 700	> 950

Resistência ao fogo

A combustão da madeira ocorre por volta dos 280ºC, momento a partir do qual se inicia a sua decomposição, caracterizada pela produção de gases inflamáveis e o consequente desenvolvimento das chamas.

Atendendo aos três mecanismos clássicos de transferência de calor (*condução*, *convecção* e *radiação*), o processo de condução é o único que tem lugar no caso de uma peça em ignição. Daí que, quanto maior for a espessura da peça, maior será o período de tempo necessário para a sua total destruição.

No entanto, o processo de combustão pode ser suspenso por causas intrínsecas ou provocado por acção de agentes externos. Desta forma, um mas elevado grau de humidade no interior da madeira susterá ou retardará a combustão, como consequência do maior ou menor abaixamento da temperatura, relativamente ao valor limite de 280ºC.

Ainda que a temperatura ultrapasse em larga escala aquele limite, a madeira não sofre uma rotura súbita, pois mesmo num incêndio em que se atinjam os 1000ºC, ela conserva durante algum tempo uma certa resistência mecânica. O mesmo não se verifica com uma peça metálica, cuja resistência diminui drasticamente quando ocorrem temperaturas da ordem dos 300ºC, em virtude duma alteração significativa das suas propriedades físico-mecânicas.

Como forma de diminuir o grau de inflamabilidade das madeiras, recorre-se a substâncias ignífugas, ou seja, são substâncias que conferem à madeira um maior poder de resistência contra o fogo. A aplicação de produtos que diminuem a sua combustibilidade é prática utilizada desde os tempos mais remotos, pois os egípcios recorriam a uma mistura de *vinagre* e *alúmen* para tratamento da madeira contra o fogo, processo que os romanos aperfeiçoaram mediante a adição duma substância mineral à base de argila. Em tempos mais recentes, séc. XIX, constatou-se que as boas propriedades ignífugas de certos sais minerais, tais como o fosfato e cloreto de amónio, boratos de sódio e de cálcio. Na sequência de estudos desenvolvidos desde o início do século XX com vista a averiguar a capacidade ignífuga de diversos produtos químicos utilizados na impregnação de materiais de construção, cientistas concluíram que os mais eficazes eram soluções aquosas de *fosfato monoamónico* (NH_4) H2 PO_4 e *dihidrogénio diamónico* $(NH_4)_2$ HPO_4.

Aos produtos químicos capazes de provocar um atraso na combustão do material lenhoso dá-se o nome de *retardantes*. De acordo com a sua origem, os retardantes podem ser minerais, vegetais e sintéticos. Os ensaios laboratoriais, tendo por fim a avaliação da eficiência das soluções ignifugas, realizam-se num *túnel de fogo*, que é atravessado por uma corrente de ar e ao longo do qual se aplicam grelhas para posicionamento do material, tratado e não tratado [21].

Para além de outras grandezas, o túnel de fogo permite, essencialmente, apurar a velocidade de propagação do fogo. A eficiência de um retardante (E_r) é expressa pela relação:

$$E_r = \frac{Velocidade\ \ de\ \ combustão\ \ do\ \ material\ \ não\ \ tratado}{Velocidade\ \ de\ \ combustão\ \ do\ \ material\ \ tratado} \tag{10}$$

2.4.2 Características mecânicas

O estudo das características mecânicas das madeiras pode considerar-se inserido no domínio da *Resistência dos Materiais*, e como tal é demasiado extenso para ser abordado na sua totalidade. Por outro lado, tendo em conta a especificidade da matéria-prima que tem vindo a ser abordada ao longo destes dois capítulos, achou-se conveniente seleccionar apenas aquelas características que mais directamente influenciam a selecção do material lenhoso para uma dada aplicação no domínio do *design* de mobiliário e objectos.

O conhecimento destas características, na sua totalidade, é fundamental, pois permite um emprego mais adequado das diversas espécies de madeira, seleccionando-as de acordo com as suas aptidões naturais.

Dureza

A dureza é uma medida que indica a resistência do material à *penetração*, à *riscagem* e ao *desgaste*.

A determinação deste tipo de resistência das madeiras pode ser realizada rigorosamente recorrendo a equipamento especial. No entanto, utilizando a unha ou uma lamina cortante é possível ajuizar «grosso modo» do grau de dureza duma madeira. As madeiras mais duras são geralmente as mais densas.

O cálculo exacto da dureza duma madeira baseia-se na maior ou menor resistência que a mesma oferece à penetração e pode ser efectuado pelos processos:

– Usando uma semi-esfera de aço de 1cm^2 de secção diametral até uma profundidade igual ao raio (método de *Janka*);

– Recorrendo a um cilindro de aço de 1.5cm de raio, com o eixo disposto normalmente às fibras, ou seja, paralelo à direcção radial da madeira (método *Chalais-Mendon*).

Na primeira abordagem é medido o esforço (em N/mm^2) necessário para fazer penetrar na madeira a aludida semi-esfera.

No segundo método, o valor da dureza define-se como o inverso da profundidade em milímetros da «mossa» produzida pelo cilindro, numa das faces do provete paralelas à direcção radial da madeira.

A dureza do provete (N) define-se pela expressão:

$$N = \frac{1}{f}, \tag{11}$$

em que f é a profundidade da «mossa» do provete em mm.

Recorrendo aos dados obtidos pelo segundo método, apresenta-se na tabela 2.4 a classificação das madeiras de acordo com a sua dureza.

Tabela 2.4 – Valores de dureza [21]

Dureza (1/mm)	Classe
0.2 – 1.5	Muito macias
1.5 - 3	Macias
3 - 6	Semi-duras
6 -9	Duras
9 - 20	Muito Duras

Resistência ao fendilhamento

O fendilhamento é uma característica típica dos materiais fibrosos, como é o caso da madeira. Evidencia-se por um deslocamento ao longo das fibras provocado por um esforço de tracção normal às mesmas e exercido excentricamente à secção respectiva.

No âmbito de ensaios com provetes, a carga é aplicada na extremidade de uma peça entalhada. Nestes ensaios afere-se a carga de rotura dos provetes, que obviamente está relacionada com a secção de fendilhamento e que, por norma, se exprime em N/mm^2.

Os valores que se obtêm possuem um significado puramente convencional, uma vez que dependem da forma e dimensões dos provetes, servindo exclusivamente como índices comparativos de resistência ao fendilhamento. Por outro lado, permitem caracterizar as diversas madeiras de acordo com o grau de *fissuração,* ou seja, a tendência que apresentam para fender.

Em conformidade com as especificações seguidas no LNEC, definiram-se grandezas características da rotura dum provete em madeira adoptadas no mesmo Laboratório, sendo uma de maior importância e, portanto, digna de referência: - *Força unitária de rotura por fendilhamento a H% de humidade* dum provete em madeira (F'_H). Resulta do quociente da força de rotura por fendilhamento (F) pela largura do provete (a), sendo estes dois valores determinados para a humidade de H% [21].

Este parâmetro exprime-se em N/mm e calcula-se pela fórmula:

$$F'_H = \frac{F}{a} \tag{9}$$

A tabela 2.5 insere a classificação das madeiras de acordo com a respectiva força unitária:

Tabela 2.5 – Classificação das madeiras em função da força de rotura [21]

Força de rotura (N/mm)	Classe
>15	Pouco resistentes
15 - 30	Medianamente resistentes
>30	Muito resistentes

Além destas grandezas destacam-se outras, não menos importantes mas cujo interesse para o trabalho proposto é pouco relevante. Os parâmetros que a seguir se apresentam, conjuntamente com os caracterizados anteriormente, permitem qualificar e quantificar, na totalidade, as propriedades físicas e mecânicas das diferentes espécies, a saber:

– Características Físicas Condutibilidade eléctrica, térmica e sonora;

– Características Mecânicas

– Principais: Compressão axial em peças curtas e longas; tracção axial; flexão estática e dinâmica (resiliência); compressão normal;

– Secundárias: Compressão normal e oblíqua às fibras; tracção normal às fibras; corte ou escorregamento (cisalhamento);

– Outras: Fluência (resistência a cargas de longa duração; resistência a cargas alternadas (resistência a cargas cíclicas).

2.5 Preservação da madeira

Tratamentos e protecção da madeira

O melhor tratamento que a madeira poderá receber é a escolha acertada da espécie para o fim a que se destina. Esta escolha está quase sempre relacionada com as características de durabilidade do material face ao meio onde será inserido, e com a presença ou não, no meio, de agentes bióticos ou abióticos que promovam a sua degradação.

De um modo geral, a durabilidade da madeira depende, exclusivamente, da espécie seleccionada e do meio onde será aplicada (interiores, submergida em água, enterrada, alternância do meio – húmido/seco). A maioria das espécies, mesmo em condições adversas, mantêm as suas propriedades fundamentais durante um período médio de 50

anos, caso a sua eleição tenha sido adequada e os tratamentos necessários tenham sido adequadamente aplicados. O que a diferencia de outros materiais é a sua boa resistência a ambientes agressivos tais como salinos ou ácidos. Mas o facto de ser de origem orgânica, constitui base de alimentação a outros organismos vivos (agentes bióticos) e, por outro lado, também se degrada sob efeito da radiação solar e de agentes atmosféricos (agentes abióticos).

Como medida preventiva, um bom desenho construtivo é imprescindível e deve contemplar a ventilação permanente da madeira, de modo a evitar condensações e/ou o aparecimento de humidade. Um aspecto importante a considerar é evitar o contacto directo da madeira com o solo, pelas razões mencionadas anteriormente. Assim garante-se níveis de humidade adequados no material.

Numa primeira abordagem, tendo em conta as condições às quais poderá ser submetida e as exigências às quais terá de responder, a madeira deve proteger-se face a:

– Insectos xilófagos (através de insecticidas);

– Fungos xilófagos (através de fungicidas);

– Fogo (a inclusão de sais permite elevar o ponto de inflamação da madeira, modificando o seu comportamento contra o fogo), classes disponíveis:

– M1: Não inflamável;

– M2: Dificilmente inflamável;

– M3: Medianamente inflamável;

– M4: Facilmente inflamável.

– Luz solar (pinturas com pigmentos metálicos que ocultam os veios ou a utilização de vernizes que deixam transparecer o veio da madeira, embora o escureça).

Para fazer frente à agressividade dos agentes bióticos deve-se aplicar um produto protector, cuja selecção dependerá da espécie em causa e da classe de risco à qual está sujeita – o risco de ataque de insectos xilófagos, por exemplo, depende, sobretudo, do grau de humidade.

Os produtos protectores são substâncias químicas que têm propriedades bióticas e, nalguns casos, melhoram a resistência frente aos agentes atmosféricos, muito embora sejam os produtos utilizados nos acabamentos que cumprem esta última função.

Devem-se aplicar os produtos adequados em doses eficazes tendo sempre presente o grau de impregnabilidade da madeira – maior ou menor resistência que oferecem ao ser penetradas por um líquido.

Assim, de acordo com o uso, a classe de risco, o grau de impregnabilidade da madeira e o tipo de protecção pretendida, elege-se a modalidade da aplicação de cada produto. Contudo, é necessário ter em conta que nem todas as madeiras permitem uma impregnação adequada [12,24].

Substâncias protectoras da madeira

Os produtos protectores podem modificar algumas propriedades da madeira tratada. Deverá ter-se o cuidado de verificar se o seu uso provocará alterações na cor e no odor da madeira, se reagirá corrosivamente com metais, se degradará materiais plásticos, se haverá compatibilidade entre colas, eventualmente aplicadas, se será tóxico e nocivo para a saúde e se aumentará a inflamabilidade do material.

Consoante a sua natureza química, os produtos protectores dividem-se nas seguintes categorias [12]:

– *Protector de dissolvente orgânico*: Penetram com grande facilidade na madeira e a sua natureza translúcida torna-o compatível com a maioria dos envernizados e outros tipos de acabamento, uma vez que não produz manchas. Não é corrosivo nem aumenta a inflamabilidade;

– *Emulsões aquosas*: A madeira assim tratada não muda a sua cor natural, admite operações posteriores de acabamento, é compatível com colas, não mancha, não aumenta a sua inflamabilidade e nem é corrosiva.

– *Protector hidro-solúvel*: Sais de cobre ou boro dissolvidos em água. É um tratamento específico para madeiras extremamente húmidas (30% humidade). Estes sais dissolvem-se na água contida na própria madeira A sua utilização é mais restritiva uma vez que provoca uma ligeira coloração e requer operações posteriores de secagem (as quais podem originar deformações no material);

– *Protector orgânico natural*: derivado do petróleo e do carvão. Caracteriza-se pela dificuldade em penetrar e por manchar a madeira com uma cor negra. A sua utilização é a mais limitativa.

Métodos de tratamento

– *Tratamentos superficiais*: a penetração da capa protectora não ultrapassa os 3 mm de profundidade. São indicados para casos nos quais a madeira não se encontra exposta a qualquer risco de humidade ou de ataque fortuito de térmitas. Pintura a pincel, pulverização e imersão rápida são os métodos que constituem este tipo de tratamentos (tintas, vernizes, lacados, …);

– *Tratamentos em profundidade:* são os adequados sempre que haja risco elevado de humidade e de ataques de insectos xilófagos. Os tratamentos aplicáveis são a imersão a quente e a frio ou, mais recentemente, em *autoclave*. O sistema de imersão alternado a quente e a frio consiste na introdução da madeira num depósito aquecido de modo a facilitar a penetração do produto protector, mantendo-a assim mergulhada durante alguns minutos. Depois introduz-se a madeira num depósito semelhante, com o mesmo produto protector, mas em frio;

O tratamento em autoclave é um procedimento industrial que melhor garante a profundidade de penetração e a retenção do produto protector. O autoclave é um depósito cilíndrico, em aço, equipado com sistema de vácuo, que permite retirar o ar (húmido) da madeira, e com um sistema de pressurização que facilita a penetração do produto protector na madeira. A duração e os níveis de pressão são estabelecidos de acordo com o tratamento, o tipo de produto utilizado e a intensidade do tratamento que se pretende aplicar [12].

2.6 Produtos derivados da madeira

2.6.1 Painéis de base madeira

A popularidade dos painéis e a sua produção em quantidades industriais é relativamente recente e presume-se que foi entre os anos trinta e quarenta que esta nova realidade a nível de revestimentos terá emergido. Indústrias como a da aviação conceberam as primeiras hélices com aproveitamentos de madeira colada sobreposta, e o caça-bombardeiro inglês *Mosquito* foi o primeiro avião cuja fuselagem foi integralmente construída com recurso a lâminas de contraplacado de madeira. Não obstante, o conceito do painel de madeira é muito mais antigo e remonta aos tempos da civilização egípcia, que utilizavam já alguns sistemas de painéis de base madeira na construção de sarcófagos. No ano 1500 a.C., as pinturas murais egípcias ilustravam figuras humanas a cortar painéis com machados e a

colar as partes com colas de origem animal. Gregos e romanos, através do estudo de documentação deixada por antigos artesãos egípcios sobre a utilização da madeira no seu estado natural, e artificialmente combinada (aglomerados e contraplacados), utilizaram também este tipo de materiais nas suas inúmeras edificações [12].

Os primeiros painéis de fibras, obtidos mediante um processo húmido (*hardboard*), tiveram a sua origem no ano de 1858, nos Estados Unidos. Destaca-se neste período a importantíssima contribuição de *Mason* pelo seu mundialmente conhecido processo *Masonite*[1], patenteado em 1927.

A primeira empresa, a produzir industrialmente contraplacado, foi construída em 1932 pela *Portland Manufacturing Company*. Além de dispor de uma avançada tecnologia de fabrico do painel de contraplacado, utilizava pela primeira vez, a um nível industrial, adesivos sintéticos à base de ureia-formaldeído e fenol-formaldeído em vez dos tradicionais ligantes de origem animal e vegetal. O aparecimento deste tipo de resinas foi fundamental para o crescimento desta indústria, em especial, na melhoria do processo produtivo. Na Europa, o grande avanço na divulgação do fabrico de painéis de partículas de base madeira chegaria apenas em 1951 por intermédio da empresa alemã *Deutche-Novopan*.

Toda a actividade de investigação e desenvolvimento realizada nesta área, aliada a filosofias de melhoramento contínuo dos processos produtivos, traduziu-se num grande *boom* da indústria de transformação da madeira, dando lugar a um novo produto, o painel de fibras de média densidade – *medium density fiberboard* – comercialmente conhecido como MDF que, em muitas casos, substitui a madeira maciça e, até ao momento, é a melhor forma de recuperar e reconstruir a madeira. É um produto de aparição recente no mercado, mas a sua origem está associada a investigações realizadas por instituições de índole académica, nos Estados Unidos, em meados dos anos 50 [12].

Há que salientar ainda o desenvolvimento de tecnologias de fabrico de outros tipos de painéis derivados da madeira nas últimas duas décadas assim como de outros conformados mistos que incorporam materiais diversos, de modo a optimizar performances e alargar o seu campo de aplicabilidade. A investigação actual na indústria de transformação da madeira faz-se no sentido do aproveitamento exaustivo do material com a utilização de subprodutos que são, até ao momento, rejeitados.

O tema abordado neste relatório visa, sobretudo, o aproveitamento de pó de madeira, vulgarmente designado por *serrim*, no fabrico de peças e componentes que são diariamente

[1] A *Masonite* é um produto da engenharia aplicada, à madeira, que provém da aplicação de um método – método *Mason* (inventado por *William H. Mason*) que consiste na utilização de aparas de material lenhoso que são transformadas em longas fibras por aplicação de vapor e depois conformadas de modo a perfazer painéis. Estes são posteriormente prensados e aquecidos, conferindo-lhes uma geometria final já com acabamento.

utilizados em inúmeras aplicações, quer no âmbito da carpintaria mecânica em geral, tais como puxadores, pinos, elementos de fixação, dobradiças entre outros, quer no domínio dos objectos de decoração e esculturas de autor. Embora o pó de madeira seja já utilizado como material de enchimento no fabrico de painéis ou associado a termoplásticos para dar origem aos denominados *Wood Plastic Composits* (*WPC*), aparentemente, nunca terá sido utilizado como material de construção no fabrico de objectos finais segundo uma abordagem aditiva. É precisamente este campo que se pretende explorar com tal nobre material.

Tipos de painéis de madeira

A denominação genérica dos painéis abarca um amplo número de produtos, fabricados com madeira, cujas propriedades e aplicações são distintas e variadas. Pode-se dizer que um painel de madeira é uma peça onde duas dimensões principais, comprimento e a largura, predominam sobre uma terceira, a espessura e cujo elemento base constituinte é a madeira. Na generalidade, os painéis subdividem-se em dois grandes grupos que diferem na sua constituição física: painéis de madeira maciça e painéis derivados de base madeira.

Painéis de madeira maciça

São, como o próprio nome indica, aqueles que são constituídos, na sua maior parte, em madeira maciça, a base de pequenas réguas ou tiras unidas com cola. Dividem-se em:

– *Painéis de tiras*: tiras de madeira com comprimentos iguais ou distintos são colados entre si, sendo a espessura e larguras as dimensões que se mantêm constantes; A colagem é feita com base no método de *junta seca*;

– *Painéis de alma*: são painéis de tiras com revestimento exterior em placa fina de madeira, disposta em contra fibra, que perfaz ambas as faces do painel;

– *Painéis combinados*: são formados por réguas de madeira, com um sistema de acoplamento tipo macho-fêmea, de modo a permitir que outras, com geometria semelhante, se agreguem e perfaçam um painel sólido em madeira. Um adesivo estrutural é ainda aplicado para fortalecer a ligação e garantir a solidez do painel [12,24].

Painéis derivados de base madeira

São produtos constituídos à base de chapas de madeira ou elementos dimensionalmente reduzidos ou ainda elementos lenho-celulósicos (*cânhamo*[1]*, linho, bagaço*[2]*,* …) onde são utilizados adesivos para promover a união das partes. Estes, por sua vez, dividem-se em vários grupos que diferem entre si no tamanho e na forma física dos elementos constituintes.

Os painéis derivados de base madeira estão submetidos a uma série de normas e, actualmente, a maior parte delas estão revistas e em alguns casos substituídas por normas Europeias EN.

A seguir faz-se uma breve referência aos painéis que se evidenciam pela sua importância na actualidade, por serem os mais utilizados, assinalando as características que lhes são mais peculiares.

Painéis de finas folhas de madeira

Painéis de contraplacado (plywood)

São painéis formados por um número ímpar de finas folhas de madeira, coladas entre si e dispostas de forma que a direcção das fibras numa folha seja perpendicular à adjacente. Posteriormente é aplicada à composição calor e pressão durante um determinado período de tempo, a partir do qual se dá por concluído o processo de conformação do painel. As finas folhas de madeira são obtidas a partir de operações prévias de desenrolo. As espécies mais utilizadas na produção deste tipo de painéis são o *Pinho Oregón*, o *Pinho da Califórnia* e o *Pinho do Sul* e algumas frondosas tropicais como o *Okumé*.

O painel de contraplacado distingue-se dos demais pela sua estabilidade dimensional, pela sua resistência ao empenamento e pelo facto de não ter uma orientação natural de rotura. O desempenho de um painel de contraplacado é determinado pelo tipo de cola e placas usadas no seu fabrico, podendo estabelecer-se três categorias consoante o seu local de aplicação: contraplacado de *exterior*, adequado a uma exposição permanente às intempéries; contraplacado de *interior*, para ambientes interiores secos; painéis de *categoria intermédia*, à

[1] A *cannabis* foi utilizada durante milénios como planta medicinal, além de fornecer fibras e celulose para a indústria de tecidos e papel (industrialmente, a *cannabis* é mais conhecida como cânhamo).

[2] O bagaço da cana-de-açúcar é um dos subprodutos da indústria da cana, assim como a sacarose e a palha. É constituído por celulose, hemicelulose e lenhina.

base de colas que não permitem exposições prolongadas, podendo ser usados no exterior mas sob condições especiais de isolamento.

Mediante o uso de um selo impresso na superfície do painel é especificada a espessura, o tipo de placa utilizada em cada face e a capacidade de exposição que possui face às intempéries. Esta informação fica completada com a indicação, no painel, da distância mínima entre apoios, isto é, o número mínimo de pontos intermédios permitidos em cada face. Assim se determina a capacidade de carga do produto.

As dimensões *standard* dos painéis são impostas pelas normas americanas e têm os seguintes valores: 1,22 x 2,44 m [12,24].

Contraplacado de alta densidade

Trata-se de um painel composto por finas placas de madeira unidas entre si com ajuda de colas e mecanismos de alta pressão (prensas hidráulicas) de modo a conferir ao material uma elevada densidade. As colas são de base fenólica, o que explica a grande resistência característica deste tipo de painéis.

De acordo com as suas principais características, os contraplacados de alta densidade são utilizados em ambientes não agressivos. Dada a sua natureza compacta, a capacidade de absorção é reduzida, apresentando o seu valor mínimo nos cantos dos painéis, onde a área exposta é diminuta.

Painel laminado

Obtém-se a partir da associação de finas tiras de madeira desenrolada, sobrepostas com colagem sob pressão, no qual as fibras são orientadas numa única direcção, proporcionando desta forma um painel de fibras paralelas.

Painéis de partículas ou Aglomerados

O fabrico deste tipo de painéis baseia-se num processo de aplicação de pressão e calor sobre partículas de madeira ou outros materiais de origem lenho-celulósica. Dentro deste novo grupo de painéis incluem-se aqueles que são formados por aparas de madeira.

Painéis de partículas

De acordo com o seu acabamento superficial classificam-se em painéis de partículas *em cru* e painéis de partículas revestidos – finas placas de madeira, PVC, poliéster, lacas ou vernizes.

Aqueles sem revestimento, em cru, classificam-se, por sua vez, em função dos tratamentos específicos que tenham recebido, existindo um código de cor que estabelece uma correspondência directa com as suas características [12]. Podem ser:

– Resistentes à humidade (*cor verde*): As condições higrotérmicas devem ser tais que o conteúdo em humidade não ultrapasse os 18%);

– Ignífugos (*cor vermelha*): Podem receber as seguintes classificações M1, M2 ou M3;

– Tratados contra agentes biológicos (*cor azul*);

– Constituídos com *formaldeído*;

– Combinados em termos das características atrás mencionadas como, por exemplo, os painéis de partículas mistos, resistentes simultaneamente à humidade e ao fogo (ignífugos).

A figura 2.9 apresenta alguns painéis de partículas disponíveis comercialmente.

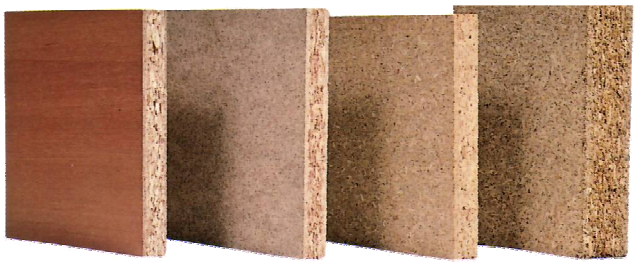


Figura 2.9 – Painéis de partículas [12]

Painéis de aparas de madeiras

As aparas de madeira, que compõem este tipo de painéis, carecem de uma orientação predominante o que faz com que a resistência à flexão deste produto seja a mesma,

independentemente da direcção segundo a qual foi calculada. O seu uso revela-se mais restrito quando comparado com um painel homólogo mas com aparas orientadas.

Painel OSB (oriented strand board)

É um painel pouco divulgado na Península Ibérica mas cuja penetração no mercado tem vindo a crescer. A sua constituição provém de espécies arbóreas de crescimento rápido, com menor valor comercial que as demais, e cujo aproveitamento do tronco ronda os 85%, o que traduz uma maior eficiência na utilização dos recursos florestais. As espécies mais utilizadas no seu fabrico são o *Pinho Amarelo*, o *Álamo*, o *Abeto*, entre outras.

A resistência do painel OSB provém da orientação das suas aparas, paralelas à dimensão predominante, nas faces exteriores, e orientadas perpendicularmente aquela direcção no seu interior, conseguindo-se obter, desta forma, a resistência natural das fibras em ambas os sentidos.

Este material pode ser usado em suportes de coberturas, em operações de forja, isolamentos de muros e também como revestimento.

Foi introduzido no mercado com o objectivo de competir com o painel de contraplacado. As normas existentes não estabelecem distinção quanto ao comportamento estrutural de ambos. As aplicações em estruturas são regidas pela norma EN 300 que os classifica em quatro categorias, segundo as suas características mecânicas e físicas, para assim determinar a sua melhor aplicabilidade.

O formato mais usual do painel é de 1.22 por 2.44 m com espessuras de 10, 12, 15, 19, e 22 mm. Os painéis distinguem-se também pelo acabamento das suas faces que podem ser superfícies simplesmente lixadas, estriadas, ou com um pré acabamento antiderrapante numa das faces para evitar quedas desnecessárias de operários que, durante o exercício da sua actividade, circulem em cima deles [12,24].

A figura 2.10 ilustra os dois tipos de painéis de aparas referidos.

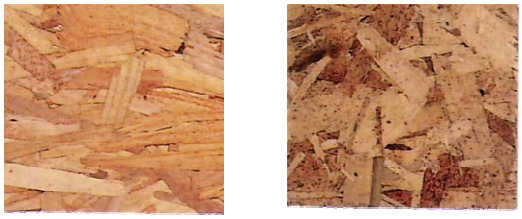


Figura 2.10 – Painéis de partículas OSB (1) e sem orientação definida (2) [12]

Painéis de fibras

Estes painéis são fabricados a partir de fibras de madeira e agentes aglutinantes, naturais ou sintéticos, aplicando pressão e formando um material estável e homogéneo.

Painéis de fibras de densidade média – MDF (medium density fiberboard)

Nesta variante de painéis (figura 2.11), as fibras aglutinam-se umas às outras com recurso a um adesivo de resina sintética. Têm uma estrutura uniforme e uma textura lisa. Existem tratamentos hidrófugos e ignífugos que melhoram o seu comportamento face à água e ao fogo.



Figura 2.11 – Painéis de fibras de densidade média – MDF [12]

Painéis de fibras de densidade alta – HDF (high density fiberboard)

O seu fabrico realiza-se a partir de fibras húmidas compactadas sob a acção de níveis elevados de pressão e temperatura, cuja união é favorecida pela resina de origem natural que se encontra nas fibras.

Os painéis de partículas e de fibras podem ser revestidos/decorados com papéis decorativos impregnados com resinas melamínicas, chapas (finas laminas) de madeira, laminados plásticos, etc. Esta técnica, para além de permitir imitar a mesma aparência da madeira maciça, previne descompensações e consequentes empenamentos.

Porém, existem ainda no mercado outros painéis que resultam da associação da madeira com outros tipos materiais. Dentro deste grupo estão os painéis para a construção civil, que combinam materiais inorgânicos com a madeira [12,24]:

– Painéis de *madeira-cimento*, à base de partículas de madeira unidas mediante *cimento hidráulico*[1] por pressão;

– Painéis de *madeira-gesso*, *papel-gesso* e todas as variantes de *cartão-gesso*;

– Painéis *aglomerados de aparas de madeira-cimento*, utilizados para acondicionamento acústico;

– Painéis *aglomerados de celulose*, utilizados como revestimento industrial;

– …



Figura 2.12 – Painéis madeira-cimento [12]

Para terminar, deverá referir-se a existência de uma outra classe de painéis – os *mistos*.

[1] O cimento hidráulico mais frequente (tipo *Portland*) é o resultado da mistura de dois constituintes básicos: o clínquer (consiste numa mistura íntima de silicatos e aluminatos cálcicos, e tem a forma de grânulos com alguns centímetros de diâmetro) e o gesso.

Estes são obtidos por combinação de painéis de base madeira com um núcleo central constituído por um material diferente [12]. Podem ser painéis compostos por uma alma em:

– Baquelite (figura 2.13);

– Aglomerado de cortiça;

– Espuma sintética;

– Outros materiais com propriedades isolantes ou acústicas;

– Estrutura alveolar em cartão, chapa ondulada, utilizada no fabrico de portas.



Figura 2.13 – Painéis em baquelite [12]

2.6.2 Compósitos de Fibras de Madeira com Termoplásticos (*WPC – Wood Plastic Composites*)

O uso de materiais lenho-celulósicos com materiais poliméricos termoendurecíveis, como fenol e ureia – formaldeído, na produção de compósitos não é algo de novo e conta já com alguma história. A combinação da celulose, proveniente do material lenhoso, com termoplásticos é, contudo, uma inovação mais recente. Um material termoplástico amolece quando aquecido e adquire novamente rigidez quando arrefece. Esta será, talvez a definição mais informal e amplamente conhecida da natureza física de um termoplástico. A sua selecção, no âmbito da produção de um WPC, em combinação com materiais lenho-celulósicos deve ser cuidada, pois o amolecimento e/ou fundição devem ser realizados a níveis de temperatura que não ultrapassem o ponto de degradação do material lenhoso, valore estes que se situam entre os 200ºC e 220ºC [24]. Aqueles termoplásticos que satisfazem, normalmente, estes pré-requisitos são:

– Polipropileno (PP);

– Poliestireno (PS);

– Vinis (PVC);

– Polietilenos de Baixa e Alta Densidade (PEBD; PEAD).

O *pó de madeira*, vulgarmente designado por *serrim*, é um recurso abundante e comercialmente disponível, podendo ser usado como *material de enchimento* na produção de compósitos termoplásticos. O processamento deste subproduto da madeira advém da laboração diária de inúmeras empresas que integram o denominado *cluster* das *indústrias de transformação da fileira da madeira*, em operações de maquinagem, que vão desde a utilização de uma serra de fita, passando por uma máquina de desengrosso e acabando, por exemplo numa calibradora automática ou, em casos mais específicos, num centro de trabalho de controlo numérico (CNC). Todas estas operações geram "desperdícios", na sua maioria, sob a forma de *pó* e também sob a forma de *lascas/aparas* ou *fitas* de madeira. Dada a diversidade da sua natureza física, estes "desperdícios" apresentam-se classificados por escalas granulométricas (dimensão das partículas) e por espécies de madeira. Por outro lado, as fibras de madeira apesar de serem mais difíceis de obter, quando comparadas com o processamento do pó de madeira, tem a particularidade de conferir aos compósitos melhores propriedades e actuam mais como um reforço do que propriamente um material de enchimento. Uma vasta gama de fibras de madeira encontra-se, de igual forma, disponível no mercado, oriunda quer de recursos virgens quer de subprodutos reciclados.

Outros produtos podem ser adicionados de forma a afectar o processamento e a performance do compósito madeira-termoplástico. Estes aditivos podem melhorar a união/fusão entre o termoplástico e o componente lenho-celulósico (agentes acopladores), a performance do produto (modificadores de impacto, estabilizadores UV, retardantes de fogo), e o seu processamento (lubrificantes).

Algumas considerações deverão ser retidas no que respeita ao processamento de madeira com termoplásticos. A presença de humidade pode afectar muitos dos processos utilizados no domínio dos termoplásticos, reflectindo-se na fraca qualidade superficial dos componentes, no aparecimento de vazios intersticiais e outros defeitos que, em termos de qualidade, reprovam automaticamente a aceitação das peças. Os materiais deverão ser previamente secos e, no caso específico da madeira, operações de desumidificação deverão também ser contempladas. A baixa temperatura de degradação da madeira deve ser igualmente considerada. Como regra geral, as temperaturas de fusão devem ser mantidas abaixo dos 200ºC, excepto para períodos de tempo reduzidos. Temperaturas elevadas

podem conduzir à libertação de determinados componentes voláteis nocivos, a descolorações, a odores desagradáveis e à fragilização do componente obtido.

Existem duas estratégias essenciais que regulam o processamento de termoplásticos com material lenho-celulósico. Na primeira, a madeira surge como material de reforço ou de enchimento numa matriz continua termoplástica. A segunda estratégia estabelece que o material termoplástico funciona como agente aglutinador do material lenho-celulósico. A presença ou a ausência de uma matriz continua termoplástica pode ser determinante na escolha do processo tecnológico de conformação do material compósito. De um modo geral, se a matriz for contínua, qualquer processo convencional utilizado com termoplásticos pode ser usado no processamento deste tipo de compósitos de madeira. Contudo, se a matriz for descontínua, outros processos poderão vir a ser necessários. Tendo presente a actual discussão, faz-se a seguir uma breve descrição dos dois cenários possíveis no que respeita à maior ou menor concentração de material termoplástico no compósito [24,26].

Compósitos com elevada percentagem de material termoplástico

Em compósitos cujo valor de concentração de material termoplástico é elevado, o componente termoplástico encontra-se numa matriz contínua e o material lenho-celulósico funciona como reforço ou material de enchimento. A grande maioria dos compósitos termoplásticos reforçados disponíveis comercialmente incorpora materiais inorgânicos (por exemplo vidro, barro e outros minerais) como cargas de reforço ou de enchimento. No entanto, a natureza orgânica dos materiais lenho-celulósicos oferecem vantagens adicionais quando comparadas com as proporcionadas com os materiais inorgânicos – são mais leves, muito menos abrasivos e renováveis. Como reforço, o material orgânico torna mais rígido e mais resistente o termoplástico e melhora substancialmente a sua estabilidade térmica. Estas propriedades não são tão evidentes quando o material termoplástico não é reforçado.

Os termoplásticos sob a forma de grânulos apresentam uma densidade média que varia entre os 500 e os 600 kg/m^3. O material lenho-celulósico, não compactado, tem valores de densidade média que oscilam entre os 25 e os 250 kg/m^3. Numa escala de densidades de materiais lenho-celulósicos, as fibras ocupam os últimos lugares, enquanto o pó de madeira situa-se entre os primeiros. Embora o processamento do pó de madeira com termoplásticos seja relativamente fácil de realizar, a dificuldade da dispersão de material fibroso, associada à sua baixa densidade, tornam os termoplásticos mais difíceis de processar. Operações de mistura mais intensas assim como o uso de equipamento especial de alimentação poderão ser necessários, caso fibras de maior dimensão estejam em jogo.

A produção de compósitos termoplásticos é geralmente um processo com duas etapas. Os materiais em bruto são previamente misturados e, em seguida, o composto é fundido e conformado na forma final dando origem a um determinado produto. À associação destas duas etapas dá-se o nome de processamento *em linha*, resultando numa única etapa onde produtos virgens (em bruto) são transformados em produtos finais. O processamento em linha pode revelar-se crítico pois é extremamente difícil controlar eficientemente o processo e, consequentemente, a qualidade final dos produtos. Assim sendo, a facilidade de implementação do processo aliada, a aspectos económicos, sugere a separação do processo em duas etapas.

A composição resulta da alimentação e da dispersão de um componente lenho-celulósico num banho fundido de um material termoplástico com o objectivo final de produzir um produto completamente homogéneo. Vários aditivos são adicionados e a humidade é geralmente extraída durante a conformação. O processo de composição pode ser apoiado por uma bateria de misturadoras (misturadoras termo-cinéticas, associadas em série) ou apenas por uma misturadora contínua (misturadoras extrusoras). Aqueles sistemas em bateria permitem um controlo mais apertado do tempo de permanência, do corte e da temperatura da mistura que nos sistemas contínuos. Os sistemas em bateria são também mais apropriados para operações que envolvam pequenos ciclos produtivos e frequentes trocas de materiais. Por ouro lado, os sistemas contínuos não requerem tanta supervisão como os seus homólogos em bateria e não são tão afectados por propagações de erros/diferenças, frequentes nos sistemas discretos [24,26].

O material assim composto pode então ser imediatamente prensado ou conformado na sua forma final enquanto está num estado amolecido ou permanecer em grânulos passíveis de serem reaquecidos e seguidamente moldados na geometria pretendida. Os processos mais comuns de conformação usados no domínio dos compósitos madeira-termoplásticos são aqueles que se descrevem a seguir:

– Extrusão: Material amolecido é forçado a passar numa fieira que detém o negativo da geometria final pretendida;

– Injecção: Material fundido é injectado num molde arrefecido cuja cavidade moldante perfaz a forma final desejada;

– Calandragem: Material amolecido é obrigado a passar por entre dois rolos, dando origem a uma tira com espessura idêntica à distância entre eixos que separa os dois rolos;

– Termo-deformação: Uma folha de material compósito amolecida é conformada sob uma superfície moldante através de um sistema de vácuo;

– Moldação por compressão: Material amolecido é colocado entre duas meias cavidades moldantes (macho-fêmea) sob as quais é aplicada pressão.

As propriedades dos compósitos madeira-plástico podem variar consideravelmente, dependendo de certas variáveis como o tipo, a forma e a razão mássica dos constituintes, tipos de aditivos utilizados e o tipo de processamento utilizado. As tabelas 2.6 e 2.7 estabelecem uma análise comparativa entre algumas propriedades mecânicas de um material 100% polimérico, o *polipropileno* (PP), com outros materiais, de matriz semelhante, uns compostos com pó e outros reforçados com fibras de madeira.

Tabela 2.6 – Propriedades mecânicas de *WPC* – ensaio de tracção [24]

Compósito	**Densidade (g/cm3)**	**Resistência Mecânica (MPa)**	**Módulo de Elasticidade (GPa)**	**Alongamento (%)**
Polipropileno	0.9	28.5	1.53	5.9
PP + 40% de pó de madeira	1.05	25.4	3.87	1.9
PP + 40% de fibras de madeira (densidade elevada)	1.03	28.2	4.20	2.0
PP + 40% de fibras de madeira (densidade elevada) + 3% agente aglutinador	1.03	52.3	4.23	3.2

Tabela 2.7 – Propriedades mecânicas de *WPC* – ensaio de flexão [24]

Compósito	**Densidade (g/cm3)**	**Resistência Mecânica (MPa)**	**Módulo de Elasticidade (GPa)**
Polipropileno	0.9	38.3	1.19
PP + 40% de pó de madeira	1.05	44.2	3.03
PP + 40% de fibras de madeira (densidade elevada)	1.03	47.9	3.25
PP + 40% de fibras de madeira (densidade elevada) + 3% agente aglutinador	1.03	72.4	3.22

Os compósitos que, na sua constituição, apresentam maior percentagem de material termoplástico do que madeira não são isentos de características mecânicas menos interessantes. A resistência ao impacto de tais compósitos diminui quando comparada com os termoplásticos não combinados/reforçados. Por outro lado, aqueles compósitos são também mais sensíveis à humidade do que termoplásticos, combinados ou não com materiais inorgânicos. Do ponto de vista prático, é mais relevante o efeito que o componente termoplástico tem na sensibilidade do compósito a variações térmicas, do que qualquer variabilidade de outras propriedades que possam resultar da absorção de humidade.

A figura 2.14 ilustra alguns produtos fabricados com base neste tipo de materiais.

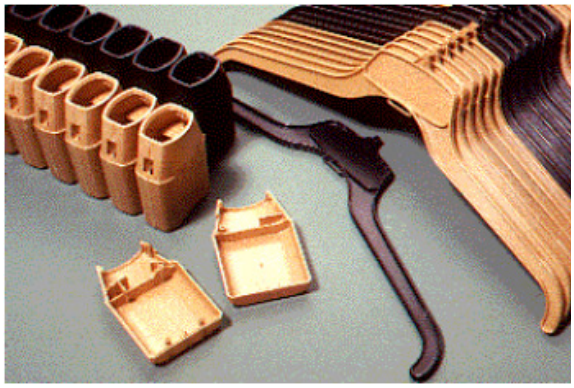


Figura 2.14 – Exemplo de produtos derivados de *WPC* [24]

Compósitos com reduzida percentagem de material termoplástico

Esta gama de compósitos pode ser processada de várias formas. A mais simples é aquela na qual o componente termoplástico actua com o mesmo propósito de uma resina termoendurecível, isto é, actua como agente aglutinador do componente lenho-celulósico. Outra alternativa é usar o termoplástico na forma de uma fibra têxtil. A fibra têxtil termoplástica permite que uma variedade de material lenho-celulósico possa ser incorporado numa *malha*, de natureza sintética e de baixa densidade. Esta malha pode ser considerada, ela mesma, um produto ou então consolidada num outro, de elevada densidade.

Experimentalmente, os compósitos com baixo conteúdo em material termoplástico apresentam características de performance muito semelhantes às dos compósitos convencionais de base lenhosa (*MDF*, *HDF*, …). Na sua forma mais simples, as partículas

ou fibras lenho-celulósicas podem ser misturadas secas com grânulos, flocos ou fibras termoplásticas e posteriormente prensadas dando origem a produtos planos – painéis.

Embora os componentes termoplásticos permaneçam derretidos enquanto expostos ao calor, os componentes termoendurecíveis apresentam comportamentos distintos e, por conseguinte, requerem diferentes estratégias de prensagem. Foram então desenvolvidos dois métodos específicos que se adaptam aqueles materiais. O primeiro método sugere que o material seja colocado numa *prensa de pratos quentes* à temperatura ambiente. A prensa é fechada, consolidando o material, e o calor é transferido, por condução, ao "compactado", promovendo o derretimento do material termoplástico, que fluí, por capilaridade, entre o material lenho-celulósico. O prensado é então arrefecido, de modo a solidificar o termoplástico e a possibilitar a remoção do composto do interior da prensa. Em alternativa, o material a conformar pode ser previamente aquecido numa câmera ou numa prensa *a quente*, o qual é transferido, em seguida, para uma prensa *a frio*, onde o compósito se "transforma", por arrefecimento, num painel rígido [24].

Alguns dos conceitos abordados neste capítulo sobre a madeira e suas aplicações não têm uma relação directa com o trabalho que se pretende desenvolver. No entanto, entendeu-se essencial criar um panorama global da aplicabilidade daquele material e evidenciar o que de mais inovador se faz, hoje em dia, com a sua utilização. O enquadramento permite organizar, mentalmente, a panóplia de aplicações referidas assim como facilitar a compreensão, por parte do leitor, do interesse subjacente ao trabalho proposto.

Por outro lado, o envolvimento diário do autor com tal nobre matéria-prima e a sua relativa experiência no que concerne à correcta utilização do material, conduzem-no, frequentemente, a pesquisar. De modo a centralizar a informação técnica especifica sobre a madeira, considerada essencial ao exercício da qualquer actividade profissional que a integre, o autor optou por introduzir uma mais valia nesta tese, tornando-a num precioso auxiliar de consulta.

A madeira, não obstante os seus inconvenientes, é um material indubitavelmente interessante quer pela sua versatilidade estrutural, quer pela sua atracção estética, quer pelo seu custo (relativamente aceitável), quer pelo seu carácter renovável e também pelo baixo consumo energético que requer quando manipulada. Por outro lado é imprescindível usar madeiras provenientes de florestas cultivadas ou de exploração florestal para evitar a destruição indiscriminada do seu habitat natural – a floresta.

A par da sua evolução tecnológica e da sua combinação com outros materiais, a madeira ampliou o seu campo de aplicações com a introdução no mercado de novos produtos derivados. A título de exemplo têm-se os painéis que proporcionam elementos construtivos

de grande superfície, com um comportamento melhorado em todos os seus planos de trabalho e que, dia após dia, vê a sua performance cada vez mais optimizada.

A madeira e as suas múltiplas possibilidades constituem assim alternativas sedutoras que irão, certamente, tentar muitos arquitectos e designers no decurso dos seus projectos.

Capítulo 3

Desenvolvimento de modelos e protótipos

O homem, desde tempos antigos, sente a necessidade de visualizar as suas ideias para melhor entendê-las e exibi-las. As maquetas fazem parte dessa história e são, ainda hoje, utilizadas com o mesmo propósito na arquitectura moderna.

O *design* de produto segue esta mesma linha e não poderia ser diferente. No entanto, num projecto de desenho industrial, a visualização concreta de uma ideia antes de ser, de facto, produzida, é feita através do desenvolvimento de modelos, *mockups* e protótipos. São eles que dão suporte ao projecto, servem como forma de estudo e apresentação, e são realizados com diferentes finalidades para cada fase do desenvolvimento do produto.

Esta realidade poderá ser melhor entendida com um exemplo real: em ateliers de *design* de produto são desenvolvidos, em média, três modelos para cada projecto. Ou seja, numa primeira fase de concepção da ideia é feito um modelo volumétrico, que serve para uma avaliação estética do conceito inicial e para proceder às modificações necessárias. Este modelo, à escala ou não, é o que permite, uma vez concluídas as modificações necessárias, que uma nova fase do projecto seja iniciada. Deste modo, um novo modelo, agora mais elaborado, pode ser trabalhado para dar continuidade à fase de apresentação do modelo final com todos os detalhes gráficos necessários, transparências, entre outros, que para fins de concursos públicos se revelam de grande importância.

Está-se a falar de projectos que exigem um grande investimento (tempo e dinheiro), não só dos clientes, mas também do escritório ou do *designer* que está encarregue de desenvolver o trabalho. No entanto, o nível de complexidade e custos dos modelos físicos varia de acordo com as exigências dos clientes quando encomendam um determinado trabalho e,

certamente, o valor do projecto vai oscilar de forma directamente proporcional a esta variação.

Embora o nível de complexidade e custos dos modelos possam variar de projecto para projecto, o *design* de produto tem algo a seu favor quando se trata de analisar uma ideia com base num modelo físico.

3.1 Modelos e protótipos

3.1.1 *Mockups*, modelos e protótipos *vs* maquetas

Os *mockups* são reproduções de uma ideia que mais se aproximam da realidade, em tamanho real, mas que não precisam reproduzir, necessariamente, as suas funções. Os protótipos também são realizados à escala 1:1 mas têm que reproduzir as funcionalidades que o produto final apresenta. Ou seja, os protótipos têm necessariamente que funcionar mas não precisam ser concebidos com os mesmos materiais que serão utilizados no fabrico do produto final. Os modelos, por sua vez, não precisam funcionar e nem estar no tamanho real; podem ser executados em escalas reduzidas. Necessitam sim de ter uma precisão estética tão grande quanto a dos protótipos.

Aqueles três processos, assim como as maquetas, ajudam a compreender melhor os projectos, numa perspectiva global, assim como prever e evitar futuros problemas funcionais. No entanto, neste contexto, o *design* de produto tem uma determinada vantagem sobre a arquitectura. Sem querer, de forma alguma, diminuir a importância e a qualidade das maquetas, que são desenvolvidas a par do exercício da actividade, o desenho industrial tem a escala a seu favor.

Sem ocultar a importância do modelo físico para uma melhor visualização de uma ideia, optimizações e estudos da mesma, o facto de, normalmente, os projectos de *design* de produtos serem desenvolvidos numa escala que permite a sua reprodução num modelo em tamanho real, e muitas vezes funcional, confere a possibilidade de uma análise mais fidedigna e exacta daquilo que se está a propôr como projecto. Permite, além disso, que sejam evitadas impossibilidades funcionais e exageros formais.

De facto, muitos dos projectos desenvolvidos por *designers* não podem ser reproduzidos em forma de protótipos, ou pelo custo, ou por estarem realmente numa escala maior. São feitos, nestes casos, modelos em escalas reduzidas. Estes, certamente, são aqueles que mais se assemelham às maquetas usadas na arquitectura. No entanto, apresentam normalmente escalas três, cinco, dez, quinze ou vinte vezes menores que o produto real, enquanto as

maquetas podem ser cinquenta ou duzentas vezes menores que o projecto a executar. Por isso os modelos à escala estão mais próximos da realidade do que as maquetas por serem submetidos a uma redução que não se distancia tanto do projecto real.

À escala ou não, hoje em dia, a tecnologia interfere directa e intensamente no desenvolvimento de um produto, nomeadamente no que concerne ao fabrico de protótipos, modelos e *mockups* [27].

3.1.2 A tecnologia no *design*

A tecnologia tem invadido, ao longo de vários anos, diversas áreas de actuação em diferentes sectores de transformação e serviços. O *design* também tem vindo a ser influenciado por essa evolução tecnológica. Entenda-se aqui *design* como *design* de produto, *design* gráfico, *design* das técnicas de ilustração e *layout*, *web design*, etc. A tecnologia modificou os procedimentos, as técnicas utilizadas, os conceitos, o meio produtivo. Isto é facilmente percebido se atendermos à qualidade do produto final que se consegue obter, actualmente, num dado projecto, em períodos de tempo relativamente curtos quando comparados com outros procedimentos e meios utilizados há dez, quinze ou vinte anos atrás. A par do desenvolvimento conceptual é importante ter presente o tempo necessário para desenvolver o respectivo protótipo.

3.1.3 A modelação 3D

Quando se pensa no *design* de produto há alguns anos atrás, é inevitável dissociar desses tempos áureos o charme das pranchetas, réguas, esquadros, compassos, curvas francesas, etc., que eram as ferramentas de desenvolvimento de um produto ou de um projecto de arquitectura (figura 3.1). A par desse equipamento seria preciso também um tempo relativamente maior para finalizar um dado projecto.

Avançando um pouco mais no tempo, o senso comum apelidou de obsoletos muitos daqueles instrumentos de desenho os quais deram espaço aos computadores e aos seus programas CAD, para desempenharem as mesmas funções mas de forma mais dinâmica e eficiente. Uma etapa seguinte a este rápido desenvolvimento técnico foi o surgimento de programas de modelação 3D, que possibilitou ter uma visualização mais real daquilo que é projectado. Tudo isso fez com que as formas tradicionais utilizadas para desenvolver um produto se modificassem completamente, dando lugar a outras mais eficientes, e com elas a capacidade de obter prazos de execução mais competitivos.



Figura 3.1 – Equipamento de desenho: Prancheta de desenho (1); Compasso (2); Esquadro (3); Régua T (4); Curvas francesas (5); Aristo (6); Escantilhão de círculos (7); Escala (8) [23]

Os sistemas de CAD 3D permitem a modelação de peças, tal qual elas são na realidade tridimensional (ou seja, permite uma representação fiel da peça nas suas 3 dimensões espaciais – *xx, yy e zz*), e ainda a sua montagem para formar conjuntos funcionais. Além de permitir uma visualização mais real e intuitiva, esta associação possibilita ainda a verificação de movimentos relativos e cálculo de interferência de volumes.

A modelação 3D tem ainda uma outra vantagem adicional: é imprescindível no que toca à utilização de *software* de apoio ao projecto e ao processo produtivo, ou seja, aos sistemas de CAE (engenharia assistida por computador) e de CAM (maquinagem assistida por computador). Os sistemas CAM permitem, utilizando formas geradas pelo CAD, criar programas de maquinagem a serem executados por máquinas CNC (controlo numérico computorizado), automatizando completamente o processo produtivo. Os sistemas CAE permitem verificar a aplicabilidade de determinadas peças no equipamento a desenvolver. Esta análise do funcionamento dos componentes pode ser realizada em diversos domínios, como por exemplo, o da análise estrutural, análise térmica, análise termomecânica, etc.

Apesar dos inúmeros *softwares* de modelação 3D disponíveis no mercado possibilitarem uma visualização e análise bastante próximas da realidade, elas não são, de facto, reais. Este facto remete novamente para a importância do modelo físico que, por sua vez foi também fortemente modificado pelos avanços tecnológicos [20].

3.1.4 Os protótipos e a tecnologia

Assim como os modelos 3D virtuais e outros adventos tecnológicos exerceram grande influência e modificaram o modo e a dinâmica de se projectar, a tecnologia influenciou também a percepção actual que se tem sobre a modelação física.

Se em tempos, o tempo necessário para finalizar a etapa correspondente ao detalhe de um projecto era imenso, imagine-se, por exemplo, o que demoraria para produzir um modelo final de apresentação. Apesar de morosa, a fase que compreende o detalhe possibilita o estudo e o amadurecimento da ideia. As coisas bem feitas exigem o seu tempo…

A introdução de novos meios no processo de "fabrico" dos protótipos também modificou e dinamizou esta etapa do desenvolvimento de um produto. Isto não quer dizer que todo o equipamento artesanal utilizado numa oficina tradicional de modelação foi substituído, mas sim, novas "ferramentas" estão agora a ser aplicadas em conjunto com as tradicionais.

A tecnologia entra aqui como algo que realmente modificou determinados parâmetros, principalmente quando se analisa a questão do tempo. Com o dinamismo que os programas CAD e de modelação 3D deram à fase de conceptual, era necessário que a fase correspondente à produção de um protótipo acompanhasse este novo ritmo.

Para dinamizar o processo, diminuir o tempo e melhorar o nível de apresentação dos modelos, são utilizadas, hoje em dia, ferramentas como as fresadoras CNC, os tornos CNC, equipamentos de prototipagem rápida, *scanners* 3D, etc. As peças assim obtidas são "confeccionadas" em pouco tempo e auxiliam os estudos para elaboração do produto no seu todo. É possível, actualmente, desenvolver um produto, em quantidades reduzidas, para perfazer pré-séries que, uma vez postas no mercado, facilitam a pesquisa que gira em torno da sua qualidade e aceitabilidade por parte dos seus potenciais utilizadores.

Tendo em conta o referido, pode concluir-se que as tecnologias tradicionais de prototipagem, embora possam vir a perder alguma importância, devido ao crescente desenvolvimento da prototipagem rápida, não deixarão nunca de ter o seu campo de aplicação, tanto na indústria como em outras áreas.

Os processos tradicionais e os processos de prototipagem rápida em vez de serem concorrentes, poderão funcionar antes em paralelo e complementando-se, ocupando cada um o seu espaço no desenvolvimento de um produto [20,27].

3.2 Prototipagem rápida (*Rapid Prototyping*)

3.2.1 Introdução

O termo *prototipagem rápida*, já referido no capítulo 1, designa um conjunto de tecnologias usadas no fabrico de objectos físicos directamente a partir de fontes de dados gerados por *softwares* de projecto assistido por computador (CAD 3D). Tais métodos são bastante peculiares, uma vez que agregam e ligam materiais, camada a camada, de forma a constituir o objecto desejado. Oferecem diversas vantagens em muitas aplicações quando comparados com os processos de fabrico clássicos baseados na remoção de material, tais como as operações de fresagem ou torneamento.

Tais métodos permitem aos projectistas criar rapidamente protótipos concretos a partir de dos modelos digitais 3D, em detrimento das figuras bidimensionais. Esses modelos possuem diversas utilizações possíveis. Constituem um auxílio visual excelente durante a discussão prévia do projecto com colaboradores ou clientes. Além disso, o protótipo pode permitir testes prévios como, por exemplo, ensaios em túnel de vento para componentes aeronáuticos, ou análise foto elástica para se verificar pontos de concentração de tensões na peça. A verdade é que os projectistas sempre construíram protótipos; os processos de prototipagem rápida permitem que eles sejam feitos mais depressa e de forma mais barata. De facto, estima-se que a economia de tempo e de custos proporcionada pela aplicação das técnicas de prototipagem rápida na construção de modelos seja da ordem de 70 a 90% [18].

As mesmas técnicas de prototipagem rápida podem ser usadas para a fabricação de ferramentas, um processo também conhecido como *fabrico rápido de ferramentas (rapid tooling)*, ou seja, a fabricação automática de ferramentas para uso na produção em série. A produção de ferramentas é uma das etapas mais lentas e caras no processo produtivo, em função da qualidade extremamente alta que se exige delas. As ferramentas geralmente apresentam geometrias complexas e precisam ser dimensionalmente precisas, em torno de centésimos de milímetro. Além disso, devem ser duras, resistentes ao desgaste e apresentar baixa rugosidade. Por isso matrizes e moldes são tradicionalmente feitos por maquinagem CNC, electroerosão ou mesmo por via manual. Todos estes processos são caros e demorados, o que torna a implementação das técnicas de prototipagem rápida muito bem vinda. Estima-se que essas técnicas permitam economizar 75% do tempo e custos envolvidos na fabricação das ferramentas [18].

Permitem também a obtenção de peças com o mesmo nível de qualidade da produção em série, no domínio do *fabrico rápido* (*rapid manufacturing*). Este assunto será abordado mais à frente, neste relatório, com maior detalhe uma vez que é essencial ao projecto que se pretende desenvolver futuramente.

De facto, a prototipagem rápida é o melhor processo de produção possível quando se precisa produzir peças em pequenas quantidades e/ou no caso de componentes com geometrias complexas que sejam impossíveis de gerar recorrendo aos processos tradicionais.

Actualmente, existem mais de 35 diferentes técnicas de prototipagem rápida disponíveis comercialmente. Uma vez que tais tecnologias estão a ser cada vez mais usadas em aplicações não relacionadas directamente com prototipagem, é preferível designá-las pelas expressões *fabrico de objectos sólidos com forma livre (solid freeform manufacturing)*, ou, simplesmente, *fabrico por camadas (layer manufacturing)*. Este último termo descreve particularmente o processo de produção usado por todas as técnicas disponíveis actualmente. Um *pack* de software "fatia" o modelo do componente em CAD em várias camadas finas, com aproximadamente 0,1 mm de espessura, as quais são dispostas uma sobre a outra. O processo de prototipagem rápida é um processo "aditivo", combinando camadas de papel, cera, metal ou plástico para se criar um objecto sólido. A natureza aditiva deste processo permite a criação de objectos com características internas complicadas que não podem ser obtidas através de outros processos como, por exemplo, maquinagem (fresagem, furação, torneamento, etc.), que são processos "subtractivos", ou seja, removem material a partir de um bloco sólido [18].

Nestes processos os modelos são obtidos por adição de material, camada a camada, até obter o objecto pretendido. Por este motivo, as peças obtidas por qualquer um destes processos apresentam irregularidades na superfície, correspondentes à espessura de cada camada, *efeito de escada* (Figura 3.2), o qual é directamente proporcional à espessura da camada, podendo, no entanto ser atenuado com acabamentos posteriores.

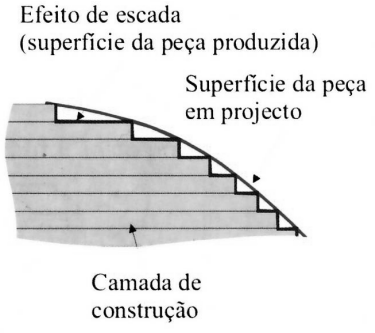


Figura 3.2 – Efeito de escada no fabrico de protótipos por prototipagem rápida [20]

3.2.2 Processamento da informação gráfica

Em todos os processos de prototipagem rápida recorre-se a um modelo digital 3D que é traduzido para um ficheiro ".STL"[1], no qual todas as superfícies do desenho são convertidas em triângulos. Este ficheiro, ao ser introduzido no equipamento de prototipagem rápida é convertido num ficheiro ".SLI"[2], através do software da máquina, que divide o modelo nas várias camadas de construção (figura 3.3).

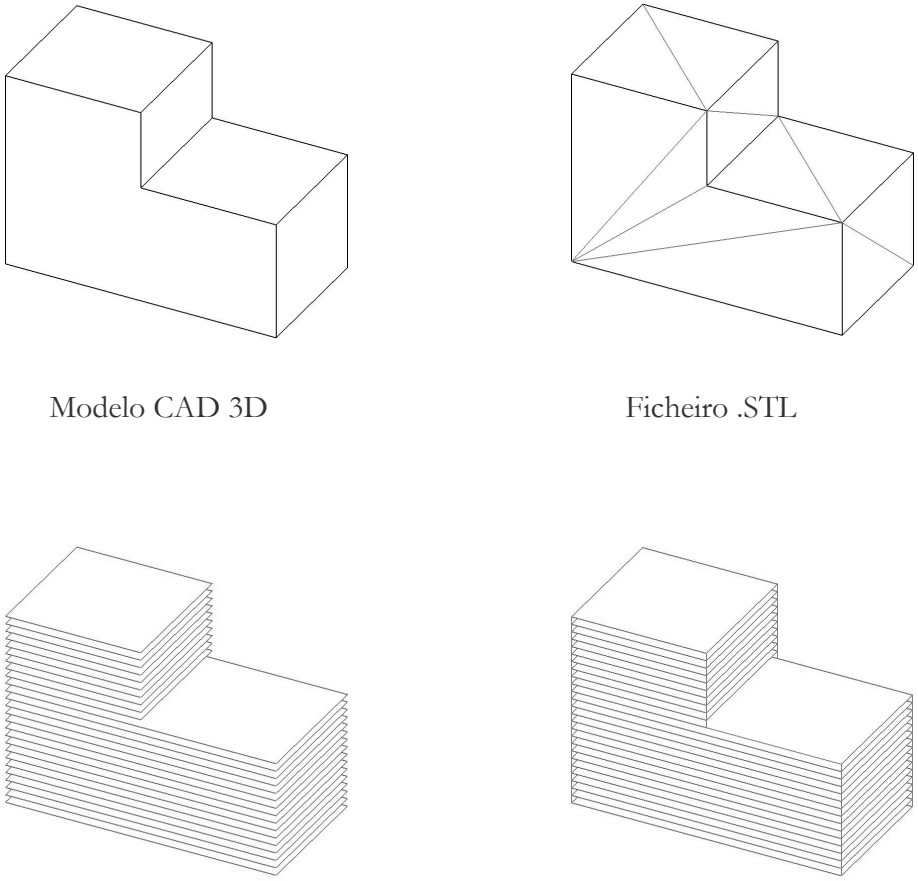


Figura 3.3 – Evolução do modelo CAD 3D até à obtenção do protótipo [20]

[1] A sigla "STL" deriva da palavra *stereolitography*, por a estereolitografia ter sido o primeiro processo de prototipagem rápida a ser comercializado.
[2] Do inglês *slice* (fatia).

Os processos de prototipagem rápida actualmente disponíveis utilizam cinco etapas básicas:

– Criação de um modelo CAD 3D da peça que está a ser projectada;

– Conversão do arquivo CAD 3D no formato ".STL";

– Seccionamento do arquivo STL em finas camadas transversais - ficheiro ".SLI";

– Construção física do modelo, camada a camada;

– Limpeza e acabamento do protótipo.

3.2.3 Processos de prototipagem rápida

Apesar de existirem diferentes formas de classificar os processos de prototipagem rápida (> 35 processos), a melhor forma de o fazer baseia-se no estado físico do material de construção do modelo:

– Base líquida (1 *Laser*, lâmpada com máscara, 2 *lasers*, congelamento);

– Base Sólida (corte e colagem/junção, fusão e solidificação/mistura);

– Base Pó (junção/ligação, uns usam um *laser*, outros um ligante/cola).

Apesar do *pó* estar no estado sólido, foi intencionalmente criada uma categoria fora dos sólidos para significar pó na forma de grão [19].

Uma vez que este trabalho assenta na utilização de pó de madeira como material de construção dos modelos/componentes serão apenas descritos os processos de prototipagem mais relevantes que podem ser adaptados para atingir o objectivo proposto. Estes processos serão apresentados segundo uma ordem decrescente em termos de grau de interesse.

3.2.3.1 Impressão tridimensional (*TDP*)

O processo de impressão 3D possui como princípio a aglutinação de pós pela acção de um líquido aglutinador expelido sob a forma de gotículas por uma cabeça de impressão tipo jacto-de-tinta, muito parecida com as utilizadas nas impressoras comuns. O jacto de ligante gerado pela cabeça é aspergido sobre uma fina camada de pó, previamente laminada numa plataforma que se movimenta na direcção Z (movimento descendente). Um rolo é utilizado

para depositar novas camadas de material e compactar uma camada sobre a outra. O processo, descrito seguidamente, foi desenvolvido pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts , E.U.A.*) e a patente do processo foi segmentada em diferentes actividades industriais. Existem máquinas específicas para a fabricação de objectos com plásticos, cerâmicas e metais, além de outras aplicações mais específicas como a fabricação de próteses biomédicas e o encapsulamento de medicamentos [20].

Descrição do processo

Numa primeira fase promove-se a distribuição de uma camada uniforme de pó sobre a superfície de trabalho. Em seguida, o agente aglutinador é depositado nessa camada, recorrendo a finos jactos que atingem apenas os pontos que correspondem ao corte local da peça. Para esse efeito utilizam-se cabeças de impressão semelhantes às utilizadas nas impressoras do tipo jacto de tinta.

O processo é repetido as vezes necessárias até obter, camada por camada, a peça pretendida. Uma vez concluída, a peça *em verde* é retirada da máquina ficando o pó não aglutinado pelo ligante, solto. Apenas permanecem ligadas as zonas onde o jacto de ligante incidiu, ligando as partículas entre si e cada camada à anterior.

O agente aglutinador confere ao componente impresso apenas a resistência suficiente para ser manuseado.

Numa segunda fase, o componente sofre um tratamento térmico do tipo sinterização, com o objectivo de fortalecer a ligação entre partículas, aumentando assim a resistência do modelo.

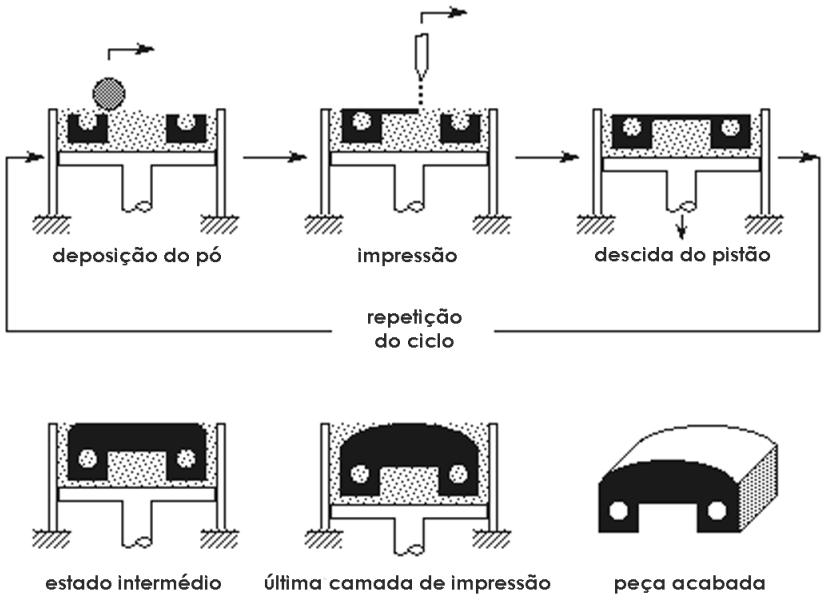


Figura 3.4 – Sequência de operações necessárias num processo de impressão 3D [S8]

Inicialmente o processo TDP foi desenvolvido para a produção de carapaças cerâmicas. Actualmente, segundo relatórios anuais de progresso da tecnologia em questão, este processo pode usar qualquer tipo de material sob a forma de pó e um ligante compatível.

A resolução deste processo está dependente do tamanho das gotículas de ligante depositadas, da granulometria do pó, da precisão de aplicação do jacto de ligante e da forma como o ligante flúi através dos grãos por acção capilar.

As principais vantagens do processo são:

– Não necessita de suportes físicos para construir o modelo;

– Pode ser usado para fabricar peças de qualquer geometria;

– Pode obter-se directamente as peças pretendidas, enquanto que com outros processos de prototipagem rápida é necessário recorrer a tecnologias de conversão;

– Não gera desperdícios.

As principais desvantagens do processo são:

– Pelo facto de se utilizarem materiais sob a forma de grãos, com granulometrias da ordem dos 100 micron, as superfícies finais obtidas têm sempre uma rugosidade elevada.

– As peças em verde são relativamente frágeis e porosas;

– Por vezes é difícil remover o pó devido à forma intrincada de certos modelos.

Processos derivados do TDP

Para já são três os processos derivados do TDP, a saber:

– DSPC – Fabricação directa de carapaças cerâmicas para fundição de precisão (*Soligen*);

– Z-Corp/Prometal/Termojet – Baseiam-se todos na tecnologia TDP embora com algumas particularidades associadas.

Aqui importa frisar apenas o processo da Z-Corp uma vez que é o mais interessante e aquele que inspirou todo este trabalho!

A tecnologia de deposição assenta num sistema constituído por uma cabeça que projecta 128 jactos de uma cola/resina sobre uma superfície que contém uma fina camada de pó, previamente laminada. Esta projecção atomizada do agente aglutinador promove a união dos pequenos grãos de pó.

A movimentação da cabeça faz-se segundo um processo idêntico ao das impressoras 2D, a jacto de tinta, que "varre" toda uma área – modo *raster*. Convém frisar que nem todos os sistemas baseados na impressão tridimensional funcionam assim. Existem uns que operam apenas com uma cabeça de deposição que se move, vectorialmente, no plano – modo *vectorial*.

As máquinas iniciais permitiam espessuras por camada que oscilavam em torno dos 0.177 mm, velocidades de construção na ordem dos 18-25mm/h, com precisão de ± 508 microns. Esta realidade tem vindo a ser progressivamente optimizada podendo os equipamentos actuais produzir modelos com velocidades próximas dos 50mm/h. A velocidade de construção pode ser ajustada pelo utilizador condicionando assim a espessura de cada camada (0.089-0.203 mm) e consequentemente o tempo de fabrico dos protótipos e a qualidade final dos mesmos. Todos os equipamentos disponíveis comercialmente, Z™310, Z™510 (figura 3.5) e Z™810, destinam-se a operar em ambientes de escritório e permitem fabricar modelos de engenharia do tipo *concept modeling*, de uma forma bastante rápida e económica. Os atravancamentos variam entre 203x254x203mm (Z™310), 254x356x203mm (Z™510) e 500x600x400mm (Z™810), respectivamente [44].



Figura 3.5 – Equipamento de PR *Z510 System*; exemplo de um modelo físico de uma sola de sapatilha obtida com aquele equipamento [S3]

Curiosamente, a Z-Corp apresenta equipamentos que podem operar com diferentes materiais (em pó) sendo um de natureza celulósica (amido e celulose). O alternativo é à base de gesso de muito baixa granulometria. O agente aglutinador é de base aquosa.

O processo de impressão tridimensional, na variante Z-Corp, revela-se assim num meio bastante interessante no que concerne ao aproveito de pó de madeira para produzir protótipos. Aqui, apesar de algumas condicionantes tecnológicas, a dificuldade principal reside no tipo de ligante a utilizar pois, necessariamente, terá que haver uma certa compatibilidade entre ambos. A sua cura também é uma dificuldade uma vez que no processo original esta fica concluída através de operações de pós cura. Esta é uma realidade a contornar pois deseja-se que a peça final obtida esta já completamente curada, estando apta a ser imediatamente utilizada na aplicação para a qual foi concebida.

Este processo é o mais interessante relativamente ao caso em estudo pelo facto de ser económico e "simples" de implementar. Os actuais *inputs*, pó composto de amido e celulose e uma resina de base aquosa, seriam substituídos pelo pó de madeira e por um adesivo líquido compatível. A necessidade de obter uma peça completamente curada após impressão obriga à inclusão de um sistema mais eficiente de cura do que o utilizado no processo original. Caso o adesivo líquido, compatível com o pó de madeira, seja foto sensível, é possível, através de luzes ultravioleta, promover a cura durante o processo de construção. Talvez o único pré processamento necessário seja o afinamento do grão, do pó de madeira, e a sua secagem uma vez que é obtido a partir de operações de desbaste provenientes de um processo subtractivo de maquinagem, e como tal, a sua constituição é heterogénea.

3.2.3.2 *PolyJet*™

Trata-se dum processo patenteado pela empresa norte-americana *Objet*. Este processo baseia-se igualmente na tecnologia usada nas impressoras tipo jacto de tinta, a partir da qual materiais poliméricos, foto sensíveis, são depositados sob a forma de finas camadas (16 micron), numa base móvel (em ZZ), até perfazer por completo o modelo (figura 3.6).

Cada ínfima camada de polímero foto sensível é curada (endurecida) através da incidência de luz ultravioleta, logo após ter sido depositada, produzindo desta forma modelos passíveis de ser manipulados e imediatamente aplicados, sem necessidade de pós cura.

É também utilizado, aquando da construção do modelo, material de suporte, no estado de gel, especialmente desenvolvido para suportar geometrias complexas. A sua extracção é relativamente simples e faz-se através da aplicação de água pressurizada (jacto de água).

Em suma, são utilizados dois tipos de materiais, um de construção e outro de suporte. A adaptação deste processo ao caso em estudo consiste na substituição do material de construção, aqui de natureza 100% polimérica, por um outro, composto à base de pó de madeira e uma resina foto sensível.

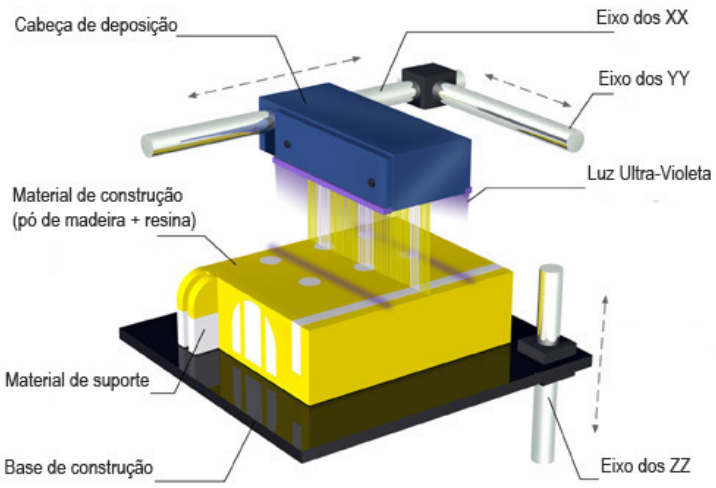


Figura 3.6 – Representação esquemática (adaptada) do processo *Polyjet*™ [S9]

Em resultado de alguma experiência adquirida ao longo de ensaios laboratoriais realizados no âmbito do trabalho proposto, pode-se afirmar que a associação de pó de madeira com resinas termoendureciveis (função das percentagens mássicas de cada componente) resulta

num composto pastoso, de elevada viscosidade, o qual é extremamente difícil de depositar manualmente (seringas vulgarmente utilizadas em ambiente hospitalar).

De acordo com informações recolhidas a partir de especialistas de uma empresa alemã de equipamentos específicos de deposição automática de fluidos (*microdrop*™), alguns problemas podem surgir, nomeadamente o entupimento de válvulas, quando estamos perante escoamentos do tipo *não-newtonianos*.

A deposição eficiente de *pastas* está a ser alvo de estudo intenso no domínio do fabrico rápido e novas soluções estão a ser continuamente apresentadas. A mais recente, designada por *High-Viscosity Jetting*, está ainda a ser testada mas revela-se bastante promissora. Prevê-se que este processo, uma vez completamente operacional, solucionará muitos dos problemas e limitações conhecidos actualmente nos domínios da PR e do FR. A simplicidade do conceito inerente ao processo de deposição permitirá velocidades produtivas muito próximas daquelas que caracterizam os actuais métodos de produção massificada e a *pasta* poderá vir a ser composta por qualquer tipo de material em pó.

A figura 3.7 ilustra, esquematicamente, a tecnologia *High-Viscosity Jetting*.

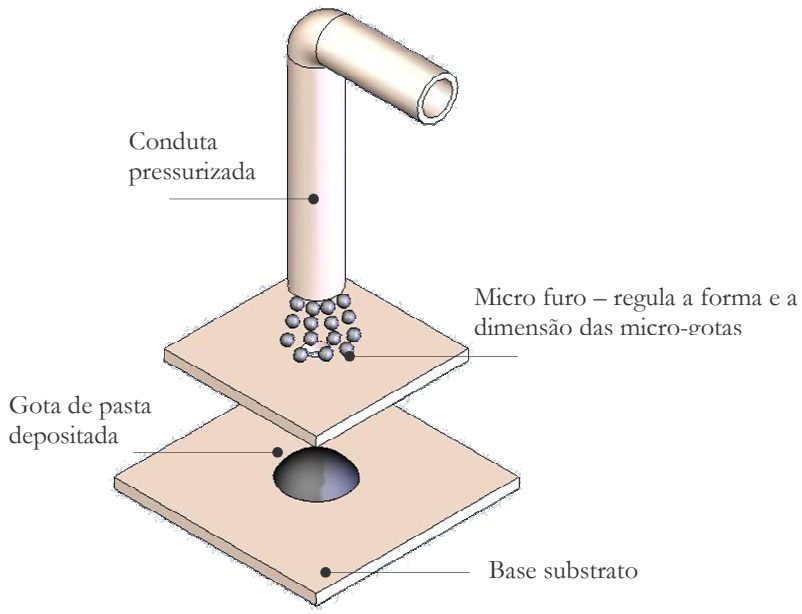


Figura 3.7 – Representação esquemática do processo *High Viscosity Jetting* [11]

A aplicabilidade deste processo ao estudo em causa prende-se, sobretudo, com a capacidade de depositar pastas de modo eficiente, adaptando portanto, o processo original que utiliza apenas uma resina fotosensível como material de construção. Como é um assunto que está ainda em fase de investigação profunda, é difícil poder emitir uma opinião

concreta sobre a sua possível adaptação à produção de peças e componentes com base em pó de madeira.

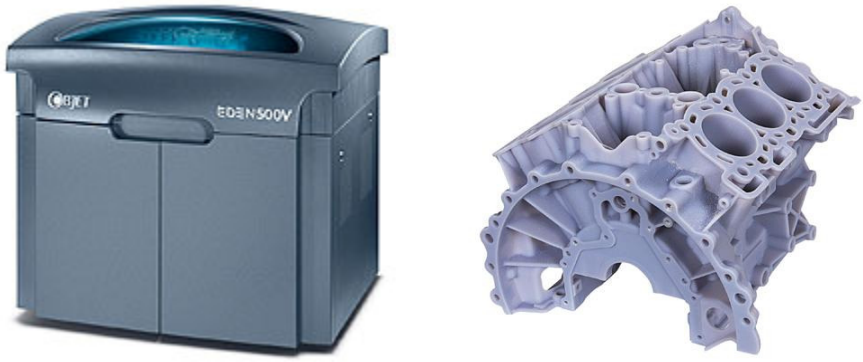


Figura 3.8 – Equipamento de PR *Eden500V*™ (*Objet*); modelo físico de um bloco de motor obtido com aquele equipamento [S9]

3.2.3.3 Sinterização selectiva por laser (SLS)

A sinterização selectiva por laser é um processo de prototipagem rápida comercializado desde 1992 pela DTM (E.U.A) e pela EOS (na Alemanha), desde 1994. Presentemente é o quinto processo mais usado na América, ocupando um lugar cimeiro na Europa.

O processo utiliza pós muito finos de muito baixa granulometria (camadas de 0.076mm) de materiais plásticos, compósitos de matriz polimérica, metais revestidos a termoplástico ou ligas metálicas, os quais são ligados entre si por varrimento de um feixe laser de CO_2.

À semelhança do processo de impressão tridimensional da Z-Corp, uma fina camada de pó é também laminada mas, agora, no interior de um meio de construção pré-aquecido (câmara a 186ºC e sinterização a 196ºC), com atmosfera controlada (5.5% O_2). A utilização de sistemas electromecânicos de precisão permitem projectar um feixe laser que incide nas partículas, provocando a fusão parcial das interfaces dos pós, obtendo-se desta forma uma estrutura sólida parcialmente porosa.

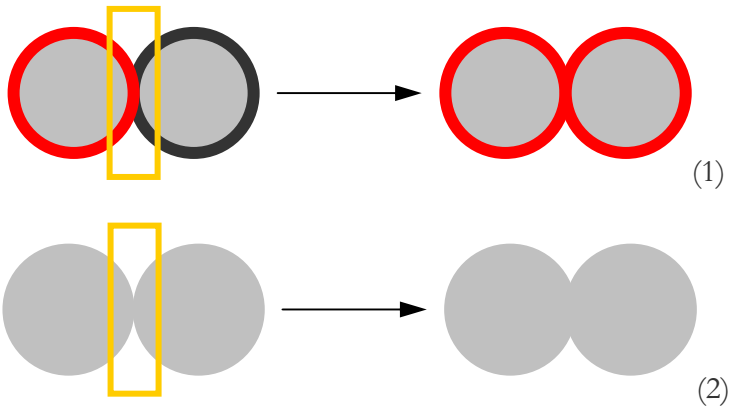


Figura 3.9 – Representação esquemática de partículas metálicas revestidas com (1) e sem (2) polímero

O pó não utilizado durante o processo é reciclado. Apenas 40% de pó fresco é carregado nos alimentadores sendo os restantes 60% fruto da reciclagem.

A representação esquemática do processo pode ser observada na figura 3.10.

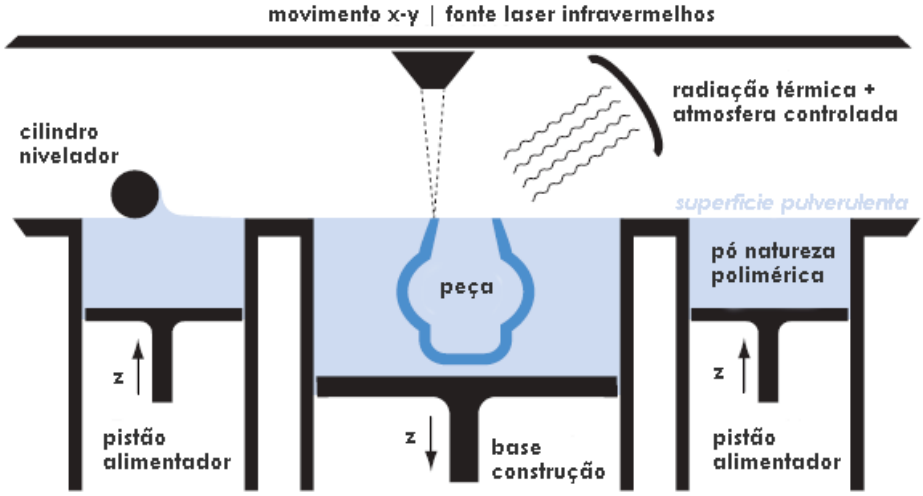


Figura 3.10 – Representação esquemática do processo *SLS (Materialise)* [S10]

Como o meio de construção é sólido, ou seja, pulverulento, o processo não necessita de estruturas suportes nas zonas em balanço. Em processos de base líquida, por exemplo a *estereolitografia*[1] (SL), onde o meio de fabricação do modelo é líquido, é necessário que o

[1] É um processo de PR que utiliza uma resina *epoxídica* líquida, fotosensível, e um feixe laser de raios UV. A incidência do feixe laser na resina promove a sua cura instantânea.

software do equipamento defina suportes sólidos em todas as peças sem apoio de modo que seja possível construir o modelo.

No final do processo os modelos ficam porosos (densidade relativa de 50 a 62%) com alguma rugosidade superficial. Este facto, para além de levantar problemas de acabamento, exige impregnações com resinas e tintas para garantir impermeabilidade e baixa rugosidade.

Quando a finalidade é obter reproduções da peça obtida por SLS a partir de moldes de silicone torna-se fundamental impermeabilizar o modelo para garantir a desmoldação do silicone e obter um bom acabamento superficial.

O SLS permite também a utilização de pós cerâmicos envolvidos numa resina termoendurecível. Estes pós permitem fabricar *moldações bloco* ou *carapaças* que servem para vazar metais líquidos, obtendo-se assim directamente protótipos metálicos [20].

Uma vez descrito o processo de sinterização selectiva por laser torna-se evidente a sua possível aplicabilidade ao objectivo em estudo. Se os pós utilizados forem de origem lenho-celulósica (madeira) revestidos com um polímero e se a temperatura de sinterização não exceder os 200ºC[1] então, teoricamente, este processo poderá ser aplicado ao fim em vista. A incidência do feixe laser não degradará o pó de madeira, promovendo apenas a fusão do material polimérico e a agregação das pequenas partículas entre si.

Por outro lado, o facto da madeira ser um material higroscópico levanta algumas dificuldades no que respeita ao processo de formação de finas camadas homogéneas de material. As partículas quando estão húmidas agregam-se umas às outras formando grumos que provocam irregularidades na espessura da camada laminada. Necessariamente, os pós utilizados quer no processo TDP quer no processo SLS devem estar completamente secos de modo a permitir que o seu espalhamento se faça do modo mais regular possível.

Este processo é menos interessante que os anteriores uma vez que consome mais energia e requer um maior número de operações de pré-processamento (pré aquecimento da câmera de construção, laser utilizado na sinterização selectiva do pó, envolvimento das partículas de pó de madeira com um material de natureza polimérica, entre outras).

Embora ainda não utilizado com madeira, este processo já é empregue na construção de mobiliário, nomeadamente cadeiras e bancos em materiais sintéticos tais como a Poliamida (PA).

[1] No caso particular do material em estudo, a combustão da madeira ocorre à volta dos 280ºC". No entanto, o pó de madeira deve ser processado a temperaturas inferiores, na ordem dos 200ºC, para evitar a degradação do material (ver Capitulo 2).

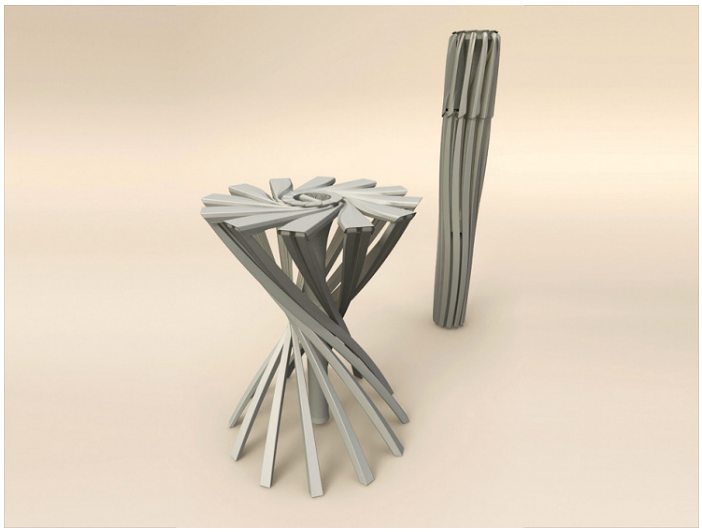


Figura 3.11 – Ilustração de um banco obtido por SLS de pós de Poliamida (PA) [S11]

3.2.4 Tecnologias de conversão

3.2.4.1 Vazamento sob vácuo em moldes de silicone

As tecnologias de prototipagem rápida permitem obter protótipos utilizando processos e materiais diferentes dos empregues no processo de fabrico definitivo. Existem tecnologias de conversão que permitem converter, um protótipo obtido por um processo qualquer, num outro protótipo funcional ou semi funcional, com características mecânicas e de utilização muito próximas dos componentes obtidos pelos processos de produção definitivos.

As ferramentas denominadas de curta tiragem, *rapid soft tooling*, permitem obter protótipos funcionais ou mesmo pré séries, num espaço de tempo relativamente reduzido, por processos de conversão directos ou indirectos.

O processo mais conhecido e largamente utilizado baseia-se na utilização de moldes de silicone para converter protótipos em SL, SLS, LOM[1], FDM[2] ou outros, em protótipos de plástico termoendurecível. Denomina-se *vazamento sob vácuo em moldes de silicone* e permite ainda, por intermédio do processo *investment casting*, converter em metal os protótipos iniciais. Embora pouco utilizado, permite também a obtenção de protótipos cerâmicos através do vazamento de barbotinas cerâmicas.

[1] LOM – *Layer object manufacturing* – processo de PR que utiliza papel impregnado com cola e um feixe laser para corte. A utilização de um rolo pré aquecido comprime a camada de papel à camada anterior, promovendo a adesão das partes.
[2] FDM – *Fused deposition modeling* – processo de PR que utiliza uma cabeça extrusora que deposita material termoplástico fundido em camadas muito finas. A união de duas camadas adjacentes dá-se após solidificação do material.

Conversão de protótipos em peças finais

O processo de conversão de protótipos num plástico de características semelhantes às peças definitivas realiza-se de acordo com as etapas seguintes:

– Definição do plano de apartação do modelo;

– Construção de uma caixa/ colocação do protótipo no seu interior com um ou mais suportes que funcionarão como canais de vazamento/ vazamento de silicone transparente para o interior da caixa, previamente desgaseificado em vácuo/ cura do silicone (polimerização);

– Remoção do protótipo do interior do molde de silicone. Uma série de cortes irregulares são aplicados ao molde para garantir o posterior guiamento dos vários componentes que o constituem;

– Mistura e vazamento de uma resina (por exemplo, de poliuretano) em vácuo;

– Após a cura dentro do molde (50-70ºC – função do tipo de resina utilizada) procede-se à pós cura (temperatura ambiente), em molde aberto. Por último realiza-se o controlo dimensional.

Este conjunto de operações pode ser completamente reprodutível e automatizado, recorrendo a equipamentos comerciais específicos disponíveis no mercado.

O processo descrito, apesar de ser relativamente lento e envolver muita mão-de-obra, é amplamente utilizado por pequenas empresas que prestam serviços na área de desenvolvimento de produtos. As elevadas temperaturas que se desenvolvem aquando da cura da resina promovem a degradação gradual do molde estando este limitado a um limite médio de vida de cerca de 25 peças. O tempo de permanência da peça no molde é função do tempo de cura do material utilizado e pode ascender a 1 hora [20].

Este processo revela-se assim num excelente meio de produção de pequenas pré-séries de peças de dimensão média e de qualquer complexidade, em tempos relativamente curtos quando comparados com processos definitivos.

Um outro processo pode ainda ser referido e utiliza uma máquina de *RIM*, *reaction injection molding* – moldação por injecção com reacção, em vez da câmera com misturador em vácuo. A injecção é realizada também em moldes de silicone nos quais a resina injectada possui

um *pot life*[1] extremamente curto e cura "a frio". Este método é extremamente interessante para componentes cujas dimensões limitam o seu processamento no interior das câmaras de vácuo. Por outro lado, torna-se difícil obter peças isentas de bolhas de ar. A par do tempo de processamento (menor que o processo anterior) e da duração dos moldes (maior tempo de vida útil) está a desvantagem da gama de resinas disponíveis ser muito menor [20].

Uma última referência acerca destes processos vai para o material base que é sempre uma resina termoendurecível – poliuretano, poliéster e eventualmente epoxídica.

O *vazamento sob vácuo em moldes de silicone* pode ser também bastante útil no que concerne ao aproveitamento do pó de madeira. Um modelo físico da peça final pretendida, obtido com recurso às tecnologias de PR, pode ser utilizado na construção dum molde em silicone, no qual é vazada, posteriormente, uma *pasta* à base de pó de madeira e uma resina termoendurecível. Desta forma é possível, se bem que em pequena escala, produzir peças "vazadas" compósitas, de base madeira.

[1] Tempo em que a resina pode ser processada.

3.3 Fabrico rápido (*Rapid Manufacturing*)

A definição de *Fabrico Rápido* (FR) pode ser diferente consoante a ideologia do indivíduo a quem se faça esta questão. Para alguns é uma forma de produzir rapidamente produtos finais, por um qualquer processo de fabrico, enquanto que para outros envolve, necessariamente, a integração de um processo aditivo de fabrico num determinado ponto da cadeia de produção.

A definição adoptada por *Neil Hopkinson*, *Richard Hague* e *Phill Dickens* [11] é bem mais clara e precisa: "FR é definido como sendo a utilização de um processo automatizado de construção aditiva, com recurso a software de projecto assistido por computador (CAD 3D), de modo a produzir peças que são utilizadas directamente como produtos finais ou componentes". As peças obtidas pelo processo aditivo podem ser pós-processadas utilizando para isso técnicas tais como *infiltrações*, *grenalhagem*, *pinturas*, etc. O termo "fabrico aditivo" é usado preferencialmente em vez de "fabrico por camadas" uma vez que os futuros sistemas de FR irão operar com movimentos, simultâneos, de vários eixos (modo multi-axial) em oposição ao modo tradicional *layer by layer* característico dos equipamentos actuais de Prototipagem Rápida (PR).

Embora alguns sistemas de PR tenham sido usados, com sucesso, em aplicações específicas que visavam a produção de peças finais, este sistemas "adaptados" de FR não foram projectados para o fabrico, propriamente dito, e muitos dos problemas encontrados permanecem por resolver. Nestes incluem-se o acabamento superficial, a precisão e a reprodutibilidade entre outros. O FR está a passar uma fase de transição na qual os sistemas de PR estão a ser usados na produção específica, personalizada, e de baixo volume de produtos. A verdadeira produção, no âmbito do FR, terá que contemplar parâmetros produtivos essenciais, tais como velocidade, custo e qualidade que irão condicionar a aceitação ou não do produto pelo consumidor. A optimização daqueles parâmetros é algo que não existe actualmente mas está a ser intensamente investigado.

O domínio do FR tem crescido nos últimos anos e oferece um potencial tal que deve ser inscrito numa disciplina autónoma, independente das tecnologias antecessoras que lhe deram origem – *Prototipagem Rápida* e *Fabrico Rápido de Ferramentas*. Esta nova disciplina, que elimina a necessidade do recurso a ferramentas, tem implicações profundas em vários aspectos que caracterizam o *design*, a *produção* e o *marketing* de novos produtos [11].

3.3.1 Âmbitos de aplicação

É difícil pensar numa disciplina tecnológica que tenha uma amplitude tão vasta de aplicações potenciais como aquelas encontradas (e por encontrar!) no âmbito do FR. Que outra tecnologia poderia despertar num artista, num médico clínico e num engenheiro a mesma excitação de curiosidade? Esta latitude de aplicações quase sem paralelo é reflectida na gama de materiais que podem vir a ser processados. É notório que a tecnologia ainda está na sua fase de desenvolvimento mas, nalguns casos, é já possível recorrer a ela para produzir, com fiabilidade, componentes em materiais poliméricos, metálicos e cerâmicos e, quem sabe, de natureza puramente orgânica! Abre também novas possibilidades à produção de sistemas completamente funcionais onde se combinam diferentes materiais com uma liberdade nunca antes percepcionada.

3.3.2 Liberdade no design

A liberdade criativa introduzida pelo FR é notória e os processos disponíveis revelam-se capazes de concretizar qualquer tipo de ideia mais arrojada. Durante o percurso evolutivo das tecnologias de fabrico aditivo por camadas (ainda não muito longo), os principais processos produtivos com base nessa tecnologia ultrapassaram as capacidades gráficas dos sistemas CAD e, em muitos casos, aqui reside o problema fundamental – desenhar um produto é mais difícil do que produzi-lo!

À medida que estas tecnologias vão sendo, comummente, mais utilizadas na produção de novos produtos e estes vão sendo divulgados perante o público em geral, a criatividade de cada indivíduo irá ser como que libertada e todo o potencial inerente a este tipo de processos irá ser largamente explorado e posto à prova.

Alguns analistas apontam, num período a curto prazo, para a inclusão de pacotes standard de software de modelação 3D em PC´s de uso doméstico, à semelhança do que já se faz com o Windows Office. E por que não um Microsoft CAD? Certamente será um projecto ambicioso que englobará um trabalho considerável de desenvolvimento, onde o público-alvo é composto pelo utilizador comum e não por indivíduos com formação académica/técnica específica, tais como engenheiros, designers, etc.

A criatividade individual será fomentada perante esta evolução sem precedentes, alargando os seus horizontes, com repercussões nomeadamente em domínios onde essa qualidade é fortemente explorada (por ex., *design* de produto!) [10,11].

A figura 3.12 pretende ilustrar a liberdade criativa, anteriormente descrita, aplicada na produção de mobiliário contemporâneo (no caso particular das cadeiras) através da utilização de processos de fabrico aditivos. O exemplo em questão trata de uma cadeira integralmente produzida com base no processo aditivo de *sinterização selectiva por laser* (SLS) de um material, em pó, de natureza polimérica, o *nylon*. Segundo referência bibliográfica, a cadeira pode ser produzida "à medida", permitindo, portanto, ser personalizada e em períodos de tempo absolutamente fascinantes (inferiores a 24 horas[1]), a partir do qual é literalmente possível levar a cadeira "para casa" e começar desde logo a usá-la!



Figura 3.12 – *Sinterchair* ® (*Oliver Vogt e Hermann Weize Negger,* 2002) [34]

3.3.3 Aspectos económicos sobre a produção personalizada

A eliminação da necessidade de recorrer a ferramentas "subtractivas" no fabrico de produtos que são difíceis ou mesmo impossíveis de produzir segundo processos de maquinagem, abre caminho para a produção de pequenas e médias quantidade de produtos via FR. Da mesma forma, a produção unitária faz agora algum sentido quando comparada com a produção em massa, isto em termos económicos. Este novo modo de "laborar" distingue-se do seu antecessor pelo facto de promover a proximidade com o cliente (personalização do produto) e clarifica a necessidade de "encaminhar" a produção para um lugar próximo do ponto de venda – realidade inversa daquela que ainda persiste actualmente.

[1] Este tempo é válido para projectos cujo modelo virtual esteja previamente concluído.

Vários aspectos estão agora a ser discutidos no âmbito desta nova realidade produtiva. O processo de design, especificamente, irá contemplar, para além de um sem número de modelos virtuais, outro tipo de ferramentas de optimização e teste (análise por elementos finitos) de apoio à concepção. A produção, propriamente dita, assim como os regulamentos que normalizam os ensaios teste do produto final irão também sofrer mudanças significativas. As normas que regulam a certificação do tipo CE terão que ser revistas à luz das novas possibilidades que se perspectivam. Outra questão relevante diz respeito ao envolvimento legal de ambas as partes – produtor-cliente; imagine-se um cliente que esteja intimamente envolvido no processo de design do seu próprio produto e uma empresa que fique responsável pela produção do seu produto. Se alguma coisa falhar no produto final, colocar-se-á a seguinte questão: Quem é o responsável legal pelo insucesso do produto? Para não existirem ambiguidades a este nível, nova legislação deverá ser formulada e adaptada às empresas e a todos os agentes participantes no processo produtivo.

O fabrico rápido permite que as expectativas dum cliente sobre determinado produto possam ser encontradas mais eficientemente segundo processos de design e produção personalizados. O grande benefício da personalização está na criação de valor a partir da venda de produtos, mais caros, que foram especialmente produzidos para um dado cliente, que não se importa de pagar um pouco mais pela sua exclusividade [11].

3.3.4 O "legado"da prototipagem rápida

Um dos maiores impedimentos ao rápido desenvolvimento e crescimento desta nova filosofia produtiva reside na não-aceitação da tecnologia aditiva como uma possibilidade genuína. Apesar de alguns indivíduos estarem convictos das oportunidades inerentes ao fabrico rápido, outros recusam-se a ver e centram-se nos pormenores que refutam tais evidências e afirmam, convictamente, que tal realidade nunca irá acontecer. A verdade é que esta realidade, quer queiram quer não, está neste preciso momento a acontecer…

A rejeição do conceito subjacente ao fabrico rápido geralmente ocorre quando aquele processo é comparado com outros já existentes. Por outro lado, o FR é visto como uma extensão da prototipagem rápida e, portanto, as peças assim obtidas não são vistas como aplicações (produtos) finais. Esta "herança" é, talvez, o grande travão ao desenvolvimento do FR. Algum tempo será necessário para contornar este ponto de vista e serão igualmente precisas mais provas, casos de sucesso, que promovam e intensifiquem a sua aceitação.

Não menos importante é a habilidade daqueles que se sentem motivados, uma vez fascinados pela tecnologia e pelas possibilidades que antevêem nela, para divulgar todos os

benefícios que este novo processo produtivo poderá trazer, de uma forma clara, equilibrada e persuasiva [11].

3.3.5 O fabrico rápido como tecnologia disruptiva

Muito daquilo que foi dito anteriormente pode conduzir, sintomaticamente, a uma tecnologia com propriedades disruptivas. Embora o FR ofereça um conjunto vasto de possibilidades em diferentes domínios de aplicação, ele foi sempre visto como uma *boa nova* naquelas áreas onde a prototipagem rápida se revelou numa ajuda imprescindível e conduz (quase) sempre a debates saudáveis ao contrário de discussões infrutíferas.

Embora conotada como uma tecnologia destabilizadora, o fabrico rápido vem colmatar lacunas produtivas que resultam, muitas vezes, das políticas de "massas". Uma empresa que se destine exclusivamente à produção, em grande escala, de uma pequena família de produtos não estará apta a acompanhar as constantes mutações do mercado apenas com a "máquina" produtiva que dispõe. O *layout* rígido do parque de máquinas bem como a sua especificidade operativa, exclusivamente arquitectado para a produção actual, tornam-se pouco flexíveis a variações de forma e tipo de novos produtos.

Esta é talvez uma de muitas perspectivas que podem ser usadas para explicar de que forma a incorporação de novas filosofias laborais, nomeadamente a do fabrico rápido, podem acrescentar valor e solucionar muitos dos problemas que as empresas de transformação enfrentam actualmente – o escoamento do seu produto no mercado e a possibilidade de concorrer noutros com novos produtos. Para tal é preciso flexibilidade produtiva e essa é uma característica intrínseca à fabricação aditiva.

Capítulo 4

Trabalho experimental

Este capítulo é inteiramente dedicado à descrição e análise das experiências realizadas com base em pós de madeira e resinas, de naturezas diversas, com o objectivo de estudar a afinidade ou não destes dois tipo de materiais para construir componentes/peças derivadas de matéria lenho-celulósica, tendo por base os princípios fundamentais da prototipagem rápida.

Os diversos *sets* experimentais, levados à prática, não tiveram uma ordem sequencial predefinida, tendo sido conjecturados e conduzidos de acordo com a evolução dos resultados.

Desprovida de qualquer antevisão, a primeira experiência baseou-se na simples associação de pó de madeira com colas de uso comercial, como por exemplo a conhecida *super cola 3*. Os primeiros ensaios experimentais são comentados linhas abaixo e marcam o inicio de todo um processo de investigação, marcado por avanços e recuos, dificuldades incontornáveis, surpresas agradáveis, objectos surpreendentes e uma grande dose de incertezas, tudo isto fruto da actividade experimental e, sobretudo, da aprendizagem contínua das potencialidades da madeira, mesmo naquele estado físico particular – *em pó*.

4.1 Deposição aleatória de cianoacrilato sobre pó de madeira

Numa base lisa, previamente engordurada com uma cera desmoldante [S17], foram espalhados diferentes pós de madeira, *Wengé (Panga Panga)* e *Pau Cetim (Pau Amarelo)*, sob a forma de finas camadas. Seguidamente, com algum cuidado, manuseou-se um tubo de cola, de composição química à base de *cianoacrilato* (*loctite super cola 3*) [S12], com o qual se

verteram algumas gotas, numa trajectória circular, sobre os planos pulverulentos. O processo repetiu-se ciclicamente até se obterem duas formas, aparentemente sólidas. Como o tempo de cura (secagem) desta cola é extremamente curto, cerca de 3 segundos, foi possível empilhar as sucessivas camadas com alguma rapidez.

Os espécimes assim obtidos não despertaram grande interesse. Para além do odor intenso, tóxico, que a cola imputou aos modelos físicos, do aspecto final, completamente irregular e rugoso, o contributo do adesivo utilizado a nível estrutural não foi satisfatório uma vez que não promoveu uma coesão forte das micro partículas entre si, tornando-os estaladiços, e portanto, frágeis. Conclui-se, portanto, que além do seu difícil manuseamento este tipo de cola não é compatível com os pós de madeira utilizados na experiência.

4.2 Simulação manual do processo de impressão tridimensional da *Z-Corp*™

4.2.1 Caracterização da resina de *poliéster (Quires 272)*

As conclusões retiradas da experiência anterior conduziram a uma nova experiência, agora com uma resina de poliéster (*Quires 272, Maikiprel*®), com carácter mais profissional, desenvolvida para aplicações industriais em enrolamento filamentar, extrusão, moldação centrífuga ou moldação por contacto. Os moldados/laminados fabricados com esta resina apresentam valores constantes nas suas propriedades mecânicas e químicas.

A tabela 4.1 resume as formulações possíveis de realizar com esta resina para diferentes condições de cura – a quente, a frio e a média temperatura:

Tabela 4.1 – Formulações possíveis realizar com a resina de poliéster [S13]

Partes em uso	**Formula.1**	**Formula.2**	**Formula.3**	**Formula.4**	**Formula.5**
QUIRES 272*	100	100	100	100	100
Peróxido de benzoilo a 50%, em pó	2	1	-	-	-
Peróxido de ciclohexanona, em pasta	-	-	4	-	-
Peróxido de metil-etil-cetona-50%, média reactividade*	-	-	-	2	-
Peróxido de metil-etil-cetona-50%, baixa reactividade	-	-	-	-	2
Hidroperóxido de cumeno (80%)	-	1	-	-	-
Sal de cobalto (0.4% Co)*	-	1-4	1-4	1-4	1-4

* Componentes utilizados

Embora as curas a quente e a média temperatura possam ter um grande interesse em determinadas aplicações industriais, aqui interessa apenas caracterizar o processo de cura a frio ou, por outras palavras, à temperatura ambiente, uma vez que é o mais adequado ao objectivo essencial das experiências.

Cura a Frio – Formulações 3, 4, e 5

O catalizador deve ser cuidadosamente misturado com a resina. A resina catalizada permanece estável durante 8 horas quando mantida à temperatura ambiente (20°C). Um pouco antes da sua utilização deverá adicionar-se o sal de cobalto (com 0.4% Co).

No caso de ser utilizado um catalizador líquido, é preferível juntar o acelerador em primeiro lugar e catalizar pequenas quantidades de resina à medida que esta for necessária. A resina acelerada e sem catalizador tem um tempo de vida bastante longo.

Na maioria dos casos não são significativas as diferenças entre as propriedades dos moldados fabricados com a Formulação 3 e dos realizados com as Formulações 4 e 5. No entanto, os moldados curados com *peróxido de ciclohexanona* apresentam, em geral, melhor resistência em meios quimicamente agressivos e a temperaturas elevadas.

Como advertências, o catalisador e o acelerador não devem ser misturados, sob perigo de violenta explosão. Por outro lado, a resina deve estar à temperatura ambiente quando da formulação.

O *set* de experiências com base nesta resina foi idealizado tendo em atenção os recursos disponíveis no laboratório de materiais compósitos do INEGI Assim sendo, como o catalizador e o endurecedores inerentes à Formulação 5 são os mais utilizado em trabalhos análogos a este, realizados pelo Instituto, recorreu-se oportunamente a essa formulação.

A utilização dum catalizador líquido conduziu à seguinte ordem de formulação:

1. Resina: *Quires 272;*
2. Acelerador: *Sal de cobalto (1% Co);*
3. Catalisador: *Peróxido de metil-etil-cetona-50%, média reactividade.*

Tempo de vida ("pot life")

A quantidade de acelerador (sal de cobalto com 0.4% Co) determina o tempo de vida da resina nas formulações para a cura a frio, o qual pode ser calculado de modo aproximado com o auxílio da tabela 4.2, que mostra o tempo de vida para a Formulação 5.

Tabela 4.2 – *Pot life* da resina de poliéster [S13]

Partes de acelerador	**1,0**	**2,0**	**3,0**	**4,0**
Tempo de vida a 15°C (min.)	35	21	15	12
Tempo de vida a 20°C (min.)	25	16	12	9
Tempo de vida a 25°C (min.)	14	12	10	8

Obs.: A cura a frio não deve ser efectuada a temperaturas inferiores a 15°C

4.2.2 Material utilizado no *set* de experiências

Para além da resina, do endurecedor e do catalizador, outros materiais foram utilizados na materialização das experiências conjecturadas. Estas experiências basearam-se, essencialmente, na reprodução manual do processo de impressão tridimensional da *Z-Corp*™.

A necessidade de ter uma superfície plana, o mais regular possível, para depositar os pós e a resina, levou ao fabrico de uma base de ensaios especialmente desenvolvida com vista a esse fim. A base foi projectada recorrendo a software gráfico de modelação 3D, o *Solidworks*™, e produzida com recurso a uma máquina de fresagem de controlo numérico computorizado (CNC). O material escolhido para a base foi contraplacado de madeira com uma película muito fina e lisa, termolaminada, numa das faces (*Wisa White*). Esta particularidade confere-lhe assim a regularidade exigida.

A base foi idealizada com o intuito de se reproduzirem, em paralelo dois tipos de experiências; a primeira, com *domínios virtuais de deposição* e a segunda, com *domínios físicos de deposição ou suportes físicos*. O modelo tridimensional da base pode ser visualizado na figura 4.1.



Figura 4.1 – Representação esquemática da base de ensaios

Os domínios virtuais, como o próprio nome indica, não são físicos e servem unicamente para facilitar o guiamento da deposição do agente líquido aglutinador (resina) sobre as sucessivas camadas de pó, que vão sendo laminadas, no decurso da experiência. A sua "materialização" foi feita com recurso a anéis elásticos (borrachas), devidamente dispostos, os quais facilitaram o traçado de percursos rectilíneos, em banda. O posicionamento dos elásticos foi conseguido à custa de buchas plásticas, embutidas nos furos na própria base. A representação seguinte (figura 4.2) ilustra o princípio descrito.

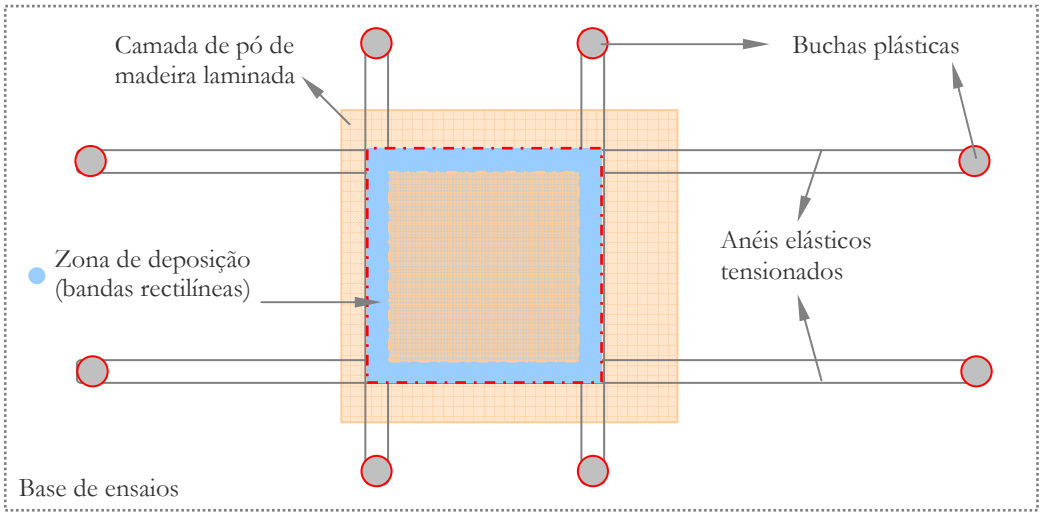


Figura 4.2 – Representação esquemática dos domínios virtuais de deposição

Os domínios físicos de deposição têm como objectivo auxiliarem a edificação do modelo físico funcionando como suportes à construção. Uma observação atenta da base de ensaios

mostra que esta foi projectada contendo rasgos concêntricos, com cerca de 4mm de profundidade, que permitem acoplar, concentricamente, tubos de 40mm, em PVC. Estes, assim dispostos, permitem a construção de um outro tubo, através da deposição simultânea de pó de madeira e resina, camada a camada, com uma espessura de parede igual à diferença dos raios, exterior e interior, dos tubos interior e exterior, respectivamente. A figura 4.3 mostra os componentes utilizados nesta nova classe de experiências.

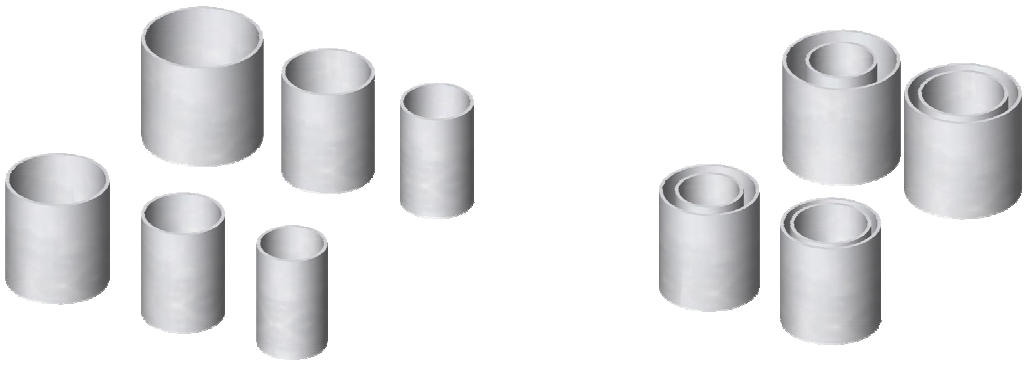


Figura 4.3 – Representação esquemática da disposição concêntrica dos tubos em PVC

Preparação da base de ensaios

A preparação da base de ensaios é essencial para evitar problemas posteriores de desmoldagem. Nesse sentido foi utilizada uma cera especial com esse propósito. A sua aplicação deve ser feita minutos antes do início das experiências de modo que a superfície de contacto adquira a gordura necessária para que, no fim, o modelo seja facilmente removido da base.

A cera desmoldante [S17] *Past Wiz*, *da empresa norte americana Axel*, foi aplicada sobre a base de ensaios, nos locais onde se previu efectuar as experiências com o pó de madeira e a resina. Após aplicar a cera, foram contabilizados cerca de 5 minutos até esta ser parcialmente absorvida pela base. Com a ajuda dum pano seco limpa-se a cera em excesso. O processo repete-se uma vez mais de modo a garantir que a base fique completamente encerada.

4.2.3 Preparação da resina

Após ter-se estimado um volume óptimo de resina a utilizar no set de experiências, esta foi acondicionada num recipiente em vidro. A quantidade de resina depositada foi ponderada com base no seu período de vida útil – período de tempo que medeia entre a sua deposição no recipiente até ao tempo de gel - (função da % catalisador), de modo a evitar

desperdícios. Nesse sentido optou-se por utilizar 20g de resina por cada experiência realizada.

O facto do acelerador utilizado possuir sal de cobalto com uma concentração igual a 1%, obrigou a reformular, proporcionalmente, a sua percentagem mássica. O seu doseamento foi feito com recurso a uma pipeta. Por sua vez, o catalizador foi inserido num frasco conta gotas para facilitar a sua deposição. Como regra geral, a massa de uma gota varia sensivelmente entre 0.04 e 0.05 gramas (tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Percentagens mássicas utilizadas na composição da resina de poliéster [S13]

Valores de referência (em partes)		Valores utilizados (em g)	
Resina	100	Resina	20
Acelerador	1-4 (0.4% Co) 2.5-10 (1% Co)	Acelerador	0.5 – 2
Catalizador	2	Catalizador	0.4

As percentagens mássicas, quer da resina e seus componentes, quer do pó de madeira utilizado, foram devidamente aferidas numa balança de precisão. A mistura dos diversos componentes fez-se com recurso a uma simples vareta.

4.2.4 Preparação do pó de madeira

O pó de madeira foi directamente recolhido de um processo automático de maquinagem (CNC) quando se submeteu um bloco de madeira maciça de *Wengé* a um conjunto de operações sucessivas de desbaste. Nesta primeira fase não houve uma grande preocupação com o tamanho das partículas do pó. A sua afinação ocorrerá mais à frente, com um propósito bem definido, num outro *set* de experiências

Outros materiais acessórios foram também utilizados nas experiências, igualmente indispensáveis à sua realização, a saber:

– Seringas (utilizadas em ambiente hospitalar – 2.5, 5, 10, 20 ml);

– Agulhas;

– Luvas de silicone;

– Acetona;

– Calibre cilíndrico (metálico) com 20 mm de diâmetro.

4.2.5 Caracterização do *set* experimental

Segundo o processo de impressão tridimensional, os modelos são construídos a partir de um material em pó, aglutinado por um agente líquido através de um jacto. Numa primeira fase dá-se a distribuição de uma camada uniforme de pó sobre a superfície de trabalho. Seguidamente, o ligante líquido é depositado nessa camada, por intermédio de finos jactos, sobre os pontos que correspondem ao corte local da peça. Para esse efeito utilizam-se cabeças de impressão idênticas às utilizadas pelas impressoras do tipo jacto de tinta.

A ausência do *hardware* específico utilizado em equipamentos de impressão tridimensional obrigou a improvisar, com alguma criatividade, os diversos órgãos electromecânicos que facilitam a construção dos modelos físicos nesse tipo de máquinas. Deste modo, a cabeça de impressão foi substituída por uma seringa, vulgarmente utilizada em ambientes hospitalares, com o respectivo elemento doseador, uma agulha. Um calibre metálico, com 20mm de diâmetro, foi usado como objecto laminador das sucessivas camadas do pó de madeira. O corte local da peça, de geometria rectangular, foi considerado constante segundo o eixo dos zz e foi materializado, como já referido anteriormente, por um conjunto de anéis elásticos (borrachas elásticas), sob tensão, devidamente dispostas.

Como materiais de construção foram utilizados pó de madeira de *Wengé* e a resina de poliéster *Quires 272*. Uma vez concluídos os preparativos necessários à simulação deu-se inicio ao arranque dos trabalhos práticos.

4.2.6 Análise dos resultados obtidos

A primeira deposição revelou-se numa tarefa bastante complicada de se implementar por diversas razões. Tendo sido aplicado o catalizador à resina inicia-se automaticamente uma contagem decrescente do tempo disponível para realizar a experiência. Quando o *tempo de gel*[1] é relativamente curto, cerca de 7min, o *stress* torna-se num factor importante a considerar! O processo de aspiração da resina para o interior da seringa resultou numa outra fonte de imprecisão, isto porque, a quantidade mássica aspirada resulta da soma de duas quantidades mássicas elementares – a massa de ar e a massa de resina. Esta percentagem de ar aspirado contribuiu para uma deposição não uniforme da resina, no

[1] Tempo durante o qual é possível trabalhar com a resina.

interior do domínio geométrico relativo ao corte local da peça. A intenção de se depositar gotas uniformes de resina naquele domínio não foi inteiramente conseguida.

Uma vez que se pretende dosear fluidos com uma viscosidade relativamente elevada, o acessório doseador (agulha) colocado na extremidade da seringa não pode ter um orifício demasiado pequeno. A pressão necessária para fazer escoar o fluido através da agulha é extremamente elevada pelo que só pode ser realizável através de dispositivos automáticos de deposição (válvulas). Tendo em conta esta restrição, a experiência foi realizada sem a utilização da agulha. Com alguma dificuldade procurou-se então obter uma distribuição uniforme do ligante entre as linhas "elásticas" delimitadoras do corte local da peça. O "jacto" conseguido, em forma de gota, revelou-se exagerado em temos de quantidade. Após a deposição de uma gota verificou-se que esta escoa por capilaridade entre as finas partículas de pó ultrapassando o domínio geométrico definido promovendo assim a agregação de outras partículas que nada tem a ver com a geometria do corte local. Esta experiência revelou-se bastante conclusiva relativamente ao seu propósito – é impossível reproduzir o processo de impressão tridimensional, com níveis de qualidade e precisão aceitáveis, sem recorrer a meios automáticos de deposição.

Uma outra dificuldade encontrada prendeu-se com o espalhamento do pó de madeira de modo a formar uma fina camada, completamente homogénea. Para além de não ter havido uma preocupação prévia de se "afinar" as partículas do pó, o facto de este ser de natureza lenho-celulósica torna-o sensível a variações de humidade no ambiente. Não sendo propriamente madeira maciça, o pó partilha da mesma propriedade higroscópica da primeira. As diversas camadas de pó laminadas durante a implementação da experiência constituiriam também uma tarefa difícil de se materializar manualmente. O aparecimento de grumos de pó resultantes da absorção de humidade, conduziu à formação de camadas de pó grosseiras e heterogéneas.

Face a esta nova dificuldade conclui-se que um pó, seja ele da natureza que for, usado num qualquer processo de impressão tridimensional tem necessariamente que ser submetido a processos prévios de tratamento de humidade ($\leq 1\%$) e afinamento do grão ($\geq$50 MESH). Só assim é possível laminar finas camadas de pó (espessuras na ordem dos mícron) perfeitamente regulares e homogéneas [S14].

A segunda experiência realizada, semelhante à primeira em termos de processo, contou com a utilização de um suporte físico de auxílio à construção. Para tal, foram usados dois tubos de PVC com 30mm e 20mm de diâmetros e 40mm de comprimento dispostos concentricamente na base de trabalho. Apesar das dificuldades encontradas para distribuir uniformemente, quer a camada de pó quer a camada de ligante, a peça obtida apresentou uma qualidade superficial muito interessante. Conclui-se, portanto que a combinação pó de

madeira de *Wengé* e resina de poliéster resulta num material com boas características de reprodutibilidade superficial, quando desenvolvido com base numa estrutura de suporte. Esta conclusão conduziu a realização de um novo *set* de experiências agora assentes num outro princípio – o *vazamento em moldes de silicone*.

A figura 4.4 ilustra a peça que suscitou todo o interesse pela realização de um novo *set* de experiências.



Figura 4.4 – Peça obtida numa experiência realizada com tubos de PVC

4.3 Vazamento em moldes de silicone

4.3.1 Selecção de uma peça

O vazamento (sob vácuo ou não) em moldes de silicone é um processo de conversão de protótipos em peças, na sua maioria, de plástico, metal ou cerâmica. Uma vez que este processo obriga à construção prévia de um modelo físico, da peça que se pretende obter, (neste caso concebido por um equipamento de prototipagem rápida), foi necessário proceder à eleição de uma peça para reprodução. O critério de selecção contemplou um tipo de peças utilizado vulgarmente na indústria do mobiliário – um puxador em madeira de uma cómoda.

A especificidade do puxador seleccionado, relativamente aos demais, reside no facto do seu volume ficar completamente embutido na parte interior da gaveta, ficando apenas visível, na parte exterior, um aro quadrangular. A imagem que se segue ilustra a cómoda, da autoria do arquitecto português Álvaro Siza Vieira, onde se insere o respectivo puxador.



Figura 4.5 – Cómoda C3 (Álvaro Siza, 1990) [15]

Concebido com base numa madeira escura com características exóticas, este componente, apesar da sua simples geometria (figura 4.6), é actualmente produzido com recurso a uma máquina CNC. A par da sua reduzida dimensão, a existência do oco que lhe confere toda a funcionalidade obriga a operações delicadas de desbaste e acabamento por parte do equipamento automatizado, tornando o processo actual algo moroso.

O facto de ser produzido, em "tablete", (por motivos relacionados com a sua fixação à mesa de trabalho da máquina) partindo de um bloco paralelipipédico de madeira maciça, gera um grande desperdício de matéria-prima. Por outro lado, a área visível do puxador na cómoda é diminuta, quando comparada com a sua área total. A percepção de veios ou texturas da madeira nesse domínio visível é também quase inexistente, fruto da sua coloração escura. Atendendo ao exposto, o critério de selecção baseou-se sobretudo nestas duas realidades – desperdício de matéria-prima e área "útil", funcional e estética, do puxador.

A peça em questão revelou-se assim interessante, sob o ponto de vista académico, tendo sido submetida a um conjunto de experiências, todas elas baseadas na formulação de pastas compostas por resinas e pós de madeira, posteriormente vazadas em moldes de silicone.

4.3.2 Modelação tridimensional

Partindo dos desenhos originais provenientes do atelier de arquitectura, o puxador foi posteriormente modelado tridimensionalmente, com recurso a software adequado (*SolidWorks*™). Uma vez obtido o ficheiro CAD 3D fez-se a conversão instantânea deste ficheiro para um homólogo, mas com extensão STL, o qual permitiu, com recurso a um equipamento de estereolitografia, a realização do modelo físico do puxador num material polimérico.

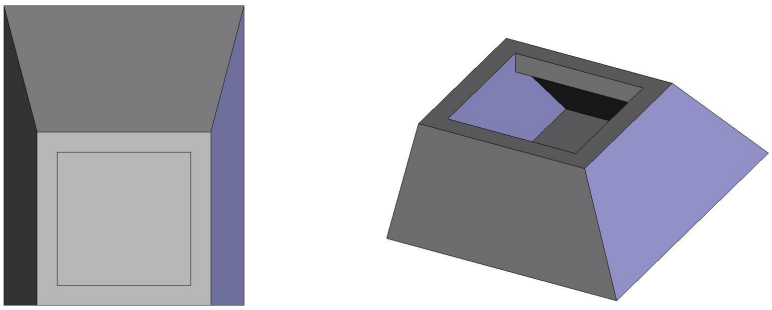


Figura 4.6 – Modelo 3D do puxador

A máquina *SL Viper SI40* utilizada na construção do protótipo, pertence à empresa norte americana *3D Systems*™ e utiliza um material de natureza polimérica, foto sensível, com a seguinte denominação comercial – *Accura*™ *SI 10*. Este material confere aos componentes, ainda "em verde", uma grande resistência mecânica assim como uma óptima resistência à humidade. Além disso, este polímero foi especialmente desenvolvido para aplicações que envolvam a utilização de protótipos na criação de moldes para vazamento.

A figura 4.7 ilustra o protótipo do puxador obtido através do processo de estereolitografia o qual irá permitir a concretização dos moldes em silicone.

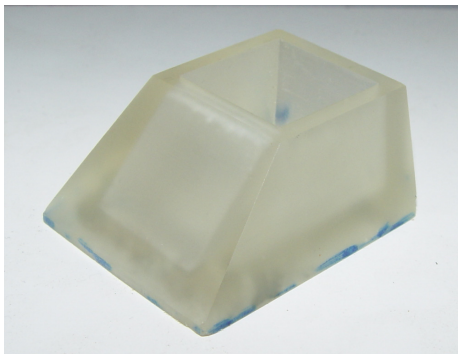


Figura 4.7 – Protótipo do puxador em *SL*

4.3.3 Construção dos moldes em silicone

4.3.3.1 Preparação da caixa

Após a selecção da peça final a produzir e a obtenção do respectivo modelo físico (protótipo) que a caracteriza, o passo seguinte prende-se com a construção de uma caixa onde se insere o protótipo com um ou mais suportes que vão funcionar como canais de vazamento.

Paralelamente, define-se do plano de apartação do molde. Esta tarefa revelou-se extremamente simples uma vez que o protótipo possuía uma região completamente plana, estando esta localizada na base do modelo físico. Para delimitar aquela região foi usada fita adesiva, de banda larga, na qual foram definidas marcas de referência com a ajuda de um marcador azul. Estas marcas são necessárias para mais tarde identificar o plano de apartação quando da desmoldação.

O dimensionamento da caixa foi feito, essencialmente, com base nas dimensões globais da peça (44x34x21 mm) e contemplou um conjunto de regras que evitam a contracção da cavidade moldante após a cura do silicone. Uma das regras aplicadas está intimamente relacionada com o posicionamento relativo do protótipo na caixa onde, regra geral, as paredes interiores devem estar afastadas do modelo físico cerca de 2.5 a 4 cm.

O material utilizado na sua construção da caixa foi contraplacado (de madeira) de cofragem c/ isolamento em ambas as faces. A figura 4.8 ilustra, com algum detalhe gráfico, o modo como se idealizou todo o processo de construção da caixa para obter o molde em silicone do puxador.

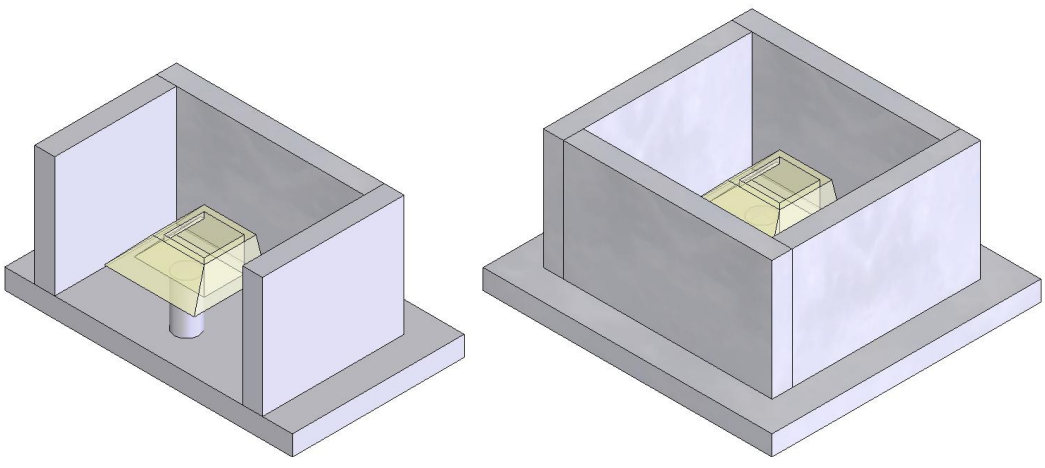


Figura 4.8 – Representação esquemática da construção do molde em silicone

A necessidade de realizar experiências em simultâneo utilizando diferentes tipos de resinas e pós de madeira com diferentes granulometrias levou à construção de dois moldes em silicone. Esta opção foi bastante proveitosa pois permitiu desenvolver este trabalho experimental com alguma celeridade.

4.3.3.2 Selecção e preparação do silicone

A utilização de silicones na produção de moldes permite reproduzir modelos sem planos de apartação bem definidos, geometrias intrincadas com muito pouca ou nenhuma saída. A sua característica auto desmoldante evita, na maioria dos casos, a utilização de desmoldantes, geralmente aplicados para facilitar a extracção dos modelos.

Embora existam dois tipos de silicone disponíveis comercialmente, que diferem entre si quanto ao processo de polimerização, um por condensação e outro por adição, é este último o mais utilizado no fabrico de moldes pois apresenta uma menor contracção durante a cura (normalmente inferiores a 0.1%).

Com o objectivo de facilitar as operações de extracção dos modelos do interior dos moldes, o silicone utilizado deve ser transparente. Apesar de serem inúmeros os fornecedores que disponibilizam este tipo de silicones, foi utilizado um da empresa espanhola, MCP Ibéria, SA (VTX950-CAT950), por ser um produto regularmente utilizado pela Unidade de Fundição e Novas Tecnologias do INEGI (CETECOFF), em trabalhos congéneres.

A tabela 4.4 apresenta algumas propriedades do silicone utilizado no âmbito deste trabalho experimental A dimensão da peça e a construção da caixa para vazamento determinaram a massa de silicone a utilizar, 500g.

Tabela 4.4 – Características do silicone VTX 950 – CAT 950 (MCP Ibéria, SA) [S15]

Características principais	Boa vazabilidade e boa resistência a resinas
Proporção da mistura (silicone/catalizador) (g)	10:1
Cor	Transparente
Viscosidade (mPa.s)	≈ 42 000
Densidade (g/cm^3)	1.10
Pot Life (h)	1.5

Tempo de desmoldação (h)	24 a 25ºC ou 2 a 60ºC
Contracção (%)	0.1
Dureza *Shore*	40
Indicações complementares	Moldes flexíveis, auto-desmoldantes para peças técnicas

Os silicones de adição são mais caros que os de condensação. Embora estes últimos sejam mais económicos do que os primeiros apresentam a desvantagem de serem menos duros e terem maiores contracções. Desaconselha-se, portanto, a sua utilização em aplicações que exijam elevada precisão dimensional.

De modo a obter-se silicones isentos de bolhas de ar é fundamental que se exerça um controlo eficaz, quer sobre a temperatura de trabalho quer sobre a técnica de processamento. Este objectivo foi equacionado durante as experiências e atingido com sucesso, graças a um conjunto de passos que a seguir se descrevem:

– Deve-se misturar cuidadosamente o catalizador (50g) com o silicone (500g) em doses sucessivas (e não de uma vez só) para evitar que parte do silicone não fique catalizado. Ao contrário do que é habitual com as resinas, a ordem de formulação inverte-se, passando a ser o silicone (VTX950) o componente que vai sendo sucessivamente adicionado ao catalizador (CAT950). Esta mistura deve ocorrer num recipiente com, pelo menos, 5 vezes o volume do silicone a processar;

– Uma vez concluída a mistura, esta deverá ser colocada numa câmera de vácuo para ser desgaseificada. A desgasificação ocorre desde a pressão atmosférica, ≈1bar, até aos 25mbar, altura a partir da qual se dá o abate da mistura. Este processo é rápido e dura, sensivelmente, cerca de 2 minutos. À medida que a depressão vai aumentando, no interior da câmara de vácuo, é necessário abrir, algumas vezes, a entrada de ar para evitar que o silicone transborde o recipiente;

– Decorridos alguns minutos as bolhas de ar começam a crescer, em tamanho e número, provocando uma grande agitação à superfície. É um indício de que o abate do silicone irá ocorrer a qualquer instante. Após esta fase o silicone poderá ser vazado;

– O enchimento da caixa deve ser feito com esta ligeiramente inclinada para permitir uma só frente de avanço;

– Uma segunda desgasificação deve ser realizada, agora com o silicone no interior da caixa.

A cura do silicone processou-se à temperatura ambiente, estando concluída ao fim de 24 horas. Caso seja necessário reduzir o tempo de cura do molde de silicone, existe um processo para o fazer. A caixa com a mistura desgaseificada deverá ser colocada num forno à temperatura de 60-70ºC. Passadas 3 horas, o molde estará completamente curado apresentando contracções superiores a 0.1%, fruto da expansão que sofreu no interior do forno, durante o aquecimento. Esta solução só é aplicável em casos que não exijam grandes tolerâncias dimensionais.

A figura 4.9 ilustra os dois moldes de silicone, construídos com base no processo descrito anteriormente, utilizados no novo de *set* de experiências.



Figura 4.9 – Moldes em silicone do puxador

A cura dos silicones pode ser inibida por certos contaminantes presentes no modelo a ser reproduzido. Esta inibição pode afectar, ou mesmo impedir, a ligação química necessária à cura do silicone [20].

4.3.4 Caracterização do *set* experimental

O novo *set* de experiências, utilizando os moldes em silicone do puxador, foi concebido com o objectivo de poderem ser testadas, em simultâneo, diferentes formulações de *pastas*,

compostas à base de pós de madeira (de espécies distintas), com diferentes granulometrias, misturados com resinas estruturais, de natureza polimérica diferente.

O vazamento destas pastas nos moldes em silicone permitiu aferir parâmetros essenciais como a compatibilidade do ligante utilizado, a influência do tamanho do grão na qualidade final das peças, o tipo de acabamento (brilhante, mate, acetinado, etc.), heterogeneidade no processamento, entre outros, na análise de novos materiais compósitos.

O afinamento dos pós das diferentes espécies de madeiras utilizadas nesta experiência foi feito recorrendo a uma peneira de uso doméstico. As partículas que conseguiram passar pela malha apertada da peneira foram designadas de *grão fino*. A designação *grão grosseiro* foi dada a todas as outras partículas que permaneceram na peneira. As primeiras experiências foram realizadas com base numa mistura aleatória de grãos finos com grãos grosseiros.

As resinas utilizadas neste novo set experimental foram as de poliéster, a já utilizada *Quires 272* em experiências anteriores e a *Reapox 520*, de natureza epoxídica. Uma vez que a de poliéster já foi caracterizada anteriormente, faz-se de seguida uma breve descrição da resina epoxídica.

4.3.5 Caracterização e preparação da resina epoxídica (*Rapox 520*)

A resina *Reapox 520* (R520), comercializada pela empresa francesa *REA Industrie*, foi formulada com vista à produção de estruturas compósitas, de alta performance, reforçadas com fibra de vidro, aramida ou carbono, através de técnicas do tipo "*wet layup*", curadas à temperatura ambiente. É um produto multi-propósito bastante usado na indústria dos compósitos laminados. Os seus diferentes endurecedores permitem ajustar o tempo de trabalho em função de cada aplicação específica. Como características principais destacam-se as boas propriedades mecânicas, o tempo de trabalho, regulável entre 1 e 5 horas, a cura à temperatura ambiente, a baixa toxicidade e a baixa viscosidade.

Existem 4 tipo de endurecedores, comercializados também pela *REA Industrie*, a saber:

– D522 – Muito lento;

– D523 – Lento;

– D526 – Normal (catalisador utilizado nas experiências);

– D528 – Rápido.

De acordo com a especificação do fabricante, a mistura deve ser realizada da forma mais precisa possível, ou seja, os seus componentes (resina + endurecedor) deverão ser correctamente pesados e bem proporcionados. Qualquer erro de preparação resultará num défice das propriedades globais do sistema[1], uma vez curado. Esta advertência foi tida em consideração, tendo sido utilizado equipamento adequado de medição – balança de precisão. A tabela 4.5 resume as quantidades mássicas utilizadas para cada um dos componentes.

Tabela 4.5 – Percentagens mássicas utilizadas na composição da resina epoxídica

Valores de referência (em g)		Valores utilizados (em g)	
Resina	100	Resina	40
Endurecedor	30	Catalizador	12

A resina R520 pode ser curada à temperatura ambiente. Consoante o tipo de endurecedor utilizado é possível programar diferentes períodos de cura. Com o endurecedor D526, foi possível obter uma cura completa, a 20ºC, ao fim de 14 dias. Caso houvesse necessidade de reduzir o tempo de cura com este endurecedor, seria viável utilizar a seguinte programação: 8 horas a 20ºC + 24 horas a 40ºC. No entanto, os diferentes tipos de endurecedores podem ser utilizados em conjunto para ajustar o tempo de trabalho.

Seguidamente resumem-se na tabela 4.6 algumas das características técnicas relevante do endurecedor utilizado.

Tabela 4.6 – Dados técnicos relativos ao endurecedor D526

Características técnicas	Valores
Pot Life (400g/20ºC)	40 min
Tempo de trabalho (20ºC)	3 h
Filme "à prova de poeira"	4h/4h30
Filme "toque seco"	5h/5h30
Filme "duro/rígido"	16h

A tabela anterior mostra que, para efeito prático, ao fim de 16 horas é já possível manusear a peça obtida com esta resina sem o risco desta se desagregar! O facto de a cura completa só se verificar ao fim de 14 dias não implica que a peça possa só ser usada ao fim desse

[1] Entenda-se como sistema a associação da resina com o endurecedor.

período. As 16 horas são já suficientes sob o ponto de vista de utilização, mesmo sabendo que o processo de cura ainda não está concluído.

As propriedades físicas da mistura (resina+endurecedor) são apresentadas na tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Propriedades físicas da mistura resina epoxídica+endurecedor

Propriedades físicas	Resina R520	Endurecedor D526	Mistura (R520+D562)
Aspecto	Amarelo	Castanho escuro	Castanho claro
Densidade (g/cm3)	1.16	1.01	1.12
Viscosidade a 20ºC (cP)[1]	900/1000	150/200	1200/1400
Viscosidade a 25ºC (cP)	700/800	100/120	800/900

4.3.6 Análise dos resultados obtidos

A tabela 4.8 condensa os vários tipos de experiências realizadas assim como os resultados obtidos em cada uma delas. Para além da caracterização de cada experiência, no que respeita aos materiais de construção utilizados, fazem-se também alguns comentários quanto à qualidade superficial dos vários modelos físicos obtidos do puxador.

Tabela 4.8 – Caracterização e análise das experiências realizadas

Experiência	Pó de madeira	Resina	Observações
A1	*Wengé* [5g] Grão Fino [?%] + Grão Grosseiro [?%]	Poliéster [40g]	Mistura aleatória de grãos finos com grãos grosseiros. Acabamento (Idêntico a A.3)
A2	*Wengé* [5g] Grão Fino [100%]	Poliéster [40g]	Acabamento (Suficiente*, Brilhante)
A3	*Wengé* [5g] Grão Grosseiro [100%]	Poliéster [40g]	Acabamento (Bom**, Brilhante)
* A homogeneização da mistura não foi totalmente conseguida. Na peça obtida são evidentes zonas onde não existe pó de madeira, apenas resina. Presença de bolhas de ar.			
** Surpreendentemente, a peça obtida apresenta melhor acabamento superficial que a anterior. O motivo prende-se com o tamanho das fibras que compõe o pó grosseiro. Estas, por sua vez, ao misturarem-se com a resina entrelaçam umas nas outras formando uma malha aparentemente mais compacta que a obtida com o grão fino. Presença de bolhas de ar.			

[1] 1 P ("poise") é igual a 0.1Pa.s.

A4	*Wengé* [5g] Grão Fino [100%]	Poliéster [20g]	Acabamento (Bom*, Brilhante)
A5	*Wengé* [5g] Grão Grosseiro [100%]	Poliéster [20g]	Acabamento (Bom**, Brilhante)
*/** Presença de bolhas de ar. Ainda que a percentagem seja inferior à registada em experiências anteriores, a sua presença mantém-se evidente. As amostras foram sujeitas a operações de polimento o que melhorou significativamente o seu acabamento superficial.			
B1	*Wengé* [5g] Grão Fino [100%]	Epoxídica [20g]	Acabamento (Muito Bom*, Mate)
B2	*Wengé* [5g] Grão Grosseiro [100%]	Epoxídica [20g]	Acabamento (Muito Bom**, Mate)
*/** Presença de bolhas quase inexistente. Alguma rugosidade superficial detectada na amostra B2 – influência do tamanho do grão.			
C1	Pau Cetim [5g] Grão Fino [100%]	Epoxídica [20g]	Acabamento "plástico" (Oxidação da cor natural da madeira* – amarelo cetim>>amarelo torrado)
* Numa primeira análise, as madeiras "claras" proporcionam peças com um aspecto visual menos interessante do que o obtido com a utilização de madeiras escuras.			
D1	Takula [5g] Grão Fino [100%]	Epoxídica [20g]	Acabamento (Muito Bom*, Mate)
E1	Nogueira [5g] Grão Fino [100%]	Epoxídica [20g]	Acabamento (Muito Bom**, Mate)
*/** As experiências D1 e E1 revelaram que, a associação de pós de madeiras exóticas (de cor escura) com a resina epóxica utilizada (REAPOX 520), independentemente da cor original da madeira, gera peças com uma coloração final semelhante (castanho escuro ou preto). A razão prende-se com a oxidação provocada pela resina uma vez em contacto com o pó de madeira utilizado.			

A evolução do *set* experimental não foi aleatória, tendo sido seguido um determinado critério. À medida que as peças eram obtidas, iam sendo sujeitas a uma análise cuidadosa das imperfeições que as caracterizavam. Assim, através de um ajustamento permanente das quantidades mássicas aplicadas, quer do pó de madeira quer da resina, foi possível optimizar, continuamente, a qualidade superficial das peças. Os modelos físicos conseguidos quando dos últimos ensaios demonstram, efectivamente, esta preocupação.

A grande dificuldade encontrada prende-se, sem dúvida, com o processo de deposição. A mistura de pó de madeira com resina originou um composto pastoso que dificilmente penetrou, livremente, nas zonas mais intrincadas do molde em silicone. Reconhecida a dificuldade optou-se, desde o início, por não contemplar o vazamento sob vácuo, simplesmente pelo facto de não ser possível o escoamento livre da pasta na cavidade moldante.

O preenchimento total do molde foi conseguido com recurso a uma simples vareta que ajudou a "empurrar" a pasta para as zonas de difícil acesso. Mesmo sendo um molde auto-lubrificado, o escoamento da pasta no seu interior não foi facilitado. Embora não tenha sido testada, presume-se que a injecção pressurizada da pasta num outro tipo de molde (por exemplo em resina), mais rígido que o de silicone, possa ser uma solução viável para obter peças sãs, isentas de bolhas de ar. Deste modo conclui-se que o vazamento sob vácuo em moldes de silicone é um processo parcialmente eficiente quando o propósito é "vazar" compostos pastosos. Uma forma de contornar esta dificuldade é aumentar a fluidez do composto, incrementando a percentagem de resina mantendo inalterada a quantidade mássica de pó. Apesar de ser uma solução não é propriamente a mais interessante. Aqui interessa dar maior preponderância ao pó de madeira, uma vez que é a matéria-prima abundante e "grátis". A grande vantagem é poder usá-lo em maiores proporções, minimizando, desta forma, o consumo de resina.

A qualidade superficial das peças extraídas dos ensaios realizados é função, sobretudo, da qualidade do modelo físico obtido por estereolitografia e do tipo de silicone utilizado. Se este for bem escolhido e correctamente processado então irá reproduzir com exactidão todos os detalhes do modelo físico. Contudo, a excelente característica de reprodutibilidade das resinas utilizadas associada às optimizações sucessivas das percentagens mássicas dos componentes assim como o afinamento dimensional do grão dos diferentes pós de madeira empregues nas experiências não devem ser menosprezados, pois contribuíram igualmente para o sucesso deste *set* experimental, tendo sido obtidas peças quase isentas de defeitos e com um aspecto global bastante interessante.

Posteriormente, as peças foram submetidas a operações de pós processamento com abrasivos, nomeadamente operações de lixagem e polimento, realizadas com sucesso. A qualidade superficial foi substancialmente melhorada. Estas operações foram realizadas com recurso a lixas da empresa *Robbialac* (P60 e P220). O indicie de referência das lixas está intimamente ligado com o poder abrasivo da mesma que é tanto maior quanto mais baixo for o valor do índice O acabamento final foi obtido com recurso a operações de polimento efectuadas num equipamento da *Struers*, o *Planopol-3*. A lixa utilizada é específica da marca para o tipo de equipamento em questão (geometria circular). O índice adoptado foi o P800 podendo este ser superior consoante o grau de exigência do acabamento final.

A imagem que se segue pretende ilustrar a qualidade dos protótipos obtidos, quando das últimas experiências realizadas, no âmbito deste *set* experimental. Por outro lado, a imagem valida, ainda que de um modo indirecto, o verdadeiro propósito desta tese, ou seja, a utilização de pós de madeira no fabrico de protótipos/peças por prototipagem rápida.

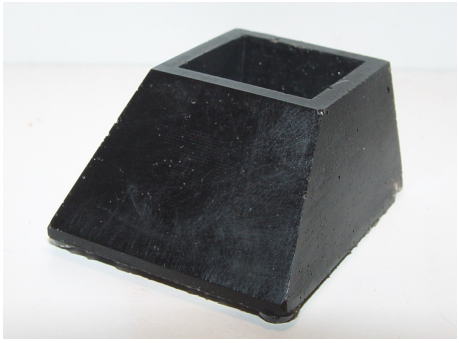


Figura 4.9 – Puxador obtido por vazamento, à base de pó de madeira e resina

O mesmo puxador produzido segundo um processo de maquinagem CNC acarretaria um desperdício mínimo na ordem dos 42%, fruto das condicionantes técnicas, já referidas, inerentes aquela tecnologia. Esta percentagem resulta da divisão do volume efectivo da peça (13185 mm^3) pelo volume do bloco maciço de madeira onde ela se insere (31415 mm^3). Em condições normais de trabalho, no caso especifico de peças pequenas, a quantidade desperdiçada excede, muitas vezes o volume útil global das peças finais.

Embora os componentes obtidos pelo processo de vazamento de pastas de base madeira em moldes de silicone não serem propriamente peças em madeira, tornam-se interessantes de considerar em situações onde a presença dos aspectos peculiares da madeira não sejam relevantes e sobretudo, que a sua integração não comprometa a qualidade do projecto sob o ponto de vista do seu *design* global.

4.4 Ensaio mecânico de flexão

O ensaio de flexão foi realizado segundo a norma internacional ISO 14125, concebida para determinar a propriedades mecânicas de flexão em materiais compósitos plásticos reforçados com fibras.

A realização deste ensaio teve dois propósitos essenciais. O primeiro prende-se com a verificação da anisotropia da madeira e o segundo com a comparação das características mecânicas do "novo" material obtido (pó de madeira de *Wengé* + resina epoxídica), utilizado durante o trabalho experimental, no âmbito das experiências com os moldes de silicone, com as da madeira de *Wengé*, no seu estado natural, e também com as da resina usada na mistura. Optou-se por usar, neste ensaio, a resina epoxídica uma vez que foi aquela que proporcionou melhores resultados nas experiências anteriores. Deste modo, os provetes utilizados foram agrupados em classes de acordo com a sua natureza física, a saber:

- Classe 1: 100% Resina epoxídica;

- Classe 2: 75% Resina epoxídica + 25% Pó de madeira de *Wengé*;

- Classe 3: 100% Madeira de *Wengé* (foram contempladas as 3 direcções principais).

O equipamento utilizado na realização dos vários ensaios de flexão é propriedade do INEGI e foi adquirido à empresa norte-americana *Instron*. Concebida com base num sistema electromecânico de precisão, a *Maquina Universal de Ensaios* de *30ton*. (designação da máquina) encontra-se equipada com uma célula de carga de 5KN (pode realizar testes de carga até ≈500kg).

A norma contempla dois métodos distintos para realização dos ensaios, definidos com base no número de apoios. O utilizado designa-se por método A e caracteriza-se por ser de *três pontos*, ou seja, dois pontos de apoio e um terceiro que referencia o local de incidência da carga (no ponto médio do provete).

4.4.1 Preparação do ensaio mecânico

Forma e dimensão do provete

As dimensões do provete utilizado assim como a sua geometria (secção rectangular) são coerentes com as mencionadas na norma ISO 14125 [37], associada a materiais de natureza semelhante ao que se pretende ensaiar, e encontram-se resumidas na tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Dimensões de referência para o método A (flexão com dois pontos de apoio e um de carga) [37]

Material	Comprimento provete (l) mm	Distância entre apoios (L) mm	Largura (b) mm	Espessura (h) mm
Classe 1 Termoplásticos (reforçados c/ fibras descontinuas)	80	64	10	4
Tolerâncias	-0 +1	±1	±0.5	±0.2

Uma vez que a madeira faz parte do leque de materiais a serem submetidos ao ensaio de flexão, a espessura de 4mm aconselhada revela-se diminuta quando se trata daquele material. Portanto, fixou-se o valor da espessura dos provetes em 8mm. Este facto obrigou a redimensionar os outros comprimentos específicos. Segundo a norma, eles encontram-se relacionados com a espessura h do provete da seguinte forma (tabela 4.10):

Tabela 4.10 – Dimensões características do provete em função da espessura h [37]

Dimensão	Expressão (Materiais tipo Classe I)
Comprimento do provete (l)	l/h=20
Distância entre apoios (L)	L/h=16
Largura (b)	Se 5<h≤10 então b=15

Deste modo determinaram-se as restantes dimensões características do provete. A tabela 4.11 condensa as dimensões adoptadas.

Tabela 4.11 – Dimensões características do provete função da espessura h [37]

Dimensão	Valores adoptados (mm)
Comprimento do provete (l)	160
Distancia entre apoios (L)	120
Espessura (h)	8
Largura (b)	15

Direcção da carga aplicada

A direcção segundo a qual o provete é testado coincide, geralmente, com umas das suas direcções principais. A direcção paralela ao eixo das fibras é definida como direcção "1" e a direcção perpendicular a elas fica definida recorrendo ao índice "2". A direcção "1" está também associada à direcção longitudinal do provete (0º) assim como a direcção "2" está associada à direcção transversal (90º). Uma notação semelhante pode ser usada em materiais com orientações preferenciais das fibras diferentes das normais.

Quando o ensaio é realizado com base num material anisotrópico, neste caso a madeira, o provete ensaiado deverá ser solicitado segundo aquelas 3 direcções por apresentarem propriedades distintas. Se, no âmbito de uma aplicação específica, o material for solicitado segundo uma direcção diferente das principais, o provete deverá ser também testado nessa direcção particular.

Preparação dos provetes

Os provetes foram preparados de acordo com a especificidade do material utilizado. No caso de compostos obtidos por moldação ou extrusão, as amostras deverão ser obtidas directamente através de um processo de moldação por injecção ou de um processo de

moldação por compressão. A especificidade do trabalho experimental desenvolvido conduziu a um outro processo, o da moldação por gravidade, que foi efectivamente utilizado na obtenção dos provetes. Um molde em silicone foi concebido especialmente para este ensaio com o intuito de se produzir uma placa maciça de onde se extraíram os provetes. Deste modo é possível obter amostras iguais, isentas de qualquer defeito de processamento, passíveis de serem lixadas, polidas para ficarem correctamente dimensionadas.

Verificação dos provetes

Os provetes deverão estar isentos de qualquer imperfeição para garantir que os resultados obtidos sejam fidedignos. Dizer-se-á que o provete estará em condições de ser testado se satisfazer a um conjunto de especificações que estão directamente relacionadas com a forma (geometria) do provete, composição e aspecto superficial. As suas faces, geralmente paralelipipédicas, deverão ser paralelas em todo o seu comprimento, não deverá conter quaisquer inclusões estranhas e/ou descontinuidades no material base assim como a sua superfície deverá estar isenta de riscos. Estas especificações devem ser verificadas com recurso a instrumentos de medição de precisão (calibres, micrómetros) e através da simples observação visual. Embora não fosse primordial, no âmbito deste trabalho, uma grande preocupação a este nível, procurou-se efectuar uma verificação medianamente rigorosa.

Número de provetes a utilizar

De acordo com a norma o número mínimo de provetes a utilizar neste ensaio é de 5. Assim sendo, os ensaios de flexão foram realizados em conformidade com o valor recomendado.

Velocidade da aplicação da carga

A velocidade da aplicação da carga (v) foi calculada com base na seguinte expressão:

$$v = \frac{\varepsilon' L^2}{6h} = \frac{0.01 * 120^2}{6 * 15} = 3 \rightarrow 2 \text{ mm/min}, \tag{13}$$

onde ε' é igual a 0.01. O valor da velocidade foi escolhido em conformidade com uma tabela, disponível na norma, com valores padronizados. Como o valor obtido através da expressão não consta na tabela, embora situando-se entre dois valores consecutivos normalizados, a norma sugere a adopção do imediatamente inferior. Face ao exposto fixou-se a velocidade do ensaio nos 2mm/min.

Tensão de flexão, módulo de elasticidade e deformação relativa

As expressões indicadas pela norma para o cálculo da tensão de flexão (σ_f), do módulo de elasticidade à flexão (E_f) e da deformação relativa (ε), para o método A, são aquelas que a seguir se apresentam:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \qquad E_f = \frac{L^3}{4bh^3}.\left(\frac{\Delta F}{\Delta s}\right) \qquad \varepsilon = \frac{6sh}{L^2}, \tag{14}$$

onde F representa a carga aplicada e s a deflexão do ponto médio do provete [37].

4.4.2 Análise gráfica dos resultados obtidos

A figura 4.10 ilustra o comportamento mecânico da madeira de *Wengé* quando solicitada, perpendicularmente, em cada uma das suas direcções principais. A direcção dominante coincide com a direcção longitudinal das fibras o que prova a razão pela qual os toros de madeira são quase sempre laminados paralelamente ao seu eixo.

Os trabalhos realizados em madeira maciça, no âmbito de projectos de arquitectura, engenharia, bem como de *design*, deverão respeitar esta característica do material lenhoso a par de um bom dimensionamento estrutural. Deste modo é possível salvaguardar a resistência mecânica do material e, por conseguinte a sua valia estrutural, não raras as vezes denegrida pela opinião pública, pelo facto da sua natureza ser pouco conhecida.

Analisando a curva à azul, correspondente ao provete cujas fibras se encontram orientadas na direcção longitudinal, a transição do domínio elástico para o domínio plástico ocorre muito suavemente, sem que seja possível identificar o ponto de transição. A evolução em patamares, já no domínio plástico, refere-se ao rompimento parcial e consecutivo das fibras. A rotura do provete dá-se quando a ligação das últimas fibras é quebrada. O módulo de elasticidade (E_f) foi calculado e obteve-se um valor médio na ordem dos 17.3GPa. A tensão limite de elasticidade aproxima-se dos 150MPa. Assumiu-se somente importante

comentar o ensaio dominante dada a discrepância de valores (bastante inferiores) registada nos ensaios efectuados nas outras duas direcções.

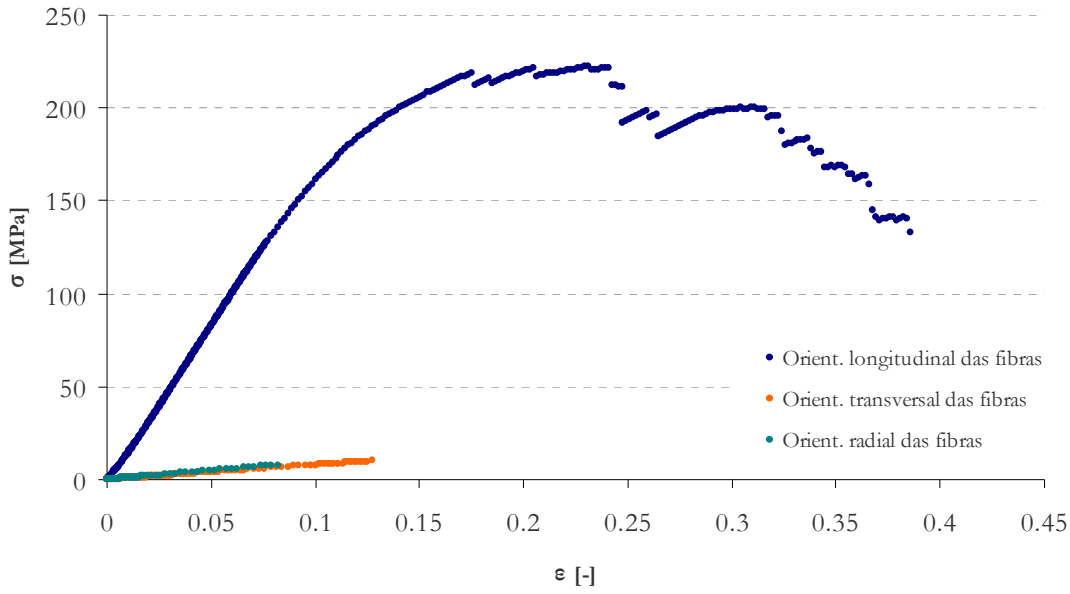


Figura 4.10 – Tensão *vs* deformação (anisotropia da madeira – 3 direcções principais)

As duas curvas que se seguem (figura 4.11) definem o comportamento mecânico dos provetes concebidos em resina e no composto pó de madeira + resina. Para além da evolução elástica, já conhecida da resina utilizada, a curva do material composto revelou alguma perplexidade. Supôs-se, desde o início, que a união dos dois materiais distintos iria originar um terceiro, que reunia as melhores características de ambos. Portanto, as fibras da madeira ao misturarem-se na resina formariam uma malha que contribuiria para uma aumento do módulo de elasticidade do composto, ou seja, originaria um material com uma rigidez superior à da resina. Em parte foi o que se verificou muito embora não se tivesse percepcionado desde o início que a mistura se traduziria num material com um comportamento perfeitamente elástico, assemelhando-se a um elastómero rígido, com um ponto de rotura relativamente baixo.

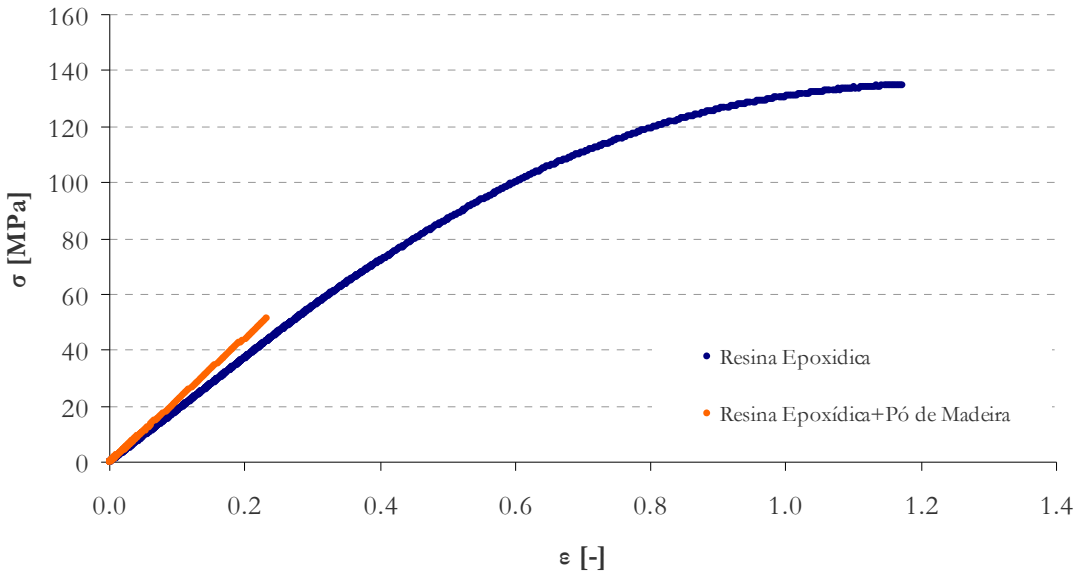


Figura 4.11 – Tensão *vs* deformação (comparativo resina epoxídica e resina epoxídica + pó de madeira)

Uma análise posterior da zona de fractura dos provetes compostos, à lupa estereoscópica (*Olympus SZH*) revelou a presença de ocos (figura 4.12). Estes ocos são defeitos contraídos durante o processamento da mistura pelo facto de esta, uma vez vazada no molde, não ter sido desgaseificada. Por outro lado, embora a mesma zona não tenha sido visualizada num microscópio electrónico, presume-se que a interface pó de madeira – resina seja frágil, sendo responsável pela rotura precoce do material.

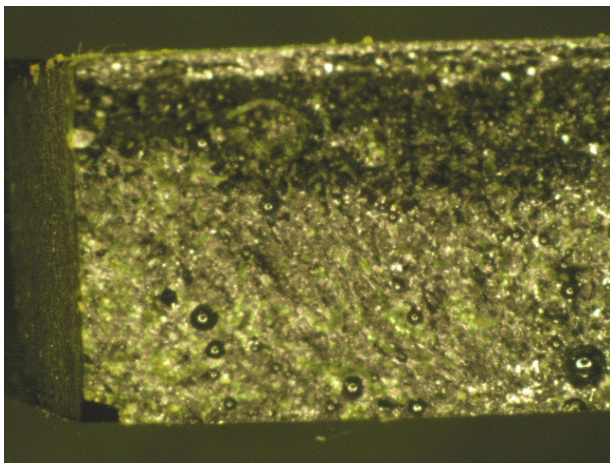


Figura 4.12 – Imagem estereográfica da zona de fractura de um provete composto

Uma observação atenta da figura anterior mostra a existência de umas cavidades esféricas escurecidas. Estas marcas sugerem a presença de bolhas de ar quando do processamento da pasta que não conseguiram libertar-se. Por outro lado, é visível uma zona mais escura na

parte superior da fractura. Esta mancha pode estar relacionada com a incompleta homogeneização da mistura. Conclui-se assim que a mistura do pó de madeira com a resina conduziu à produção de provetes com heterogeneidades na sua constituição, proporcionado concentrações distintas de resina e pó em diferentes regiões e, por conseguinte, ao aparecimento de pontos concentradores de tensões, responsáveis pela sua rotura abrupta.

O gráfico da figura 4.11, relativo ao ensaio de flexão dos provetes compostos, não é, portanto, conclusivo. As experiências deveriam ser repetidas com base em provetes compostos processados com dispositivos automatizados de mistura e de homogeneização. A análise microscópica referida anteriormente seria essencial para determinar a compatibilidade ou não dos dois elementos constituintes. Caso se validasse a incompatibilidade dos principais constituintes da mistura, nomeadamente a resina utilizada, seria necessário seleccionar uma nova, compatível com o pó de madeira, e proceder à realização de novas experiências.

Esta nova realidade apercebida não vem destituir a imagem promissora já criada do puxador. Este, sendo solicitado dentro da gama de valores determinada nas experiências, cumpre o seu propósito sem comprometer a sua fiabilidade. Acredita-se que a optimização de determinados parâmetros (modo de processamento, tipo de resina, desgasificação da mistura, afinamento do tamanho das partículas) irá potencializar os valores experimentais obtidos assim como garantir uma maior qualidade superficial dos componentes finais, proporcionando novos campos de aplicabilidade a este novo tipo de material.

4.5 Complemento experimental com resina fotosensível

Os resultados obtidos quando do primeiro *set* experimental (simulação manual do processo de impressão 3D) suscitaram a realização de duas pesquisas tecnológicas que, embora não sendo completamente testadas, pudessem suportar o conceito inicial inerente a todo este trabalho de desenvolvimento. As dificuldades inerentes quer ao processo de deposição da resina quer ao seu processo de cura (secagem) eram questões que estavam por resolver, daí terem merecido uma atenção especial. Ambas serão comentadas com a importância devida, muito embora tenha sido remetido, para um capítulo adequado, o processo de deposição da resina, por merecer algum detalhe.

O processo de cura, por outras palavras, a secagem de resinas ou materiais termoplásticos é um assunto actual e perfeitamente conhecido da moderna indústria dos polímeros e dos componentes electrónicos. A facilidade de implementação deste processo associada ao

baixo consumo de energia que acarreta torna-o bastante interessante em diversos tipos de aplicações industriais. A sua única particularidade é que os materiais utilizados têm que ser, necessariamente, fotosensíveis, ou seja, que incorporem na sua constituição física constituintes, sensíveis a uma determinada gama da luz, que são responsáveis por desencadear o processo de polimerização (cura) – *fotoiniciadores*.

A percepção da existência desta tecnologia aliada à necessidade vigente de se encontrar um mecanismo eficiente de cura, quase instantânea, conduziu à formulação do seguinte raciocínio: – "*A utilização de uma resina fotosensível, compatível com pós de madeira, em detrimento de uma outra com cura natural (por exposição ao ar e à temperatura ambiente) traz vantagens adicionais ao processo de impressão tridimensional de componentes de base madeira, que se pretende implementar. A utilização de luz ultravioleta como fonte luminosa de cura torna-o energeticamente mais eficiente. Por outro lado, o processamento da resina é facilitado pelo facto de esta não necessitar de ser formulada com base em componentes. A presença de fotoiniciadores é uma característica intrínseca da resina*".

Esta nova realidade conduziu, naturalmente, a uma pesquisa sobre resinas fotosensíveis. Embora não sendo, aparentemente, vasto o leque de produtos comercialmente disponíveis em *sites* da especialidade, foi possível descobrir um que satisfaz, em certa medida, o propósito da aplicação pretendida.

As conversações estabelecidas, via *e-mail,* com a empresa norte americana *Dow-Chemicals* sobre o tema em desenvolvimento suscitaram um grande interesse pelo que desde logo se prontificaram em colaborar, disponibilizando algumas amostras da resina *Cyracure*™, especialmente desenvolvida para aplicações que exijam, essencialmente, baixa viscosidade, nas quais se insere a prototipagem rápida e que cura sob a acção de luz ultravioleta. Uma vez que é um produto dirigido a ambientes de produção industrial, é comercializado em quantidades também industriais. Normalmente, a formulação base é composta pela resina mais o fotoiniciador. A necessidade específica de cada empresa é que determina a possibilidade de se adicionarem outros componentes, à formulação base, de modo a optimizar o sistema para uma dada aplicação. Entre aquelas propriedades passíveis de serem melhoradas destacam-se o tempo de cura, a viscosidade, a dureza, a tenacidade e a elasticidade.

Uma vez que a utilização do produto era para fins experimentais, o envio fez-se em módulos separados de resina e fotoiniciador, de modo a ser possível controlar a proporção destes dois componentes, quando da mistura.

Os diferentes componentes, generosamente cedidos pela *Dow Chemicals,* apresentam as especificações seguintes:

- *Cyracure UVR-6105* (resina, menor viscosidade);

- *Cyracure UVR-6107* (resina);

- *Cyracure UVI-6976* (fotoiniciador).

A seguir (figura 4.13) ilustra-se um gráfico, directamente retirado da ficha técnica de uma das resinas, que mostra a lei de variação da viscosidade com a temperatura, para cada um dos tipos recebidos. Uma simples análise mostra que as resinas diminuem a sua viscosidade com o aumento da temperatura, sendo a UVR-6105 aquela que apresenta menor gama de valores.

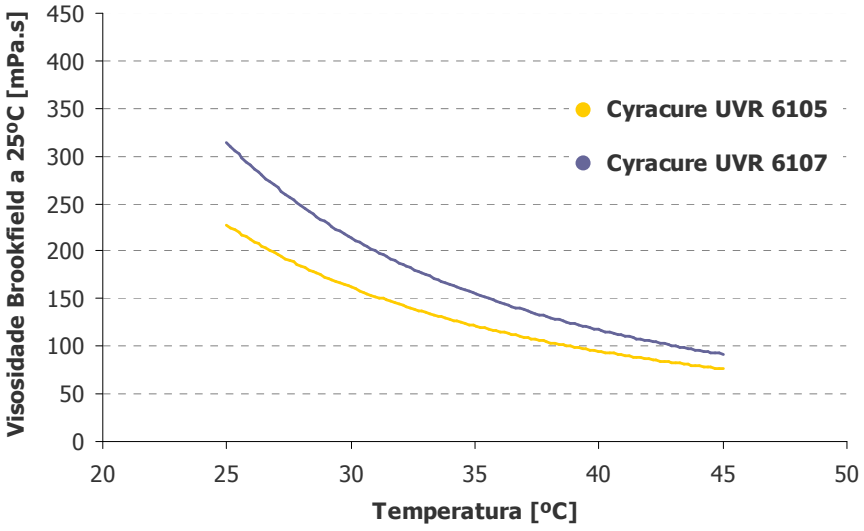


Figura 4.13 – Variação da viscosidade com a temperatura

A questão da viscosidade é um importante parâmetro a considerar uma vez que a deposição deste tipo de resinas ou semelhantes, em equipamentos de prototipagem rápida, é feita com recurso a sistemas automáticos de deposição. Estes sistemas possuem válvulas que podem entupir caso a viscosidade exceda um determinado valor e, consequentemente, comprometer a fiabilidade do processo. Este é um assunto que será revisto no capítulo seguinte.

Assim como não existe a preocupação de doseamento e mistura de componentes na resina fotosensível também não existe a preocupação com os tempos associados ao "*pot life*", que em muito dificultam e comprometem a qualidade dos processos.

Uma vez identificada a resina fotosensível faltava determinar a fonte de luz indicada para a sua cura. A pesquisa incidiu, sobretudo, em empresas mundialmente conhecidas no ramo da iluminação, como a *Philips* e a *Osram*. Embora a luz ultravioleta seja amplamente comercializada pelas duas marcas, em lâmpadas com diferentes tamanhos e potências, foi

no catálogo da *Osram*, na secção de aplicações industriais, que se conseguiu encontrar aquela que melhor satisfazia os pré-requisitos experimentais. A lâmpada seleccionada, *Ultra-Vitalux® UV* da *Osram*, pode ser acoplada numa simples instalação eléctrica que disponha de um casquilho universal (E27), vulgarmente usado em iluminação. Segundo a sua ficha técnica, estas lâmpadas emitem radiação UV que é usada na polimerização dos mais modernos materiais plásticos, disponíveis actualmente. Um outro parâmetro importante na selecção foi a distribuição espectral da radiação emitida pela lâmpada. Os fotoiniciadores, presentes na resina e responsáveis pela polimerização da mesma, absorvem a radiação apenas numa determinada gama de valores do espectro ($250<\lambda<350$ nm). Estes tiveram que ser confrontados com os da lâmpada (figura 4.14).

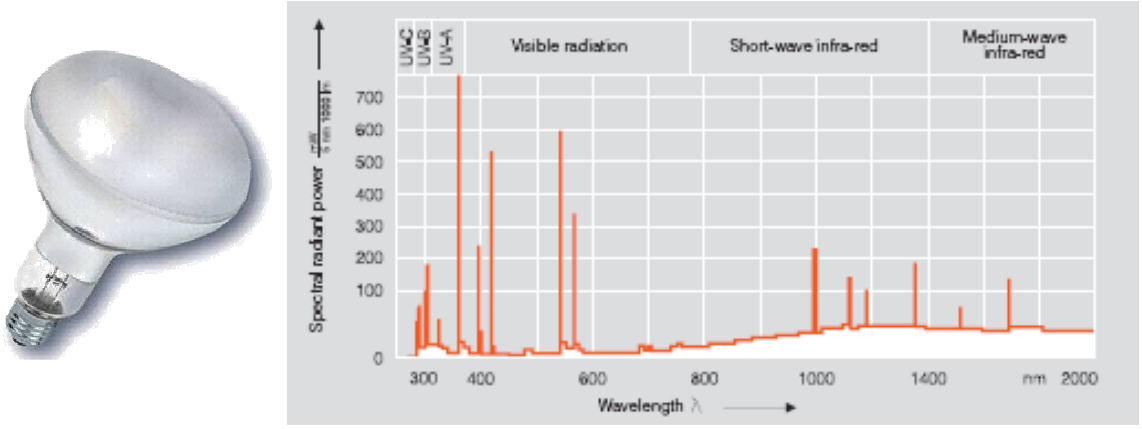


Figura 4.14 – Lâmpada *Ultra-Vitalux UV (Osram);* distribuição espectral de radiação

A reunião destas duas novas componentes experimentais, a resina fotosensível e a lâmpada de UV, permitiu a realização de um novo *set* experimental, agora com a possibilidade de curar instantaneamente a resina, uma vez depositada num fino estrato de pó de madeira.

A preparação da resina foi feita com base numa brochura técnica, retirada do *website* da *Dow*, sobre a *cura catiónica* de resinas UV. A percentagem de fotoiniciador foi calculada com base no peso (em gramas) de resina utilizada. De acordo com o tipo utilizado, o UVI-6976, a proporção indicada é de 2%. Assim sendo, para cada componente, estimaram-se as seguintes quantidade mássicas óptimas (tabela 4.12):

Tabela 4.12 – Percentagens mássicas utilizadas na composição da resina *Cyracure*™ [S16]

Valores de referência (em g)		Valores utilizados (em g)	
Resina (UVR-6105)	100	Resina	20
Fotoiniciador (UVI-6976)	2	Catalizador	0.4

Após ter sido laminada uma fina camada de pó de madeira de *Wengé* no interior de um domínio geométrico triangular (cavidade triangular materializada com recurso a vidro acrílico), numa base previamente engordurada com cera desmoldante, *Past Wiz (Axel)* [S17], foram depositadas algumas gotas de resina por cima dessa camada. Seguidamente fez-se incidir a lâmpada de luz ultravioleta na zona de deposição da resina. Foram precisos menos de 5min para que a resina depositada curasse completamente agregando as partículas de pó em contacto. Este tempo poderá ser ajustável mediante a percentagem de fotoiniciador utilizada ou através da adição conjunta de outros fotoiniciadores. Outra resina poderá igualmente ser utilizada, em substituição ou em conjunto com o mesmo propósito.

A figura 4.15 ilustra uma peça irregular obtida após repetições sucessivas de deposição de pó de madeira e resina, sendo esta curada por incidência de radiação UV.



Figura 4.15 – Peça obtida por associação de pó de madeira e resina *Cyracure*™

Embora não sendo uma resina com carácter estrutural, a peça conseguida reforça a hipótese inicial de que é possível produzir peças, partindo de pós de madeira que vão sendo sucessivamente adicionados e agregados, camada a camada, segundo um processo em tudo semelhante ao da impressão tridimensional da *Z-Corp*™.

Foram ainda realizados algumas experiências no âmbito dos WPC, ou seja, a associação de pós de madeira com um material termoplástico. Apesar dos resultados obtidos não terem sido satisfatórios, achou-se importante realçar os aspectos fulcrais que conduziram ao insucesso deste *set* experimental, em particular.

O trabalho experimental consistiu na utilização de uma máquina injectora de plásticos (*Injecta P5*), disponível no laboratório de Materiais e Ensaios Mecânicos da FEUP, para injectar uma *pasta* fundida no interior de um pequeno molde metálico. Esta pasta resultou da associação de pó de madeira de *Wengé* com polipropileno (*PP Hifax BA23893*) numa proporção 5g e 25g, respectivamente. A temperatura de fusão fixou-se nos 200º de modo a evitar a degradação do material orgânico.

O molde metálico utilizado, de geometria bastante simples, foi previamente pulverizado com um spray desmoldante (*Domáx*), à base de silicone, para evitar complicações quando da desmoldação. O facto do orifício do alimentador possuir um diâmetro especialmente dimensionado para injectar termoplásticos, não facilitou o escoamento do WPC, relativamente mais viscoso que o termoplástico, para o interior da cavidade moldante. Por outro lado, o arrefecimento foi tal que, logo à entrada do alimentador, promoveu a solidificação imediata do material fundido.

Outro aspecto relevante foi o facto de não ter sido conseguida uma homogeneização completa da mistura. A leitura de um artigo científico, no âmbito da moldação por injecção de WPC [53], permitiu uma melhor compreensão do problema anterior bem como a forma de o solucionar. A preparação de um WPC exige a utilização de aditivos, nomeadamente lubrificantes (para facilitar o seu escoamento no alimentador e na cavidade moldante) e de *coupling agents* (para promover a mistura dos dois materiais – homogeneidade). Este tipo de agentes, para além de melhorarem as propriedades mecânicas do material, tais como a tensão de rotura, o módulo de elasticidade e a resistência ao impacto, reduzem também a capacidade de absorção de água e melhoram a sua resistência a altas temperaturas.

Concluiu-se o trabalho experimental com a convicção de que, face ao panorama positivo de resultados obtidos, é aceitável ponderar sobre a criação de um equipamento que reúna as condicionantes tecnologias necessárias para que possa "imprimir", tridimensionalmente, peças "em madeira"!

Este novo desígnio é abordado no capítulo seguinte que reporta a constituição física e modo de funcionamento de um hipotético equipamento de fabrico rápido a ser utilizado por indústrias ligadas ao sector da transformação da madeira, na produção de peças/componentes e objectos decorativos, partindo de um subproduto conhecido, abundante e menos valorizado, especifico desses ambientes industriais – *o serrim.*

Capítulo 5

Equipamento de *fabrico rápido*

A viabilidade tecnológica de se produzirem peças e componentes a partir da aglutinação de pós de madeira por um adesivo químico estrutural tornou-se evidente no capítulo 4, com os promissores resultados obtidos no âmbito do trabalho experimental.

As inúmeras dificuldades encontradas no decurso desse trabalho conduziram à pesquisa permanente de soluções tecnológicas, específicas a cada problema. Muitas delas foram já apresentadas e caracterizadas, embora a solução mais delicada, relacionada com a deposição eficiente da resina, tenha sido remetida para este capítulo, dada a sua dificuldade de implementação. Uma vez resolvidos os impasses técnicos será possível esquematizar o modo de funcionamento de um hipotético equipamento de *fabrico rápido* assim como enumerar os diversos componentes que o constituem.

O micro doseamento de fluidos e de outras substâncias liquefeitas é, geralmente, um tema bastante complexo de abordar e insere-se no domínio da *Mecânica* dos *Fluidos*[1] [39]. A física inerente ao processo de deposição de *micro gotas* ou mesmo de *micro jactos* de fluidos é elaborada e, como tal, não é leccionada no período normal de um curso de engenharia (mecânica ou química). Contudo, a caracterização de um sistema automático de deposição de fluidos obriga a um abordagem sobre esta matéria, a qual não pretende ser exaustiva mas, sobretudo, que esclareça o leitor dos princípios físicos fundamentais que a sustentam.

A necessidade de aprofundar conhecimentos e a escassez de literatura técnica ao nível da micro dosagem de substâncias levou à consulta directa de especialistas internacionais nesta área. Após algumas tentativas falhadas de comunicação com empresas do ramo, aquela que mostrou maior interesse em colaborar neste projecto é alemã e denomina-se por *Microdrop*™ [S18]. Para além da venda directa de equipamento/sistemas, a empresa

[1] Ramo da física dedicado ao estudo do movimento (hidrodinâmica) e do repouso (hidrostática) de fluidos.

disponibiliza igualmente serviços em diversas áreas: formação técnica, realização de ensaios experimentais de deposição, prototipagem e estudos de soluções personalizadas às necessidades do cliente. Assim, a tecnologia abordada neste capítulo é propriedade integral da empresa *Microdrop*™ que gentilmente cedeu alguma informação técnica.

5.1 Deposição automática de fluidos

5.1.1 Conceitos fundamentais

A essência dos sistemas de micro dosagem de fluidos baseia-se na utilização de um vidro capilar que é envolvido por um material piezo eléctrico. A aplicação de uma tensão (sinusoidal) a este material leva-o a contrair e a gerar uma onda de pressão sobre o fluido, no seu interior. O estrangulamento propositado da extremidade do orifício de saída faz com que a pressão estática diminua e a pressão dinâmica aumente, traduzindo-se num movimento fortemente acelerado do fluido ($10^5 g$[1]!), do qual resulta a libertação de uma ínfima gota. Uma vez libertada das tensões superficiais que a ligam à extremidade do capilar, a micro gota desloca-se no ar a uma velocidade de 1.5 a 3.0 m/s, até atingir a superfície de contacto. A dimensão diametral, típica das micro gotas, ronda os 30-100 microns (volumes depositados entre os 25pl e os 500pl), sendo função do diâmetro do orifício através do qual é expelida.

A figura 5.1 ilustra, esquematicamente, a constituição de um vidro capilar *standard*, usado em sistemas de micro dosagem de fluidos.



Figura 5.1 – Representação esquemática de um vidro capilar [S18]

[1] $1g \approx 9.8 m/s^2$ (g é a aceleração da gravidade).

Existem diferentes tipos de geradores de micro gotas: os *standard* e aqueles que possuem um volume de armazenamento. No entanto, ambos não permitem o contacto directo do piezo actuador com o fluido a depositar. Este contacta apenas com o vidro capilar. A figura 5.2 refere os dois tipos descritos. As extremidades doseadoras encontram-se a 10 mm (para a esquerda), do material piezo eléctrico.



Figura 5.2 – Imagem real de dois vidros capilares – c/ volume de armazenamento (em cima) e o *standard* (em baixo) [S18]

A forma dos orifícios doseadores é optimizada no sentido de permitir que as ondas acústicas geradas pelo piezo actuador sejam correctamente convertidas em energia cinética – movimento do fluido. A figura 5.3 mostra um orifício típico dos sistemas comercializados pela empresa alemã *Microdrop*™, com 70 microns de diâmetro de saída.

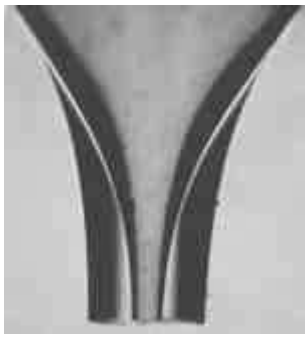


Figura 5.3 – Imagem real (ampliada) de um orifício doseador de um vidro capilar [S18]

A imagem que a seguir se apresenta (figura 5.4) pretende ilustrar o resultado conseguido com a utilização da tecnologia *Microdrop*™ num ensaio experimental realizado num acreditado instituto alemão (IOF). A experiência consistiu na deposição de uma resina fotosensível (com cura por UV) sobre uma base em vidro. Após cura da resina, a matriz de pontos foi submetida a um *scanner* superficial. A representação em relevo denota a elevada precisão na formação dessa matriz assim como a possibilidade de formar pontos de maior dimensão por adição sucessiva de micro gotas na mesma posição - o ponto central resulta da deposição sucessiva de 5 micro gotas!

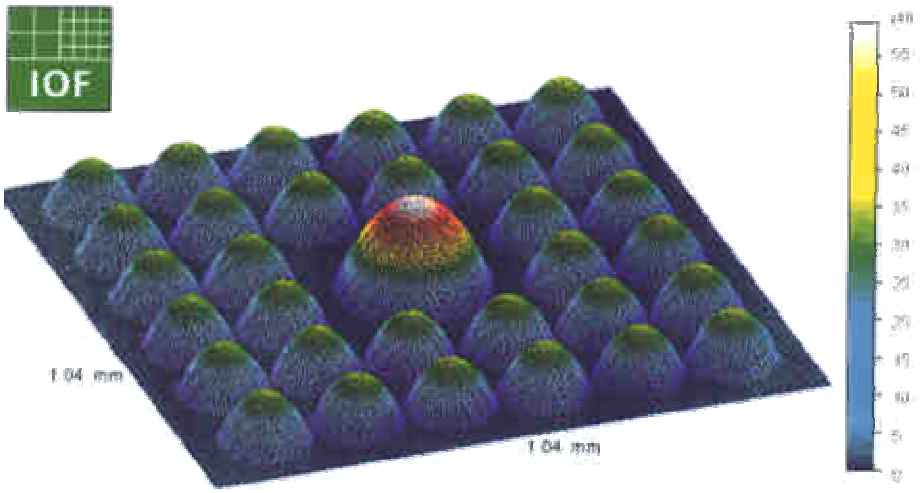


Figura 5.4 – *Scanner* superficial a uma matriz de pontos (de resina)

A linha de produtos disponível comercialmente pela empresa alemã cobre um vasto leque de instrumentos de precisão para aplicações que exijam volumes doseados na ordem dos pico-litros (10^{-12}litros), e também, dos micro-litros (10^{-6}litros), com viscosidades entre 1 e 200 mPa.s (à temperatura ambiente). Caso a viscosidade exceda aquele valor, foram desenvolvidas válvulas com sistema de aquecimento incorporados que podem aquecer o fluido até uma temperatura próxima dos 160ºC[1].

Os fluidos passíveis de serem usados com este tipo de tecnologia podem ser simples soluções coradas de base aquosa (tintas), óleos, adesivos estruturais, lubrificantes, impermeabilizantes, dispersões, bio(polímeros), e soluções de nano partículas (1nano=10^{-9}m). As aplicações variam de igual forma, podendo a tecnologia ser usada no fabrico de sensores, polímeros electrónicos (células solares FV, etiquetas RFID, ligações condutoras), micro-lubrificação (indústria de relojoaria e dos rolamentos de precisão), micro mecânica e óptica. Mais recentemente, sistemas biológicos podem ser processados recorrendo também à micro dosagem (ADN, proteínas, células). De acordo com o grau de precisão da deposição é possível controlar eficientemente o tamanho da gota depositada, ou a espessura do filme projectado. Estas dimensões podem variar entre os 50nm (nanométros) e valores da escala milimétrica (os actuais sistemas de prototipagem rápida laminam camadas na ordem dos microns – 1micron=10^{-6}m) [S18].

A modularidade característica dos sistemas *Microdrop* permite-lhes serem ajustados "à medida" das necessidades do cliente.

[1] Note-se que a viscosidade de um fluido é inversamente proporcional ao aumento da sua temperatura.

5.1.2 Tecnologias disponíveis

Embora o propósito seja o mesmo, existem diferentes técnicas para materializar a micro-dosagem de fluidos, a saber [S18]:

– *Microdrop*™ – deposição por "gota-a-gota" de fluido (deposição discreta);

– *Nanojet*™ – deposição por jacto de fluido (deposição contínua);

– *Dropjet*™ – deposição por geração continua de gotas de fluido (deposição continua).

A tecnologia *Microdrop*™ foi já caracterizada quando da abordagem dos conceitos fundamentais. Resta agora caracterizar as outras duas.

Na presença de aplicações que exijam doseamentos de volumes na ordem dos 200nl e superiores, a tecnologia *Nanojet*™ é a indicada. Esta técnica permite formar um jacto líquido partindo de um sistema de micro-doseamento controlado por dois parâmetros – um temporal (o tempo) e outro físico (a pressão). Um fluido pressurizado alimenta uma cabeça doseadora que consiste numa mico-válvula associada a um orifício doseador (acessório). Abrindo a válvula, o fluido, sob pressão, escoa através da extremidade doseadora formando um jacto líquido bem definido. A integração da micro válvula permite a abertura e o fecho à passagem do fluido. Uma vez que esta mutação de estados (aberto-fechado) é operada a uma elevada frequência, é possível depositar quantidades volúmicas próximas dos 200nl. A geometria particular do orifício doseador permite obter um jacto em regime de escoamento laminar, o que o torna estável (contínuo) durante um período de tempo considerável até se converter em múltiplas gotículas de fluido (deixa de ser um jacto para se tornar num conjunto discreto de gotículas). A figura 5.5 ilustra o funcionamento descrito [S18].

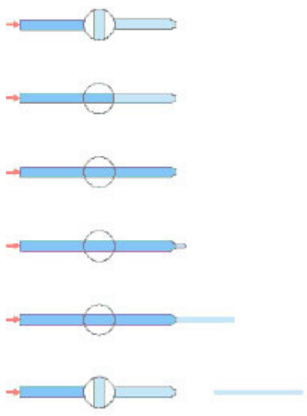


Figura 5.5 – Representação esquemática da tecnologia *Nanojet*™

A tecnologia *Dropjet*™ (figura 5.6) resulta da combinação das duas tecnologias anteriores, o que permite a geração de múltiplas gotas com uma grande precisão dimensional. O jacto de fluido pressurizado é modulado por um actuador piezo eléctrico que provoca flutuações bem definidas no diâmetro do jacto à saída do orifício doseador. Estas flutuações crescem no tempo e conjuntamente com a abertura e fecho da micro-válvula conduzem à desintegração do jacto em micro gotículas. O volume destas ínfimas gotas fica definido pelo caudal de fluido, pela frequência de modulação e pelo diâmetro do orifício doseador. A gota mais pequena que é possível atingir com esta tecnologia tem o dobro do tamanho (diametral) do orifício doseador e fica definida pela onda de amplitude mais baixa da flutuação periódica. O volume máximo é limitado pela separação estável das micro gotas. A figura 5.6 ilustra a tecnologia *Dropjet*™.

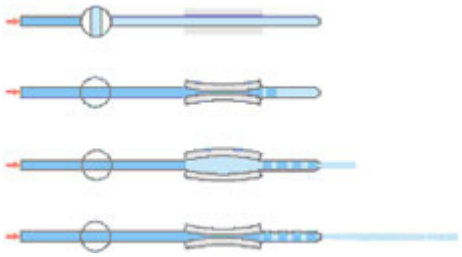


Figura 5.6 – Representação esquemática da tecnologia *Dropjet*™

A caracterização das diferentes tecnologias de micro deposição de fluidos facilita a procura do melhor processo para aplicação em mente. No entanto, existem particularidades, inerentes a cada tecnologia, que não foram enunciadas e que, de alguma forma, condicionam a sua aplicação. O quadro seguinte (tabela 5.1) pretende ser sucinto, no que respeita às suas características técnicas mais relevantes e, sobretudo, estabelecer uma análise comparativa entre elas [S18].

Tabela 5.1 – Comparação das diferentes tecnologias de micro deposição de fluidos [S18]

Características técnicas	*Microdrop*™	*Nanojet*™	*Dropjet*™
Volume por gota	25-500 pl*	>200 nl	-
Diâmetro da gota	30-100 μm*	-	60-200 μm*
Variação volúmica	≈ 1%*	≈ 5%*	≈ 2%*
Gama de viscosidades	1-100 mPa.s (s/ aquecimento) 100-10000 mPa.s (c/ aquecimento)	1-50 mPa.s	1-50mPa.s

Frequência de doseamento	0-2000/s*	-	20-80 KHz
Volume máximo doseado	1 µl/s	2 ml/s	-

* Função do tipo de fluido

As tecnologias *Microdrop*™, *Nanojet*™ e *Dropjet*™ incorporam o mesmo princípio tecnológico utilizado nas impressoras do tipo jacto de tinta, o qual está a ser, actualmente, adaptado a novos fins industriais. Prova disso são os modernos materiais poliméricos, usados na indústria electrónica, cuja constituição física compreende nano partículas condutoras. Estes materiais estão a ser largamente utilizados na produção de circuitos electrónicos impressos e em *displays* gráficos. A sua aplicação é feita recorrendo à tecnologia *Microdrop*™ nos mais variados tipos de substratos.

A figura 5.7 pretende ilustrar a precisão da deposição de um material condutor, conseguida com recurso à tecnologia *Microdrop*^{TM}, utilizado na produção das actuais "etiquetas" electrónicas RFID.

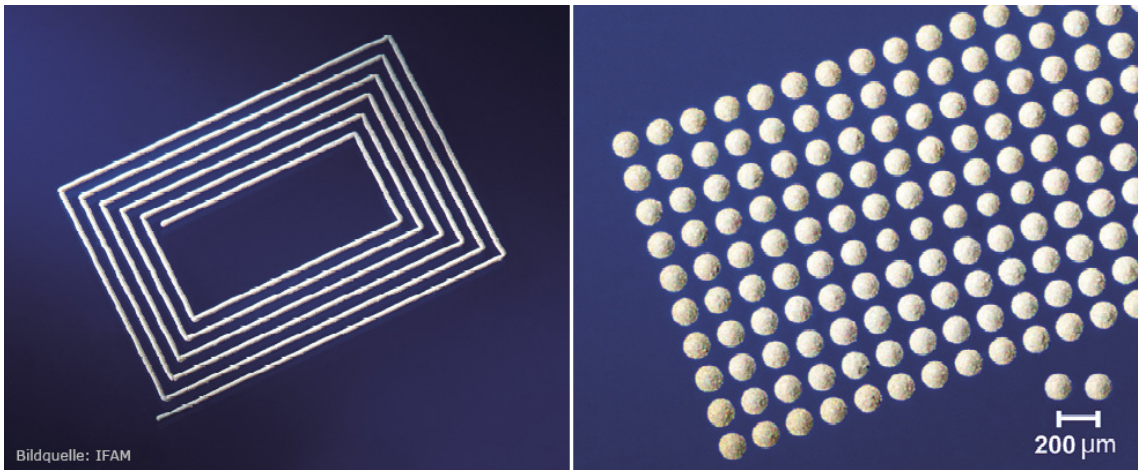


Figura 5.7 – Circuito electrónico de uma etiqueta RFID (Rádio Frequency Identification) [S18]

Uma vez encontrada a solução tecnológica adequada ao processo de deposição estão reunidos (quase) todos os ingredientes necessários à esquematização funcional de um equipamento que reproduza peças e componentes de base madeira segundo uma abordarem de construção aditiva

5.2 Equipamento de fabrico rápido

A fase inicial da caracterização de um mecanismo, independentemente da sua organização (interna) funcional, contempla a definição das variáveis de entrada, o *input*, e da(s) variável(eis) de saída, ou seja, o *output* da máquina. Esta visão macro do modo de funcionamento de equipamento pode ser esquematizada através de um simples diagrama de blocos (figura 5.8).

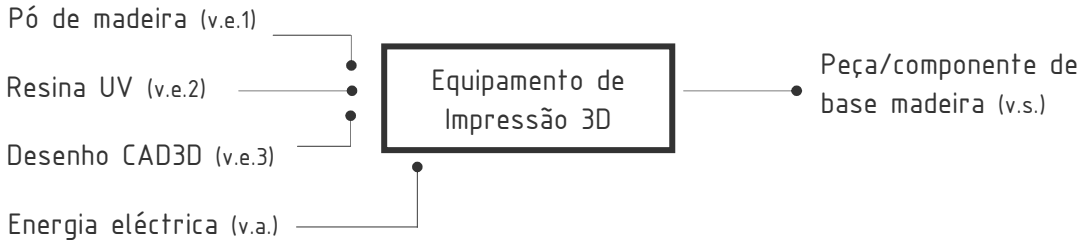


Figura 5.8 – Diagrama funcional do equipamento de impressão 3D

A caixa com a designação *Equipamento de Impressão 3D* encerra todo um mecanismo que, partindo das variáveis de entrada (v.e.), *pó de madeira,* r*esina UV e um desenho CAD3D* e da variável auxiliar (v.a.) *energia eléctrica,* reproduz *peças e componentes de base madeira* [33,42].

Uma vez definidos o objectivo a implementar e as principais variáveis de arranque do sistema resta agora dispor, esquematicamente, os vários módulos funcionais que irão permitir materializa-lo. Estes módulos perfazem sistemas que incorporam diferentes tecnologias, a saber:

– Sistema de movimentação dos eixos *xx*, *yy* e *zz* ;

i) Tecnologia semelhante à utilizada em equipamentos CNC, tipo *NUM* [S19].

– Sistema de alimentação e deposição da resina;

ii) Tecnologias disponíveis: *Microdrop*™*, Nanojet*™ *e Dropjet*™.

– Sistema de cura da resina;

iii) Tecnologia de secagem de resinas por incidência de radiação ultravioleta, tipo *OSRAM – Supratec* [S20].

– Sistema de alimentação e deposição do pó de madeira (função do tipo de sistema de deposição de resina adoptado e do tamanho das partículas do pó de madeira);

iv) Tecnologia CNC para movimentação linear de rolos cilíndricos laminadores (caso a tecnologia *Microdrop*™ tenha sido a adoptada) ou ;

iv) Tecnologia de aspiração por depressão e deposição por transporte - *Venturi* (caso a tecnologia *Nanojet*™ ou a *Dropjet*™ tenha sido a adoptada).

– *Hardware* de comando dos vários sistemas;

v) Computador do tipo industrial – PLC.

– *Hardware* de comunicação com o equipamento de impressão 3D;

vi) *C*omputador do tipo pessoal – PC.

– *Software* de gestão global.

vii) Aplicação informática numa determinada linguagem de programação.

No que concerne ao sistema de alimentação e deposição do pó de madeira, existe um tempo acrescido de operação associado ao processo convencional (movimentação linear de rolos cilíndricos) utilizado no espalhamento do pó assim como uma dificuldade de obter substratos completamente uniformes (espessura variável da camada laminada) quando o pó é constituído por grãos grosseiros. Caso seja viável obter pós de madeira com granulometrias muito finas, inferior a 200 microns, é fisicamente possível transportar estes pós quando da movimentação da resina[1], sob a forma de jacto, no interior da cabeça doseadora.

No domínio da mecânica dos fluidos existe um fenómeno físico denominado efeito de *Venturi* [39] que, pelo facto de existir um estrangulamento intermédio na conduta por onde circula um fluido, animado de uma determinada velocidade, ocorre uma diminuição da pressão estática nesse ponto. Esta *depressão* permite *aspirar* qualquer fluido ou partículas que estejam em contacto com esse ponto, através de uma outra conduta.

[1] A resina utilizada deverá ter uma viscosidade compatível com a tecnologia de deposição adoptada.

A concepção de uma cabeça de deposição (figura 5.9) que integre esta funcionalidade permitirá reduzir o tempo de construção dos modelos uma vez que o pó e a resina são depositados simultaneamente. A figura 5.9 ilustra o princípio físico descrito.

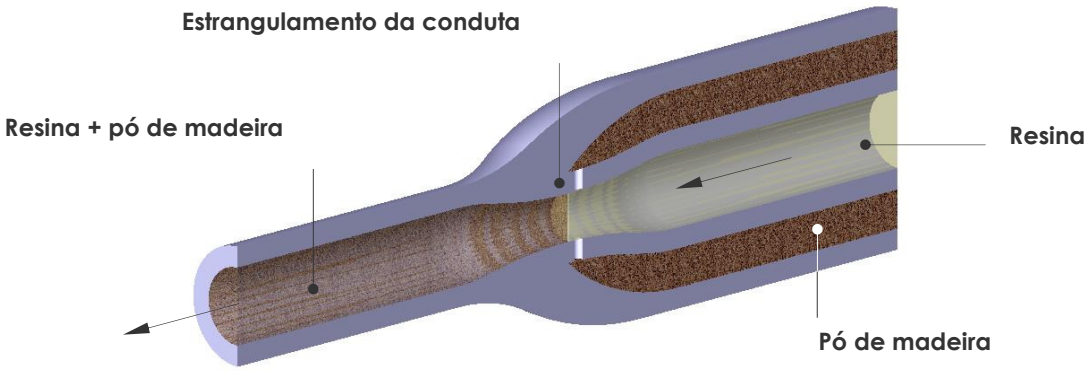


Figura 5.9 – Esquematização do efeito de *Venturi* aplicado à cabeça de deposição [39]

Embora esta solução seja fisicamente possível de implementar numa escala maior (metros), ela não foi validade para dimensões na ordem dos microns. Contudo, é uma possibilidade a ser explorada em estudos posteriores.

5.2.1 Abordagens conceptuais de funcionamento

Admitindo a viabilidade de se implementar a solução anterior, o órgão mecânico mais relevante de todo o sistema passaria a ser a cabeça de deposição que encerraria um conjunto de funcionalidades distintas, assim como uma movimentação espacial interpolada tridimensional (ao contrário do seu actual movimento bidimensional XY). A mesa de construção deixaria de ter movimento em ZZ, passando ser uma base estática, quase "sempre limpa", apenas com as zonas estratificadas relativas aos cortes locais da peça. Os rolos cilíndricos laminadores seriam então eliminados do sistema.

As funcionalidades da cabeça de (dupla) deposição seriam então as seguintes:

– Micro dosagem simultânea de resina e pó de madeira;

– Integração do sistema de secagem por radiação UV;

– Movimentação espacial interpolada 3D.

No entanto, este novo conceito traz uma desvantagem associada. O facto de não existir camadas de pó sucessivamente laminadas faz com que não exista um "berço" de apoio à construção dos modelos físicos. Isto é particularmente importante quando os componentes a produzir possuem domínios geométricos "em balanço". Nestes casos, quando não existe o tal apoio pulverulento é necessário recorrer a estruturas de suporte que devem ser depositadas quando a deposição da resina+pó. Esta realidade obriga à deposição de um outro material, para além da resina e do pó de madeira, que cumpra a função de estrutura de suporte e que, no final do processo construtivo, possa ser facilmente removido da peça ou componente obtido.

A abordagem conceptual clássica é em tudo semelhante aos actuais sistemas de impressão tridimensional, de base pó, a menos do sistema de secagem da resina. Este, como já foi referido anteriormente, baseia-se na integração, no sistema base, de uma matriz luminosa composta por lâmpadas de radiação ultravioleta, que promove a cura instantânea da resina depositada, solidarizando as partículas de pó em contacto. Para além da cabeça de deposição da resina existe também um sistema de armazenamento e espalhamento do pó de madeira. Nos equipamentos clássicos existem dois êmbolos que armazenam matéria pulverulenta, dispostos em paralelo, nos quis existem pistões que nivelam a quantidade de pó necessária ao processo de espalhamento laminar do pó pelos rolos cilíndricos.

O modo de funcionamento de um sistema assim composto comportaria as seguintes etapas:

– 1º) Espalhamento laminar do pó de madeira com recurso à movimentação linear, tipo "vai-vem", dos rolos cilíndricos, no interior de uma câmera com controlo de humidade;

– 2º) Deposição da resina sobre o pó de madeira, em limites geométricos definidores do corte local da peça, à cota respectiva;

– 3º) Incidência da luz ultravioleta na região onde ocorreu a deposição da resina, promovendo a sua cura imediata;

– 4º) Movimento descendente da mesa de construção;

– 5º) Repetição cíclica dos procedimentos anteriores, na ordem descrita, até obter por completo o modelo físico.

Conclui-se assim que estariam reunidos os *inputs* necessários à realização de um ante projecto com vista à concepção de um equipamento de impressão tridimensional, tendo por base duas abordagens conceptuais de funcionamento.

A figura 5.10 representa, esquematicamente e segundo a abordagem clássica, um processo adaptado de impressão tridimensional tendo em vista as condicionantes do material de construção que se pretende utilizar – o pó de madeira.

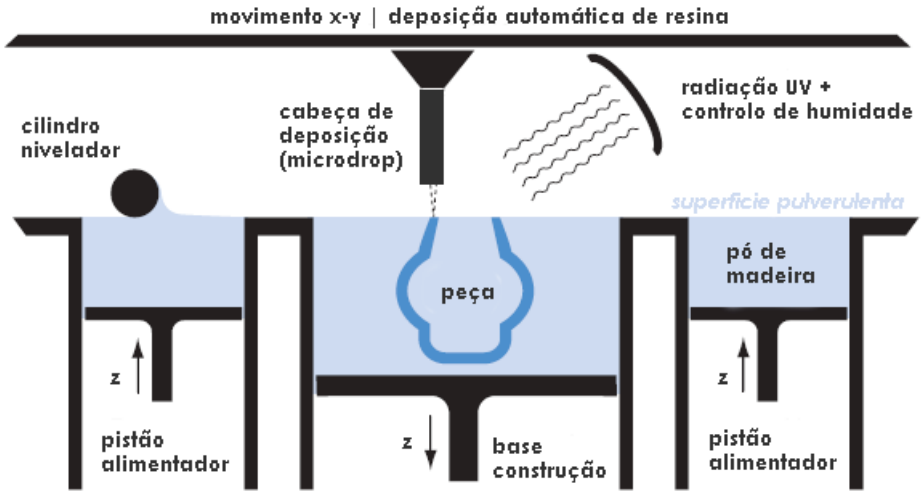


Figura 5.10 – Representação esquemática do processo de impressão 3D [adaptado de S10]

O "equipamento" ilustrado na figura 5.11 é uma representação conceptual de uma máquina de fabrico rápido, que integra o princípio de funcionamento anteriormente descrito. Com esta máquina pretende-se concretizar o sonho inicial de se produzirem peças e componentes, utilizando o pó de madeira como elemento principal de construção.

O conceito idealizado assenta numa estrutura modular, no qual se antevê uma separação física das principais tecnologias que "equipam" a máquina. O módulo superior representa a "impressora" propriamente dita, ou seja, integra a cabeça de deposição da resina fotosensível, solidária a um sistema de movimentação bidimensional (XY), controlado numericamente (CNC) assim como os sistemas de radiação UV e de controlo da humidade. Para o módulo inferior foram remetidas as bases móveis de construção e de alimentação do pó de madeira. Esta particularidade permite variar o volume de construção (variando a dimensão do módulo inferior – módulo variável) sem que para isso seja necessário alterar a configuração do módulo superior (módulo universal). Assim é possível personalizar o sistema de fabrico rápido, tendo em mente diferentes necessidades associadas a diferentes tipos de utilizador.

A figura 5.12 mostra alguns exemplos de peças, possíveis de serem construídas por aquele equipamento, estando elas associadas a diferentes tipos de actividade económica.

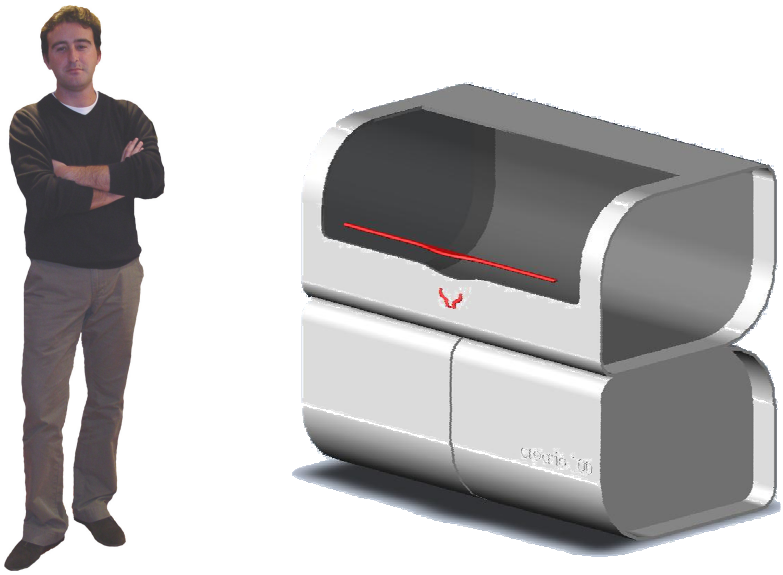


Figura 5.11 – Representação conceptual do equipamento de impressão 3D *CREATIO® 100WP*

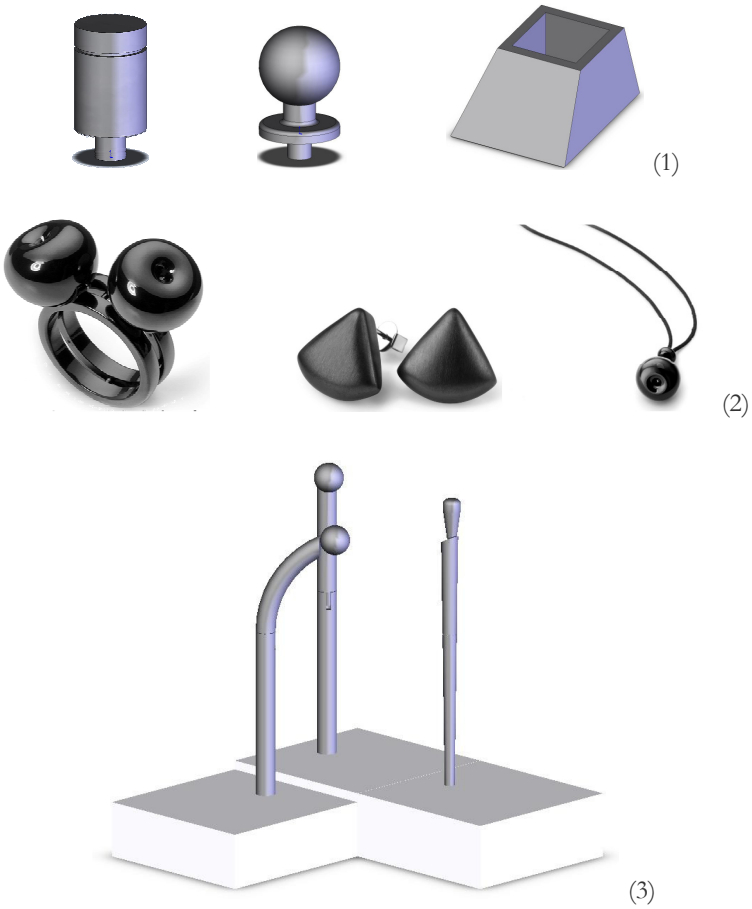


Figura 5.12 – Exemplos de peças a produzir pela *CREATIO® 100WP*: 1-Puxadores [Cortesia SPSS Lda.]; 2-Anel,brimcos e colar [S21]; 3-Escultura *Encontro I* (Álvaro Siza 1998) [36]

5.2.2 Abordagem formal do equipamento

Embora não fazendo parte dos objectivos essenciais traçados para este trabalho entendeu-se que deveria existir uma fonte de inspiração que suportasse as referências formais do hipotético equipamento de fabrico rápido que se idealiza construir.

A satisfação do autor por literatura científica, nomeadamente no campo da cosmologia, levou-o a procurar referências bibliográficas que, de alguma forma, sugerissem uma ligação com o tema em desenvolvimento. Foi assim que surgiu um livro e com ele a expressão *Creatio Ex Nihilo - Criação a Partir do Nada.*

"Na mitologia grega, o universo começou a partir de um estado de Caos. De facto, «caos» provém da palavra grega que significa «abismo». Este vazio sem traços característicos é muitas vezes descrito como um oceano, tal como acontece na mitologia babilónica e japonesas."

"Estes mitos de «creatio ex nihilo» contrastam fortemente com a cosmologia budista e com certas formas de hinduísmo. Nestas mitologias o universo é intemporal e não tem princípio nem fim. Há muitos níveis de existência, mas o mais elevado é o Nirvana, que é eterno e só pode ser atingido através da mais pura meditação."

"Estas mitologias contradizem-se uma à outra, sem que entre elas possa haver conciliação aparente. Excluem-se mutuamente. Hoje, contudo, parece estar a emergir uma conciliação a partir de uma direcção completamente nova – o mundo da ciência – em resultado de uma nova geração de equipamentos científicos poderosos que perscrutam o espaço exterior…O que está a emergir gradualmente dos dados é uma grande síntese destas duas mitologias opostas. Talvez, especulam os cientistas, a Criação ocorra repetidas vezes num oceano intemporal de Nirvana."

Estes excertos foram retirados de um livro de cosmologia intitulado *Mundos Paralelos* [56], do autor *Michio Kaku*, que aborda questões actuais relacionadas com aquele domínio científico. A sua leitura conduz a uma viagem fascinante através da *Criação*, de *Dimensões Superiores* e um breve olhar sobre eventuais futuros possíveis do *Cosmos*. A leitura atenta do capitulo da Criação motivou o autor a explorar a expressão, em latim, *Creatio Ex Nihilo - Criação a partir do nada*, associando-a à teoria dos *Mundos Paralelos*, ou seja, a teoria que prevê que uma mesma realidade possa ocorrer, ao mesmo tempo, em planos dimensionais/temporais distintos, com desfechos igualmente distintos.

Apesar da teoria cosmológica seleccionada ser demasiado abstracta para ser modelada fisicamente, foram realizados alguns ensaios, matemáticos, para tentar explicar a sua

natureza criativa. Não se pretende ser exacto na representação, apenas realçar o carácter cíclico e orgânico de *Mundos Paralelos* (figura 5.13).

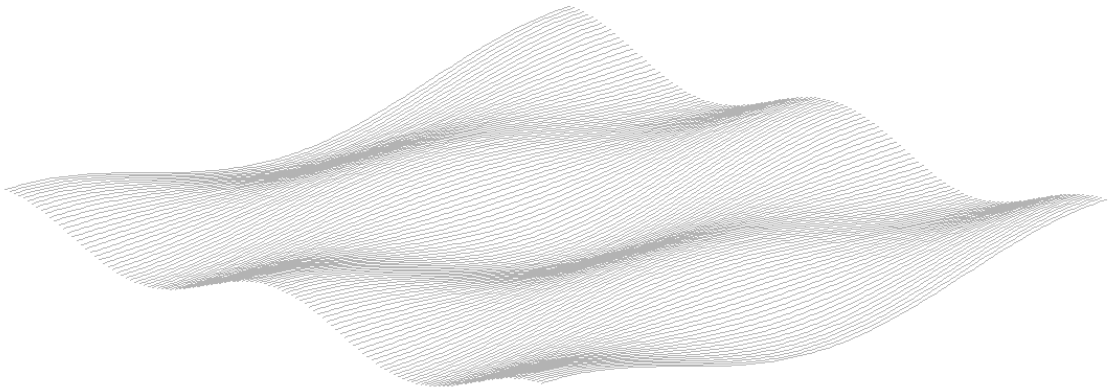


Figura 5.13 – Simulação computacional de um espaço curvo multi-dimensional

Esta composição visual representa uma interpretação pessoal da teoria abstracta de *Mundos Paralelos*, não sendo, portanto, propriedade intelectual de uma determinada obra literária.

Na realidade, a teoria estabelece uma analogia com este trabalho, atente-se à seguinte reflexão: cada camada laminada de pó, aglutinada com resina, corresponde a um de muitos *Mundos Paralelos* que, independentemente da sua dimensão, partilham de igual importância existencial. Basta uma das *Partes* falhar para que o *Todo* (a peça ou componente) não faça qualquer sentido. A ligação entre eles (neste caso, física) é igualmente importante na caracterização do *Todo*.

Partindo daquela modelação prevê-se que exista uma base geométrica passível de ser explorada, com vista à caracterização formal do equipamento. O seu *design*, propriamente dito, dada a especificidade do processo e o período temporal de desenvolvimento que comporta (função do detalhe que se pretende), é uma actividade que merece uma atenção especial e, portanto, deve ser desenvolvida numa fase posterior a este trabalho.

A enorme satisfação, adquirida ao longo da elaboração deste relatório assim como da realização do trabalho experimental levou à ponderação de trabalhos futuros, nos quais se incluem o desenvolvimento da tipologia formal do equipamento entre outros trabalhos de índole experimental, com o pretexto de culminar num único objectivo – construir um equipamento que reúna a totalidade dos requisitos tecnológicos que permitam explorar, eficientemente, a potencialidade do pó de madeira no *fabrico rápido* de peças e componentes segundo uma abordagem aditiva.

Capítulo 6

Conclusões e considerações futuras

O princípio de sustentabilidade que caracteriza esta dissertação faz dela um pequeno mas importante contributo para travar o exagerado consumo irracional dos recursos naturais, nomeadamente aquele directamente relacionado com o trabalho em questão – *a floresta*.

Com ela pretende-se abrir novos horizontes, no que concerne à utilização racional e eficiente da madeira, desde a árvore ao serrim (pó de madeira), sobretudo na geração de valor mesmo partindo dos subprodutos gerados quando da sua transformação.

A constatação diária de uma realidade menos valorizada, sensibilidade e bom senso foram talvez os *inputs* fundamentais para que uma ideia inovadora pudesse surgir e com ela um novo processo produtivo associado à produção de peças e componentes, com base em pó de madeira, segundo uma abordagem aditiva.

A originalidade da ideia, ao nível da inovação do processo, condicionou o acesso a referências bibliográficas sobre o tema, uma vez que a quantidade de informação actualmente disponível é específica ao mundo dos plásticos. Mesmo assim, a valorização de algo, que até então era considerado desperdício é, por si só, um forte argumento em defesa desta tese.

O arrojado conceito abordado nesta tese revelou-se enriquecedor, sob o ponto de vista dos conteúdos apresentados, pois permitiu reunir, simultaneamente, a relação interdisciplinar existente quando da concepção e desenvolvimento de novos produtos – *design, tecnologia e materiais*, justificando assim o seu interesse em ser explorado no âmbito de um mestrado em Design Industrial.

A realização do trabalho experimental permitiu identificar os principais problemas associados à utilização do pó de madeira como material de construção. Foi um processo puramente iterativo; o rumo das experiências seguintes dependia exclusivamente do sucesso ou insucesso das anteriores. A surpresa e o descontentamento foram factores emocionais sempre presentes. Apesar dos impasses técnicos encontrados durante o curso dos trabalhos práticos foram obtidas peças, embora por tecnologias de conversão, cuja qualidade superficial validou o propósito inicial desta tese. As dificuldades encontradas foram, na sua maioria, ultrapassadas através da pesquisa permanente de soluções tecnológicas, actualmente disponíveis. Apesar de não ter sido possível materializar manualmente, com êxito, o processo de impressão tridimensional da *Z-Corp*™, foram identificados os princípios fundamentais assim como componentes que o permitem implementar, mas num modo completamente automatizado.

As experiências realizadas demonstraram que, da associação de pó de madeira de *wengé* com resinas estruturais, resultam modelos físicos, visualmente interessantes e funcionalmente capazes. Embora outras espécies tivessem sido utilizadas, foram as madeiras de coloração escura que proporcionaram melhores resultados. Quer a resina de *poliéster* quer a resina *epoxídica* possibilitaram a obtenção de diferentes tipos de acabamento superficial, lustrosos (brilhante) e baços (mate), respectivamente. Os modelos físicos foram ainda submetidos a operações posteriores de polimento as quais permitiram optimizar a sua qualidade final. A regularidade geométrica das superfícies foi conseguida através da afinação permanente das partículas do pó de madeira. Este parâmetro revelou-se essencial na medida em que, quanto menor forem as partículas, menor a dimensão dos espaços intersticiais (entre partículas), menor o consumo de resina e, por conseguinte, maior homogeneidade e melhor acabamento superficial do modelo.

A resina fotosensível *Cyracure*™ abriu novos horizontes no que respeita à construção dos modelos físicos com base na tecnologia de impressão tridimensional. A cura localizada e instantânea de pós de madeira aglutinados com resina pode ser materializada através da incidência de luz ultravioleta. Os fotoiniciadores presentes neste tipo de resinas absorvem a luz incidente e promovem o desencadear da reacção de polimerização. Uma vez que esta classe de resinas não necessita de solventes adicionais (catalizador e endurecedor), o seu emprego é uma mais valia pois permite optimizar o processo de impressão tridimensional que se ambiciona implementar.

Uma vez legitimada a viabilidade de se utilizar o pó de madeira como material de construção de novas peças procurou-se identificar qual o processo aditivo que melhor se aplicaria ao fim em vista, a par das necessárias adaptações. De salientar é o facto dos materiais de construção utilizados nos sistemas actuais de *prototipagem rápida* e *fabrico rápido*

serem especialmente desenvolvidos para equipamentos específicos. No caso presente, o material – *o pó de madeira* – existe, a máquina não!

A consciencialização sobre o estado actual das tecnologia de suporte às industrias da *prototipagem rápida* e do *fabrico rápido* conduziu a diferentes abordagens conceptuais de funcionamento passíveis de ser aplicadas a um equipamento dedicado à produção de peças e componentes de base pó de madeira segundo um processo aditivo.

Os promissores resultados obtidos no âmbito do trabalho experimental deram origem a um artigo que será publicado e apresentado na conferência Matérias 2007, sobre materiais e processos tecnológicos a realizar, em Abril de 2007, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O mesmo motivo constituiu também um forte argumento para que, este estudo, fosse submetido a uma apreciação, por um comité científico internacional, através da Fundação de Ciência e Tecnologia, no sentido de obter um financiamento para um projecto de investigação com vista à criação de um protótipo de um equipamento de fabrico rápido.

Em consequência do parecer científico do júri e da existência ou não de financiamento, as perspectivas de trabalho futuro centram-se no estudo mais detalhado dos parâmetros reputados essenciais ao desenvolvimento de um equipamento de fabrico rápido que permita *imprimi*r peças e/ou componentes, utilizando como material de construção *pó de madeira*.

Comunicações científicas referentes ao trabalho de investigação contido nesta dissertação

Conferências

No âmbito da conferência Materiais 2007, a realizar em Abril de 2007 na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, foi submetido um *abstract* de um artigo cientifico sobre o trabalho desenvolvido, intitulado "*Application of Wood Powder to Produce Prototypes using the Principles of Addictive Manufacturing*".

Revistas científicas

Um outro artigo será ainda proposto a uma revista científica da especialidade (a definir posteriormente) para fomentar a divulgação do tema abordado nesta dissertação.

Bibliografia

[1] WBCSD, 2002. "*Innovation, Technology, Sustainability, and Society*", Publicação World Business Council for Sustainable Development.
www.wbcsd.ch/includes/getTarget.asp?type=d&id=Nzg0NA

[2] WBCSD, 2003. "*Cross-Cutting Themes*", Publicação World Business Council for Sustainable Development.
www.wbcsd.org/includes/getTarget.asp?type=d&id=ODc2NA

[3] Holliday Jr., Charles O.; Schmidheiny, Stephan; Watts, Sir Philip, 2002. "*Walking the Talk: The Business Case for Sustainable Development*", Editora KCMG.

[4] WBCSD, 2001. "*The Business Case for Sustainable Development*", Publicação World Business Council for Sustainable Development.
www.wbcsd.org/includes/getTarget.asp?type=d&id=ODYyMQ

[5] WBCSD, 2001. "*Eco-efficiency: Creating more value with less impact*", Publicação World Business Council for Sustainable Development.
www.wbcsd.ch/includes/getTarget.asp?type=d&id=ODkwMQ

[6] WBCSD, 2003. "*Intellectual Property Rights*", Publicação World Business Council for Sustainable Development.
www.wbcsd.ch/includes/getTarget.asp?type=d&id=OTIwMA

[7] Willums, Jan-Olaf. 2003. *"O Desafio da Empresa Sustentável"*, Editora First Media.

[8] WBCSD, 2000. "*Measuring Eco-Efficiency: A Guide to Reporting Company Performance*", Publicação World Business Council for Sustainable Development.
www.wbcsd.ch/includes/getTarget.asp?type=d&id=OTQyNA

[9] Gershenfeld, Neil, 2000. "*When Things Start to Think*", Editora Owl Books.

[10] Gershenfeld, Neil, 2005. "*FAB: The Coming Revolution on Your Desktop--From Personal Computers to Personal Fabrication*", Editora Basic Books.

[11] Hopkinson, N.; Hague, R.J.M.; Dickens, P.M., 2006. "*Rapid Manufacturing – An Industrial Revolution for the Digital Age*", Editora John Wiley & Sons, Ltd.

[12] Tectonica, 2003. "*Monografias de Arquitectura, Tecnologia y Construcción – La madera*", Informação técnica, Revista Tectonica, pp 14-29.

[13] Hauffe, Thomas, 1988. "*Design, A Concise History*", Editora Laurence King.

[14] Montenegro, Riccardo, 1995. "*Guia de História do Mobiliário – Os Estilos de Mobiliário do Renascimento aos Anos Cinquenta*", Editorial Presença.

[15] ICEP, 1997. "*Álvaro Siza – Móveis e Objectos*", Publicação ICEP.

[16] Revista CAD Project, 2005. "*Prototipagem Rápida*", pp 36-38, Novembro/Dezembro. www.cadproject.com

[17] Wohlers, Terry, 1999. "*Rapid Prototyping & Tooling – State of the Industry. Worldwide Progress Report*", Publicação Wohlers Associates, Inc.

[18] Wohlers, Terry, 2006. "*Rapid Prototyping and Manufacturing – State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report*", Editado por Wohlers Associates, Inc.

[19] Lino, F. Jorge; Neto, Rui J. L.; Vasconcelos, M. Teresa; Vasconcelos, Pedro V.; Azevedo,M. J.; Pereira, Acácio V., Silva Elizabeth C., 2005. "*Design Interaction with Industry through Rapid Prototyping*", pp 2-6.
paginas.fe.up.pt/~falves/artigodesign.pdf

[20] Lino, F. Jorge, Braga, F. Jorge, Simão, M. São, Neto, Rui J.; Duarte, Teresa, 2001. "*Protoclick – Prototipagem Rápida*", Editora Protoclick.

[21] Sardinha, Augusto Manuel, 1988. "*Ciência e Tecnologia dos Materiais*", Editora Intelecto, Capítulo III – A Madeira, pp 147-239.

[22] Hoadley, R. Bruce, 2000. "*Understanding Wood – A Craftsman's Guide to Wood Technology*". Editora Taunton Press, Inc.

[23] Jackson, Albert; Day, David; Jennings, Simon, 2004. "*The Complete Manual of Wood working*", Editora Alfred A. Knopf, Inc.

[24] Forest Products Laboratory, 1999. "*Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*", Publicação United States Department of Agriculture Chap.2 pp 1-4; Chap.3 pp1-15; Chap.4 pp 1-4; Chap.10 pp 13-24.

[25] AIMMP, 2006. "*Madeira, Natural Como Tu!*", Publicação Associação das Industrias de Madeira e Mobiliário em Portugal.

[26] Tangram Technology, 2002. "*Wood-Plastic Composites – A Technical Review of Materials, Processes and Applications*", Publicação Tangram Technology Ltd. www.tangram.co.uk/TI-Wood_Plastic_Composites_Review.pdf

[27] Duits, Thimo Te, 2003. "*The Origins of Things: Sketches, Models, Prototypes*", Editora NAI Publishers.

[28] Hilton, Peter D.; Jacobs, Paul F., 2000. "*Rapid Tooling Technologies and Applications*", Editora Marcel Dekker, Inc.

[29] Pham, D. T.; Dimov, S. S., 2000. "*Rapid Manufacturing – The Technologies & Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling*", Editora Springer.

[30] Chua, C. K.; Leong, K. F.; Lim, C. S., 2003. "*Rapid Prototyping, Principles and Applications*", 2ª Edição, Editora World Scientific.

[31] Pedro, Aparecido H.; Katori, Rosa, 2003. "*Rhinoceros3.0 – Modele suas ideias em 3D*", Editora Érica.

[32] Araújo, Mário de, 1995. "*Engenharia e Design de Produto*", Editora Universidade Aberta.

[33] Ulrich, Karl T.; Eppinger, Steven D., 2003. "*Product Design and Development*", 3ª Edição, Editora McGraw-Hill.

[34] Byars, Mel, 2006. "*New Chairs – Design, Technology, and Materials*", Editora Laurence King Publishing.

[35] Ehrenstein, Gottfried W., 2000. "*Polymeric Materials – Structure, Properties and Applications*", Editora Hanser Gardner Publications.

[36] ICO, 1998. "*Álvaro Siza – Escultura, El Placer de Trabajar*", Publicação Museo Colecciones ICO.

[37] ISO, 1999. "*International Standard ISO 14125 – Fiber-reinforced plastic composites – determination of flexural properties*", Publicação International Standards Organization.

[38] Dow, 2001. "*CYRACURE™ Cycloaliphatic Epoxides Resins – Cationic UV Cure*", Publicação Dow Chemicals.
www.dow.com/cyracure/product/rapid.htm

[39] White, Frank M., 1999. "*Fluid Mechanics*", Editora McGraw-Hill.

[40] Ijfisnar, "*Principles of Dispensing*", Technological issue, Website I&J Fisnar Inc.
www.ijfisnar.com/usa/principals.htm

[41] Silva, Dias da, 1995. "*Mecânica e Resistência dos Materiais*", Editora Ediliber.

[42] Dieter, George, 1999. "*Engineering Design: A Materials and Processing Approach*", Editora McGraw-Hill.

[43] Lefteri, Chris, 2005. "*Wood: Materials for Inspirational Design*", Editora Rotovision

[44] Wohlers, Terry, 2005. "*Factors to Consider When Choosing a 3D Printer*", Technological issue, Time-Compression Technologies Magazine, November/December.

[45] Wohlers, Terry, 2006. "*Additive Fabrication Technology*", Technological issue, MoldMaking Technology Online Magazine, January.
www.moldmakingtechnology.com/articles/0106additive.html

[46] Clemons, Craig M.; Caufield, Daniel F., 2005. "*Functional Fillers for Plastics – Wood Four*", Editora Wiley-Vch Verlag GmbH & Co KGaA.
www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2005/fpl_2005_clemons001.pdf

[47] Prescott, Brian; Karlinsky, Thomas; Yingfei, Ke; Battaglia, Joseph, 2003. "*Microdot Dispensing – Equipment and Process Create a Solution*", Artigo científico, Advanced Packaging Magazine, pp 1-4, Fevereiro.
www.speedlinetech.com/docs/MicroDotDispensingArticle.pdf

[48] Winandy, J. E.; Stark, N. M.; Clemons, C. M., 2004. "*Considerations in Recycling of Wood Plastic Composites*", Artigo científico, 5th Global Wood and Natural Fibre Composites Symposium, pp 3-6, Kassel, Germany.

[49] Klocke, Volker; Gesang, T., 2002. "*Nanorobotics for Micro Production Technology*", Artigo científico, Conference on Photonics Fabrication Europe, pp 2-10, Brugge, Belgium.
www.nanomotor.de/pdf/micro_prod_system_e_lo.pdf

[50] Fonte, Manuel da, 2006. "*Mechanical Properties of Coating Particleboards Obtained by Continuous Stiffness Measurement Indentation Technique*", Artigo científico, 5th International Conference of Mechanics and Materials in Design, pp 1-11, Porto, Portugal.

[51] Laufenberg, Theodore L, 2004. "*Phosphate-Bonded Ceramic-Wodd Composits*", Artigo científico, Ninth International Conference on Inorganic Bonded Composite Materials, pp 3-10, Outubro.
www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2004/fpl_2004_laufenberg001.pdf

[52] Wang, Weihong, Morrell J. J.; 2004. "*Water Sorption Characteristics of Two Wood-Plastic Composites*", Artigo científico, Forest Products Journal, pp 1-4, Oregon, USA.
fcg.cof.orst.edu/structur/9736-209-212.pdf

[53] Hancic, Ales; Glojec, Andrej, 2006. "*Injection Moulding of Wood-Plastic Composits*", Conference on Rapid Product Development, Marinha Grande, Portugal.

[54] Wohlers, Terry, 2006. "*Where Additive Processes Fit in the Mass Customization Movement*", Technological issue, Time-Compression Technologies Magazine, May/June.

[55] Abbott, Edwin A., 2006. "*Flatland – Uma aventura em Muitas Dimensões*", Editora Assírio & Alvim.

[56] Kaku, Michio, 2006. "*Mundos Paralelos – Uma Viagem através da Criação, Dimensões Superiores e o Futuro do Cosmos*", Editora Bizâncio.

Websites consultados:

[S1] www.wbcsd.org

[S2] pt.wikipedia.org/wiki/Ribosomo

[S3] www.zcorp.com/products/printersdetail.asp?ID=2

[S4] membres.lycos.fr/floreportages/corbu/Corbu.html

[S5] www.serpentinegallery.org

[S6] www.artek.fi

[S7] www.twentytwentyone.com

[S8] www.mit.edu/~tdp/

[S9] www.2objet.com

[S10] www.materialise.com

[S11] www.freedomofcreation.com

[S12] www.loctite.com

[S13] www.proquiplas.pa-net.pt/

[S14] www.pjmurphy.net/wood-flour-faq.html

[S15] www.mcp-group.com/

[S16] www.dow.com/cyracure/product/rapid.htm

[S17] www.axelplast.com

[S18] www.microdrop.de

[S19] www.num.com

[S20] www.radium.de

[S21] www.swatch.com

[S22] www.solid-scape.com

[S23] www.geplastics.com

[S24] www.scottbader.com

[S25] www.efd.com

[S26] www.ijfisnar.com

[S27] www.3dsystems.com

[S28] www.stratasys.com

[S29] www.soligen.com

[S30] www.wohlersassociates.com