



João Manuel Vicente Fradinho

Mestre em Engenharia Mecânica

Contributo metodológico para a tomada de decisão em projecto sustentável – uma abordagem axiomática

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutor António Mourão, Professor Associado, Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Manuel Flores Romão de Azevedo
Gonçalves Coelho

Arguentes: Prof. Doutor Fernando Manuel Bigares Charrua Santos
Prof. Doutor António Gabriel Marques Duarte dos
Santos

Vogais: Prof. Doutor António Manuel Ramos Pires
Prof. Doutor António José Freire Mourão
Prof. Doutor Arlindo José de Pinho Figueiredo e Silva
Prof. Doutor Nuno Miguel Ribeiro Videira Costa

Contributo metodológico para a tomada de decisão em projecto sustentável – uma abordagem axiomática

Copyright © João Manuel Vicente Fradinho, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedicatórias

À minha esposa Natália,
às minhas filhas Ana Carolina e
Joana
e aos meus pais João e Hortense.

Agradecimentos

Quero expressar o meu agradecimento ao meu orientador científico, Prof. Doutor António Mourão, que me guiou e ajudou de uma forma inexcedível ao longo deste trabalho. As suas qualidades de perseverança, determinação, sabedoria e constante disponibilidade, além da amizade pessoal, constituíram-se como estímulos sempre presentes na realização desta dissertação.

Agradeço ao Prof. Doutor Gonçalves-Coelho com quem fui regularmente comentando este trabalho e cujo brilhantismo próprio contribuiu para o enriquecimento da presente dissertação. Os meus agradecimentos são também extensíveis ao Prof. Doutor Alberto Martinho e ao Prof. Doutor António Gabriel Santos pelo seu constante incentivo e colaboração. Expresso também o meu agradecimento ao Eng. Vasco Sobral pela colaboração prestada.

O tempo não vivido junto dos meus familiares mais próximos (esposa, filhas e pais), foi compensado pela sua compreensão e palavras de estímulo, libertando-me para a concentração nesta tarefa. Estou-lhes vivamente reconhecido.

Finalmente, quero também apresentar o meu agradecimento à Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL, através da pessoa do seu Director, Prof. Doutor Fernando Santana, pela facilitação concedida nas condições para a realização deste trabalho.

RESUMO

Tradicionalmente, a tomada de decisão em projecto de engenharia assenta sobre os aspectos da funcionalidade, no sentido de dar resposta às necessidades da sociedade. Como em engenharia não há respostas únicas, a selecção das propostas de solução é usualmente condicionada pelos aspectos económicos, os quais são normalmente tomados como restrição na tomada de decisão técnica.

Na fase final do século XX, a comunidade internacional começou a tomar consciência da necessidade de actuar sobre a constante agressão às condições naturais do planeta. Neste contexto, começaram a ser consideradas preocupações de ordem ambiental e, conseqüentemente, a ser incluídas no projecto, todavia, também, como restrições. Assim, surgiu um conceito de projecto mais alargado – o projecto sustentável –, assente em três vertentes: sociedade, economia e ambiente.

Na acepção da Teoria Axiomática de Projecto, é fácil de admitir que os projectos sustentáveis sejam acoplados, o que pressupõe a optimização das soluções.

A tese desenvolvida assenta nos pressupostos: os aspectos económicos e ambientais devem ser lidados como requisitos e não como restrições, particularmente, nas tomadas de decisão da fase conceptual do projecto de propostas de solução; os valores dos parâmetros de projecto utilizados para a definição da solução conceptual devem obedecer inicialmente à funcionalidade e adequarem-se simultaneamente aos requisitos económicos e ambientais. Assim, a metodologia proposta nesta dissertação conduz ao encontro de “zonas” flexíveis de compatibilidade de requisitos de natureza diferente, com vista a disponibilizar informação para a tomada de decisão na fase conceptual.

Foram trabalhados três casos exemplificativos simples, de desenvolvimento de produto com vista à definição das características dos mesmos, nomeadamente, produto de cortiça com borracha, reservatórios pressurizados e estrutura tubular do tipo galeria. Os resultados mostram que a metodologia proposta se mostra adequada, porém muito dependente da existência e da fiabilidade dos dados.

Palavras-chave: Desenvolvimento do produto, tomada de decisão, projecto sustentável, projecto axiomático.

ABSTRACT

Usually, decision-making in engineering design is based on functional aspects and aims at responding to societal needs. As far as to engineering design concerns, there are not unique answers and the selection of the available solution proposals is typically conditioned by economic aspects, which are routinely taken as restrictions in the decision-making process.

In the end of 20th century, the international community became aware of the need to act over unceasing aggressions to the natural conditions of our planet. In this context, the environmental concerns start to be considered, and therefore included, in the design process, mostly in the form of restrictions. As a result, it emerged a new and wide design concept – the sustainable design – that is based on three main concerns: society, economy and environment.

In the sense of Axiomatic Design, it is easy to accept that sustainable design is coupled, which presuppose the optimization of the selected solutions.

This thesis is based on the following assumptions: the economic and environmental aspects must be dealt as requirements, and not as restrictions, particularly in decision-making process that characterises the conceptual design phase of the solution proposals; the values of the design parameters used to define the conceptual solutions must initially conform to functionality and, simultaneously, those solutions should satisfy the economic and environmental requirements.

Thus, the methodology that is proposed in this thesis leads to compatible flexible “zones” of requirements of different natures, in order to provide the information that is needed for the decision-making of the conceptual phase.

Three exemplifying and simple cases of product development were worked out in order to define their characteristics, namely, rubber cork products, pressurized tanks and tubular type galleries. The results show that the proposed methodology seems appropriate. However, its appropriateness is highly dependent on the existence and the reliability of data.

Key-words: Product development, decision-making, sustainable design, axiomatic design.

Índice de matérias

1	Introdução	- 1 -
1.1.	Motivação	- 1 -
1.2.	Apresentação da dissertação	- 1 -
1.3.	Organização da dissertação.....	- 6 -
2	Síntese do conhecimento	- 9 -
2.1	Introdução	- 9 -
2.2	Projecto	- 9 -
2.3	Estimativas de custos	- 19 -
2.4	Sustentabilidade	- 37 -
2.5	Tomada de decisões	- 54 -
3	Metodologia proposta	- 59 -
3.1	Introdução	- 59 -
3.2	Teoria Axiomática do Projecto e sustentabilidade.....	- 60 -
3.3	Metodologia proposta	- 63 -
4	Estudo de casos	- 69 -
4.1	Introdução	- 69 -
4.2	Definição de parâmetros de projecto num produto de cortiça com borracha	- 70 -
4.3	Projecto conceptual de reservatórios pressurizados.....	- 84 -
4.4	Projecto conceptual de uma estrutura tubular	- 95 -
5	Conclusões e desenvolvimentos futuros	- 105 -
5.1	Conclusões	- 105 -
5.2	Desenvolvimentos futuros	- 106 -
	Referências bibliográficas	- 107 -
	ANEXOS	- 117 -

Índice de figuras

Fig. 1.1 - Conhecimento e liberdade de tomadas de decisão ao longo da actividade de projecto (adaptado de Villiers, 1987).....	- 2 -
Fig. 1.2 - Custos efectivos e custos comprometidos ao longo da actividade de projecto (adaptado de Barton <i>et al.</i> , 2001).....	- 3 -
Fig. 1.3 - Triplo conceito de sustentabilidade (adaptado de Chiu & Chu, 2012).....	- 4 -
Fig. 1.4 - Propósito da tese: deslocamentos das curvas relativas ao conhecimento e à liberdade para tomadas de decisão ao longo da actividade de projecto.	- 5 -
Fig. 2.1 - Caracterização espacial da tomada de decisão (adaptado de Eagan <i>et al.</i> , 2002).....	- 11 -
Fig. 2.2 - Projecto como um processo iterativo (adaptado de Chen, 2003).	- 12 -
Fig. 2.3 - Domínios do projecto segundo a Teoria Axiomática de Projecto (adaptado de Gonçalves-Coelho <i>et al.</i> , 2012).....	- 16 -
Fig. 2.4 - Decomposição hierárquica em zigue-zague entre os domínios funcional e físico (adaptado de (Gonçalves-Coelho <i>et al.</i> , 2003).....	- 16 -
Fig. 2.5 - Competências e conhecimento na estimativa de custos (adaptado de Rush e Roy, 2001).	- 19 -
Fig. 2.6 - Dilema na estimativa de custos (adaptado de Bode, 2000).	- 21 -
Fig. 2.7 - Custos de um produto, efectivos e comprometidos, em diferentes fases (Shehab e Abdalla, 2001).....	- 21 -
Fig. 2.8 - Exemplo de equação paramétrica (adaptado de Roy, 2003).....	- 22 -
Fig. 2.9 - Classificação dos métodos de estimativas de custos (adaptado de Caputo e Pelagagge, 2008).	- 24 -
Fig. 2.10 - Processo genérico de desenvolvimento de relações de custo (adaptado de Hicks <i>et</i> <i>al.</i> , 2002).	- 26 -
Fig. 2.11 - Estrutura de inferência em estimação de custos baseada em analogia (adaptado de Roy e Rush, 2001).....	- 28 -
Fig. 2.12 - Exemplos dos conceitos relativos à modelação do produto e do processo (adaptado de Mauchant <i>et al.</i> , 2008).....	- 29 -
Fig. 2.13 - Integração através da comunicação entre projecto e planeamento do processo (adaptado de Feng & Zang, 1999).....	- 30 -
Fig. 2.14 - Representação esquemática da metodologia apresentada em Roy <i>et al.</i> , 2001 (adaptado).....	- 32 -
Fig. 2.15 - Combinação de relações (adaptado de Roy <i>et al.</i> , 2001).....	- 32 -
Fig. 2.16 - Processo de análise de custo (adaptado de Shehab e Abdalla, 2001).	- 33 -
Fig. 2.17 - Sistema de controlo da metodologia proposta por Eversheim <i>et al.</i> , 1998 (adaptado). -	- 34 -

Fig. 2.18 - Estrutura de projecto baseado em casos anteriores (adaptado de Rehman e Guenov, 1998).	- 34 -
Fig. 2.19 - Abordagens de sustentabilidade ambiental (adaptado de Puyou, 1999).....	- 42 -
Fig. 2.20 - Cartografia de diversos tipos de aproximação à obtenção de informação por parte da equipa de projecto (adaptado de Ventère, 2012).....	- 46 -
Fig. 2.21 - Principais fases de projecto tendo em conta requisitos ambientais	- 48 -
Fig. 2.22 - Estrutura aumentada da matriz de projecto (adaptada de Shin <i>et al.</i> , 2011).....	- 49 -
Fig. 2.23 - Ferramentas para integração de requisitos ambientais no processo de projectar.....	- 50 -
Fig. 2.24 - Classificação dos métodos para avaliação dos requisitos ambientais de um produto ..	- 51 -
Fig. 2.25 - Classificação das ferramentas para integração dos aspectos ambientais no processo de projecto (adaptado de Bovea & Pérez-Belis, 2012).	- 51 -
Fig. 2.26 - Triplo conceito de sustentabilidade (adaptado de Chiu & Chu, 2012).	- 53 -
Fig. 2.27 - A importância da disponibilização de informação na fase inicial de projecto	- 55 -
Fig. 2.28 - Matriz de projecto da IDM indicando fases e níveis de abstracção.....	- 56 -
Fig. 3.1 - Representação esquemática da metodologia proposta.....	- 66 -
Fig. 4.1 - Folha de cortiça com borracha.....	- 72 -
Fig. 4.2 - Processo industrial de produção de cortiça com borracha.	- 72 -
Fig. 4.3 - Superfície de resposta da tensão de ruptura em função do peso específico e da quantidade de granulado, com granulado 1-2 mm.	- 76 -
Fig. 4.4 - Superfície de resposta da compressibilidade em função do peso específico e da quantidade de granulado, com granulado 1-2 mm.	- 76 -
Fig. 4.5 - Projecção da superfície de resposta da Tensão de Ruptura (MPa) sobre o plano x_1Ox_2 . ..	- 77 -
Fig. 4.6 - Projecção da superfície de resposta da Compressibilidade (%) sobre o plano x_1Ox_2	- 77 -
Fig. 4.7 - Projecção da superfície de custos (€/m^3) sobre o plano x_1Ox_2	- 78 -
Fig. 4.8 - Projecções sobrepostas das superfícies da Tensão de Ruptura, da Compressibilidade e do Custo, sobre o plano x_1Ox_2	- 79 -
Fig. 4.9 - Gamas da Tensão de Ruptura, Compressibilidade e Custo para o Produto 1.....	- 80 -
Fig. 4.10 - Gamas da Tensão de Ruptura, Compressibilidade e Custo para o Produto 2.....	- 80 -
Fig. 4.11 - Localização de regiões ambientalmente preferíveis.	- 84 -
Fig. 4.12 - Dimensões funcionais do reservatório.....	- 85 -
Fig. 4.13 - Fundo copado torisférico do tipo Korbogen DIN-28013 – geometria.....	- 85 -
Fig. 4.14 - Custo específico em função de L/Da e do volume, para o aço S235JR.....	- 90 -
Fig. 4.15 - Custo específico em função de L/Da e do volume, para o aço S275JR.....	- 91 -
Fig. 4.16 - Custo específico em função de L/Da e do volume, para o aço S355JR.....	- 91 -
Fig. 4.17 - Custo específico em função do L/Da e do aço, para os volumes de 16 m^3 e de 20 m^3 . ..	- 92 -
Fig. 4.18 - Volume de aço para um reservatório de 20 m^3 em aço S355JR.	- 94 -
Fig. 4.19 - Secção de estrutura tubular com acesso humano.....	- 95 -

Fig. 4.20 - Comprimento dos vãos (m) em função da espessura e do diâmetro, para cada tipo de aço.- 100 -

Fig. 4.21 - Custo por metro (€/m) em função da espessura e do diâmetro, para cada tipo de aço.- 100 -

Fig. 4.22 - Energia consumida (GJ/m) em função da espessura e do diâmetro, para cada tipo de aço.- 100 -

Fig. 4.23 - CO₂ libertado (toneladas/m) em função da espessura e do diâmetro, para cada tipo de aço.- 101 -

Fig. 4.24 - Consumo de tinta (litros/m) em função da espessura e do diâmetro, para cada tipo de aço.- 101 -

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Modelos de projecto prescritivos e descritivos (adaptado de Evbuomwan, 1996 e Tate, 1999).....	14 -
Tabela 2.2 - Comparação de métodos e ferramentas de projecto (adaptado de Eagan, 2002).	15 -
Tabela 2.3 - Exemplos de características de produtos (adaptado de Roy, 2003).	23 -
Tabela 2.4 - Métodos de estimativa de custos e ciclo de vida de um produto	24 -
Tabela 2.5 - Caracterização dos métodos de estimativas de custos (baseado em Caputo e Pelagagge, 2008).....	25 -
Tabela 2.6 - Aplicabilidade de metodologias de estimativa de custos por fase (adaptado de Long, 2000).	26 -
Tabela 2.7 - Classes de componentes e técnicas de modelação de custos (adaptado de Hicks <i>et al.</i> , 2002).....	26 -
Tabela 2.8 - Critérios para selecção de métodos de estimativas de custos (adaptado de Bode, 2000).....	35 -
Tabela 2.9 - Trabalhos publicados sobre estimativas de custos durante a fase de projecto	36 -
Tabela 2.10 - Principais fontes de energia (adaptado de Esnault, 2009).....	39 -
Tabela 2.11 - Principais fontes de poluição e suas consequências (adaptado de Esnault, 2009). -	40 -
Tabela 2.12 - Eco-projecto ao longo do ciclo de vida de um produto.....	41 -
Tabela 2.13 - Meios de avaliação do impacto ambiental de um produto (adaptada de Butel-Bellini e Janin, 2011).....	43 -
Tabela 2.14 - Meios de melhoria da concepção ambiental de um produto (adaptada de Butel-Bellini e Janin, 2011).....	44 -
Tabela 2.15 - Eco-requisitos (adaptado de Masui <i>et al.</i> , 2003).....	49 -
Tabela 3.1 - Exemplos de parâmetro económicos e ambientais.....	63 -
Tabela 3.2 - Percursos possíveis da metodologia apresentada.	67 -
Tabela 4.1 - Valores médios das características da cortiça (Gil, 1998).	71 -
Tabela 4.2 - Composição da mistura-base.....	73 -
Tabela 4.3 - Especificações de hipotéticos produtos de cortiça com borracha.	79 -
Tabela 4.4 - Valores calculados de D_a , L , C_{total} , L/D_a e custo específico para o aço S235JR.	89 -
Tabela 4.5 - Valores calculados de D_a , L , C_{total} , L/D_a e custo específico para o aço S275JR.	89 -
Tabela 4.6 - Valores calculados de D_a , L , C_{total} , L/D_a e custo específico para o aço S355JR.	90 -
Tabela 4.7 - Conjunto de soluções construtivas estudadas.....	99 -

1 INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

São vários os motivos que impeliram o autor para a realização desta dissertação de doutoramento. O primeiro é indiscutivelmente por prazer. Desde muito jovem, as ciências de engenharia e a matemática revelaram-se como áreas de interesse pessoal. A possibilidade e a necessidade de aprofundar o seu conhecimento (ainda que apenas numa pequena parte) constituíram-se como impulsos sempre presentes ao longo deste trabalho.

A determinação em alcançar um objectivo (neste caso, a obtenção de um novo grau académico) demorado no tempo, de relativa transversalidade e requerente de empenho, foi outro factor motivador.

A consequente valorização profissional, nas suas vertentes académica e industrial, revelou-se também, factor de dinamização pessoal.

O tema escolhido para a tese reflecte também uma dupla intenção; se por um lado incorpora várias áreas das ciências de engenharia, por outro lado, é convicção do autor que apresenta uma metodologia útil e de aplicação prática.

1.2. Apresentação da dissertação

Projectar consiste em conceber e materializar qualquer produto, processo ou sistema como consequência de necessidades sentidas pela sociedade. Nesta acepção, projectar, é pois, tão antigo quanto a natureza humana. Ao longo dos séculos, o Homem foi construindo aquilo que necessitava balizado pelo conhecimento tecnológico que detinha no momento. Os grandes progressos científicos e tecnológicos ocorridos a partir do século XIX alargaram exponencialmente a capacidade de projectar produtos, processos e sistemas, cada vez mais específicos. A partir dos anos 50 e 60 do século passado, a comunidade académica iniciou tentativas de formalização da actividade de projecto tendo surgido, a partir de então, um vasto conjunto de teorias, metodologias e ferramentas, tendo como objectivo a sistematização e facilitação da actividade e do ensino de projecto.

Vivemos, presentemente, segundo um modelo económico que tende para a globalização, isto é, o local de produção de um produto e o seu local de consumo ou utilização, tendem a ser independentes. Como consequência, a qualidade de um projecto não reside apenas

na sua capacidade em satisfazer todos os requisitos funcionais que lhe são inerentes (desempenho), mas também no seu preço de comercialização. Assim, o custo passou a ser considerado um requisito, tal como todos os restantes requisitos funcionais que o produto, processo ou sistema, deve satisfazer. Durante o desenvolvimento de um projecto, os projectistas devem tomar todas as decisões tendo também em consideração a sua implicação no custo final.

No desenvolvimento de um projecto ao longo do tempo, podem-se considerar várias fases, nomeadamente, conceito, princípios, detalhes, testes e planeamento do processo. Ao longo destas fases, o projecto vai ficando cada vez mais definido, diminuindo a liberdade das opções a tomar. É na fase conceptual que existe maior liberdade de opções mas é também aí que ainda existe menor definição do projecto. A Fig. 1.1 ilustra a evolução do conhecimento e da liberdade de decisões ao longo da actividade de projecto.

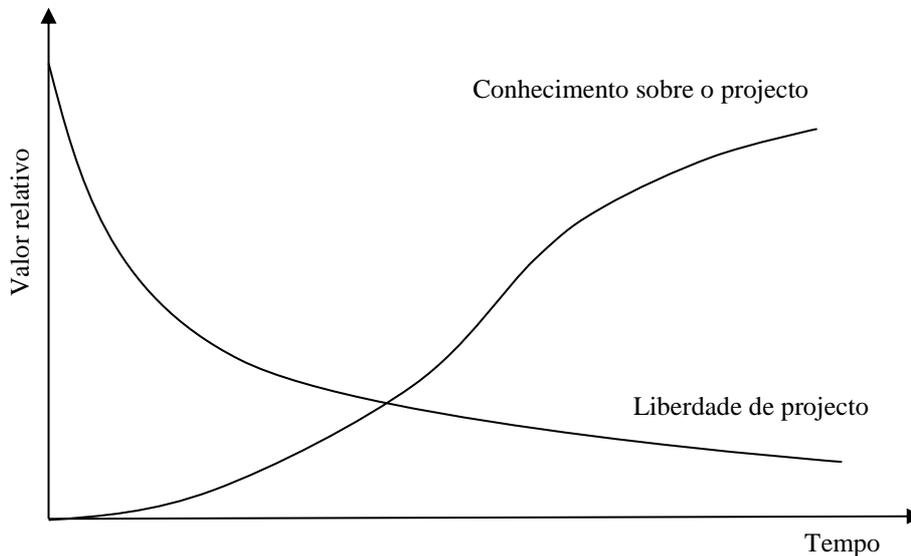


Fig. 1.1 - Conhecimento e liberdade de tomadas de decisão ao longo da actividade de projecto (adaptado de Villiers, 1987).

Os custos efectivamente ocorridos durante a fase conceptual de projecto são relativamente diminutos, só começando a crescer significativamente à medida que se aproximam as fases de implementação ou produção, porém o valor do custo final do resultado do projecto ficou fortemente determinado por decisões tomadas na sua fase inicial quando o seu conhecimento era ainda diminuto. A Fig. 1.2 apresenta a variação dos custos efectivos e dos custos comprometidos ao longo do tempo.

Sendo o custo, um requisito de fundamental importância, as figuras evidenciam a necessidade de aumentar o conhecimento do produto (doravante o termo produto refere-se genericamente a produto, processo ou sistema) nas fases embrionárias de projecto, pois que é aí que as decisões tomadas determinam em grande parte o seu custo final. Este é presentemente um dos grandes desafios que se colocam na actividade de projecto.

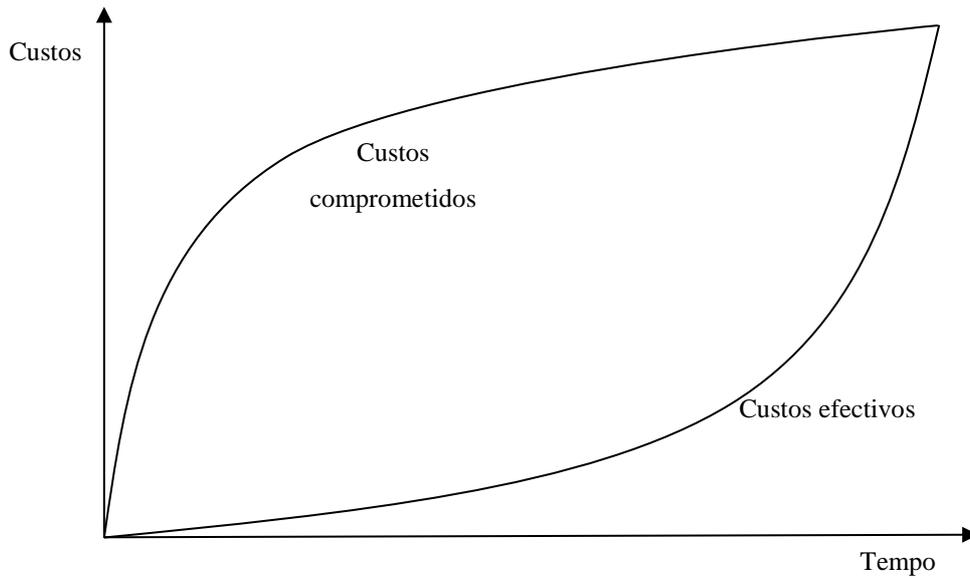


Fig. 1.2 - Custos efectivos e custos comprometidos ao longo da actividade de projecto (adaptado de Barton *et al.*, 2001).

Neste contexto, o conceito de Engenharia Concorrente tem sido considerado como um meio para aumentar o conhecimento na fase inicial de projecto. Com efeito, ao integrar equipas pluridisciplinares com representantes das áreas de projecto, produção, qualidade, aprovisionamentos, comercial e outras, a Engenharia Concorrente visa considerar todas as fases do ciclo de vida de um produto e diminuir o tempo de desenvolvimento para colocação no mercado. Neste ambiente de trabalho em que as tarefas são realizadas concorrentemente e por outro lado, várias opções não estão ainda decididamente definidas, a possibilidade de tomar decisões baseadas também em custos estimados, assume-se de fundamental importância, particularmente nas fases iniciais do projecto, onde há carência de dados.

No que se refere ao desempenho de um produto, têm sido efectuados imensos trabalhos e estudos, que aliados ao estado actual do conhecimento científico, constituem um corpo que responde à grande maioria das situações e simultaneamente permitem espaço a uma melhoria contínua. A estimativa de custos durante a fase de projecto é uma área também fundamental, sobre a qual existe bastante bibliografia, todavia de difícil corporização. Com efeito, vários autores têm apresentado metodologias para estimativas de custos, porém caracterizadas por grande restritividade e especificidade.

Sendo generalizada a aceitação de que as decisões tomadas na fase inicial de projecto comprometem cerca de 70/80% do custo final de um produto (Suh, 1990, p 41) (Geiger & Dilts, 1996), a existência de meios que permitam estimar o custo final do produto, ainda durante a sua fase conceptual, afigura-se como de fundamental importância, tanto mais que nessa fase a informação disponível é ainda diminuta e existem bastantes incertezas.

Presentemente, todos os envolvidos na actividade de projecto tendem a actuar no sentido de dispor do máximo de informação durante a parte conceptual de projecto para uma

melhor tomada de decisões. A estimativa de custos é uma das partes dessa informação desejável. Com efeito, na posse de estimativas de custeio, os decisores podem começar a direccionar o projecto para o cumprimento dos requisitos funcionais pretendidos e simultaneamente ter em consideração as implicações das decisões tomadas nos custos dos produtos.

Nos últimos anos do século XX, a comunidade internacional começou a tomar consciência da necessidade de actuar sobre a constante agressão às condições naturais do planeta. Com efeito, começou a ficar evidente a necessidade de, por um lado, abrandar o consumo de recursos naturais finitos, e por outro, minimizar a poluição gerada pela actividade humana. Por uma questão de solidariedade intergeracional, começou a tomar-se consciência da necessidade de actuação sobre esta problemática. É dever das actuais gerações preservarem condições de habitabilidade e de bem-estar às gerações vindouras.

Esta consciencialização é transversal a todas as actividades da humanidade e consequentemente à actividade de projecto. Nas últimas duas ou três décadas, diversos académicos e profissionais da área (Chiu & Chu, 2012) (Deutz *et al.*, 2013) propuseram um conceito de projecto mais alargado, segundo o qual, para além para além das preocupações sobre a funcionalidade e custo, deveriam ser também consideradas preocupações de ordem ambiental. Este novo conceito é designado por projecto sustentável (Fig. 1.3) no qual, o lucro, o planeta e as pessoas são considerados simultaneamente e a sua transposição para o projecto sustentável cobrirá todo o espectro da vida de um produto. Assim, projecto sustentável é entendido como o desenvolvimento de um produto que cumpre as suas funções, gera lucro à empresa, é socialmente aceitável e usa materiais e energia mínimos gerando também desperdícios mínimos.

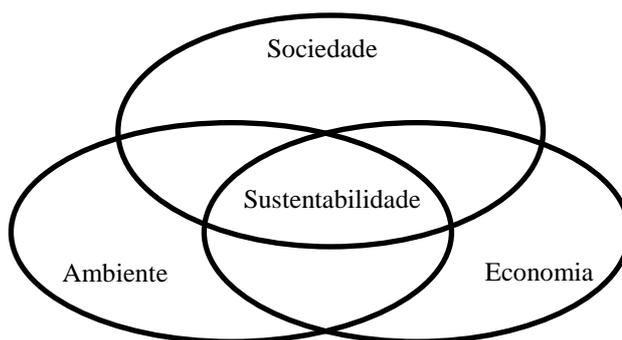


Fig. 1.3 - Triplo conceito de sustentabilidade (adaptado de Chiu & Chu, 2012).

As considerações ambientais, vêm, assim, adicionar-se ao estabelecimento dos requisitos funcionais e de estimativas de custos como factores para uma tomada de decisão integrada na fase conceptual de projecto, caracterizada pela escassez de informação e pela abundância de incertezas. A obtenção nesta fase, de um máximo de informação integrada afigura-se de extrema utilidade para a escolha e definição dos valores em torno dos quais se

desenvolverão as fases subsequentes do projecto sustentável. O sucesso de um projecto depende fortemente das decisões então tomadas.

É neste âmbito que se insere a presente dissertação de doutoramento. Neste trabalho é estudada a integração do desempenho com informação de custeio e ambiental tendo como objectivo proporcionar o máximo de informação na fase conceptual do projecto. Graficamente corresponde a efectuar um deslocamento para a esquerda na curva da Fig. 1.1 relativa ao conhecimento, ou seja, aumentar a informação disponível na fase inicial de projecto quando ainda existe maior liberdade para o seu desenvolvimento, o que por consequência implica um deslocamento para a direita da curva relativa à liberdade de projecto. Este objectivo é ilustrado na Fig. 1.4.

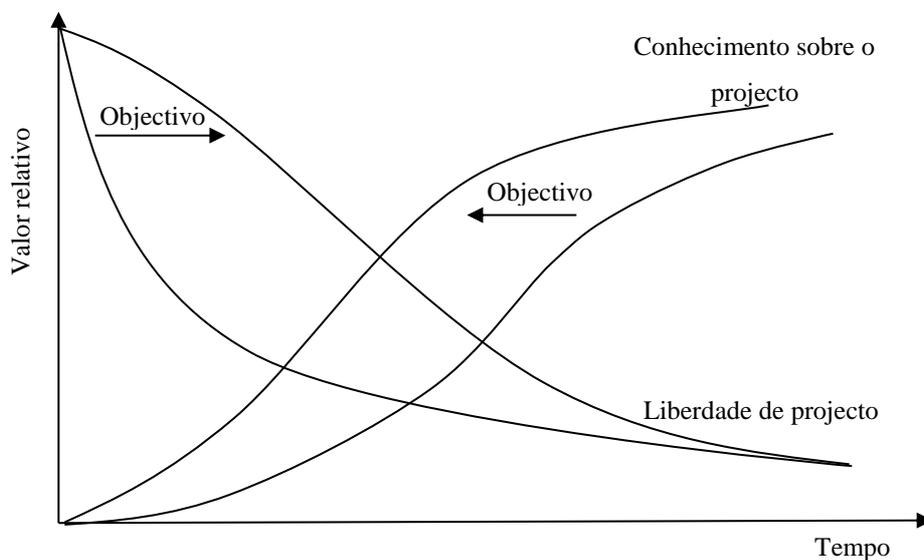


Fig. 1.4 - Propósito da tese: deslocamentos das curvas relativas ao conhecimento e à liberdade para tomadas de decisão ao longo da actividade de projecto.

Como referido, ao longo do tempo foram desenvolvidas um largo número de teorias e metodologias de projecto com o objectivo de formalizar, sistematizar e estruturar a actividade de projecto. De entre elas, destaca-se a Teoria Axiomática de Projecto assente numa base analítica rigorosa. A Teoria Axiomática (TA) proporciona um método sistemático e lógico para conduzir a actividade de projecto, contribuindo para evitar os tradicionais ciclos de projecto-reformulação (tentativa-erro) na procura da melhor solução, pois que, se preocupa essencialmente com a avaliação antecipada de soluções e com o controlo antecipado do processo de projectar. É aplicável ao projecto de qualquer tipo de produto, processo ou organização. Em “Approaches to Improve Engineering Design”, Eagan (2002) apresenta uma comparação entre diversas teorias, métodos e ferramentas usados na actividade de projecto na qual a Teoria Axiomática apresenta a máxima valorização no que se refere à selecção entre conceitos, não obstante apresentar o valor mínimo relativamente à facilidade de uso.

A TA assenta na existência de dois princípios fundamentais ou axiomas, que regem as práticas de um bom projecto: o Axioma da Independência e o Axioma da Informação. Em termos gerais, a procura de soluções admissíveis deve basear-se no primeiro axioma, enquanto que, a eleição de uma solução de entre as várias possíveis deve fundamentar-se no segundo axioma (Gonçalves-Coelho, 1994).

Nesta dissertação, serão usados os conceitos da Teoria Axiomática para comparação de várias soluções de projecto e fundamentação das decisões tomadas. A análise da matriz de projecto constitui a base para a determinação de soluções com independência entre os vários requisitos, pois que, a associação entre funcionalidade, custo e ambiente, configura invariavelmente um projecto acoplado porque as variáveis de projecto que satisfazem os requisitos funcionais afectam também os requisitos económicos e ambientais.

A Teoria Axiomática de Projecto identifica várias estratégias possíveis como forma de lidar com projectos acoplados, nomeadamente, alteração de tolerâncias, redefinição do problema, optimização do problema ou criação de redundâncias. A metodologia apresentada nesta dissertação enquadra-se numa estratégia de optimização, não com o objectivo de encontrar uma solução óptima, mas de encontrar “zonas” de compatibilidade de requisitos de natureza diferente. Consiste basicamente nos seguintes passos:

- conhecer a relação entre o desempenho funcional e as principais variáveis de projecto. Este conhecimento pode ser obtido através de conhecimento científico ou de conhecimento empírico;
- conhecer a relação entre o custo e as mesmas variáveis de projecto. Esta relação pode ser determinada analiticamente ou através da realização de experiências;
- conhecer as relações entre quaisquer requisitos ambientais considerados e as mesmas variáveis de projecto. Este conhecimento pode também, ser alcançado analítica ou experimentalmente;
- sobreposição das várias relações (curvas ou superfícies) para identificação das regiões consideradas de maior interesse por parte do(s) decisor(es).

Projectar é um processo multi-estágio e multi-critério no qual as decisões tomadas na fase conceptual determinam irremediavelmente a bondade da solução final. A existência de meios e informação para ajuda ao suporte das decisões tomadas pelos projectistas reveste-se, pois, da máxima utilidade.

1.3. Organização da dissertação

Neste primeiro capítulo da dissertação, é apresentada a exposição dos motivos que impeliram o autor para a realização deste trabalho, a que se segue uma sucinta explicação do

enquadramento e objectivos do mesmo. Em seguida, é feita a descrição da estrutura da dissertação.

No segundo capítulo é apresentada uma síntese do conhecimento relativa a várias áreas do conhecimento relevantes neste trabalho. A leitura de artigos e livros científicos constituiu-se como a principal base de obtenção de informação. Este “estado de arte”, necessariamente nunca se apresenta completo, todavia é convicção do autor que traduz uma parte significativa do que de mais relevante tem sido desenvolvido e publicado nestas áreas. Os subcapítulos considerados foram os seguintes:

- Projecto - é apresentada a evolução histórica do conceito de projecto, bem assim como uma descrição das principais teorias, métodos e ferramentas de projecto. Entre estes, a Teoria Axiomática é apresentada com maior detalhe;
- Estimativas de custos - é exposta a importância da estimativa de custos particularmente nas fases embrionárias de projecto e são também os caracterizados os principais métodos usados. Nesta síntese, a estimativa paramétrica e os custos baseados em analogias e nas características dos produtos, emergem como os métodos mais adequados de estimativas de custo durante a fase conceptual de projecto de novos produtos. O conceito de factores que afectam significativamente o custo (“cost drivers”) é recorrente em vasta bibliografia;
- Sustentabilidade - é exposta a inevitabilidade da preocupação em preservar os recursos naturais do planeta e garantir condições de habitabilidade para as gerações futuras. São apresentados casos de inclusão das preocupações ambientais no projecto de produtos. Finalmente é apresentado o conceito recente de projecto sustentável o qual é entendido como o desenvolvimento de um produto que cumpre a suas funções, gera lucro à empresa, é socialmente aceitável e usa materiais e energia mínimos gerando também desperdícios mínimos. As decisões no âmbito de um projecto tendo em conta a sustentabilidade, são, assim, tomadas dentro de uma tripla vertente de análise que inclui a funcionalidade, o custo e o ambiente;
- Tomadas de decisão - são apresentadas algumas abordagens ao processo de tomada de decisões e é exposto o objectivo de que seja construída informação apropriada e antecipada para sua fundamentação na fase conceptual de projecto.

No terceiro capítulo, é exposta a natureza acoplada de projectos sustentáveis e é descrita a metodologia proposta como forma de obtenção de informação diferenciada para suporte à tomada de decisão nas fases iniciais deste tipo de projectos. A metodologia refere a importância da análise ambiental só dever ser efectuada após terem sido tomadas as decisões de cariz funcional e económico.

O capítulo quarto apresenta três casos de projectos sustentáveis acoplados como exemplos de aplicação da metodologia proposta. Nenhum dos casos representa um projecto

definitivo e detalhado, mas sim, a sua fase conceptual onde são tomadas decisões determinantes para o seu posterior desenvolvimento e sucesso. Em cada caso, a análise funcional é tecnicamente fundamentada e são consideradas a vertente de custeio e ambiental com base na informação disponível. É de realçar o carácter meramente exemplificativo destes casos, particularmente no que diz respeito aos requisitos ambientais, onde poderiam ter sido usados outros requisitos mais apropriados e precisos, com origem em cada caso particular de sector de actividade. Os três casos apresentados resultam de trabalhos científicos anteriormente publicados em que o autor foi co-participante. Os três exemplos apresentados são:

- Desenvolvimento de um novo produto de cortiça com borracha (Fradinho *et al.*, 2009) (Fradinho *et al.*, 2012).
- Projecto conceptual de reservatórios pressurizados (Fradinho *et al.*, 2011).
- Contributo metodológico para a tomada de decisão em projecto sustentável – caso de uma estrutura tubular” (Fradinho *et al.*, 2013).

No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho onde se conclui a utilidade da metodologia proposta como forma de suporte à tomada de decisão na fase conceptual de projectos acoplados onde são contemplados conjuntamente requisitos funcionais, económicos e ambientais. A presente dissertação termina com a indicação de futuros trabalhos a desenvolver em assuntos que, embora relacionados ou tendo surgido na sua sequência, ficaram fora do âmbito deste trabalho.

2 SÍNTESE DO CONHECIMENTO

2.1 Introdução

Neste capítulo será feito um levantamento dos principais conceitos e estados de conhecimento relacionados com o objectivo desta dissertação. Dada a grande quantidade de informação permanentemente publicada, a síntese do conhecimento efectuada não pode ser exaustiva, sendo contudo, convicção do autor que reflecte de uma forma adequada o que de mais significativo tem sido estudado e divulgado em cada área do conhecimento abordada. O levantamento efectuado foi feito com base na consulta de vários tipos de documentos publicados, nomeadamente, artigos científicos (principal fonte), livros, actas de congressos e teses de doutoramento. Actualmente, as publicações com origem no mundo anglo-saxónico (ou pelo menos escritas em língua inglesa) assumem uma dimensão de forte dominância, todavia foi intencionalmente também, consultada bibliografia de origem francesa e portuguesa.

A pesquisa bibliográfica efectuada procurou centra-se em publicações recentes como forma de reflectir um estado de conhecimento actual, não obstante o uso de algumas referências já com algumas décadas, com o intuito de enquadramento histórico.

Em concordância com o objectivo da dissertação, este capítulo está estruturado com base nas áreas de projecto, estimativas de custos, sustentabilidade e tomada de decisão.

2.2 Projecto

A actividade de projecto remonta aos primórdios da pré-história (Paleolítico Inferior, há cerca de 2 milhões de anos) quando o *Homo Habilis* construiu as primeiras ferramentas de pedra lascada. O desenvolvimento das suas capacidades intelectuais tinha-lhe permitido perceber que um dispositivo de percussão lhe seria útil para defesa e para esmagar alimentos e, além disso, possuía já a capacidade de relacionar o que tinha que fazer para atingir determinado resultado. Terá então nascido a actividade de projectar que se pode dizer ser tão antiga quanto o Homem. Nesta assunção, projectar é, pois, conseguir obter algo que satisfaça as necessidades sentidas.

De então para cá, a capacidade de entender e dominar o meio envolvente não cessou de aumentar, particularmente nos últimos dois séculos, quando ocorreram os principais

desenvolvimentos científicos e tecnológicos. O momento presente é apenas um ponto na “linha do tempo”, a que se seguirão certamente infinitos desenvolvimentos.

Até meados do século XX, a actividade de projectar foi sendo desenvolvida desprovida de qualquer estrutura ou organização (Evboumwan *et al.*, 1996). Só a partir de então, a comunidade académica começou a dar-lhe algum formalismo, nomeadamente procurando responder a perguntas como: o que é o projecto?, porque é feito?, como é feito? Desde então, muitas definições têm sido propostas para definir Projecto.

Feilden (1963) definiram Projecto de Engenharia como sendo o uso de princípios científicos, informação técnica e imaginação na definição de uma estrutura mecânica, máquina ou sistema, para obtenção de funções pré-especificadas com o máximo de economia e eficiência.

Luckman (1984) considera que o Processo de Projectar é a tradução de informação sob a forma de requisitos, constrangimentos e experiência, em soluções potenciais que satisfazem as características de desempenho requeridas.

Para Eagan *et al.* (2002), Projecto é um processo no qual o intelecto humano, criatividade e paixão concorrem para a criação de artefactos úteis. Enfatizam, também, que a prática de Projecto de Engenharia envolve, não só ciências puras e aplicadas, ciências sociais e comportamentais e economia, mas também muitos aspectos do direito.

Projectar, é pois, reconhecido como o acto de gerar algo que satisfaça os requisitos e constrangimentos iniciais, no qual existe sempre actividade cognitiva. A experiência do projectista é também um factor importante de sucesso e de redução do tempo de projecto. Com efeito, projectistas experientes têm maior capacidade de avaliação na fase conceptual do projecto (Coley *et al.*, 2007). Além disso, criatividade, imaginação e intuição são requisitos considerados importantes na actividade de projecto.

De acordo com Chen (2003), a actividade de projectar é composta por quatro grandes fases:

- clarificação da tarefa - recolha de informação sobre os requisitos e constrangimentos a que a solução deve obedecer;
- conceptualização do projecto – estabelecimento de estruturas de funções, procura e combinação de possíveis soluções;
- corporização do projecto – determinação geral e preliminar de formas e materiais de todos os componentes; esta fase é também habitualmente designada por projecto preliminar;
- projecto de pormenor – são especificados todos os pormenores do projecto final e são elaborados os desenhos de produção e restante documentação.

A actividade de projectar implica, inicialmente, partição ou decomposição de um sistema em componentes para determinar a sua natureza, funções, relações, etc. e,

posteriormente, a sua integração para a criação do produto com as propriedades desenvolvidas e a sua constante avaliação. Assim, projectar é uma combinação simultânea de análise, síntese e avaliação.

Depois de bem definido o problema e de clarificados os objectivos, a fase de projecto conceptual implica bastantes tomadas de decisão e iterações. Essas tomadas de decisão devem ser realizadas com base em regras lógicas ou modelos aplicáveis. A dificuldade da tomada de decisões depende do grau de complexidade do problema, do seu grau de incerteza e do factor tempo. A Fig. 2.1 ilustra as três dimensões da dificuldade da tomada de decisão. Os projectos situados em torno do vértice 1, são os de menor dificuldade e são os primeiros a serem estudados em escolas de engenharia. À medida que a localização de um projecto se afasta do vértice 1, a dificuldade de modelação aumenta, até que próximo do vértice 8, muito poucas representações matemáticas serão possíveis e ter-se-á que decidir que factores serão cuidadosamente considerados e quais serão tratados aproximadamente.

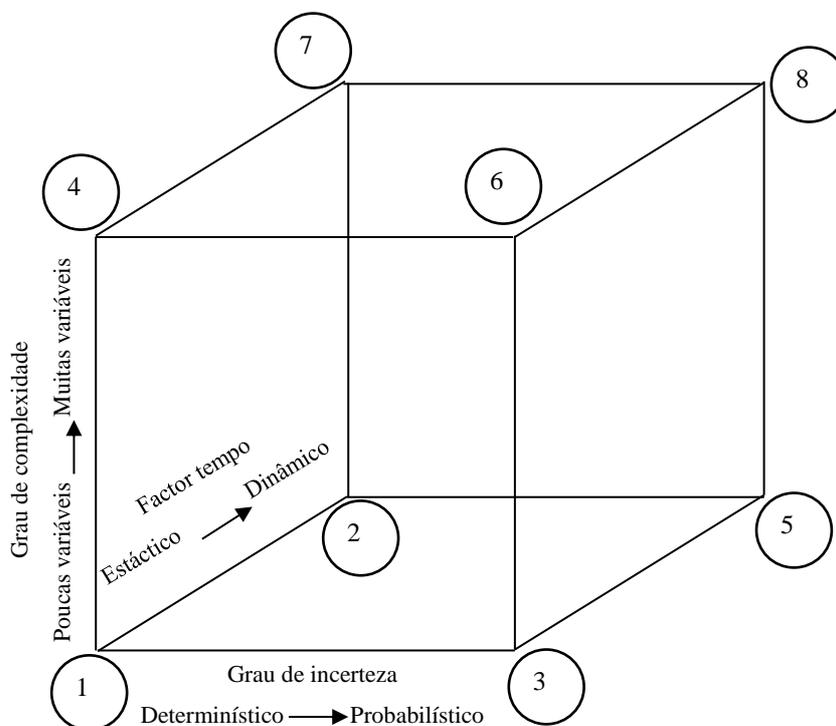


Fig. 2.1 - Caracterização espacial da tomada de decisão (adaptado de Eagan *et al.*, 2002)

Quanto à sua natureza, os projectos podem ser considerados adaptados, extensivos ou originais (Evboumwan *et al.*, 1996). Nos adaptados, um projecto existente é adaptado a novas condições ou tarefas mantendo a mesma solução, enquanto nos processos extensivos, são efectuadas alterações geométricas mantendo-se quer as tarefas quer o princípio de solução. Estes dois tipos de projecto são também designados por reprojectos. Nos projectos originais uma solução nova é criada.

Desde os anos 50 e 60 do século passado, a comunidade académica tem procurado formalizar e sistematizar a actividade de projecto, criando teorias, metodologias e ferramentas que visam facilitar e guiar os projectistas na sua actividade, por um lado, por outro, corporizar um conjunto de ideias e regras por forma a possibilitar o ensino de projecto nas escolas de engenharia. Independentemente das muitas abordagens propostas, o processo de projectar é genericamente composto por uma sequência com as seguintes fases:

- Identificação do problema
- Conhecimento geral das necessidades, do problema e da sua oportunidade
- Definição clara e concisa do problema e identificação dos requisitos e constrangimentos
- Desenvolvimento de ideias e soluções alternativas
- Avaliação das soluções alternativas
- Selecção da melhor alternativa
- Implementação da melhor solução
- Avaliação dos resultados

Nesta sequência de acções, frequentemente se retorna a passos anteriores, o que torna o processo de projectar, um processo iterativo, conforme é ilustrado na Fig. 2.2.

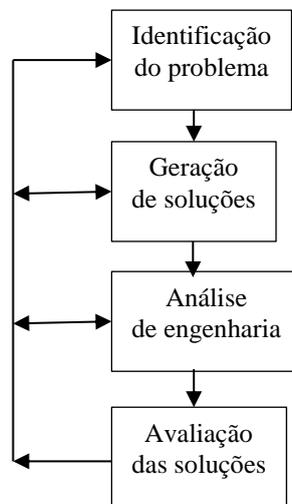


Fig. 2.2 - Projecto como um processo iterativo (adaptado de Chen, 2003).

As tentativas de formalização e sistematização da actividade de projecto não têm gerado unanimidade entre as comunidades de projectistas e investigadores. Em termos filosóficos, surgiram três grandes escolas de pensamento (Broadbent, citado por Evboumwan et al., (1996) e Santos, (2010)):

- O processo de projectar é uma arte, o que implica que não pode ser formalizado nem ensinado. O projecto deve ser caótico e criativo e só é projectista quem tiver esse dom.

- O processo de projectar pode ser organizado e disciplinado.
- O processo de projectar não deve estar submetido a quaisquer regras.

De um modo geral, os investigadores tendem a considerar que o processo de projectar pode ser sistematizado (pelo menos, parcialmente) tendo surgido nas últimas décadas inúmeros métodos que visam, por um lado, guiar o projectista na sua actividade e por outro lado formalizar o seu ensino. Também a forma de abordagem das situações pelos projectistas tem sido estudada comparando-a com a dos cientistas. Segundo Nigel Cross (Cross, 2008), os primeiros tendem a sugerir várias soluções possíveis até encontrarem uma que seja boa ou satisfatória, enquanto que os segundos têm tendência a usar uma estratégia de exploração sistemática do problema na busca de regras que lhes permita gerar a solução correcta e óptima. Deste modo, os projectistas usam estratégias focadas na solução e resolvem o problema por síntese enquanto os cientistas usam estratégias focadas no problema e resolvem-no por análise.

Nos últimos decénios, a comunidade académica tem desenvolvido esforços na sistematização e corporização da actividade de projecto cujo resultado foi o surgimento de diversos modelos com níveis de abstracção e gama de aplicação, bastante variados. Alguns, como é o caso da Teoria Axiomática (TA) (Suh, 1990), constituem um sistema coerente dos conceitos, princípios e técnicas aplicáveis à actividade de projecto, enquanto outros, como o “Quality Function Deployment” (QFD), são sobretudo usados para obter contributos para melhorar produtos já existentes (Gonçalves-Coelho *et al.*, 2005).

Os vários modelos propostos são agrupados por diversos autores, em duas grandes categorias: prescritivos e descritivos. Os modelos prescritivos abordam o processo de projecto numa perspectiva global cobrindo todos os passos procedimentais sugerindo a melhor maneira de actuação, enquanto os modelos descritivos centram-se nas acções dos projectistas e com as actividades realizadas durante o processo de projectar, isto é, com o que está envolvido no acto de projectar.

Como referido, todos os modelos desenvolvidos têm níveis de abstracção e áreas de aplicação bastante variadas, podendo ser designados por teorias, metodologias ou mesmo simplesmente por ferramentas de projecto. A Tabela 2.1 ilustra a forma como Evbuomwan (1996) e Tate (1999) agruparam alguns dos principais modelos de projecto em função do seu carácter prescritivo ou descritivo. Grande parte dos modelos de projecto é conhecida pelo nome do próprio proponente.

Em “Approaches to Improve Engineering Design”, Eagan (2002) apresenta alguns dos métodos de projecto mais comumente utilizados, agrupados em função dos seus conceitos básicos, bem assim como a sua valorização no que se refere a utilização corrente, criação e desenvolvimento conceptuais, selecção de alternativas conceptuais e facilidade de uso (ver Tabela 2.2). A escala usada varia entre 1 (baixo) e 5 (alto) e a atribuição dos valores resultou da opinião de vários autores, investigadores e projectistas.

Tabela 2.1 - Modelos de projecto prescritivos e descritivos
(adaptado de Evbuomwan, 1996 e Tate, 1999).

Modelos prescritivos			Modelos descritivos
Baseados no processo de projectar		Baseados nos atributos do produto	
Jones-1970	Cross-1989	TA (Suh)-1990	March-1984
Asimow-1962	Hubka-1982	Taguchi-1986	Matchett-1966
Pahl and Beitz-1984	French-1985		Gero-1992
VDI 2221-1987	Harris-1980		
Watts-1966	Pugh-1990		
Marples-1960	BS 7000-1990		
Archer-1963	HoQ (Clausing)-1994		
Krick-1969			

Os casos considerados na tabela variam bastante quanto à sua corporização, desde ferramentas de projecto de aplicação limitada como as Matrizes de Decisão (úteis para ponderar atributos) ou o QFD, até teorias de projecto como sejam a TA ou a TRIZ (acrónimo russo de Teoria de Resolução de Problemas Inventivos). A sua utilização efectiva requer sempre domínio em áreas de engenharia e de matemática. Quanto à quantificação apresentada, destacam-se com a máxima valorização as Matrizes de Decisão quanto à facilidade de uso, o Método de Pugh quanto ao desenvolvimento de conceitos e a Teoria Axiomática quanto à selecção entre conceitos, não obstante esta apresentar o valor mínimo relativamente à facilidade de uso.

Os vários métodos e ferramentas apresentados não são alternativos e vários deles podem coexistir num mesmo projecto beneficiando das potencialidades das suas características.

Quanto à sua natureza, a Engenharia Simultânea é mais que um método de projecto, pois consiste na integração simultânea de todos os atributos de um produto durante o seu desenvolvimento. Assim, um projecto desenvolvido num ambiente de Engenharia Simultânea é realizado por equipas multidisciplinares que para além de projectistas, integram também especialistas em produção, manutenção, custeio, gestão, qualidade, segurança e de outras áreas consideradas relevantes para o produto. Como consequência, os produtos desenvolvidos em ambiente de Engenharia Simultânea apresentam como vantagens o seu menor custo e tempo de desenvolvimento.

Os métodos agrupados como qualitativos são apropriados para obtenção e avaliação de ideias e os estatísticos para análises de aspectos relacionadas com qualidade, nomeadamente variabilidade e incerteza.

A Teoria Axiomática de Projecto (TA) e a Teoria de Resolução de Problemas Inventivos (TRIZ), como o próprio nome sugere, mais que métodos de projecto, constituem-se efectivamente como teorias de projecto. Ambas as teorias apresentam um sistema coerente de

conceitos, princípios e técnicas de projecto. Dada a sua relevância, são, de seguida, apresentadas as suas principais características.

Tabela 2.2 - Comparação de métodos e ferramentas de projecto (adaptado de Eagan, 2002).

Natureza	Nome	Base Primária						Valor potencial				
		Conhecimento de engenharia	Lógica e Teoria de Conjuntos	Álgebra de Matrizes	Probabilidades	Estatística	Economia	Utilização corrente	Criação de conceitos	Desenvolvimento de conceitos	Seleção entre conceitos alternativos	Facilidade de uso
Prática	Engenharia Simultânea						x	4	2	4	4	1
Qualitativa	Matrizes de Decisão			x			x	4	1	2	4	5
	Método de Pugh			x				3	4	5	1	2
	QFD			x				2	2	4	2	1
Estatística	Método de Taguchi				x	x		4	1	4	4	2
	Six Sigma				x	x		3	3	3	3	2
Criativa	TRIZ	x						3	3	1	1	3
Axiomática	TA		x	x				2	2	3	5	1

1=baixo; 5=alto

A Teoria Axiomática de Projecto surgiu em 1990 com a publicação do livro “The Principles of Design” da autoria de Nam P. Suh. Nele, o autor apresenta uma base analítica rigorosa para a actividade de projecto tendo sido de imediato aceite por parte da comunidade académica e profissional da actividade de projecto. Para além das suas potencialidades em termos de projecto, contribuiu também para facilitar outro desígnio: o ensino de projecto.

De acordo com Suh (2001), a TA constitui uma alteração qualitativa importante na actividade de projecto, a qual passou a ter uma fundamentação teórica de acordo com os padrões da ciência moderna. A TA proporciona um método sistemático e lógico para conduzir a actividade de projecto contribuindo para evitar os tradicionais ciclos de projecto-reformulação (tentativa-erro) na procura da melhor solução, pois que, se preocupa essencialmente com a avaliação antecipada de soluções e com o controlo antecipado do processo de projectar. O fluxo sistemático de procedimentos fornece os critérios para a avaliação das boas e más soluções de

projecto, o que permite a eliminação das más opções o mais cedo possível, deixando os projectistas disponíveis para se concentrarem nas soluções mais promissoras.

Outra grande potencialidade da TA reside no facto de ser aplicável ao projecto de qualquer tipo de produto, processo ou organização. É uma teoria simples, com a simplicidade própria das teorias com uma base teórica sintética (Cavique, 2005).

A TA proporciona uma abordagem sistemática ao processo de projecto alicerçada na utilização do conceito de domínio, da sistematização do processo de decomposição em zigue-zague e do uso de matrizes de projecto, sendo as decisões tomadas com base em dois axiomas e dezenas de teoremas e corolários seus derivados.

O ambiente de projecto é constituído pelos domínios apresentados na Fig. 2.3.

Os requisitos funcionais (RF) são formulados tendo em conta as necessidades do cliente e constituem o objectivo do projecto. A sua formulação é essencial, nenhum projecto pode ser melhor que os seus RF's. A solução do projecto é gerada no domínio físico e o domínio do processo contém as variáveis de processo (VP) que produzem os parâmetros de projecto (PP) especificados.

O processo de projecto consiste no mapeamento sucessivo das relações entre os domínios funcional e físico a qualquer nível hierárquico (ver Fig. 2.4).

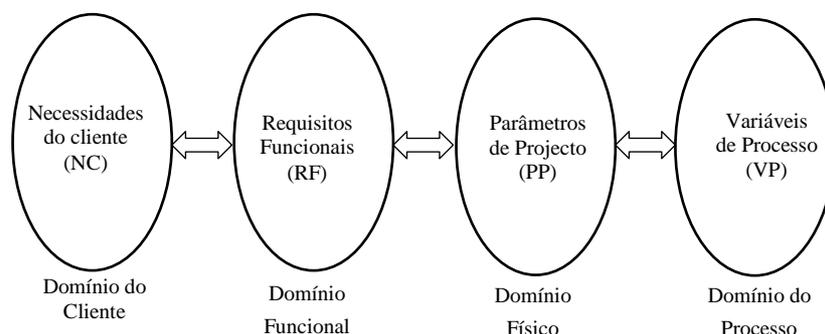


Fig. 2.3 - Domínios do projecto segundo a Teoria Axiomática de Projecto (adaptado de Gonçalves-Coelho *et al.*, 2012)

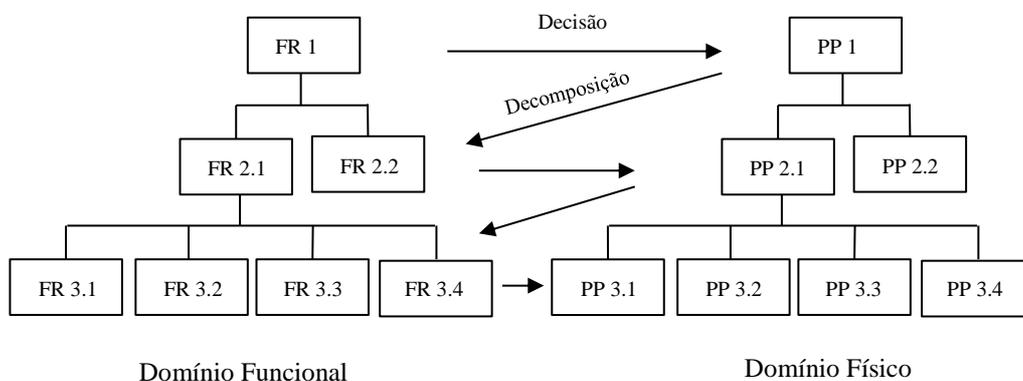


Fig. 2.4 - Decomposição hierárquica em zigue-zague entre os domínios funcional e físico (adaptado de (Gonçalves-Coelho *et al.*, 2003).

Estes dois domínios são inerentemente independentes; o que os relaciona é o projecto. Este mapeamento é traduzido pela expressão (2.1), em que $\{RF\}$ é o vector dos requisitos funcionais, $[A]$ é a matriz de projecto e $\{PP\}$ é o vector dos parâmetros de projecto.

$$\{FR\} = [A]\{PP\} \quad (2.1)$$

Existe uma equação de projecto similar entre os domínios físico e do processo. A relação entre o domínio do cliente e o domínio funcional é uma excepção e não pode ser estruturada rigorosamente (Harutunian *et al.*, 1996).

A TA assenta na existência de dois princípios fundamentais ou axiomas, que regem as práticas de um bom projecto: o Axioma da Independência e o Axioma da Informação.

O primeiro axioma estabelece que os requisitos funcionais de um projecto devem ser independentes, ou seja, cada RF deve ser ajustado por apenas um parâmetro de projecto, sem afectar o desempenho dos demais requisitos. Assim, o projecto ideal é aquele cuja matriz de projecto é diagonal. Tais projectos designam-se por desacoplados. Se a matriz de projecto for triangular, tais projectos designam-se por desacopláveis, e satisfazem também o axioma da independência obrigando, no entanto, a que o ajustamento dos parâmetros de projecto seja feito segundo uma determinada ordem, tal que, cada requisito seja controlado por apenas um parâmetro. Qualquer outro tipo de matriz determina que o projecto seja acoplado e viole, portanto, o axioma da independência. Se um projecto for acoplado, tal não significa impossibilidade, traduz, isso sim, complexidade.

O segundo axioma estabelece que o conteúdo de informação incorporado em cada projecto deve ser mínimo, ou seja, de entre várias soluções alternativas não acopladas, a melhor é aquela que contiver menor quantidade de informação. Matematicamente, a quantidade de informação (I), expressa em “bit”, associada a um projecto com um único RF e um único PP, é determinada pela expressão (2.2)

$$I = \log_2 \frac{1}{p} = -\log_2 p \quad (2.2)$$

sendo p , a probabilidade desse requisito funcional ser satisfeito. Daqui resulta que se um acontecimento for certo, a quantidade de informação é nula, por outro lado, se a probabilidade de acontecer tender para zero, a quantidade de informação tenderá para infinito. Se um projecto com n requisitos funcionais for desacoplado, a sua quantidade de informação será dada pela expressão (2.3) (Suh, 1990).

$$I = \sum_{i=1}^n -\log_2 p_i = \sum_{i=1}^n I_i \quad (2.3)$$

Sumariamente, através do Axioma da Independência são identificadas soluções admissíveis, enquanto a sua solução eleita é determinada pelo Axioma da Informação. Dito de outra forma, o primeiro axioma traduz a ideia de que qualquer definição rigorosa não deve conter referências, ainda que indirectas, ao próprio objecto de definição. Quanto ao segundo, exprime a ideia de que entre um número infinito de projectos diferentes visando os mesmos objectivos, o melhor é aquele que contiver a menor quantidade de informação. A procura de soluções admissíveis deve basear-se no Axioma 1, enquanto que, a eleição de uma solução de entre as várias possíveis deve fundamentar-se no Axioma 2 (Gonçalves-Coelho, 1994).

Na sua obra pioneira, Suh apresenta sete teoremas e sete corolários derivados dos dois axiomas. Trabalhos posteriores, quer do próprio, quer de outros autores, têm acrescentado mais teoremas e corolários à TA (Gonçalves-Coelho, 2011).

A TRIZ é também uma Teoria de Projecto com aceitação entre profissionais de projecto e a comunidade académica. Foi desenvolvida por Genrich Altshuller a partir de 1946 na antiga União Soviética, baseada na presunção que o conflito entre dois objectivos contribui para a criatividade. Altshuller analisou milhares de patentes e desenvolveu uma matriz entre os conflitos e as soluções adoptadas verificando que, em diferentes áreas técnicas, muitos problemas são resolvidos usando um pequeno número de princípios de invenção. A sua intenção era de que esta sistematização activasse a criatividade em cada problema de projecto. Posteriormente, os seus seguidores analisaram cerca de 1,5 milhões de patentes e constataram que os princípios de resolução de problemas são previsíveis e repetitivos contribuindo para a corporização da TRIZ (Eagan, 2002). Dessa corporização constam, entre outros, listas de parâmetros de engenharia, princípios de invenção e tabelas de contradições, tornando a TRIZ aplicável a qualquer entidade que realize uma função (sistema técnico na própria terminologia).

A TA e a TRIZ são duas teorias de projecto baseadas em elevados princípios de abstracção proporcionando bases científicas que suportam as decisões inerentes ao processo de projectar (Kim *et al.*, 2010). A sua complementaridade é possível, pois que, enquanto a TRIZ pode ser útil na geração de soluções inovadoras, a TA tem a capacidade de definir e decompor um problema geral, bem assim como avaliar a eficácia da solução.

Para além das duas teorias de projecto anteriormente descritas, outras teorias tem surgido nas últimas décadas como sejam a Teoria Geral de Projecto (“General Design Theory” – GDT) desenvolvida por Yoshikawa em 1981 e a Teoria C-K de Projecto (“C-K Design Theory”) apresentada por Hatchuel e Weil em 2003. A GDT faz uma abordagem ao projecto largamente filosófica e dela não resultou nenhum novo método ou ferramenta de projecto (Eagan, 2002). A Teoria C-K de Projecto assenta na presunção de que um projecto pode ser modelado pela interligação entre dois espaços independentes: conceitos (“concepts”) e conhecimento (“knowledge”). Segundo os próprios autores, esta relação é insuficiente para descrever a geração de novos produtos e conhecimentos, que constitui uma característica

distintiva de projecto (Santos, 2010). Estas duas últimas teorias têm tido pois, uma diminuta aceitação por parte das comunidades académica e profissional ligadas à actividade de projecto.

2.3 Estimativas de custos

Entende-se estimativa de custos como a predição de custos de actividades antes que estas tenham efectivamente acontecido.

A estimativa de custos durante a fase de projecto é uma área de importância relevante, na qual converge informação e conhecimento de diferentes áreas, conforme é ilustrado na Fig. 2.5. O estimador de custos, em Portugal vulgarmente designado por orçamentista, tem pois que, permanentemente, usar uma combinação apropriada de conhecimento, lógica, bom senso, talento, experiência e discernimento por forma a gerar uma estimativa significativa e atempada.

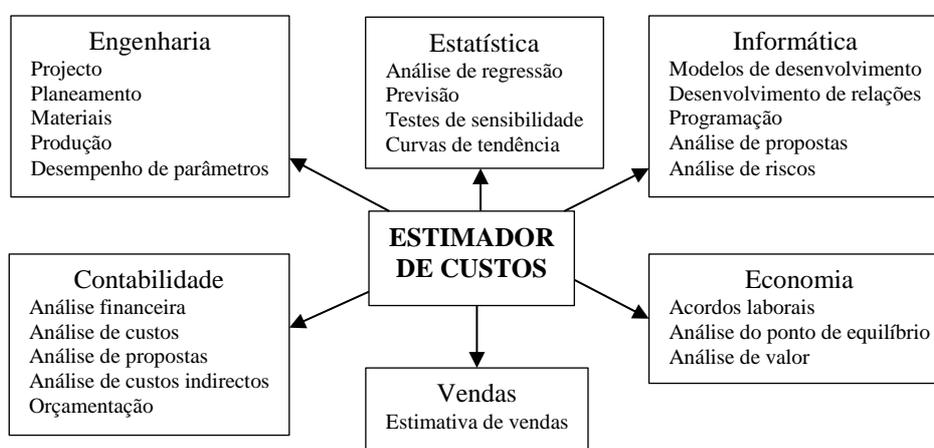


Fig. 2.5 - Competências e conhecimento na estimativa de custos (adaptado de Rush e Roy, 2001).

Shehab e Abdalla (2001) sustentam que o custo pode ser usado como critério de avaliação de duas formas diferentes: uso consciente de tecnologias de processo para redução do custo total (“design-for-cost”) ou com o objectivo de ser conseguido um custo-objectivo (“design-to-cost”).

Sendo reconhecidamente importante a estimativa de custos durante a fase de projecto, esta pode ser usada com dois objectivos diferentes: reduzir o custo final de um produto (“design-for-cost”) ou projectar um produto que não ultrapasse um determinado valor de custo (“design-to-cost”) (Shehab e Abdalla, 2001).

Com excepção de alguns casos, o preço de venda de um produto é habitualmente determinado pelo mercado. Nestas circunstâncias, a rentabilidade é determinada pelos custos totais do produto. Na presente situação económica, caracterizada por elevada competitividade, não é satisfatório apurar os custos de um produto “à-posteriori”. Assim, as decisões tomadas

desde a fase inicial de projecto, devem ser tomadas, não só em função dos requisitos funcionais pretendidos, mas também tendo em conta as suas repercussões no custo final do produto.

Quando a estimativa de custos é usada para efeitos de orçamentação (caso de projecto de produtos únicos), uma estimativa pouco precisa pode ter graves consequências para as empresas; uma sobre-estimativa implica perda de competitividade e uma sub-estimativa acarreta perdas financeiras. Para além de confiável, uma preliminar estimativa de custos deve também ser rápida (cada vez mais) e pouco dispendiosa para garantir um posicionamento forte nas negociações com clientes e fornecedores.

Vários autores sustentam que as decisões tomadas na fase inicial de projecto comprometem cerca de 70 a 80% do custo final de um produto (Suh, 1990, p 41; Geiger & Dilts, 1996; Pahl & Beitz, 1996; Barton *et al.*, 2001; Stewart *et al.*, 1995, p 323). A Fig. 1.2 ilustra bem a relação entre custos efectivos e comprometidos ao longo do processo de desenvolvimento de um produto. Deste modo, a existência de meios que permitam estimar o custo final do produto ainda durante a sua fase conceptual, afigura-se como de importância fundamental, tanto mais que nessa fase, a informação disponível é ainda diminuta e existem bastantes incertezas. Por outro lado, quaisquer modificações no produto ou alterações no processo de manufactura, serão tanto mais dispendiosas quanto mais tarde ocorrerem no desenvolvimento do projecto.

A actividade de projectar encerra, pois, um dilema para os projectistas: a fase inicial onde são tomadas as decisões que efectivamente comprometem o custo final, corresponde justamente à fase em que existe menor quantidade de dados. Este dilema é ilustrado na Fig. 2.6, onde se evidencia a importância da obtenção do máximo de informação antecipada sobre o produto, o que corresponderia a uma translação horizontal para a esquerda da curva relativa ao conhecimento do produto. É neste âmbito que se insere a presente dissertação de doutoramento.

Shehab e Abdalla (2001) apresentam mesmo uma quantificação dos custos de um produto, quer aquando do seu comprometimento, quer aquando da sua efectivação, conforme é ilustrado na Fig. 2.7.

Nestas circunstâncias, a estimativa de custos durante as fases iniciais de projecto, assume-se como uma área de grande importância para o sucesso de um projecto.

Na sua obra “Cost Engineering: Why, What and How?”, Roy (2003) identifica e compara cinco métodos usados em estimativas de custos: estimativa tradicional, estimativa paramétrica, custos baseados nas características, redes neuronais e custeio baseado em analogia.

Na estimativa tradicional existem dois grandes tipos: estimativa “à primeira vista” e estimativa detalhada. O primeiro caso requer grande experiência do estimador sendo a estimativa largamente subjectiva e incompatível com a presente cultura de custos pautada pelo rigor e precisão. A estimativa detalhada é baseada num grande número de indicadores como sejam os tempos de trabalho por operação, as quantidades de material e o custo energético

associado a cada operação, informação esta normalmente baseada nos registos históricos da empresa. A obtenção de uma estimativa detalhada requer um grande nível de conhecimento do produto e dos processos usados na sua manufactura, ou seja, quando o produto já está bem definido.

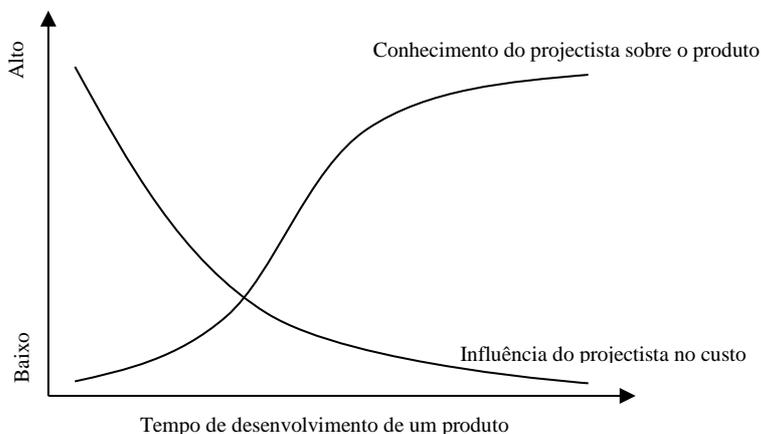


Fig. 2.6 - Dilema na estimativa de custos (adaptado de Bode, 2000).

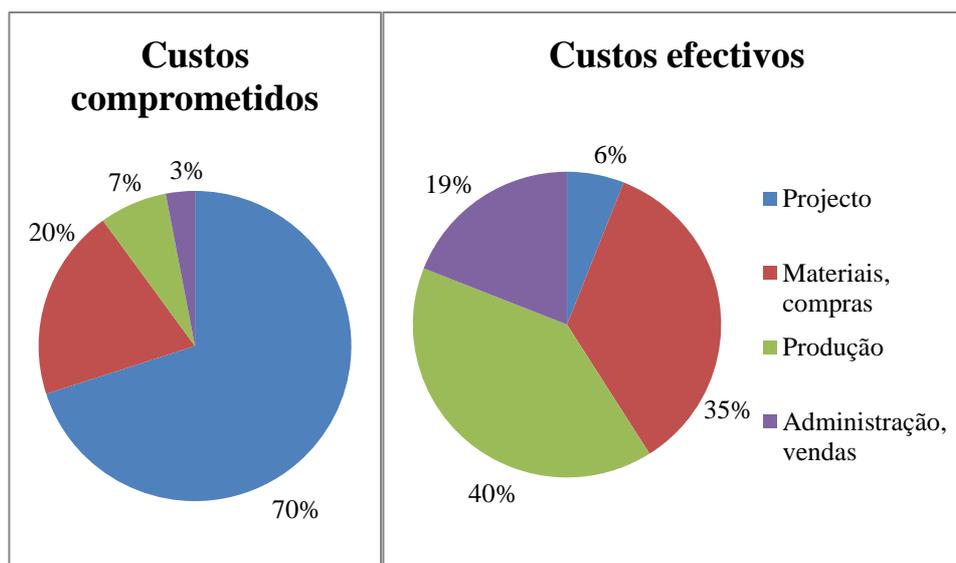


Fig. 2.7 - Custos de um produto, efectivos e comprometidos, em diferentes fases (Shehab e Abdalla, 2001).

É também possível obter estimativas de custos através de uma técnica quantitativa baseada nas actividades da empresa envolvidas na sua produção (“Activity Based Costing” – ABC). Cada actividade da organização tem associado um custo que é parcialmente usado na estimativa do custo em função da quantidade estimada da sua utilização. Esta técnica combina, pois, valores apurados com valores estimados requerendo, todavia, uma grande definição do produto, tal como na estimativa detalhada. Em ambos os casos, estes métodos não se afiguram úteis durante a fase conceptual de desenvolvimento do projecto.

A estimativa paramétrica é bastante usada nas fases iniciais de desenvolvimento de um projecto sendo conhecida nos meios académicos por relações de estimativa de custos (“Cost Estimating Relationship” – CER). Consiste no uso de relações conhecidas entre custos e determinadas variáveis de projecto combinadas com lógica e bom senso. Um exemplo simples deste conceito é o facto de a relação entre o custo total de um avião e a sua massa ser praticamente linear, podendo os projectistas ter uma noção clara da repercussão das suas decisões iniciais, no custo final do avião (Fig. 2.8). Naturalmente, à medida que as relações envolvam mais variáveis e se tornem mais complexas, mais complexas serão também as relações matemáticas que as traduzem requerendo o uso de algoritmos ou de programas informáticos específicos. Trata-se de uma técnica bastante usada pelos projectistas para prever custos na fase inicial de projecto. Uma das suas desvantagens é de, por vezes, ser demasiado simplista baseando-se em suposições estatísticas que não traduzem exactamente a realidade. Não requerer uma definição detalhada do produto e não consumir uma grande quantidade de tempo, são vantagens do uso das estimativas paramétricas (Long, 2000).

O custeio baseado nas características (“Feature Based Costing” – FBC) é um tipo de estimativa que assenta no pressuposto de que quantas mais particularidades (por exemplo: furos, superfícies planas, cantos, dobras, etc.) um produto tiver, maior será o seu custo. Dada a necessidade de uma base de dados simultaneamente grande e específica, esta forma de estimativa de custos não tem ainda grande aplicabilidade mas está a ser aprofundada por várias empresas e universidades que lhe reconhecem potencialidades. Cada uma destas particularidades tem impactos diferentes no custo do produto e a repercussão da sua inclusão ou omissão durante o desenvolvimento dos produtos deve ser considerada pelos projectistas.

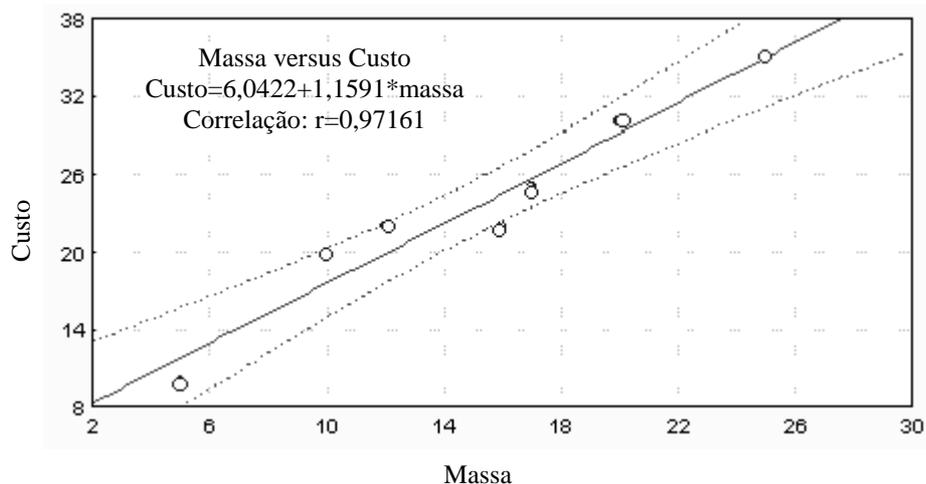


Fig. 2.8 - Exemplo de equação paramétrica (adaptado de Roy, 2003).

As características relevantes de um produto variam de empresa para empresa e de indústria para indústria, o que causa limitações ao uso deste método forçando cada empresa a definir as características relevantes dos seus produtos. A Tabela 2.3 ilustra diferentes

agrupamentos de tipos de características. A aproximação ao custeio baseado nas características do produto não está ainda suficientemente estabelecida e compreendida mas as empresas industriais consideram o conceito com interesse.

Tabela 2.3 - Exemplos de características de produtos (adaptado de Roy, 2003).

Tipo de característica	Exemplos
Geométrico	Comprimento, largura, profundidade, perímetro, volume, área.
Atributo	Tolerância, acabamento, densidade, massa, material, composição
Físico	Furo, cavidade, cabo, asa
Processo	Furação, camada, soldadura, máquina
Montagem	Interligação, inserir, alinhar, anexar
Actividade	Projecto, análise estrutural, controlo da qualidade

As redes neuronais consistem em sistemas computacionais que têm como objectivo reproduzir o processo de raciocínio humano. Em termos de estimativas de custos, o objectivo é a programação de um sistema que aprenda as relações dos atributos de um produto com o custo, isto é, munir o sistema com dados por forma a que este aprenda que atributos de um produto, influenciam fortemente o custo final. Investigações desenvolvidas têm demonstrado que as redes neuronais podem conseguir boas predições de custos (Bode, 2000). No entanto, nos casos em que são claramente conhecidas as relações paramétricas, estas revelam significativas vantagens em termos de precisão. Nesta comparação, as redes neurais apresentam a vantagem de poder detectar relações escondidas entre todos os dados com que são municiadas. As redes neuronais, para além de requererem grandes quantidades de dados, têm a desvantagem de só serem aplicáveis a produtos da mesma família ou similares não podendo, portanto, serem usadas em projectos inovadores.

O custeio baseado em analogia (“Case-Based Reasoning” – CBR) é uma técnica de estimativa baseada na assumpção de que produtos similares têm custos similares. De acordo com este método, identificando semelhanças e diferenças entre um novo produto com produtos existentes, e efectuando os ajustamentos adequados, é possível a obtenção de um custo estimado válido. O seu uso implica não só experiência, mas também um sistema com uma grande base de dados de situações passadas para que a sua utilização possa ser efectiva. Os valores assim obtidos são considerados robustos. Outro ponto forte desta técnica é o facto de permitir obter estimativas de uma forma rápida.

Os métodos de estimativa de custos apresentados têm características que os tornam apropriados para as diferentes fases do ciclo de vida de um produto, conforme ilustrado na Tabela 2.4. Nenhuma destas técnicas dispensa a participação e envolvimento de especialistas experientes.

Tabela 2.4 - Métodos de estimativa de custos e ciclo de vida de um produto (adaptado de Rush e Roy, 2000).

	Estimativa detalhada	Estimativa paramétrica	FBC	Redes neuronais	CBR
Fase conceptual de projecto (inovação)		x	x		x
Fase conceptual de projecto (produtos similares)		x	x	x	x
Estudo de exequidade		x	x	x	x
Definição do projecto		x	x	x	x
Desenvolvimento total do projecto	x		x		
Produção	x		x		

Caputo e Pelagagge (2008) classificaram os métodos de estimativas de custos conforme representado na Fig. 2.9, sendo as suas características, vantagens e desvantagens apresentadas na Tabela 2.5.

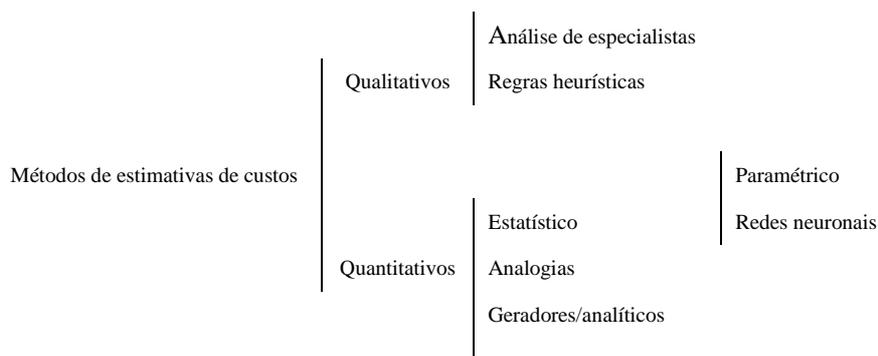


Fig. 2.9 - Classificação dos métodos de estimativas de custos (adaptado de Caputo e Pelagagge, 2008).

A escolha dos métodos de estimativas de custos depende de vários factores, como por exemplo o produto, o processo tecnológico, a informação disponível e constrangimentos específicos, no entanto, essa escolha será sempre condicionada pelas vantagens, limitações e capacidades de cada um dos métodos.

Em Caputo e Pelagagge (2008), os autores estudaram a estimativa de horas de trabalho numa empresa produtora de grandes reservatórios e reactores químicos. Estudaram o método de estimativa correntemente usado na empresa (baseado no custo de material e na alocação dos custos directos e indirectos aos vários centros de custos) e desenvolveram modelos paramétricos e neuronais a partir da informação da própria empresa. Comparando os valores das três estimativas (tradicional, paramétrica e neuronal) com os valores efectivamente ocorridos, os resultados das estimativas paramétrica e neuronal revelaram-se substancialmente mais precisos e com menor variabilidade, com ligeira primazia para os resultados obtidos pela rede neuronal.

Long (2000) compara três metodologias de estimativas de custos (paramétrica, analogia e detalhada (“grass roots”)) e conclui ser a estimativa paramétrica a mais vantajosa na medida

em que é a mais rápida, menos dispendiosa e de igual ou melhor precisão quando comparada com as restantes. É além disso, uma técnica aplicável em todas as fases de desenvolvimento de um produto (Tabela 2.6). Neste trabalho, o autor enfoca também que o sucesso do desenvolvimento de um novo produto assenta na combinação de três vectores fundamentais: desempenho, custo e planeamento.

Grande quantidade de projectos são, na verdade, sistemas compostos por vários componentes. Hicks *et al* (2002) estudaram a estimativa de custos destes produtos considerando as diversas classes de componentes (

Tabela 2.7), tendo desenvolvido modelos paramétricos de custeio específicos. Na metodologia aplicada, os autores consideraram a independência/dependência entre variáveis, conforme ilustrado na Fig. 2.10.

Tabela 2.5 - Caracterização dos métodos de estimativas de custos
(baseado em Caputo e Pelagagge, 2008).

Método	Aplicação/características	Vantagens	Desvantagens
Qualitativos	Baseados na experiência.	Não envolvem custos significativos.	Só indicam se uma alternativa é melhor que outra sem especificar valores absolutos.
Paramétricos	CrITÉrios estatísticos (regressões lineares e processos de optimização, por exemplo) são usados para identificar correlações entre custos e características dos produtos.	Não requerem uma definição detalhada do processo de manufactura.	Não identificam os factores relevantes do custo dos produtos.
Redes neuronais	Uso de critérios estatísticos para classificação, sumarização e extrapolação de dados.	São possíveis extrapolações e generalizações. Não requerem uma definição detalhada do processo de manufactura.	Requerem um grande conjunto de casos. Não identificam os factores relevantes do custo dos produtos.
Analogias	Identificação de um produto similar e reutilização da informação de custos, ajustando as diferenças entre produtos.	Proporcional à similaridade entre as características relevantes dos produtos.	Confiabilidade dependente da capacidade de identificação de diferenças entre o produto estudado e o de referência.
Geradores / analíticos	Análise detalhada do processo de produção, decomposição em operações de manufactura simples e posterior agregação dos seus custos estimados.	Constituem o método de maior precisão na medida em que representam todo o processo de criação do produto Identificação dos factores de custo principais.	Requerem grande quantidade de informação e de tempo porque necessitam do projecto detalhados dos produtos e dos seus processos de produção.

Tabela 2.6 - Aplicabilidade de metodologias de estimativa de custos por fase (adaptado de Long, 2000).

Fase	Paramétrica	Analógica	Pormenorizada
Conceptual	x	x	
Desenvolvimento	x	x	
Produção	x		x
Suporte e apoio	x		x

Tabela 2.7 - Classes de componentes e técnicas de modelação de custos (adaptado de Hicks *et al.*, 2002).

Classe do componente	Tipo de modelo de custo	
Normalizado e disponível	Listado (lista completa de preços correntes para uma determinada gama)	
	Família (representa a estrutura de custo de uma dada família de componentes)	Específico (representa o comportamento do custo de um determinado tipo de componente)
Projecto padrão		
Projectado especificamente	Configuração (captura os custos relativos devidos a mudanças dos atributos de um dado componente)	

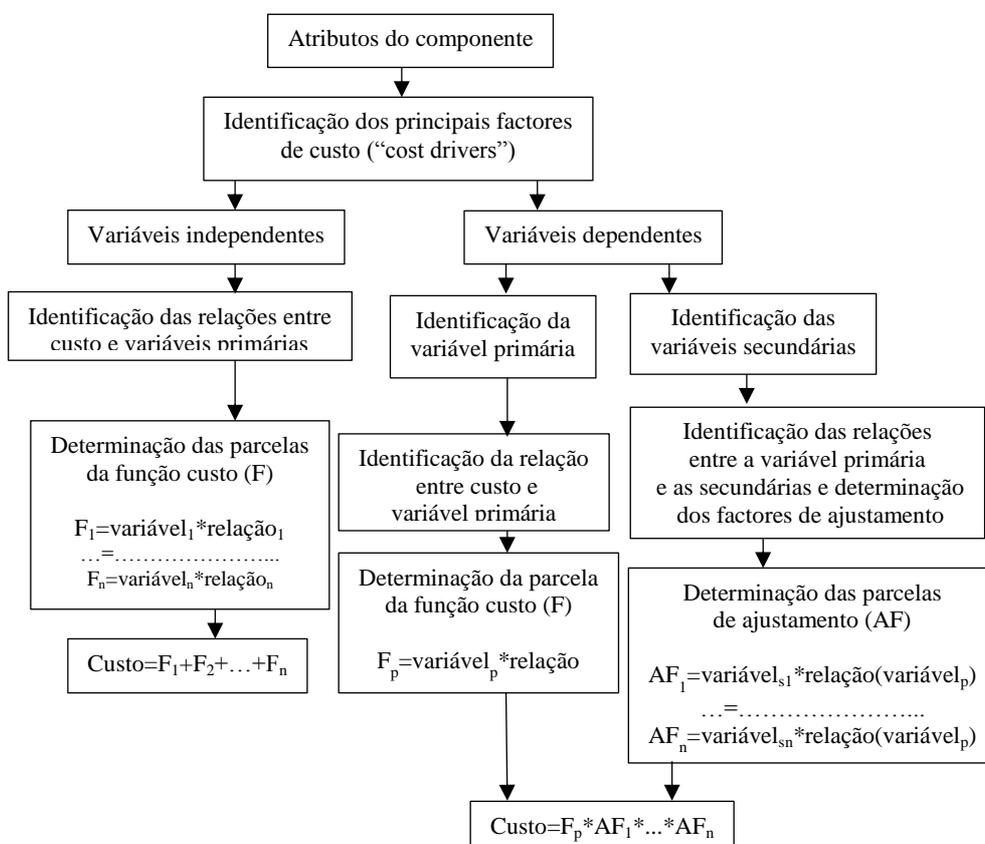


Fig. 2.10 - Processo genérico de desenvolvimento de relações de custo (adaptado de Hicks *et al.*, 2002).

Rush e Roy (2001) procuraram compreender, estruturar e integrar os processos mentais usados pelos estimadores de custos nas suas assumpções, julgamentos e decisões. Segundo eles, a compreensão e representação dos raciocínios usados pelos profissionais têm como benefícios:

- a representação do processo mental pode ajudar os estimadores a clarificarem o seu raciocínio no processo de geração de uma estimativa;
- melhor estruturação do processo mental;
- o conhecimento escondido dos especialistas é capturado e de possível reutilização por outros profissionais independentemente da sua experiência;
- o raciocínio que suporta as decisões fica exposto e sujeito a críticas e melhorias;
- estimativas existentes para requisitos similares podem ser usadas, compreendidas e mais facilmente modificáveis para satisfação de novas necessidades.

Estes autores identificaram o processo de analogia como o principal método de raciocínio usado pelos profissionais na geração de estimativas. Com base no estudo da forma de raciocinar de especialistas em estimativas de custos nas indústrias automóvel, aeroespacial e de defesa, foi desenvolvido o modelo de inferência seguido pelos estimadores quando estes fazem estimativas baseadas em comparações e analogias com projectos anteriores. A representação abstracta dos passos do raciocínio usados pelos estimadores é apresentada na Fig. 2.11, onde os rectângulos descrevem os tipos de dados usados para inferência ou raciocínio num determinado nível de abstracção, as ovas representam os processos de inferência ou raciocínio e os rectângulos boleados indicam as interacções com o exterior.

Os autores sustentam que este processo de raciocínio é independente da fase de projecto, ou seja, é o mesmo desde a fase conceptual de um produto até ao seu desenvolvimento total. O seu propósito é o desenvolvimento de um programa informático de apoio à estimativa de custos.

Na sua dissertação de doutoramento, Layer (2003) propõe que as empresas construam uma base de dados relativa aos seus produtos, suas soluções técnicas e custos directos. Baseando-se no princípio de que problemas semelhantes têm soluções semelhantes, os projectistas poderiam, assim, monitorizar o custo do produto durante o desenvolvimento do projecto. Naturalmente, este sistema pressupõe a existência de um histórico bastante significativo relativamente a produtos já existentes. Requer além disso, uma arquitectura informática específica na qual interagem as áreas de Projecto, Produção e Contabilidade.

Considerando que, no domínio da mecânica, um novo produto é frequentemente resultado de uma ou várias mudanças de parâmetros de produtos já existentes, Talbi (2001) propõe também uma metodologia que se baseia em analogias e interpolações a partir do histórico da empresa para estimar os custos de novos produtos. O autor propõe uma aplicação que se vai enriquecendo com a antiguidade da empresa.

Em sectores extremamente competitivos, como seja por exemplo a indústria aeronáutica, mesmo a predição do custo de projecto conceptual, se revela importante. Neste âmbito, Roy, *et al.* (2001) propõem uma metodologia baseada num conjunto de relações de estimativa de custos (quantitativas e qualitativas) com origem nos respectivos custos relevantes (“cost drivers”) e cuja integração prediz o esforço futuro necessário no projecto conceptual de um produto.

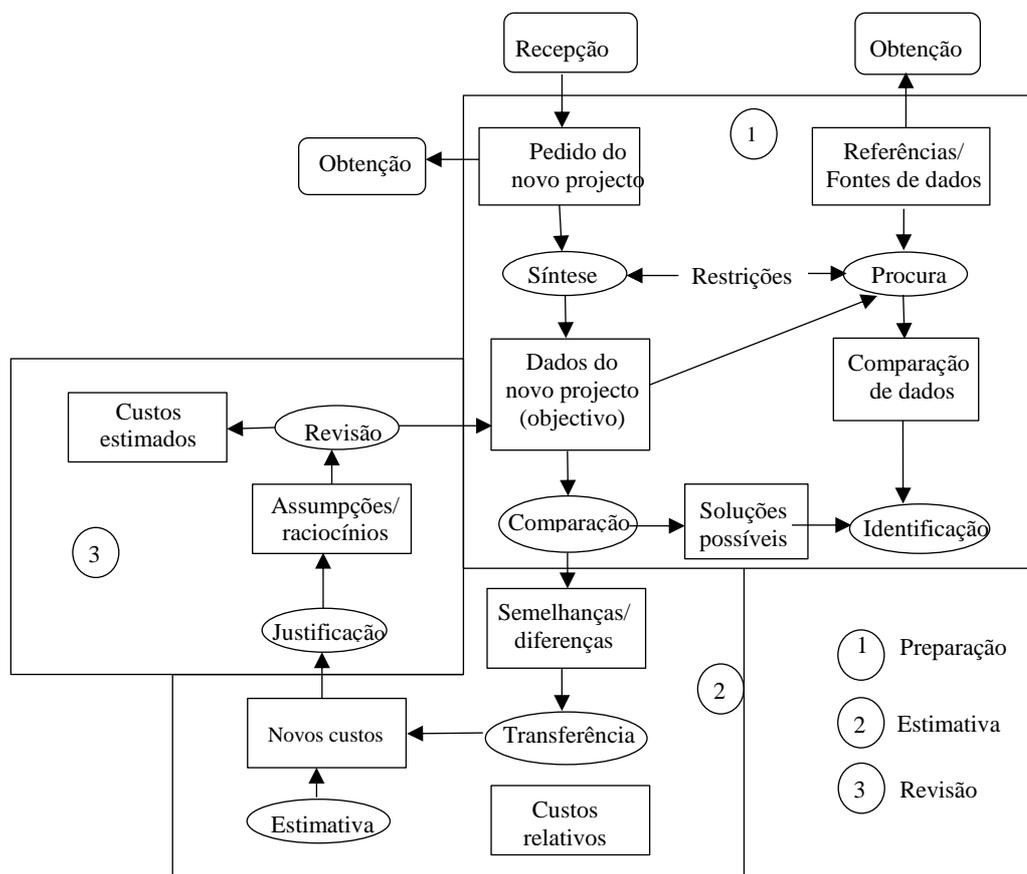


Fig. 2.11 - Estrutura de inferência em estimação de custos baseada em analogia (adaptado de Roy e Rush, 2001).

Neste mesmo sector, Eaglesham (1998) propõe o desenvolvimento de um sistema informático de custeio de apoio ao projecto (“Design Decision Support System” - DDSS) o qual procura informação de custos de produtos ou funções existentes, mas dispersas, nas diversas áreas das empresas. É um sistema que usa informação disponível internamente, baseado nas actividades desenvolvidas na empresa (ABC), porém de implementação e manutenção demoradas e dispendiosas.

Mauchand *et al.* (2008), constataam que a investigação sobre estimativas de custos assenta sobre características da manufactura dos produtos e concluem sobre a carência de um método que permita a estimativa de custos na fase preliminar de projecto. Para o efeito propõem uma ferramenta que sirva de suporte à tomada de decisões na fase inicial de projecto. Assumem que a estimativa de custo de um produto manufacturado é induzida pelos recursos consumidos.

A metodologia proposta por estes autores formaliza um guião para a estimativa desses recursos a partir do produto ainda na sua fase conceptual de projecto. A solução adoptada é resultado da combinação entre a forma do produto, o material a usar, as tecnologias possíveis, as características superficiais e as quantidades a produzir (Fig. 2.12). Com base na decisão da solução é gerada a estimativa de recursos e o custo resultante. É intenção dos autores, o desenvolvimento de um programa informático para aplicação deste método.

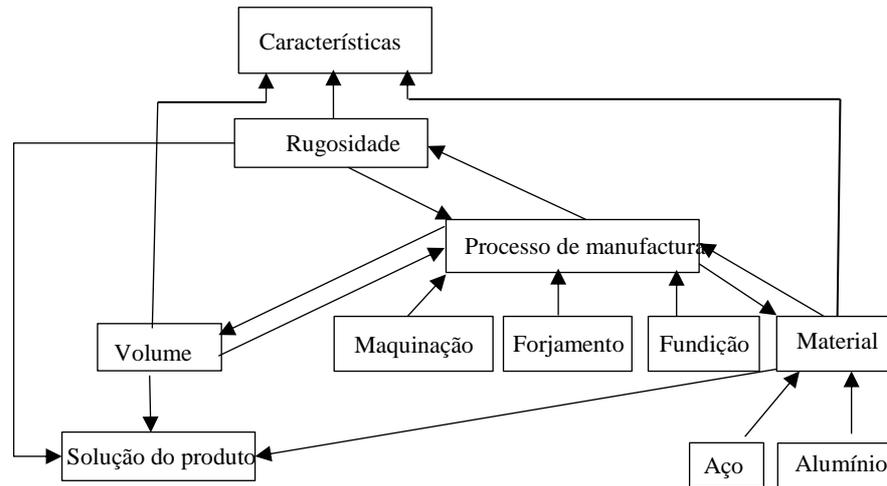


Fig. 2.12 - Exemplos dos conceitos relativos à modelação do produto e do processo (adaptado de Mauchant *et al.*, 2008).

O planeamento do processo na sua fase conceptual visa avaliar a manufacturabilidade e os respectivos custos estimados na fase inicial do projecto de um produto. Este conhecimento é de grande relevância dado que, quer a sua manufactura, quer o seu custo final, ficam em grande parte determinados por decisões tomadas nesta fase. Feng & Zang (1999) associam ambas as fases conceptuais com o objectivo da interoperabilidade entre produto e processo (Fig. 2.13) para conduzir a uma estimativa mais fiável de custos de produção. A selecção do processo segue, por esta ordem, os seguintes passos: material, quantidade, forma geométrica e tolerâncias. Finalmente é seleccionado um processo de produção que satisfaça todos estes constrangimentos e é então possível proceder a uma estimativa de custos. Com esta sequência fica assegurada a rastreabilidade do efeito de cada uma das características do produto.

O método de estimativa de custos baseia-se nos recursos consumidos: material, capital, mão-de-obra e custos gerais através da expressão (2.4) (Feng & Zang,1999):

$$C = C_m + \frac{C_c}{N} + \frac{C_l}{N'} + C_{np} \quad (2.4)$$

em que,

C – Custo estimado por peça

C_m – Custo de material por peça

C_c – Custo de capital no uso e compra de equipamento

C_l – Custo de mão-de-obra por unidade de tempo

C_{np} – Custos gerais por peça

N – Número de peças

N' - Número de peças por unidade de tempo

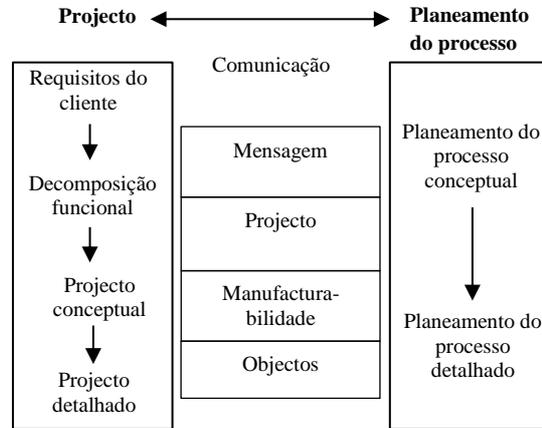


Fig. 2.13 - Integração através da comunicação entre projecto e planeamento do processo (adaptado de Feng & Zang, 1999).

Er & Dias (2000) desenvolveram um trabalho na área de fundição em que sugerem ser o custo estimado, o factor decisivo para a opção do processo de fundição de entre todos os que garantam a sua adequabilidade quanto à precisão dimensional e geométrica e quanto ao tipo de metal e quantidade de produção. Segundo o seu modelo, não são feitas estimativas dos custos de diferentes processos de fundição, mas apenas são calculados custos comparativos com o processo de fundição em areia tendo como base o peso e a complexidade da forma.

Enquanto os conceitos de projecto para a manufactura e a engenharia simultânea têm tido significativos avanços de integração da função projecto com as outras áreas funcionais da empresa sob o ponto de vista funcional, todavia ainda não é disponibilizada aos projectistas a informação precisa e atempada de custeio dos produtos. Segundo Geiger & Dilts (1996), tal é devido a três razões:

- Falta de ligação tradicional entre a função de projecto e a estimativa de custos habitualmente situada nos serviços de contabilidade.
- Falta de ferramentas apropriadas para disponibilizar aos projectistas um rápido “feed-back” dos custos.
- Inabilidade para integrar a imensa e heterogénea informação das diversas áreas da empresa.

Geiger & Dilts (1996) propõem a criação de um sistema automático de custeio final aplicado a operações de maquinação que disponibiliza informação aos projectistas durante a fase de projecto, o que melhora significativamente, quer a própria actividade de projecto, quer a

posição competitiva da empresa. Os autores apelidam este sistema de “*Design-To-Cost*” (DTC). Esta designação não é consonante com a proposta por Shehab e Abdalla (2001).

Embora os sistemas de projecto que atendam a manufacturabilidade de um produto (“*Design For Manufacturability*” - DFM) e a Engenharia Simultânea tenham tido grandes desenvolvimentos, Geiger & Dilts (1996) propõem no seu modelo a incorporação dos conceitos de modelação baseada na funcionalidade (“*Feature-Based Modelling*” - FBM), Tecnologia de Grupo (“*Group Technology*” - GT) e de custeio baseado na actividade (“*Activity-Based Costing*” - ABC). Dado que o projecto e o custeio estão tão interrelacionados, a filosofia DTC propõe que o custeio seja considerado um parâmetro formal de projecto.

Rajkumar Roy, talvez um dos investigadores nesta temática com mais obra publicada, descreve em Roy *et al.* (2001) uma metodologia de estimativa de custos para prever o custo de um produto durante as fases conceptuais de desenvolvimento, através da obtenção de relações de estimativas de custos (“*Cost Estimating Relationships*” - CER) que integram factores, quer quantitativos, quer qualitativos. Neste contexto, os factores quantitativos estão relacionados com a quantidade efectiva de tempo de projecto (trabalho) enquanto os factores qualitativos estão relacionados com o tempo gasto pelos projectistas a pensarem sobre o problema ou a trocaram ideias com os restantes membros da equipa de Engenharia Simultânea.

Os autores constataram que não obstante existir bastante bibliografia sobre estimativas de custos, muito poucos trabalhos a abordam durante a fase de projecto e nenhum deles contempla factores qualitativos.

A metodologia implica a identificação dos factores que afectam significativamente o custo (“*cost drivers*”). Massa, área, volume e quantidade são exemplos de factores quantitativos e qualidade, complexidade, material e processos de manufactura, são exemplos de factores qualitativos. A Fig. 2.14 apresenta as várias etapas da metodologia.

A peculiaridade deste estudo reside na utilização do conceito de função composta; sendo neste caso o tempo de projecto a variável a estimar, através de regressão linear, são estabelecidas as relações com os factores qualitativos. Posteriormente, também através de regressão linear, são determinadas as relações entre a informação conceptual (variável independente) e os factores qualitativos (variável dependente). Finalmente os dois tipos de relações são combinados sendo a informação conceptual a variável independente e o tempo a gastar, a variável dependente. Esta composição de funções é ilustrada na Fig. 2.15.

Shehab e Abdalla (2001) trabalharam também na área de estimativa de custos apresentando uma metodologia para assistir projectistas inexperientes na estimativa dos custos de produção de um produto durante a fase conceptual de projecto. Este trabalho restringe-se a produtos maquinados e consiste na integração de sistemas de conhecimento de custos com sistemas de bases de dados de materiais e sistemas de CAD. No que se refere à estimativa de custos e na ausência de dados heurísticos, os autores propõem o uso de aproximações analíticas

ou de raciocínios de relacionamento (“fuzzy logic”). A metodologia apresentada (Fig. 2.16) tem, segundo os autores, a capacidade de:

- indicar a técnica de montagem mais económica;
- seleccionar o material, bem assim, como o processo de manufactura;
- estimar o custo total do produto.

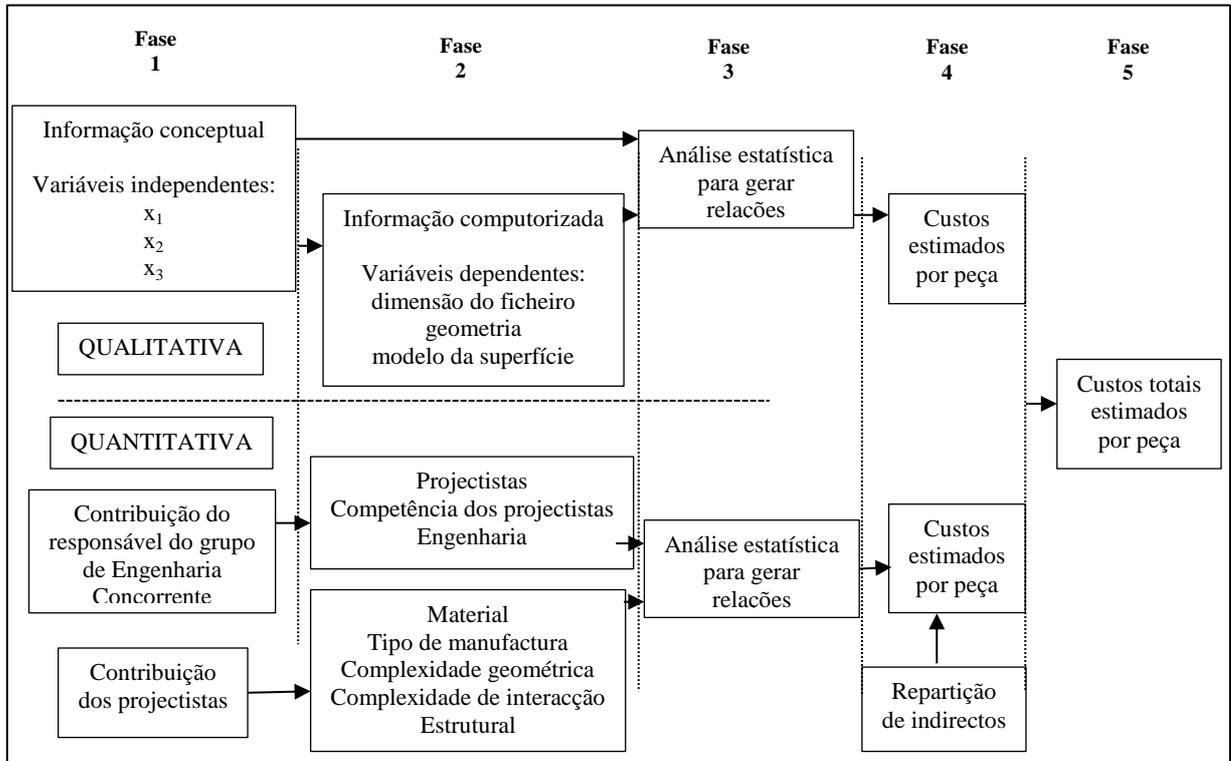


Fig. 2.14 - Representação esquemática da metodologia apresentada em Roy *et al.*, 2001 (adaptado).



Fig. 2.15 - Combinação de relações (adaptado de Roy *et al.*, 2001).

Eversheim *et al.* (1998) propuseram uma metodologia que combina o projecto de um produto, o planeamento do processo e a estimativa de custos. O seu objectivo visa dotar as equipas de projecto com meios que lhes permita avaliar como as decisões tomadas na fase inicial de projecto, se repercutem nos custos. Considerando que o constante surgimento de novas tecnologias pode alterar a manufactura de componentes e a sua montagem, a metodologia proposta propõe a avaliação de custo e desempenho de uma solução de projecto de cima-para-baixo, isto é, sobre o projecto de um sistema e não sobre um componente individual. Deste modo, é possível a comparação entre soluções diferentes, uma vez que os resultados finais são os mesmos. Segundo os autores, o procedimento para selecção de um sistema é subdividido em

três funções (derivação do desempenho do sistema, avaliação do sistema de custos e apresentação de resultados e processo de decisão), cada uma delas realizada por um módulo apropriado (desempenho, custos e apresentação).

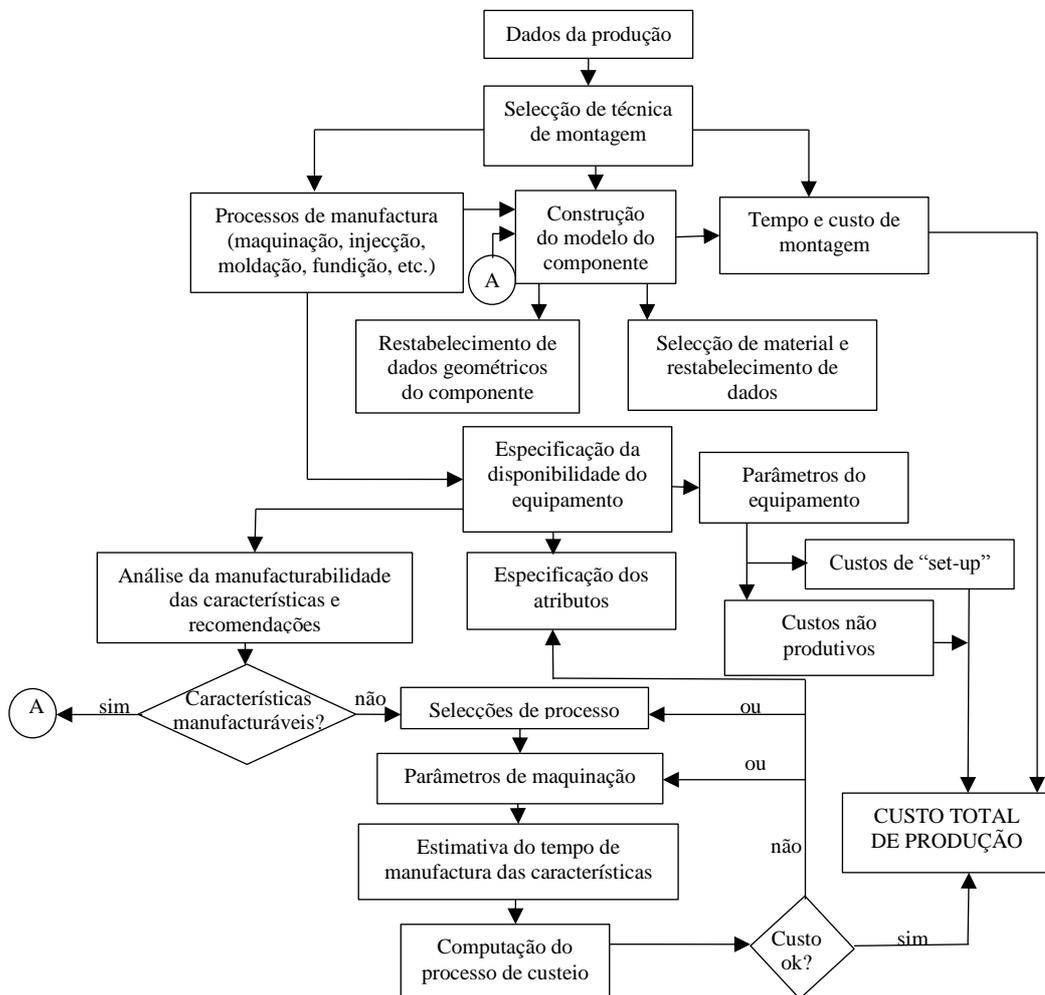


Fig. 2.16 - Processo de análise de custo (adaptado de Shehab e Abdalla, 2001).

A Fig. 2.17 ilustra esquematicamente esta metodologia em que são utilizados módulos genéricos para a optimização do projecto integrado de produto e processo e as relações entre custo e desempenho nas fases iniciais de projecto.

O módulo de desempenho usa o QFD para identificação das relações entre as necessidades do cliente e os requisitos do sistema, enquanto o módulo de custos segue a técnica tradicional de cálculo e soma de todos os custos directos e indirectos estimados. O módulo de apresentação e conclusão consiste na representação gráfica da capacidade de satisfação das necessidades do cliente pelos diversos sistemas gerados (desempenho) em função do custo. A empresa poderá, então, tomar a decisão de escolha considerando factores como a sua posição no mercado, volume de produção, concorrência ou política estratégica da qualidade. Esta metodologia foi estudada estritamente no âmbito da indústria automóvel e o seu módulo de

custos indicia demasiada pormenorização, não compatível com a grande incerteza característica das fases iniciais de projecto de qualquer produto.

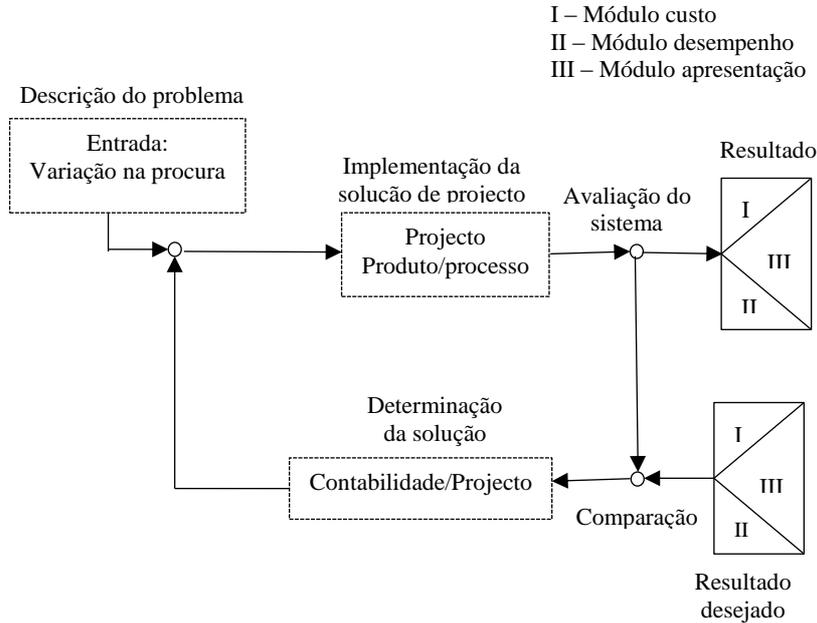


Fig. 2.17 - Sistema de controlo da metodologia proposta por Eversheim *et al.*, 1998 (adaptado).

Rehman e Guenov (1998) propõem para estimativa de custos na fase conceptual de projecto, um método teórico híbrido entre custeio baseado em analogia (CBR) e conhecimento (“knowledge-based”). Segundo este modelo, a partir dos requisitos de um novo projecto seria identificado numa base de dados, o projecto mais similar cujo custo é conhecido. O armazenamento da informação estaria hierarquicamente organizado em diferentes níveis de abstracção permitindo a sua decomposição (Fig. 2.18).

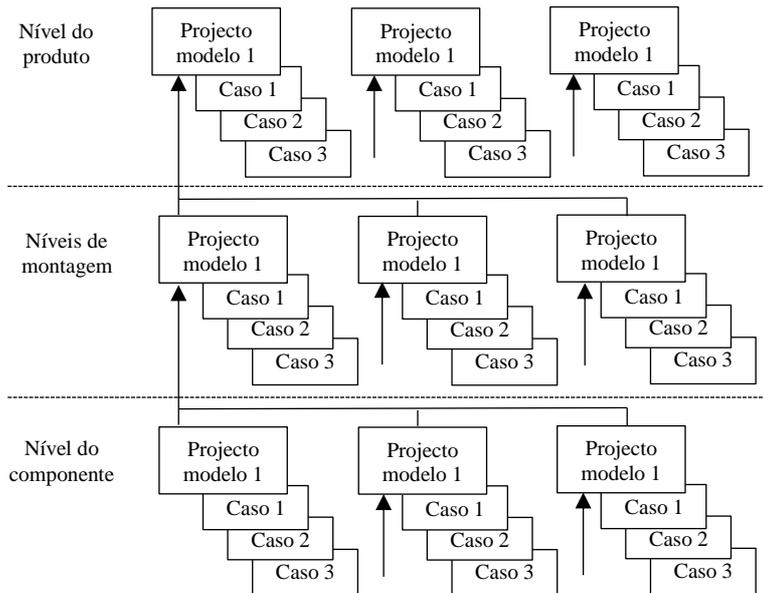


Fig. 2.18 - Estrutura de projecto baseado em casos anteriores (adaptado de Rehman e Guenov, 1998).

Neste modelo (não validado), os requisitos não satisfeitos por uma dada solução, seriam alcançados a partir de adaptações de outras soluções conhecidas. Assim, ao longo do desenrolar do projecto o custo estaria automaticamente actualizado.

As redes neuronais permitem classificar dados e gerar funções aproximadas baseadas num determinado conjunto de informação. Bode, (2000) estudou estas propriedades e usou-as na estimativa de custos nas fases iniciais de projecto de novos produtos. Comparou também os resultados obtidos com estimativas baseadas em métodos convencionais (regressões lineares e não-lineares), tendo concluído serem as redes neuronais um bom método quando existe um histórico de projectos similares, são poucos os factores de custo significativos e desconhecida a forma como se repercutem (Tabela 2.8).

Tabela 2.8 - Critérios para selecção de métodos de estimativas de custos (adaptado de Bode, 2000).

Usar redes neuronais quando...	Usar estimativas paramétricas quando...	Usar estimativas detalhadas quando...
-existem alguns casos similares anteriores e... -não há certeza em quais os atributos com importância no custo e... - são poucos os factores importantes no custo e... -não é conhecida a forma como influenciam o custo.	-existem alguns casos similares anteriores e... -são conhecidos com precisão quais os atributos com importância no custo e... -não são muitos os factores importantes no custo, e... -se admite conhecer a forma como influenciam o custo.	-é conhecido exactamente o número de horas de trabalho e quantidades de material requeridas e... - são conhecidos com precisão quais os atributos com importância no custo e... -é conhecida com exactidão a forma como influenciam o custo

A área de estimativa de custos durante a fase de projecto tem sido, durante as últimas décadas, objecto de interesse por parte da comunidade académica. A sugestão da sua inclusão nos curricula dos cursos de Projecto em Engenharia Mecânica, é uma evidência da sua crescente importância (Drigel, 2008). Nas páginas anteriores foram apresentados alguns trabalhos sobre esta temática, naturalmente diversos quanto aos âmbitos de aplicação e metodologias propostas. Muitas mais investigações têm sido feitas sobre este assunto. Reconhecendo a impossibilidade de identificar e apresentar tudo o que nesta área se tem publicado, são listados na Tabela 2.9 outros trabalhos afins resultantes do levantamento bibliográfico efectuado.

O levantamento bibliográfico efectuado, não pretendendo ser exaustivo, revela abordagens metodológicas diferenciadas, sendo mesmo algumas de aplicabilidade restrita. Apesar da existência de sistemas computacionais sofisticados e de grande quantidade de conhecimento científico, a área de estimativa de custos durante a fase de projecto conceptual afigura-se ainda carente de homogeneização, sistematização e de aplicabilidade transversal, não obstante a sua reconhecida importância. Com efeito, a generalidade da bibliografia sobre o tema caracteriza-se por ser direccionada a determinada tecnologia ou grupos de tecnologias. Alguns

autores propõem sistemas automáticos de custeio que requerem extensas bibliotecas (materiais, tolerâncias, processos, etc.) de suporte, nem sempre existentes ou possíveis, dependendo do tipo de produto. Por outro lado, muito poucos trabalhos (Eversheim *et al.*, 1998) se debruçam sobre a relação entre o custo e desempenho durante a fase inicial de projecto. O sucesso de um projecto dependerá fortemente destes dois factores não devendo as decisões tomadas nesta fase, deixar de ter em consideração as relações entre ambos.

Tabela 2.9 - Trabalhos publicados sobre estimativas de custos durante a fase de projecto (listagem não exaustiva).

Autores	Metodologia	Campo de aplicação	Observações	Inconvenientes
Maden et al. (2007)	Conjunção de relações paramétricas.	Fundição	Considera custos relativos a moldes, materiais, energia, aspectos geométricos, tempos de ciclos e taxas de vazamento.	
Bode (2000)	Redes neuronais.	Genérico, fase conceptual de projecto	Compara estimativas paramétricas com estimativas obtidas com redes neuronais, estas apresentam menores desvios desde que estejam reunidas duas condições: suficientes casos anteriores e conhecimento dos atributos com significativa influência nos custos (“cost drivers”).	-Limitado número de factores de custo significativos. -Não apropriado para produtos radicalmente novos.
Lederer e Prasad (1992)	Estabelecimento de nove regras de gestão de estimativas de custos.	Empresas com bons recursos computacionais.	Estabelecimento das regras com base nas respostas de um questionário a 115 gestores informáticos, programadores e analistas.	Subjectividade elevada.
Fayek e Flores (2010)	Lógica difusa (“fuzzy logic”).	Construção civil.	Cálculo de um índice por comparação com um projecto ideal em termos de requisitos e custos.	
Roy <i>et al.</i> (2011)	Estimativa detalhada de custos.	Fase conceptual de projecto na indústria automóvel.	Construção de um portal na Internet com infra-estrutura da informação relevante.	Pormenorizado e moroso.
Lin <i>et al.</i> (2012)	Modelo automático para estimativa do custo de produção e da performance do sistema produtivo. Baseado em relações paramétricas e ABC.	Fase conceptual de projecto de pás de helicóptero.	“Outputs”: custo/peça, tempo/peça, tempo/operação, capacidade de produção, etc.	Muito específico.
Lee et al. (2011)	Projecto desenvolvido com base na comparação entre a função de custo óptimo e a função de custo estimado com origem em analogias.	Genérico.		Complexidade, subjectividade e morosidade elevadas.
Kravanj a e Žula (2008)	Optimização através de programação não-linear.	Edifícios de estrutura metálica.	Optimização simultânea do custo, topologia e secções das vigas.	

(Continua)

Tabela 2.9 (Continuação) – Trabalhos publicados sobre estimativas de custos durante a fase de projecto (listagem não exaustiva).

Sarma e Adeli (2000)	Optimização da função custo considerando também, para além do peso, o custo dos elementos de ligação, o transporte e a montagem.	Edifícios de estrutura metálica.	Pode conduzir a ganhos de 7% a 26%, quando comparada com optimizações exclusivamente baseadas no peso.	
Roy <i>et al.</i> (2008)	Aumento da eficácia da comunicação entre a área comercial e a área de projecto baseado na decomposição funcional.	Pequenos sistemas.	Mapeamento função-atributo-parâmetro. Estimativa de custos baseada em projectos similares e em histórico de informação.	Impraticável em grandes sistemas e em projectos totalmente inovadores.

A estimativa de custos durante a fase conceptual de projecto, é pois, uma área ainda parcialmente em aberto, passível de ser complementada e melhorada, em particular para produtos verdadeiramente novos e para produtos complexos. É neste âmbito que se insere o presente dissertação, na qual é apresentada uma metodologia que integra a estimativa de custos com o desempenho dos produtos, propondo percursos diferenciados consoante o conhecimento existente sobre os mesmos. Estas duas áreas serão determinantes para o sucesso do produto e com base nelas os projectistas poderão suportar as suas decisões ainda na fase conceptual do desenvolvimento.

2.4 Sustentabilidade

O conceito de sustentabilidade ambiental é uma preocupação recente. Começou a ganhar relevância nas décadas de 70 e de 80 do século passado, no auge da Guerra Fria quando alguns sectores da população mundial se aperceberam que o arsenal nuclear existente, seria mais que suficiente para num ápice extinguir toda a vida no planeta. O resultado de uma maravilhosa evolução de milhares de milhões de anos não poderia depender uma qualquer quezília (absolutamente insignificante na escala temporal) entre nações. Essa preocupação alargou-se a todo os factores que pudessem afectar o equilíbrio ambiental e, de certa forma, condicionar a existência saudável das gerações vindouras, bem como todos os seres vivos no geral. Ganhou-se consciência que todos vivíamos na mesma casa: o planeta Terra.

Na Alemanha, epicentro desta nova consciência, foi fundado o partido político “Os Verdes” em Janeiro de 1980. Hoje em dia existem partidos políticos de ideologia ambientalista/ecologista em quase todas as democracias pluralistas. Apesar da expressão representativa destes partidos ser geralmente diminuta, o resultado da sua acção transcende a sua dimensão política e hoje em dia existe uma consciência generalizada de respeito pelos factores ambientais. A forma natural como uma parte da população mundial já separa e deposita

em locais próprios o lixo por si gerado, constitui um bom exemplo desta tomada de consciência colectiva. Todavia, este é um pequeno exemplo de um problema bem grande:

- os recursos do planeta são finitos;
- a população mundial tem crescido de uma forma muito rápida; actualmente existem cerca de 7 000 milhões de pessoas. Os últimos 4 milhares de milhões aconteceram a ciclos de 12 a 15 anos;
- todos os anos se extinguem espécies animais e vegetais.

Perante estas circunstâncias, as preocupações de sustentabilidade ambiental vão inexoravelmente estar presentes, de uma forma cada vez mais forte, na sociedade humana. Como consequência, esta tomada de consciência colectiva passou também a reflectir-se no projecto de novos produtos, desde o tipo de matérias-primas usadas até ao fim do seu ciclo de vida e posterior desmantelamento e destino dos materiais. Surgiu, assim nas últimas décadas o conceito de eco-projecto, que basicamente consiste em projectar procurando minimizar os impactos ambientais ao longo de toda a vida dos produtos. Esta característica tende a ganhar importância junto do binómio tradicional desempenho/custo no que se refere a avaliações e opções entre produtos. A adopção do conceito de desenvolvimento sustentável por parte das empresas, é presentemente já considerado como valor de negócio.

O mundo não deve estar submetido apenas a critérios economicistas. De acordo com os actuais conhecimentos científicos, faltam cerca de 4,5 mil milhões de anos para que o Sol se extinga. Se não se actuar no sentido da sustentabilidade ambiental, a vida na Terra não chegará a tanto.

Esta problemática não tem um cariz nacional mas sim mundial. Em 1972 realizou-se a primeira grande Cimeira sobre o Homem e o Ambiente, em Estocolmo, sob a égide das Nações Unidas. De então para cá, várias outras conferências relevantes se têm realizado, nomeadamente (Esnault, 2009):

- 1992, Conferência das Nações Unidas no Rio de Janeiro, sobre ambiente e desenvolvimento;
- 1995, Protocolo de Cartagena, sobre as prevenções dos riscos biotécnicos;
- 1997, Protocolo de Quioto sobre a redução da emissão dos gases com efeito de estufa;
- 2000, Declaração das Nações Unidas sobre os objectivos do milénio para o desenvolvimento;
- 2002, Cimeira Mundial da Terra, em Joanesburgo, que aponta a necessidade de mudança dos modos de produção e de consumo.

Como consequência desta nova atitude surgiu nas últimas décadas o conceito de eco-projecto (ou eco-concepção) o qual pode ser definido como uma aproximação sistemática para

concepção de produtos que satisfazem as necessidades do utilizador com redução dos seus impactos ambientais ao longo de todo o seu ciclo de vida (Esnault, 2009).

A poluição e a problemática energética são duas vertentes de elevada importância, em termos de protecção ambiental. Uma sua sistematização é apresentada na Tabela 2.10 e na Tabela 2.11, respectivamente.

Em França, em 1992, foi constituída a Associação Orée (Association Orée, 2012), composta por empresas, autarquias, associações profissionais e organizações académicas com o objectivo de desenvolver uma reflexão conjunta sobre as melhores práticas ambientais e a gestão da sua implementação integrada. Esta associação editou em 2012 um guia denominado: "Animer le lancement d'une démarche d'éco-conception pour améliorer la compétitivité de l'entreprise" o qual sugere actuações a todas as empresas que pretendam seguir uma estratégia inovadora, competitiva e duradoura, que integre critérios ambientais. Este guia identifica, com clareza, áreas de actuação numa perspectiva de eco-projecto, ao longo de todo o ciclo de vida de um produto (Tabela 2.12).

Tabela 2.10 - Principais fontes de energia (adaptado de Esnault, 2009).

Energias fósseis	Quota na produção mundial de electricidade
Carvão	39%
Petróleo	10%
Gás natural	15%
Urânio (não é fóssil, é finita)	16% (78% em França)
Energias renováveis	
Bioenergia	Madeira, Agro-carburantes (soja, girassol, trigo, milho, cana-de-açúcar, algas marinhas, etc)
Solar	Células fotovoltaicas, Painéis solares
Eólica	
Geotérmica	
Marítima	Ondas, Correntes, Marés

Uma estratégia de gestão que incorpore o conceito de eco-eficiência, implica o desenvolvimento de processos produtivos mais eficientes, com redução dos recursos usados, desperdícios e poluição ao longo de toda a cadeia de valor. Consoante os seus objectivos, Puyou (1999) classifica as intervenções possíveis em três grupos (Fig. 2.19). O conceito de eco-tratamento, por ser curativo e frequentemente se limitar a uma única etapa do ciclo de vida do produto, tem sido o de maior aplicação até ao momento. Muito poucos produtos foram projectados de raiz tendo em conta preocupações de sustentabilidade ambiental (Panarotto & Törling, 2011). É necessária inovação para atingir uma nova revolução industrial com foco na sustentabilidade. Só assim o planeta será salvo da sua corrente degradação.

Tabela 2.11 - Principais fontes de poluição e suas consequências (adaptado de Esnault, 2009).

Poluição atmosférica	Gases com efeito de estufa	Gás	Origem natural	Origem antrópica	
		H ₂ O (vapor de água)	Evaporação das plantas, do solo, dos rios, dos oceanos		
		CO ₂	Respiração dos seres vivos, incêndios, erupções vulcânicas	Combustão de energias fósseis (gases de escape dos automóveis), indústria, desflorestação	
		CH ₄ (metano)	Decomposição de matérias orgânicas em meios privados de oxigénio	Combustão de matéria orgânica, pecuária, exploração de gás natural	
		N ₂ O	Produto da transformação de nitratos por bactérias	Adubos azotados, combustão de biomassa, pecuária	
		O ₃ (ozono)	Incêndios florestais	Transformação, através de UV, de poluentes como o NO ₂	
		Halocarbo netos (por ex.:CFC)		Utilizados como refrigerantes, gas propulsor dos aero sóis	
	Destruidores da camada de ozono	Principais gases		Exemplos de consequências	
		Compostos clorados (por ex. CFC)		-mutações genéticas -blocagens da fotossíntese -perturbações na reprodução do fitoplâncton -cancros de pele -deficiências imunitárias	
		Óxidos de azoto			
CH ₄					
CO ₂					
Nevoeiro fotoquímico			-irritação das mucosas		
Chuvas ácidas	SO ₂	-para a saúde pública, problemas cardíacos e respiratórios -para os vegetais, destruição da clorofila das folhas - para os edifícios, erosão das superfícies metálicas e corrosão das pedras			
	NO _x				
Compostos orgânicos voláteis	Butano, propano, etanol, acetona, benzeno, solventes em tintas		toxicidade, mutantes ou cancerígenos (benzeno)		
Poluição da água e do solo (de origem não atmosférica)	Fontes de poluição		Exemplos de poluentes emitidos		
	Industria		Metais pesados (cobre, chumbo, manganés, cromo, cádmio, boro, mercúrio, molibdénio, níquel, antimónio), gorduras, hidrocarbonetos, ácidos, bases, matérias radioactivas		
	Agricultura		Nitratos e fosfatos contidos em adubos e dejectos animais, produtos fitossanitários		
	Águas domésticas		Fosfatos de detergentes, agentes coliformes e estreptococos fecais		
	Aterros		Metais pesados, solventes, matéria orgânica, hidrocarbonetos		

Tabela 2.12 - Eco-projecto ao longo do ciclo de vida de um produto
(adaptado de Association Orée, 2012).

Fase	Vertentes	Sub-vertentes	
Matérias-primas	De origem reciclada		
	Renováveis		
	Recicláveis		
	Transportes	Tipo de transporte, proximidade	
Produção	Condições de trabalho	Ergo-concepção	
	Tecnologia	Própria	Melhores tecnologias disponíveis
	Consumos	Energia	Renováveis, limite de consumo
		Água	Tratamento de efluentes, limite de consumo
	Resíduos	Prevenção	Limitação de resíduos
		Regenerados	
		Sem perigo	Inertes
	Valorizados	(ver fim-de-vida)	
Complexidade do processo	Limitar nº de etapas		
Embalagem / Logística	Optimização	Peso limitado, monomaterial	
		Volume optimizado	
		Informação	Uma cor, tinta vegetal, cunhar
	Reutilizar	Voltar ao fabricante, nova função	
	Transportes	Proximidade	
		Tipo de transportes	Fluvial
		Optimização de entregas	
Instalação	Tipo de montagem	Não definitiva, colas aquosas	
Utilização	Autónoma	Sem consumíveis	
		Energia renovável	Muscular, solar
	Consumos	Energia	Renovável, economizar
		Água	Economizar
		Alertar, registar, sensibilizar	
	Resíduos	Limitar, evitar, reutilizar	
	Duração de vida	Registo de utilização	Estimativa
		Adaptação/optimização	Manutenção, conservação
Melhoria tecnológica (reparável, adaptável, modulável)			
Apenas o necessário			
	Multi-função, evolução		
Comportamento	Documentação		
	Sensibilizar	Sensorial, boas práticas, etiqueta energética	
Fim de vida	Biodegradável	Abandono	Biodegradável em matéria útil
			Sensibilização dos utilizadores
	Reutilização	Componentes	Mesma função, outras funções
	Valorização	Reciclagem	Recolha existente, desmontagem
Incineração		Limitar poluição, recuperação de energia	
Compostagem		Recolha	
Novo conceito	Venda de um serviço em vez de um produto		

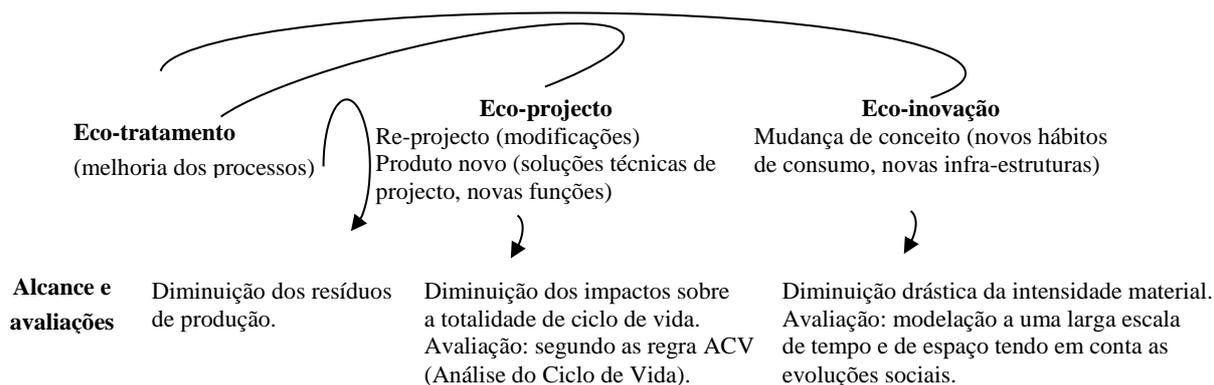


Fig. 2.19 - Abordagens de sustentabilidade ambiental (adaptado de Puyou, 1999).

A incorporação do objectivo da sustentabilidade nas tomadas de decisão levou à necessidade do desenvolvimento de relações métricas de relacionamento de performance ambiental e económica. Segundo Schwarz et al. (2002) estas relações devem ser simples, úteis para a tomada de decisão, de fácil entendimento para a generalidade das audiências, reproductíveis (resultados consistentes e comparáveis), robustas, acumuláveis ao longo do processo e protectivas de informação tecnológica. Os autores propõem cinco indicadores principais: 1) intensidade de material, 2) intensidade de energia, 3) consumo de água, 4) emissões tóxicas, e 5) emissões poluentes.

Cada um destes indicadores resulta de uma divisão entre consumos ou emissões com impacto ambiental no numerador e o resultado final (“output”) em termos físicos ou financeiros no denominador. Estas relações variam entre produtos e processos diferentes sendo, no entanto, o seu uso cada vez mais frequente.

No seu trabalho “Écoconception: état de l’art des outils disponibles”, Butel-Bellini e Janin (2011) apresentam uma visão holística sobre os meios de avaliação do impacto ambiental de um produto (Tabela 2.13). A análise desta tabela permite emergir várias leituras:

- as referências a datas revelam que este tipo de preocupações é ainda bastante recente;
- as referências geográficas situam a origem das preocupações ambientais em países tecnológica e socialmente mais desenvolvidos;
- tipos de avaliações bastante diferenciadas, reveladoras não só do carácter multidisciplinar dos problemas ambientais, mas também da ainda juventude desta problemática.

Neste mesmo trabalho, Butel-Bellini e Janin, fazem também um levantamento dos meios disponíveis de melhoria de projecto ambiental (Tabela 2.14).

Tabela 2.13 - Meios de avaliação do impacto ambiental de um produto (adaptada de Butel-Bellini e Janin, 2011).

	Exemplos e referências	Principais características
AVALIAÇÃO QUANTITATIVA		
Análise do ciclo de vida (ACV)	Métodos: CML (Holanda), EPS (Suécia), Tellus (Estados-Unidos), Volumes críticos (Suíça), Écopontos (Suíça)...	Avaliação ecológica do produto em relação a múltiplos critérios
Análise simplificada do ciclo de vida -inventário	Perfis da “ <i>European Plastics Industry</i> ”, PWMI (Bélgica)	Inventários dos consumos e necessidades de um produto.
- monocritério	Conteúdo energético (NF X30-110)	Avaliação dos impactos ambientais através de um só critério: consumo de energia.
Método dos eco-indicadores	Método Eco-Indicador 95 (Holanda); Programa informático ECOSCAN (Holanda).	Manipulação de indicadores representantes da ACV.
Análise dos custos do ciclo de vida completo	REDI Tool (Reino Unido)	Avaliação dos custos directos e indirectos gerados pelo produto, comparados com o seu valor acrescentado.
AVALIAÇÃO QUALITATIVA		
Aproximação matricial	Grelhas de avaliação ADEME (França) e AFNOR (França).	Identificação dos pontos desfavoráveis de um produto.
	“ <i>Product Improvement Matrix</i> ”, AT&T (Estados Unidos); “ <i>Product Life Cycle Matrix</i> ”, Motorola (Estados Unidos).	Avaliação de um produto através de questões
	MET Matrix (1997)	Avaliação segundo três critérios: -consumo de matéria -consumo de energia -emissão de substâncias tóxicas
Avaliação baseada na regulamentação	Método EDF (1996)	Atribuição de notas baseadas na regulamentação.
Índice ecológico	Método Ventère (1995)	Cálculo de um índice relativo a critérios seleccionados, com atribuição de penalidades.
Lista de controlo.	Eco Estimador	Avaliação de um produto existente.
	“ <i>Fast Five Awareness</i> ”, Philips (1997)	Avaliação de um produto em fase de concepção (5 questões).
	“ <i>Design for Recycling</i> ”, (1995)	Listas de questões agrupadas por temas com 3 respostas possíveis: ideal, aceitável, a necessitar de melhoria.
Lista de materiais	“ <i>US Clean Act</i> ” (Estados Unidos, 1990)	Listas de produtos químicos visados pela regulamentação.
	Listas negra e cinzenta, Volvo (Suécia)	Listas de materiais a banir ou a limitar de acordo com a regulamentação.

Tabela 2.14 - Meios de melhoria da concepção ambiental de um produto (adaptada de Butel-Bellini e Janin, 2011).

Meios existentes		Exemplos e referências	Principais características
Norma	Geral	FD X 30-310 (eco concepção), NF ISO 11469 (marcação de peças)	Definições de princípios gerais de protecção ambiental.
	Sectorial	R10-401, XP R 10-402 (indústria automóvel)	Definições de princípios de protecção ambiental adaptados ao sector.
	Empresarial	Norma elaborada pelos construtores automóveis para os seus fornecedores	Princípios e regras e seguir, adaptadas à empresa.
Lista	Linha directriz	WBCSD (Estados Unidos, 1995)	Recomendações a seguir de acordo com os eixos estratégicos escolhidos.
	Lista de controle	“ <i>Roue des stratégies d'écoconception</i> ” (1997)	Lista de questões agrupadas por eixo estratégico de eco-concepção com linhas directrizes possíveis; visualização, sobre um alvo, da posição do produto em cada eixo.
		“Product Improvement Matrix”, AT&T (Estados Unidos)	Lista de questões que permitem imaginar vias de melhoria por comparação com o existente.
	Lista de materiais	Listas negra e cinzenta, Volvo (Suécia)	Listas de materiais a banir ou a limitar de acordo com a regulamentação.
	Etiquetização ambiental	Ecoetiqueta europeia, NF Environement (França), Angle Blue (Alemanha), Cygne Blanc (países nórdicos)	Implementação de critérios ecológicos a respeitar com vista à obtenção da etiqueta ecológica.
Guia	Geral	Ecoprojecto: Uma aproximação prometedora para produção e consumo sustentáveis (Brezit & van Hemel, 1997)	Guia pedagógico completo para informação e educação.
		Projecto tendo em conta o ciclo de vida (Behrendt et al., 1997)	Guia pragmático destinado às PME.
		Projecto tendo em vista a desmontagem (Kahmeyer, 1991)	Guias de auxílio ao projectista para valorização em fim de vida.
		Projecto tendo em vista a desmantelagem (Simon, 1991)	
		Projecto de produtos tecnicamente recicláveis, VDI 2243 (Beitz et al., 1991)	Recolha de princípios com o fim de otimizar a reciclagem desde a fase de projecto.
		Manual de projecto de produtos electrónicos respeitadores do ambiente (Bergendahl et al., 1995)	Manual específico com instruções de projecto (montagens, materiais, compostos, embalagens,...).
	Empresarial	Philips (1997)	Manual da política ambiental da Philips.
		Schneider Electric (1996)	Manual com princípios base, características de um eco-produto, regras de projecto, meios de auxílio à tomada de decisão...

(Continua)

Tabela 2.14 (Continuação) - Meios de melhoria da concepção ambiental de um produto (adaptada de Butel-Bellini e Janin, 2011).

Programação	Geral	“Ecodesing Tool” (Universidade de Manchester, Reino Unido)	Permite estabelecer uma estratégia de desenvolvimento ambiental. Composto por 5 módulos: integração de uma estratégia de desenvolvimento, conselhos, armazenamento de informação, memorização de soluções de melhoria e relatório ambientais.
		EIME (Schneider Electric, IBM, Legrand, Alcatel Alstom e outros)	Para um produto decomposto em componentes, dá um balanço dos impactos ambientais, verifica a conformidade com a regulamentação e identifica melhorias possíveis
		LEADS (Universidade de Delft, Holanda)	Permite determinar a prioridade de deferentes estratégias de eco-concepção desde as primeiras fases do processo de desenvolvimento de produtos
	Específico	AMETIDE (concepção tendo em vista a desmontagem) (Estados- Unidos e França)	Optimização das sequências de desmontagem. Estabelece penalidades em função das acessibilidades.
		P2-EDGE (prevenção de poluição) (Departamento de Energia dos Estados- Unidos)	Composto por 2 módulos: informação sobre prevenção e ajuda na escolha das opções de concepção para redução de resíduos.
Organizacio nal	Análise de valor	Delafollie (1991)	Método de procura da melhor adequação a uma necessidade que envolva o mínimo de recursos. Análise funcional também abrangida.
	Engenharia concorrente	Foulard (1994)	Aproximação tendo em conta o ciclo de vida de um produto desde a sua concepção até ao seu uso, incluindo a qualidade, os custos, a planificação e as necessidades dos utilizadores.
Outros	Diagrama em espinha de peixe invertida	Ishii & Lee (1995)	Optimização das etapas de desmontagem de um produto de acordo com uma árvore de procedimentos.
	Plano de reciclabilidade	Ishii (1996)	Ajuda à melhoria da reciclabilidade de um produto através da selecção de materiais.
	Matrix “Eco- porte«folio”	Brezet & van Hemel (1997)	Destinado aos comerciais. Apresenta o valor “verde” de um produto face à sua concorrência.

Esta listagem de ferramentas disponíveis para melhoria do projecto de produtos tendo em conta preocupações de sustentabilidade ambiental, evidencia, sobretudo, conjuntos de orientações e boas práticas notando-se a ausência de modelos deterministas. Como foi referido

anteriormente, tal dever-se-á, quer à grande transversalidade dos factores ambientais, quer ao facto de ser uma área tecnológica ainda recente com fundamentos científicos ainda em desenvolvimento. Os programas informáticos disponíveis podem já constituir uma efectiva ajuda para a concepção ambiental de um produto.

Em “Conception écologique des produits”, Ventère (2012) sustenta que uma vez encontrado um impacto que se possa reduzir sem provocar outros agravamentos, o processo de melhoria de um produto é sempre possível. Se se pretender ir mais além e fazer mudanças profundas nas escolhas de concepção, pode ser delicado avaliar as repercussões dessas mudanças nos diversos impactos. Nesse caso, é necessária uma grande compreensão de todas as envolventes, devendo os projectistas munirem-se com o máximo de informação para suporte de decisão. A

Fig. 2.20 ilustra várias formas de obtenção de informação com relevância ambiental.

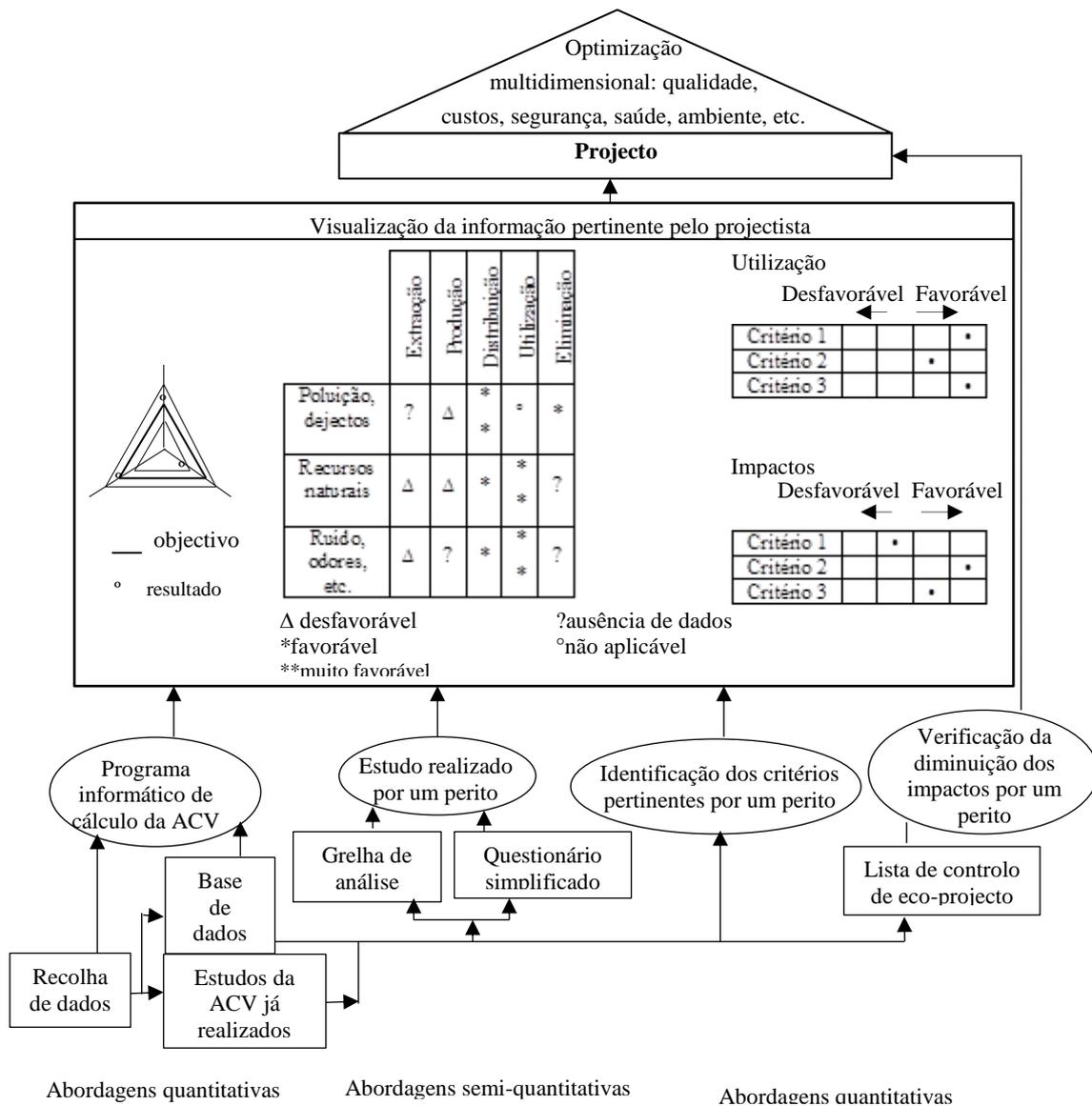


Fig. 2.20 - Cartografia de diversos tipos de aproximação à obtenção de informação por parte da equipa de projecto (adaptado de Ventère, 2012).

Este autor apresenta o projecto ecológico de produtos sempre numa óptica de melhoria, portanto, não no projecto de novos produtos. Esta abordagem é comum à generalidade dos trabalhos encontrados nesta área. Mourão *et al.* (2013) sugerem uma abordagem diferente ao propor uma concepção para o desenvolvimento de produtos sustentáveis baseado nos princípios da Teoria Axiomática de Projecto. Ao considerarem os conceitos de eco-requisitos (ER) e eco-parâmetros (EP) em conjunto com os restantes requisitos funcionais (RF) e parâmetros de projecto (PP), os autores propõem uma abordagem possível para projectos (desacoplados ou desacopláveis) de novos produtos com preocupações de sustentabilidade desde a sua origem. A Fig. 2.21 ilustra a abordagem sugerida, apresentada de uma forma sequencial. A Figura 2.21a) representa uma típica matriz de projecto de um dado projecto tradicional. Como se trata de um projecto acoplado, de acordo com o Axioma da Independência da Teoria Axiomática, os parâmetros de projecto devem ser alterados por forma a obter-se um projecto desacoplável (matriz triangular) representado em Figura 2.21b). Como exemplo, na Figura 2.21c) foram introduzidos arbitrariamente requisitos e parâmetros ambientais que voltaram a tornar o projecto novamente acoplado. Dado RF_1 e RF_2 serem afectados por variações de EP_2 e EP_3 estas variáveis vão ser “congeladas”. Como consequência, têm que ser fixados valores considerados aceitáveis para ER_2 e ER_3 , ajustando EP_2 e EP_3 , conforme representado na Figura 2.21d). Esta técnica de “congelamento”, já anteriormente foi usada em Fradinho *et al.*, (2012). A matriz de projecto final representa um projecto desacoplável (Figura 2.21e)), que à luz dos conceitos da Teoria Axiomática, constitui um “bom projecto”.

Esta abordagem descreve uma técnica possível para lidar com projectos que contemplem requisitos ambientais, pois que da sua inclusão resulta invariavelmente um aumento de complexidade. Os autores frisam que o processo de projecto, deve sempre iniciar-se pela satisfação dos requisitos de desempenho e custo (projecto tradicional), sendo as considerações ambientais só posteriormente introduzidas.

Shin *et al.* (2011), propõem que o custo e a análise do ciclo de vida (LCA “Life Cycle Assessment”) sejam acrescentados à Matriz de Projecto como critérios de selecção por forma a poderem ser naturalmente incluídos no processo axiomático de projecto (Fig. 2.22). Este conceito proposto carece ainda de aplicações efectivas.

Zang *et al.* (2011), propõem a utilização do QFDE (“Quality Function Development for Environment”) com um pormenorizado conjunto de ponderações para, a partir dos requisitos funcionais e ambientais, identificar os parâmetros de projecto a considerar (“technical parameters” na sua terminologia). Esta metodologia, para além da sua morosidade, é caracterizada pela subjectividade própria da atribuição de factores de ponderação.

Em Shin *et al.* (2010), os autores apresentam uma metodologia de projecto com preocupações ambientais baseada na Teoria Axiomática. Depois de reconhecerem a inerência de acoplamentos entre factores ambientais e parâmetros de projecto, propõem uma metodologia

inspirada no QFD para a identificação dos acoplamentos mais críticos, sobre os quais a equipa de projecto se deve concentrar. Tal identificação é alcançada por intermédio do uso de factores de ponderação associados a cada RF que representam a sua repercussão ambiental sendo o peso de cada PP calculado pela soma dos pesos dos RF que lhe estão relacionados. Os PP cujos pesos assim resultantes tiverem maiores valores, são aqueles com maior impacto ambiental. Esta informação será de grande utilidade para a tomada de decisões conducentes à eliminação de acoplamentos entre requisitos funcionais e parâmetros de projecto.

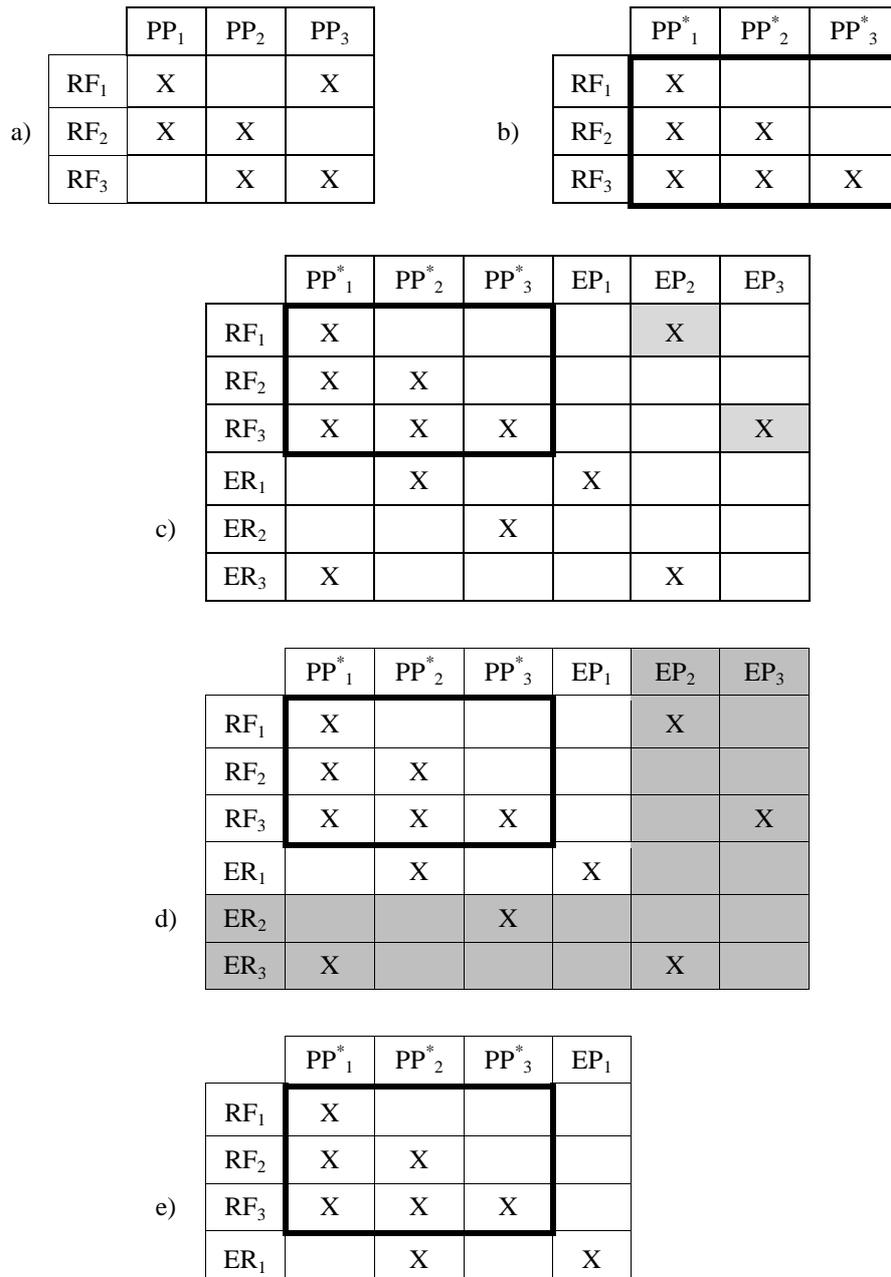


Fig. 2.21 - Principais fases de projecto tendo em conta requisitos ambientais (adaptado de Mourão *et al*, 2013).

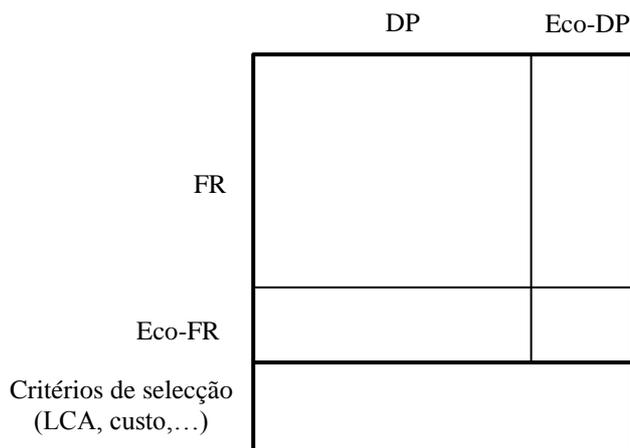


Fig. 2.22 - Estrutura aumentada da matriz de projecto (adaptada de Shin *et al.*, 2011).

No mesmo trabalho, os autores referem também a necessidade de estruturar, organizar e adaptar as necessidades ambientais dos clientes. Com efeito, estas são frequentemente pouco estruturadas e podem incluir objectivos, métodos, constrangimentos, contradições ou mesmo desejos. Para uso da Teoria Axiomática, os autores listaram coerentemente um vasto conjunto de eco-RF e eco-PP próprios para uso neste contexto. Por definição, os requisitos funcionais são objectivos e os parâmetros de projecto são métodos.

Também com os mesmos intuítos de organização e sistematização, Masui *et al.* (2003) identificaram e propuseram vários requisitos ambientais (Tabela 2.15).

A análise dos principais indicadores ambientais segundo a OCDE (OECD, 2001), das listas de controlo de manufactura respeitadoras do ambiente e das categorias e estratégias da análise do ciclo de vida evidenciam um grande número possível de eco-requisitos que, basicamente podem ser agrupados em três categorias: material, energia e desperdício.

Tabela 2.15 - Eco-requisitos (adaptado de Masui *et al.*, 2003).

Requisitos ambientais
Uso mínimo de material
Fácil de transportar e de conservar
Baixo consumo energético
Grande durabilidade
Facilidade em reusar
Facilidade de desmontagem
Facilidade de limpeza
Facilidade de destruição
Facilidade de separação
Incineração em segurança
Uso em aterro com segurança
Inofensivo ambientalmente
Emissões inofensivas
Possibilidade de abandono

A inclusão sistematizada de preocupações de sustentabilidade na actividade de projecto, sendo relativamente recente, tem já sido objecto de vários estudos com propostas de abordagem bastante diferenciadas. Bovea & Pérez-Belis (2012) reviram e classificaram as diversas ferramentas que têm sido propostas para considerar os requisitos ambientais dos produtos e facilitar a sua integração no processo de projectar (Fig. 2.23). O seu trabalho teve como objectivo a elaboração de um guia para selecção da eco-ferramenta que melhor se adapte a cada caso de projecto em particular.

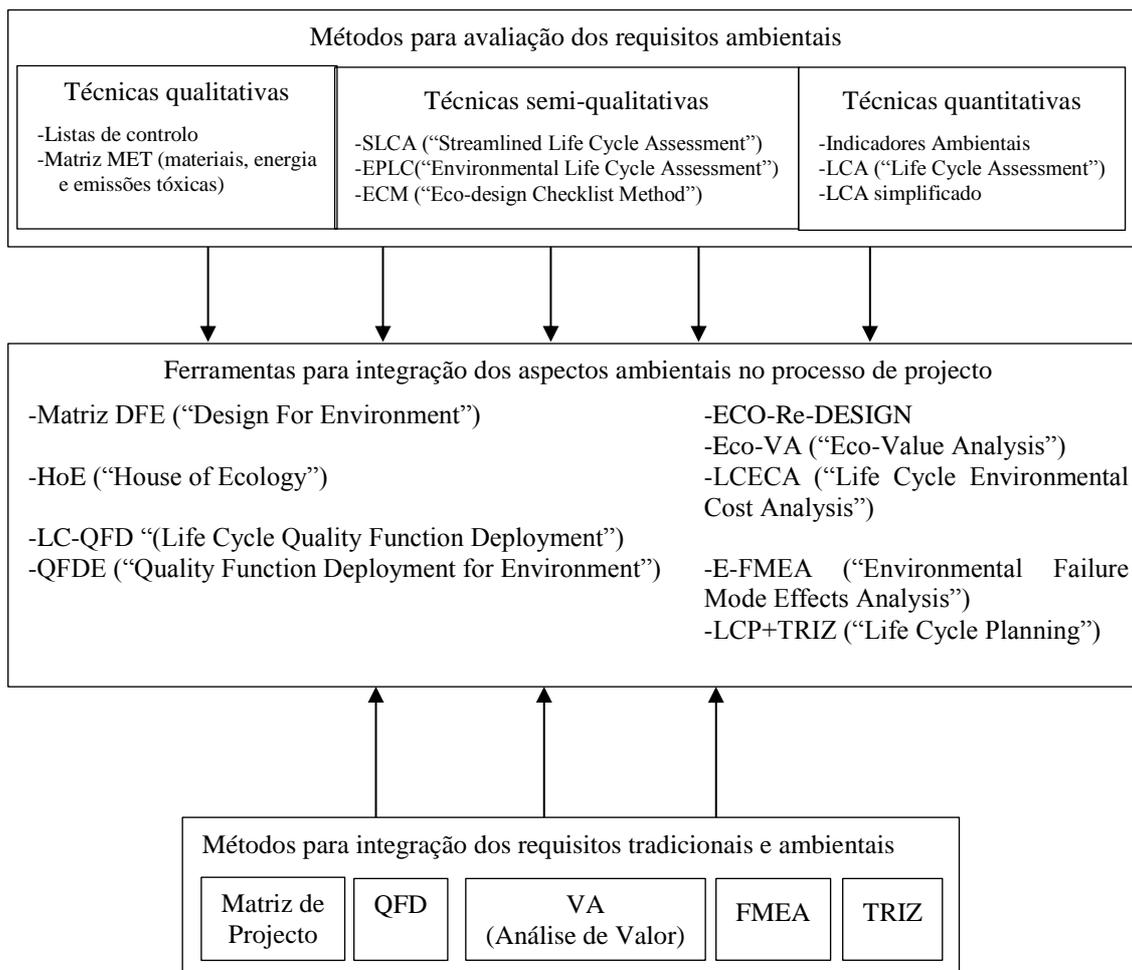


Fig. 2.23 - Ferramentas para integração de requisitos ambientais no processo de projectar (adaptado de Bovea & Pérez-Belis, 2012).

Por forma a facilitar a comparação entre os vários métodos de avaliação dos requisitos ambientais de um produto, estes são classificados na Fig. 2.24 de acordo com o seu objectivo e o seu grau de dificuldade/tempo necessário para aplicação.

O resultado final do trabalho dos autores (taxonomia das ferramentas para integração dos aspectos ambientais no processo de projecto) é apresentado na Fig. 2.25 evidenciando a fase de projecto onde são aplicáveis em função do seu grau de dificuldade / tempo consumido.

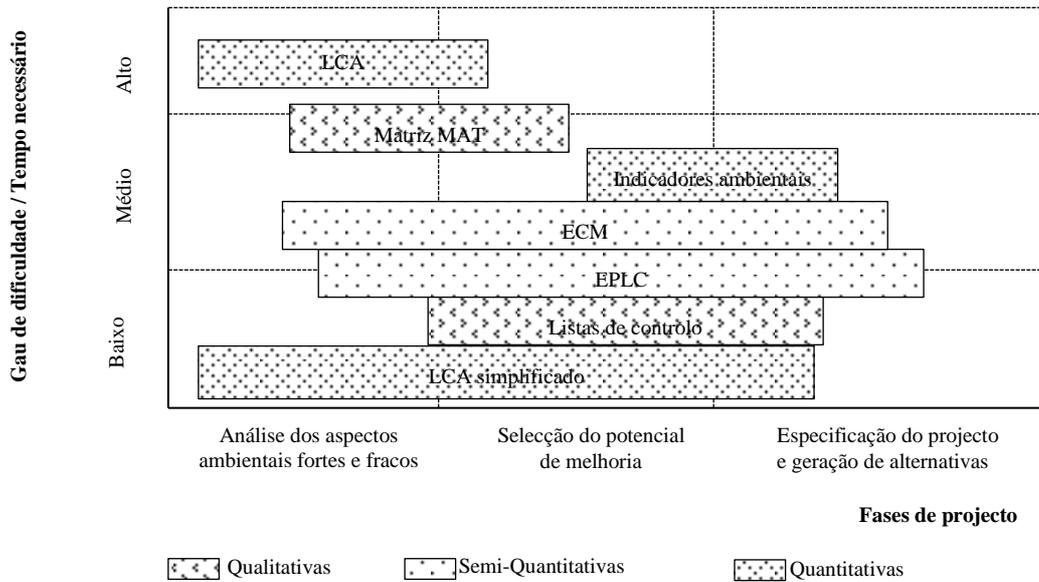


Fig. 2.24 - Classificação dos métodos para avaliação dos requisitos ambientais de um produto (adaptado de Bovea & Pérez-Belis, 2012).

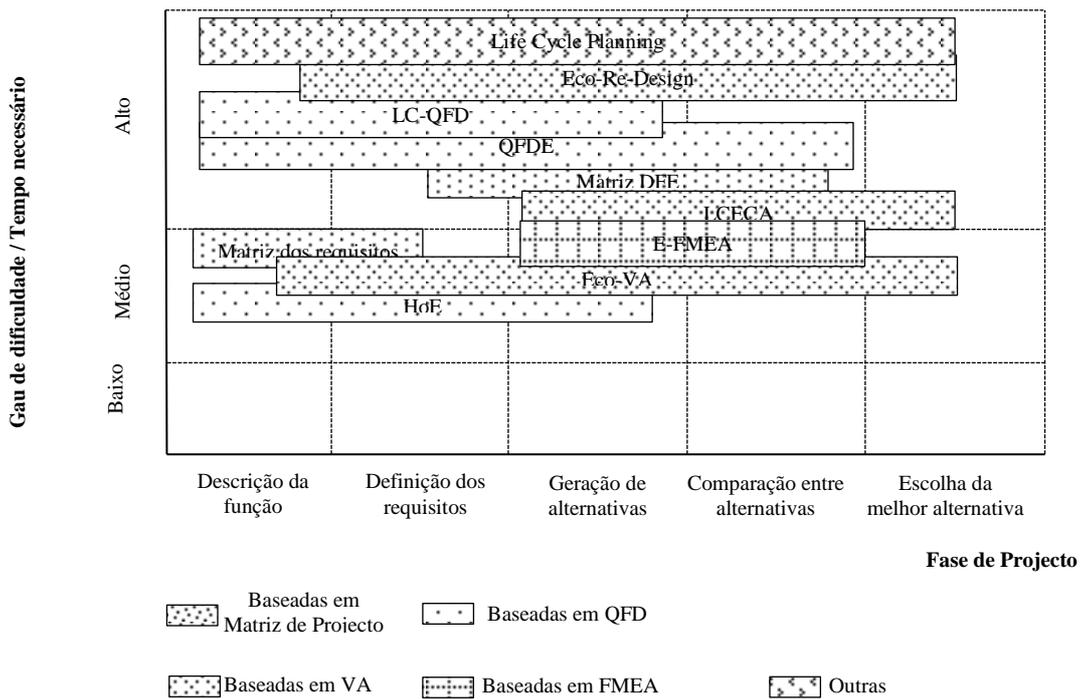


Fig. 2.25 - Classificação das ferramentas para integração dos aspectos ambientais no processo de projecto (adaptado de Bovea & Pérez-Belis, 2012).

- A partir da análise da figura é possível retirar algumas ilações, nomeadamente
- Apesar da relativa juventude da problemática ambiental, existe já um considerável conjunto de ferramentas que contemplam a integração dos aspectos ambientais no processo de projecto;

- Todas as ferramentas têm um grau de dificuldade médio/alto, bem assim como a quantidade de tempo que requerem;
- Os autores não identificaram a Teoria Axiomática como base para o projecto e desenvolvimento de produtos sustentáveis.

A inclusão de considerações ambientais no projecto de novos produtos está ainda numa fase primordial. Existe um longo caminho a percorrer nesta matéria. Até agora as indústrias química, automóvel e de produtos electrónicos, têm sido charneira nesta nova atitude. Todavia, para além da orientação direccionada dos próprios órgãos gestores, muito têm contribuído também as regulamentações emitidas pelos estados e organizações super-estatais (a União Europeia, por exemplo, tem desempenhado um papel muito activo através da emissão das suas directivas).

Deutz *et al.* (2013) estudaram, através de questionários e entrevistas, 93 empresas industriais do Reino Unido quanto à consideração e inclusão de factores ambientais no projecto dos seus produtos. Constataram que as grandes empresas tendem a ter um maior envolvimento com preocupações de sustentabilidade do que as pequenas e médias empresas. Salientam, no entanto, que muitos dos seus desenvolvimentos se repercutem no seu próprio processo (energia consumida, desperdício, poluição, etc.), mais do que nas características ambientais do produto. Concluíram que o envolvimento das preocupações ambientais no processo de projecto é globalmente limitado. Nenhuma das empresas estudadas considera a sustentabilidade como um requisito funcional.

Alguns autores têm-se debruçado sobre a importância da escolha dos materiais no impacto ambiental causado por um produto ao longo de todo o seu ciclo de vida. Giudice *et al.* (2004) desenvolveram um método que alia as repercussões ambientais às propriedades físicas dos materiais, para que a sua escolha seja contemplada conjuntamente. Segundo este método, em primeiro lugar são seleccionadas potenciais soluções considerando a sua manufacturabilidade e performance sendo depois calculados indicadores de impacto ambiental e de custo, ambos ao longo de todo o seu ciclo de vida. A obtenção de informação para a construção destes indicadores, nomeadamente custos energéticos e fracções de reciclabilidade, é possível através de diversas bases de dados disponíveis comercialmente (Cebon, 2000) (Goedkoop, 2001). Finalmente é eleita a melhor solução com base na análise destes indicadores. Para esta avaliação, os autores sugerem mesmo, duas ferramentas com relativa simplicidade: análise gráfica ou análise multi-objectivo de funções, nas quais as mais significativas propriedades dos materiais são adequadamente normalizadas e ponderadas.

Apesar da lenta mas gradual incorporação dos factores ambientais na actividade de projecto, pode-se considerar que as questões ambientais tais como o aquecimento global e o consumo energético, são já desafios críticos a nível global. Existe consenso, quer na academia quer na indústria, sobre a necessidade de implementar medidas de sustentabilidade nos

primeiros estágios do ciclo de vida de um produto. Na grande maioria das empresas industriais, as actividades de desenvolvimento são ainda predominantemente orientadas pelas preocupações de qualidade e custo. Algumas empresas temem que a incorporação de factores ecológicos no desenvolvimento de produtos lhes possa acarretar custos adicionais e conseqüentemente reduzir a sua competitividade. Tendencialmente, a quantidade de empresas com esta atitude irá diminuir.

A Comissão Mundial para o Ambiente e Desenvolvimento (WCED – “World Commission on Environment and Development”) (Drexhage, 2010) define desenvolvimento sustentável como o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades.

Nos últimos anos, alguns autores (Chiu & Chu, 2012) (Deutz *et al.*, 2013) têm defendido um conceito alargado de sustentabilidade. Segundo eles, o conceito de sustentabilidade deve cobrir também aspectos económicos e sociais, além dos aspectos ambientais (Fig. 2.26). Neste conceito, o lucro, o planeta e as pessoas são considerados simultaneamente e a sua transposição para o projecto sustentável cobrirá todo o espectro da vida de um produto. Assim, projecto sustentável é entendido como o desenvolvimento de um produto que cumpre as suas funções, gera lucro à empresa, é socialmente aceitável e usa materiais e energia mínimos gerando também desperdícios mínimos.

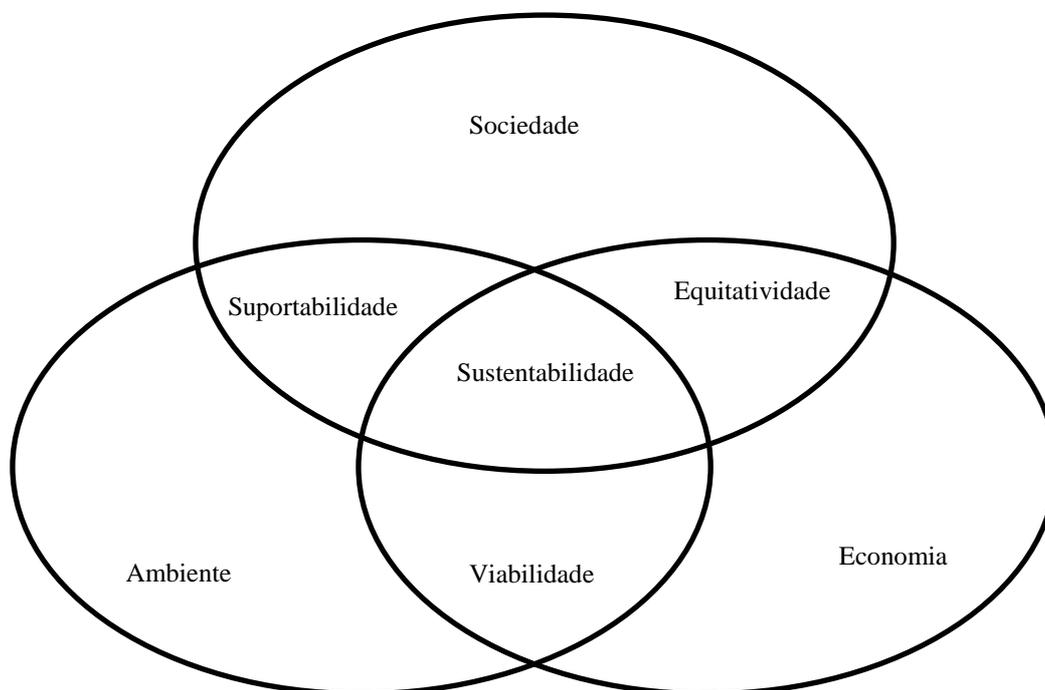


Fig. 2.26 - Triplo conceito de sustentabilidade (adaptado de Chiu & Chu, 2012).

A conjunção de requisitos de sustentabilidade com requisitos funcionais (que são a razão de ser do próprio projecto) conduz invariavelmente a projectos complexos de natureza acoplada (Suh, 1990) (Shin *et al.* 2011). Quaisquer que sejam as soluções adoptadas, implicam uma forte interdependência entre os dois tipos de requisitos. Se à fase conceptual de projecto, se

adicionarem também requisitos ligados a custo (que não deverão deixar de estar presentes nesta fase), a complexidade do projecto aumenta ainda mais. É esta dificuldade que justifica o facto de a generalidade dos produtos existentes com melhores características ambientais, terem sido desenvolvidos a partir de produtos pré-existentes.

Na sequência do que anteriormente foi referido quanto à relevância futura dos factores de sustentabilidade, é de referir que Portugal detém em abundância um valioso recurso: a cortiça. Com efeito, o nosso país é o maior produtor mundial com uma quota de cerca de 54% (UTAD, 1988).

A presente dissertação pretende também, salientar a dificuldade da inclusão de factores de sustentabilidade nas fases iniciais de projecto e simultaneamente apontar para possíveis técnicas para lidar com os acoplamentos necessariamente existentes.

2.5 Tomada de decisões

A actividade de projecto é um processo complexo que depende da informação disponível sobre o objectivo a atingir. Nas suas fases iniciais, frequentemente só existem esboços imprecisos e incompletos e é justamente nessas fases que decisões importantes têm que ser tomadas. Por outro lado, à medida que um projecto decorre, é cada vez maior o conhecimento do seu detalhe. Nas fases iniciais do projecto em que o conhecimento do mesmo é diminuto, são tomadas decisões determinantes para a sua consecução, no entanto na sua fase final, apesar de já existir bastante informação disponível, qualquer decisão então tomada tem pequena influência. É para obstar a esta contradição que a comunidade académica e profissional da actividade de projecto, tem desenvolvido esforços no sentido de conseguir dispor de maior quantidade de informação disponível nas fases preliminares do projecto. A Fig. 2.27 traduz a contradição apontada e o objectivo desejável de fazer deslocar na linha do tempo a informação disponível sobre o produto. Na mesma figura é também evidenciado que o custo de qualquer alteração aumenta quando o projecto tende a estar finalizado o que também reforça a importância do máximo conhecimento antecipado.

Face ao exposto, os projectistas têm que tomar decisões de crucial importância na fase conceptual de projecto. Nesta fase, as diversas opções estão condicionadas pelos requisitos pretendidos, por constrangimentos físicos e legais, por recursos físicos e financeiros disponíveis, entre outros. O sucesso de um projecto depende fortemente das opções então tomadas.

Vários autores têm-se debruçado sobre este assunto, propondo, nomeadamente, uma abordagem sob a forma de análise funcional tendo em conta as incertezas, permitindo ao longo do projecto o conhecimento do risco de não serem atingidos os requisitos finais pretendidos. Tal é o caso do artigo de Cabannes *et al.* (2011) no qual é proposta uma metodologia que permite a

tomada de decisões na fase inicial de projecto usando uma útil representação funcional conjugada com uma consistente representação dos riscos associados (usando as leis de De Morgan).

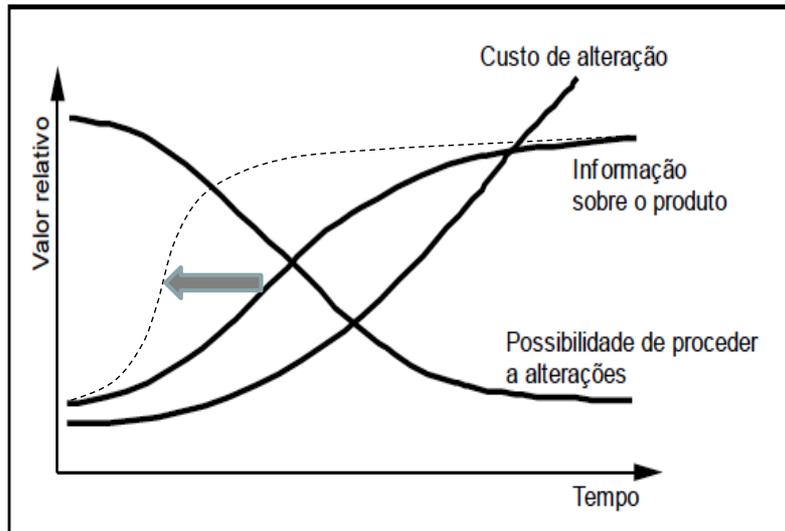


Fig. 2.27 - A importância da disponibilização de informação na fase inicial de projecto (adaptado de Villiers, 1987).

Hoje em dia, o projecto é cada vez mais, conduzido por equipas multidisciplinares que geram grande quantidade de informação, o que torna as tomadas de decisão complexas. As metodologias de apoio à tomada de decisão revestem-se de grande utilidade para estruturar a informação durante a fase conceptual de projecto e suportarem as opções dos decisores.

Os sistemas de apoio à decisão durante as fases iniciais de projecto, têm sido objecto de inúmeras publicações, quer através de livros, quer através de artigos científicos.

Em “Design decision support for the conceptual phase of the design process”, Zeiler *et al.* (2007) propõem uma metodologia (“Integral Design Methodology” – IDM) que integra a informação das diversas disciplinas envolvidas no processo de projecto. Fornecendo e facilitando troca de informação acerca das decisões tomadas durante o processo, melhora a combinação de esforços por parte das partes envolvidas. Esta metodologia consubstancia-se numa matriz de projecto cujas linhas representam as diferentes fases do processo e as colunas representam diferentes níveis de abstracção permitindo, desta forma, transformar as decisões complexas de projecto em sub-questões de menor complexidade (Fig. 2.28). Ajuda a tornar o processo de projecto mais transparente e facilitador da troca de informações e motivações entre todos os envolvidos. Os autores referem a grande aceitação da IDM entre a comunidade académica da Universidade técnica de Eindhoven.

Nos últimos anos, esta Universidade tem vindo a desenvolver estudos no desenvolvimento de sistemas de apoio à tomada de decisão (“Decision Support Systems” – DSS) caracterizados pela facilidade, interactividade e facilidade de uso que evidenciem as

potenciais consequências das decisões tomadas na fase conceptual de projecto onde a informação disponível é incompleta e complexa. Tal é o caso do artigo (Groot & Mallory-Hill, (1999)) onde os autores focam a importância do fluxo de informação (e do seu registo) entre membros das equipas de projecto e destas com unidades exteriores de investigação. A análise multi-critério relativa a diferentes desempenhos do projecto é exposta num gráfico de tipo radar para apoio à tomada de decisão.

Fases de projecto		Níveis de abstracção			
		Geração	Síntese	Seleccção	Aplicação
Esboços	Necessidade				
	Problema de projecto				
Projecto conceptual	Especificação funcional				
	Solução física				
Projecto preliminar	Estrutura modular				
	Estrutura do protótipo				
Definição final do projecto	Aspectos de engenharia				
	Propriedades de materiais				

Fig. 2.28 - Matriz de projecto da IDM indicando fases e níveis de abstracção (adaptado de Zeiler *et al.*, 2007).

Durante as fases iniciais de projecto, os seus requisitos e variáveis são caracterizados por grande incerteza, no entanto essas decisões são determinantes para o projecto final e têm grande importância, quer no seu tempo de desenvolvimento, quer no seu custo final. Assim, é de enorme utilidade para os projectistas a possibilidade de comparar os resultados expectáveis das diversas ideias conceptuais de projecto (em múltiplos aspectos), não obstante as suas intrínsecas incertezas. Face a esta situação, Hambali *et al.* (2009) propõem o uso de um processo hierárquico analítico (“Analytical Hierarchy Process” – AHP) e exemplificam-no com o projecto de um pára-choques automóvel. Para oito opções de projecto, identificam e decompõem os principais factores de decisão (energia absorvida, custo, processo de manufactura, peso, resistência, forma/estilo, material e manutenção) sendo de referir a contemplação de factores ambientais na decomposição. A atribuição de factores de ponderação aos diversos factores e sub-factores, a utilização de um programa informático específico e posterior análise de sensibilidade, gera a ordenação das diversas opções suportada em vasta informação gráfica. Apesar da facilidade e da clareza dos resultados finais, é de destacar a crucialidade dos factores de ponderação que implica a participação de especialistas em múltiplas áreas.

No livro intitulado “Multicriteria Methodology for Decision Aiding”, Roy (1996) desenvolve uma metodologia em que as preferências são estruturadas através das relações

binárias de indiferença, preferência estrita, preferência fraca e incomparabilidade que dão origem a funções de critério. Variando de caso para caso, o autor usa três estratégias operacionais: uso de um único critério sintetizado sem incomparabilidades, síntese por ponderação com incomparabilidades e análises iterativas. Ao longo do livro são apresentados exemplos de referência significativamente diferenciados (infra-estruturas, desenvolvimento regional, publicidade, investigação e desenvolvimento, operacionais, recrutamento e manufactura) para ilustrar os diversos conceitos, conceitos, modelos, algoritmos, procedimentos e metodologias desenvolvidos.

Num plano mais filosófico, Scott & Antonsson (2000), sustentam que, contrariamente às decisões de escolhas sociais caracterizadas pela soberania e particularidade da individualidade, a tomada de decisão em projectos de engenharia pode ser fundamentada na comparação explícita de graus de preferência. Esta tomada de decisão baseada em preferências e na sua eventual agregação, é aceitável em projecto de engenharia mas viola a assumpção de soberania individual própria das escolhas sociais.

Projectar é um processo multi-estágio e multi-critério no qual as decisões tomadas na fase conceptual determinam irremediavelmente a bondade da solução final. A existência de meios e informação para ajuda ao suporte das decisões tomadas pelos projectistas reveste-se, da máxima utilidade.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

3.1 Introdução

A presente situação económica é caracterizada pelo fenómeno da globalização existindo independência entre os locais de produção e de consumo de um produto. Numa situação de mercado fortemente concorrencial, mais do que factores geográficos, são determinantes para o sucesso de um produto, o seu custo e a sua capacidade em satisfazer os requisitos funcionais (desempenho) atempadamente.

Os novos produtos surgem habitualmente como resposta a uma necessidade detectada pela empresa produtora ou por solicitação directa do mercado. Nesta fase, a empresa tem uma ideia pouco definida do produto, conhecendo apenas algumas características desejáveis que transmite à equipa de projecto. Se a empresa for de média ou grande dimensão, a equipa de projecto deverá ser constituída por elementos de várias áreas técnicas por forma a melhorar a qualidade do projecto e diminuir o seu tempo de desenvolvimento, ou seja, o projecto deve ser desenvolvido num ambiente de Engenharia Simultânea. Com efeito, ao integrar equipas pluridisciplinares com representantes das áreas de projecto, produção, qualidade, aprovisionamentos, comercial e outras, a Engenharia Simultânea visa considerar todas as fases do ciclo de vida de um produto e diminuir o tempo de desenvolvimento para colocação no mercado. Neste ambiente de trabalho em que as tarefas são realizadas concorrentemente e por outro lado várias opções não estão ainda decididamente definidas, a possibilidade de tomar decisões baseadas também em custos estimados e repercussões ambientais, assume-se de fundamental importância, particularmente nas fases iniciais do projecto, onde há carência de dados (Fradinho *et al.*, 2012). É neste contexto que se insere a presente dissertação doutoramento.

A metodologia a desenvolver tem como objectivo identificar “zonas de desempenho” em articulação com “zonas de custo” e “zonas de sustentabilidade ambiental”, permitindo aos decisores optarem por soluções mais ajustadas a cada realidade. Assim, esta abordagem envereda pela via da integração flexível (conjunto de soluções possíveis como resultado de diferentes combinações de factores vários) e não pela via da optimização, necessariamente pouco flexível (soluções únicas).

Dada a sua natureza, a conjunção de requisitos funcionais, com requisitos de custo e de ordem ambiental, conduz invariavelmente a projectos de natureza acoplada. Existe sempre uma

forte dependência entre estes três tipos de requisitos. O projecto de novos produtos que tenha em conta a conjugação dos três tipos de requisitos reveste-se, pois, de grande complexidade. É de referir, que contrariamente à visão tradicional de considerar o custo como um constrangimento, nesta abordagem o custo será considerado como um requisito influenciado por vários parâmetros de projecto, o que traduz uma maior identificação com a realidade. Desempenho e custo, porém, não são independentes tornando os projectos acoplados.

Recentemente, alguns autores têm defendido um conceito alargado de projecto. Segundo eles, o projecto de novos produtos deve cobrir também aspectos ambientais, além dos aspectos económicos e sociais. Neste conceito, as pessoas (através da funcionalidade do produto) o lucro e o planeta são considerados simultaneamente e a sua transposição para o projecto sustentável cobrirá todo o espectro da vida de um produto. Assim, projecto sustentável é entendido como o desenvolvimento de um produto que cumpre as suas funções, gera lucro à empresa, é socialmente aceitável e usa materiais e energia mínimos gerando também desperdícios mínimos.

Ao considerar-se também, e em simultâneo, requisitos ambientais caminha-se inexoravelmente para um projecto acoplado. Os requisitos funcionais serão certamente afectados pelos novos parâmetros ambientais considerados na matriz de projecto (Mourão *et al.*, 2013).

3.2 Teoria Axiomática do Projecto e sustentabilidade

Com a excepção de projectos muito simples, a generalidade dos projectos são acoplados ou desacopláveis. A Teoria Axiomática constitui-se como uma excelente ferramenta para identificar acoplamentos e como ajuda para a sua eliminação.

A inclusão de Parâmetros Económicos (PE's) e de Parâmetros Ambientais (PA's) na matriz de projecto, para além de aumentar a sua dimensão, aumenta também a possibilidade de acoplamentos. Acresce, que para além desta evidência algébrica, existe uma forte relação entre requisitos funcionais e requisitos ambientais, já que ambos são influenciados quase invariavelmente pelos mesmos parâmetros de projecto. Assim, o projecto tendo em conta a sustentabilidade é de natureza acoplada.

Uma situação análoga se passa entre desempenho e custo, pois que de um modo geral não há independência entre parâmetros de projecto e custo final. Como consequência, a integração do desempenho, do custo industrial e preocupações de sustentabilidade conduz necessariamente a projectos de natureza acoplada.

Tendo com base os conceitos da Teoria Axiomática de Projecto, é possível identificar as seguintes estratégias de desacoplamento:

- Alterar tolerâncias
- Redefinir o problema
- Optimizar o problema
- Criar redundâncias

A primeira estratégia referida consiste em alargar ou deslocar as tolerâncias dos requisitos funcionais.

Redefinir o problema pode, por exemplo, consistir em passar a considerar um ou mais requisitos funcionais como constrangimentos, os quais não requerem independência. Na verdade, corresponde a um outro problema e a uma outra solução. Os constrangimentos podem ser classificados como funcionais, de segurança, de qualidade, de manufactura, de tempo, económicos, ergonómicos, ecológicos, estéticos, de ciclo de vida e legais ou éticos (Design Constraints. [Em linha] <http://www.docstoc.com/docs/44506233>).

A optimização de um projecto é uma estratégia frequentemente seguida. Um adequado conjunto de experiências permite identificar as variáveis de projecto relevantes para os requisitos-alvo. Frequentemente, estes planeamentos de experiências contemplam o congelamento de variáveis (Fradinho *et al.*, 2012) e as suas conclusões constituem-se como suporte à tomada de decisão.

A criação intencional de redundâncias pode, constituir-se como uma estratégia vantajosa. A Teoria Axiomática estabelece que sempre que na matriz de projecto, o número de colunas (PP's) é superior ao número de linhas (RF's), o problema é considerado redundante. Existe uma abundância excessiva na definição do problema (Gonçalves-Coelho *et al.*, 2012). Todavia, a redundância pode ser benéfica e pode, portanto, ser provocada. Considere-se o exemplo simples de um projecto acoplado (2x2) ao qual é acrescentado um terceiro PP só com influência num dos RF (3.1).

$$\begin{bmatrix} RF_1 \\ RF_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PP_1 \\ PP_2 \\ PP_3 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

No projecto inicial (acoplado), PP₁ e PP₂ teriam que ser fixados e os valores de RF₁ e RF₂ seriam os resultantes. No projecto redundante, PP₁ e PP₂ são fixados, determinam RF₁ mas RF₂ passa a ser sintonizado por PP₃. Assim, num projecto no qual não era possível qualquer ajustamento nos RF, passou a permitir um controlo sobre RF₂ mediante a inclusão de um parâmetro de projecto redundante.

Os factores ambientais e os factores de custo estão quase sempre inerentemente acoplados com os requisitos funcionais. Nestes casos, acrescentar outros parâmetros que embora redundantes, pode contribuir para uma maior flexibilidade do projecto.

De acordo com a Teoria Axiomática, apenas projectos muito simples são considerados desacoplados, alguns outros de maior complexidade são desacopláveis sendo a generalidade dos projectos possuidores de uma complexidade tal, que os torna acoplados.

A equação de projecto característica de um projecto sustentável é representada pela expressão (3.2). Para maior simplicidade, consideram- se apenas dois requisitos funcionais (RF), um requisito económico (RE), dois requisitos ambientais (RA) e dois parâmetros de projecto (PP).

$$\left\{ \begin{matrix} RF_1 \\ RF_2 \\ RE \\ RA_1 \\ RA_2 \end{matrix} \right\} = \begin{bmatrix} X & X \\ X & X \\ X & X \\ X & X \\ X & X \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} PP_1 \\ PP_2 \end{matrix} \right\} \quad (3.2)$$

Esta equação configura um projecto acoplado de acordo com o Teorema 1 da TA. Trata-se de um tipo de projecto acoplado e a sua resolução passará pela implementação de uma das estratégias referidas.

Como lidar com este tipo de projectos? Com base nos conceitos da Teoria Axiomática de Projecto, é possível identificar as seguintes estratégias de desacoplamento:

- Alterar tolerâncias
- Redefinir o problema
- Optimizar o problema
- Criar redundâncias

A metodologia proposta neste trabalho enquadra-se numa estratégia de optimização para identificação de uma região de soluções possíveis e não de uma solução única.

O Teorema 4 da mesma teoria estabelece que num projecto ideal, o número de PP deve ser igual ao número de RF, o que equivale a dizer que a matriz de projecto deve ser quadrada.

No caso de a matriz de projecto (do ponto de vista estritamente funcional) ser triangular do tipo

$$\left\{ \begin{matrix} RF_1 \\ RF_2 \end{matrix} \right\} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ X & X \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} PP_1 \\ PP_2 \end{matrix} \right\} \quad (3.3)$$

é possível que um projecto sustentável seja desacoplável mediante a inclusão de adequados parâmetros económicos (PE) e ambientais (PA) que satisfaçam os requisitos económicos e ambientais embora não tenham influência sobre os parâmetros funcionais. A Tabela 3.1 apresenta alguns exemplos de requisitos económicos e ambientais passíveis de inclusão em projectos sustentáveis com o objectivo de os tornar desacopláveis e consequentemente satisfazerem o Axioma de Independência.

Tabela 3.1 - Exemplos de parâmetro económicos e ambientais.

Parâmetros económicos (PE)	Parâmetros ambientais (PA)
-Qualificação da mão-de-obra -Automação	-Programa de recolha de material usado -Sistema de transporte para material usado -Reprocessamento de material usado -Uso de energias renováveis -Plantação de árvores -Purificação do ar

A escolha apropriada de parâmetros económicos e ambientais, pode então transformar a equação de projecto como representada na expressão (3.4). Os RA podem ou não ser influenciados pelos PP. Considerou-se que sim, embora isso não altere o carácter desacoplável do projecto.

$$\begin{pmatrix} RF_1 \\ RF_2 \\ RE_i \\ RA_i \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 \\ X & X & X & 0 \\ X & X & X & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} PP_1 \\ PP_2 \\ PE_i \\ PA_i \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Como referido, este é o caso de um projecto sustentável desacoplado porque a sua matriz de projecto funcional, já era triangular. Tal não ocorre na generalidade dos projectos.

Nesta dissertação, pretende-se apresentar um contributo metodológico para a tomada de decisão nas fases embrionárias de projectos sustentáveis não passíveis de aplicação de estratégias de desacoplamento.

3.3 Metodologia proposta

Nesta dissertação pretende-se desenvolver uma metodologia que permita, na fase conceptual de projecto, dotar os decisores com informação relativa aos factores caracterizadores de um projecto sustentável com preocupações sociais (desempenho), económicas (custo) e ambientais. Com base nesta informação poderão ser tomadas as opções consideradas mais apropriadas. As decisões então tomadas caracterizarão marcadamente os desenvolvimentos subsequentes do projecto. Como é sabido, quaisquer alterações ao projecto tomadas em fases posteriores teriam consequências mais gravosas em termos de custo e de tempo.

Numa economia marcada pela concorrência, a actividade de projecto é indissociável da preocupação com o custo final do produto. Esta associação entre a funcionalidade e o custo, configura o chamado projecto tradicional. Nestas circunstâncias, está-se quase invariavelmente perante um projecto acoplado porque as variáveis de projecto que satisfazem os requisitos funcionais afectam também, por norma, o custo do produto.

Na sua essência, a metodologia apresentada consiste em exprimir o desempenho e o custo em função das mesmas variáveis conhecendo deste modo, como quaisquer alterações aos seus valores se repercutem quer no desempenho, quer no custo do produto. Desempenho e custo não são, pois, independentes, já que como estão expressos em função das mesmas variáveis, qualquer alteração no valor destas, alterará também os seus valores. A consideração do custo como um requisito tem como resultado que qualquer projecto resulte acoplado. Considerando que cada uma das especificações funcionais de um produto são normalmente limitadas por dois valores (“zona de trabalho”) ou só por um valor (mínimo ou máximo), a aplicação desta metodologia passa por identificar as gamas de valores das variáveis que as satisfaçam e depois tomar a decisão do seu valor que conduza a um “bom valor” de custo. Esta metodologia permite também a aplicação de um processo de raciocínio inverso: projectar para um determinado custo.

Uma vez clarificadas as principais características do produto, importa identificar os principais parâmetros de projecto que as determinam. Por outras palavras, importa conhecer as principais variáveis que afectam (e como) os requisitos funcionais pretendidos, ou seja, a matriz de projecto segundo a Teoria Axiomática de Projecto. Nesta fase, existem duas situações díspares cujos extremos vão desde uma noção insuficientemente suportada até um sólido domínio baseado em conhecimento científico. Com excepção desta última situação, deve ser conduzido um planeamento de experiências apropriado para identificação e triagem das variáveis admitidas como importantes para as principais características do produto. Em teoria não existe limite para este número mas na generalidade dos casos revela-se reduzido.

A expressão do desempenho poderá ser facilmente determinada (casos em que existe um grande conhecimento teórico e é conhecida a relação entre as variáveis e a resposta) ou poderá requerer um trabalho experimental prévio. Neste caso, a RSM (“Response Surface Methodology”) aplicada a um adequado planeamento de experiências (DoE-“Design of Experiments”), constitui-se como um eficiente meio para entendimento de determinado fenómeno (Montgomery, 1991). Em algumas situações, é impossível ou impraticável a realização de experiências físicas seja por inexistência ou impossibilidade de ocupação de equipamento, seja pelos elevados custos associados. Nestes casos, a simulação de experiências apropriadas constitui-se também como um meio para a compreensão do modelo fenomenológico e conseqüente determinação da expressão analítica que o traduz.

Estando identificadas as variáveis relevantes, deve então ser deduzida em função das mesmas, uma expressão analítica que traduza custo. Esta é uma fase crucial da metodologia e requer um bom conhecimento dos processos produtivos por parte da equipa pluridisciplinar, num ambiente de Engenharia Simultânea. A “função custo” poderá incluir custos de material, mão-de-obra, energia e indirectos, ou apenas algumas combinações parciais podendo a sua origem ser interna ou externa à empresa. Esta expressão analítica não tem necessariamente que se exprimir em unidades monetárias, podendo, consoante os casos, representar quantidades que

se relacionam directamente com o custo como sejam quantidades de material ou de energia consumida.

Em seguida devem ser obtidas expressões para os requisitos ambientais considerados relevantes em função das mesmas variáveis com que foram expressos o desempenho e o custo. Consoante o tipo de produto e tecnologias usadas, esta fase pode revestir-se de dificuldade por ausência de registos históricos, todavia deve ser usada a informação de obtenção possível, ainda que generalizada.

Uma vez obtidas as várias expressões (funções de desempenho, função custo e funções ambientais) devem ser obtidas as suas representações gráficas dividindo em vários intervalos o contradomínio de cada resposta. A interpretação das linhas (uma variável) ou das superfícies (duas variáveis) assim obtidas e nalguns casos mesmo, a sobreposição das curvas relativas ao desempenho e ao custo permitirá identificar valores para os parâmetros de projecto que garantem a performance desejada e a sua obtenção em zonas de reduzido custo. No caso em que as expressões contenham mais que duas variáveis, devem ser criteriosamente escolhidas as variáveis a fixar e os seus valores. Os processos de análise serão então, semelhantes aos anteriormente referidos. Em situações de maior simplicidade poderá não ser necessário o uso de representações gráficas, podendo as interpretações resultarem apenas de interpretação numérica.

Nesta metodologia, sempre que sejam bem conhecidos quais os parâmetros de projecto que afectam as características do produto ou quando o respectivo modelo fenomenológico é já conhecido, as partes relativas aos planeamentos de experiências podem ser suprimidas.

A Fig. 3.1 apresenta uma representação esquemática da metodologia proposta.

O percurso esquemático da metodologia apresenta quatro passos que implicam tomadas de decisão (losangos) adiante designadas por D_1 , D_2 , D_3 e D_4 . Caso em D_2 se verifique um sim, não ocorrerá D_3 . Ao serem possíveis duas opções em cada caso, a metodologia proposta admite percursos diferentes representando assim a globalidade das situações de projecto. Cada um dos vários percursos, representados na Tabela 3.2, pode ser inequivocamente identificado por uma determinada sequência. Esta forma de referência será adiante usada para caracterizar cada um dos casos apresentados.

A metodologia proposta tem uma aplicabilidade de carácter universal (na medida em que não é pensada para um produto/processo em particular), porém é aberta à introdução de novas contribuições e à integração com outras metodologias.

Sempre que possível a sua aplicação, constitui-se como uma ferramenta muito útil às equipas de projecto, na medida em que permite, numa fase ainda inicial, a tomada de decisões devidamente suportadas na performance desejada e em custos de produção reduzidos. A grande mais-valia desta abordagem reside no facto de combinar desempenho, custo e ambiente, na tomada de decisões na fase conceptual de projecto. Apesar da eventual implicação de custos e

tempos na realização de experiências, a utilização da informação gerada pode promover benefícios significativos.

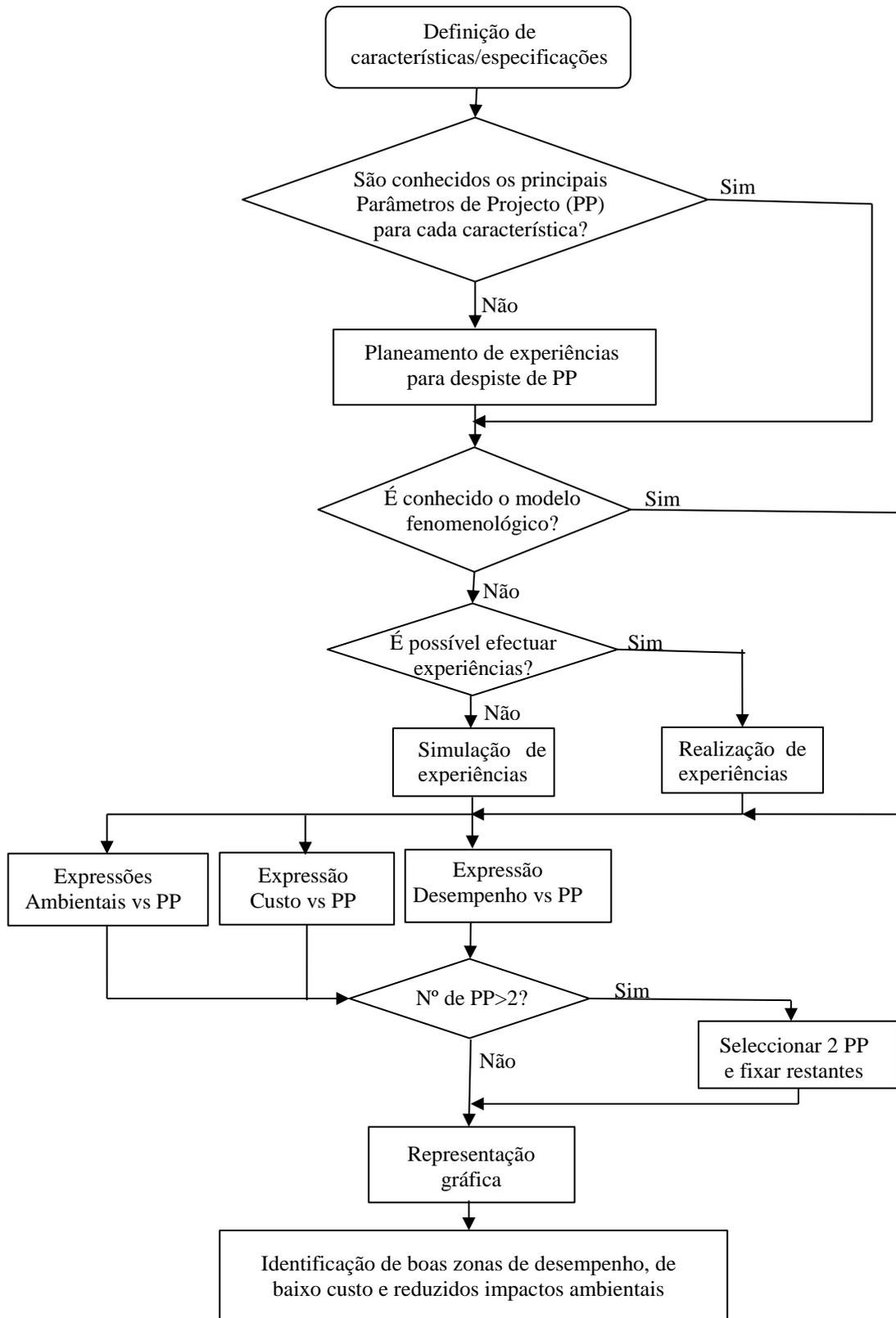


Fig. 3.1 - Representação esquemática da metodologia proposta.

Tabela 3.2 - Percursos possíveis da metodologia apresentada.

Percurso	São conhecidos os principais Parâmetros de Projecto (PP) para cada característica?	É conhecido o modelo fenomenológico?	É possível efectuar experiências?	Nº de PP>2?
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
1	Sim	Sim		Sim
2	Sim	Sim		Não
3	Sim	Não	Sim	Sim
4	Sim	Não	Sim	Não
5	Sim	Não	Não	Sim
6	Sim	Não	Não	Não
7	Não	Sim		Sim
8	Não	Sim		Não
9	Não	Não	Sim	Sim
10	Não	Não	Sim	Não
11	Não	Não	Não	Sim
12	Não	Não	Não	Não

Esta metodologia constitui uma forma de lidar com projectos acoplados e pode ser de grande utilidade como suporte à tomada de decisão em projectos sustentáveis. O sucesso de um projecto depende fortemente das opções então tomadas. A sequência dos diversos passos não é arbitrária; primeiro devem ser satisfeitas as necessidades de desempenho e custo, e só depois devem ser consideradas as necessidades ambientais (Mourão *et al.*, 2013).

Em suma, a metodologia apresentada constitui um contributo para a tomada de decisão na fase inicial de projectos acoplados, justamente quando há mais carência de informação.

Teoricamente esta metodologia apresenta as seguintes vantagens e desvantagens:

Vantagens:

- disponibilização de informação preciosa aquando da fase inicial de projecto;
- pouco dispendiosa

Desvantagens:

- experiências necessárias podem envolver quantidades de tempo não compatíveis;
- dificuldade em modelar alguns fenómenos

No capítulo seguinte são apresentados vários casos, todos com diferentes objectivos, diferentes quantidades de dados existentes e consequentemente, representando diferentes percursos desta metodologia. A sua apresentação conjunta contribui para a validação da metodologia proposta.

4 ESTUDO DE CASOS

4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados alguns casos onde será testada a metodologia proposta, a qual permitirá aos projectistas fundamentar as suas decisões numa fase caracterizada pela escassa existência de informação. Consiste na obtenção e uso de informação para ser considerada pelos projectistas na fase inicial de projecto de produtos que, para além de garantir o desempenho desejado (razão de ser do projecto), este seja alcançado com um bom (baixo) valor de custo e minimizando o consumo de recursos com extracção e efeitos com impacto ambiental negativo, mesmo após o seu período de utilização.

O primeiro caso apresentado tem origem na tese de mestrado do autor na qual se pretendia conhecer a influência de alguns parâmetros de projecto na funcionalidade de juntas de vedação de cortiça com borracha (Fradinho, 2003). Todo o trabalho experimental decorreu numa grande unidade industrial portuguesa. Este estudo foi posteriormente desenvolvido, tendo dado origem a dois artigos (Fradinho *et al.*, 2009) (Fradinho *et al.* 2012). Nesta dissertação os mesmos dados são usados para o desenvolvimento do produto numa óptica de projecto sustentável.

O segundo caso resulta de um artigo sobre integração do custo e desempenho na fase inicial de projecto no qual foi estudado o caso de reservatórios pressurizados (Fradinho *et al.*, 2011). Este artigo tinha como objectivo encontrar para uma dada pressão, a relação mais favorável em termos de custo, entre diâmetro e comprimento de um reservatório cilíndrico

O caso apresentado em terceiro lugar é um artigo recente intitulado “Contributo metodológico para a tomada de decisão em projecto sustentável – caso de uma estrutura tubular” (Fradinho *et al.*, 2013). Este artigo procura auxiliar os projectistas respondendo à seguinte dúvida: para uma dada estrutura dever-se-ão projectar vãos grandes e portanto menor número de colunas, ou inversamente será preferível uma estrutura mais ligeira embora com maior número de colunas? Como se reflectem estas opções em termos de custo e de impactos ambientais?

4.2 Definição de parâmetros de projecto num produto de cortiça com borracha

A cortiça com borracha, vulgarmente conhecida no mundo anglo-saxónico por “rubbercork” ou “corkrubber”, é um material que alia as propriedades de um elastómero (flexibilidade e resistência a óleos e gases) com as características ímpares de cortiça.

A cortiça é um material vegetal com características excepcionais, nomeadamente, é um recurso renovável, reciclável, não tóxico, durável, além de ser um bom fixador de CO₂ com excelentes propriedades físicas e mecânicas (Mestre & Gil, 2011).

Os montados de sobreiro (árvore emblemática da bacia ocidental do Mediterrâneo), para além da produção de cortiça e de outras actividades económicas decorrentes, como a caça e a pastorícia, desempenham um papel fundamental na regulação dos ciclos da água, da conservação dos solos e no combate à desertificação. Em Portugal ocupam uma área de cerca de 736700 hectares fixando 4,8 milhões de toneladas de CO₂ atmosférico, o equivalente a 5% do total de emissões de CO₂ no país (dados de 2006) (Mestre & Gil, 2011).

Em termos sociais o sector corticeiro é responsável em Portugal, por cerca de 15 000 empregos directos e 100 000 empregos indirectos. Em termos económicos, contribui com cerca de 100 milhões de euros para o PIB.

Existe ainda, um largo potencial de crescimento do sector corticeiro em Portugal, na medida em que a capacidade instalada é inferior à usada e, com excepção das rolhas naturais, todos os outros produtos são pouco valorizados, não obstante as suas excepcionais características físicas e de sustentabilidade. Produtos com aplicações técnicas e na construção sofrem uma grande concorrência por parte de outros sectores, nomeadamente da indústria da madeira e de polímeros. Existe ainda em aberto, uma vasta potencialidade para o desenvolvimento e valorização de novos produtos que incorporem, total ou parcialmente, cortiça. As suas propriedades ecológicas fazem da cortiça um material sustentável por excelência, conferindo-lhe um futuro promissor.

A cortiça constitui o revestimento do tronco e dos ramos do sobreiro (*Quercus Suber* L.). É um material natural constituído por células mortas (cerca de 35 milhões por cm³ (Gil, 1988)), de aspecto alveolar, cujas membranas celulares estão cheias de ar (sem dióxido de carbono), o que juntamente com a impermeabilidade e flexibilidade das paredes celulares, lhe confere particulares características (

Tabela 4.1).

As suas principais propriedades macroscópicas são:

- baixo peso específico;
- elevada deformabilidade e baixa resistência à deformação;

- grande impermeabilidade a líquidos e gases;
- baixa condutividade térmica e acústica;
- grande absorção acústica e vibrática;
- elevada imputrescibilidade;
- capacidade de compressão sem expansão lateral (baixo coeficiente de Poisson).

Tabela 4.1 - Valores médios das características da cortiça (Gil, 1998).

Característica	Valor médio
Massa volúmica	180 kg.m ⁻³
Módulo de Young (compressão)	13 MPa
Módulo de Young (tracção)	18 MPa
Coeficiente de Poisson	0.18
Coeficiente de dissipação de energia	02
Coeficiente de fricção	0.3
Calor específico (a pressão constante)	350 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Coeficiente de difusão (água a 20 °C)	4*10 ⁻¹⁰ m ² .s ⁻³
Difusividade térmica	10 ⁻⁶ m ² .s ⁻¹
Condutividade térmica	0.045 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Tensão de ruptura	1.9 MPa

A cortiça com borracha (Fig. 4.1), ao apresentar as propriedades físico-químicas resultantes das características intrínsecas de cada um dos materiais constituintes, é um material compósito apropriado para juntas de vedação com uma vasta gama de aplicações, como por exemplo, caixas de engrenagens, transmissões, reservatórios de óleo, contadores de gás, transformadores, bombas de óleo e de água e vedantes estáticos de óleos, solventes, massas lubrificantes, líquidos refrigerantes, água, ar e outros fluidos de serviço.

Sendo o(s) elastómeros e os granulados de cortiça, os principais componentes do produto cortiça com borracha, vários outros produtos são necessariamente incorporados na mistura. Assim, a generalidade das misturas são compostas por produtos com as seguintes funções:

- Base (elastómero);
- Carga activa (granulado de cortiça);
- Plastificantes;
- Carga inerte (caulino duro tratado);
- Activadores;
- Vulcanizantes;
- Aceleradores;

– Anti-oxidantes.

Consoante objectivos específicos, a estes produtos podem juntar-se ainda pigmentos, retardadores ou outros produtos.



Fig. 4.1 - Folha de cortiça com borracha.

O processo industrial de produção de cortiça com borracha é traduzido pelo fluxograma da Fig. 4.2.

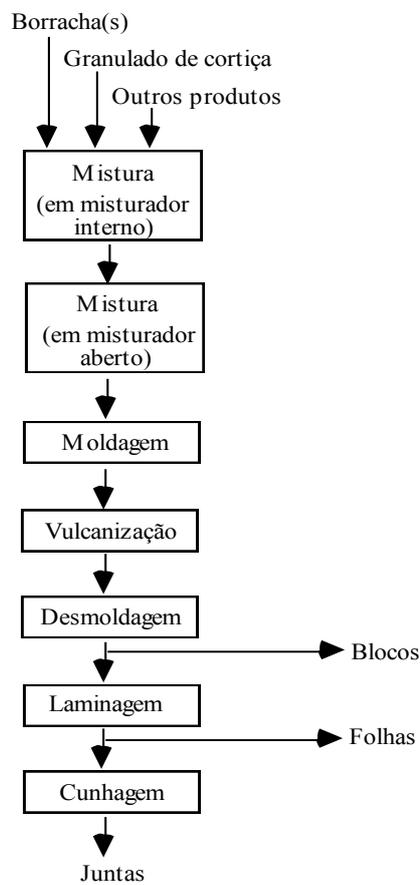


Fig. 4.2 - Processo industrial de produção de cortiça com borracha.

As principais especificações que caracterizam o produto final são:

- Peso específico;
- Dureza;
- Tensão de ruptura;
- Compressibilidade;
- Recuperação;
- Flexibilidade;
- Variação de volume quando em imersão em óleos.

Dada a grande gama de aplicação das juntas de vedação, são inúmeras as referências caracterizadas pelos diferentes valores das suas especificações.

Para mistura-base do estudo efectuado, foi escolhida uma referência comercial simples e típica cuja composição é apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Composição da mistura-base.

Função	Produto	Quantidade (PHR)
Elastómero	Borracha nitrílica (NBR)	100,0
Carga activa	Granulado 1/2 mm-55/65 kg/m ³	190,0
Plastificante	Óleo sintético di-octil-ftalato (DOP)	20,0
Carga inerte	Caulino duro tratado	100,0
Activador	Ácido esteárico	1,0
Activador	Óxido de zinco (ZnO)	5,0
Vulcanizante	Enxofre (S)	2,3
Anti-oxidante	“Octylated diphenylamine” (ODPA)	1,5
Acelerador	“Tetramethyl thiuram monosulfide” TMTM	1,5
Nota: As quantidades estão apresentadas percentualmente em relação ao peso de borracha (PHR-“parts per hundred of rubber”)		

As especificações finais (requisitos funcionais) deste produto são as seguintes:

Peso específico (mínimo)	690 kg/m ³
Dureza	60/80 IRHD (“Int. Rubber Hardness Degrees”)
Tensão de ruptura (mínima)	2.20 MPa
Compressibilidade	25/35 %
Recuperação (mínima)	75 %
Flexibilidade (mínima)	5 diâmetros
Resistência aos óleos	
Fuel A	-2/ +10 %
ASTM Oil nº 1	-5/ +10 %
ASTM Oil nº 3	-2/ +15 %

Genericamente os diferentes produtos ou materiais podem surgir, ou por desenvolvimento da empresa produtora, ou por solicitação dos clientes. Esta última situação representa claramente o caso mais comum. Deste modo, assume fundamental importância a

capacidade de, a partir de um conjunto de especificações e com um mínimo de experiências, obter um produto que satisfaça as especificações impostas. Este objectivo é normalmente atingido com base no conhecimento empírico dos responsáveis face a relações causa-efeito anteriormente verificadas. Este conhecimento nunca está sistematizado numa forma escrita e é normalmente considerado conhecimento próprio das empresas.

Na sua Dissertação de Mestrado (Fradinho, 2003) denominada “A influência de alguns parâmetros de projecto na funcionalidade de juntas de vedação de cortiça com borracha”, o autor estudou as principais variáveis que influenciam a tensão de ruptura e a compressibilidade, que são dois dos requisitos funcionais mais relevantes para as juntas de vedação deste material. Foi usada a Metodologia de Superfície de Resposta (“Response Surface Methodology” – RSM) por forma a conhecer a importância directa e cruzada de um grupo de variáveis na resposta característica do produto, numa determinada região de interesse.

Inicialmente foram estudadas cinco variáveis, que face ao conhecimento empírico eram tidas como potencialmente importantes para os requisitos em estudo (tensão de ruptura e compressibilidade). As cinco variáveis estudadas (parâmetros de projecto) foram o peso específico (x_1), a quantidade de granulado de cortiça (x_2), a quantidade de plastificante (x_3), a quantidade de carga inerte (x_4) e a dimensão do granulado de cortiça (x_5). Para exploração inicial, foi adoptado um modelo de primeiro grau com dois níveis (-1, +1) em cada variável dando origem a 32 blocos experimentais. Depois de testada a significância do modelo matemático através do teste da hipótese nula com um intervalo de confiança de 95 % e de verificada a normalidade dos resíduos do modelo empírico, foi efectuada a análise de resultados.

Para as duas respostas considerados, este trabalho experimental realizado na primeira fase, identificou como principais variáveis o peso específico, a quantidade relativa de granulado e a sua granulometria. Numa segunda fase, estas três variáveis foram depois estudadas em cinco níveis ($-\sqrt{2}$, -1, 0, +1, $+\sqrt{2}$) através de um modelo central compósito (“central composite design”), tendo sido mantidos todos os restantes procedimentos experimentais. É de referir que, enquanto o peso específico e a quantidade relativa de granulado são variáveis contínuas, a dimensão do grão é uma variável discreta. Com efeito, o granulado, ou tem uma granulometria 1/2 mm, ou 2/4 mm (comercialmente, existe também a granulometria de 0.5/1 mm). Esta situação não se colocou aquando da 1ª fase das experiências porque aí cada variável assumia apenas dois níveis. Assim, o modelo central compósito, foi aplicado separadamente ao granulado 1/2 mm e ao granulado 2/4 mm, tendo sido em cada um dos casos, estudadas as variáveis peso específico e quantidade relativa de granulado.

Para o granulado de 1-2 mm, as expressões (4.1) e (4.2), traduzem o comportamento das respostas em estudo, dentro da região experimental, com um nível de significância de 95%, em que a tensão de ruptura é expressa em MPa, a compressibilidade em %, e x_1 e x_2 representam

respectivamente as variáveis codificadas peso específico e quantidade relativa de granulado de cortiça, numa forma adimensional.

$$T. Ruptura = 2.82 + 0.26x_1 + 0.12x_2 \quad (4.1)$$

$$Compressibilidade = 31.1 - 3.4x_1 - 2.3x_2 \quad (4.2)$$

A codificação das variáveis foi efectuada de acordo com as expressões (4.3) e (4.4)

$$x_1 = \frac{(X_1 - 730)}{50} \quad (4.3)$$

$$x_2 = \frac{(X_2 - 170)}{30} \quad (4.4)$$

em que X_1 e X_2 representam os valores efectivos do peso específico em kg/m^3 e da quantidade de granulado de cortiça em PHR (“parts per hundred of rubber”). Desta forma, os valores centrais são respectivamente 730 kg/m^3 e 170 PHR , correspondendo cada unidade codificada a 50 kg/m^3 e a 30 PHR . Ambas as respostas foram estudadas no domínio codificado de $[-1,41; 1,41]$ que correspondem aos domínios efectivos de $[659 \text{ kg/m}^3; 801 \text{ kg/m}^3]$ e $[128 \text{ PHR}; 212 \text{ PHR}]$ respectivamente.

A validação deste modelo empírico foi efectuada comparando valores experimentais com valores gerados analiticamente através das expressões (4.1)e (4.2), sendo os desvios verificados na ordem de 5%. Considerando a complexidade do processo industrial estas diferenças são consideradas pequenas e, portanto, o modelo empírico revelou-se apropriado.

Ao predizer os valores das respostas em função dos valores das variáveis, esta informação afigura-se de grande interesse prático para os projectistas do material cortiça com borracha na medida em que permite chegar mais rapidamente à produção de um produto específico diminuindo o número de experiências necessárias.

No prosseguimento do trabalho, estes dados foram usados para verificação de uma metodologia que permita conjugar simultaneamente a satisfação dos requisitos funcionais de um produto com a sua obtenção a baixos custos (Fradinho *et al.* , 2009) (Fradinho *et al.* 2012).

As representações gráficas das expressões (4.1) e (4.2) são ilustradas nas Fig. 4.3 e Fig. 4.4.

Nas Fig. 4.5 e Fig. 4.6, estão representadas as projecções horizontais das superfícies de resposta nas suas zonas centrais do domínio

Nesta fase, o projectista tem já o conhecimento, com bastante proximidade, de como duas importantes variáveis de projecto influenciam dois requisitos funcionais importantes do

produto. Simplificando, é conhecido o desempenho do produto em função de dois importantes parâmetros de projecto.

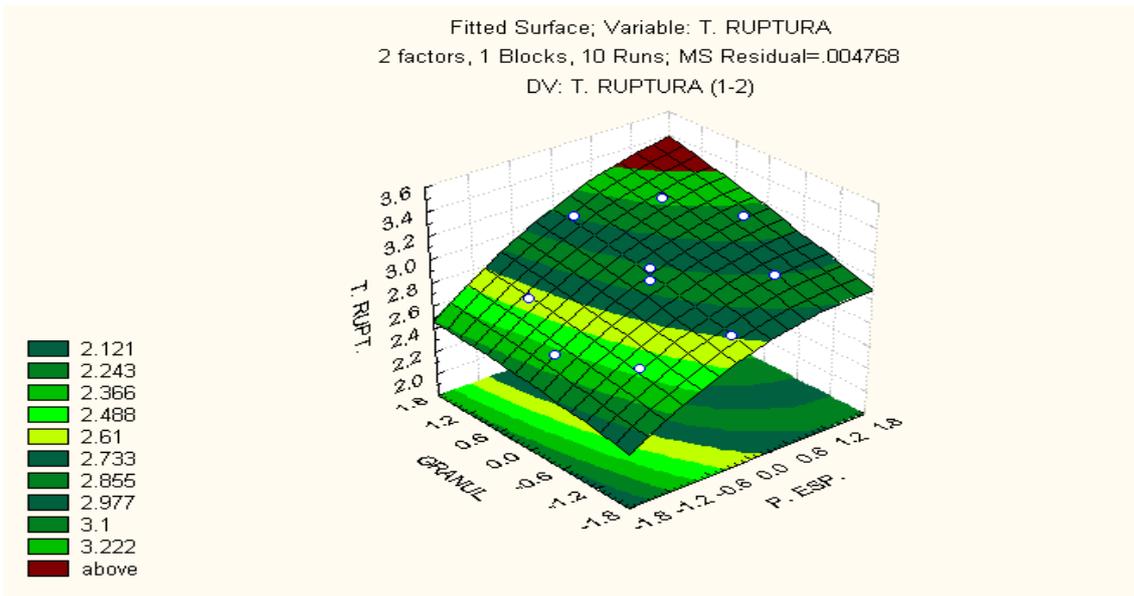


Fig. 4.3 - Superfície de resposta da tensão de ruptura em função do peso específico e da quantidade de granulado, com granulado 1-2 mm.

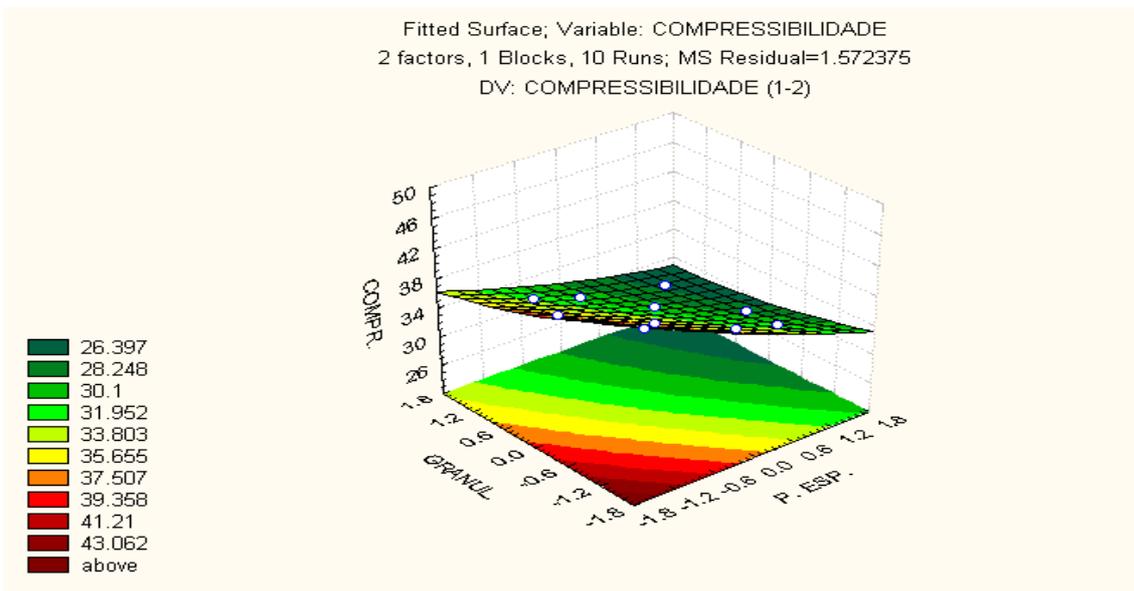


Fig. 4.4 - Superfície de resposta da compressibilidade em função do peso específico e da quantidade de granulado, com granulado 1-2 mm.

Através da análise às expressões (4.1) e (4.2) conclui-se que, a um aumento do peso específico e/ou de quantidade de granulado, corresponde um aumento da tensão de ruptura. Relativamente à compressibilidade o efeito é contrário, isto é, se se pretender aumentar a compressibilidade, tanto se pode actuar diminuindo o peso específico como a quantidade de granulado, todavia as suas repercussões económicas serão diferenciadas.

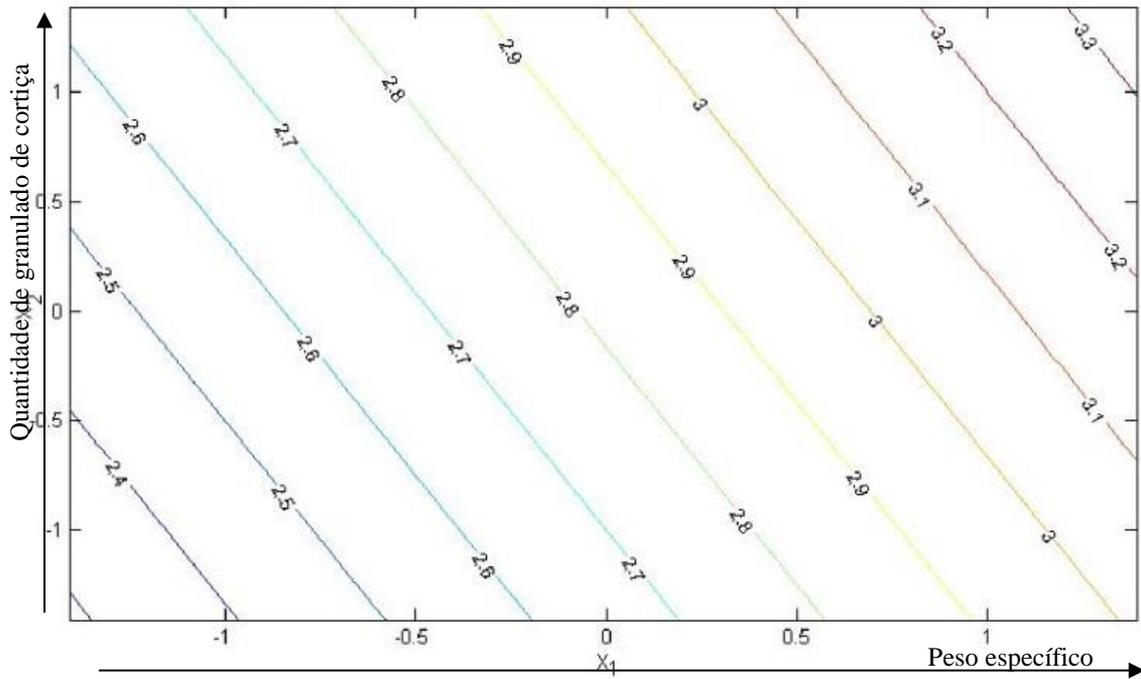


Fig. 4.5 - Projecção da superfície de resposta da Tensão de Ruptura (MPa) sobre o plano x_1Ox_2 .

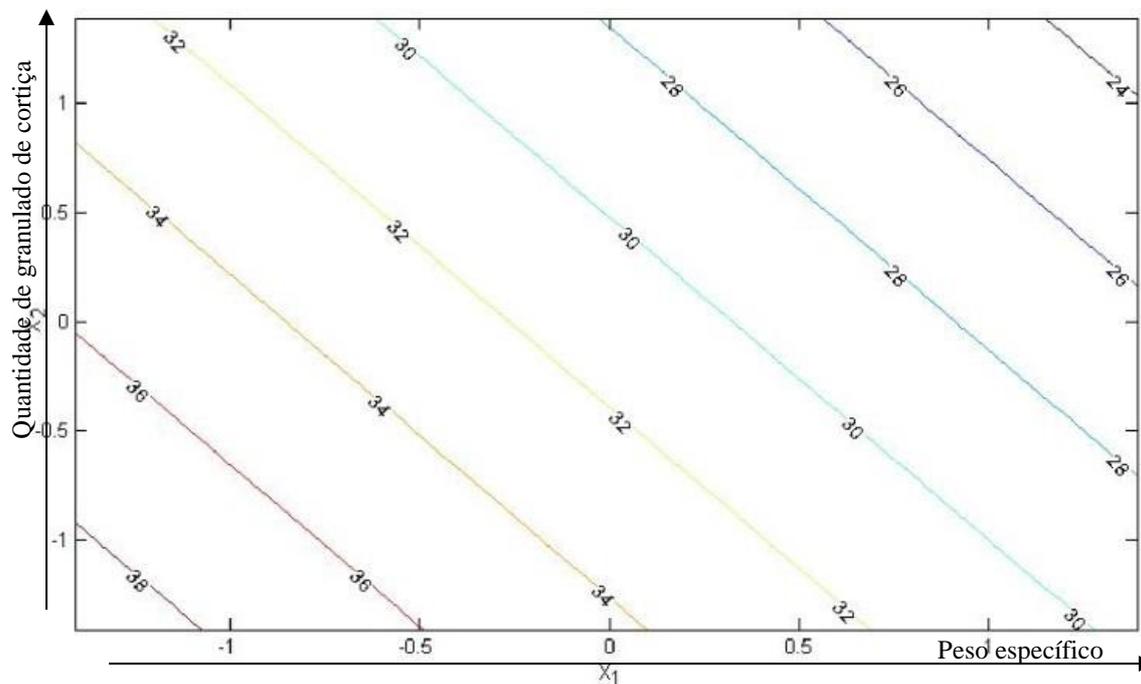


Fig. 4.6 - Projecção da superfície de resposta da Compressibilidade (%) sobre o plano x_1Ox_2 .

De acordo com a representação esquemática da metodologia proposta (Fig. 3.1), deve ser obtida uma função custo em função dos mesmos parâmetros (variáveis) que condicionam o desempenho.

A expressão (4.5) apresenta o custo material da mistura-tipo usada, em €/m³, em função das anteriores variáveis x_1 (peso específico) e x_2 (quantidade relativa de granulado de cortiça). Os custos usados para as diferentes matérias-primas podem não estar actualizados,

contudo é de supor não terem ocorrido significativas diferenças em relação aos valores actuais. São de realçar os valores absolutos dos números que evidenciam que o custo de cada m^3 deste material ronda os 1000 € apenas quanto ao custo das matérias-primas. Estes valores são tanto mais significativos se se considerar que as unidades industriais deste tipo processam largas dezenas de metros cúbicos diariamente.

$$Custo \left(\frac{\text{€}}{m^3} \right) = \frac{937,558 + 64,216x_1 + 106,417x_2 + 7,289x_1x_2}{1 + 0,075x_2} \quad (4.5)$$

A Fig. 4.7 apresenta a projecção horizontal da superfície de custos dentro das mesmas zonas do domínio das Fig. 4.5 e Fig. 4.6.

As três figuras anteriores podem ser sobrepostas (Fig. 4.8) municiando os projectistas com informação valiosa relativamente ao desempenho e ao custo do produto. O seu principal objectivo será projectar o produto que garanta a funcionalidade pretendida mas com um baixo custo. Por baixo custo entende-se não o custo mínimo, mas sim uma região onde os custos sejam baixos, identificando assim uma boa zona para o projecto. Estas funções são contínuas no seu domínio.

Apesar das várias isolinhas apresentarem inclinações semelhantes, ainda assim é possível identificar zonas na mesma gama de tensão de ruptura e compressibilidade mas com diferentes custos. Para melhor ilustração do procedimento, considere-se que se tem a necessidade de produzir dois materiais compósitos de cortiça com borracha com as especificações constantes na Tabela 4.3. A Tensão de Ruptura é normalmente apresentada como um mínimo a garantir e a compressibilidade como um intervalo de múltiplos consecutivos de cinco.

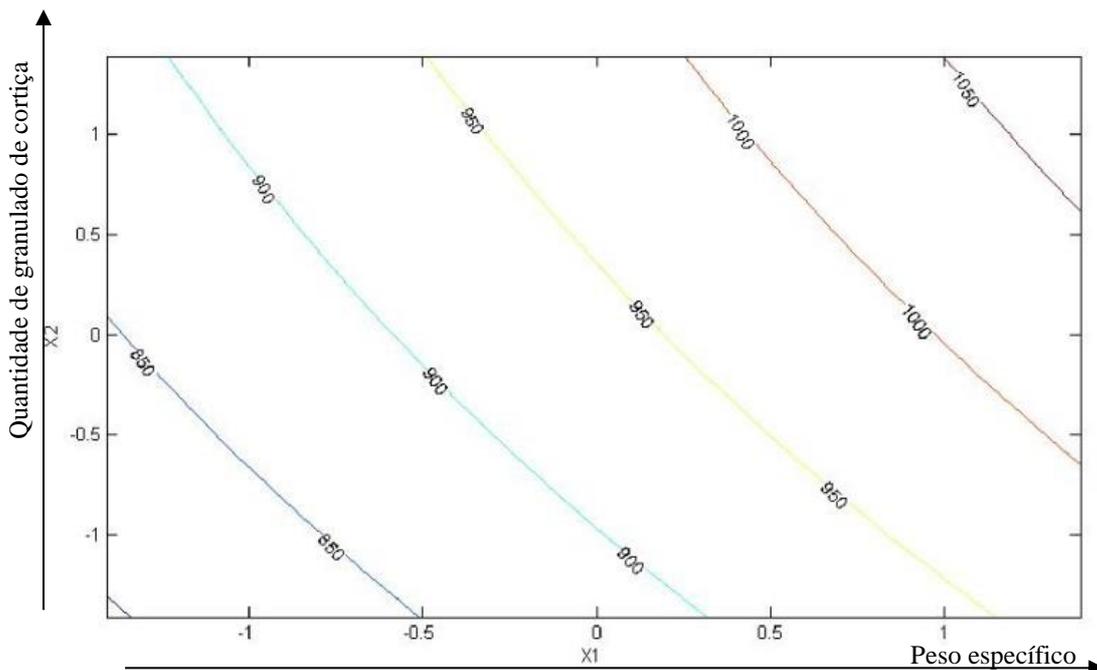


Fig. 4.7 - Projecção da superfície de custos (€/m^3) sobre o plano x_1Ox_2 .

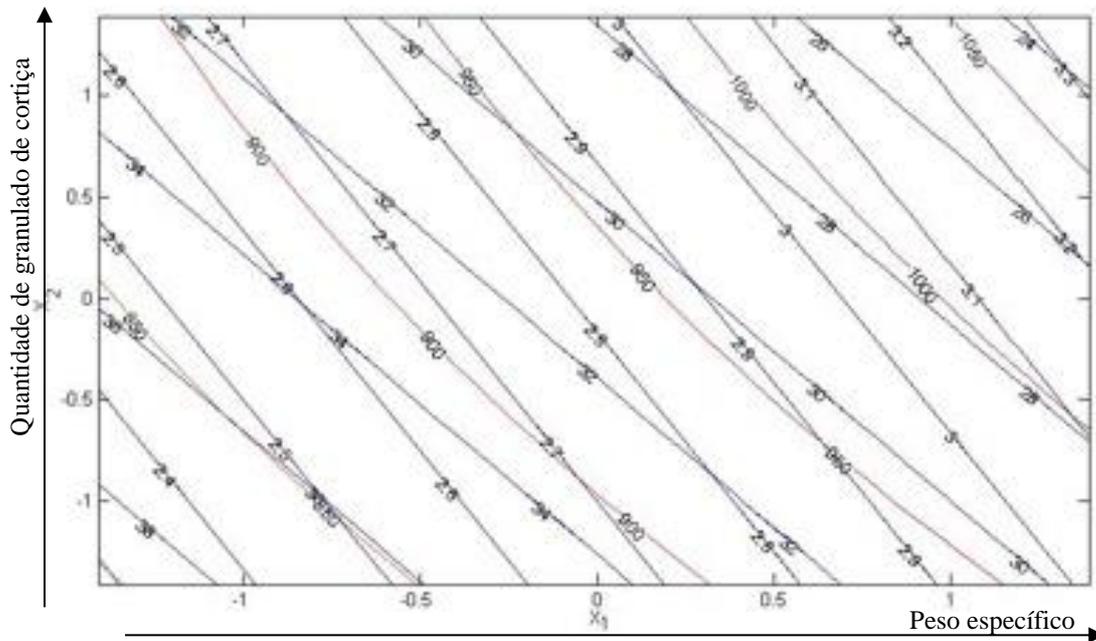


Fig. 4.8 - Projecções sobrepostas das superfícies da Tensão de Ruptura, da Compressibilidade e do Custo, sobre o plano x_1Ox_2 .

Tabela 4.3 - Especificações de hipotéticos produtos de cortiça com borracha.

Produto	Tensão de Ruptura (mínima) (MPa)	Compressibilidade (%)
Produto 1	2,8	25-30
Produto 2	2,7	30-35

Através da informação contida nas Fig. 4.5 e Fig. 4.6, os projectistas deverão identificar quais as combinações de valores das variáveis que satisfazem o desempenho pretendido. Constata-se que, ainda assim, existe uma larga gama de valores possíveis face a este objectivo. No passo seguinte e através da informação constante na Fig. 4.8, os responsáveis identificarão a zona de menores custos dentro da gama de valores possíveis. Este procedimento é ilustrado nas Fig. 4.9 e Fig. 4.10, onde as áreas a cinzento assinalam zonas onde os dois requisitos funcionais são satisfeitos e as áreas a negro identificam em que partes dessas zonas ocorrem os menores custos.

No caso do Produto 1, considerem-se dois pontos A(-0,5;1,4) e B(1,4;0,5) os quais garantem as especificações mas têm diferentes custos (expressões (4.6) e (4.7)).

$$\text{Custo A} = 946,62 \text{ €/m}^3 \tag{4.6}$$

$$\text{Custo B} = 1046,53 \text{ €/m}^3 \tag{4.7}$$

O ponto B corresponde a um produto com a mesma funcionalidade do ponto A, todavia o seu custo material apresenta uma diferença não negligenciável de 10,5%.

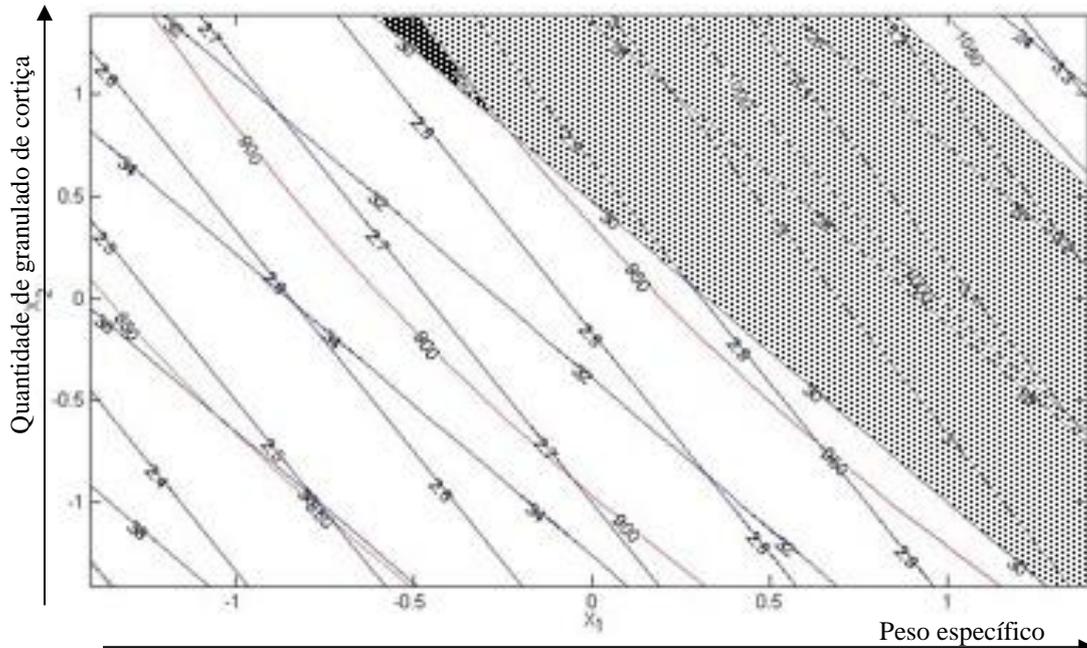


Fig. 4.9 - Gamas da Tensão de Ruptura, Compressibilidade e Custo para o Produto 1.

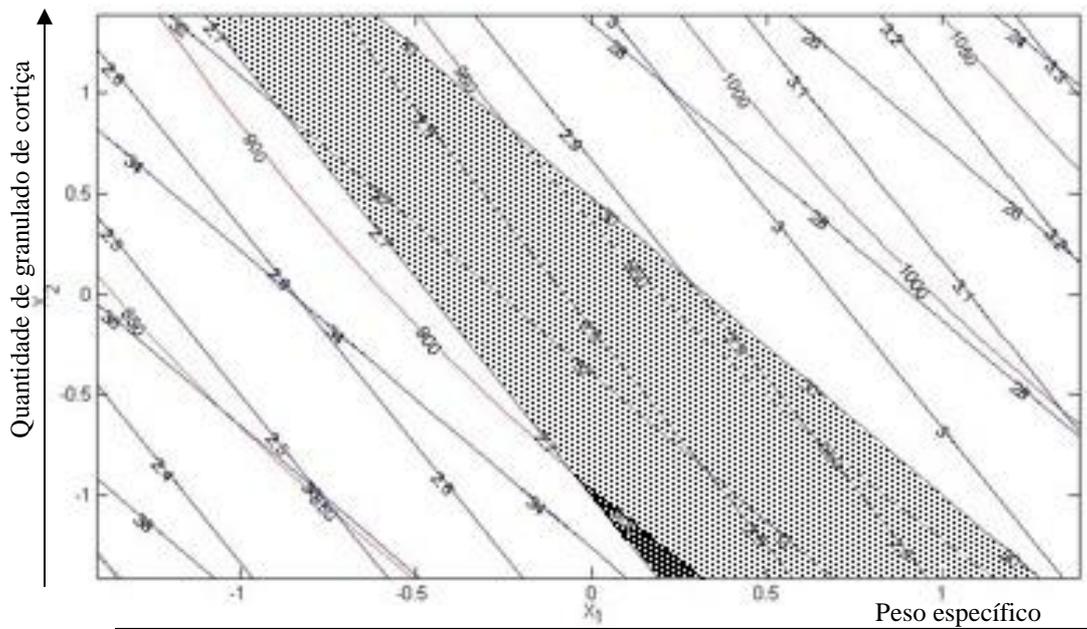


Fig. 4.10 - Gamas da Tensão de Ruptura, Compressibilidade e Custo para o Produto 2.

Desta forma, é possível identificar valores do peso específico (x_1) e da quantidade relativa de granulado (x_2) que garantem a funcionalidade desejada e a um baixo custo (no exemplo anterior, cerca de 950 €/m³ para o Produto 1 e 900 €/m³ para o Produto 2). Esta integração do desempenho e do custo material (neste caso o custo industrial mais significativo) constitui-se de grande utilidade para os projectistas deste tipo de material, na medida em que permite, mediante a utilização de poucos recursos, chegar com rapidez ao produto final desejado e em condições concorrenciais vantajosas.

Numa economia onde qualidade, custo e tempo são determinantes para a sobrevivência das empresas, a metodologia apresentada neste caso mostra a utilidade de uma ferramenta

preditiva, especialmente quando não são aplicáveis leis científicas para a modelação da resposta dos produtos em projecto. A sua aplicabilidade não se restringe ao projecto de novos produtos, sendo possível a sua utilização em ajustes em produtos correntemente em produção na persecução da melhoria do binómio desempenho/custo.

Considerando que todos os processos industriais podem sempre ser melhorados em termos de qualidade e de produtividade, a mesma assunção é também possível para mudanças no sentido de uma maior sustentabilidade ambiental. O consumo de menos recursos não renováveis e a menor geração de resíduos e efluentes surgem, de um modo geral, como as esferas de actuação mais imediatas.

A observação do fluxograma da Fig. 4.2, permite identificar algumas áreas a explorar no caminho da produção do material cortiça com borracha, de uma forma menos agressiva ambientalmente e, portanto, no caminho de uma maior sustentabilidade. Não se pretendendo ter uma análise exaustiva e completa, os seguintes aspectos emergem como possíveis de estudo e/ou alteração para uma menor “pegada ecológica” na produção de cortiça com borracha:

- Elastómero – É de origem sintética, derivado do petróleo. A sua substituição por borracha natural não é equacionável porque esta tem menor durabilidade e menor resistência a óleos, luz e ao calor. Contudo, os projectistas têm a possibilidade de estudar e projectar misturas com um teor mínimo de borracha, desde que salvaguardados os requisitos funcionais pretendidos.
- Granulado de cortiça – É desejável maximizar a quantidade de granulado. A granulometria é muitas vezes imposta por motivos não técnicos (estéticos, facilidade de identificação, etc.) mas os seus diferentes valores são obtidos com diferentes consumos energéticos; quanto menor a granulometria do granulado, maior o consumo de energia para a sua obtenção (mais cortes). Assim, sem prejuízo da funcionalidade, deve-se caminhar do sentido de maiores dimensões do granulado.
- Outros constituintes – Entre estes, a carga inerte é o único usado em quantidades significativas, para além da borracha e do granulado de cortiça. A carga inerte mais comumente usada é o caulino duro tratado, que é extraído de pedreiras causando conseqüentemente grande agressividade ambiental. É o constituinte com menor custo unitário.
- Mistura – Os misturadores internos e externos usados habitualmente nesta indústria são equipamentos com grandes potências eléctricas instaladas, frequentemente sobredimensionados e tecnologicamente ultrapassados. O estudo e actuação nesta área poderá conduzir a significativas reduções de consumo de energia eléctrica. Algumas empresas têm instalados sistemas de cogeração para produção de energia eléctrica a partir da queima de pó de cortiça. A energia

eléctrica é consumida internamente e o seu excesso pode ser vendido à rede nacional.

- Vulcanização – A energia térmica necessária para esta fase deverá ser obtida a partir da queima de pó de cortiça que é um sub-produto sempre gerado na produção de granulado. Algumas unidades industriais têm instalado este tipo de caldeiras.
- Embalagem – Devem ser usadas embalagens simples com produtos reutilizáveis ou recicláveis.
- Fornecedores – O critério de proximidade geográfica deve ser tido em conta.
- Clientes – Deve ser desenvolvida sensibilização junto da cadeia comercial a jusante, no sentido de que, materiais de baixo impacto ambiental serão um factor diferenciador nos tempos vindouros. Com o aumento tendencial do custo de materiais derivados do petróleo e com a já existente tendência para a manufactura sustentável, o interesse pelos materiais de base orgânica aumentará seguramente devido aos seus baixos custos de reciclagem e reprocessamento. A baixa emissão de químicos orgânicos (VOC – “Volatile Organic Compound”) constitui-se também, como um factor simples, mas importante para um mundo saudável. Por estes motivos, a cortiça e os seus materiais compósitos (novos ou existentes) afiguram-se com grande potencialidade.

Os aspectos anteriormente apresentados são exemplos de actuação por parte dos responsáveis pela produção de cortiça com borracha, no caminho de uma atitude mais sustentável e conseqüentemente de maior preocupação e respeito pelas gerações futuras. Todos eles requerem, naturalmente, estudos prévios quanto às suas repercussões económicas e industriais.

Em consonância com a metodologia proposta e depois de terem sido tomadas decisões com base nos requisitos funcionais e económicos, deve-se então considerar os factores ambientais.

Não é do conhecimento do autor a existência de informação pública relativa a factores ambientais ligados à produção de cortiça com borracha. É de admitir que algumas empresas industriais do sector possuam indicadores relativos ao seu próprio processo. Assim, neste trabalho serão feitas algumas simplificações para simplificação da metodologia proposta, sem contudo, afectar a sua exposição.

Em termos energéticos, o consumo de energia eléctrica nas operações de mistura (interna e externa) representa a maior parcela. De acordo com Saidur & Mekhilef (2010) os motores eléctricos instalados numa unidade industrial de produção de produtos de borracha, são responsáveis consumo de cerca de 48% do consumo energético total da mesma. Segundo os mesmos autores, a energia térmica consumida na operação de vulcanização é responsável por

cerca de 20% do consumo energético total. Dada a semelhança do processo, são de admitir valores semelhantes para o caso da cortiça com borracha.

Segundo o documento “Energy Efficiency Index in Rubber Industry” publicado em 2007 pelo Ministério da Energia da Tailândia, o consumo específico energético é a unidade mais adequada para comparações entre processos e equipamentos do mesmo tipo de indústria. É definida como a razão entre o consumo de energia e a quantidade de material processado. De acordo com o mesmo documento, o consumo específico médio para unidades industriais de produção de produtos em borracha, é de 11,74 MJ/kg. Este valor refere-se ao conjunto de energia eléctrica e térmica. Deve ser encarado apenas como orientativo, dada a sua origem em indústrias bastante diferenciadas.

Segundo contactos informais estabelecidos com uma empresa inglesa de cortiça com borracha, foi possível apurar um indicador interno de 0,36 MJ/kg relativo apenas ao consumo de energia eléctrica na operação de mistura interna.

Independentemente da inexactidão dos valores indicados, a energia consumida na produção deste material, depende da quantidade de matéria processada.

Em termos ambientais, o granulado de cortiça é um constituinte que apresenta propriedades interessantes. Como todas as espécies vegetais, o sobreiro converte CO₂ em oxigénio e compostos de carbono, através do processo de fotossíntese. De acordo com um estudo publicado pelo Instituto Superior de Agronomia de Lisboa, calculou-se em 2006, que os montados de sobreiro em Portugal são responsáveis pela fixação de 4,8 milhões de toneladas de CO₂ atmosférico (Mestre e Gil, 2011), o equivalente a 5% das emissões de CO₂. Um sobreiro ao qual é regularmente extraída cortiça, tem uma produção 250% a 450% superior caso não seja efectuada essa extracção. Estima-se que a produção anual de 350 000 toneladas de cortiça seja responsável pela fixação de 182 000 toneladas de CO₂ atmosférico, de onde se obtém o indicador de 0,52 kg de CO₂/kg de cortiça. Nesta óptica, um maior consumo de cortiça corresponde a um contributo ambiental positivo.

Assim, no caso em estudo e em termos estritamente ambientais, são desejáveis um menor processamento de matéria devido à energia consumida e um maior processamento de cortiça devido à fixação de CO₂. Como as superfícies geradas nas figuras anteriores para estudo do desempenho e do custo, têm representado o peso específico em abcissas e a quantidade de granulado de cortiça em ordenadas, então do ponto de vista ambiental são preferíveis as zonas localizadas na parte esquerda superior do referencial, conforme a Fig. 4.11 sugere.

A importância relativa de cada um dos requisitos ambientais dependerá da equipa decisora do projecto e em última análise reflectirá a estratégia da empresa dentro do sector de actividade em que se insere.

De acordo com a metodologia apresentada, as Fig. 4.9 e Fig. 4.10 identificaram regiões em que o desempenho é satisfeito e simultaneamente a um baixo custo, para o exemplo de dois

determinados produtos. Só então devem ser introduzidos os factores ambientais como elementos complementares de decisão. Esta temporização é uma característica própria da metodologia proposta. Assim, a conjugação da informação contida nas Fig. 4.9, Fig. 4.10 e Fig. 4.11, indica a zona superior esquerda das áreas a preto como a mais indicada para os valores dos dois parâmetros de projecto conducentes ao desenvolvimento de um produto dentro de uma lógica integrada de projecto sustentável.

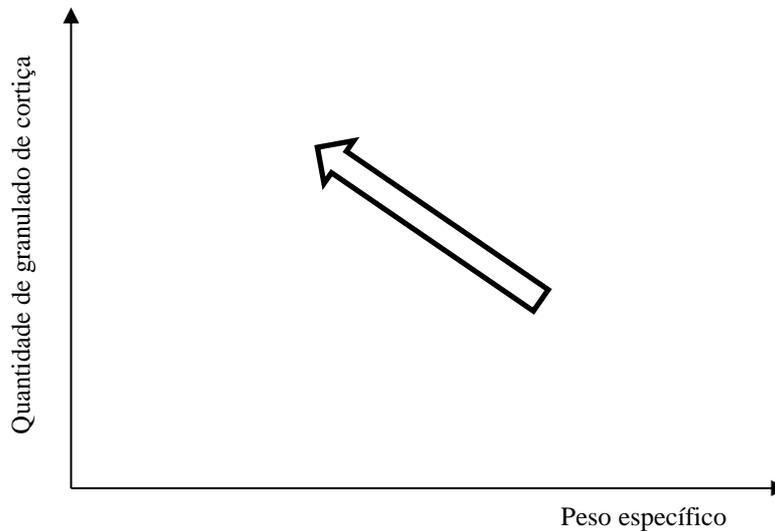


Fig. 4.11 - Localização de regiões ambientalmente preferíveis.

É convicção do autor que a metodologia apresentada e desenvolvida neste trabalho se revela de grande utilidade prática. Esta convicção é reforçada pela sua anterior actividade profissional desenvolvida nesta área industrial.

4.3 Projecto conceptual de reservatórios pressurizados

Neste caso, pretende-se evidenciar que a recolha, o tratamento, a sistematização e a integração de informação técnica e de custeio, se pode revelar de grande utilidade na tomada de decisões em fase muito embrionária de projecto. Desta forma, é possível desenvolver o projecto de um produto que simultaneamente garanta o desempenho pretendido e seja produzido com custos mais favoráveis atendendo aos constrangimentos de cada caso em concreto. Para o efeito, foi feito um estudo de caso de projecto de reservatórios pressurizados (Fradinho *et al.*, 2011), no qual foram desenvolvidos gráficos que relacionam características funcionais – que determinam o desempenho – com o custo específico, os quais permitem tomadas de decisão fundamentadas. Numa fase posterior, foi acrescida também uma componente ambiental para análise.

Considerou-se que os reservatórios estudados neste caso são destinados ao armazenamento de GPL à pressão de 16 bar. A superfície exterior do reservatório é decapada e

pintada sendo prevista uma sobreespessura da chapa, não inferior a 1 mm, para compensar os efeitos da corrosão. Os reservatórios são compostos por um corpo central cilíndrico e por dois fundos copados. Por razões de simplicidade, neste trabalho apenas foram considerados o corpo central e os fundos copados (Fig. 4.12), excluindo-se elementos tais como apoios, entradas de homem e outras ligações ao reservatório.

Foi considerado que o corpo central e os fundos copados dos reservatórios são obtidos a partir de chapas de aço nas espessuras disponíveis no mercado.

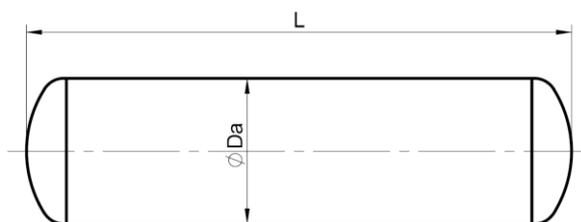


Fig. 4.12 - Dimensões funcionais do reservatório.

Os fundos copados para reservatórios podem ser de forma hemisférica, elíptica, torisférica ou outras. As soluções construtivas mais utilizadas em reservatórios pressurizados são as elípticas e as torisféricas verificando-se que a escolha depende da aplicação, da disponibilidade do mercado e também da tradição dos vários sectores de actividade. Neste trabalho optou-se por fundos de forma torisférica do tipo Korbogen DIN-28013 (Fig. 4.13) por serem de utilização comum em aplicações como a reportada neste estudo. Por razões de natureza construtiva o fundo inclui uma extensão cilíndrica de comprimento $h1$. Neste caso, considerou-se este valor três vezes superior à espessura.

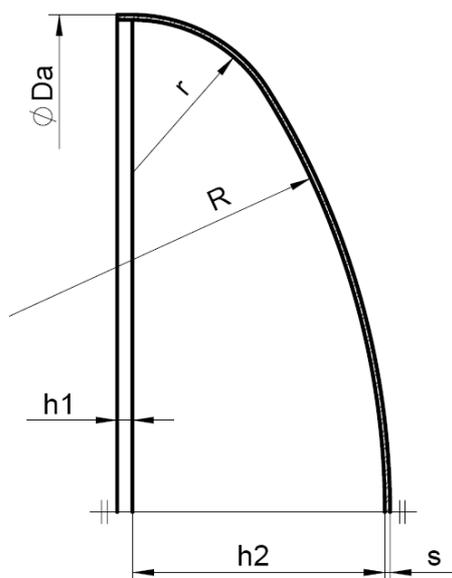


Fig. 4.13 - Fundo copado torisférico do tipo Korbogen DIN-28013 – geometria.

Considerou-se a espessura do fundo copado igual à espessura do corpo cilíndrico, o que para a forma Korbogen, traduz uma opção conservadora relativamente à resistência mecânica

dos fundos comparativamente ao corpo cilíndrico. Esta escolha apresenta também vantagens no fabrico dos reservatórios.

De acordo com (Gelbe, 1994) a expressão (4.8) aplica-se no dimensionamento de reservatórios cilíndricos sujeitos a pressão interior. Essa expressão traduz a relação a verificar no corpo cilíndrico do reservatório para assegurar a sua resistência mecânica.

$$s = \frac{D_a p}{p + 2v \frac{K}{S}} + c_1 + c_2 \quad \text{se } \frac{D_a}{D_i} < 1,2 \quad (4.8)$$

Em que:

D_a = diâmetro exterior;

D_i = diâmetro interior [m] ($D_i = D_a - 2s$);

s = espessura da parede cilíndrica;

K = tensão característica;

S = factor de segurança;

v = factor de correcção para a soldadura [0,8;1];

c_1 = sobreessura relativa ao processo de fabrico;

c_2 = sobreessura relativa ao desgaste e à corrosão;

p = pressão interior

Atendendo a que os reservatórios são construídos em aço e que a pressão nominal é 16 bar, a relação $D_a/D_i < 1.2$ verifica-se para todas as configurações consideradas. Desta forma valida-se a utilização da expressão (4.8) neste estudo.

Tendo em conta que no processo de fabrico dos fundos copados há uma tendência para diminuir a espessura da chapa em algumas zonas, optou-se por considerar uma sobreessura de 2 mm para compensar esta diminuição de espessura e a corrosão. Assim, na expressão (4.8) tem-se $c_1 + c_2 = 2$ mm.

Optou-se por realizar o cálculo da resistência mecânica considerando a condição de ensaio do reservatório. Desta forma, considerou-se $p = 1,5 \times 16$ bar = 24 bar e $S = 1,1$. No respeitante à tensão característica, utilizaram-se os valores 235 N/mm², 275 N/mm² e 355 N/mm² que correspondem respectivamente às tensões de cedência dos aços S235JR, S275JR e S355JR. Em relação ao factor de correcção para a soldadura, utilizou-se $v = 0,9$, valor que se situa a meio do intervalo considerado para esta variável [0.8 a 1].

Nas condições apresentadas e tendo em conta o objectivo do estudo, achou-se por conveniente relacionar a espessura da parede do corpo cilíndrico com o correspondente diâmetro. Assim, para o aço S235JR ($K = 235$ N/mm²), tem-se

$$s = \frac{D_a}{161,2} + 2 \text{ mm} \Leftrightarrow D_a = 161,2 \times (s - 2 \text{ mm}) \quad (4.9)$$

Para os outros tipos de aço, foi seguido um procedimento análogo.

Assim, considerando as espessuras de chapa de aço existentes no mercado, $s = \{8; 10; 12; 14; 16\}$ mm, calcularam-se os correspondentes diâmetros exteriores do corpo cilíndrico do reservatório. Para o caso particular de $s = 12$ mm obtém-se $D_a = 1612$ mm e, conseqüentemente, $D_a/D_i = D_a/(D_a - 2s) = 1,016 < 1,2$.

Definidos os diâmetros em função das espessuras de chapa, calcularam-se os comprimentos do reservatório que permitem acomodar o volume pretendido considerando os seguintes volumes: $V = \{4; 8; 12; 16; 20; 24; 28; 32\}$ m³. Considerou-se que o volume total do reservatório é composto por uma parcela relativa ao corpo cilíndrico e por outra relativa à parte interior dos dois fundos copados.

Através de (Esoe, 2008) e de (Fondayur, 2011) obteve-se que o volume contido no interior da parte torisférica do fundo se pode determinar pela relação aproximada $V_f = 0,1298 \times (D_a - 2s)^3$, onde as variáveis têm o significado apresentado na Fig. 4.13. Assim, o volume total contido no interior do fundo copado é dado por

$$V \cong 0,1298(D_a - 2s)^3 + \frac{\pi(D_a - 2s)^2}{4} h_1 \quad (4.10)$$

em que a segunda parcela representa o volume interior da parte cilíndrica do fundo.

Através da modelação sólida dos reservatórios, obteve-se a relação aproximada para o cálculo da área da superfície exterior da parte torisférica do fundo como sendo $A_f = 1,10 \times D_a^2$. Assim, a área da superfície exterior do fundo copado é dada por

$$A = 1,10D_a^2 + \pi D_a h_1 \quad (4.11)$$

em que a segunda parcela representa a área da superfície exterior da parte cilíndrica do fundo.

De acordo com (Fondayur, 2011), o comprimento interior da parte torisférica do fundo pode ser obtido por $h_2 = 0,255D_a - 0,635s$.

Considerando as expressões anteriores, foram calculados o volume interior, a área da superfície exterior e o comprimento dos reservatórios para cada espessura e para cada tipo de aço.

Com o objectivo de integrar o custo na fase conceptual, foi desenvolvida uma função custo que contemplasse o custo de aquisição do material e os custos associados aos principais processos tecnológicos na produção de reservatórios. Não foram considerados os custos relativos a alguns pormenores, por exemplo, entrada de homem e apoios.

Assim, para o cálculo do custo total dos reservatórios foi usada a expressão (4.12)

$$C_{total} = C_{tp} + C_{mc} + C_{sd} + C_{c+c} + C_{dc} + C_{pt} \quad (4.12)$$

em que:

C_{total} = Custo total

C_{tp} = Custo dos topos

C_{mc} = Custo do material da zona cilíndrica

C_{sd} = Custo da soldadura

C_{c+c} = Custo do corte e da calandragem da chapa

C_{dc} = Custo da decapagem

C_{pt} = Custo da pintura

O custo dos topos foi obtido por consulta a uma empresa especializada neste fabrico; o custo dos materiais foi obtido com base nos seguintes valores médios: 0,72 €/kg para o aço S235JR, 0,74 €/kg para o aço S275JR e 0,89 €/kg para o aço S355JR; o custo da soldadura foi calculado como sendo 8% do custo do material da zona cilíndrica baseado em informações recolhidas em diversas empresas; o custo do corte e da calandragem foi obtido considerando 0,5 €/kg; os custos da decapagem e da pintura foram considerados 5 €/m² e 5,5 €/m², respectivamente. Estes dois últimos tiveram como base a informação provenientes de empresas industriais de metalomecânica.

Não era pretensão deste estudo apurar o custo real de cada reservatório, mas sim, que reflectisse as parcelas de maior valor. Pela mesma razão, não foram considerados os custos de apoios e das entadas e saídas de fluídos, pois que a sua influência se repercutiria praticamente como uma constante.

Os valores calculados relativos ao projecto dos reservatórios e aos seus custos são apresentados de uma forma sistematizada, para cada tipo de aço, nas tabelas seguintes: Tabela 4.4 para o aço S235JR, Tabela 4.5 para o aço S275JR e Tabela 4.6 para o aço S355JR. Em cada tabela e para cada volume e cada espessura, são apresentados valores do diâmetro exterior (D_a), comprimento total do reservatório (L), custo total, relação geométrica L/D_a e o custo total por metro cúbico.

Para melhor visualização, a partir destes valores foram construídos os gráficos constantes nas Fig. 4.14, Fig. 4.15 e Fig. 4.16, cada um deles relativo aos três tipos de aço estudados. Neles, para cada volume, estão representados os custos unitários em função da relação L/D_a .

Tabela 4.4 - Valores calculados de D_a , L , C_{Total} , L/D_a e custo específico para o aço S235JR.

s (mm)	Volume 4 m ³	D _a (m)	L (m)	C _{Total} (€)	L/D _a	€/m ³	Volume 8 m ³	D _a (m)	L (m)	C _{Total} (€)	L/D _a	€/m ³
8		0.967	5.812	1755	6.0	438.64		0.967	11.439	3304	11.8	412.96
10	1.290	3.404	1810	2.6	452.55	1.290	6.562	3226	5.1	403.25		
12	1.612	2.325	1910	1.4	477.43	1.612	4.344	3246	2.7	405.77		
14	1.935	1.768	2373	0.9	593.20	1.935	3.168	3657	1.6	457.09		
16	2.257	1.456	2931	0.7	732.77	2.257	2.485	4178	1.1	522.25		
s (mm)	Volume 12 m ³	D _a (m)	L (m)	C _{Total} (€)	L/D _a	€/m ³	Volume 16 m ³	D _a (m)	L (m)	C _{Total} (€)	L/D _a	€/m ³
8		0.967	17.066	4852	17.7	404.30		0.967	22.693	6401	23.5	400.05
10	1.290	9.721	4642	7.5	386.82	1.290	12.88	6059	10.0	378.68		
12	1.612	6.363	4583	4.0	381.88	1.612	8.382	5919	5.2	369.94		
14	1.935	4.569	4941	2.4	411.73	1.935	5.97	6225	3.1	389.04		
16	2.257	3.513	5424	1.6	451.96	2.257	4.542	6670	2.0	416.90		
s (mm)	Volume 20 m ³	D _a (m)	L (m)	C _{Total} (€)	L/D _a	€/m ³	Volume 24 m ³	D _a (m)	L (m)	C _{Total} (€)	L/D _a	€/m ³
8		0.967	28.320	7950	29.3	397.49		0.967	33.947	9499	35.1	395.79
10	1.290	16.038	7475	12.4	373.74	1.290	19.197	8891	14.9	370.44		
12	1.612	10.401	7257	6.5	362.83	1.612	12.42	8593	7.7	358.05		
14	1.935	7.371	7509	3.8	375.43	1.935	8.772	8793	4.5	366.36		
16	2.257	5.570	7916	2.5	395.80	2.257	6.599	9162	2.9	381.73		
s (mm)	Volume 28 m ³	D _a (m)	L (m)	C _{Total} (€)	L/D _a	€/m ³	Volume 32 m ³	D _a (m)	L (m)	C _{Total} (€)	L/D _a	€/m ³
8		0.967	39.574	11048	40.9	394.58		0.967	45.201	12597	46.7	393.67
10	1.290	22.355	10306	17.3	368.09	1.290	25.514	11723	19.8	366.36		
12	1.612	14.439	9930	9.0	354.63	1.612	16.457	11266	10.2	352.06		
14	1.935	10.173	10077	5.3	359.88	1.935	11.574	11361	6.0	355.02		
16	2.257	7.627	10408	3.4	371.73	2.257	8.656	11654	3.8	364.19		

Tabela 4.5 - Valores calculados de D_a , L , C_{Total} , L/D_a e custo específico para o aço S275JR.

s (mm)	Volume 4 m ³	D _a (m)	L (m)	C _{Total} (€)	L/D _a	€/m ³	Volume 8 m ³	D _a (m)	L (m)	C _{Total} (€)	L/D _a	€/m ³
8		1.131	4.311	1599	3.8	399.82		1.131	8.407	2938	7.4	367.29
10	1.508	2.585	1671	1.7	417.74	1.508	4.885	2896	3.2	362.03		
12	1.885	1.826	2205	1.0	551.25	1.885	3.296	3362	1.7	420.23		
14	2.262	1.446	2645	0.6	661.15	2.262	2.466	3756	1.1	469.53		
16	2.639	1.245	*	*	*	2.639	1.995	4323	0.8	540.38		
s (mm)	Volume 12 m ³	D _a (m)	L (m)	C _{Total} (€)	L/D _a	€/m ³	Volume 16 m ³	D _a (m)	L (m)	C _{Total} (€)	L/D _a	€/m ³
8		1.131	12.504	4277	11.1	356.44		1.131	16.6	5618	14.7	351.10
10	1.508	7.185	4121	4.8	343.45	1.508	9.485	5348	6.3	334.25		
12	1.885	4.767	4520	2.5	376.66	1.885	6.237	5677	3.3	354.79		
14	2.262	3.487	4868	1.5	405.65	2.262	4.507	5979	2.0	373.71		
16	2.639	2.744	5402	1.0	450.14	2.639	3.493	6482	1.3	405.10		
s (mm)	Volume 20 m ³	D _a (m)	L (m)	C _{Total} (€)	L/D _a	€/m ³	Volume 24 m ³	D _a (m)	L (m)	C _{Total} (€)	L/D _a	€/m ³
8		1.131	20.697	6957	18.3	347.83		1.131	24.794	8297	21.9	345.70
10	1.508	11.786	6573	7.8	328.66	1.508	14.086	7798	9.3	324.94		
12	1.885	7.708	6833	4.1	341.67	1.885	9.178	7992	4.9	332.98		
14	2.262	5.528	7091	2.4	354.55	2.262	6.548	8203	2.9	341.78		
16	2.639	4.243	7560	1.6	378.01	2.639	4.992	8640	1.9	360.00		
s (mm)	Volume 28 m ³	D _a (m)	L (m)	C _{Total} (€)	L/D _a	€/m ³	Volume 32 m ³	D _a (m)	L (m)	C _{Total} (€)	L/D _a	€/m ³
8		1.131	28.890	9636	25.5	344.14		1.131	32.987	10975	29.2	342.97
10	1.508	16.386	9024	10.9	322.27	1.508	18.686	10249	12.4	320.28		
12	1.885	10.649	9148	5.6	326.73	1.885	12.119	10305	6.4	322.03		
14	2.262	7.569	9314	3.3	332.65	2.262	8.589	10426	3.8	325.81		
16	2.639	5.741	9719	2.2	347.10	2.639	6.491	10799	2.5	337.46		

* Não se considerou dado que o volume interior dos fundos copados é superior ao volume especificado.

Tabela 4.6 - Valores calculados de D_a , L , C_{Total} , L/D_a e custo específico para o aço S355JR.

s (mm)	Volume	D_a (m)	L (m)	C_{Total} (€)	L/D_a	€/m ³	Volume	D_a (m)	L (m)	C_{Total} (€)	L/D_a	€/m ³
8		10	12	14	16	8		10	12	14	16	
Volume 4 m ³												
8	Volume 4 m ³	1.458	2.721	1597	1.9	399.37	Volume 8 m ³	1.458	5.17	2745	3.5	343.17
10		1.944	1.738	1963	0.9	490.77		1.944	3.113	3016	1.6	376.96
12		2.43	1.332	2560	0.5	640.09		2.43	2.212	3556	0.9	444.47
14		2.917	1.153	*	*	*		2.917	1.764	3583	0.6	447.87
16		3.403	1.081	*	*	*		3.403	1.529	*	*	*
8		Volume 12 m ³	1.458	7.618	3893	5.2		324.44	Volume 16 m ³	1.458	10.066	5041
10	1.944		4.489	4070	2.3	339.15	1.944	5.864		5122	3.0	320.15
12	2.43		3.091	4553	1.3	379.39	2.43	3.971		5548	1.6	346.76
14	2.917		2.374	4540	0.8	378.36	2.917	2.984		5499	1.0	343.70
16	3.403		1.978	5174	0.6	431.15	3.403	2.426		6105	0.7	381.58
8	Volume 20 m ³		1.458	12.515	6189	8.6	309.46	Volume 24 m ³		1.458	14.963	7337
10		1.944	7.239	6175	3.7	308.75	1.944		8.615	7228	4.4	301.15
12		2.430	4.850	6544	2.0	327.18	2.43		5.73	7541	2.4	314.19
14		2.917	3.595	6456	1.2	322.82	2.917		4.205	7415	1.4	308.97
16		3.403	2.874	7037	0.8	351.83	3.403		3.323	7968	1.0	332.00
8		Volume 28 m ³	1.458	17.411	8485	11.9	303.04		Volume 32 m ³	1.458	19.86	9633
10	1.944		9.990	8282	5.1	295.77	1.944	11.365		9334	5.8	291.69
12	2.43		6.609	8536	2.7	304.86	2.43	7.489		9533	3.1	297.90
14	2.917		4.816	8374	1.7	299.08	2.917	5.426		9332	1.9	291.61
16	3.403		3.771	8900	1.1	317.84	3.403	4.219		9829	1.2	307.17

* Não se considerou dado que o volume interior dos fundos copados é superior ao volume especificado.

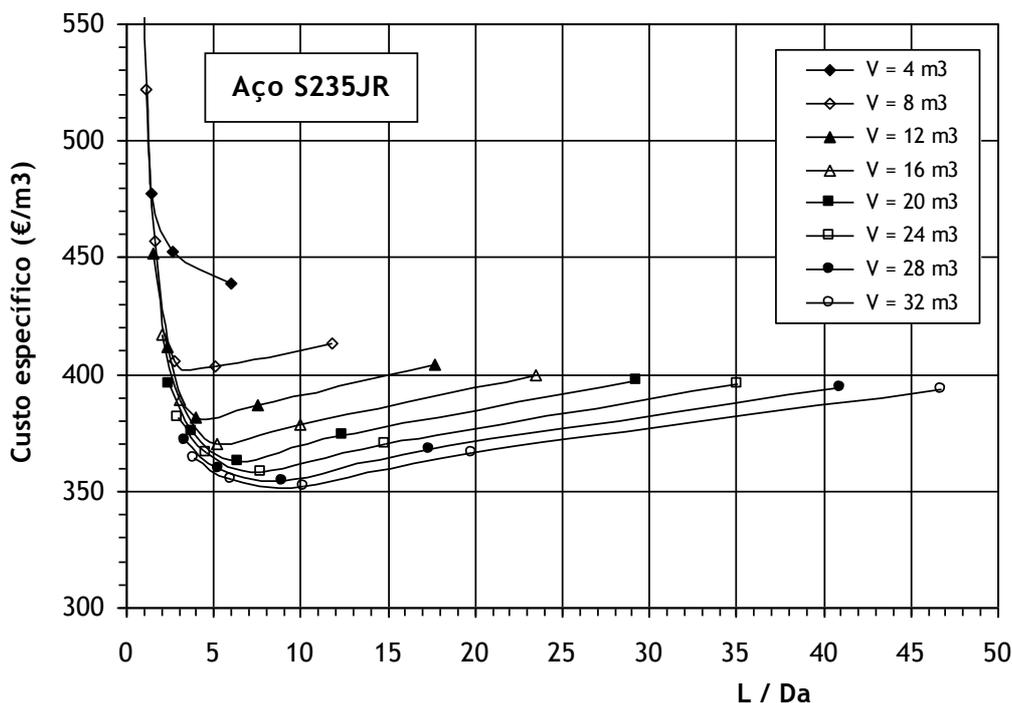


Fig. 4.14 - Custo específico em função de L/D_a e do volume, para o aço S235JR.

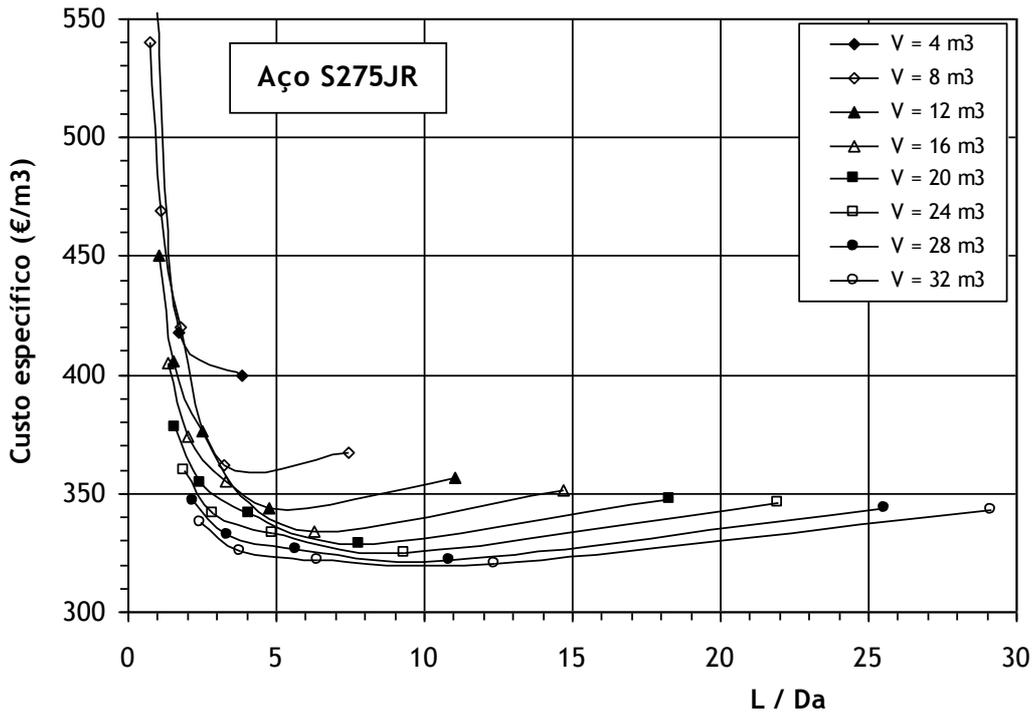


Fig. 4.15 - Custo específico em função de L/Da e do volume, para o aço S275JR.

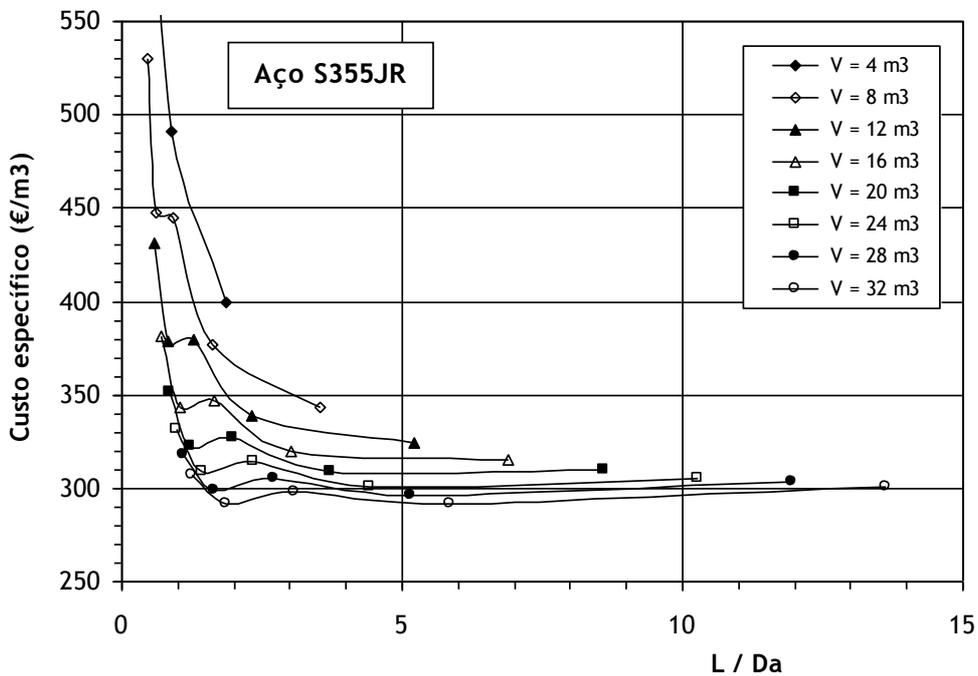


Fig. 4.16 - Custo específico em função de L/Da e do volume, para o aço S355JR.

A partir da interpretação das tabelas e dos valores representados graficamente, é possível retirar várias conclusões, nomeadamente:

- das 24 curvas (3 aços e 8 volumes), apenas 6 apresentam um custo mínimo num extremo do domínio estudado que ocorre sempre nos menores valores de volume;

- 18 curvas apresentam um mínimo no interior do domínio estudado;
- em todos os casos, o custo unitário mínimo ocorre sempre para valores de L/D_a pertencentes ao intervalo [1,9;12,4], dos quais 71% pertencem ao intervalo [3;8];
- conforme esperado, para o mesmo tipo de aço e para o mesmo valor de L/D_a , o custo unitário diminui com o aumento do volume.

Para uma melhor comparação entre os três tipos de aço, foi construído um gráfico (Fig. 4.17), no qual são fixados dois volumes (16 e 20 m³) e é apresentado o custo unitário em função de L/D_a . Neste gráfico constata-se que para o mesmo valor de L/D_a , é sempre mais económico a utilização de aços de maior resistência pois necessitam de menores espessuras e menores comprimentos (L). Este facto é compreensível pois existem parcelas do custo que estão associadas à massa (custo de material, custo de soldadura e custo de corte e calandragem) e outras associadas à área (custo de decapagem e custo de pintura).

A informação contida nos gráficos das Fig. 4.14, Fig. 4.15, Fig. 4.16 e Fig. 4.17, pode revelar-se de grande utilidade, pois permite obter para cada volume, a relação L/D_a correspondente à solução mais favorável. Na posse desta informação, a equipa de projecto poderá, então, desenvolver o projecto detalhado centrado nos valores assim obtidos.

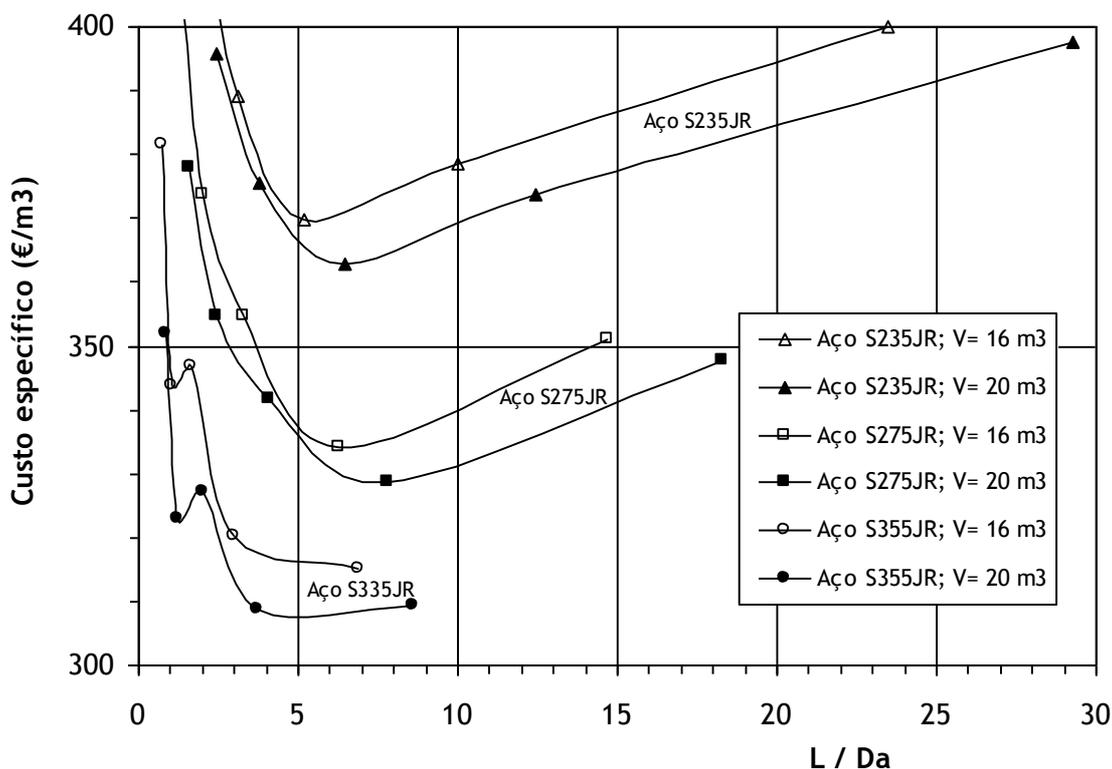


Fig. 4.17 - Custo específico em função do L/D_a e do aço, para os volumes de 16 m³ e de 20 m³.

A título ilustrativo, considere-se dois exemplos:

- No projecto de um reservatório de 20 m³, obtém-se da Fig. 4.17 que a solução de custo mais baixo é a que corresponde à utilização do aço S355JR. Em

seguida, a partir da Fig. 4.16 é possível identificar a relação $L/D_a = 3.7$ como a mais favorável. Da Tabela 4.6, para $L/D_a = 3.7$ encontram-se as características funcionais do reservatório a projectar ($s=10$ mm, $D_a=1.944$ m e $L=7.239$ m) e o custo total previsível de 6175 euros.

- Admitindo que para o exemplo anterior existisse o constrangimento de 5 metros para o comprimento do reservatório, das Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Tabela 4.6, e para o volume de 20 m³, constata-se que o material S355JR continua a constituir a opção mais favorável, tendo-se duas alternativas: ($s=12$ mm, $D_a=2.430$ m e $L=4.850$ m) e ($s=14$ mm, $D_a=2.917$ m e $L=3.595$ m), com custos totais previsíveis de 6544 e 6456 euros, respectivamente.

O caso apresentado evidencia quão útil pode ser a existência de informação trabalhada previamente para ser usada em fases muito embrionárias do projecto de qualquer produto. Desta forma, é possível, desde o início, direccionar o projecto de pormenor para zonas favoráveis de valores das variáveis consideradas importantes.

De acordo com a metodologia proposta, foram, até ao momento, estudadas as relações entre desempenho e custo de reservatórios pressurizados. Está-se então, agora, em condições introduzir os factores ambientais para análise global dentro de uma perspectiva de projecto sustentável.

No projecto de reservatórios pressurizados, muitos factores ambientais podem ser considerados, nomeadamente, comprimento dos cordões de soldadura; energia associada às operações de corte, calandragem e decapagem; desperdícios de chapas de aço; massa total de aço usada e solventes voláteis resultantes da pintura. A posse de valores reais deste tipo de informações, permitirá aos projectistas fazer a sua conjugação com desempenho e custo para suporte à tomada de decisão em projecto sustentável. Entre os exemplos apontados, a massa de aço consumida é certamente um factor ambiental de relevo, não só devido à energia consumida e CO₂ libertado na sua produção, como também ao minério de ferro extraído (recurso não renovável).

Assim, e a título de exemplo, considerem-se os casos referidos anteriormente para um reservatório de 20 m³ em aço S355JR. Foi efectuado o cálculo do volume de aço usado (proporcional à massa de aço usada) considerando, para maior simplicidade, os fundos planos. A Fig. 4.18 apresenta o volume de aço em função da relação geométrica L/D_a .

Como é visível o volume de aço consumido (e por extensão a massa de aço consumida) aumenta à medida que diminui a relação L/D_a , ou seja, quanto maior é o diâmetro em comparação com o comprimento. Esta relação faz sentido do ponto de vista geométrico. É de referir que este factor ambiental está intencionalmente expresso em função de L/D_a , tal como também anteriormente, os custos o foram. Esta é uma particularidade relevante na metodologia proposta.

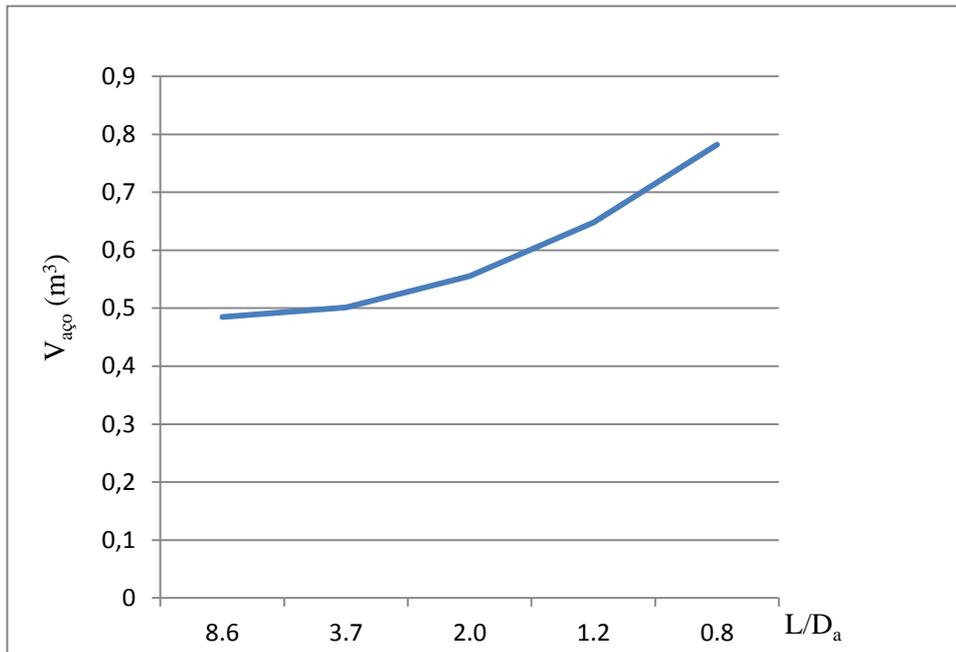


Fig. 4.18 - Volume de aço para um reservatório de 20 m³ em aço S355JR.

No primeiro exemplo acima referido, a solução de mais baixo custo para um reservatório de 20 m³, correspondia à utilização do aço S355JR com uma relação $L/D_a=3,7$, a que correspondia um custo de 6175 euros. Se fosse usada a relação $L/D_a=8,6$, o custo teria um valor muito semelhante de 6189 euros (+0,2 %), contudo teria um consumo de material inferior em 3,2 %.

No segundo exemplo em que existia um constrangimento de 5 metros para o comprimento do reservatório, foram identificadas duas opções ($s=12$ mm, $D_a=2.430$ m, $L=4.850$ m e $C=6544$ €) e ($s=14$ mm, $D_a=2.917$ m, $L=3.595$ m e $C=6456$ €). A primeira é 1,4% mais dispendiosa mas tem um consumo de material inferior em 14,3%.

Em ambos os exemplos, a melhor solução em termos económicos não corresponde à melhor solução ambiental. A solução a eleger dependerá da estratégia política, comercial e social da empresa, todavia a decisão tem que ser tomada com base na existência deste tipo de informação. Os indicadores económicos e os ambientais deverão ser baseados em informação, tão realista quanto possível.

É convicção do autor de que a existência deste tipo de informação na fase conceptual de um projecto acoplado, é de grande utilidade para suporte da tomada de decisão sobre a opção em torno da qual, se desenvolverão as fases subsequentes do projecto.

4.4 Projecto conceptual de uma estrutura tubular

Este exemplo, tal como os anteriores, visa exemplificar a grande utilidade de possuir informação trabalhada para ajuda à tomada de decisões durante a fase inicial de um projecto sustentável. Como já visto, este tipo de projectos é sempre de natureza acoplada

O caso ora apresentado deu origem a um artigo científico a publicar brevemente (Fradinho *et al.*, 2013).

Considere-se o projecto de uma estrutura tubular com uma correia transportadora no seu interior para transporte de um material granular. Ao longo do tapete existe uma plataforma com acesso humano para facilitar as actividades de montagem e manutenção. Para além destes, a estrutura tem como requisitos um comprimento de 1000 metros, deve estar a uma altura do solo de 10 metros e a sua carga útil distribuída não excede 3000 Newtons por metro.

Apesar de uma estrutura treliçada corresponder a uma melhor opção sob o ponto de vista do custo e material utilizado (Sobral, 2013), considera-se que a forma tubular é uma imposição do cliente, alegadamente por razões de facilidade de manutenção e de durabilidade, contudo sem apresentação de quaisquer dados justificativos. A Fig. 4.19 representa a secção da estrutura.

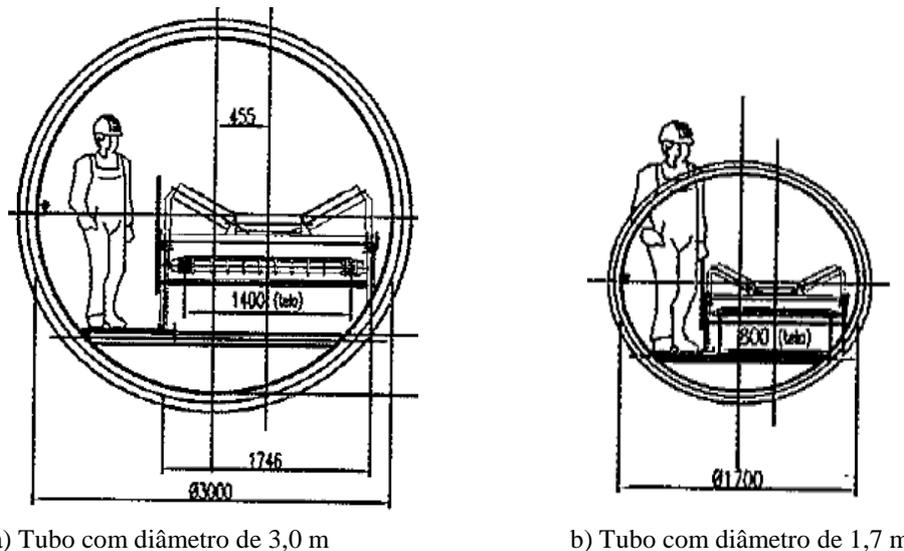


Fig. 4.19 - Secção de estrutura tubular com acesso humano.

Pretende-se, neste exemplo, gerar informação para apoio às tomadas de decisão na fase inicial de projecto. A equipa de projecto, tem à partida um dilema sobre aspectos conceptuais da solução a propor: deve projectar uma estrutura com vãos grandes e diminuir o número de apoios ao longo do comprimento total, ou pelo contrário aligeirar a estrutura tubular, não obstante com isso aumentar o número total de apoios. Como interagem estas grandezas e quais as situações económicas e de preocupações ambientais mais favoráveis, são questões que se colocam nesta fase à equipa de projecto.

De acordo com a Teoria Axiomática do Projecto, a relação entre os diversos requisitos - funcionais (RF), económico (RE) e ambientais (RA) - e as variáveis de projecto (PP), é traduzida pela respectiva equação de projecto representada pela expressão (4.13). O vector dos requisitos é composto por: RF1 – Vencer o vão; RF2 – Suportar a carga; RE – Encontrar solução com viabilidade económica; RA1 – Preservar recursos naturais; RA2 – Controlar efeito de estufa; RA3 – Controlar poluição atmosférica. O vector relativo aos parâmetros de projecto é composto por: PP1 - Tipo de aço; PP2 – Espessura; PP3 – Diâmetro.

$$\begin{Bmatrix} \text{RF1} \\ \text{RF2} \\ \text{RE} \\ \text{RA1} \\ \text{RA2} \\ \text{RA3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{X} & \text{X} & \text{X} \\ \text{X} & \text{X} & \text{X} \\ \text{X} & \text{X} & \text{X} \\ 0 & \text{X} & \text{X} \\ 0 & \text{X} & \text{X} \\ 0 & \text{X} & \text{X} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{PP1} \\ \text{PP2} \\ \text{PP3} \end{Bmatrix} \quad (4.13)$$

Esta equação tem um carácter simples e exemplificativo, não considera, por exemplo, parâmetros de projecto estritamente ambientais, como poderia ser a plantação de árvores (tem efeito nos requisitos ambientais e económico, embora não afecte a funcionalidade). A equação (4.13) configura um projecto acoplado, constituindo a metodologia proposta uma forma de lidar com este tipo de projectos. Com efeito, ao expressar todos os requisitos em função dos mesmos parâmetros, permite uma análise integrada para suporte à tomada de decisão em projectos sustentáveis.

Os cálculos foram efectuados considerando cada vão como parte de uma viga contínua infinita, cuja deformada máxima é dada por

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{qL^4}{384EI} \quad (4.14)$$

em que

$\delta_{m\acute{a}x}$ =deformação máxima

q =carregamento distribuído uniformemente (inclui carga distribuída e peso próprio)

L =comprimento do vão

E =módulo de elasticidade

I =momento de inércia

Foi considerada uma limitação para a deformação de acordo com a expressão (4.15)

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{L}{500} \quad (4.15)$$

O momento de inércia para uma coroa circular, é dado por

$$I = \frac{\pi d^3 e}{8} \quad (4.16)$$

em que: d =diâmetro, e =espessura.

Para o cálculo das tensões devidas à flexão foram usadas as expressões (4.17), (4.18), (4.19) e um coeficiente de segurança de 2,5

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \pm \frac{My_{m\acute{a}x}}{I} \quad (4.17)$$

$$M = \frac{qL^2}{12} \quad (4.18)$$

$$y_{m\acute{a}x} = \frac{d}{2} \quad (4.19)$$

em que:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ =tensão máxima

M =momento flector

$y_{m\acute{a}x}$ =distância máxima à fibra neutra (neste caso, o eixo longitudinal)

Nos cálculos efectuados, os valores dos diâmetros foram impostos tendo sido considerado o peso próprio de cada vão. A construção de cada vão (viga) foi considerada a partir de chapas calandradas e soldadas.

No caso considerado, o diâmetro da estrutura é um parâmetro fundamental. Inicialmente foi considerado um diâmetro de 3,0 m para garantir o livre acesso das equipas de manutenção ao interior da estrutura, conforme ilustrado na Fig. 4.19. Atendendo ao fenómeno da estabilidade local, foi decidido usar uma espessura mínima de 5 mm. Por razões que se prendem com a exequibilidade da calandragem das chapas, optou-se por não ultrapassar 8 mm de espessura. Deste modo, os cálculos foram efectuados para espessuras de 5 e de 8 mm. Para valores similares de tensões admissíveis, o uso de chapas de 8 mm permitiu aumentar o comprimento do vão (viga). Ambos os casos resultaram numa estrutura sobredimensionada por via do elevado momento de inércia, pois que as espessuras impostas são superiores às resultantes do dimensionamento. Posteriormente foram considerados mais dois diâmetros: 2,4 m e 1,7 m. Analogamente ao diâmetro de 3,0 m, foram calculados para estes casos os comprimentos dos vão para as espessuras de 5 e 8 mm. Não obstante, o diâmetro de 1,7 m corresponder a uma solução com diminuto espaço disponível para acesso humano, ainda assim foi considerada com o intuito de verificação de tendência (o que poderá sugerir eventuais hipóteses alternativas). Em todas as situações foram considerados aços de construção correntemente disponíveis no circuito comercial: S235JR, S275JR e S355JR (segundo a norma EN 10025-2).

Para cada solução construtiva foram calculadas colunas de suporte, também tubulares. Para o seu dimensionamento foram usadas as expressões (4.20), (4.21) e (4.22),

$$R = \frac{\pi^2 EI_{col}}{4H^2} \quad (4.20)$$

$$I_{col} = \frac{\pi d_{col}^3 e_{col}}{8} \quad (4.21)$$

$$\sigma = \frac{R}{A} \quad (4.22)$$

em que

R =reação nos apoios ($R = Lq$)

I_{col} =momento de inércia da coluna

H =altura da coluna

I_{col} =momento de inércia da coluna

e_{col} =espessura da coluna

A =área da secção transversal

Foram impostas espessuras e calculados os diâmetros resultantes, também com um coeficiente de segurança de 2,5. Para maior simplicidade, as características morfológicas e geológicas do terreno, foram consideradas uniformes.

A Tabela 4.7 apresenta o conjunto de soluções construtivas estudadas.

Como consequência do dimensionamento efectuado, todas as soluções suportam a carga útil e o seu peso próprio, resultando variável o respectivo comprimento de vão. O número de colunas de toda a estrutura e o comprimento dos vários vãos, estão inversamente relacionados: a maiores vãos corresponde um menor número de colunas. O projecto assim configurado tem pois, como variáveis de projecto, o tipo de aço, a espessura das chapas e o diâmetro da estrutura.

Com o objectivo de envolver os aspectos económicos nas tomadas de decisão durante a fase conceptual, foi desenvolvida uma função custo de acordo com a expressão (4.23). Não é objectivo deste trabalho determinar exaustivamente os custos envolvidos, mas sim calcular valores que reflectam as diferenças relativas entre as várias opções.

$$C_{Industrial} = C_{material} + C_{corte+caland.} + C_{soldadura} + C_{decap.+pint.} + C_{aplicação\ colunas} \quad (4.23)$$

Para o custo de material foram considerados os valores correntes de 0,818 €/kg para o aço S235JR, 0,84 €/kg para o aço S275JR e 1,00 €/kg para o aço S355JR. Os custos de corte e calandragem e de soldadura foram calculados indexados à massa da viga, sendo de 0,5 €/kg e 8% do custo de material, respectivamente. Para a decapagem e pintura foram considerados 5 e 7 €/m², respectivamente. Para o custo de aplicação das colunas (fundações, ligações, etc.) foi considerado um custo 10 vezes superior ao seu custo de material. Todos estes valores tiveram como origem informações disponibilizadas por empresas industriais de metalomecânica.

A análise dos impactos ambientais provocados por um produto deve contemplar todo o seu ciclo de vida, desde os recursos físicos e energéticos consumidos para a obtenção da matéria-prima usada, até ao seu desmantelamento após o período de utilização, passando pelos meios e recursos envolvidos durante a sua produção e manutenção.

No caso em estudo são considerados como exemplificativos, três tipos de efeitos ambientais: a energia consumida e a quantidade de CO₂ libertado por cada tonelada de aço

produzida e a quantidade de tinta gasta. Foram considerados os seguintes índices para o caso de chapas de aço (Tata Steel, 2013): 17,37 GJ por tonelada de aço e 0,919 toneladas de CO₂ por tonelada de aço.

Tabela 4.7 - Conjunto de soluções construtivas estudadas.

Aço	Vigas					Colunas				
	Espessura (mm)	Diâmetro (m)	Vão (m)	Tensão (Mpa)	Massa (kg)	Espessura (mm)	Diâmetro (m)	Tensão (Mpa)	Massa (kg)	Quant.
S235	5	1,7	34,5	93	7232	5	0,302	37	372	30
		2,4	44,0	95	13021	5	0,346	49	427	24
		3	50,0	91	18496	6	0,352	50	520	21
	8	1,7	38,0	95	12745	6	0,315	40	467	27
		2,4	47,0	95	22254	7	0,345	48	596	22
		3	54,0	94	31960	8	0,360	53	711	20
S275	5	1,7	37,5	110	7861	5	0,310	39	382	28
		2,4	47,0	109	13909	6	0,333	45	493	22
		3	55,0	110	20345	6	0,363	53	537	19
	8	1,7	41,0	111	13751	7	0,307	38	531	25
		2,4	51,0	112	24148	6	0,374	56	553	21
		3	58,0	109	34328	8	0,369	55	728	18
S355	5	1,7	42,5	141	8909	6	0,304	37	450	25
		2,4	54,0	143	15980	7	0,331	66	572	20
		3	62,0	139	22935	6	0,378	58	559	17
	8	1,7	46,0	140	15428	7	0,319	41	551	23
		2,4	58,0	143	27462	9	0,338	74	751	18
		3	66,0	141	39063	9	0,370	56	822	16

Para a pintura, foi usado um rendimento de 6 m² por litro de tinta e consideradas duas demãos nas superfícies interior e exterior da viga e na superfície exterior das colunas. As tintas usadas nesta actividade contêm diluente (solventes orgânicos voláteis) na proporção média de 1 para 4 em termos de volume.

A Fig. 4.20 apresenta, para cada situação, os valores do vão que satisfazem os requisitos funcionais (vencer o vão e suportar a carga), que traduzem o desempenho mecânico das diferentes propostas conceptuais.

Na Fig. 4.21 são apresentados os custos unitários de cada solução, que traduzem a vertente económica da sustentabilidade das diferentes propostas conceptuais.

As Fig. 4.22 e Fig. 4.23 apresentam a energia consumida e o CO₂ emitido associados à produção do aço utilizado em cada proposta de solução. A Fig. 4.24 apresenta a quantidade de tinta estimada para cada uma das soluções. Estas três figuras ilustram os resultados para os requisitos ambientais considerados.

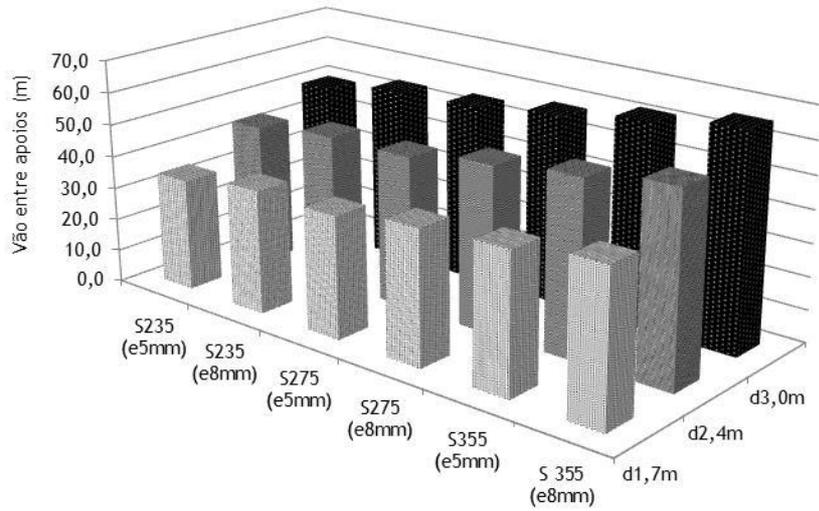


Fig. 4.20 - Comprimento dos vãos (m) em função da espessura e do diâmetro, para cada tipo de aço.

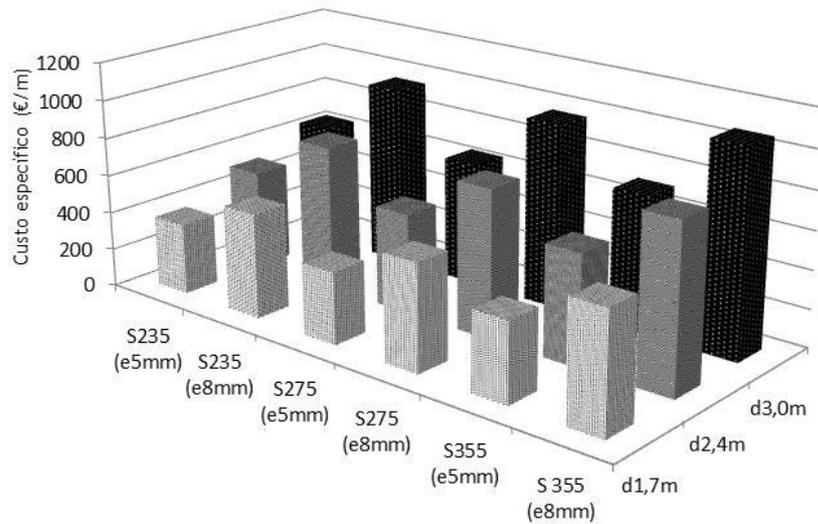


Fig. 4.21 - Custo por metro (€/m) em função da espessura e do diâmetro, para cada tipo de aço.

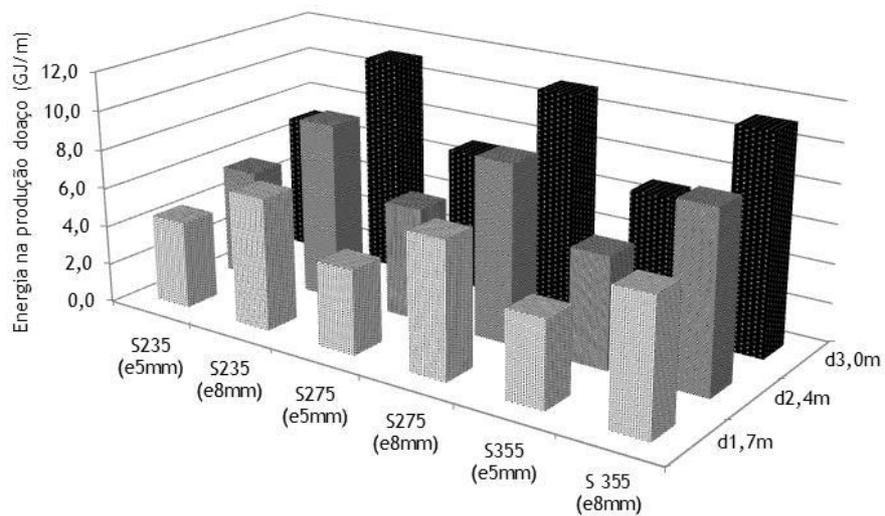


Fig. 4.22 - Energia consumida (GJ/m) em função da espessura e do diâmetro, para cada tipo de aço.

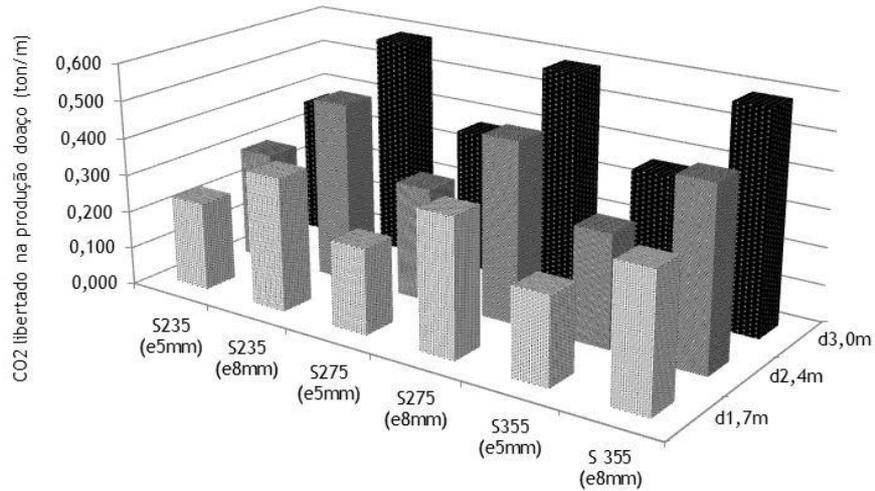


Fig. 4.23 - CO₂ libertado (toneladas/m) em função da espessura e do diâmetro, para cada tipo de aço.

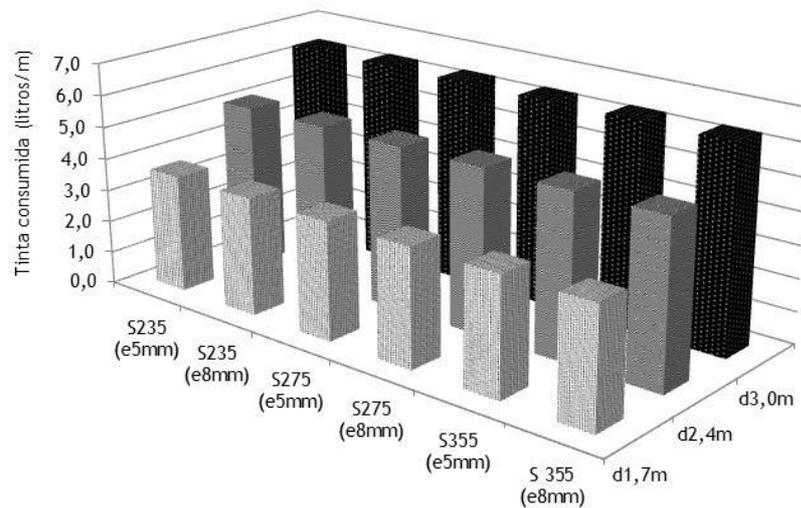


Fig. 4.24 - Consumo de tinta (litros/m) em função da espessura e do diâmetro, para cada tipo de aço.

A partir da observação da Fig. 4.20 evidenciam-se várias conclusões qualitativas resultantes dos princípios teóricos de Mecânica dos Sólidos, nomeadamente:

- para o mesmo diâmetro e tipo de aço, a maiores espessuras correspondem maiores valores de vãos;
- para o mesmo diâmetro e espessura, a maiores tensões de cedência dos aços correspondem maiores vãos;
- para a mesma espessura e tipo de aço, a menores diâmetros correspondem menores vãos.

Da observação das Fig. 4.21, Fig. 4.22, Fig. 4.23 e Fig. 4.24, emanam também as seguintes conclusões qualitativas:

- o custo industrial é tanto maior quanto maior é o diâmetro, a espessura e a tensão de cedência do aço.

- para o mesmo diâmetro e o mesmo tipo de aço, o facto de a maior espessura corresponder um maior vão e conseqüente menor número total de colunas, não corresponde a um menor custo por unidade de comprimento.
- a energia consumida e a quantidade de CO₂ libertada, estando associadas à massa total, dependem em cada caso do rendimento de aproveitamento das chapas fruto das diversas geometrias. Em todo o caso, a maiores diâmetros e maiores espessuras correspondem piores indicadores energéticos e poluentes.
- o tipo de aço usado não tem influência na energia consumida e na quantidade de CO₂ libertada, sendo as pequenas diferenças verificadas resultantes da eficiência de aproveitamento de material de cada caso.
- a quantidade de tinta consumida depende apenas do diâmetro da estrutura.
- este conjunto de informação sugere, ser mais vantajoso o uso do menor diâmetro e menor espessura em detrimento de soluções com maiores comprimentos de vãos e conseqüente menor número de colunas de apoio.

Relativamente ao tipo de aço, o S235JR apresenta-se como o mais vantajoso como consequência directa da imposição da espessura resultando no sobredimensionamento de todas as soluções, sendo o projecto condicionado pelas deformações máximas. Esta conclusão é de sentido contrário às conclusões de um trabalho anterior (Fradinho *et al.*, 2013) sobre projecto de reservatórios pressurizados, sendo este condicionado pelos valores das tensões máximas. Aí, estando também o custo fortemente associado à massa, concluiu-se ser a opção mais económica, a utilização de aços de maior resistência pois necessitam de menores espessuras. Sendo as várias soluções funcionalmente equivalentes, os dados apurados apontam a solução de 1,7 m diâmetro, 5 mm de espessura em aço S235JR e vãos de 23,5 m, como a solução preferível dentro de uma óptica de projecto sustentável. Após esta tomada de decisão, a equipa de projecto deverá, então, desenvolver o projecto detalhado centrado nestes valores.

O exemplo apresentado neste artigo é pouco racional devido a uma tomada de decisão inicial (opção por uma estrutura tubular) sem fundamentação quantitativa. Para a sua racionalização deveriam existir dados para serem comparados com os aqui apresentados. Chama-se a atenção para o facto destes dados não contemplados corresponderem a custos de exploração da estrutura, em particular, custos de manutenção, os quais deverão ser considerados num projecto com características de sustentabilidade. Este caso não representa um projecto de pormenor, sendo apenas usado como exemplo de aplicação a metodologia proposta. Os requisitos ambientais considerados e sua dependência com as variáveis de projecto, são também apenas exemplificativos. Outros requisitos e outras relações, poderiam ser usadas a partir da existência de informações de maior precisão. A reciclabilidade, a energia associada à operação de calandragem e os impactos resultantes do processo de soldadura, são exemplos de outros requisitos passíveis de utilização.

Neste estudo evidencia-se a utilidade de trabalhar dados disponíveis na fase inicial de um projecto, como forma de gerar informação para decisão dos valores das principais variáveis de projecto, em torno das quais, se devem desenvolver as restantes fases do projecto.

A informação gerada nesta fase, afigura-se de grande utilidade para a fundamentação das opções tomadas nas fases embrionárias do projecto, uma vez que estas vão ser determinantes para os desenvolvimentos subsequentes até ao resultado final. Dada a natureza acoplada do projecto sustentável, o decisor (individual ou colectivo) tem necessidade de alicerçar as suas decisões multivariadas em informação previamente trabalhada e preparada. Esta informação corresponde à translação temporal da curva associada à informação sobre o produto, representada na Fig. 2.27. A informação assim trabalhada permite, por um lado avaliar as consequências das decisões tomadas nas fases iniciais de projecto e por outro lado, facilita as tomadas de decisões de carácter político. Por exemplo, o respeito pelos valores ambientais pode fazer parte da estratégia de desenvolvimento de uma empresa. A metodologia apresentada representa uma forma de gerar de informação para suporte à tomada de decisão na fase conceptual de um projecto sustentável, integrando simultaneamente informação relativa ao desempenho, custo e factores ambientais. Constitui uma forma de lidar com projectos acoplados, tal como são os projectos sustentáveis.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Contrariamente à tendência habitual de considerar o custo como uma restrição, a metodologia apresentada considera o custo como um requisito, o que corresponde a maior aproximação da realidade. A informação relativa ao custo deve ser considerada juntamente com a informação relativa ao desempenho, como base para as primeiras tomadas de decisão. Quase sempre o desempenho e o custo dependem dos mesmos parâmetros de projecto, o que conduz quase inevitavelmente a um projecto acoplado. Só após as tomadas de decisão com base no desempenho e custo, devem ser considerados os factores ambientais. Expressar os vários requisitos em função dos mesmos parâmetros de projecto constitui um factor facilitador na análise da informação gerada, permitindo nomeadamente a sobreposição de superfícies de natureza diferente.

Nesta dissertação evidencia-se a utilidade de trabalhar dados disponíveis na fase inicial de um projecto, como forma de gerar informação para decisão dos valores das principais variáveis de projecto, em torno das quais, se devem desenvolver as restantes fases do projecto.

A informação gerada nesta fase, afigura-se de grande utilidade para a fundamentação das opções tomadas nas fases embrionárias do projecto, uma vez que estas vão ser determinantes para os desenvolvimentos subsequentes até ao resultado final. Dada a natureza acoplada do projecto sustentável, o decisor (individual ou colectivo) tem necessidade de alicerçar as suas decisões multivariadas em informação previamente trabalhada e preparada. Esta informação corresponde à translação temporal da curva associada à informação sobre o produto, representada na Fig. 2.27. A informação assim trabalhada permite, por um lado avaliar as consequências das decisões tomadas nas fases iniciais de projecto e por outro lado, facilitar as tomadas de decisões de carácter político. Por exemplo, o respeito pelos valores ambientais pode fazer parte da estratégia de desenvolvimento de uma empresa. A metodologia apresentada representa uma forma de gerar de informação para suporte à tomada de decisão na fase conceptual de um projecto sustentável, integrando simultaneamente informação relativa ao desempenho, custo e factores ambientais. Constitui uma forma de lidar com projectos acoplados, tal como são os projectos sustentáveis. Consubstancia-se em satisfazer requisitos de

natureza diferente através dos mesmos parâmetros de projecto, com vista à definição de zonas para optimização de soluções por parte dos decisores.

5.2 Desenvolvimentos futuros

No decorrer deste trabalho foram encontradas situações carentes de aprofundamento, embora não determinantes para o seu desenvolvimento.

Como consequência da sua relativa juventude, a área ambiental prima pela escassez de informação, particularmente a informação de cariz específico e não genérico. Assim, dada a sua utilidade, no caso do produto cortiça com borracha, são exemplos de indicadores com interesse em obter:

- energia consumida no misturador por cada quilograma de matéria;
- energia consumida durante a operação de vulcanização por cada quilograma de matéria;
- energia consumida pela operação de trituração da cortiça por cada quilograma de granulado por cada tipo de granulometria;
- quantidade de CO₂ absorvida da atmosfera por cada sobreiro;
- índice de reciclabilidade da cortiça com borracha

No caso dos reservatórios pressurizados e da estrutura tubular, por serem ambos em estrutura metálica, são exemplos de indicadores com interesse em apurar:

- energia consumida e quantidade e tipo de gases libertados por cada metro de cordão de soldadura;
- energia consumida durante a operação de calandragem de chapas de aço por cada espessura

Em termos de maior abstracção e à luz da Teoria Axiomática do Projecto afigura-se como importante, o desenvolvimento de um conjunto de requisitos ambientais de carácter genérico e transversal, bem assim como do ou dos seus parâmetros de projecto. A existência destes conjuntos e das suas relações, poderá constituir-se como precioso auxiliar para o desacoplamento de futuros projectos sustentáveis. Nalguns casos, o seu uso através da criação intencional de redundâncias poderá constituir também uma estratégia de desacoplamento.

Os pontos anteriormente apresentados constituem um conjunto de desenvolvimentos a que o autor se deseja dedicar no próximo futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIATION ORÉE - **Animer le lancement d'une démarche d'éco-conception pour améliorer la compétitivité de l'entreprise** [Em linha]. [Consult. 8 Ago. 2013]. Disponível na WWW: <http://www.oree.org> (2012).

BARTON, J. A.; LOVE, D. M. –Design decision chains as a basis for design analysis. **Journal of Engineering Design**. : Taylor & Francis Ltd. 11:3 (2000) 283-297.

BARTON, J. A.; LOVE, D. M.; TAYLOR, G. D. – Design determines 70% of cost? A review of implications for design evaluation. **Journal of Engineering Design**. : Taylor & Francis Ltd. ISSN 0954-4828. 12:1 (2001) 47-58.

BODE, J. – Neural networks for cost estimation: Simulations and pilot application. **International Journal of Production Research**. : Taylor & Francis. 38:6 (2000) 1231-1254.

BODE, J: - Neural networks for cost estimation: Simulation and pilot application. **International Journal of Production Research**. : Taylor and Francis. ISSN 0020-7543. 38:6 (2000) 1231-1254.

BOVEA, M. D.; PÉREZ-BELIS, V. – A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process. **Journal of Cleaner Production**. : Elsevier. 20 (2012) 61-71.

BUTEL-BELLINI, B.; JANIN, M. – Écoconception: état de l'art des outils disponibles. **Techniques de l'Ingénieur**. Référence G6010 (2011).

CABANNES, G.; TROUSSIER, N.; GIDEL, T.; CHERFI, Z. – An uncertainty-based approach to drive product preliminary design. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**. : Springer 5 (2011) 55-65.

CAPUTO, A. C.; PELAGAGGE, P. M. – Parametric and neural methods for cost estimation of process vessels. **International Journal of Production Economics.** : Elsevier 12 (2008) 934-954.

CAVIQUE, M. – **Ciência do Projecto em Engenharia.** 2005. Documento não publicado.

CEBON, D.; ASHBY, M.; LEE-SHOTHAMAN, L. – Cambridge Engineering Selector V3.1 user's manual. Granta Design Ltd (2000).

CHEN, W. – Advanced Computational and Statistical Methods for Product and Process Design (2003) [Em linha]. [Consult. 9 Ago. 2009]. Disponível na WWW: http://www.uic.edu/labs/idel/.../MIE542_notes_03.pdf

CHIU, M.-C.; CHU, C.-H. – Review of Sustainable Product Design from life Cycle Perspectives. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing.** : Springer 13:7 (2012) 1259-1272.

COLEY, F.; HOUSEMAN, O.; ROY, R. – An introduction to capturing and understanding the cognitive behavior of design engineers. **Journal of Engineering Design** : Taylor & Francis. ISSN 0954-4828. 18:4. (2007) 311-325.

CROSS, N. – **Engineering Design Methods – Strategies for product Design.** Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2008. ISBN-978-0-470-51926-4.

DESIGN CONSTRAINTS. [Em linha]. [Consult. 24 Ago. 2013]. Disponível na WWW: <http://www.docstoc.com/docs/44506233>

DEUTZ, P.; McGUIRE, M.; NEIGHBOUR, G. – Eco-design practice in the context of a structured design process: an interdisciplinary empirical study of UK manufacturers. **Journal of Cleaner Production.** : Elsevier. 39 (2013) 117-128.

DREXHAGE, J.; MURPHY, D. – **Sustainable Development: From Brundtland to Rio 2012.** High Level Panel on Global sustainability. United Nations Headquarters, Nova Iorque. 2010.

DRIEGEL, G. S. – The Integration of Cost into Mechanical Design Curricula. **The International Journal of Applied Management and Technology.** 6:3 (2008).

EAGAN, R. J, [et al.] – Approaches to improve engineering design (2002) [Em linha]. [Consult. 25 Mai. 2010]. Disponível na WWW: <http://www.nap.edu/catalog/10502.html>

EAGLESHAM, M. – PhD Thesis: **A Decision Support System for Advanced Composites Manufacturing Cost Estimation**. Virgínia : Mark A. Eaglesham, 1998.

ER, A.; DIAS, R. – A rule-based expert system approach to process selection for cast components. **Knowledge-Based Systems**. 13 (2000) 225-234.

ESCOE, A. – **Pressure Vessel and Stacks Field Repair Manual**. Houston Estados Unidos (2008).

ESNAULT, F. – **Construction Mécanique-Transmission de puissance-Tome 1**. Principes et Écoconception. : Dunod, Paris (2009) ISBN 978-2-10-052399-3.

EVBUOMWAN, N. F. O.; SIVALOGANATHAN, S.; JEBB, A. – A Survey of Design Philosophies, Models, Methods and Systems. **Journal of Engineering Manufacture**.: P. I. Mech Eng . 210 (1996) 301-320.

EVERSHEIM, W.; NEUHAUSEN, J.; SESTERHENN, M. – **Design-to-Cost for Production Systems**. CIRP. 47/7/1998 (1998).

FAYEK, A. M.; FLORES, J. R. R. – Application of fuzzy logic to quality assessment of infrastructure projects at conceptual cost estimating stage. **Canadian Journal of Civil Engineering**. : NRC Research Press 37 (2010) 1137-1147.

FEILDEN, G. – Engineering Design. **Her Majesty's Stationary Office**, London, 1963.

FENG S. C.; ZHANG, Y. – Conceptual process planning-a definition and functional decomposition. **Manufacturing and Science Engineering**. 10 (1999) 97-106.

FONDEYUR [Em linha]. [Consult. 25 Jul. 2011]. Disponível na WWW: <http://www.fondayur.com/>

FRADINHO, J. – Tese de Mestrado: **A influência de alguns parâmetros de projecto na funcionalidade de juntas de vedação de cortiça com borracha**. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, 2003.

FRADINHO, J., MARTINHO, A., MOURÃO, A. - Integração do custo e do desempenho na fase inicial do projecto de produtos – estudo de caso de reservatórios pressurizados. **International Conference on Engineering - Innovation & Development (ICEUBI 2011, thematic area: Technological Innovation and Product Development)** , UBI, Covilhã. ISBN: 978-989-654-079-1.

FRADINHO, J.; GONÇALVES-COELHO, A. M.; MOURÃO, A. – The need of cost estimating in the implementation of Concurrent Engineering. **Academic Journal of Manufacturing Engineering**. Vol.10 (2012).

FRADINHO, J.; GONÇALVES-COELHO, A.; MOURÃO, A. - An axiomatic design approach for the cost optimization of industrial coupled designs: a case study. **Proceedings of The Fifth International Conference on Axiomatic Design (ICAD2009)**, Campus de Caparica, Portugal – March 25-27, (2009) 201-207 (ISBN 978-989-20-1535-4).

GEIGER, T. S.; DILTS, D. M. –Automated design-to-cost: integrating costing into the design decision. **Computer-Aided Design**. : Elsevier. 28:6/7 (1996) 423-438.

GELBE, H. – Components of Thermal Apparatus in **Handbook of Mechanical Engineering**. Berlim : Springer Verlag, (1994) H6.

GIL, L. – **Cortiça (Produção, Tecnologia e Aplicação)**. Lisboa : INETI, 1998. ISBN 972-676-162-X.

GIUDICE, F.; LA ROSA, G.; RISITANO, A. – Materials selection in the Life-Cycle Design process: a method to integrate mechanical and environmental performances in optimal choice. **Materials and Design**. : Elsevier. 26 (2005) 9-20.

GOEDKOOH, M.; OELE, M. – **Sima Pro 5 user manual**. Amersfoort, Holanda.(2001).

GONÇALVES-COELHO, A. M.- **O Projecto de Engenharia-Uma Perspectiva Axiomática**. Universidade Nova de Lisboa, 1994

GONÇALVES-COELHO, A. M.; MOURÃO, A. J. F.; PAMIES-TEIXEIRA, J. J. – Axiomatic Design as a Background for Concurrent Engineering Education and Practice. **The vision for the Future Generation in Research and Applications**. Lisse : Swets & Zeitlinger, (2003) ISBN 90 5809 622 X.

GONÇALVES-COELHO, A. M.; MOURÃO, A. J. F.; PEREIRA, Z. L. – Improving the use of QFD with Axiomatic Design. **Concurrent Engineering: Research and Applications**. : Sage Publications. 13:3 (2005) 233-239.

GONÇALVES-COELHO, A. M.; NEȘTIAN, G.; CAVIQUE, M.; MOURÃO, A. – Tackling with Redundant Design Solutions Through Axiomatic Design. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**. : Springer. 13:10 (2012) 1837-1843.

GONÇALVES-COELHO, A. M.; NEȘTIAN, G.; MOURÃO, A. - Ensuring independence in redundant designs. **Proc. 15th International Conference on Modern Technologies, Quality and Innovation (ModTech 2011 – New face of T.M.C.R.)**, Vol. I, (2011) 469-472, Chișinău, May 25 – 27.

GROOT, E.; MALLORY-HILL, S. – A Decision Support System for Preliminary Design. **8th International Conference on Durability of Building Materials and Components**. Edited by M.A. Lacasse and D.J. Vanier. Canada (1999) 970-979.

HAMBALI, A.; SAPUAN, S. M.; ISMAIL, N.; NUKMAN, Y. – Application of analytical hierarchy process in the design concept selection of automotive composite bumper beam during the conceptual design stage – **Scientific Research and Essay**. : Academic Journals 4:4 (2009) 198-211.

HARUTUNIAN, V.; NORDLUND, M.; TATE, D.; SUH, N. P. – Decision Making and Software Tools for Product Development on Axiomatic Design Theory. **CRIP Annals – Manufacturing Technology**. : Elsevier. 45:1 (1996) 135-139.

HICKS, B. J., CULLEY, S. J., MULLINEUX G. – Cost estimation for standard components and systems in the early phases of the design process. **Journal of Engineering Design**. : Taylor & Francis. ISSN 0954-4828. 13:4 (2002) 271-292.

KIM, Y. S.; COCHRAN, D. S. –Reviewing TRIZ from the perspective of Axiomatic Design. **Journal of Engineering Design**. : Taylor & Francis Ltd. Londres. 11:1 (2010) 79-94.

KRAVANJA, S.; ŽULA, T. – Cost optimization of industrial steel building structures. **Advances in Engineering Software**. : Elsevier. 41 (2010) 442-450.

LAYER, A. – **PhD Thesis: A Building Block for Product Cost Management and Design-for-X**. Universiteit Twente, 2003.

LEDERER, A. L.; PRASAD, J. – Nine Management Guidelines for Better Cost Estimating. **Communications of the ACM**. 35:2 (1992) 51-59.

LEE, H. C.; LEE, J. M.; SEO, J. H. – Design and improvement of product using intelligent function model based cost estimating. **Expert Systems and Applications**. : Elsevier. 38 (2011) 3131-3141.

LIN, T.; LEE, J-W.; BOHEZ, E. L. J. – New integrated model to estimate the manufacturing cost and productions system performance at the conceptual design stage of helicopter blade assembly. **International Journal of Production Research**. : Taylor & Francis. 50:24 (2012) 7210-7228.

LONG, J. A. – **Parametric cost estimating in the new millennium**. : Price Systems, L. L. C.(2000) 1-7.

LUCKMAN, J. – An approach to the management of design. **Developments in Design Methodology**. : John Wiley, London. (1984) 83-97.

MADAN J., RAO P. V. M., KUNDRA T. K. - System for early cost estimation of die-cast parts. **International Journal of Production Research**. : Taylor & Francis. ISSN 0020-7543. 45:20 (2007) 4823-4847.

MASUI, K.; SAKAO, T.; KOBAYASHI M.; INABA, A. - Applying Quality Function Deployment to environmentally conscious design. **International Journal of Quality and Reliability Management**. : Emerald. 20:1 (2003) 90-106.

MAUCHAND, M; SIADAT, A.; BERNARD, A.; PERRY, N. – Proposal for tool-based method of product cost estimation during conceptual design. **Journal of Engineering Design.** : Taylor & Francis. ISSN 1466-1837. 19:2 (2008) 159-172.

MESTRE, A.; GIL, J. – **Cork for Sustainable Product Design.** Ciência e Tecnologia dos Materiais. 23 n°3-4 (2011) 52-63.

MINISTRY OF ENERGY OF THAILAND – **Energy Efficiency Index in Rubber Industry.** Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Bangkok (2007).

MONTGOMERY, D. – **Design and Analysis of Experiments.** Nova Iorque : John Wiley & Sons, 1991. ISBN: 978-0-471-48735-7

MOURÃO, A.; FRADINHO, J.; SANTOS, A.; DODUN, O.; SLATINEANU, L.; GONÇALVES-COELHO, A. – The Role of Eco-Requirements in a Sustainable Product Development Based on Axiomatic Design Principles. **Applied Mechanics and Materials.** ISSN 1660-9336. 371 (2013) 888-892.

OECD – **Extended Producer Responsibility: A Guidance Manual for Governments.** OECD, Lausanne, Suíça, 2001.

PAHL G., BEITZ W. – **Engineering Design: A Systematic Approach.** Berlim : Springer Verlag, 1996. ISBN 3-540-19917-9.

PANAROTTO, M.; TÖRLIND, P. - Sustainability Innovation in Early Phases. **International Conference on Engineering Design (ICED11).** Technical University of Denmark-August 15-18, (2011).

POYOU, J.-B. – Démarches d'écoconception en entreprise. **Techniques de l'Ingénieur.** Référence G6050 (1999).

REHMAN, S.; GUENOV, M. D. –A methodology for modeling manufacturing costs at conceptual design. **Computers Industrial Engineering.** : Elsevier. 35 (1998) 823-826.

ROY, B. – **Multicriteria Methodology for Decision Aiding – Non convex optimization and its applications.** Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1996. ISBN: 0-7923-4166.

ROY, R. – **Cost Engineering: Why, What and How?** Cranfield : R. Roy. C. Kerr and Cranfield University, 2003. ISBN 1-861940-96-3.

ROY, R., FORSBERG, S., KELVESJO, S., RUSH, C. - Quantitative and qualitative cost estimating for engineering design. **Journal of Engineering Design.** : Taylor & Francis. ISSN 0954-4828. 12:2. (2001) 147-162.

ROY, R.; SOUCHOROUKOV, P.; GRIGGS, T. – Function-based cost estimating. **International Journal of Production Research.** : Taylor & Francis. 46:10 (2008) 2621-2650.

ROY, R.; SOUCHOROUKOV, P.; SHEHAB, E.; - Detailed cost estimating in the automotive industry: Data and information requirements. **International Journal of Production Economics.** : Elsevier. 133 (2011) 694-707.

RUSH, C. e ROY, R. – Expert judgement in cost estimating: Modelling the reasoning process. [Em linha] [Consult. 8 Fev. 2012]. Disponível na WWW:10.1.1.18.2831.pdf de citeseerx.ist.psu.edu.

RUSH, C.; ROY, R. - Analysis of cost estimating processes used within a concurrent engineering environment throughout a product life cycle. **7th ISPE International Conference on Concurrent Engineering: Research and Applications**, Lyon, France, July 17th - 20th, Technomic Inc., Pennsylvania USA, (2000) 58-67.

SAIDUR, R.; MEKHILEF, S. – Energy use, energy savings and emission analysis in the Malaysian rubber producing industries. **Applied Energy.** : Elsevier. 87 (2010) 2746-2758.

SANTOS, A. G. – Tese de Doutoramento: **O Projecto de Produtos Únicos Desenvolvidos em Empresas de Pequena Dimensão.** Lisboa: FCT-UNL, 2010

SARMA, K. C. e ADELI, H. – Cost optimization of steel structures. **Engineering Optimization.** 32:6 (2000) 777-802.

SCHWARZ, J.; BELOFF, B.; BEAVER, E – Use Sustainability Metrics to Guide Decision-Making. **CEP Magazine.** : AIChE. (2002).

SCOTT, M.; ANTONSSON, E. – Arrow’s Theorem and Engineering Design Decision Making - **Research in Engineering Design**. : Springer-Verlag 11 (1999) 218–228.

SHEHAB, E. M.; ABDALLA, H. S. – Manufacturing cost modeling for concurrent product development. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**. : Elsevier. 17 (2001) 341-353.

SHIN, M.; AZHAR, M.; MORRISON, J. R.; LEE, T. – On the use of axiomatic design for eco-design. **Proceedings of The Sixth International Conference on Axiomatic Design (ICAD2011)**, Daejeon, South Korea-March 30-31 (2011) 79-87.

SHIN, M.; MORRISON, J.; SUH, H. – Methodology to support environmentally aware product design using axiomatic design: EAD+. **Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conference & Computers and Information In Engineering Conference**, Montreal, Canada-August 15-28 (2010).

SOBRAL, V. - **Decisão conceptual no projecto de estruturas metálicas do tipo galeria – análise mecânica e económica de soluções treliçadas e tubulares**. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade nova de Lisboa, 2013. (dissertação para obtenção do Grau de Mestre, a submeter para discussão).

STEWART, R. D.; WYSKIDA, R. M.; JOHANNES, J. D. – **Cost Estimator’s Reference Manual**. Nova Iorque : John Wiley & Sons, Inc., 1995. ISBN 0-471-30510-3.

SUH, N. P. – **Axiomatic Design: Advances and Applications**. Nova Iorque : Oxford University Press, 2001. ISBN 978-0-19-513466-7.

SUH, N. P. – **The Principles of Design**. Nova Iorque : Oxford University Press, 1990. ISBN 0-19-594345-6.

TALBI, A. – Apport d’une méthode de classification de données et d’un outil d’aide a la décision dans l’estimation du prix de revient. **3e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels**. MOSIM’01. Troyes (2001).

TATA STEEL [Em linha]. [Consult. 1 Ago. 2013]. Disponível na WWW: http://www.tatasteelconstruction.com/en/sustainability/carbon_and_steel/

TATE, D. – **PhD Thesis: A Roadmap for decomposition: Activities, Theories, and Tools for System Design**. Cambridge, MA : Massachusetts Institute of Technology, 1999.

Ciência e Tecnologia dos Materiais. : Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. 1988.

VENTÈRE, J.-P. – Conception écologique des produits. **Techniques de l'Ingénieur**. Référence G6000 (2012).

VILLERS, P. – Introducing MCAE: Expert Tools for Engineering. **Computers in Mechanical Engineering**. ASME (1987) 37-52.

ZANG, L.; ZHAN, Y.; LIU, Z. F.; ZHANG, H. C.; LI, B. B. – Development and analysis of design for environment oriented design parameters. **Journal of Cleaner Production**. : Elsevier. 17 (2011) 1723-1733.

ZEILER, W.; SAVANOVIC, B.; Quanjel, E. – Design Decision Support for the conceptual phase of the design process. **IASDR07 Conference of The International Association of Societies of Design Research**. (2007).

ANEXOS

Anexo A - Classificação de metais (adaptado de Esnault, 2009).

Metal Símbolo químico	Massa volúmica (kg/dm ³)	Temp .fusão (°C)	Aplicações possíveis		Observações gerais
			Engenharia mecânica	Outras aplicações	
Alumínio Al	2,7	660	Automóvel, Aviação, Marinha Peças moldadas, forjadas, laminadas	Electricidade (condutor)	Moderadamente tóxico Obtenção deste metal: -grande consumo energia -muito poluente (libertação de CO e CO ₂) Reciclagem pouco consumidora de energia
Prata Ag	10,5	961	Soldadura	Joalheria Imagiologia médica Electrónica (supercondutor) Electricidade (cátodos de baterias)	Moderadamente tóxico 70% a 80% é sub- produto da extracção do cobre, chumbo e zinco
Berílio Be	1,85	1287	Ligas de alumínio Pistões Estribos de travões	Electricidade (isolante, bom condutor térmico) Acústica (abóboda de altifalante)	Muito tóxico Ingestão possível por alimentos ou água contaminada
Bismuto Bi	9,78	271	Cerâmica Vidro (pigmento) Borracha (vulcanização)	Electricidade (fusível) Electrónica (semicondutor)	Tóxico
Cádmio Cd	8	320	Soldadura Brasagem Proteção de superfícies Tubagem (centrais nucleares)	Electricidade (baterias, pilhas recargáveis, relés, comutadores)	Muito tóxico Bastante absorvido por inalação: poeiras metalúrgicas, fumo de cigarros, lamas de depuração
Crómio Cr	7,1	1600	Elemento de adição no aço (aço inoxidável) Tratamento de superfície (cromagem anticorrosiva) Alumínio anodizado	Vidraria (corante verde)	Crómio hexavalente muito tóxico
Cobalto Co	8,9	1490	Ligas resistentes Turbinas a gás Radiografia industrial (defeitos de peças)	Electricidade (ímãs, eléctrodos) Radiografia médica	Tóxico Isótopo radioactivo

(Continua)

Anexo A (Continuação) - Classificação de metais (adaptado de Esnault, 2009).

Cobre Cu	9	1083	Ligas(bronze, latão) Chumaceiras	Electricidade Radiografia (tubos de rios X)	Tóxico
Estanho Sn	7	232	Ferro coberto de estanho Chumaceiras Turbinas de navio	Electricidade Soldadura Brasagem Electrónica (condutor aliado ao nióbio)	Tóxico
Ferro Fe	7,8	1530	Aços	Magnetismo (suportes informação analógica)	Tóxico para além de uma certa dosagem
Iridio I	22,5	2450	Liga de platina Cadinhos	Electricidade (contactores) Vidraria (tratamento de superfície, efeito de espelho em óculos de ski)	Moderadamente tóxico sob a forma metálica Muito tóxico sob a forma de compostos
Lítio Li	0,534	180	Vidro Cerâmica Ligas condutoras de calor	Electricidade (ânodo de baterias, pilhas resistentes a vibrações, choques e altas temperaturas)	Não tóxico
Magnésio Mg	1,75	650	Automóveis Aviação Marinha Peças moldadas, forjadas, laminadas Material refratário		Pouco tóxico
Manganésio Mn	7,2	1260	Elemento de adição no aço	Electricidade (pilhas) Vidraria (corante violeta e castanho)	Pouco tóxico em pequenas doses
Mercúrio Hg	13,6	-39	Pintura	Electricidade (lâmpadas fluorescentes, pilhas) Medicina (termómetros) Meteorologia (barómetros)	Muito tóxico
Molibdénio Mo	10,2	2630	Elemento de adição no aço Corante (laranja) Lubrificante sólido (pó)	Electricidade (filamentos) Electrónica (semicondutor, tubos de raios X)	Pouco tóxico em pequenas doses
Níquel Ni	8,9	1455	Elemento de adição no aço inoxidável Turbo-reactores Peças filiformes (agrafos)	Electricidade (cátodos de acumuladores alcalinos) Electrónica (televisores) Bijuteria Medicina (agulhas) Música (cordas de guitarra) Química (corante)	Tóxico
Ouro Au	19,3	1063	Douramento de peças metálicas	Bijuteria (ligas com Ni, Cu, Ag, Fe) Electrónica (contactos inoxidáveis)	Pouco tóxico

(Continua)

Anexo A (Continuação) - Classificação de metais (adaptado de Esnault, 2009).

Platina Pt	21,5	1770	Cadinhos Catalisadores Injectores (motores a reacção)	Electricidade (contactores) Magnetismo (ímans)	Pouco tóxico no estado puro Muito tóxico em compostos
Chumbo Pb	11,34	327	Ligas Chumaceiras	Electricidade (dispositivos piezoeléctricos) Electrónica (vidro de tubos catódicos) Vidraria (cristal) Armamento Armamento (munições)	Muito tóxico (saturnismo) Contido no ar: gases de escape, fumo de cigarros, fertilizantes, tintura, pesticidas) Contido na água que circulava em antigas canalizações de chumbo
Estrôncio Sr	2,6	757	Cerâmicas	Química (corante vermelho para vernizes e esmaltes)	Muito tóxico
Tântalo Ta	16,69	2966	Ligas com alto ponto de fusão Ferramentas de corte	Electrónica (telemóveis, computadores) Química (reactores)	
Tálio Tl	11,85	304		Detectores de infravermelhos Electricidade (lâmpadas de halogénio metálicas)	Muito tóxico Veneno para ratos e formigas
Titânio Ti	4,5	1820	Aeronáutica (peças forjadas) Tubos de perfuração (petróleo) Bielas Molas Reservatórios de gás (satélites)		Não tóxico
Tungsténio W	19,3	3400	Ligas para peças resistentes (pás de turbinas) Lubrificante sólido (pó)	Electricidade (eléctrodo em soldadura TIG, contactos de disjuntores)	Ligeiramente tóxico
Urânio U	18,7	1132	Combustível nuclear		Muito tóxico
Vanádio V	5,9	1735	Elemento de adição no aço Cerâmica (catalisador)		Muito tóxico
Zinco Zn	7,15	42	Galvanização (protecção de superfícies) Elemento de adição no cobre (latão)		Não tóxico
Zircónio Zr	6,5	1705	Revestimento refractário		Não tóxico

Anexo B - Classificação de metalóides (elementos com algumas propriedades que os aproximam dos metais) (adaptado de Esnault, 2009).

Metalóide Símbolo químico	Massa volúmica (kg/dm ³)	Temp fusão (°C)	Aplicações possíveis		Observações gerais
			Engenharia mecânica	Outras aplicações	
Antimónio Sb	6,7	630	Ligas antifricção Caracteres de tipografia Agente lubrificante Plásticos	Electricidade (placas de acumuladores)	Tóxico em certas condições
Arsénio As	5,72	1090	Roletes de impressoras a laser	Electricidade (eléctrodo de acumuladores) Electrónica (células fotovoltaicas, transístores, diodos electroluminescentes)	Muito tóxico Encontra-se na água contaminada com herbicidas
Germânio Ge	5,32	1211	Liga com o silício	Electrónica (diodos, transístores) Vidraria	Tóxico em certas condições
Silício Si	2,33	1410	Molas Vidro Abrasivo Cerâmicas	Electrónica (transístores, semicondutores, células fotovoltaicas)	Não tóxico
Boro B	2,35		Fibra de vidro Têxteis	Electrónica (semicondutor) Vidraria (vidro “pirex”) Electricidade (ímanes permanentes)	Moderadamente tóxico