



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Armando André Fernandes Pimenta

**O CONCEITO DE DESIGN FOR
MANUFACTURING: REVISÃO SISTEMÁTICA DA
LITERATURA**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na
Especialidade de Produção e Projeto orientada pelo Professor Cristóvão Silva e
apresentada no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências
e Tecnologia da Universidade de Coimbra**

outubro de 2021

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

O conceito de Design for Manufacturing: revisão sistemática da literatura

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

The concept of Design for Manufacturing: a systematic literature review

Autor

Armando André Fernandes Pimenta

Orientador

José Manuel Baranda M.S. Ribeiro

Júri

Presidente Professor Doutor Luís Miguel Domingues F. Ferreira,
Professor Auxiliar da FCTUC

Orientador Professor Doutor José Manuel Baranda M.S. Ribeiro,
Professor Auxiliar da FCTUC

Vogais Professor Doutor Cristóvão Silva,
Professor Associado da FCTUC

Coimbra, outubro, 2021

Agradecimentos

Quero agradecer, em primeiro lugar, ao professor Cristóvão Silva e ao professor José Baranda Ribeiro pelo apoio e paciência ao longo desta caminhada.

À minha namorada por toda a ajuda na redação deste trabalho e por nunca me ter deixado desistir.

A todos os meus amigos, por estarem sempre presentes e por estes anos maravilhosos que me proporcionaram.

Por fim, aos meus pais, que mesmo nas maiores “tempestades” sempre me apoiaram incondicionalmente.

Resumo

Perante o fabrico de um produto sabemos que a premissa da redução de custos sem comprometer a qualidade está sempre presente.

Durante o processo de desenvolvimento de um produto é frequente recorrer a diversas, como custos, processos de fabrico ou tempos. Isto faz com que, posteriormente, durante o processo de fabrico, apareçam imprevistos que poderão traduzir-se em custos acrescidos. O conceito de Design for Manufacturing (DFM) é uma prática de engenharia que pretende tornar o processo de fabrico do produto mais eficiente e que defende que é na fase inicial do design que devem ser evitados e corrigidos os erros, substituindo-se o desenho por um novo, tendo sempre em vista a redução de custos de produção. O DFM poderá então ser uma ferramenta importante para que na fase de conceção de um produto sejam tidos em conta aspetos como os processos de fabrico, distribuição, montagem ou desmontagem, que irão afetar o custo do produto ao longo do seu ciclo de vida.

Com a presente Dissertação pretende-se explorar o conceito de Design for Manufacturing, em particular: as suas características, as suas vantagens e desvantagens e estabelecer qual a melhor forma de o implementar no contexto empresarial. Pretende-se ainda explorar outros conceitos relacionados e/ou derivados do DFM. Para isso, este trabalho assenta numa revisão da literatura sobre o tema que se pretende explorar.

Relativamente às vantagens, 66% dos autores apontam o aumento da qualidade do produto e 88% a redução dos custos de produção. Quanto às desvantagens 45% afirmam que o ciclo de desenvolvimento do produto aumenta e 36% referem a dificuldade em analisar e seleccionar os materiais na fase inicial do design como uma das principais limitações.

Palavras-chave: Design for Manufacturing, Design do Produto, Redução de Custos, Fabrico Eficiente

Abstract

When manufacturing a product we know that the premise of reducing costs without compromising quality is always present.

During the development process of a product it is frequent to resort to several, such as costs, manufacturing processes or times. This means that later on, during the manufacturing process, unforeseen issues arise that may translate into increased costs. The concept of Design for Manufacturing (DFM) is an engineering practice that aims to make the manufacturing process of the product more efficient and argues that it is in the early stages of design that errors should be avoided and corrected, replacing the design by a new one, always aiming to reduce production costs. DFM can then be an important tool for the design phase of a product to take into account aspects such as manufacturing processes, distribution, assembly or disassembly, which will affect the cost of the product throughout its life cycle.

This dissertation aims to explore the concept of Design for Manufacturing, in particular: its characteristics, its advantages and disadvantages and establish how best to implement it in the business context. We also intend to explore other concepts related to and/or derived from DFM. To this end, this work is based on a literature review of the subject that is intended to be explored.

Regarding the advantages, 66% of the authors point out the increase in product quality and 88% the reduction in production costs. As for the disadvantages, 45% state that the product development cycle increases and 36% refer the difficulty in analyzing and selecting materials in the initial design phase as one of the main limitations.

Keywords Design for Manufacturing, Product Design, Cost Reduction, Efficient Manufacturing

Índice

Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas	xii
Siglas	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estrutura da Dissertação	3
2. Metodologia.....	5
2.1. Estratégia de Pesquisa.....	5
2.2. Critérios de Seleção	6
2.3. Análise e Síntese dos Critérios	7
3. Análise da Literatura Seleccionada	8
3.1. Artigos seleccionados para estudo.....	8
3.2. Análise do conceito de Design for Manufacturing	10
3.3. Características do Design for Manufacturing	17
3.4. Guidelines	22
3.5. Vantagens da aplicação do Design for Manufacturing	27
3.6. Barreiras à Implementação	33
3.7. Análise Económica	38
4. Extensões ao Conceito.....	40
4.1. Design For Manufacturing VS Design For Assembly	40
4.2. Design for Disassembly	41
4.3. Design for Environment.....	43
5. Conclusões.....	46
Referências Bibliográficas.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.Resultados da pesquisa inicial.	6
Figura 2.2.Resultados após critérios de secção.	7
Figura 3.1 Número de artigos publicados anualmente por cada País.....	10
Figura 3.2. Principais características assinaladas nos diferentes artigos.....	21
Figura 3.3. Adaptada de (Lenau & Alting, 1996) “Selection of material, manufacturing process, function and shape is closely interrelated”.	24
Figura 3.4. Principais orientações para uma correta implementação do DFM.	27
Figura 4.1. Hierarquia de ações a adotar segundo o DFR (Kuo et al., 2001).	42

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Distribuição do número de publicações, de acordo com a fonte da publicação.	8
Tabela 3.2. Definições do conceito DFM dadas pelos diferentes autores.....	11
Tabela 3.3 Características do conceito DFM	18
Tabela 3.4. Adaptada de (Youssef, 1994) “Benefits of DFM”.	30
Tabela 3.5. Principais vantagens do DFM, apontadas pelos diferentes autores.....	32
Tabela 3.6. Principais desvantagens do DFM, apontadas pelos diferentes autores.	37

SIGLAS

DFM- *Design For Manufacturing*

APC- *Advanced Process Control*

CAE- *Computer Aided Engineering*

CAM- *Computer Aided Manufacturing*

CAD- *Computer Aided Design*

CALS- *Computer Aided Acquisition Logistics Support*

PDP- *Product Design Process*

DFA- *Design For Assembly*

DFMA- *Design For Manufacturing and Assembly*

DFD- *Design For Disassembly*

DFR- *Design For Recyclability*

DFE- *Design For Environment*

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Com a exigência constante de responder eficientemente às necessidades dos consumidores, associada a um aumento da competitividade entre empresas, é fundamental diminuir o tempo necessário para o desenvolvimento de novos produtos, simplificar o fabrico e facilitar a recuperação em fim de vida.

De acordo com (Howard & Lewis, 2003) as três medidas da eficácia do processo de Design são o custo, a qualidade e o tempo. Independentemente do produto a ser produzido, o cliente e a gestão querem sempre melhor, mais barato e mais rápido.

Assim, na década de 1980, surge o conceito de engenharia concorrente como uma simbiose entre gestão e engenharia, para melhorar a qualidade e reduzir custos e prazos, desde a conceção do produto até ao seu desenvolvimento, contemplando novas condutas e modificações do produto.

O processo da engenharia concorrente compreende que todas as etapas desde o design até ao cliente são executadas simultaneamente, e que todos os custos, prazos e requisitos são considerados.

Antes da revolução industrial, segundo (Herrmann et al., 2004), o artesão era a pessoa que desenhava e concebia o produto, e que também o vendia, tendo a total compreensão detalhada das necessidades do cliente. À medida que as indústrias se desenvolveram, quer em tamanho quer em complexidade, foram surgindo organizações separadas para o Marketing, Design e Produção, cada uma com os seus próprios conhecimentos especializados.

Desde cedo que a preocupação era criar produtos que fossem baratos de produzir, e é nesta premissa que surge o conceito de Design For Manufacturing, doravante DFM, este preocupa-se com a identificação dos materiais e processos de design apropriados para um determinado produto, com base na combinação de várias capacidades e limitações do produto, para que possa ser facilmente produzido (Kuo et al., 2001).

Ainda de acordo com (Herrmann et al., 2004), o desenvolvimento de novos produtos de sucesso requer a capacidade de prever, no início do processo de desenvolvimento do produto, o impacto do ciclo de vida das decisões do design. As decisões mais importantes são tomadas individualmente para cada produto desenvolvido, o que pode acrescer os custos no caso de ser necessário alguma alteração, e por outro lado também torna o produto menos versátil.

O autor considera necessário ter em consideração todo o ciclo de vida do produto e pensar em questões desde o seu fabrico até à sua reforma ou reciclagem, e afirma que calcular e aceitar estimativas com algum erro leva a que apareçam problemas e imprevistos, que por sua vez irão resultar em custos acrescidos. Se estes problemas forem descobertos durante a verificação do design, podem ser corrigidos através de um novo desenho, contudo esta correção deve ser evitada numa fase tardia.

Se no início do ciclo de desenvolvimento fosse possível prever as necessidades exatas durante o ciclo de vida do produto, iria permitir um melhor desempenho e consequentemente melhores resultados. Infelizmente, prever estas necessidades na fase inicial do design é bastante difícil.

Consoante (Herrmann et al., 2004) quando os projetistas não detêm conhecimento suficiente e detalhado das práticas de design atuais, e os engenheiros de produção também não estão disponíveis para uma avaliação, podem não ser capazes de efetuar avaliações sobre os seus próprios trabalhos. Desta forma, pode resultar um desenho dispendioso em termos de fabrico e pode até mesmo comprometer o seu sucesso.

Com o passar do tempo e de modo a conseguir ajudar a avaliar quais os impactos no ciclo de vida do produto consoante a escolha de design, as empresas e os investigadores desenvolveram muitas ferramentas referidas como metodologias Design para X (DFX). Este 'X' representa qualquer uma das várias considerações de design que ocorrem ao longo do ciclo de vida do produto, tais como qualidade, fabrico, produção ou ambiente, como veremos em detalhe mais adiante.

Conclui-se que é crucial a participação de todas as áreas com conhecimento e experiência, desde o projeto até à venda, de modo a formarem equipas coordenadas e com o objetivo de satisfazer os clientes. Para além de uma colaboração e comunicação eficiente entre as diversas áreas, nas diferentes fases do desenvolvimento do produto é necessário a elaboração e estruturação dos métodos de trabalho.

Não obstante à redução do time-to-market dos novos produtos, é importante que seja adequado à empresa, tendo em conta a dinâmica em que a empresa se insere e opera.

Assim sendo, a utilização do DFM permitirá melhorar a eficiência do processo desde a idealização ao desenvolvimento destes novos produtos, o que levará ao triunfo da empresa no mercado.

De modo a não comprometer o sucesso deste conceito, torna-se imperioso um melhor conhecimento do mesmo, das suas vantagens e desvantagens e das dificuldades inerentes a todo o processo de implementação.

1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo procurar entender o conceito de DFM, bem como as suas outras vertentes, através de uma revisão de literatura. Espera-se que este estudo possa servir de suporte a futuras e potenciais investigações nesta área, e que ajude na tomada de decisão aquando do projeto de novos produtos.

1.3. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em quatro capítulos, incluindo a presente introdução.

A descrição detalhada do conteúdo dos capítulos é a seguinte:

O capítulo 1 enquadra o conceito de Design for Manufacturing, apresenta a motivação deste estudo, objetivos e a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 está descrito como foi efetuada a pesquisa e a recolha dos documentos para proceder à investigação, quais as bases de dados bibliográficas consultadas, e como se chegou ao número exato de documentos a analisar.

No capítulo 3, referem-se os autores analisados, apresenta-se a definição dada por cada um deles, por ordem cronológica, e apresenta-se a definição do conceito DMF, resultante da análise efetuada. Nesta secção constam as características apontadas pelos autores, algumas orientações para a implementação do conceito, as vantagens e dificuldades verificadas e ainda uma análise económica.

O capítulo 4 explora as extensões do conceito, nomeadamente o Design for Assembly, Design for Disassembly, Design for Environment.

O capítulo 5 apresenta algumas observações e conclusões finais deste trabalho.

2. METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, optou-se por elaborar uma revisão sistemática, que consiste numa metodologia utilizada para garantir a fiabilidade da investigação.

Trata-se de uma abordagem formal que pretende localizar, selecionar, analisar, sintetizar e relatar provas. Espera-se que as revisões sistemáticas sejam replicáveis, exclusivas e agregadas.

Este capítulo descreve as medidas tomadas para guiar a investigação, bem como os detalhes inerentes a todo o processo.

2.1. Estratégia de Pesquisa

Para a realização deste estudo recorreu-se a diferentes motores de pesquisa, sendo que o mais utilizado foi o *ScienceDirect*. Neste foram encontrados artigos científicos, revistas académicas, relatórios e publicações resultantes de Conferências. A par do *ScienceDirect*, também foi consultada a B-on, Google Scholar e o Scopus.

O resultado apresentado é afetado pela escolha das palavras-chave no momento da pesquisa, o que leva a que estas tenham de ser escolhidas com alguma prudência. Assim, optou-se pelos seguintes termos: Design for Manufacturing, Design for Assembly, Design for Environment, e Design for Disassembly. Para a seleção procurou ler-se os seguintes termos ao longo do conteúdo dos documentos, mais precisamente no título e na introdução.

Esta etapa inicial agregou um total de 138 resultados, sendo 108 artigos científicos, dos quais 10 publicados em revistas académicas, 8 teses de Doutoramento, 12 teses de mestrado e 3 livros, como podemos constatar na figura 2.1.

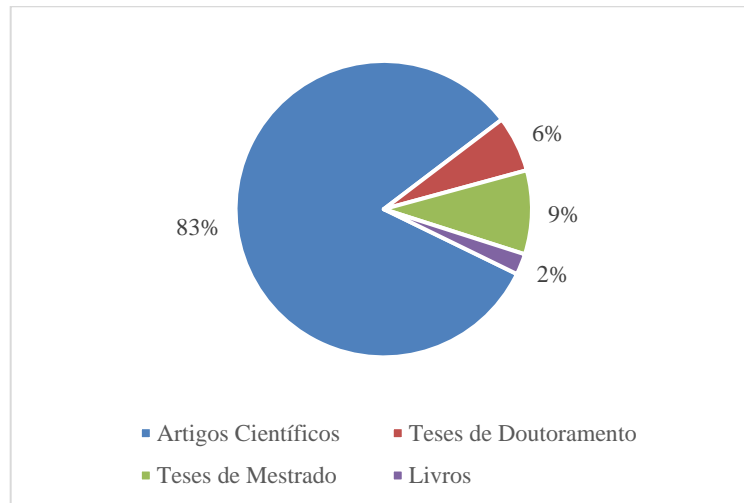


Figura 2.1. Resultados da pesquisa inicial.

2.2. Critérios de Seleção

Após a pesquisa inicial e com o objetivo de perceber quais os artigos a selecionar, os documentos foram cruzados com o objetivo de eliminar ideias repetidas e resultados semelhantes, o que fez com que reduzisse o número de documentos a estudar para 75.

Em seguida, verificou-se a relevância dos documentos com base nos títulos e nas palavras-chave. Para garantir que eram realmente pertinentes e que se debruçavam sobre o tema em causa, foram lidos o resumo e as suas conclusões.

Após esta fase, restaram 46 documentos, que correspondem a 44 artigos científicos, 1 tese de mestrado e 1 livro. Na figura 2.2 estão indicadas as respetivas percentagens.

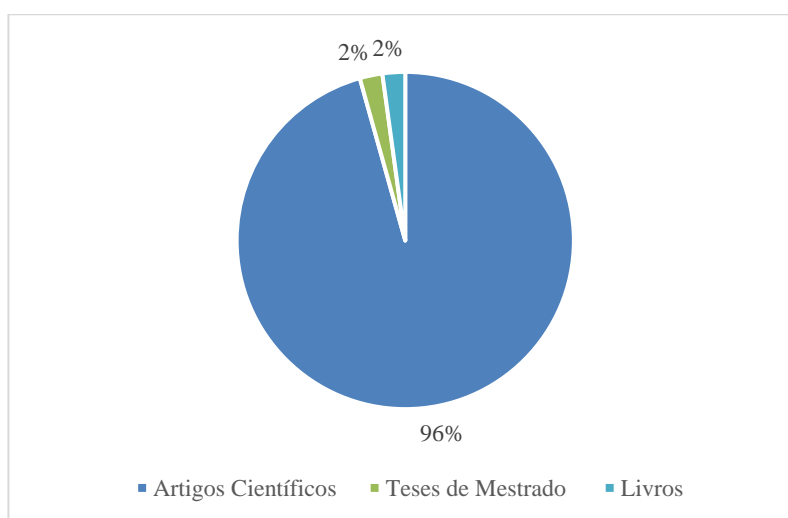


Figura 2.2. Resultados após critérios de secção.

2.3. Análise e Síntese dos Critérios

A última etapa consistiu em analisar, extrair e escrever informação relevante sobre as 46 fontes identificadas anteriormente.

O objetivo centrou-se em extrair informação sobre a definição do conceito Design for Manufacturing, identificar as suas vantagens e desvantagens, os problemas inerentes à sua implementação e ainda como tem sido reconhecida esta questão em obras anteriores.

3. ANÁLISE DA LITERATURA SELECIONADA

3.1. Artigos selecionados para estudo

Depois de identificados os documentos para a realização deste estudo, elaborou-se uma análise tendo em conta diferentes elementos, como: o ano da publicação, o país de origem e onde foi publicado o documento.

Tabela 3.1. Distribuição do número de publicações, de acordo com a fonte da publicação.

Publicado em	Número de Artigos
Procedia CIRP	8
Journal of Materials Processing Technology	5
Procedia Manufacturing	5
IFAC Proceedings Volumes	3
Computers and Industrial Engineering	3
Robotics and Computer-Integrated Manufacturing	2
Computers in Industry	2
International Journal of Production Economics	2
Management Science	1
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	1
Computer-Aided Design	1
International Journal of Industrial Ergonomics	1
Journal of Manufacturing Systems	1
CIRP Annals- Manufacturing Technology	1
Computer Integrated Manufacturing Systems	1
Applied Soft Computing Journal	1
Mechanical Engineers' Handbook	1

International Journal of Operations & Production Management	1
CAD Computer Aided Design	1
Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference	1
International Journal of Production Research	1
International Journal of Precision Engineering and manufacturing- Green Technology	1
Journal of Process Control	1
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo	1

Na tabela 3.1. verificamos que são várias as revistas internacionais que se têm debruçado sobre o tema, sendo que a revista/jornal “Procedia CIRP”, “Journal of Material Processing Technology” e “Procedia Manufacturing” são as que têm o maior número de publicações, 8, 5 e 5 respetivamente.

Vemos, também, que ao longo desta lista existe apenas um artigo publicado em português, no Departamento de Engenharia da Universidade de São Paulo, Brasil.

Ainda na análise dos 46 documentos deste estudo, de forma a ter-se uma visão geral tendo em conta uma perspetiva histórica, agregou-se o número de artigos que têm vindo a ser publicados ao longo das décadas atendendo ao país de origem das publicações, resultando no gráfico seguinte.

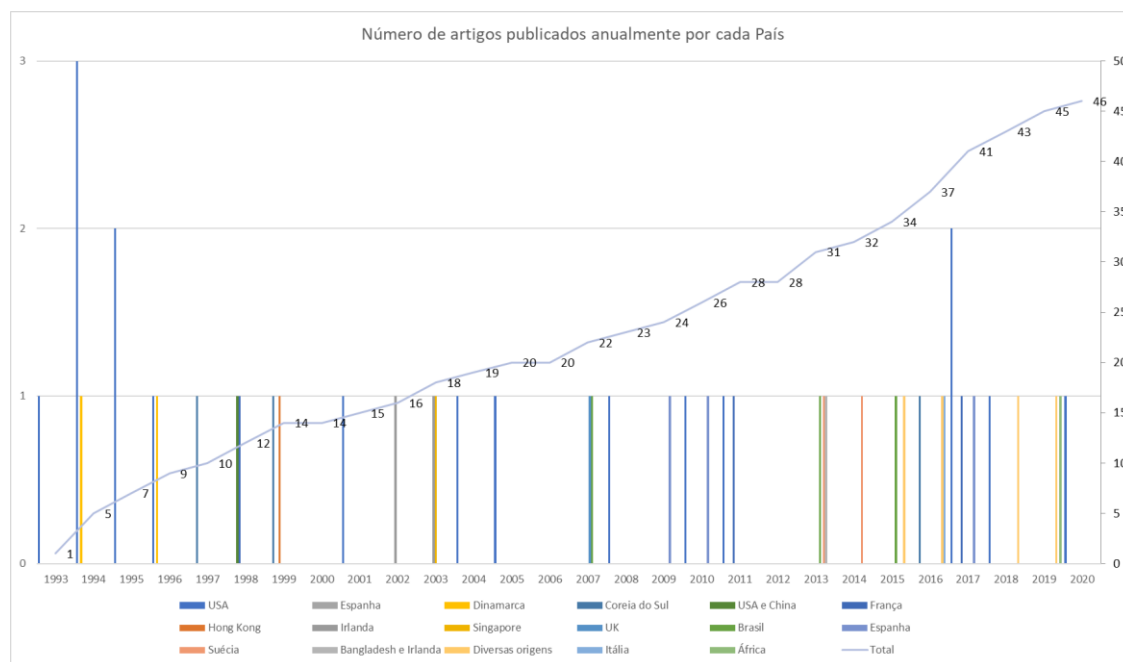


Figura 3.1 Número de artigos publicados anualmente por cada País

3.2. Análise do conceito de Design for Manufacturing

O conceito Design for Manufacturing surgiu na década de 70, e tem vindo a ser estudado desde então. Uma das primeiras definições foi proposta por (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2011) “O termo "Design for manufacturing" (ou DFM) significa que o design deve ser desenvolvido de modo a facilitar o fabrico do conjunto de componentes que formam o produto após a montagem.”

Nas décadas seguintes, vários autores debruçaram-se sobre o estudo deste conceito fazendo surgir diversas definições sobre o tema. Apesar do variado leque, todas elas são muito semelhantes, sendo que as particularidades são mais evidenciadas nas diretrizes da fase de implementação.

Assim, o DFM pode ser entendido como a prática de desenhar um produto que possa ser ajustado a um determinado sistema de produção. Pressupõe que exista um elevado nível de comunicação e o envolvimento de diferentes equipas, desde os recursos humanos, ao marketing, até ao departamento de qualidade. Estas equipas empregam todos os seus esforços para alcançar uma maior eficiência no processo de fabrico, através do aumento do rigor e perfeição no design.

Pode ler-se como cada autor define o conceito na tabela 3.2.

Tabela 3.2. Definições do conceito DFM dadas pelos diferentes autores.

Autor	Definição
(Ulrich et al., 1993)	DFM é uma filosofia de design utilizada para melhorar o desenvolvimento de produtos bem como o desempenho dos sistemas de produção. Tem como objetivo que o produto seja mais fácil de fabricar, ainda na fase de design do desenvolvimento do produto, resultando frequentemente em peças geometricamente mais complexas. Os métodos são divididos em duas categorias, redução do custo de peças individuais ou redução do custo da montagem de um conjunto de peças.
(Boothroyd, 1994)	DFM é o design que facilita o fabrico de um conjunto de peças, que irão formar um produto após a montagem. É utilizado: como base de estudo na engenharia concorrente, a fim de fornecer orientações às equipas de design de modo a simplificar a estrutura de peças e assim reduzir os custos de fabrico e montagem; como ferramenta comparativa para estudar os produtos concorrentes e as dificuldades tanto no fabrico como na montagem; na avaliação do custo-benefício, e assim controlar os custos e colaborar na negociação com fornecedores.
(X. Chu & Holm, 1994)	DFM é garantir que o design é economicamente viável de fabricar, através do controlo da “manufaturabilidade” do mesmo, sendo um dos aspetos mais importantes da engenharia concorrente
(Shad Dowlatshahi, 1994)	DFM tem como objetivo projetar peças e produtos de modo que o seu fabrico seja mais eficiente, isto é, que sejam mais baratos e fáceis de produzir. É um conceito abrangente, que compreende, entre outras, a redução do número de peças, simplificação das mesmas, e um conhecimento generalizado sobre os custos de fabrico, processos e materiais de fabrico.

(Mital, 1995)	DFM resulta da ponderação do conjunto de critérios, ainda nas fases iniciais de concepção: facilidade, rapidez e a economia do fabrico de produtos de qualidade. nas fases iniciais de concepção do produto. Estes critérios também irão avaliar a eficiência e a eficácia do processo de fabrico.
(Philpott et al., 1996)	DFM estuda os diversos designs, e a sua escolha tende a convergir em soluções de design que sejam mais eficientes em termos de custo e de qualidade, através de uma avaliação comparativa dos custos associados aos processos produtivos inerentes aos designs disponíveis, sendo imprescindível o conhecimento da relação entre os parâmetros do design, do processo produtivo e do custo associado.
(Lenau & Alting, 1996)	DFM é avaliação dos processos de fabrico e de seleção de materiais, tendo em vista o fabrico de produtos de qualidade, a economia do fabrico e o impacto ambiental. Apesar de a seleção de materiais e do processo de fabrico terem a mesma importância, os estudos de DFM tem dado maior ênfase à análise da produtividade.
(Liou & Jang, 1997)	DFM é um modo de fornecer as características detalhadas de um produto aos designers, ainda em fase de concepção, para que estes consigam escolher os processos de fabrico adequados para a produção do mesmo, sem que seja necessário recorrer a processos corretivos para garantir a sua qualidade.
(Villeneuve & Tassel, 1998)	DFM representa o conjunto de ferramentas e métodos que permitem avaliação qualitativa e/ou quantitativa, e posteriormente a validação da solução de design do produto, conforme os constrangimentos inerentes à produção.

(Chen et al., 1998)	DFM tem como objetivo conceber produtos que sejam fáceis de fabricar e montar, sob uma perspetiva rentável. Surge como solução a problemas dimensionais assim como a problemas relacionados com o custo de produção, e através da aplicação dos seus princípios gerais e métodos de avaliação quantitativos, surge para avaliar a eficiência tanto do design como de todo o processo de fabrico.
(Park & Baik, 1999)	DFM consiste na aplicação do design simultâneo, isto é o design do produto e o design do seu processo de fabrico, e existir um planeamento do processo de fabrico, aquando da fase de conceção, havendo assim um maior controlo das restrições tanto associadas ao produto como ao processo. O DFM permite encurtar o tempo de fabrico, melhorar a qualidade de produto e reduzir os custos de produção.
(Kuo et al., 2001)	DFM considera simultaneamente os objetivos e as restrições associadas ao design do produto, através do conhecimento das capacidades e limitações dos materiais e processos de fabrico apropriados à sua produção, de modo ao produto ser facilmente produzido. Para além destas, o DFM, ainda na fase inicial de conceção, considera operações de desmontagem e de reciclagem de produtos e peças a ter em conta no final ciclo de vida.
(O'Driscoll, 2002)	DFM é a prática de design do produto tendo em vista o processo de fabrico, e assim alcançar uma redução tanto no tempo como no custo total do desenvolvimento do produto, assegurando a facilidade de todo o processo de fabrico inerente ao produto.

(Ong et al., 2003)	DFM envolve a ponderação dos objetivos da conceção do produto bem como as restrições relacionadas com o fabrico, ainda na fase de conceção do produto, evitando operações corretivas dispendiosas já durante a fase de fabrico.
(Howard & Lewis, 2003)	DFM consiste no projeto de produtos, tendo em vista a facilidade e a economia da produção, considerando simultaneamente o maior conjunto de materiais e processos de fabrico adequados à produção de um produto de qualidade.
(Herrmann et al., 2004)	DFM avalia a viabilidade e o custo do fabrico, ao nível do processo de fabrico.
(Curran et al., 2007)	DFM acompanha a engenharia concorrente, na medida em que assenta na consideração do impacto das decisões tomadas na fase conceção, a fim de garantir a viabilidade económica e do processo de fabrico.
(Pan et al., 2008)	DFM defende a importância de abordar a produtividade e o rendimento do processo produtivo durante a conceção de produto. Uma vez que o seu principal objetivo é a consideração dos vários processos de fabrico adequados à produção de produtos de qualidade, tendo em vista um maior rendimento do processo, será necessário um controlo avançado do processo (APC).
(Ferrer et al., 2009)	DFM é a prática do design de componentes, tendo em vista o seu fabrico. Envolve a ponderação de características e restrições, algumas inerentes ao fabrico, de modo que haja perceção das limitações e capacidades dos processos de fabrico e o modo como afetam as soluções de design apresentadas.

(Lysenko & D'Souza, 2010)	DFM é uma metodologia que considera simultaneamente o objetivo do design e as restrições associadas aos processos de fabrico, de modo a prever e eliminar erros durante a fase de design.
(Kerbrat et al., 2011)	DFM é uma abordagem para melhorar a competitividade do produto, que para além de considerar questões relacionadas com o fabrico durante a fase de design, também promove a conceção de produtos híbridos modulares, para que sejam concebidos pelo melhor processo possível e reunidos posteriormente.
(Vallhagen et al., 2013)	DFM proporciona métodos e ferramentas de análise quantitativa e qualitativa, para a avaliação da capacidade de o design se adaptar a diferentes processos de fabrico, priorizando a otimização da produtividade, deixando por vezes de parte as funções e a características do produto.
(Ramos & Lorini, 2013)	DFM é uma abordagem extensa acerca da gestão do processo de design industrial, apoiada por informações relativas ao fabrico, necessárias à prática da engenharia.
(Wuest et al., 2015)	DFM é uma abordagem que serve de apoio à produção, na medida em que considera os requisitos e/ou restrições inerentes ao processo de fabrico ainda durante a fase de design, levando a melhorias significativas no processo, como redução de custos associados à produção, bem como uma melhoria na qualidade.

<p>(de Oliveira Leite et al., 2015)</p>	<p>DFM é uma metodologia sistemática de previsão de engenharia, uma vez que, ainda em fase de projeto, contemplam conjuntamente os objetivos do design, bem como as limitações e mais-valias do fabrico, para evitar problemas futuros relacionados com a produção.</p>
<p>(W. S. Chu et al., 2016)</p>	<p>DFM é um paradigma de design, que tem em atenção não só a forma e a função do produto, mas também a sua “manufaturabilidade”, o custo e o ciclo de vida do produto, sendo estes afetados pelas decisões tomadas na fase de conceção. Decisões como a conceção de produtos com o menor número de partes para serem montadas, produtos e partes com design modulares, usar materiais mais fáceis de transformar, entre outras, levam geralmente a reduções no custo e a uma maior eficiência do processo produtivo.</p>
<p>(Favi et al., 2016)</p>	<p>DFM é uma prática de design, na qual: o design deve transitar rapidamente para a fase de produção; a produção deve ser feita a um custo mínimo; o fabrico deve ser feito com o mínimo esforço em termos de manuseamento e processamento; e o produto quando terminado deve ter o nível de qualidade desejado.</p>

Atentando em todas as definições dadas pelos diversos autores ao longo destes anos, o conceito de DFM poderá sintetizar-se como a prática de design, assente na engenharia concorrente, que considera e avalia, através de métodos qualitativos e quantitativos, na fase inicial do desenvolvimento do design, os materiais, os processos de fabrico, o ciclo de vida do produto, o custo de produção, de modo a maximizar a manufacturabilidade dos produtos, e a evitar custos desnecessários relacionados com a produção, sem comprometer a qualidade e a fiabilidade do produto, apelando à participação de todas as partes inerentes à produção, garantindo o maior numero de informação disponível acerca do produto e do processo de fabrico.

3.3. Características do Design for Manufacturing

Foi possível identificar, entre todos os autores, diversas características ligadas ao conceito de DFM, sendo as mais relevantes: a complexidade, versatilidade, sustentabilidade, qualidade, eficiência, acessibilidade e simplicidade.

Após a leitura detalhada de cada documento e de identificadas as características mais comuns a todos os autores, seleccionaram-se, dentro destas, as que cada autor atribui ao conceito de DFM, resultando na tabela seguinte.

Tabela 3.3 Características do conceito DFM

Autor	Versátil	Complexo	Sustentável	Qualidade	Eficiente	Acessível	Simples
(Ulrich et al., 1993)	X	X					X
(Shad Dowlatshahi, 1994)		X		X	X	X	X
(X. Chu & Holm, 1994)		X					
(Boothroyd, 1994)		X			X		X
(S. Dowlatshahi, 1995)	X	X			X		
(Mital, 1995)				X	X		
(Philpott et al., 1996)		X		X			
(Lenau & Alting, 1996)		X					X
(Liou & Jang, 1997)				X			
(Villeneuve & Tassel, 1998)		X					X
(Chen et al., 1998)		X			X		
(Ji & Lau, 1999)		X					
(Park & Baik, 1999)				X			
(Kuo et al., 2001)		X			X		
(O'Driscoll, 2002)		X					
(Howard & Lewis, 2003)		X					X

(Ong et al., 2003)		X					
(Herrmann et al., 2004)		X	X	X		X	X
(Zhao & Shah, 2005)		X			X	X	
(Curran et al., 2007)		X			X	X	
(Aitken, 2008)		X		X		X	
(Pan et al., 2008)		X					X
(Ferrer et al., 2009)		X				X	X
(Lysenko & D'Souza, 2010)		X			X		
(Ferrer et al., 2010)		X				X	
(Kerbrat et al., 2011)	X	X					
(Ramos & Lorini, 2013)		X					X
(Vallhagen et al., 2013)		X			X		
(Andersson et al., 2014)	X	X			X		
(de Oliveira Leite et al., 2015)	X	X		X			
(Wuest et al., 2015)	X			X		X	
(W. S. Chu et al., 2016)	X	X					X
(Lynn et al., 2016)		X					X
(Favi et al., 2016)		X			X	X	X
(Joshi & Anand, 2017)		X			X	X	
(Gebisa & Lemu, 2017)	X	X		X			
(Asadollahi-Yazdi et al., 2017)							X

(Battaia et al., 2018)		X	X	X		X	
(Tang, 2018)	X						X
(Kadkhoda-Ahmadi et al., 2019)		X		X		X	
(Sibanda et al., 2019)						X	X
(Mears & Summers, 2020)		X			X		X
Total (%)	21,43%	83,33%	4,76%	28,57%	33,33%	50%	40,47%

Como podemos constatar na Figura 3.2, de entre todas as características, as mais apontadas foram: complexo assinalada por 35 autores (83,3%), acessível apontada por 21 autores (50%) e simples indicada por 17 autores (40,47%).

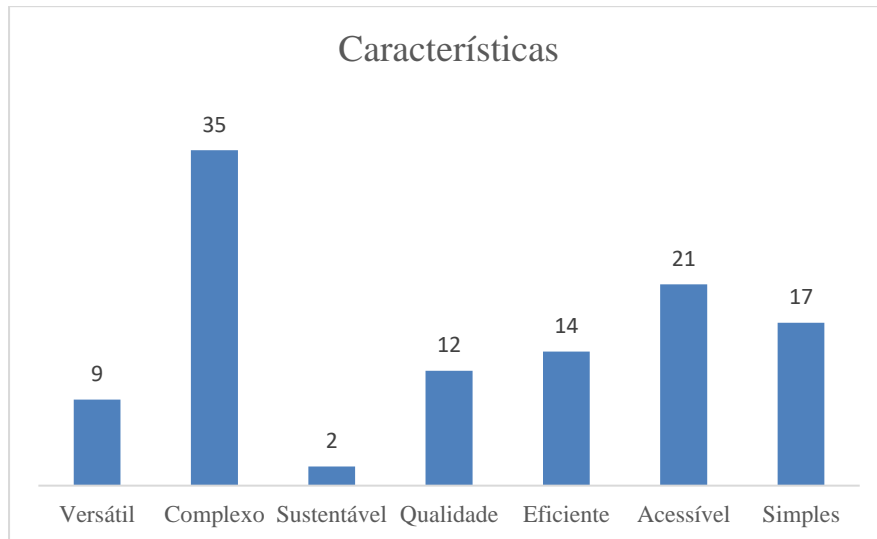


Figura 3.4. Principais características assinaladas nos diferentes artigos.

De um modo geral todos os autores consideraram este processo complexo relativamente à implementação, por ser um processo que abrange diferentes departamentos e, por sua vez, equipas, e por a fase inicial do design requerer bastante tempo e dedicação. Por outro lado, grande parte também considerou este processo simples no que diz respeito à fase de montagem, e eficiente em relação a todo o processo.

Apesar de ser considerado um processo sustentável, dado que uma das suas finalidades é reduzir o impacto ambiental, essa característica foi poucas vezes considerada pelos autores, o que poderá significar que essa finalidade não é facilmente atingida. A temática da sustentabilidade tem vindo, ao longo dos anos, a ser alvo de maior atenção, pelo que é compreensível que os autores de investigações mais antigas nem sequer a equacionem.

A versatilidade também foi associada a este conceito, visto que se adapta a cada sistema de produção, e como em todas as fases do processo se tem em conta a redução dos custos também o torna acessível economicamente, uma das características mais apontada pelos autores.

É importante realçar que ao longo da leitura foram identificadas outras características, no entanto optou-se por eleger as mais comuns e de seguida perceber dentro destas quais as mais elegidas pelos autores.

3.4. Guidelines

Apesar de o DFM ter como objetivo a simplificação do processo de fabrico, a sua implementação acaba por ser bastante complexa.

Alguns autores defendem a utilização de softwares para garantir a qualidade total, outros acreditam que é na fase embrionária do design que se previnem falhas futuras, e que toda a equipa deve ser envolvida da mesma forma para o processo ser encarado por todos com responsabilidade. Assim, para uma implementação eficiente e eficaz cada autor indica linhas orientadoras.

De acordo com (Ulrich et al., 1993) as práticas do DFM incentivam a minimização de peças integrantes através do aumento da complexidade geométrica das mesmas. Apesar do objetivo ser a redução dos custos da produção, ao ser necessário mais tempo para reproduzir todas essas características, o Lead Time de desenvolvimento do produto acaba por ser maior.

Para (Shad Dowlatshahi, 1994) o DFM envolve a redução do número de componentes, a funcionalidade, fiabilidade e durabilidade do produto bem como a análise de custos, equilibrando o custo com a qualidade das peças e, conseqüentemente, do produto. Assim, torna-se indispensável o conhecimento de todos os processos de fabrico e dos materiais disponíveis, bem como o custo associado, e as tolerâncias geométricas das peças. Como os custos associados à montagem representam cerca de dois terços dos custos total de produção, é importante que decisões como a disposição e a orientação das peças sejam tomadas na fase inicial do design.

Para além do exposto anteriormente, o autor defende que se deve promover a normalização e a modularização dos componentes e das peças, que se deve reduzir o número de elementos de ligação e ainda que o design torne mais fácil a montagem das mesmas. (Shad Dowlatshahi, 1994) defende ainda que, quando se pretende que o design seja montado automaticamente, as peças sejam o mais simétricas possível.

Segundo (Mital, 1995), o DFM prioriza processos automatizados e é neste sentido que defende que atividades relacionadas com o fabrico, desde o manuseamento das matérias-primas ao transporte, devem ser realizadas por máquinas. Ainda assim, acredita que deve ser considerado o fator humano nos processos produtivos, como instrumentos de controlo e de inovação. Desta forma, diz ser necessária a ponderação de que atividades devem ser desempenhadas manualmente ou automaticamente, tendo em conta fatores técnicos e económicos.

O autor (S. Dowlatshahi, 1995), associa vários princípios ao DFM, atendendo à união e fixação dos componentes. Primeiramente, relativamente à união dos componentes, afirma que se deve assegurar a existência de uma base, onde as peças e os componentes possam ser devidamente montados, e que os produtos devem ser concebidos de forma a não ser preciso desfazer ou rodar ligações já estabelecidas para finalizar o processo de montagem. No que diz respeito à fixação entre componentes, o autor assinala que se deve evitar ligações permanentes, enriquecendo o design de peças que encaixem per si ou de juntas adesivas, sendo estas últimas mais fáceis de produzir e com um custo menor. Por outro lado, o design deve ser contemplado de modo a que as ligações tenham área suficiente de contacto, a fim de prevenir falhas. Por fim, (S. Dowlatshahi, 1995) defende que o design deve tender a minimizar o número de componentes do produto e que as peças devem ser concebidas de forma a serem o mais simétricas possível, para que possam ser integradas e montadas em mais do que uma direção.

Conforme (Lenau & Alting, 1996), é crucial a seleção de materiais e processos de fabrico, a qual pode ser feita de seis maneiras diferentes como podemos constatar na figura seguinte.

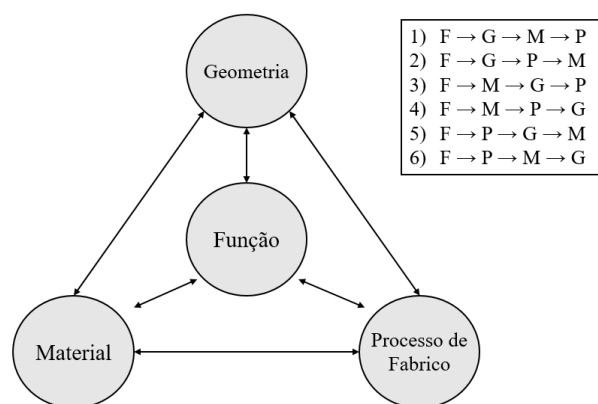


Figura 3.5. Adaptada de (Lenau & Alting, 1996) “Selection of material, manufacturing process, function and shape is closely interrelated”.

Resultam da combinação de diferentes sequências, que compreendem a função, a forma, o material e o processo de fabrico. Assim, o processo de fabrico é escolhido em função das características anteriormente definidas, ou por outro lado, as funções e as características são determinadas pelo processo de fabrico disponível.

(Liou & Jang, 1997) acredita que para o sucesso do DFM, é necessário recorrer a softwares de simulação. Defende que seja utilizado um software na fase inicial de conceção do processo, de modo a prever os resultados obtidos de acordo com o processo de fabrico escolhido, sem que haja a produção propriamente dita, e de modo a analisar as tensões resultantes do processo de fabrico e de modo a conseguir garantir os acabamentos desejados e a qualidade do produto pretendida. Também defende a utilização de ferramentas analíticas e a ponderação de antecedentes teóricos, para a otimização quer do design do produto quer do processo de fabrico.

De outro ponto de vista, o autor (Chen et al., 1998) reconhece a “manufaturabilidade” como um aspeto fulcral, que deve ser tido em conta desde o início da conceção do design. Propõe a utilização de métodos de avaliação quantitativa de forma a avaliar a manufaturabilidade dos designs, bem como a utilização de softwares de apoio que permitam orientar a conceção do produto e corrigir os designs propostos. No que concerne à montagem, (Chen et al., 1998) diz que devem ser adotadas teorias específicas,

de forma a prever o efeito de certas características na montagem e que se deve evitar que os requisitos funcionais entrem em conflito.

Tal como outros autores já referiram, também (Park & Baik, 1999) acreditam que o planeamento e as especificidades dos processos de fabrico devem ser ponderados durante a fase inicial, a conceção do design, de modo a que não seja preciso realizar ajustes e que não apareçam problemas com a produção dos mesmos. Desta forma também não surgem custos associados.

No que concerne ao processo de design e dada a sua complexidade, estes autores defendem que esta tarefa não deve ser desempenhada por uma só pessoa, e que é necessária a cooperação de diferentes entidades, de forma a tornar o problema menos complexo. Sugerem um sistema de inteligência artificial distribuída para solucionar o que foi dito anteriormente.

Com uma opinião mais abrangente, (Kuo et al., 2001) defende que toda a gente deve estar envolvida no processo de integração do DFM, desde o operário até aos responsáveis pela conceção do design, aos responsáveis pelo processo de fabrico, de montagem e até da expedição dos produtos acabados. A par desta orientação, devem ser desenvolvidos novos sistemas de gestão que repartam a responsabilidade de tomada de decisões, e que definam objetivos comuns para todos os operários.

Estes sistemas devem conseguir identificar especificações ao longo do ciclo de vida do produto, de modo a monitorizar todo o processo de conceção. Além disso, também são necessárias metodologias que permitam armazenar alternativas de design, de forma a recuperar e assimilar requisitos funcionais estabelecidos anteriormente, tal como matérias primas, características geométricas e processos de fabrico, auxiliando na mensuração da qualidade e eficiência do design.

Segundo (O'Driscoll, 2002) um método eficaz para a implementação do DFM deve compreender duas etapas: a reestruturação do processo de desenvolvimento do design, a qual denomina PDP (Product Design Process), e a criação e implementação de equipas estruturadas de DFM.

Em relação à primeira etapa, diz que devem ser introduzidos pontos de controlo nas fases de definição, desenvolvimento e validação do PDP, os quais devem ser

baseados nas características e funcionalidades que se pretendam encontrar no novo produto.

Através destes pontos de controlo, as equipas responsáveis pelo DFM, cuja criação o autor defende, conseguem analisar e impedir quaisquer incoerências que prejudiquem a aprovação do design ou a transição para o fabrico. Estas equipas devem incluir representantes dos departamentos de Research & Development e de Produção, de modo a aumentar o conhecimento relativo ao produto e ao processo. O autor dá o exemplo da aquisição de uma base de dados para armazenar produtos e processos que já tenham sido estabelecidos, e assim estabelecer métricas para avaliar designs futuros.

Tal como (Chen et al., 1998), o autor (Ong et al., 2003) também se centra na questão da manufaturabilidade. Sugere a criação de índices relativos à manufaturabilidade, que abordem e priorizem detalhes relacionados com a conceção e com a produção, ao invés de problemas relacionados com o custo e com o tempo de produção.

(Howard & Lewis, 2003) defende que é na fase inicial da conceção do design que se deve empregar mais esforço e despende mais tempo, de forma a garantir que o design apresente poucas falhas. O autor diz que 70% do custo de produção é diretamente influenciado pelas decisões tomadas na fase inicial.

Aquando da seleção dos materiais e processos de fabrico, devem ser tidas em conta algumas informações:

- O ciclo de vida do produto
- Os custos de produção que se podem suportar
- A complexidade geométrica dos componentes
- Questões relacionadas com os fatores de serviço e com o ambiente
- A fiabilidade e qualidade

Aconselha a utilização de softwares de engenharia, Computer Aided Engineering (CAE), para suportar o desenvolvimento de novos designs: Computer Aided Manufacturing (CAM), Computer Aided Design (CAD).

Depois de observadas todas as orientações dadas pelos autores, vemos que há algumas partilhadas pela maioria, as quais vamos destacar na figura seguinte:

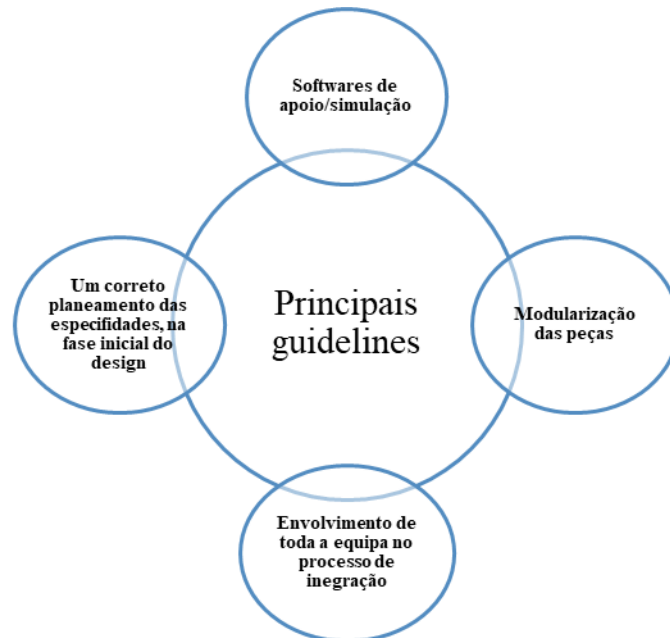


Figura 3.6. Principais orientações para uma correta implementação do DFM.

3.5. Vantagens da aplicação do Design for Manufacturing

Relativamente às vantagens aliadas a esta prática assinala-se o aumento da capacidade produtiva, a redução de desperdícios e do custo total do ciclo de vida do produto, um aumento do controlo de qualidade prevenindo o aparecimento de defeitos e a otimização do design e do processo de fabrico, resultando em produtos menos complexos e designs mais eficientes.

Vejamos o que cada autor atribui como vantagens a este conceito.

De acordo com (Shad Dowlatsahi, 1994) as vantagens inerentes à aplicação do DFM passa pela redução na mão-de-obra, no material e no espaço necessário para as operações. A par disso, afirma que com a redução do número de partes, a capacidade produtiva irá aumentar e o número de fornecedores irá diminuir. Pela aplicação do DFM

permite-nos um controlo de qualidade, prevenindo defeitos, desperdício de material e peças com qualidade insuficiente. Baseado na obra anterior, (S. Dowlatshahi, 1995), reforça a ideia de que pela aplicação do DFM verificar-se-á um aumento da produtividade e da eficiência global do sistema, bem como do rendimento do sistema produtivo e que, por outro lado, o design de peças simétricas irá reduzir a necessidade de manuseamento e de reorientação da mesma, bem como a necessidade de sensores.

Consoante (Liou & Jang, 1997) através da integração de softwares de simulação no DFM, é possível produzir produtos de qualidade com acabamentos superficiais desejados, a baixo custo e com alta produtividade. Também permite um controlo da qualidade do produto, e prever o efeito da escolha do processo de fabrico na qualidade do produto, resultando na otimização do design e do processo de fabrico.

Para (Chen et al., 1998), a principal vantagem assenta no custo total associado ao produto e o tempo de desenvolvimento do produto que irá reduzir significativamente. (Philpott et al., 1996) reconhece que os engenheiros responsáveis pelo design irão ser capazes de avaliar e comparar rapidamente os custos de produção, à medida que o design é concebido.

Os autores (Park & Baik, 1999) enumeram vários benefícios pela utilização do DFM. Assim sendo, pela integração do DFM é possível a correlação entre o design, o planeamento do processo de fabrico e os objetivos do fabrico, o que irá resultar em designs mais eficientes, com menor necessidade de reajustes, menos conflitos na produção, e então custos de produção mais baixos. Defendem ainda que ao adotar o DFM é possível não só reunir as equipas de design com as equipas responsáveis pela produção, mas também com as responsáveis pelo marketing, compras, recursos humanos, e até pela gestão, levando à diminuição do tempo de fabrico, e simultaneamente ao aumento da qualidade do produto, reduzindo os custos de produção.

Com a aplicação do DFM, e de acordo com (Kuo et al., 2001), obtêm-se produtos menos complexos, os quais serão concebidos efetivamente num curto espaço de tempo, conseguindo uma transição rápida para o fabrico, satisfazendo as necessidades dos

consumidores, reduzindo o custo total do ciclo de vida do produto, assegurando a sua qualidade e fiabilidade.

De outra perspectiva, (O'Driscoll, 2002) indica que uma das preocupações mais importantes da indústria é estabelecer um balanço entre os custos das exigências dos consumidores, o que ele está disposto a pagar e o preço de produtos concorrentes, sendo através da implementação do DFM que se obtém a melhor solução de design, com um preço competitivo e com a qualidade desejada a um custo menor. O autor considera que com uma implementação eficiente do DFM é possível reduzir o tempo de montagem até 61%, reduzir o número de operações de montagem até 53%, reduzir cerca de 68 % de conflitos na montagem e ainda reduzir o Time-to-Market até 50%.

Para o autor (Ong et al., 2003), uma das principais vantagens é ser possível comparar as diversas opções de design, e com isto conseguirmos escolher a melhor solução de design tendo em conta o seu propósito. Isto vem ajudar quando estamos perante um clima de inexperiência no que toca à conceção de novos designs, uma vez que torna possível interpretar designs do ponto de vista do fabrico. O autor partilha a opinião de que o desenvolvimento e a aplicação de softwares de DFM garante uma melhoria na qualidade do produto, assim como reduções nos custos de produção.

Os autores (Howard & Lewis, 2003) acreditam ser possível uma comunicação e uma reflexão completa e eficaz entre as partes inerentes ao DFM assegurando, deste modo, que todos os aspetos relacionados com a produção são considerados bem como a diminuição do tempo que as equipas de DFM gastam para concretizar as exigências dos consumidores. A ser possível, resulta na redução dos custos de produção na ordem dos 50 %.

Do artigo “Design for Manufacturability and Time-to-Market” do autor (Youssef, 1994), retirou-se a tabela 3.4. onde cada empresa identifica os benefícios da utilização do DFM.

Tabela 3.4. Adaptada de (Youssef, 1994) “Benefits of DFM”.

Empresa	Benefícios
AT&T	<p>Qualidade</p> <ul style="list-style-type: none"> • Redução da variedade dos processos de deposição de Polissilício; • Redução de 50 % dos defeitos superficiais. <p>Ciclo de conceção</p> <ul style="list-style-type: none"> • Redução do tempo de processamento necessário ao sistema de comutação eletrónica (5ESS).
Boeing	<p>Qualidade</p> <ul style="list-style-type: none"> • As alterações por desenho reduzem de 15 para 1, através do trabalho de equipa e da utilização de softwares de apoio; • A relação entre as horas de inspeção/produção é reduzida de 1:15 para 1:50. <p>Ciclo de conceção</p> <ul style="list-style-type: none"> • O departamento de sistemas balísticos reduziu os prazos de entrega de peças e materiais em 30%; • A análise de um design específico passou de ser realizado por 3 a 4 engenheiros em duas semanas, para 4 minutos por apenas um engenheiro.
John Deere	<p>Qualidade</p> <ul style="list-style-type: none"> • O número de supervisores reduz em 66%, por salientar os processos de controlo e correlacionar o design com os processos de fabrico. <p>Ciclo de conceção:</p> <ul style="list-style-type: none"> • O período de desenvolvimento e produção de equipamentos é reduzido em 60%.

ITT	<p>Qualidade</p> <ul style="list-style-type: none"> • Através do design e de processos de fabrico eficientes, resulta na diminuição de x, devido aos componentes apresentarem menos falhas e na poupança de nos processos de maquinação e soldadura; • Melhorias nos componentes de alimentação de energia. <p>Ciclo de conceção</p> <ul style="list-style-type: none"> • O período de conceção, bem como de transição para a produção de sistemas EMC diminui em 33%; • O tempo de produção de cabos e fios elétricos reduz em 10%.
McDonnell Douglas	<p>Qualidade</p> <ul style="list-style-type: none"> • Os custos de reparação reduzem em 29%; • Os custos das sucatas reduzem em 58%; • Os custos das não-conformidades reduzem em 38%; • Os defeitos do processo de soldadura reduzem em 70%. <p>Ciclo de conceção</p> <ul style="list-style-type: none"> • O tempo necessário para se realizarem alterações no design passou de 44 semanas para 8 horas; • O período de produção reduz em 25% pelo uso de softwares CALS (Computer Aided Acquisition Logistics Support)

Depois de lidas todas as vantagens enumeradas pelos autores, e depois de seleccionadas as principais vantagens, elaborou-se a tabela 3.5.

Tabela 3.5. Principais vantagens do DFM, apontadas pelos diferentes autores.

Autores	Aumento da capacidade produtiva	Aumento do controlo de qualidade	Otimização do Design e do processo de fabrico	Redução do tempo de desenvolvimento do produto	Redução dos custos de produção	Redução dos desperdícios
(Shad Dowlatshahi, 1994)	X	X				X
(Philpott et al., 1996)					X	
(Liou & Jang, 1997)	X	X	X		X	
(Chen et al., 1998)				X	X	
(Park & Baik, 1999)		X	X	X	X	
(Kuo et al., 2001)		X		X	X	
(O'Driscoll, 2002)		X	X		X	
(Ong et al., 2003)		X	X		X	
(Howard & Lewis, 2003)				X	X	
Total (nº)	2	6	4	4	8	1
Total (%)	22,22%	66,66%	44,44%	44,44%	88,88%	11,11%

3.6. Barreiras à Implementação

Apesar de ao DFM estarem associadas inúmeras vantagens temos, por outro lado, algumas desvantagens principalmente associadas à sua implementação. As mais relevantes foram o aumento do ciclo de concepção do design, a falta de comunicação e questões relacionadas com o custo, flexibilidade e manutenção.

(X. Chu & Holm, 1994) reconhece que para uma implementação eficaz do DFM são necessários a mensuração e o controlo da “manufaturabilidade”, o que não é fácil de avaliar, uma vez que é considerado um conceito relativo-comparativo, que compreende diversos critérios, os quais ainda não foram devidamente definidos, sendo os mais usuais relacionados com os custos. Por outro lado, aponta que os métodos utilizados na avaliação da “manufaturabilidade” baseiam-se no processo de fabrico, o que não é muito correto para a sua estimativa na fase inicial de concepção.

(Mital, 1995) indica que ao todas as atividades relacionadas com o fabrico serem totalmente automatizadas, não permite que sejam feitas grandes alterações no design do produto e que o custo dessas operações é mais elevado do que numa abordagem manual ou híbrida. Para além destes problemas relacionados com a flexibilidade e do custo, questões como a funcionalidade, manutenção, a qualidade, a fiabilidade e a montagem do produto, também não são consideradas.

Conforme (Philpott et al., 1996) a maioria dos engenheiros responsáveis pela concepção do design, por vezes, tem pouca informação ou mesmo conhecimento sobre o custo dos materiais a utilizar, bem como dos processos implícitos ao design final. Além disso, os métodos utilizados para estimar o custo associado à produção, atuam tradicionalmente na fase final da concepção do design, o que irá prolongar o ciclo de desenvolvimento do produto, podendo ter várias implicações relacionadas com o custo. Por fim, diferentes experiências e culturas técnicas também irão dificultar o design cooperativo.

Outra barreira evidenciada por (Lenau & Alting, 1996) passa por grande parte dos estudos do DFM ter como foco principal a análise da produtividade, deixando de

parte a análise das atividades de síntese, como a seleção do material e do processo, o que traz graves consequências relacionadas com o custo e sustentabilidade do produto. A par disto, a falta de informação relativa aos custos e às características geométricas dos componentes, ao serem um pré-requisito para uma seleção eficiente do material e do processo de fabrico, torna impossível a implementação eficiente do DFM.

Para (Chen et al., 1998) a principal barreira à implementação consiste na comunicação. A falta dela entre as diferentes partes envolvidas no desenvolvimento do design, e por vezes as informações previamente estabelecidas, utilizadas para a atribuição de características, revelam-se de difícil interpretação, impedindo a implementação eficiente do DFM. Diz ainda que é uma tarefa árdua considerar todos os aspetos relacionados com o fabrico na fase inicial do desenvolvimento do design, isto porque: o processo de design por si próprio é muito complexo; existe muita e variada informação sobre o ciclo produtivo; e devido à separação entre as atividades produtivas e atividades de desenvolvimento.

Consoante (Villeneuve & Tassel, 1998) a principal limitação é associar as restrições impostas pelo processo de fabrico ao desenvolvimento do design, e como elas vão afetar o mesmo.

Aquando a fase final do desenvolvimento do produto, algumas dimensões bem como os acabamentos das superfícies são frequentemente revistas o que faz com que, na opinião de (Ji & Lau, 1999), ao serem alteradas no design do produto, os aspetos relacionados com fabrico também terão de ser alterados, aumentando o ciclo de conceção do design, que conseqüentemente impede que sejam tomadas decisões rápidas e eficientes.

Os sistemas presentes no desenvolvimento do design assentam em domínios restritos e diferentes, com conhecimentos especializados em cada um, com formas distintas de apresentar conhecimentos e estratégias, o que de acordo com (Park & Baik, 1999) dificulta a interação entre eles.

Inerente a todo o processo de design, está associado um esforço adicional tal como um elevado grau de comprometimento. (Kuo et al., 2001) considera que por ser

necessária a colaboração de entidades distintas durante o processo de conceção, pode gerar mau ambiente entre elas, uma vez que grande parte das propostas iniciais de design não são as melhores, conduzindo a um aumento do tempo de desenvolvimento do produto.

Para (O'Driscoll, 2002) o sucesso do DFM está diretamente relacionado com o processo de desenvolvimento do design do produto, PDP, e com a criação de equipas especializadas no DFM. Desta forma é necessário a reestruturação do PDP, um processo complexo e demorado, que conseqüentemente irá ser refletido num acréscimo dos custos de conceção. Já a criação das equipas especializadas envolve a participação de vários departamentos, o que irá implicar um esforço adicional, bem como um aumento das responsabilidades face a uma diminuição do tempo disponível para desempenhar as suas funções anteriores.

O autor (Ong et al., 2003) divide os princípios do DFM em duas categorias: natureza qualitativa e quantitativa. Os de origem qualitativa avaliam a viabilidade do projeto, baseados em regras de design já estabelecidas, porém não permitem comparar índices de manufaturabilidade. Os de natureza quantitativa avaliam a manufaturabilidade do processo produtivo, através de estimativas do custo do material, e do custo das máquinas utilizadas, por exemplo. Não obstante, estas estimativas para conseguirem ser fiáveis precisam de mais informações relativas aos processos de fabrico, aos detalhes da produção, e para tal acontecer é necessário despende muito tempo.

A escolha dos materiais e dos processos de fabrico são, grande parte das vezes, tidas em função de experiências anteriores e da familiaridade que as equipas de design têm com os materiais e com os processos. O autor (Howard & Lewis, 2003) acredita que assim se restringe a seleção e impede que aconteçam melhorias significativas no processo produtivo. Apesar de os softwares de apoio ao DFM serem vantajosos, acarretam um custo elevado, têm uma curva de aprendizagem limitada, e os resultados obtidos são muito específicos, o que não ajuda à tomada de decisões mais abrangentes.

Depois de identificadas todas as limitações associadas à sua implementação, conclui-se que o maior desafio passa por ultrapassar as barreiras organizacionais e por desconstruir a resistência à mudança, um ambiente muito presente nas empresas.

Contudo, não existem dúvidas de que o DFM pode, e irá desempenhar um papel crucial nas atuais indústrias transformadoras.

Percebe-se que as desvantagens da aplicação deste conceito não são consensuais a todos os autores e que, muitos deles, enumeram mais obstáculos do que propriamente desvantagens.

Neste sentido, procurou-se obter uma análise dentro das limitações e desvantagens assinaladas pelos autores, resultando na tabela 3.6.

Tabela 3.6. Principais desvantagens do DFM, apontadas pelos diferentes autores.

Autores	Inflexibilidade	Dificuldade em mensurar o controlo da manufacturabilidade	Falta de informação dos custos	Aumento do ciclo de desenvolvimento do produto	Aumento dos custos de conceção	Dificuldade em analisar e seleccionar os materiais na fase inicial do design	Falta de comunicação	Custo elevado dos Softwares
(X. Chu & Holm, 1994)		X						
(Mital, 1995)	X							
(Philpott et al., 1996)			X	X				
(Lenau & Alting, 1996)			X			X		
(Chen et al., 1998)						X	X	
(Ji & Lau, 1999)				X				
(Park & Baik, 1999)						X		
(Kuo et al., 2001)				X				
(O'Driscoll, 2002)				X	X			
(Ong et al., 2003)			X	X		X		
(Howard & Lewis, 2003)	X							X
Total (n°)	2	1	3	5	1	4	1	1
Total (%)	18,18%	9,09%	27,27%	45,45%	9,09%	36,36%	9,09%	9,09%

3.7. Análise Económica

De acordo com (Ulrich et al., 1993), a aplicação do DFM verifica-se na integração de determinadas características geométricas numa única peça, o que se traduz num aumento de tempo para reunir as ferramentas necessárias para as conseguir criar.

Assim, o tamanho e a complexidade geométrica de uma peça são fatores preponderantes na determinação do tempo devido para obter as ferramentas associadas, sendo que uma peça maior e mais complexa leva, automaticamente, a um maior dispêndio de tempo que por sua vez aumenta o lead time do produto.

Este aumento de tempo frequentemente verificado na sua aplicação, pode acarretar grandes consequências económicas. Vejamos:

1- Diminuição do valor das vendas. Com o aumento do prazo de entrega, as vendas do produto são registadas mais tarde no tempo, resultando na diminuição do valor líquido das vendas.

2- Alterações de preço. Em muitas indústrias, o preço obtido para um produto é afetado proporcionalmente pelo tempo que este leva a ser produzido.

3- Perda de clientes. O volume de vendas é influenciado pelo lead time à entrada no mercado. Assim, quando ocorre atraso na introdução do produto no mercado, verifica-se perda de receitas para a empresa e perda de clientes para o mercado concorrente.

4- Aumento dos Custos na fase de Desenvolvimento. A par do aumento do tempo de execução do produto dá-se, também, um aumento do trabalho por parte da equipa envolvida, acrescentado mais custos inerentes ao desenvolvimento do produto.

Consoante (Ulrich et al., 1993), se pudermos estimar o tempo de execução associado a cada design, torna-se mais explícito o custo de oportunidade associado ao DFM. Através desta análise podemos facilitar a tomada de decisão aquando a conceção do produto e perceber para uma situação particular, se o uso do DFM é conveniente.

É imprescindível ter um procedimento capaz de estimar o impacto económico do DFM, o qual obedeça aos seguintes pontos:

Estime o tempo de desenvolvimento do produto a partir de estimativas dos tempos de desenvolvimento das ferramentas individuais das peças de uma montagem.

Estime a magnitude e o tempo de $c(f)$, $F(t)$, $S(I)$, e $D(I)$ com base nos atributos das peças e montagem, e sobre a estimativa do lead time.

Estime a magnitude de tempo de $p(f)$ e $Q(f)$ com base na influência do lead time na resposta do mercado

Utilize uma estimativa para r , calcular k .

$$k = \int_0^{\infty} e^{-rt} (Q(t)(p(t) - c(t)) - F(t) - S(t) - D(t)) dt$$

4. EXTENSÕES AO CONCEITO

4.1. Design For Manufacturing VS Design For Assembly

Enquanto o DFM aponta que o design deve ser concebido de forma a facilitar a produção de um conjunto de peças, o Design for Assembly, DFA, propõe o desenvolvimento do design de modo a tornar a montagem mais simples e eficiente. Este conceito foi apresentado inicialmente por (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2011) durante a elaboração de um conjunto de softwares de apoio ao design para a montagem automática e manual, com intuito de minimizar o número de peças a serem montadas, bem como de elementos de fixação e assim reduzir o tempo de montagem, os inventários, e o custo total dos produtos. Posteriormente, houve a necessidade de estender este conceito e de contemplar as restrições e as características do processo de fabrico no design do produto, ao qual se chamou DFM.

(Shad Dowlatshahi, 1994) mostra a crescente importância do Design for Assembly, devido aos custos de montagem representarem mais de dois terços dos custos totais de produção, e pela crescente preocupação por parte das empresas de tornarem os processos de montagem mais eficientes, assumindo que avaliação da eficiência do design deve ser feita durante a fase de montagem do mesmo.

Assinala, também, a importância dos processos de montagem automáticos e manuais, onde acredita que deve ser estabelecido um equilíbrio entre a facilidade e o custo de montagem, na fase inicial da concepção do design.

À semelhança do autor anterior, também (Boothroyd, 1994) estudou a importância dos diferentes processos de montagem. Considera que para a implementação de processos automatizados é necessária uma revisão dos designs estabelecidos, enquanto nos processos manuais isso raramente acontece. Ao sugerir a revisão, a utilização de processos automatizados não se revela tão vantajosa, favorecendo a escolha dos processos manuais. Assim é possível a simplificação dos produtos e a redução dos custos totais de produção com o design orientado para processos manuais.

Por fim, (Boothroyd, 1994) considera que para serem tomadas decisões acertadas na fase inicial do desenvolvimento do design, do ponto de vista da montagem, devem ter-se em consideração os seguintes aspetos: análise económica do processo de

montagem; o DFM; a facilidade do processo de montagem; tipo de montagem; a taxa de produção; e controlo da qualidade.

De uma forma global, a generalidade dos métodos sistemáticos do DFA tentam mensurar a dificuldade associada ao processo de montagem.

Para (Vallhagen et al., 2013) os conceitos de DFM e DFA devem ser aplicados em conjunto, e da sua combinação resulta o DFMA (DFM+DFA). Apesar das suas abordagens terem propósitos diferentes, elas partilham os mesmos conceitos, bem como informações, restrições e características associadas à produção eficiente de produtos. Posto isto, pela aplicação do DFMA é possível estabelecer uma abordagem mais abrangente para a resolução de problemas, e dessa forma simplificar o processo de montagem, e seleccionar os processos de fabrico e os materiais, que permitam obter uma solução de design eficiente, custos totais de produção menores e um aumento da qualidade do produto.

4.2. Design for Disassembly

De acordo com (Kuo et al., 2001) nos últimos anos a preocupação das indústrias com a reciclagem tem aumentado, devido a grande parte dos produtos, quando deixam de ter finalidade, serem postos de lado. Ao mesmo tempo, o crescimento da consciência ambiental leva a que os consumidores optem por produtos que sejam amigos do ambiente e que os governos estabeleçam medidas que obriguem a rotular os produtos com informações relativas à reciclagem dos mesmos.

Por esta razão surge o conceito Design for Disassembly (DFD), o qual indica que se deve ter em conta a desmontagem dos produtos usados de forma a tornar a reciclagem economicamente viável. Assim, os processos de desmontagem e as peças que podem ser recicladas devem ser tidos em conta na fase de desenvolvimento do design. Segundo o autor, existem dois métodos para a desmontagem: a montagem inversa e força bruta.

Contudo, a desmontagem dos produtos apresenta alguns problemas que impedem a sua aplicação e que fazem com que muitas indústrias os desprezem durante a fase de desenvolvimento do design. Uma das principais dificuldades é a definição da sequência de desmontagem. Uma das abordagens mais simples de entender esta sequência é: desfazer as ligações entre a peça e os seus anexos; encontrar a peça que pode ser desmontada de seguida; e voltar a desmontar as peças nos seus constituintes. Outra

dificuldade passa por reunir toda a informação relacionada com a desmontagem, uma vez que podem ter ocorrido modificações no produto resultantes da reparação e do desgaste, e por outro lado, grande parte das indústrias na fase de design, não presta atenção a uma futura desmontagem.

Dentro deste conceito, (Kuo et al., 2001), indica o Design for Recyclability (DFR) que tem como objetivo maximizar a utilização de matérias-primas recicláveis. Como é impossível fisicamente e economicamente reciclar totalmente um produto, foi necessário estabelecer uma hierarquia relativa à utilidade das peças que irão ser desmontadas, tal como se pode constatar na figura seguinte.

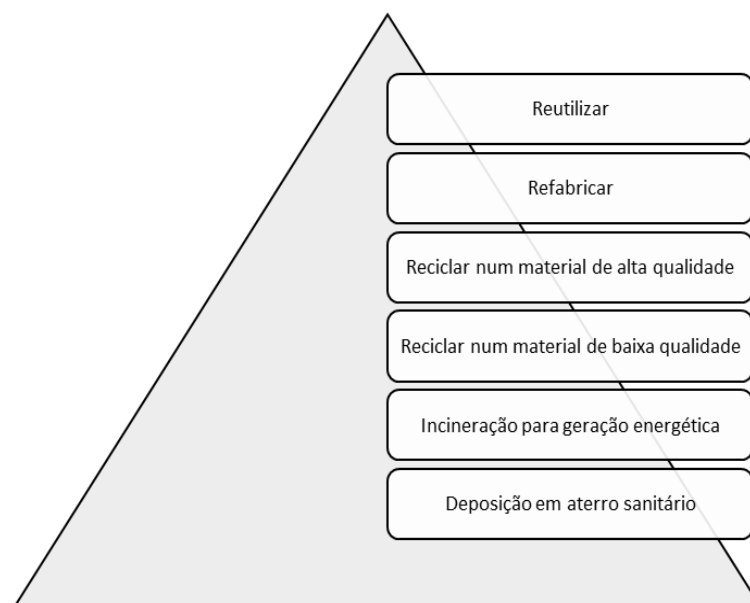


Figura 4.1. Hierarquia de ações a adotar segundo o DFR (Kuo et al., 2001).

No âmbito do DFR existem alguns problemas relacionados com o custo dos processos de reciclagem e de desmontagem, e também com o intervalo de tempo que existe entre o momento do desenvolvimento do produto e o fim do seu ciclo de vida. Para colmatar estas falhas, surgem novos e avançados processos de reciclagem e de refabricação.

Como solução, deve-se remover primeiro as peças mais valiosas e maximizar o rendimento das operações de desmontagem. Por outro lado, para o DFR ser eficiente devem existir tecnologias economicamente viáveis que permitam identificar os materiais utilizados, bem como as proporções.

No conceito de Design for Disassembly, o autor (Battaia et al., 2018) afirma que durante o processo de desmontagem não é considerada a qualidade, a quantidade, nem a fiabilidade das peças, ao contrário do que acontece durante a montagem.

O processo de desmontagem pode ser realizado parcialmente e por vezes, é deixado incompleto, devido a problemas operacionais, como conexões irreversíveis, e a fatores económicos.

Assim, é necessário planear a desmontagem do produto na fase de desenvolvimento do design, e conceber produtos com elevada percentagem de reutilização e reciclagem. Desse modo, e de acordo com o DFD, o design deve ser concebido de forma a ser facilmente montado e desmontado, apesar de nem sempre ser possível. Deve evitar-se ligações permanentes, e promover a conceção modular, a fim de facilitar o manuseamento, minimizar o desperdício de matéria-prima e facilitar o processo de desmontagem. Assim (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2011) e outros autores, propõe abordagens para a conceção do design com o objetivo de reduzir os custos de montagem e melhorar a sustentabilidade global do produto através da sua desmontagem, e ferramentas que permitam avaliar a complexidade da montagem e da desmontagem durante o ciclo de vida do produto.

4.3. Design for Environment

O autor (Kuo et al., 2001) acrescenta outra extensão ao conceito, o Design for Environment (DFE) que consiste “em considerar sistematicamente, durante o desenvolvimento de novos produtos e processos, problemas relacionados com a segurança e saúde ambiental ao longo do ciclo de vida do produto”, tendo como objetivos: minimizar a utilização de matérias-primas não renováveis; a gestão eficiente dos recursos renováveis; e diminuir a poluição do ambiente. Para que o DFE seja eficiente, são necessárias regras sobre o impacto ambiental, softwares de armazenamento e gestão de dados, bem como de otimização do design e de avaliação económica.

De acordo com (Herrmann et al., 2004) foi necessário integrar o DFE na gestão de cadeias de abastecimento, adotando a norma ISO14000 relativa à prevenção da poluição e à gestão ambiental, satisfazendo, deste modo, as expectativas dos clientes relativamente à sustentabilidade dos produtos. Assim, diversas empresas integram na conceção de novos designs, bem como nos seus modelos de negócios, diretrizes impostas pelo DFM e pelo DFE. Entre estas ações destacam-se: o Supplier Scening na AT&T,

Training Supplier na General Motors, Supplier ISO14000 Registration na Ford, e 3M's Pollution Prevention Pays Program e Xerox's Asset Recycle Management Program na Xerox.

Por fim, os objetivos do DFM e do DFE estão diretamente relacionados, uma vez que pela redução do custo e do tempo e pela utilização eficiente de materiais no DFM, é possível reduzir a energia utilizada no processo de fabrico, permitindo uma melhor gestão de resíduos e de matérias-primas.

Para (Battaia et al., 2018), o DFE surge como solução à incompatibilidade entre a funcionalidade do produto e o impacto ambiental na fase de conceção do design, sendo crucial reunir e estruturar informações necessárias às ferramentas do DFE, através da análise de produtos e designs de produtos de referência.

Contudo, para a implementação do DFE ser eficiente é necessário um esforço acrescido por todas equipas envolvidas na conceção e na produção, e estudar metodologias que permitam avaliar ecologicamente o design de produtos.

5. CONCLUSÕES

Este estudo ajudou a realçar a necessidade de implementar DFM em qualquer empresa que fabrique os seus produtos, desde a conceção. São notórias as várias fontes que convergem na ideia de que as práticas de DFM, apesar de poderem ter algumas barreiras, principalmente a nível do tempo de produção, têm inúmeras vantagens, como o aumento da capacidade produtiva e da qualidade, as reduções de custos e desperdícios e a própria otimização do design à cabeça.

Pela análise dos 46 documentos científicos analisados concluímos que em termos de vantagens, os autores consideram que a redução dos custos de produção é a principal, com 88% de menções, seguida do aumento do controlo de qualidade, com 66%. Quanto à principal barreira à implementação de DFM, o aumento do tempo de produção destaca-se, sendo mencionado por 45% dos autores.

Também resultaram do estudo, os confrontos entre conceitos derivados do DFM, particularmente DFA, DFD e DFE, fazendo com que o leitor tenha uma melhor perceção de qual o processo mais adequado para satisfazer as suas necessidades.

Como trabalhos futuros, surgem oportunidades de testar as práticas enunciadas em empresas que tenham um processo de produção sem DFM, e verificar se os dados, recolhidos aquando da observação destes case-studies, corroboram as várias perspetivas teóricas que foram analisadas ao longo deste documento.

Por último, pode-se ressaltar ainda que o método usado para análise dos dados recolhidos dos documentos pode e deve ser usado futuramente, em trabalhos semelhantes, de forma a facilitar o trabalho do investigador e do próprio leitor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Battaia, O., Dolgui, A., Heragu, S. S., Meerkov, S. M., & Tiwari, M. K. (2018). Design for manufacturing and assembly/disassembly: joint design of products and production systems. *International Journal of Production Research*, 56(24), 7181–7189. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1549795>
- Boothroyd, G. (1994). Product design for manufacture and assembly. *Computer-Aided Design*, 26(7), 505–520. [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(94\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0010-4485(94)90082-5)
- Chen, K. H., Chen, S. J., Lin, L., & Changchien, S. W. (1998). Integrated graphical user interface (GUI) for concurrent engineering design of mechanical parts. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 11(1–2), 91–112. [https://doi.org/10.1016/S0951-5240\(98\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0951-5240(98)00016-0)
- Chu, W. S., Kim, M. S., Jang, K. H., Song, J. H., Rodrigue, H., Chun, D. M., Cho, Y. T., Ko, S. H., Cho, K. J., Cha, S. W., Min, S., Jeong, S. H., Jeong, H., Lee, C. M., Chu, C. N., & Ahn, S. H. (2016). From design for manufacturing (DFM) to manufacturing for design (MFD) via hybrid manufacturing and smart factory: A review and perspective of paradigm shift. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 3(2), 209–222. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0028-0>
- Chu, X., & Holm, H. (1994). Product manufacturability control for concurrent engineering. *Computers in Industry*, 24(1), 29–38. [https://doi.org/10.1016/0166-3615\(94\)90006-X](https://doi.org/10.1016/0166-3615(94)90006-X)
- Curran, R., Gomis, G., Castagne, S., Butterfield, J., Edgar, T., Higgins, C., & McKeever, C. (2007). Integrated digital design for manufacture for reduced life cycle cost. *International Journal of Production Economics*, 109(1–2), 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.11.010>
- de Oliveira Leite, W., Carlos Campos Rubio, J., Gilberto Duduch, J., & de Almeida, P. E. M. (2015). Correcting geometric deviations of CNC Machine-Tools: An approach with Artificial Neural Networks. *Applied Soft Computing Journal*, 36, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.07.014>
- Dowlatshahi, S. (1995). An integrated manufacturing system design: an applied approach.

- International Journal of Production Economics*, 42(2), 187–199.
[https://doi.org/10.1016/0925-5273\(95\)00179-4](https://doi.org/10.1016/0925-5273(95)00179-4)
- Dowlatshahi, Shad. (1994). A comparison of approaches to concurrent engineering. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 9(2), 106–113.
<https://doi.org/10.1007/BF01750417>
- Favi, C., Germani, M., & Mandolini, M. (2016). Design for Manufacturing and Assembly vs. Design to Cost: Toward a Multi-objective Approach for Decision-making Strategies during Conceptual Design of Complex Products. *Procedia CIRP*, 50, 275–280. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.190>
- Ferrer, I., Rios, J., & Ciurana, J. (2009). An approach to integrate manufacturing process information in part design phases. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(4), 2085–2091. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.05.009>
- Herrmann, J. W., Cooper, J., Gupta, S. K., Hayes, C. C., Ishii, K., Kazmer, D., Sandborn, P. A., & Wood, W. H. (2004). New directions in design for manufacturing. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 3, 853–861.
<https://doi.org/10.1115/detc2004-57770>
- Howard, L., & Lewis, H. (2003). The development of a database system to optimise manufacturing processes during design. *Journal of Materials Processing Technology*, 134(3), 374–382. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01127-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01127-5)
- Ji, P., & Lau, K. H. (1999). Design for manufacturing: a dimensioning aspect. *Journal of Materials Processing Technology*, 91(1), 121–127. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00429-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00429-4)
- Kerbrat, O., Mognol, P., & Hascoët, J. Y. (2011). A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing. *Computers in Industry*, 62(7), 684–692.
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2011.04.003>
- Kuo, T.-C., Huang, S. H., & Zhang, H.-C. (2001). Design for manufacture and design for “X”: concepts, applications, and perspectives. *Computers & Industrial Engineering*, 41(May), 241–260.
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Integrating+Cost+Estimating+with+the+Ship+Design+Process#0%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.003%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.026%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.>
- Lenau, T., & Alting, L. (1996). The Missing Element in Design for Manufacture. *CIRP*

- Annals - Manufacturing Technology*, 45(1), 105–108. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63026-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63026-1)
- Liou, J. H., & Jang, D. Y. (1997). Computer Simulation of Continuous Manufacturing from Forging to Machining for the DFM. *IFAC Proceedings Volumes*, 30(14), 217–222. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)42724-8](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)42724-8)
- Lysenko, M., & D’Souza, R. M. (2010). Interactive machinability analysis of free-form surfaces using multiple-view image space techniques on the GPU. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(6), 703–710. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2010.03.010>
- Mital, A. (1995). The role of ergonomics in designing for manufacturability and humans in general in advanced manufacturing technology: Preparing the American workforce for global competition beyond the year 2000. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 15(2), 129–135. [https://doi.org/10.1016/0169-8141\(94\)00073-C](https://doi.org/10.1016/0169-8141(94)00073-C)
- O’Driscoll, M. (2002). Design for manufacture. *Journal of Materials Processing Technology*, 122(2–3), 318–321. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01132-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01132-3)
- Ong, S. K., Sun, M. J., & Nee, A. Y. C. (2003). A fuzzy set AHP-based DFM tool for rotational parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 138(1–3), 223–230. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00076-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00076-1)
- Pan, D. Z., Yu, P., Cho, M., Ramalingam, A., Kim, K., Rajaram, A., & Shi, S. X. (2008). Design for manufacturing meets advanced process control: A survey. *Journal of Process Control*, 18(10), 975–984. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2008.04.007>
- Park, H. G., & Baik, J. M. (1999). Enhancing manufacturing product development through learning agent system over internet. *Computers and Industrial Engineering*, 37(1), 117–120. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(99\)00035-2](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(99)00035-2)
- Philpott, M. L., Warrington, C. S., Branstad, E. A., David, R., & Nita, R. P. (1996). A parametric contract modeler for DFM analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, 15(4), 256–267. [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(96\)84551-1](https://doi.org/10.1016/0278-6125(96)84551-1)
- Ramos, A. L. T., & Lorini, F. (2013). Architecture information context in a design for manufacturing (DFM) framework. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 46(7), 110–115. <https://doi.org/10.3182/20130522-3-BR-4036.00013>
- Ulrich, K., Sartorius, D., Pearson, S., & Jakiela, M. (1993). Including the value of time in design-for-manufacturing decision making. *Management Science*, 39(4), 428–447.

<https://doi.org/10.1287/mnsc.39.4.429>

- Vallhagen, J., Madrid, J., Söderberg, R., & Wärmefjord, K. (2013). An approach for producibility and DFM-methodology in aerospace engine component development. *Procedia CIRP*, *11*, 151–156. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.07.035>
- Villeneuve, F., & Tassel, S. (1998). Earliest Analysis of the Manufacturability of a Product: Adequation Between Production Means and Product. *IFAC Proceedings Volumes*, *31*(15), 283–288. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)40567-2](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)40567-2)
- Wuest, T., Liu, A., Wei, W., Lu, S. C. Y., & Thoben, K. D. (2015). Utilization of state drivers to support design for manufacturing. *Procedia CIRP*, *36*, 72–77. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.081>
- Youssef, M. A. (1994). Design for Manufacturability and Time-to-Market, Part 1: Theoretical Foundations. In *International Journal of Operations & Production Management* (pp. 423–461). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012373973-5.50014-0>

