



INSTITUTO POLITÉCNICO DE TOMAR
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA DE ABRANTES

Mestrado em Engenharia Mecânica

Projecto e Produção Mecânica

Projecto Final

Fabrico Aditivo

Rafael Filipe Leitão Reis

Aluno n. 80336

Abrantes, Novembro 2021

Índice

1. Introdução	1
2. Propriedades da impressão 3D	2
3. Tecnologias de fabrico aditivo	4
3.1. Estereolitografia	4
3.2. Projectão Digital de Luz	5
3.3. Modelação por Extrusão e Deposição de Plástico	5
3.4. Sinterização Selectiva por Laser	6
4. Preparação do trabalho de impressão	8
4.1. Desenho CAD	8
4.2. Slicing	10
4.3. Escolha do material	12
4.4. Preparação da máquina	12
5. Aplicações da Fabricação Aditiva	14
5.1. Prototipagem Rápida	14
5.2. Ferramentas	15
5.3. Fabrico Comunitário	15
5.4. Pequenas Séries	16
5.5. Aplicações Artísticas	17
5.6. Co-Produção	17
6. Pós-processamento	19
7. Ensaaios de impacto	20
8. Conclusão	35
9. Bibliografia/Webgrafia	36

Índice de Figuras

Figura 1 - Exemplo 1 de Estereolitografia.....	4
Figura 2 - Exemplo 2 de estereolitografia.....	4
Figura 3 - Exemplo de DLP	5
Figura 4 - Exemplo de impressão FDM.....	6
Figura 5 - Exemplo de impressão SLS	6
Figura 6 - Exemplo de peça em MSLS.....	7
Figura 7 - Interface da aplicação TinkerCAD	8
Figura 8 - Interface de utilizador Fusion360.....	9
Figura 9 - Interface do módulo de escultura do software Blender	10
Figura 10 - Exemplo de aplicação em prototipagem rápida	14
Figura 11 - Ferramenta impressa para apoio do aparafusamento de rodas de carros na empresa Autoeuropa.....	15
Figura 12 - Viseira de protecção contra COVID-19 pela Prusa Research	16
Figura 13 - Exemplo de produção em pequena série pela empresa 3DPrintUK	16
Figura 14- Exemplo de aplicação da impressão 3D em arte.....	17
Figura 15 - FlexTILT Head 3D pela empresa Edelkrone (29€+IVA)	18
Figura 16 - FlexTILT Head 2 pela empresa Edelkrone (149€+IVA).....	18
Figura 17 - Provete de Impacto Carbon-P	20
Figura 18 - Gráfico de comparação dos 3 provetes a 6J (Energia/Tempo).....	21
Figura 19 - Gráfico de comparação dos 3 provetes a 6J (Força/Deslocamento).....	21
Figura 20 - Gráfico de comparação dos 3 provetes a 6J (Força/Tempo).....	22
Figura 21 - Gráfico de 1º provete a 4J (Energia/Tempo).....	23
Figura 22 - Gráfico de 1º provete a 4J (Força/Deslocamento).....	23
Figura 23 - Gráfico de 1º provete a 4J (Força/Tempo).....	24
Figura 24 - Gráfico de 2º provete a 4J (Energia/Tempo).....	24
Figura 25 - Gráfico de 2º provete a 4J (Força/Deslocamento).....	25
Figura 26 - Gráfico de 2º provete a 4J (Força/Tempo).....	25
Figura 27 - Gráfico de 3º provete a 4J (Energia/Tempo).....	26
Figura 28 - Gráfico de 3º provete a 4J (Força/Deslocamento).....	26
Figura 29 - Gráfico de 3º provete a 4J (Força/Tempo).....	27
Figura 30 - Gráfico de 1º provete a 2J (Energia/Tempo).....	28
Figura 31 - Gráfico de 1º provete a 2J (Força/Deslocamento).....	28
Figura 32 - Gráfico de 1º provete a 2J (Força/Tempo).....	29
Figura 33 - Gráfico de 3º provete a 2J (Energia/Tempo).....	29
Figura 34 - Gráfico de 3º provete a 2J (Força/Deslocamento).....	30
Figura 35 - Gráfico de 3º provete a 2J (Força/Tempo).....	30
Figura 36 - Gráfico de 5º provete a 2J, parte 1 (Energia/Tempo)	31
Figura 37 - Gráfico de 5º provete a 2J, parte 2 (Energia/Tempo)	31
Figura 38 - Gráfico de 5º provete a 2J, parte 1 (Força/Deslocamento)	32
Figura 39 - Gráfico de 5º provete a 2J, parte 2 (Força/Deslocamento)	32
Figura 40 - Gráfico de 5º provete a 2J, parte 1 (Força/Tempo)	33
Figura 41 - Gráfico de 5º provete a 2J, parte 2 (Força/Tempo)	33

1. Introdução

O presente relatório surge no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica – Projecto e Produção Mecânica, leccionado na Escola Superior de Tecnologia de Abrantes, ESTA, sendo a última etapa para a conclusão do referido Mestrado.

O fabrico aditivo (*Additive Manufacturing* - AM), também muitas vezes referido simplesmente por impressão 3D ou prototipagem rápida, é um processo que possibilita a construção de objectos físicos através da deposição de material em camadas, tendo por base um modelo 3D digital.

Assim sendo, é possível criar peças de geometria muito simples, ou extremamente complexa, sem que isso implique a utilização de ferramentas altamente especializadas e dispendiosas, e permite mesmo a criação de geometrias impossíveis de obter utilizando os métodos de fabrico tradicionais, seja por fundição ou corte de arranque de apara.

É difícil prever até que ponto o fabrico aditivo afectará a sociedade e o dia a dia de uma pessoa comum, mas pode-se adivinhar que este trará uma revolução na forma de design e fabrico, e até mesmo modelo de negócio que hoje são dados como a norma.

Embora seja uma tecnologia existente há mais de 3 décadas, só recentemente teve um crescimento enorme tanto na utilização por profissionais experientes, como pessoas simplesmente curiosas com a tecnologia, e a democratização deste método de fabrico, proveniente da expiração de patentes e a criação de máquinas de baixo custo, veio revolucionar este mercado, e que, em constante evolução, tem trazido inovação em termos de funcionamento das máquinas, tipos de tecnologias de AM e materiais utilizados, cuja oferta tem aumentado consideravelmente em termos de diversidade de materiais, cores, texturas, dureza, flexibilidade, etc.

Ao longo do relatório será falado com maior incidência na tecnologia FDM, pois esta é, de momento, a tecnologia de fabrico aditivo cujo acesso é mais simples.

2. Propriedades da impressão 3D

Os termos impressão 3D e fabrico aditivo são sinónimos do mesmo processo, no entanto existe uma percepção geral que fabrico (ou fabricação) aditivo(a) se refere a um ambiente industrial, e que a impressão 3D é o termo utilizado mais frequentemente por “*hobbyists*” e pela comunicação social quando cobrem este tema. Resta então esclarecer que fabrico aditivo é qualquer tecnologia de fabrico que recorra a processos de fabrico por camadas a partir de um modelo CAD com a finalidade de obtenção de modelos ou protótipos, e até mesmo peças de produção final. Este processo de fabrico possibilita a criação de modelos com geometrias de extrema complexidade, possibilitando mesmo a construção de montagens, eliminando a necessidade do fabrico em peças individuais e posterior montagem, o que resulta numa redução de dificuldade e custos associados à montagem.

O fabrico aditivo é uma tecnologia acessível, que permite o fabrico de pequenas séries a custos reduzidos, algo impensável com recurso a injeção por moldes, por exemplo. O método tradicional para obtenção de peças em plástico, que tem um custo inicial de obtenção de molde muito elevado, sendo apenas financeiramente justificável para grandes séries.

A fabricação aditiva permite a produção de melhorias constantes aos produtos criados, sem que isso implique a troca de ferramentas de grande valor económico, daí a sua utilidade inegável na produção de protótipos, razão pela qual no início da vida desta tecnologia, muitos a referiam como “prototipagem rápida”.

Esta tecnologia tem também algumas vantagens operacionais, já que é um processo automático, seguro e requer pouca monitorização, podendo um operador estar responsável por um grande número de máquinas ao mesmo tempo. Permite também prazos de entrega curtos para peças únicas e originais.

Nenhuma tecnologia tem apenas vantagens, e esta apresenta algumas desvantagens como a lenta velocidade de trabalho, que em função de factores como precisão desejada, tamanho da peça e nível de detalhe desejado, a construção pode variar de várias horas, a vários dias. Existe também um limite de tamanho para o tamanho das peças a produzir, pois ainda não existem muitas máquinas de dimensões tão elevadas como as existentes para o fabrico convencional. É também de salientar a ainda relativamente baixa diversidade de materiais disponíveis, e embora esta diversidade esteja cada vez mais a crescer, muitos dos novos materiais são proprietários

de empresas ou requerem requisitos especiais, havendo ainda alguma exclusividade em relações às máquinas onde podem ser utilizados.

3. Tecnologias de fabrico aditivo

Existe actualmente um elevado número de tecnologias de fabrico aditivo, com capacidades de produção diferentes e nos tipos de materiais que conseguem utilizar.

Em seguida apresenta-se uma breve síntese de várias tecnologias e do seu funcionamento

3.1. Estereolitografia

A estereolitografia, ou SLA, é um processo onde as peças ou modelos são construídos através da fotopolimerização de uma resina, presente em estado líquido, solidificado com recurso a um feixe laser, cujo comprimento de onda afecta as resinas que pode utilizar.

Este é considerado o primeiro processo de fabrico aditivo, com a sua data de invenção colocado em 1984.

Na figura 1 é visível o funcionamento de SLA de cima para baixo, enquanto na figura 2 é apresentado SLA de baixo para cima.

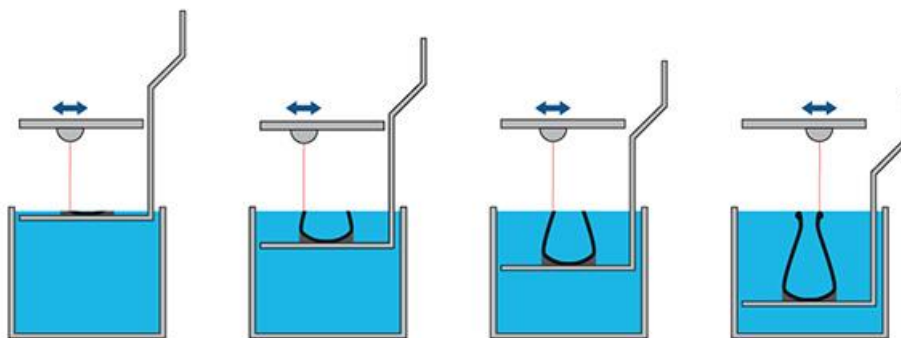


Figura 1 - Exemplo 1 de Estereolitografia (Fonte: <https://bitfab.io/pt-pt/impressao-3d-resina/>)

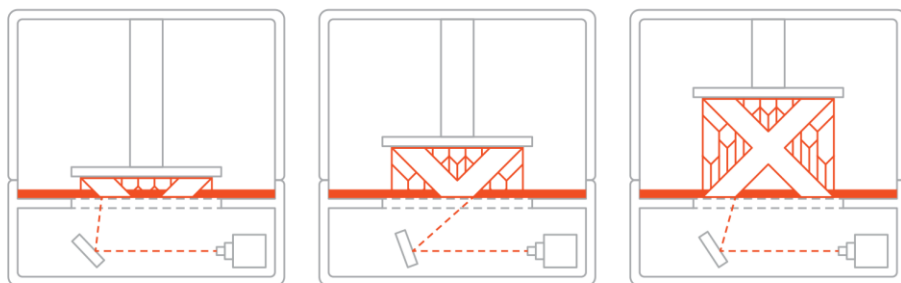


Figura 2 - Exemplo 2 de estereolitografia (Fonte: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>)

3.2. *Projecção Digital de Luz*

Projecção Digital de Luz, ou DLP (Digital Light Projection), é em muito semelhante à estereolitografia, no entanto em vez de utilizar um laser como fonte de energia para a fotopolimerização, utiliza um projector de luz ultravioleta, capaz de criar uma camada inteira de uma só vez, não necessitando que o laser se movimente ponto a ponto. A representação deste funcionamento é demonstrada na figura 3.

Assim, esta tecnologia é mais veloz que SLA, tendo o tempo de impressão total dependência apenas da altura da peça, a área da camada de resina a curar não tem impacto temporal na produção.

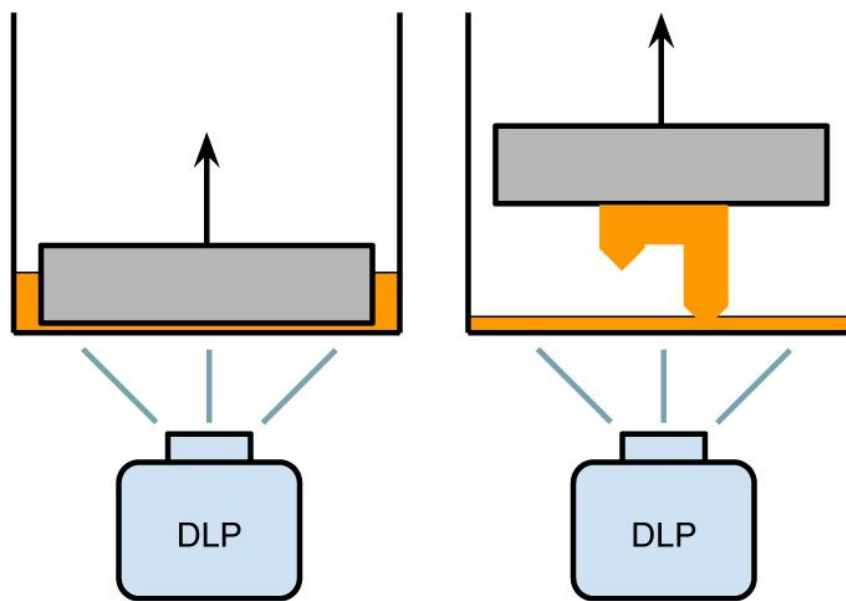


Figura 3 - Exemplo de DLP (Fonte: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/eng-2017-0016/html>)

3.3. *Modelação por Extrusão e Deposição de Plástico*

A modelação por Extrusão e Deposição de plástico, ou FDM (Fused Deposition Modeling), cujo funcionamento é demonstrado na figura 4, é de momento o mais utilizado método de fabrico aditivo a nível mundial, em grande parte devido à sua simplicidade, tanto no processo, como na construção de máquinas e na aquisição de matéria-prima, e utiliza a extrusão de um polímero aquecido por um bocal de extrusão, cujo diâmetro é pré-definido.

É também utilizado o termo FFF (Fused Filament Fabrication) para descrever esta tecnologia. Este termo foi criado por razões legais, já que Stratasys possui a patente para a utilização deste termo na sua tecnologia.

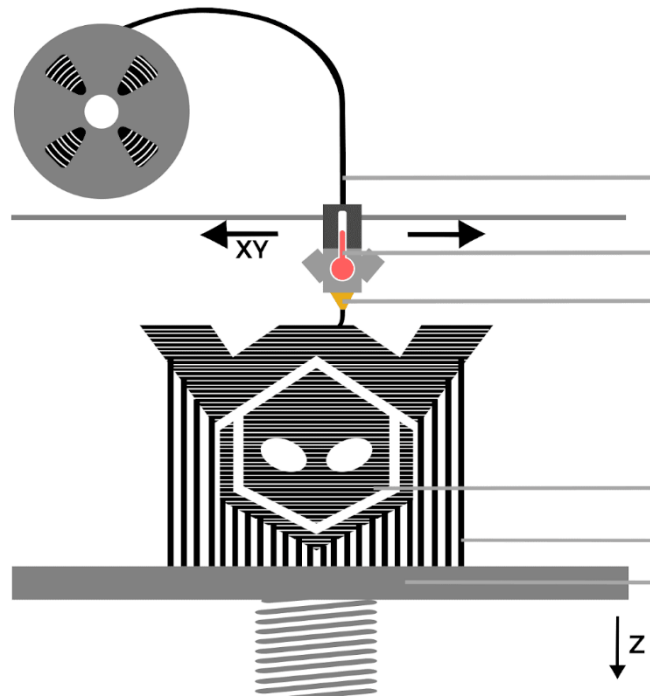


Figura 4 - Exemplo de impressão FDM (Fonte: <https://www.wishbox.net.br/blog/tipos-de-impressora-3d/>)

3.4. Sinterização Selectiva por Laser

O SLS (*Selective Laser Sintering*) utiliza um feixe laser, capaz de aplicar temperaturas elevadas, que fundem o material no ponto de incidência do mesmo. Pode-se considerar um formato de trabalho semelhante ao SLA, no entanto em vez de depender do comprimento de onda, depende da capacidade energética do laser. A matéria-prima não é uma resina líquida, mas sim material em pó. O funcionamento desta tecnologia está apresentado na figura 5.

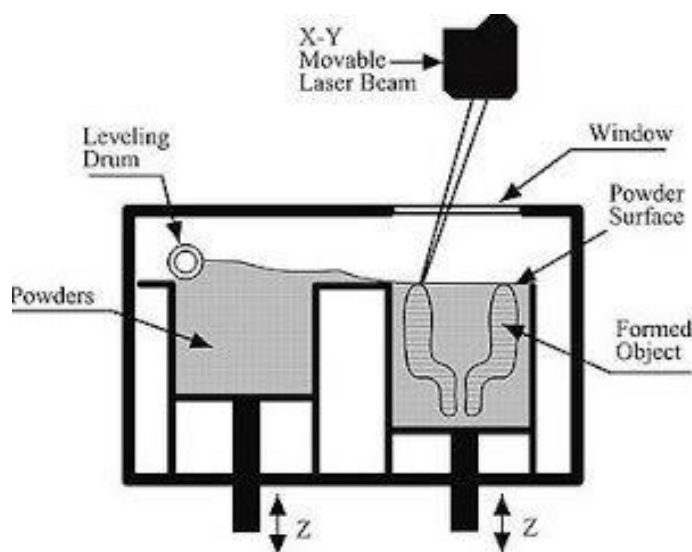


Figura 5 - Exemplo de impressão SLS (Fonte: <https://www.3dpartsunlimited.com/blog-post/sls-selective-laser-sintering/>)

Esta tecnologia pode ser também utilizada para produzir peças metálicas, exemplo demonstrado na figura 6, no processo MSLS (Metalic Selective Laser Sintering) onde o laser tem uma potência muito mais elevada e a base de trabalho fica fundida à peça, necessitando normalmente de um pós-processamento específico.

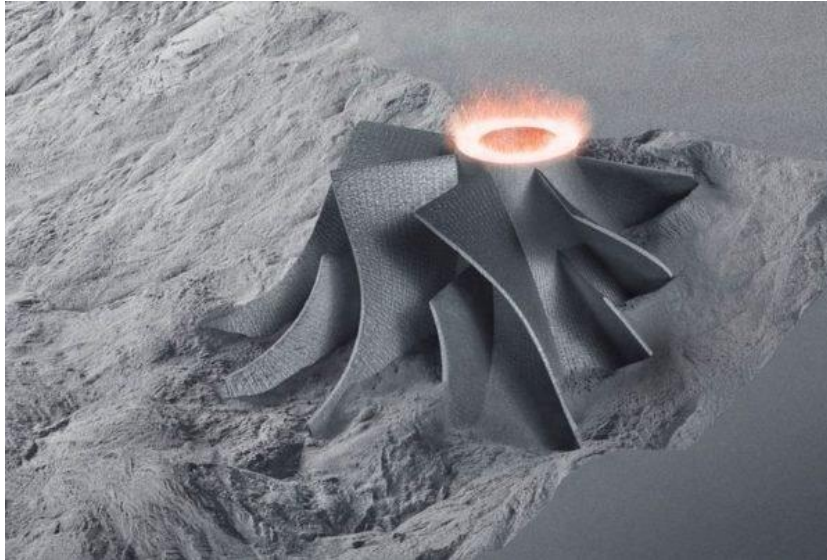


Figura 6 - Exemplo de peça em MSLS (Fonte: <https://www.beamlar.com/3d-printing-capabilities/processes/sls-selective-laser-sintering/>)

4. Preparação do trabalho de impressão

4.1. Desenho CAD

Como qualquer peça, algo fabricado por fabrico aditivo começa por uma ideia. Essa ideia pode servir para colmatar uma necessidade, pode ser uma melhoria, ou pode ser apenas algo que é considerado uma ideia interessante a testar. Após isso, é necessário passar essa ideia para um formato que possa ser produzido.

No caso do fabrico aditivo, esse formato é um CAD tridimensional, que posteriormente é processado por um software, denominado de ‘slicer’, que como o nome indica, separa o modelo em diversas camadas, com uma dada espessura, para posteriormente realizar o trabalho.

Existem imensas ferramentas de CAD, para as mais variadas aplicações, sendo aqui apresentadas 3 exemplos gratuitos, com objectivos e complexidades diferentes. Existe o TinkerCAD, mostrado na figura 7, uma aplicação de utilização gratuita, não sendo necessária instalação de software. Esta escolha é mais indicada para pessoas com muito pouca experiência em desenho CAD, pois obtém objectos à base de operações booleanas de objectos base.

A construção de objectos nesta aplicação, embora simples, é também limitada e demorada, portanto é apenas recomendada para principiantes.

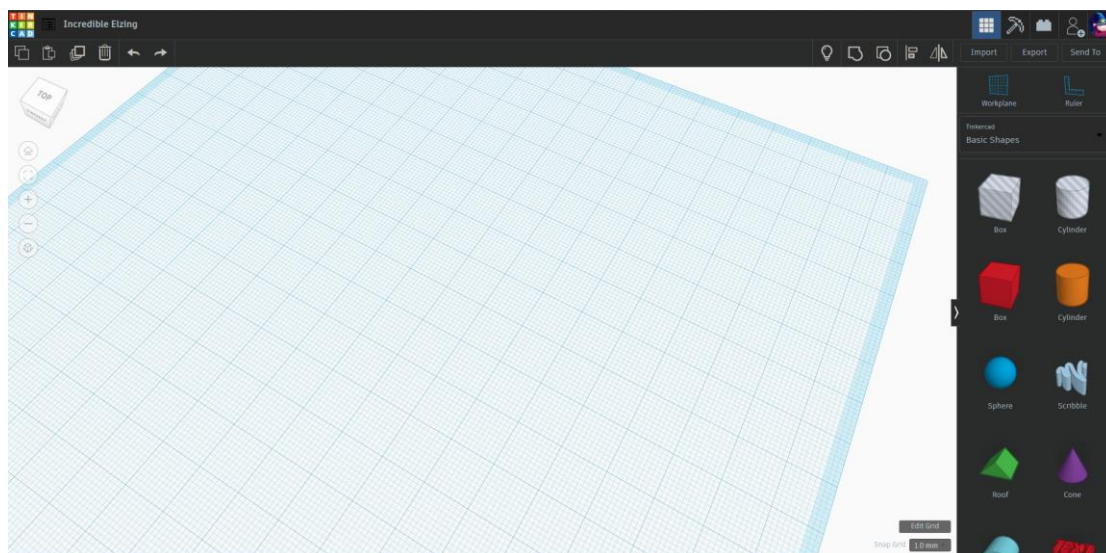


Figura 7 - Interface da aplicação TinkerCAD

Outra aplicação útil, já bastante mais avançada e capaz de produzir peças como os softwares CAD tradicionais (CATIA; SolidWorks e Inventor) é o Fusion360, mostrado na figura 8.

Este software é gratuito para uso pessoal, neste caso tem algumas restrições, mas que para uso não profissional, são suficientes para a grande maioria das situações, sem problemas. Este software tem uma interface de utilizador intuitiva, e para quem já tem prática na utilização de software CAD, terá uma adaptação muito rápida. A complexidade de modelos obtidos neste software é alta.

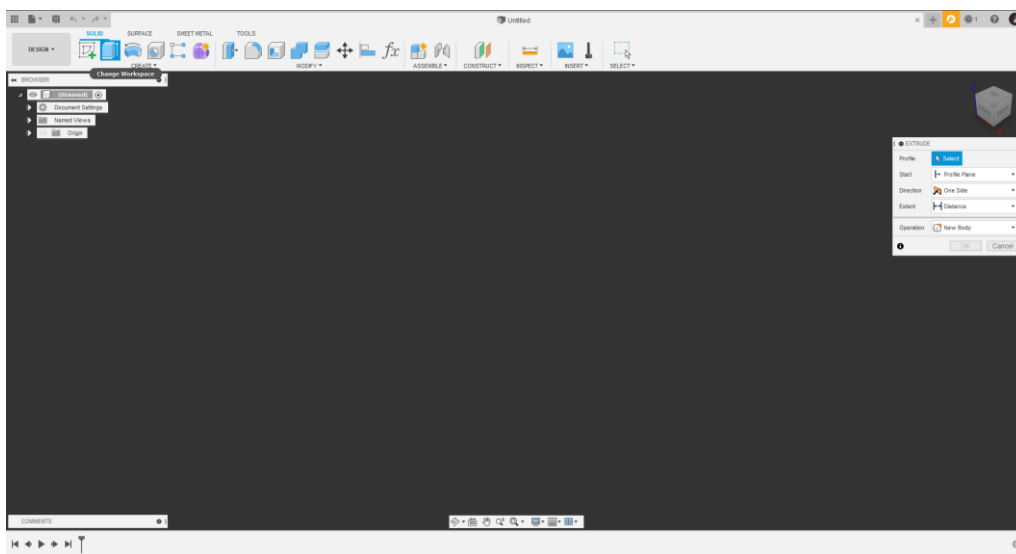


Figura 8 - Interface de utilizador Fusion360

Quando as medidas da peça não são exatas, como é o caso de peças para fins estéticos e artísticos uma outra opção gratuita é o software Blender, mostrado na figura 9.

Ao contrário dos softwares mencionados anteriormente, este possui uma elevada complexidade e dificuldade de utilização inicial, no entanto é uma ferramenta muito potente na execução de desenhos orgânicos.

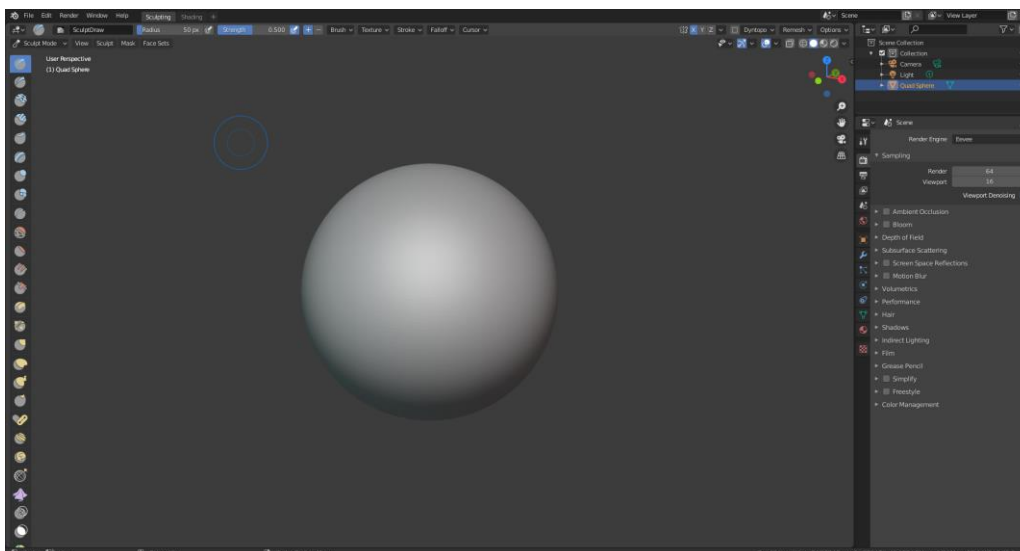


Figura 9 - Interface do módulo de escultura do software Blender

Recorrendo a uma das 3 opções indicadas, dependendo da finalidade pretendida e da capacidade de utilização do utilizador, é possível criar geometrias de grande complexidade.

Após a conclusão do desenho da peça, este necessita ser exportada para um ficheiro reconhecido pelo slicer, sendo os mais comuns o formato *.stl* e o *.3mf*. O formato *.stl* é mais antigo e divide a geometria num conjunto elevado de superfícies triangulares. O formato *.3mf* foi criado mais recentemente, e consiste numa evolução do *.stl*, tendo a capacidade de guardar muito mais informação sobre o próprio processo, guardando diferentes cores, por exemplo. Nos *slicers*, pode guardar as definições de impressão, e a posição de uma ou mais peças na mesa de impressão. É um formato muito vantajoso, mas sendo recente, ainda existem muitos softwares incapazes de o suportar.

4.2. Slicing

Quando temos a peça a ser produzida, seja obtida por desenho próprio ou obtida através de um dos vários repositórios existentes na internet, é necessário transformar o desenho em coordenadas e caminhos, tal como numa fresadora CNC. Para tal é utilizado um tipo de software, normalmente conhecido como slicer, existindo uma grande variedade de opções gratuitas, normalmente oferecidas pelos fabricantes de equipamentos. Temos como Exemplo o Cura, da Ultimaker, o PrusaSlicer, da Prusa, o ideaMaker, da Raise3D, entre outros. A maioria destes slicers referidos são compatíveis com um elevado número de máquinas, incluindo máquinas construídas em casa. A maioria das máquinas construídas em casa utiliza os firmwares Marlin, RepRap ou Repetier, daí o seu suporte.

Embora todas as opções referidas tenham a mesma função, algumas possuem capacidades diferentes uns dos outros, pelo que é aconselhável explorar todas as hipóteses.

As variáveis do processo, como a temperatura, espessura, dimensão do bico são, entre outras, responsáveis pela qualidade da impressão, pela resistência mecânica da peça e pelo tempo de trabalho, num balanço que terá de ser levado em conta a utilização pretendida para a peça.

Uma peça cuja finalidade seja, por exemplo, realizar algum esforço e em que o seu aspecto não seja um factor importante, é aconselhável utilizar as temperaturas mais altas que o normal para o material a imprimir, um bocal de extrusão maior, para que as linhas de impressão sejam mais grossas, e assim tenham uma maior área de aderência à camada anterior, o que em conjunto com a temperatura mais elevada, garantiriam que todas as linhas da peça estavam bem fundidas umas com as outras e teriam maior resistência mecânica. É também de salientar que, ao utilizar camadas mais grossas e um bocal de extrusão maior, reduz consideravelmente o tempo de trabalho para qualquer peça.

A desvantagem seria em termos estéticos, já que camadas grossas e temperaturas elevadas dariam um aspecto mais rudimentar.

Por outro lado, para se obter uma peça cuja qualidade mais importante fosse o seu aspecto, um bocal de extrusão mais fino, normalmente de 0.2mm, camadas de 0.05mm e temperaturas médias são aconselhadas, em conjunto com velocidades de impressão mais moderadas. Este tipo de afinação causa um enorme tempo de impressão, tendo de ser considerado se vale a pena utilizar uma definição tão extrema, ou se as camadas podem ser maiores.

As propriedades acima descritas, são apenas algumas das mais básicas a ter em conta. Com a utilização continuada e uma maior experiência na utilização dos slicers, será aconselhável experimentar a alteração de outras propriedades e otimizar a impressão em função da aplicação, de tempo de impressão, resistência e aspecto.

Um aspeto onde as configurações têm muita relevância é o do material utilizado no processo. Em função das escolhas é possível manter uma boa resistência da peça poupando algum material. Na impressão 3D, as peças não têm obrigatoriamente que ser maciças, cabendo ao utilizador escolher a percentagem de volume interior preenchido, podendo ir de 0% (oco) a 100% (maciço). A forma mais habitual de poupar material, é utilizar uma percentagem de

preenchimento baixa e utilizar uma espessura de parede mais elevada. A diferença de material utilizado pode ser considerável, bem como o tempo de impressão da peça necessário. Tais nuances e conhecimento de que propriedades alterar para cada caso, necessitam de alguma experiência de utilização de slicer, bem como conhecimento das capacidades da máquina específica onde vai trabalhar.

4.3. Escolha do material

A escolha do material a utilizar é dependente do objetivo da peça e da máquina a ser utilizada. No caso específico de FDM, PLA é um material simples de imprimir, e que é possível imprimir com todas as máquinas. No entanto para se obterem melhores resultados, deve ser utilizada refrigeração da peça a ser impressa, pois devido à sua baixa temperatura de transição vítrea, a peça poder deformar um pouco enquanto está a ser impressa. Por outro lado, temos materiais como ABS/ASA, que necessitam de uma base de trabalho aquecida, e de preferência uma atmosfera fechada e relativamente quente, sem correntes de ar. Isto deve-se ao facto deste material ao ser impresso, cria grandes tensões internas, e caso arrefeça demasiado rápido, causa a deformação da peça.

Estão agora a aparecer plásticos de elevado desempenho, como o PEEK, PEKK e o PEI, que necessitam de impressoras com atmosferas activamente aquecidas e bocais de extrusão capazes de atingir os 450°C. Estes materiais possuem resistências mecânicas e térmicas muito superiores quando comparados com os materiais comuns de impressão como PLA, ABS, PLA e até mesmo ao Nylon.

Dever-se-á então ter em conta o ambiente de trabalho, a função e a solicitação à qual a peça estará sujeita quando se pretende seleccionar o material mais indicado a utilizar.

4.4. Preparação da máquina

A preparação da máquina de impressão é um dos passos mais importantes para a impressão. Do ponto de vista teórico, bastaria apenas colocar o material no alimentador, deixar a máquina aquecer e verificar se estava a extrudir. Há, no entanto, algumas atenções a ter. Dependendo do material a ser impresso e do material do qual é feito a base de impressão, poderá ser necessário a utilização de um filme aderente para que a peça não se solte, ou noutros casos, para que a peça não adira demais, o que pode danificar a máquina quando se está a extrair a peça da máquina. Os materiais utilizados para criar esse filme podem ir de materiais comuns

como cola PVA, laca de cabelo, até materiais especificamente criados para tal efeito, como os materiais aderentes da *3DLAc* ou *Dimafix*.

5. Aplicações da Fabricação Aditiva

5.1. Prototipagem Rápida

A utilização inicial da tecnologia de fabrico aditivo foi precisamente como um método de prototipagem rápida, podendo facilmente alterar o modelo digital quando fosse necessária alguma alteração.

A tecnologia de fabricação aditiva permite então produzir protótipos rapidamente e a baixo custo, permitindo avançar para a peça final apenas após se validar um protótipo com todas as características desejadas, exemplo demonstrado na figura 10.

Este tipo de equipamentos de prototipagem rápida permite também a redução do tempo de produção de protótipos de semanas, para apenas algumas horas.

Esta tecnologia é também útil para criar modelos arquitectónicos, permitindo verificar fisicamente e a três dimensões todas as características, algo que poderia revelar-se difícil em modelos apenas digitais.

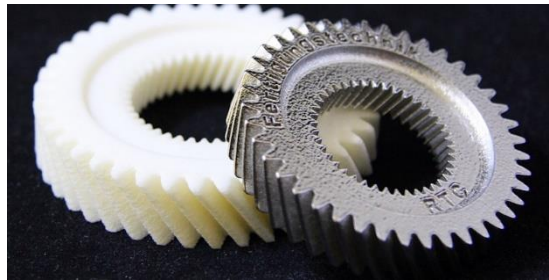


Figura 10 - Exemplo de aplicação em prototipagem rápida (Fonte: <https://mjemagazines.com/guide-to-rapid-prototyping-of-something/>)

5.2. Ferramentas

Na produção de ferramentas de uso altamente específico e especializado, a fabricação aditiva apresenta um avanço importante e uma oportunidade de poupança de tempo e dinheiro não negligenciável. É possível criar facilmente, rapidamente e a um custo bastante baixo uma ferramenta especializada, por vezes até para uso único.

Como exemplo está apresentado na figura 11 abaixo apresentada, um mecanismo utilizado no aperto de rodas na Autoeuropa. A utilização desta ferramenta numa linha de montagem tem capacidade de poupança de centenas de horas anuais, aumentando o ritmo de produção.

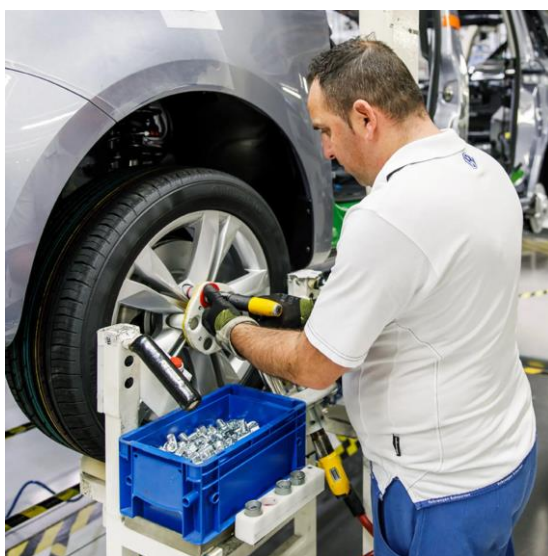


Figura 11 - Ferramenta impressa para apoio do aparafusamento de rodas de carros na empresa Autoeuropa (Fonte: <https://ultimaker.com/learn/volkswagen-autoeuropa-maximizing-production-efficiency-with-3d-printed>)

5.3. Fabrico Comunitário

A ideia de fabrico comunitário ganhou muita força devido à pandemia Covid-19, na qual a escassez de equipamentos de protecção individual, tanto para o público geral, como para os profissionais de saúde, levou à organização de vários e largos grupos de cidadãos a utilizar os seus equipamentos pessoais para fabricar equipamentos de protecção, permitindo uma não dependência das estabelecidas cadeias de fabrico e oferta, que se encontravam incapazes de acompanhar a procura. A figura 12 mostra o exemplo de viseiras, cuja estrutura é feita em impressão 3D, e a parte de protecção removível e substituível, é feita de folha de acetato ou de PETG cortada à dimensão e formato desejado.



Figura 12 - Viseira de protecção contra COVID-19 pela Prusa Research (Fonte: https://www.prusa3d.com/page/covid-19_379/)

5.4. Pequenas Séries

A produção de pequenas séries em equipamentos de fabrico aditivo é uma resposta ao preço elevado da criação de moldes para o normal processo de injeção, permitindo uma grande redução do preço por peça, usando o caso apresentado na figura 13 como exemplo.



Figura 13 - Exemplo de produção em pequena série pela empresa 3DPrintUK (Fonte: <https://www.3dprint-uk.co.uk/3d-printed-low-volume-batch-production-runs/>)

5.5. *Aplicações Artísticas*

Produções artísticas obtidas por fabrico aditivo abriram uma nova ferramenta para criação de geometrias orgânicas e extremamente complexas, permitindo a modeladores gráficos a capacidade passar para o plano físico as suas criações digitais, como é demonstrado na figura 14.



Figura 14- Exemplo de aplicação da impressão 3D em arte (Fonte: <https://mg.co.za/article/2013-07-05-3d-printing-takes-art-into-another-dimension/>)

5.6. *Co-Produção*

A ideia de co-produção baseia-se em criar e vender um produto, no entanto certas partes desse produto serem fornecidas em formato CAD, para impressão.

Esta abordagem permite uma redução enorme de custos de produção e a melhoria contínua do produto sem necessidade de alterações de ferramentas de elevado valor, e também de custo final ao cliente.

Nas figuras 15 e 16, apresentamos um exemplo da empresa *Edelkrone*, que faz periféricos para fotografia e videografia. A fig. 15 representa a co-produção, onde o cliente compra os ficheiros digitais e todos os componentes cuja impressão é impossível, como parafusos e outras peças que necessitem ser metálicas. As peças apresentadas a vermelho são impressas pelo cliente, enquanto na fig. 16, temos o produto equivalente, mas completamente produzido pela *Edelkrone*. O modelo de co-produção pode ser comprado por 29€ mais IVA, enquanto o produto completamente produzido pela empresa custa 149€ mais IVA, deixando clara a mais-valia que este modelo apresenta a ambas as partes envolvidas.



Figura 15 - FlexTILT Head 3D pela empresa Edelkrone (29€+IVA) (Fonte: <https://edelkrone-eu.com/products/flextilt-head-3d>)



Figura 16 - FlexTILT Head v3 pela empresa Edelkrone (90€+IVA) (Fonte: <https://edelkrone-eu.com/products/flextilt-head-v3>)

6. Pós-processamento

As peças obtidas por FDM não têm um acabamento perfeito, o que pode ser algo indesejado no produto final. Assim, pode ser necessário um processo adicional de modificação da superfície da peça para que esta obtenha um acabamento com maior qualidade.

Este tipo de acabamento pode ser obtido através de um processo convencional de arranque de aparas, mas no caso particular existem também outras opções. Para que a peça fique lisa ao toque, é comum cobrir a peça com uma fina camada de resina epóxi, que ao curar cria uma superfície lisa, que pode posteriormente ser pintada, eliminando o comum aspecto das camadas. No caso do ABS, é também normal colocar a peça durante alguns minutos num recipiente com acetona, de forma que a reacção química entre o ABS e a acetona, torne o ABS pastoso, o que permite que o ABS se dissolva e fique com um acabamento liso.

7. Ensaaios de impacto

De forma a avaliar a resistência mecânica de componentes produzidos por FDM, foram efetuados ensaios experimentais de impacto em provetes impressos, figura 17, em material *Carbon-P*, da RS-Pro e um compósito de PETG com 20% de reforço de fibra de carbono. Para tal, foram criados provetes com dimensões de 100x100x2mm, com a intenção de utilizar 3 provetes para cada nível de energia, para que se possa comparar e verificar se os resultados são consistentes.



Figura 17 - Provete de Impacto Carbon-P

Foram realizados ensaios de impacto a 6J, 4J, 2J. Nos gráficos das figuras 18, 19 e 20, são mostrados os resultados dos ensaios a 6J. Nestes provetes ocorreu sempre rutura com apenas um impacto. É possível verificar que os resultados são bastante semelhantes, no entanto o provete 3 apresenta valores de força um pouco mais baixos que os provetes restantes.

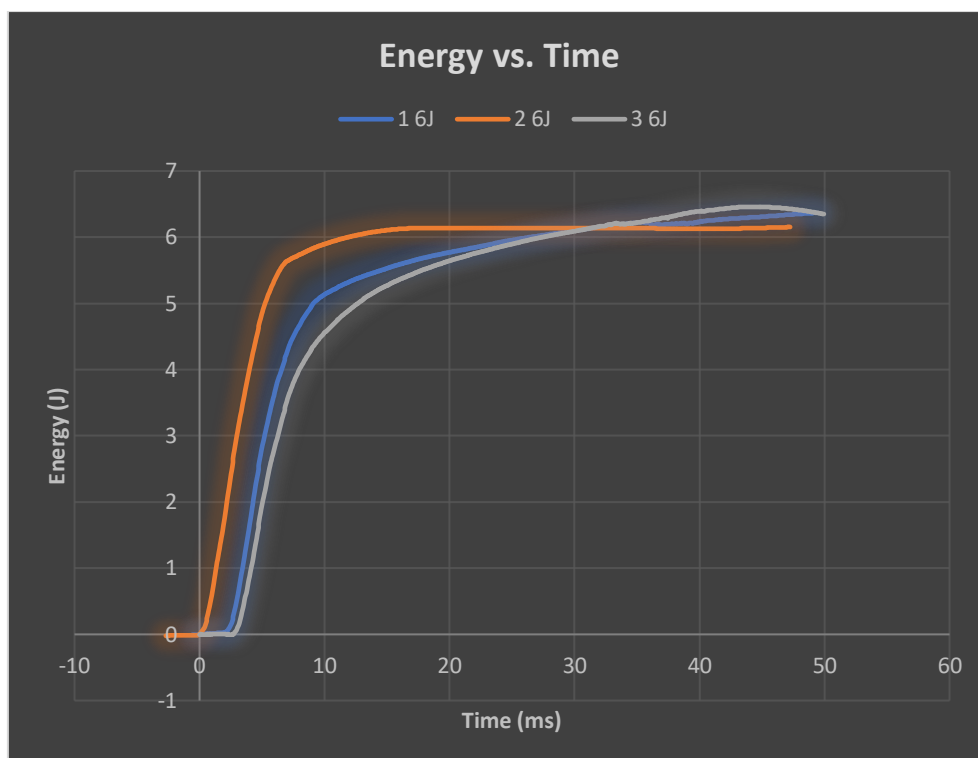


Figura 18 - Gráfico de comparação dos 3 provetes a 6J (Energia/Tempo)

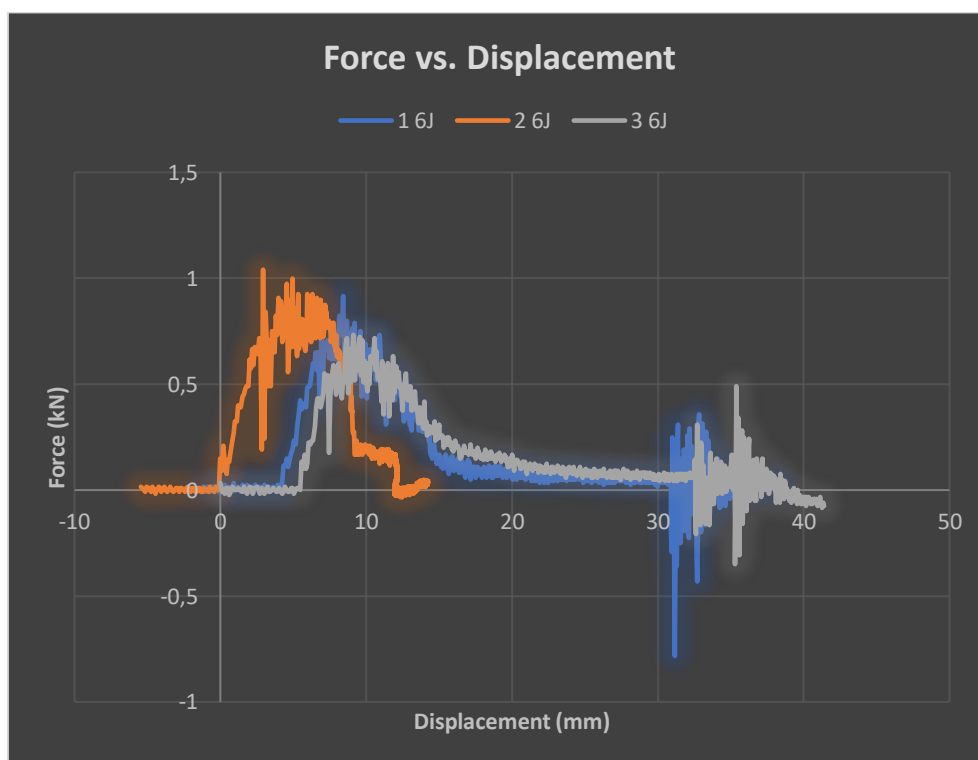


Figura 19 - Gráfico de comparação dos 3 provetes a 6J (Força/Deslocamento)

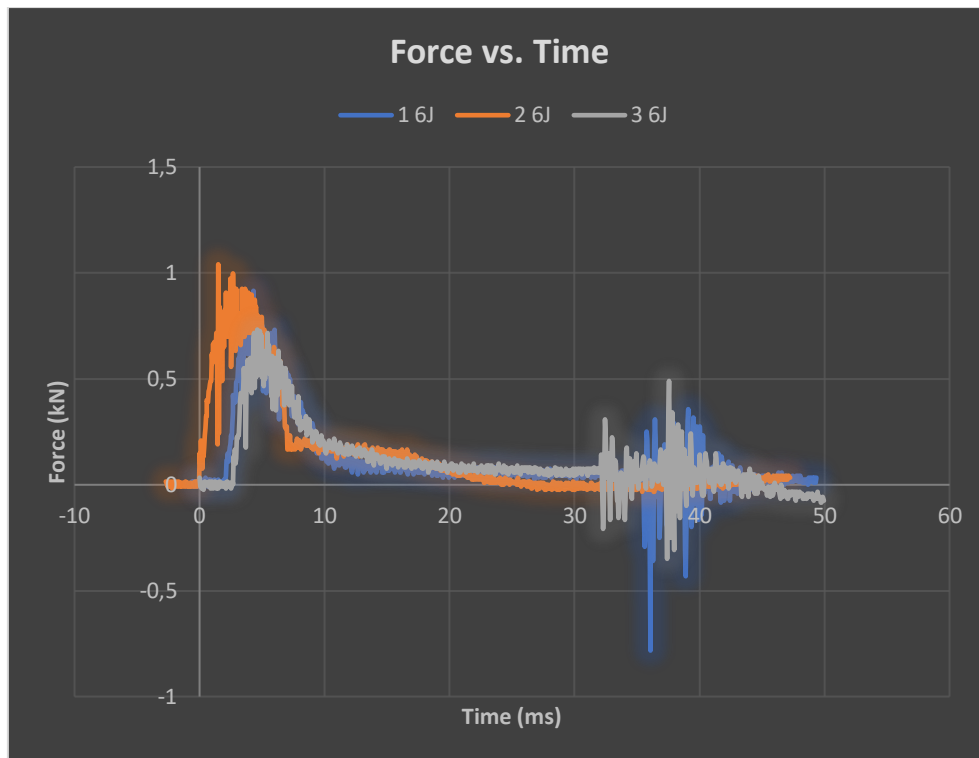


Figura 20 - Gráfico de comparação dos 3 provetes a 6J (Força/Tempo)

Ensaio a 6J	Provede 1	Provede 2	Provede 3
Quant. De Impactos	1	1	1
F _{máx} (kN)	0,91594255	1,040843844	0,732754052
E _{máx} (J)	6,367918	6,153706551	6,460080147

É possível observar que para 6J, a força mais elevada foi de aproximadamente 1kN, e a mínima de aprox. 0,73kN, diferença expectável tendo em conta a quantidade de defeitos presentes em peças obtidas através de FDM.

Ao contrário dos gráficos apresentados para 6J, os restantes gráficos apresentados a partir deste ponto, estão separados por provetes, com todos os impactos necessários até que o provete tenha sido perfurado.

Todos os provetes de 4J, figuras 21 a 29, foram perfurados pelo segundo impacto.

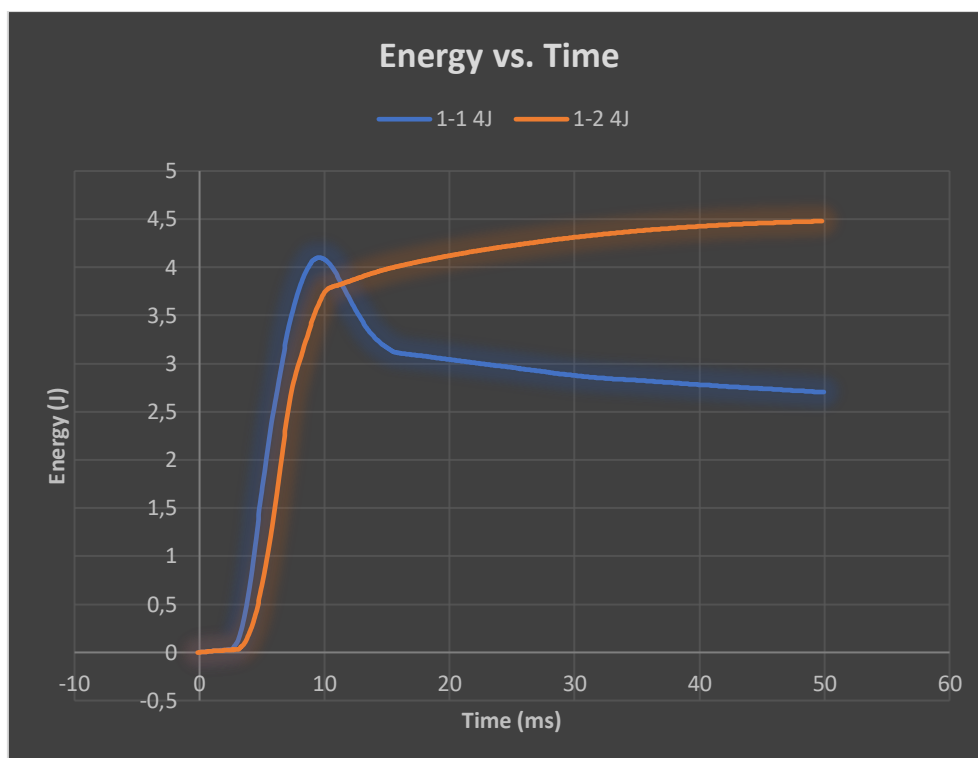


Figura 21 - Gráfico de 1º provete a 4J (Energia/Tempo)

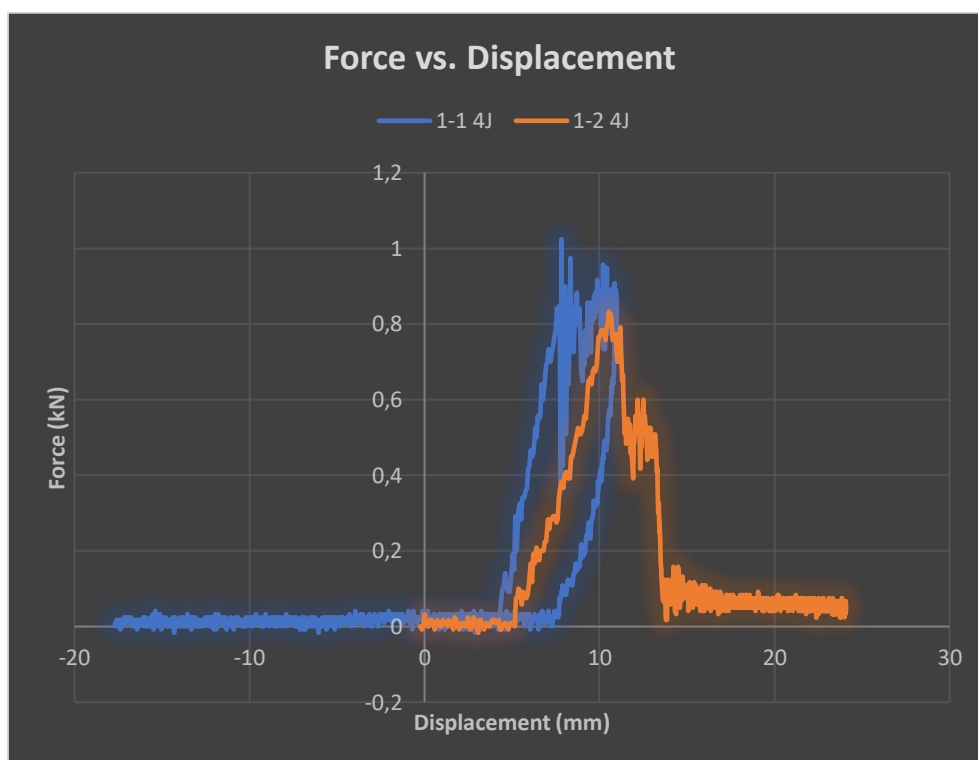


Figura 22 - Gráfico de 1º provete a 4J (Força/Deslocamento)

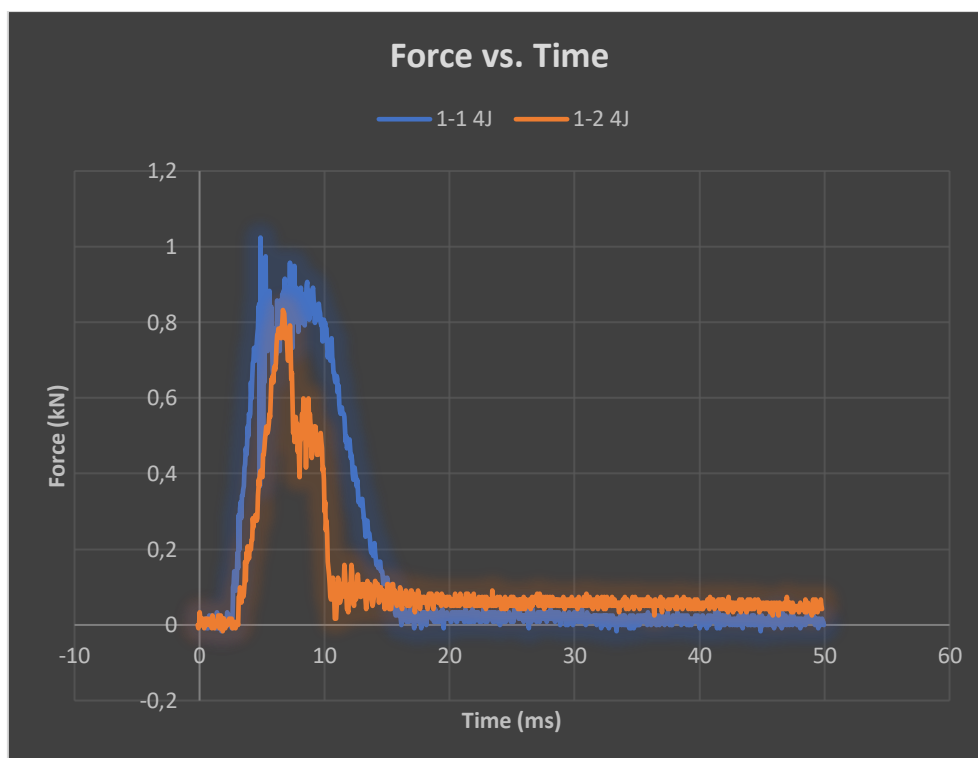


Figura 23 - Gráfico de 1º provete a 4J (Força/Tempo)

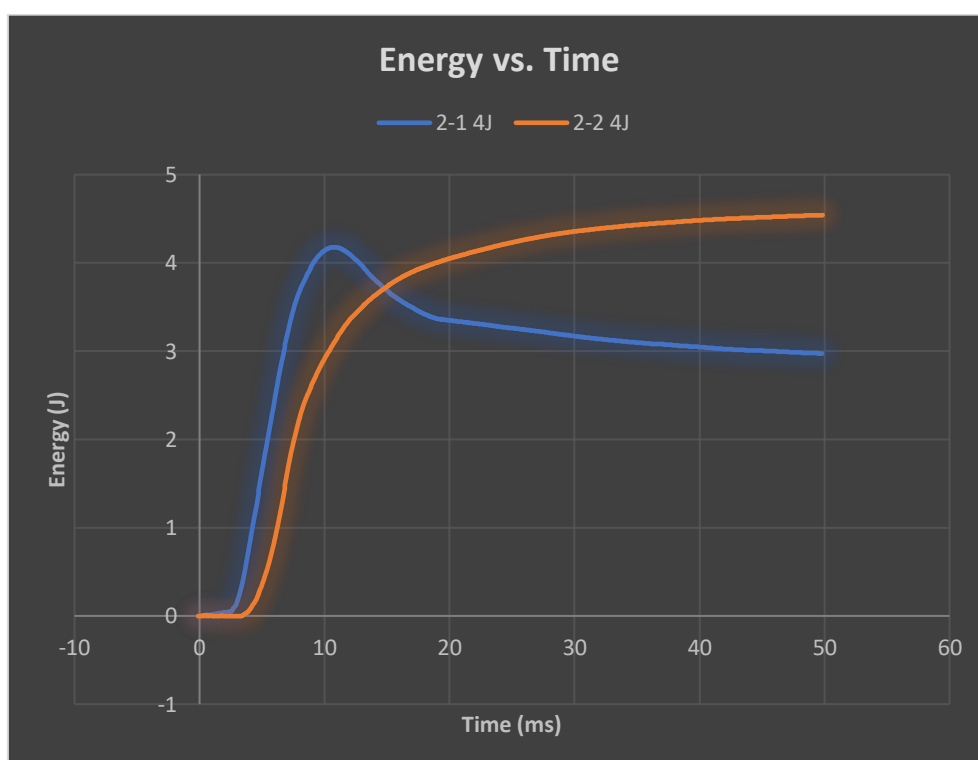


Figura 24 - Gráfico de 2º provete a 4J (Energia/Tempo)

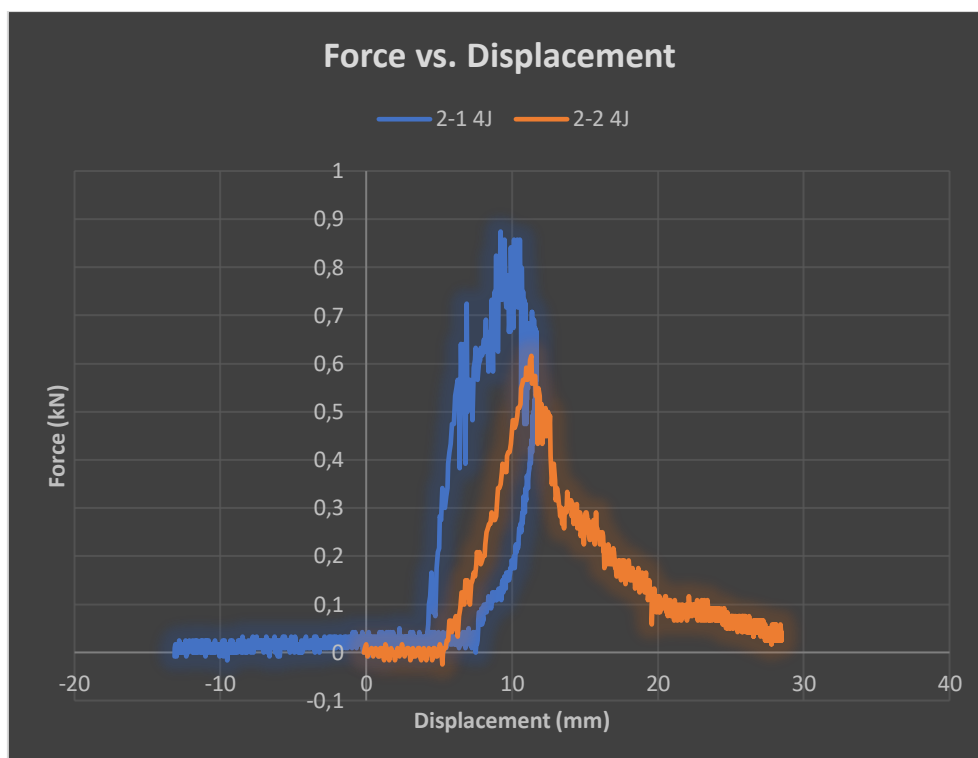


Figura 25 - Gráfico de 2º provete a 4J (Força/Deslocamento)

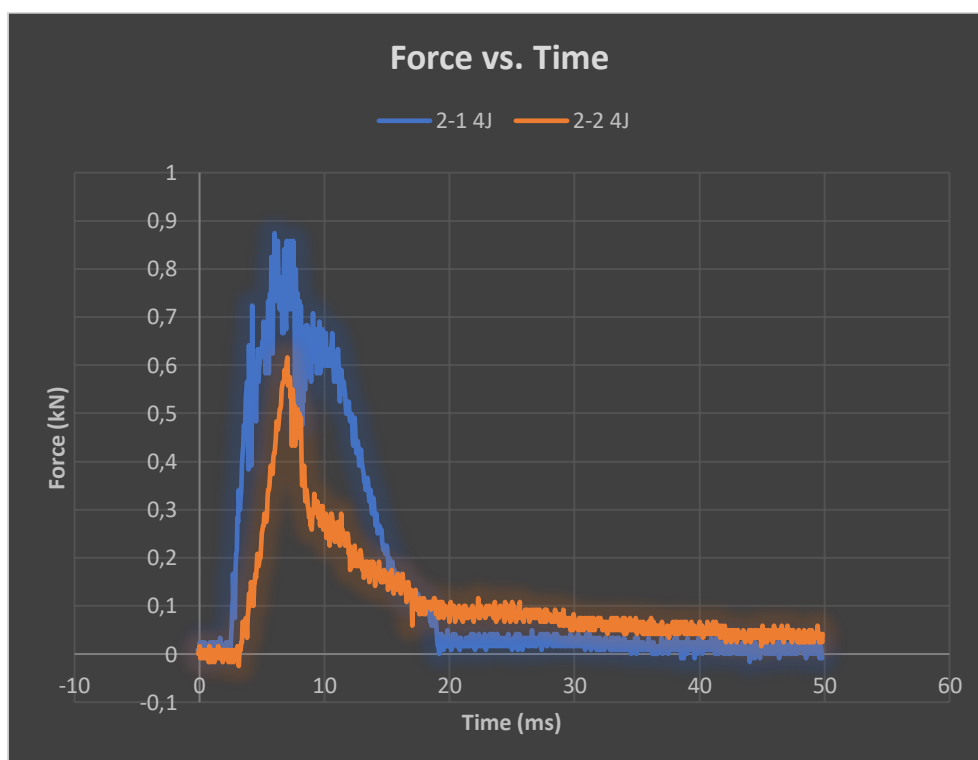


Figura 26 - Gráfico de 2º provete a 4J (Força/Tempo)

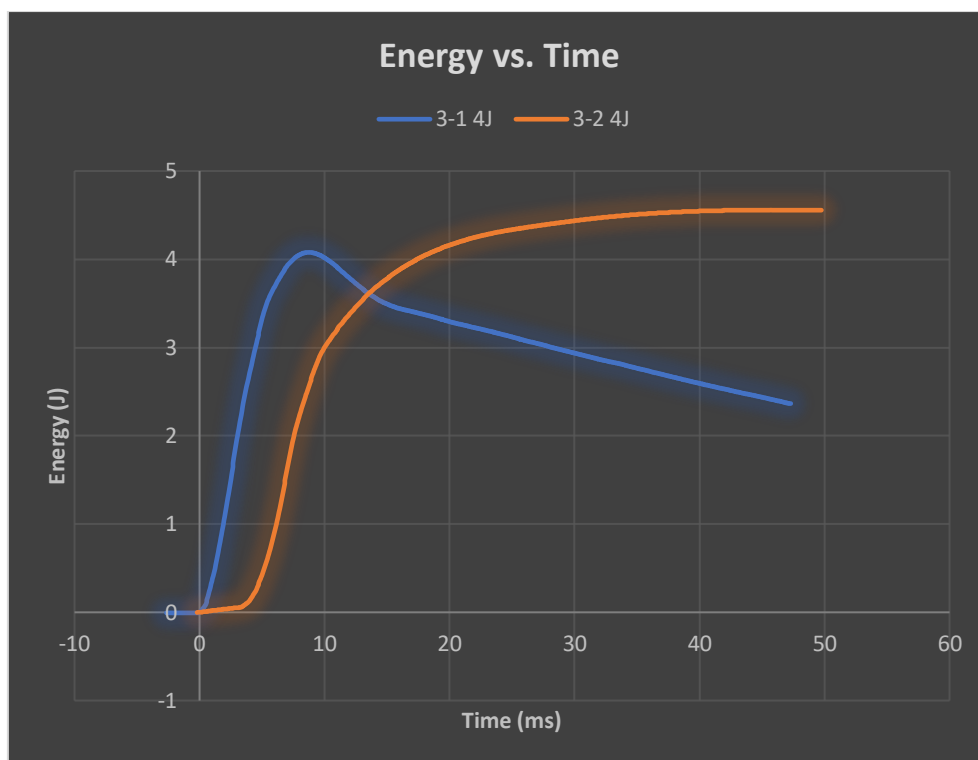


Figura 27 - Gráfico de 3º provete a 4J (Energia/Tempo)

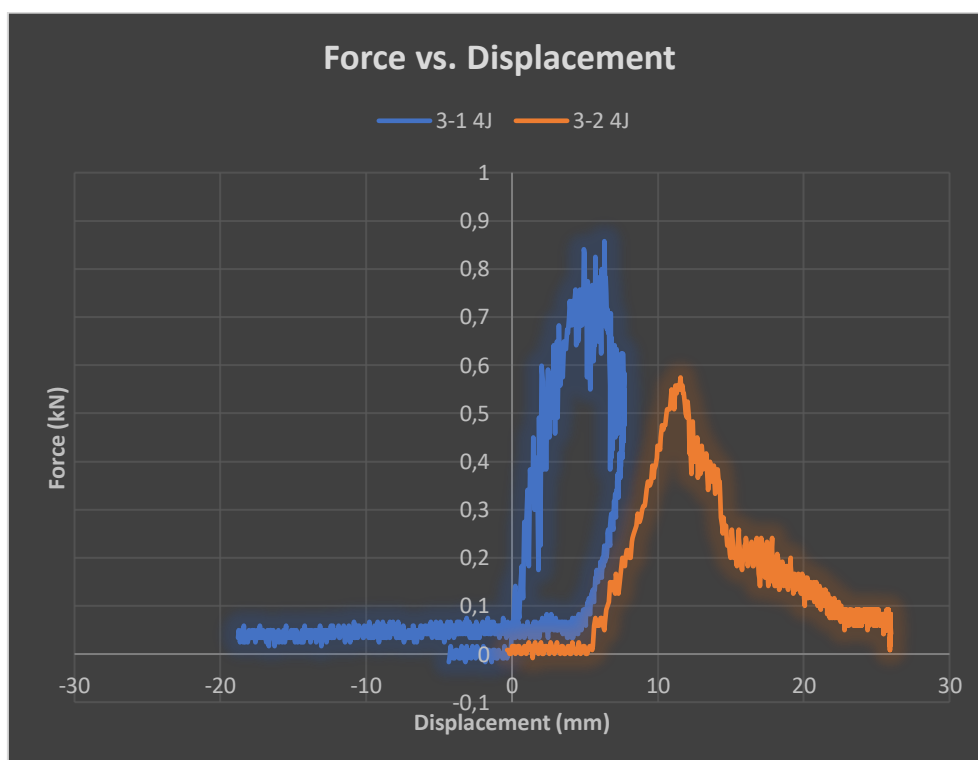


Figura 28 - Gráfico de 3º provete a 4J (Força/Deslocamento)

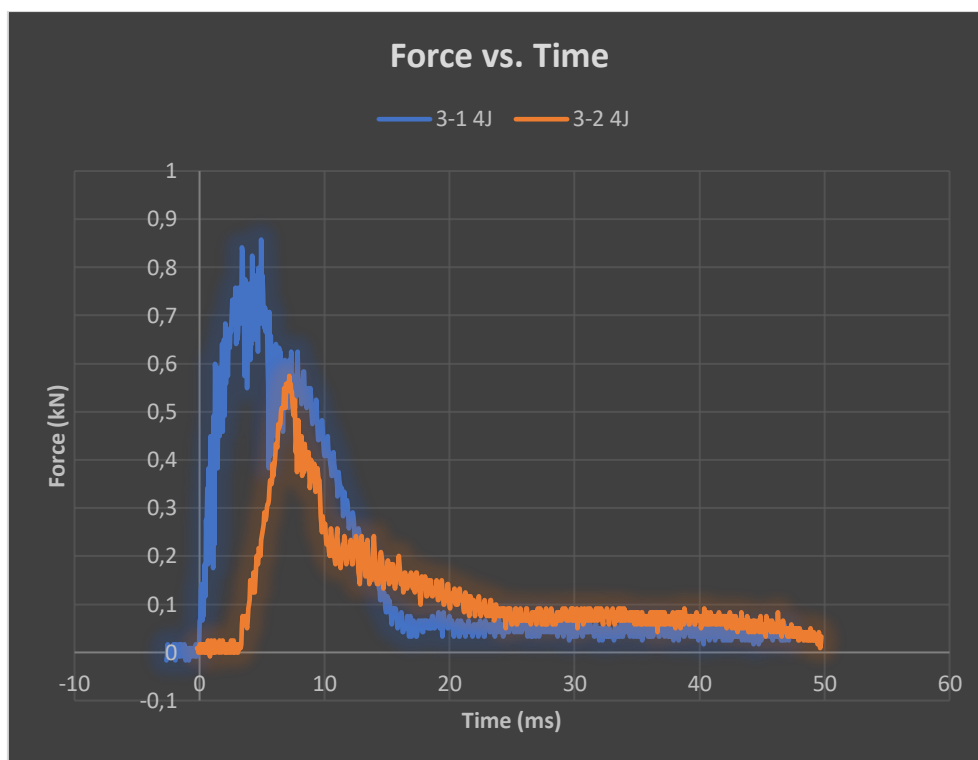


Figura 29 - Gráfico de 3º provete a 4J (Força/Tempo)

Ensaio a 4J	Provete 1	Provete 2	Provete 3
Quant. De Impactos	2	2	2
F _{máx} (kN)	1,024190307	0,874308765	0,857655287
E _{máx} (J)	4,479763985	4,542102337	4,557247639

É possível observar que para 4J, a força mais elevada foi de aproximadamente 1kN, e a mínima de aprox. 0,86kN, diferença expectável tendo em conta a quantidade de defeitos presentes numa peça obtida através de FDM, a diferença é semelhante aos valores observados quando o valor de energia é de 6J.

Nos provetes de ensaio de 2J, figuras 30 a 41, o provete 2 e provete 4 apresentaram resultados demasiado diferentes do esperado, pelo que os ensaios foram repetidos, foi também observado que o provete 5 levou mais de o dobro de impactos quando comparado com os restantes provetes nesta gama de energia.

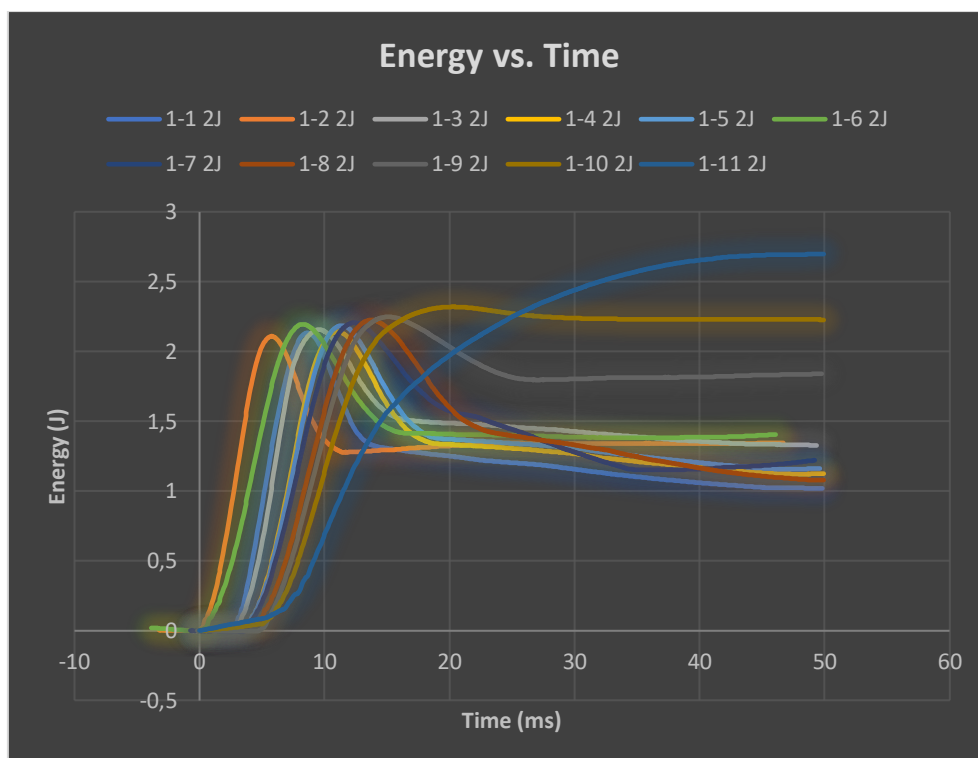


Figura 30 - Gráfico de 1º provete a 2J (Energia/Tempo)

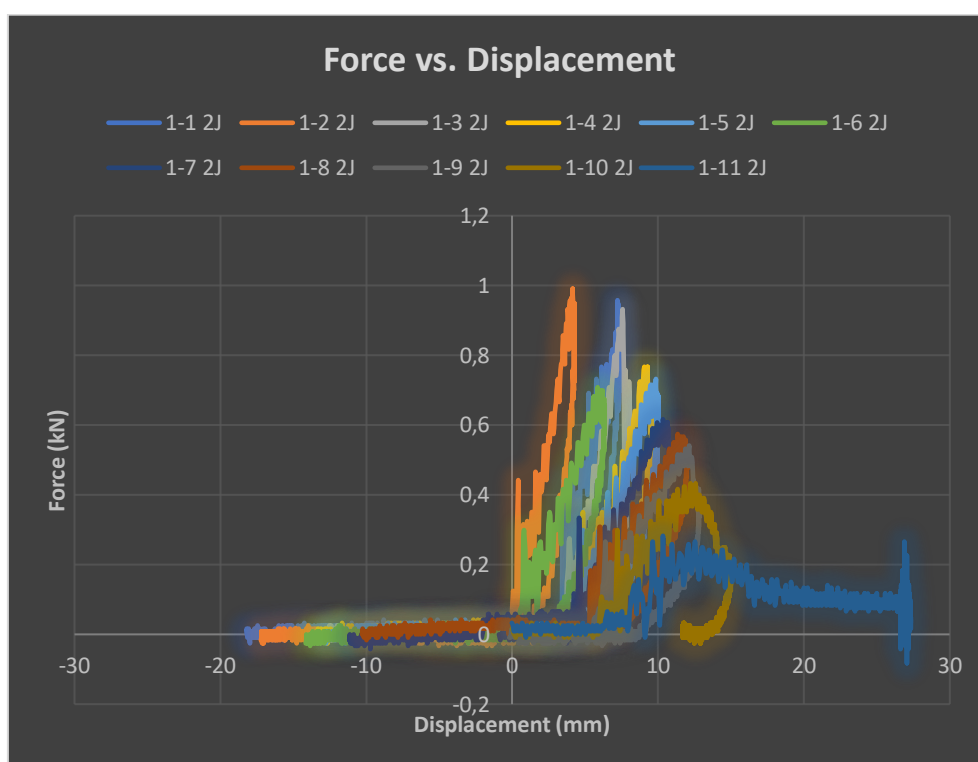


Figura 31 - Gráfico de 1º provete a 2J (Força/Deslocamento)

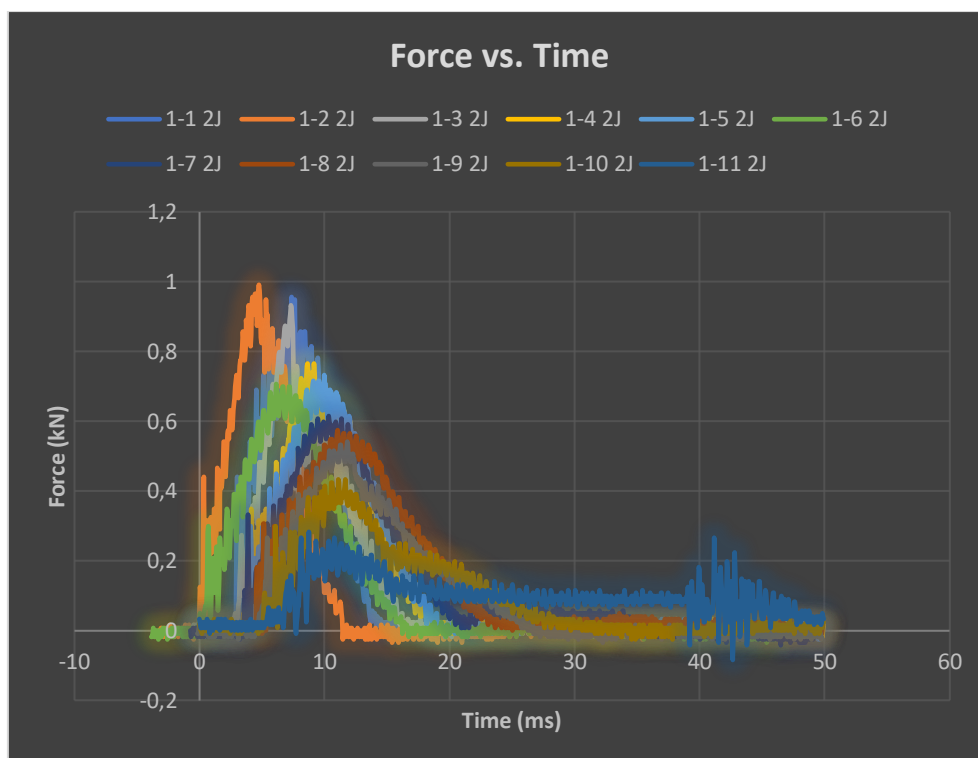


Figura 32 - Gráfico de 1º provete a 2J (Força/Tempo)

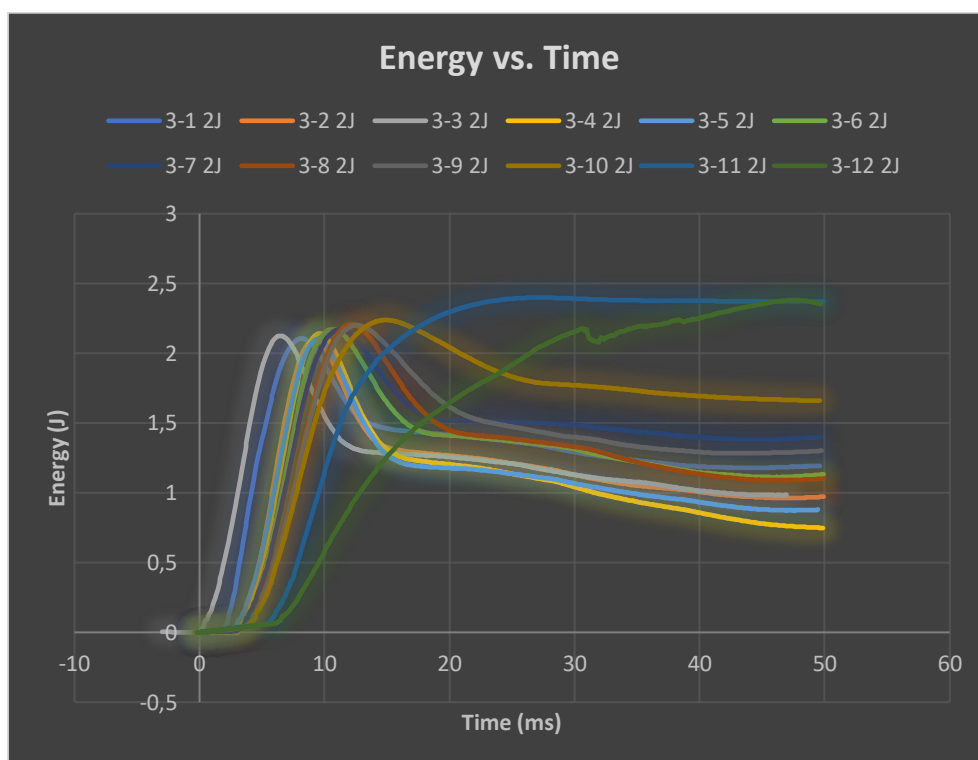


Figura 33 - Gráfico de 3º provete a 2J (Energia/Tempo)

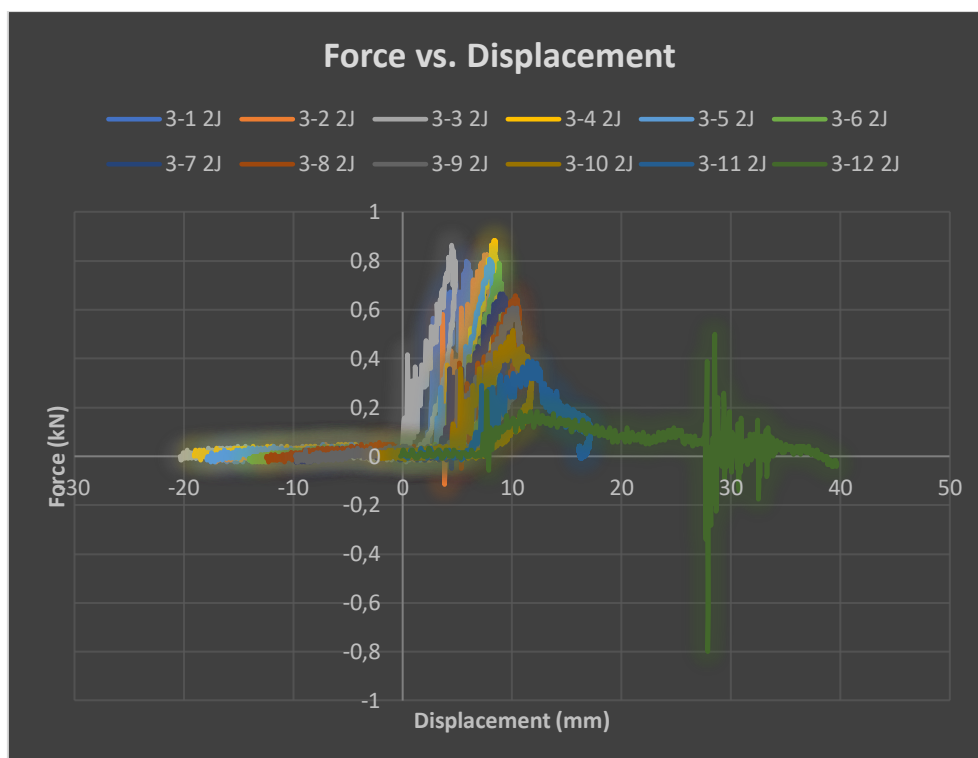


Figura 34 - Gráfico de 3º provete a 2J (Força/Deslocamento)

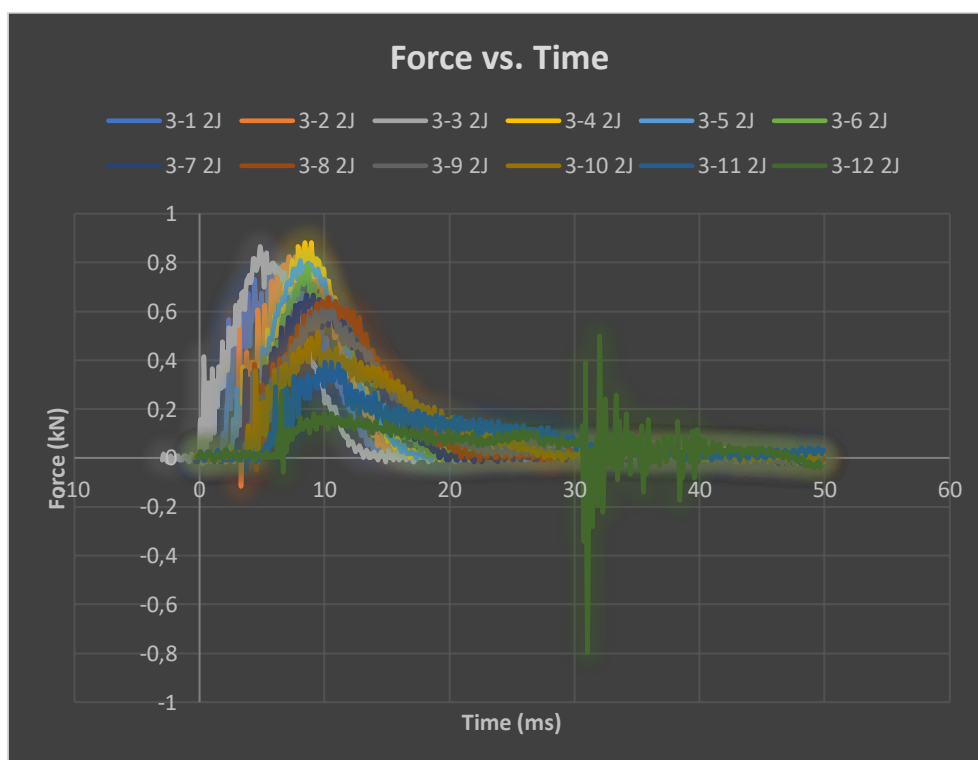


Figura 35 - Gráfico de 3º provete a 2J (Força/Tempo)

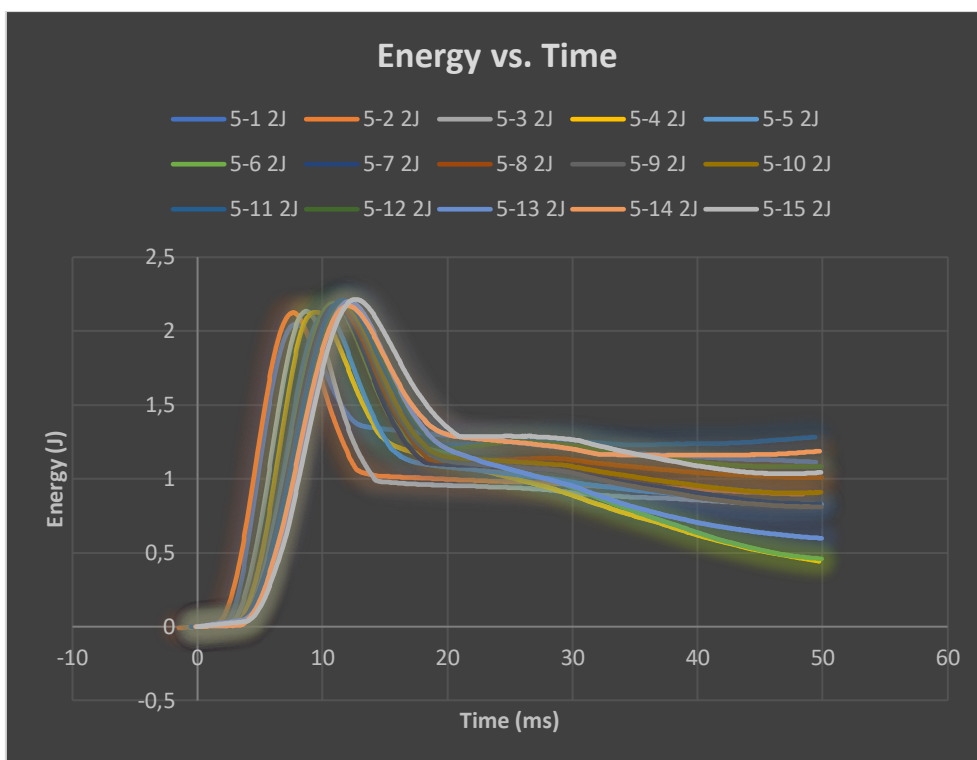


Figura 36 - Gráfico de 5º provete a 2J, parte 1 (Energia/Tempo)

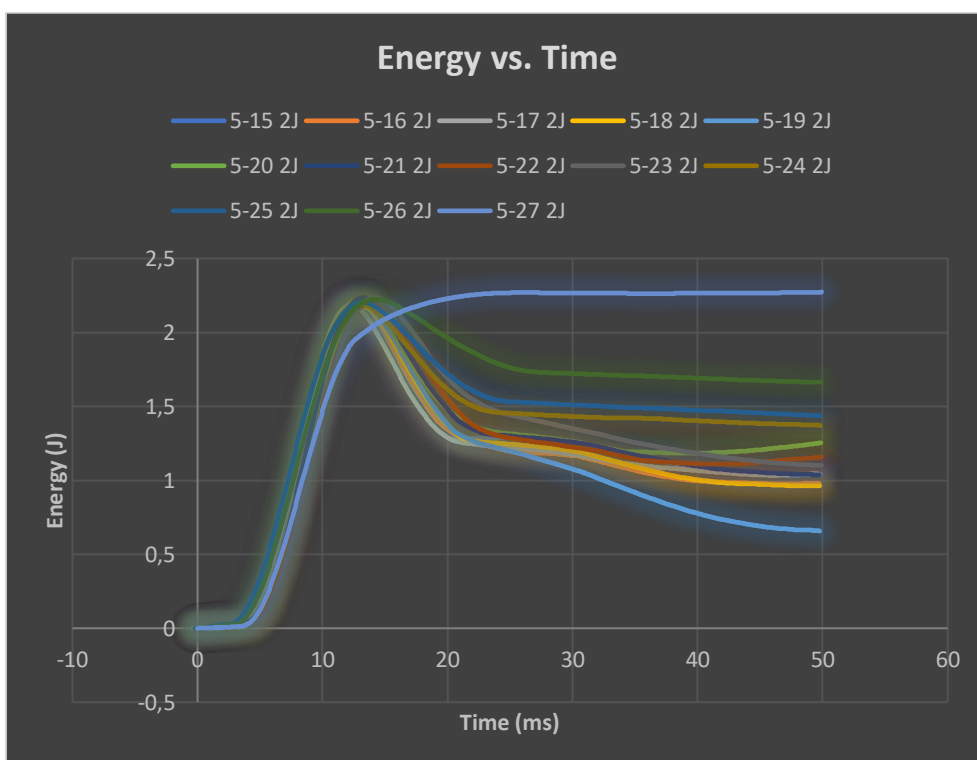


Figura 37 - Gráfico de 5º provete a 2J, parte 2 (Energia/Tempo)

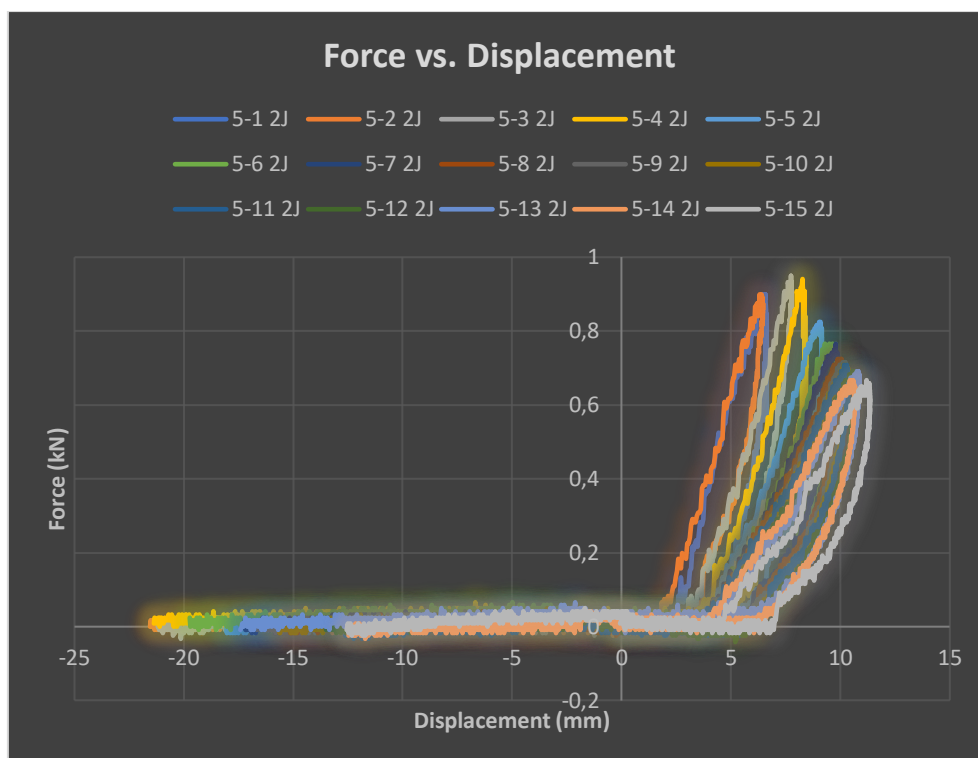


Figura 38 - Gráfico de 5º provete a 2J, parte 1 (Força/Deslocamento)

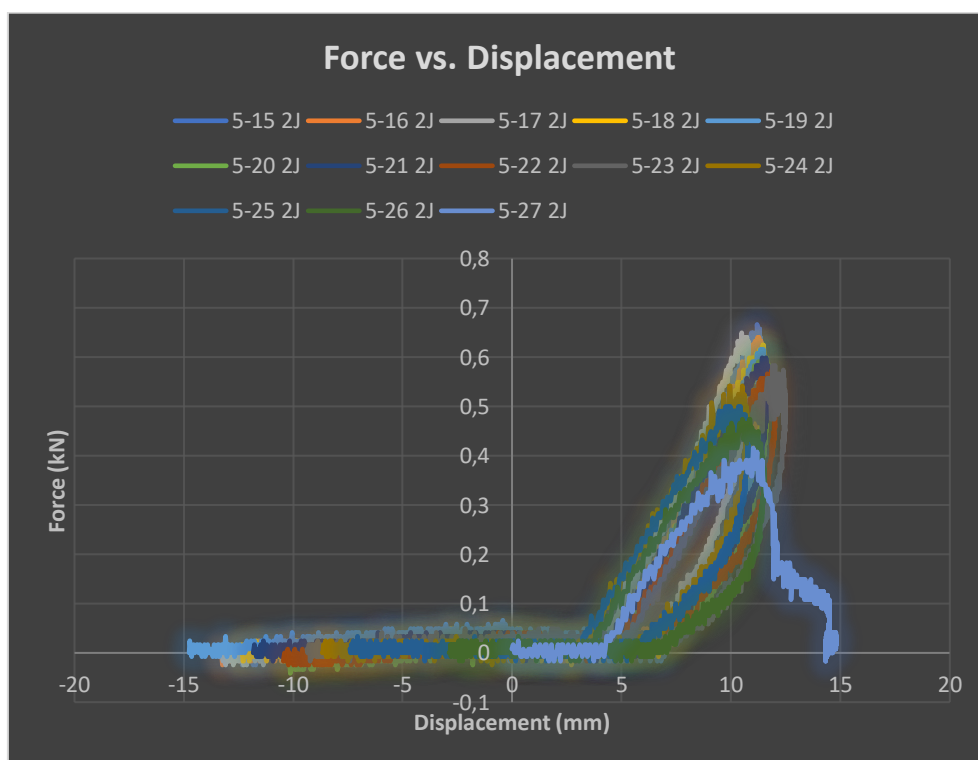


Figura 39 - Gráfico de 5º provete a 2J, parte 2 (Força/Deslocamento)

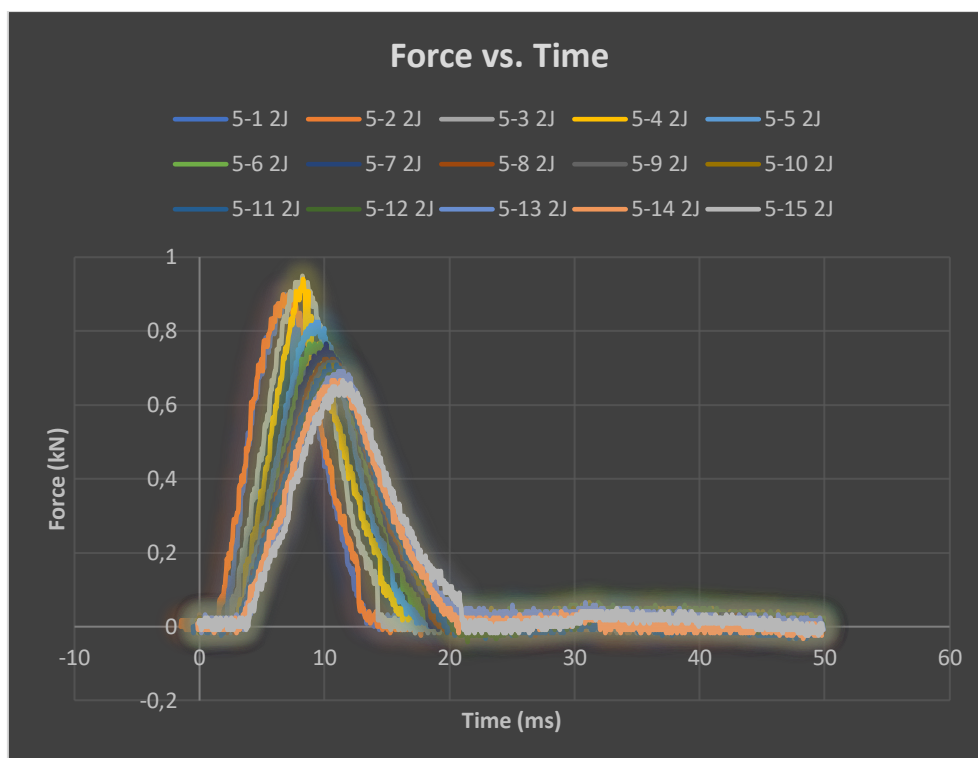


Figura 40 - Gráfico de 5° provete a 2J, parte 1 (Força/Tempo)

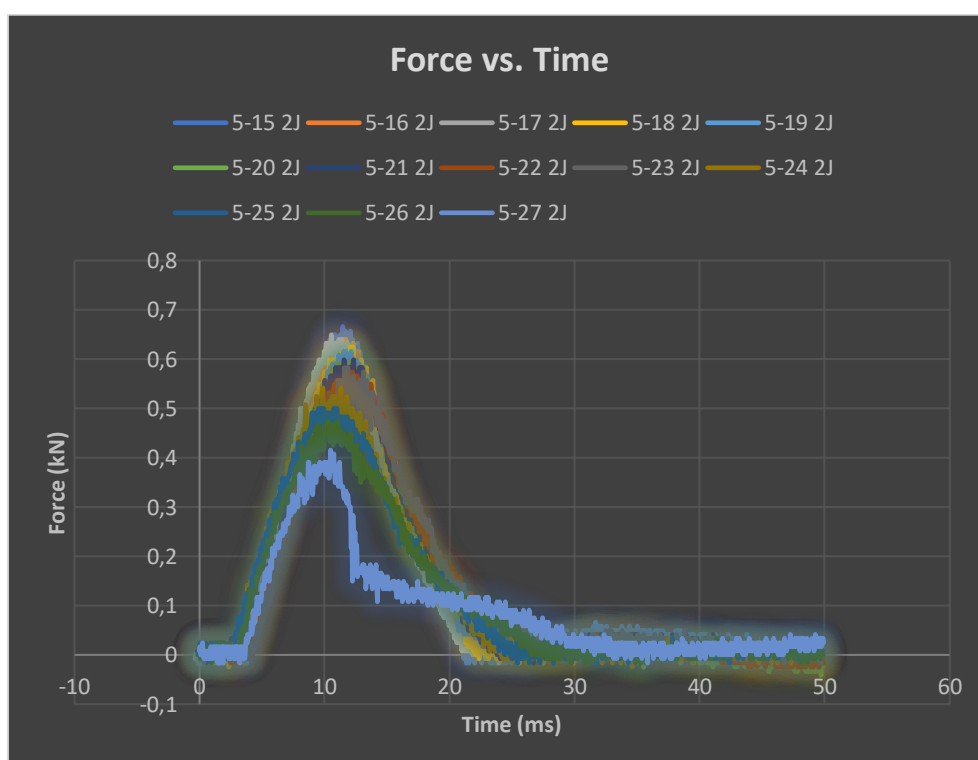


Figura 41 - Gráfico de 5° provete a 2J, parte 2 (Força/Tempo)

Ensaio a 2J	Provet 1	Provet 3	Provet 5
Quant. De Impactos	11	12	27
F _{máx} (kN)	0,990883291	0,882635534	0,949249566
E _{máx} (J)	2,697207689	2,39831686	2,273846626

É possível observar que para 2J, a força mais elevada foi de aproximadamente 1kN, e a mínima de aprox. 0,88kN, consistentes com os valores obtidos com os outros valores de energia ensaiados, de 4J e 6J.

8. Conclusão

O fabrico aditivo é ainda uma tecnologia emergente, em constante evolução, tornando impossível adivinhar as possibilidades que irão ser abertas por esta tecnologia. No entanto, é já reconhecida a sua importância na indústria e a sua capacidade de resolução de problemas, que até hoje requeriam meios consideráveis. Esta tecnologia permite contruir ferramentas ou outros objetos a partir de uma matéria-prima que é facilmente armazenável e transportável. A complexidade técnica do processo é extraordinariamente simples. Garantidamente esta tecnologia acompanhará o ser humano quando este tiver que explorar novos mundos.

É também de reconhecer que o fabrico aditivo de baixo custo, maioritariamente presente na tecnologia FDM e mais recentemente também a SLA/DLP. Dada a sua profusão e evolução previsível vai alterar a forma como é pensada a oferta de vários equipamentos.

Foram efetuados ensaios de impacto que mostram que a resistência deste tipo de peças começa a ter características que permitem uma aplicação direta. Os resultados obtidos nos ensaios de impacto, permitiram obter valores de resistência de peças obtidas por impressão 3D em FDM. Apesar de não estar incluído no relatório foi também, possível observar o efeito do impacto vs os defeitos de fabrico, como é o caso de zonas de sub ou sobre extrusão, ou a delaminação das camadas de material. O reduzido número de provetes e de defeitos não permitiu um estudo sistemático da sua influência.

A pesquisa efetuada sobre as diferentes tecnologias e as suas capacidades, bem como a utilização e processamento de materiais, a utilização dos diferentes *slicers* promoveram um enriquecimento dos conhecimentos na utilização dos equipamentos e produção de peças com recurso a estas novas tecnologias.

9. Bibliografia/Webgrafia

- 3D PRINT UK. (25 de Outubro de 2020). *3D Printed Low Volume Batch Production Runs | 3D PRINT UK*. Obtido de 3D PRINT UK: <https://www.3dprint-uk.co.uk/3d-printed-low-volume-batch-production-runs/>
- Edelkrone. (20 de Outubro de 2020). *Ortak 3D Printable Products: Edelkrone EU*. Obtido de Edelkrone EU webstore: <https://edelkrone-eu.com/collections/ortak>
- Makerbot. (20 de Outubro de 2020). *Jewellery Hand by vicentegasco*. Obtido de Thingiverse: <https://www.thingiverse.com/thing:670161>
- Makerbot. (25 de Outubro de 2020). *Skull Bowl by westers47*. Obtido de Thingiverse: <https://www.thingiverse.com/thing:3899573>
- OpenBionics. (25 de Outubro de 2020). *Open Bionics - turning disabilities into superpowers*. Obtido de Open Bionics - turning disabilities into superpowers: <https://openbionics.com/>
- Prusa Research. (25 de Outubro de 2020). *3D printed face shields for medics and professionals - Prusa3D - 3D Printers from Josef Průša*. Obtido de Prusa3D - Open-Source 3D printers by Josef Prusa: <https://www.prusa3d.com/covid19/>
- Relvas, C. (2018). *O mundo da Impressão 3D e o Fabrico Digital*. Porto: Quântica Editora - Conteúdos Especializados, Lda.
- Ultimaker. (25 de Outubro de 2020). *Applications – 3D printing uses with Ultimaker*. Obtido de Professional 3D printing made accessible | Ultimaker: <https://ultimaker.com/applications>