

Sistema de melhoria da adesão entre camadas na impressão tridimensional de termoplásticos

João Ferreira Lima

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Professor Fernando Gomes de Almeida

Orientador no INEGI: Engenheiro João Paulo Pereira



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Setembro de 2017

Ao futuro eu, não deixes de aprender!

Resumo

Na impressão tridimensional por deposição fundida diversas são as causas que conduzem a uma elevada anisotropia das peças impressas, mau acabamento superficial e ainda baixa precisão geométrica. Estes problemas ganham proporções muito maiores quando a utilização de termoplásticos de alto desempenho para melhoria da qualidade dos objetos impressos é posta em prática.

Esta dissertação identifica esses problemas e, com vista a ultrapassá-los principalmente na utilização de termoplásticos de alto desempenho, inicia o estudo de desenvolvimento de um sistema adicional à impressão tridimensional por deposição fundida que melhore a adesão entre camadas.

O método de melhoria da adesão entre camadas pretende resolver alguns dos problemas da impressão tridimensional por deposição fundida e consiste na aplicação de um tratamento nas camadas já impressas de tal modo que permita uma melhor adesão das camadas a serem sobre estas depositadas.

Dos vários tratamentos possíveis analisados nesta dissertação são seleccionados dois. O primeiro é a incidência de um feixe de laser no ponto imediatamente anterior ao ponto de extrusão de uma nova camada, de forma contínua no processo de impressão, por forma a aumentar a temperatura da camada já impressa. O segundo é a ativação da superfície já impressa com a utilização de plasma frio, ou gás altamente ionizado, de tal modo que as propriedades hidrofílicas do termoplástico possam ser melhoradas, permitindo a melhoria da adesão entre camadas.

São propostas quatro alternativas de implementação dos processos mencionados anteriormente, após o estudo das condicionantes a ter em conta na impressão por deposição fundida numa impressora com o extrusor móvel nos dois eixos paralelos à base e com a base móvel no eixo vertical, ou de impressão.

Das quatro alternativas, duas são seleccionadas de tal modo que, com a possibilidade de implementação conjunta, permitam que o processo de deposição fundida não tenha tantas limitações de qualidade mesmo trabalhando com termoplásticos de alto desempenho que exigem condições de operação mais restritas e exigentes.

Layer adhesion-improving systems for the three-dimensional printing of thermoplastics

Abstract

In three-dimensional printing by fused deposition there are several causes that result in high anisotropy of the printed parts, poor surface finish and quality and also low geometric precision. These problems become much larger when the use of high performance thermoplastics to improve the quality of printed objects is put into practice.

This thesis identifies these problems and, in order to overcome them mainly in the use of high-performance thermoplastics, begins the study for the development of a layer adhesion-improving system.

The method of improving adhesion between layers is intended to solve some problems of three-dimensional printing by fused deposition and consists in the application of a treatment to the layers already printed in such a way as to allow a better adhesion of the layers to be deposited.

Of the various possible treatments analyzed in this thesis two were selected. The first one is the incidence of a laser beam at a point just before the point of deposition of a new layer, continuously in the printing process, increasing the temperature of the already printed layer. The second is the activation of the surface already printed with the use of cold plasma or highly ionized gas such that the hydrophilic properties of the thermoplastic can be improved allowing increased adhesion between layers.

Four implementation alternatives of the processes mentioned above are proposed after the study of the factors to be taken into account in printing by fused deposition on a printer with the movements of the extruder in the two axes parallel to the base and with the base movement in the vertical axis, or printing axis.

Of the four alternatives, two are selected in such a way that, with the possibility of simultaneous implementation, they allow the fused deposition process not to have so many print quality limitations even when working with high performance thermoplastics that require more restricted and demanding operating conditions.

Agradecimentos

Agradeço a todas as pessoas do setor de desenvolvimento de produto do INEGI, em particular ao Eng. João Paulo Pereira, meu coorientador, pelas ideias objetos de reflexão e apoio.

Agradeço a todos os docentes da FEUP que me acompanharam, especialmente ao Professor Fernando Gomes de Almeida, meu orientador, por todo o suporte durante este processo.

Agradeço ainda aos meus companheiros de curso com os quais partilhei esta caminhada, pela amizade e entreaajuda.

Em especial agradeço aos meus pais, irmãos, avós e tias pelos ensinamentos, ânimo e afeto durante esta jornada.

Por último um agradecimento enorme à minha namorada pela paciência e dedicação.

Esta dissertação de mestrado foi desenvolvida no âmbito do projeto com a referência POCI-01-0145-FEDER-016414, cofinanciado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização e pelo Programa Operacional Regional de Lisboa, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e por Fundos Nacionais Através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do projeto	1
1.2	Motivação	2
1.3	A impressão tridimensional e o INEGI	3
1.4	Objetivos do projeto	4
1.5	Método seguido no trabalho	5
1.6	Estrutura da dissertação	5
2	A impressora 3D FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial, os termoplásticos de alto desempenho e as problemáticas da sua utilização	6
2.1	Impressora 3D FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial	6
2.2	Termoplásticos de alto desempenho	6
2.3	Problemas da impressão tridimensional de termoplásticos de alto desempenho	7
3	Tratamento de superfícies em FDM	10
3.1	Métodos de tratamento de superfícies	11
3.1.1	Lasers	11
3.1.2	Radiação infravermelha	15
3.1.3	Plasma frio	15
3.1.4	Vibração por ultrassons	18
3.2	Interação dos métodos de tratamento com os polímeros	18
3.2.1	Lasers	18
3.2.2	Plasma frio	19
3.3	Sistemas adicionais à impressão tridimensional e resultados	20
3.3.1	Aquecimento prévio à deposição com laser	20
	Parâmetros e características da abordagem	22
	Impressão, provetes e ensaios	23
	Resultados	24
	Ilacões desta abordagem	26
3.3.2	Tratamento de polímeros com plasma frio	27
	Caracterização dos ensaios	27
	Tratamento de polipropileno (PP)	29
	Tratamento de politereftalato de etileno (PET)	30
	Ilacões desta abordagem	32
3.3.2	FuseBox da empresa Essentium	32
	O mecanismo	32
	O material	33
	Resultados do sistema	33
	Ilacões desta abordagem	33
3.4	Patentes de tratamento de superfícies	33
4	Propostas de sistemas de melhoria da adesão entre camadas na impressão tridimensional	36
4.1	Avaliação das condicionantes das impressoras FDM	36
4.2	Sistema de aquecimento das camadas por laser direcionado em fibra ótica	38
4.2.1	Hipótese de múltiplas fibras	39
4.2.2	Hipótese de orientação de fibra(s) com um motor giratório	42
4.3	Sistema de aquecimento das camadas por laser com reflexão do feixe	46
4.4	Sistema de preparação das camadas por plasma frio aquando da impressão	52
4.5	Sistema de preparação das camadas por plasma frio em intervalos da impressão	54
5	Conclusões da dissertação e perspectivas de desenvolvimento	56
5.1	Conclusões	56
5.2	Trabalhos futuros	57
	Referências	58

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Esquema da arquitetura de uma impressora por deposição fundida.....	1
Figura 1.2 - Esquema da formação de camadas na impressão por deposição fundida (esquerda) e exemplos de impressões tridimensionais (direita) (Airwolf 3D Printers 2017)	1
Figura 1.3 - Impressão do mesmo objeto com velocidades de impressão, temperaturas e dimensão do orifício do extrusor diferentes	3
Figura 1.4 - Desenho em SolidWorks da 3D FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial	4
Figura 2.1 - Gamas de temperatura de operação dos termoplásticos comuns na impressão tridimensional e dos de alto desempenho (Moreira 2016)	7
Figura 2.2 - Efeito dos gradientes de temperatura no processo de impressão.....	8
Figura 2.3 - Efeito dos gradientes de temperatura no processo de impressão.....	8
Figura 2.4 - Efeito do mau acabamento superficial na impressão tridimensional.....	9
Figura 3.1 - Esquema de uma impressora FDM.....	10
Figura 3.2 - Utilização de lasers na soldadura de plásticos (LPKF laser & Electronics 2016) ..	11
Figura 3.3 - Esquema da passagem de um laser na união de dois termoplásticos.....	11
Figura 3.4 - Esquema da reflexão de um feixe de luz	12
Figura 3.5 - Esquema da refração de um feixe de luz	12
Figura 3.6 - Polarização de um feixe laser. Esquemas obtidos com a utilização do GnuPlot..	13
Figura 3.7 - Esquema do ângulo de Brewster.....	13
Figura 3.8 - Esquema do processo de geração de laser de fibras óticas	14
Figura 3.9 - Esquema dos dispositivos de formação de plasma frio. (Nishume 2015)	16
Figura 3.10 - Esquemática dos jatos com elétrodos sem revestimento dielétrico (Nishume 2015)	16
Figura 3.11 – Representação esquemática dos jatos de plasma DBD (Nishume 2015).....	17
Figura 3.12 – Representação esquemática dos jatos de plasma tipo corona ou jatos de eletrodo único (Nishume 2015)	18
Figura 3.13 - Temperaturas de fusão e de decomposição dos termoplásticos de alto desempenho	19
Figura 3.14 – Esquema do ângulo de contacto de uma gota com uma superfície hidrófoba (esquerda) e hidrófila (direita).....	20
Figura 3.15 - Esquema da utilização de um processo adicional à impressão tridimensional de aquecimento prévio por laser (Ravi <i>et al.</i> 2016)	21
Figura 3.16 - Esquema da impressão dos provetes (Ravi <i>et al.</i> 2016)	22
Figura 3.17 - Esquema do ensaio de flexão em 3 pontos (Ravi <i>et al.</i> 2016).....	23
Figura 3.18 - Resultados dos ensaios de resistência à flexão para diferentes velocidades do extrusor (Ravi <i>et al.</i> 2016).....	24
Figura 3.19 - Imagens microscópicas do ponto de rutura dos provetes (Ravi <i>et al.</i> 2016)	25
Figura 3.20 - Gráfico de resultados e imagens comparativas do processo com e sem laser (Ravi <i>et al.</i> 2016).....	26

Figura 3.21 - Construção de uma configuração estilo corona de tratamento de superfícies com plasma frio (Nishume 2015).....	27
Figura 3.22 - Caracterização das descargas elétricas aplicadas (Nishume 2015)	28
Figura 3.23 - Fotografia da aplicação do tratamento de plasma frio com árgon e hélio (Nishume 2015).....	28
Figura 3.24 - Esquema do padrão de exposição da amostra ao plasma frio (Nishume 2015)..	29
Figura 3.25 - Imagens microscópicas da superfície das amostras de PP (Nishume 2015).....	29
Figura 3.26 - O efeito do tempo de exposição com utilização de árgon na hidrofília da superfície medida pelo ângulo de contato (Nishume 2015).....	30
Figura 3.27 - Resultados dos tratamentos de superfícies de PET com plasma frio de árgon. (Nishume 2015).....	30
Figura 3.28 - Resultados dos tratamentos de superfícies de PET com plasma frio de hélio (Nishume 2015).....	31
Figura 3.29 - Efeito do tempo decorrido após o tratamento da superfície de PET (Nishume 2015).....	31
Figura 3.30 - Descargas elétricas na impressão tridimensional utilizando a tecnologia da FuseBox (Essentium 2017).....	32
Figura 3.31 - Equipamento FuseBox. (Essentium 2017).....	33
Figura 4.1 - Esquema de preparação ou aquecimento da camada inferior no processo de impressão tridimensional por FDM.....	36
Figura 4.2 - Plano de movimentação horizontal do extrusor da impressora 3D FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial.....	37
Figura 4.3 - Vista mais pormenorizada do plano horizontal do extrusor da impressora 3D FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial.....	37
Figura 4.4 - Laser DLM50 da IPG Photonics (IPG photonics Corporation 2017b).....	38
Figura 4.5 - Passa-cabos do extrusor da impressora tridimensional Kühling&Kühling RepRap industrial (Moreira 2016).....	39
Figura 4.6 - Esquema da utilização de fibras óticas transportadoras do feixe laser	39
Figura 4.7 - Comutador de um feixe laser para 4 canais (IPG photonics Corporation 2017b)	40
Figura 4.8 - Colimador de feixe de laser (IPG photonics Corporation 2017b)	40
Figura 4.9 – Esquema de ativação dos pontos de incidência do feixe laser em torno do ponto de extrusão, consoante a direção de impressão	41
Figura 4.10 - Grafcet comportamental da hipótese de múltiplas fibras em torno do ponto de extrusão.....	42
Figura 4.11 - Motor passo a passo da IGUS (Igus 2017)	43
Figura 4.12 - Estrutura e mecanismo de rotação da fibra em torno do ponto de extrusão	43
Figura 4.13 - Estrutura e mecanismo de rotação da fibra em torno do ponto de extrusão acoplados ao extrusor	44
Figura 4.14 - Grafcet comportamental da hipótese de uma fibra e um motor giratório em torno do ponto de extrusão.....	45
Figura 4.15 - Esquema da utilização de 4 lasers.....	46

Figura 4.16 - Esquema representativo do funcionamento de um laser galvanométrico.....	47
Figura 4.17 - Esquema de direcionamento do feixe do laser para 4 pontos diferentes por meio de um eixo com espelhos.....	48
Figura 4.18 - Esquema da localização dos componentes da hipótese de utilização de um feixe laser e um veio de espelhos acoplado a um motor	48
Figura 4.19 - Impressão tridimensional da estrutura idealizada.....	49
Figura 4.20 - Desenho em SolidWorks do acoplamento do suporte dos espelhos e da cabeça de deposição	49
Figura 4.21 - Vista em corte e lateral do suporte de espelhos com esquema de reflexão dos feixes.....	49
Figura 4.22 - Desenho em SolidWorks do acoplamento do suporte dos espelhos e da cabeça de deposição	50
Figura 4.23 - Desenho em SolidWorks do acoplamento do suporte dos espelhos, da cabeça de deposição e do veio de espelhos acoplado a um motor	50
Figura 4.24 - Desenho em SolidWorks do acoplamento do suporte dos espelhos, da cabeça de deposição e do veio de espelhos acoplado a um motor	51
Figura 4.25 - Grafcet comportamental da solução do suporte dos espelhos, da cabeça de deposição e do veio de espelhos acoplado a um motor	51
Figura 4.26 - Esquema da utilização de plasma frio.....	52
Figura 4.27 - Esquema de montagem dos aparelhos constituintes do sistema de geração de plasma frio	53
Figura 4.28 - Fotografia do gerador de plasma PlasmaBeam Standard da Diener Electronic (Electronic 2017).....	54
Figura 4.29 - Grafcet comportamental da solução de ativação da superfície com plasma frio em intervalos de impressão de camadas	55

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades de termoplásticos de alto desempenho (Moreira 2016).....	6
Tabela 3.1 - Energia de ligações moleculares nos polímeros (Santos 2010)	19
Tabela 3.2 - Parâmetros do processo de impressão utilizados na abordagem (Ravi <i>et al.</i> 2016)	22
Tabela 3.3 - Tabela comparativa de propriedades de dois termoplásticos, um comum e outro de alto desempenho	23
Tabela 3.4 - Características dos ensaios de plasma frio (Nishume 2015)	27
Tabela 4.1 - Características principais do laser DLM50 da IPG Photonics (IPG photonics Corporation 2017a).....	38
Tabela 4.2 - Características principais do motor passo a passo NEMA11 da IGUS (Icus 2017)	43
Tabela 4.3 - Características principais do PlasmaBeam Standard da Diener Electronic (Electronic 2017).....	53

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projeto

As impressoras tridimensionais por deposição fundida são utilizadas para a produção de peças de dimensões diversas, todo o tipo de geometrias e de vários tipos de materiais pela sobreposição de camadas depositadas com um extrusor.

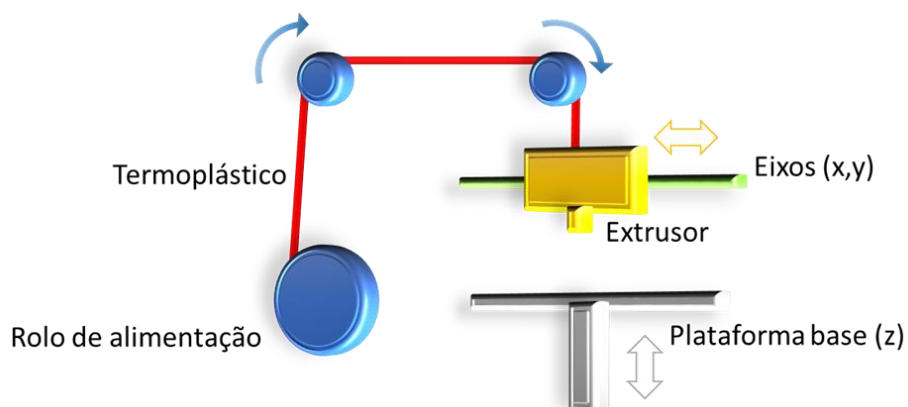


Figura 1.1 - Esquema da arquitetura de uma impressora por deposição fundida

No processo de impressão tridimensional por deposição fundida a temperatura do extrusor é controlada de modo a que o termoplástico atinja a temperatura de fusão para que possa ser extrudido pela cabeça de deposição.



Figura 1.2 - Esquema da formação de camadas na impressão por deposição fundida (esquerda) e exemplos de impressões tridimensionais (direita) (Airwolf 3D Printers 2017)

As sucessivas deposições de filamentos de termoplásticos formam uma camada e as contínuas deposições de camadas formam a peça.

A utilização destas máquinas vem dar uma resposta mais rápida do que a produção convencional, por moldação, por exemplo, e com um melhor rácio custo-benefício para diversas áreas da indústria, bem como ao nível do consumidor final. Para indústrias, como a aeroespacial, as impressoras 3D têm uma grande utilidade uma vez que podem ser utilizadas para imprimir componentes simples como guias e objetos de fixação e assim reduzir o custo e tempo de produção. Sendo que a principal matéria utilizada são termoplásticos, a utilização deste método de produção veio também reduzir o peso das peças que são impressas sendo essa vantagem bastante grande tanto a nível de peso da estrutura como no transporte das peças.

A produção de moldes utilizando a impressão 3D permite passar da conceção virtual, do design, à parte real do molde e da respetiva peça em muito menos tempo. Também a própria produção de peças em impressão por deposição fundida permite a passagem do design para a prototipagem e consequente produção em muito menos tempo.

A produção de suportes que permitam aumentar a complexidade das peças impressas, comparando com a produção por outros meios, é outra das muitas funcionalidades exequíveis com uma impressora tridimensional. A utilização de materiais que suportam as condições de temperatura a que são sujeitos os moldes permite reduzir os custos, tempos de produção e desperdícios.

A redução do tempo, a simplicidade, a inovação e a possibilidade de customização na utilização destas impressoras permite um avanço enorme do fabrico de componentes.

Na área da saúde a produção de próteses por impressão tridimensional é um avanço na medicina que permite a recriação de ossos, dentes e outras partes do corpo.

Este trabalho decorreu no INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial enquadrado numa abordagem ao conjunto de problemas que têm origem na utilização de termoplásticos de alto desempenho como matéria-prima de impressão tridimensional.

1.2 Motivação

Para o processo de impressão tridimensional por deposição fundida podemos contar com uma panóplia de plásticos com diferentes propriedades. Os principais fatores que distinguem a escolha dos diferentes termoplásticos são as temperaturas de fusão e de decomposição, densidade, dureza, módulo de Young, tensões de cedência e de rotura máximas.

A constante e crescente procura por materiais de qualidade superior na indústria obrigam à utilização de plásticos de elevado desempenho mecânico. Estes têm temperaturas de fusão e de decomposição bastante próximas que obrigam a que se necessite controlar a temperatura do extrusor com uma precisão superior.

Vários são os problemas associados à impressão tridimensional de termoplásticos de alto desempenho como a falta de precisão geométrica das peças impressas, existência de elevados gradientes de temperatura durante a impressão, fraca fixação à base de impressão, anisotropia da peça e mau acabamento superficial. A solução de um ou mais destes problemas tende a prejudicar outro.

Os vários parâmetros de impressão, como a temperatura de extrusão, dimensão do extrusor e velocidade de impressão podem ser variados, culminando em objetos de características diferentes para os mesmos comandos de impressão como podemos observar na figura 1.3.

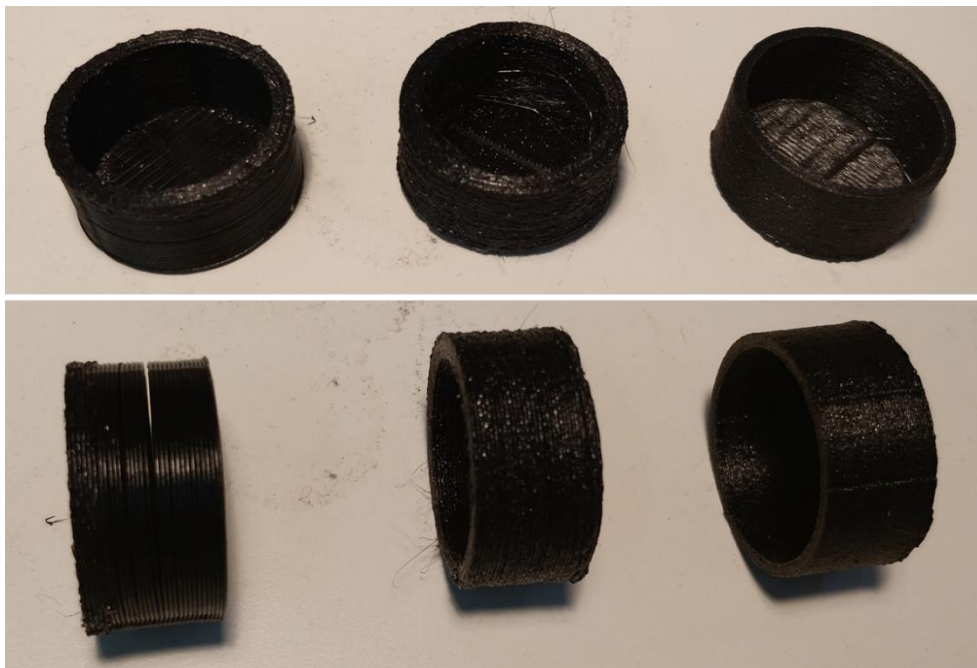


Figura 1.3 - Impressão do mesmo objeto com velocidades de impressão, temperaturas e dimensão do orifício do extrusor diferentes

Na figura 1.3 pode-se observar que os parâmetros que causam um melhor acabamento superficial no objeto da esquerda contribuem para a fraca adesão entre camadas e inclusive a formação de um defeito de junção nas camadas.

Combater os problemas de deficiente adesão entre camadas que ocorre com a utilização de termoplásticos de alto desempenho na impressão tridimensional por deposição fundida é a principal motivação deste trabalho.

1.3 A impressão tridimensional e o INEGI

No INEGI há um crescente desenvolvimento de atividades de investigação em diversas áreas do mercado e sectores de atividade industrial que caminham no sentido da inovação e renovação das tecnologias utilizadas. O instituto conta com mais de 25 anos de experiência em projetos com empresas e em consórcios nacionais e internacionais.

No setor de Desenvolvimento do Produto do INEGI existem equipas multidisciplinares de projeto com vista a solucionar os problemas do desenvolvimento de produtos que integram várias especialidades tecnológicas de engenharia e de produção

O INEGI procura, portanto, para os seus projetos, a vertente de Desenvolvimento de Produto e uma abordagem metodológica relacionada fortemente com a Engenharia Mecânica.

A equipa de Desenvolvimento de Produto tem ao seu dispor vários equipamentos de impressão tridimensional, entre eles, e utilizando a tecnologia *Fused Deposition Modelling* (FDM), a Impressora 3D FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial.

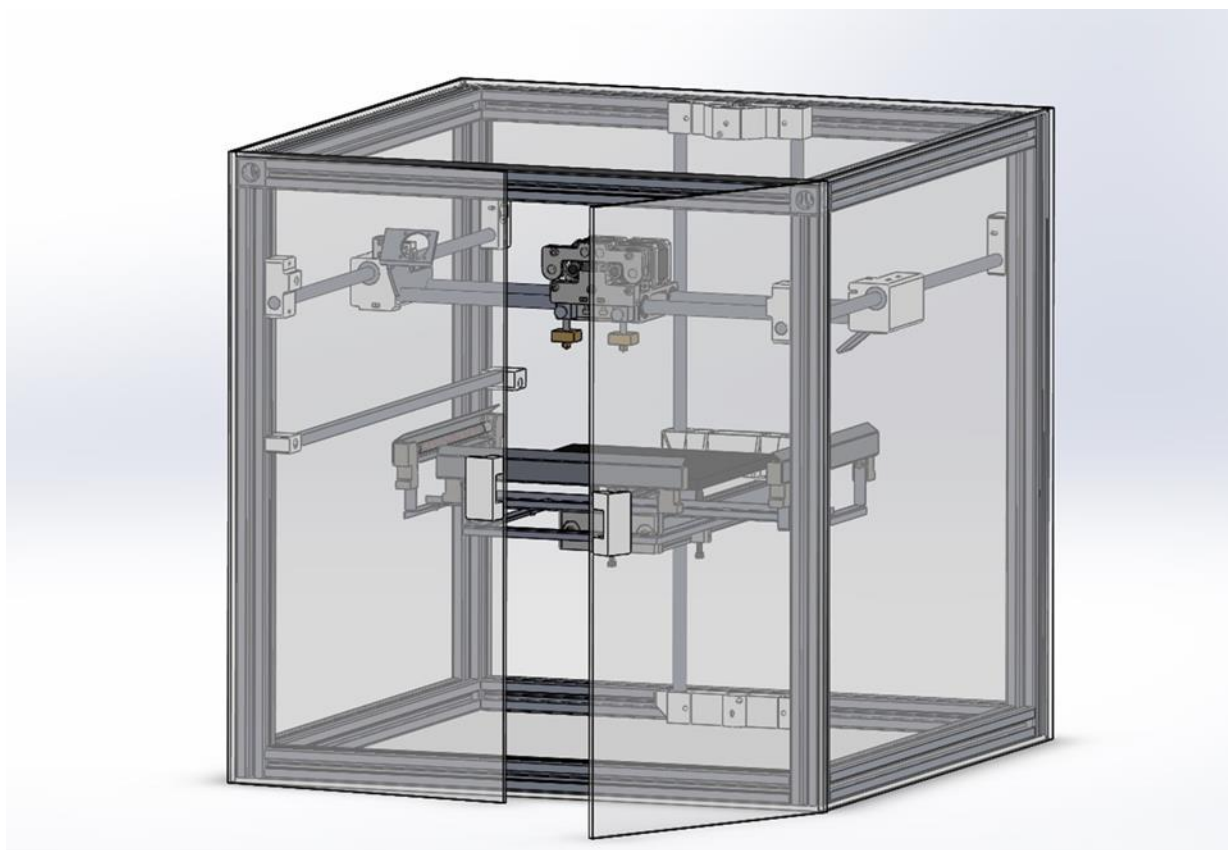


Figura 1.4 - Desenho em SolidWorks da 3D FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial

É para esta impressora e para este tipo de impressão que o INEGI pretende a conceção de um sistema de melhoria da adesão entre camadas.

Para a realização desta dissertação existe então a impressora tridimensional presente no INEGI, Impressora 3D FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial, como alvo de implementação do sistema. No entanto é desejável que o sistema a desenvolver seja facilmente adaptável a outras impressoras de deposição fundida.

1.4 Objetivos do projeto

Este trabalho tem por objetivo produzir um estudo sobre sistemas adicionais à impressão tridimensional que possibilitem uma melhor adesão de camadas no momento de adicionar uma nova camada à anteriormente depositada.

Esta junção de camadas influenciará as propriedades mecânicas da peça final com vista a atingir melhores níveis de resistência mecânica, tolerâncias dimensionais, acabamento das superfícies, bem como a previsibilidade e uniformidade de todas estas características.

O sistema pretendido terá de ser capaz de preparar a peça já depositada para a adição de uma nova camada. Esta preparação tem como finalidade melhorar a ligação entre camadas influenciando o material já extrudido e arrefecido ou o material a ser depositado. A preparação pode ser alcançada pelo aumento de temperatura ou tratamento superficial das camadas já depositadas.

1.5 Método seguido no trabalho

A conceção de um sistema engloba todo um estudo sobre os pontos em questão, que, para o caso desta dissertação, abrangem o processo de impressão tridimensional por deposição fundida, o processo de preparação das camadas já depositadas, seja por aquecimento ou tratamento, e a forma de implementação desse processo.

Primeiramente é efetuado um estudo que permite um enquadramento na realidade atual da área da impressão tridimensional por FDM. Seguidamente decorre uma especificação do estudo sobre os potenciais mecanismos de aquecimento ou preparação das camadas já impressas para melhorar a adesão de novas camadas.

Após a seleção dos processos o caminho a seguir passa pela conceção do sistema em termos de projeto, com a sua idealização e criação para implementação. Depois de implementados os sistemas deverão ser testados com ensaios estruturais de peças realizadas com os diferentes sistemas por comparação com peças em que não se utilizou qualquer processo de melhoria da ligação entre camadas.

1.6 Estrutura da dissertação

A presente dissertação inclui 5 capítulos.

O primeiro, de introdução ao tema, que inclui um enquadramento da dissertação com a contextualização geral da impressão tridimensional, do processo de impressão por deposição fundida e o seu desenvolvimento.

O segundo capítulo debruça-se sobre a impressora em causa, a 3D FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial, os termoplásticos de alto desempenho e os problemas levantados com a sua utilização.

O terceiro capítulo desta dissertação debruça-se sobre a revisão bibliográfica dos processos, técnicas e dispositivos a utilizar para o tratamento e preparação das camadas. São também apresentadas três soluções e os seus resultados: uma solução adicional à impressão tridimensional por deposição fundida, uma de tratamento da superfície de polímeros com plasma frio e uma de aumento da temperatura da peça já impressa por descargas elétricas.

No capítulo que se segue são estudadas as formas de implementação dos processos selecionados do terceiro capítulo bem como a avaliação das condicionantes de tal implementação. São ainda apresentadas propostas de sistemas de melhoria da adesão entre camadas na impressão tridimensional.

No último capítulo são apresentadas as conclusões da dissertação bem como as perspetivas da continuação do desenvolvimento deste trabalho.

2 A impressora 3D FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial, os termoplásticos de alto desempenho e as problemáticas da sua utilização

2.1 Impressora 3D FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial

Esta impressora contempla duas cabeças de deposição, geralmente uma para impressão da peça e outra para impressão dos suportes num material fácil de remover findo o processo de impressão. Os dois extrusores podem ser também utilizados para a impressão em duas ou mais cores distintas. A impressora é capaz de trabalhar com a câmara de impressão até 70 °C, aquecer a plataforma de impressão até 130 °C e os dois extrusores até 500 °C. Permite ainda um volume de impressão de 200x180x290 mm³, uma altura de camada de 0,05 mm a 0,6 mm e um diâmetro do extrusor de 0,25 mm a 0,75 mm. A impressora trabalha com velocidades do extrusor até 200 mm/s.

O extrusor desloca-se para a esquerda e para a direita num eixo acoplado a um suporte que se desloca para a frente e para trás num eixo fixo aos perfis da câmara de impressão. A mesa, ou suporte de impressão desloca-se para cima e para baixo num eixo fixo à câmara de impressão.

2.2 Termoplásticos de alto desempenho

É do interesse do INEGI que esta impressora trabalhe com termoplásticos de alto desempenho dado o elevado benefício das propriedades mecânicas destes materiais. Os pontos de fusão e de decomposição dos termoplásticos de alto desempenho são bastante próximos, ao contrário do que se verifica nos termoplásticos mais comuns como é possível observar na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Propriedades de termoplásticos de alto desempenho (Moreira 2016)

	Designação	Temp. de fusão [°C]	Temp. do extrusor [°C]	Temp. de decomposição [°C]	Densidade [g/cm ³]	Dureza [Shore D]	Módulo de Young [GPa]	Tensão de Cedência máxima [MPa]	Tensão de Rotura máxima [MPa]
PEEK	Poliéter éter cetona	343	395	400	1.3-1.48	84.5	3-9.5	95	213
PEI	Polieterimida (ULTEM)	350	380	420	1.27-1.51	79.5	3.2-9.5	105	164
PI	Poliimida	360	395	400	1.35-1.51	89	4-22.6	86.2	116
PAI	Poliamida-ímida	370	371	410	1.42-1.61	86-90	4.5-14.5	120	221
PPS	Polissulfeto de p-fenileno	280	340	370	1.4-1.51	86	3.7-14	105	185
PPSU	Polifenilsulfona	365	380	400	1.29	84	2.34	70	121
PPP	Poli-(para-fenileno)	346	350	400	1.21	23	8.3	207	207
PA 66	Poliamida (Nylon 66)	260	295	300	1.14	83	3.1	80	116

Esta proximidade de temperaturas dá origem a uma reduzida gama de temperaturas de operação no processo de impressão tridimensional. A temperatura do extrusor não pode permitir que o termoplástico atinja a temperatura de decomposição do termoplástico pois isso inviabilizaria as propriedades desejadas e o próprio material.

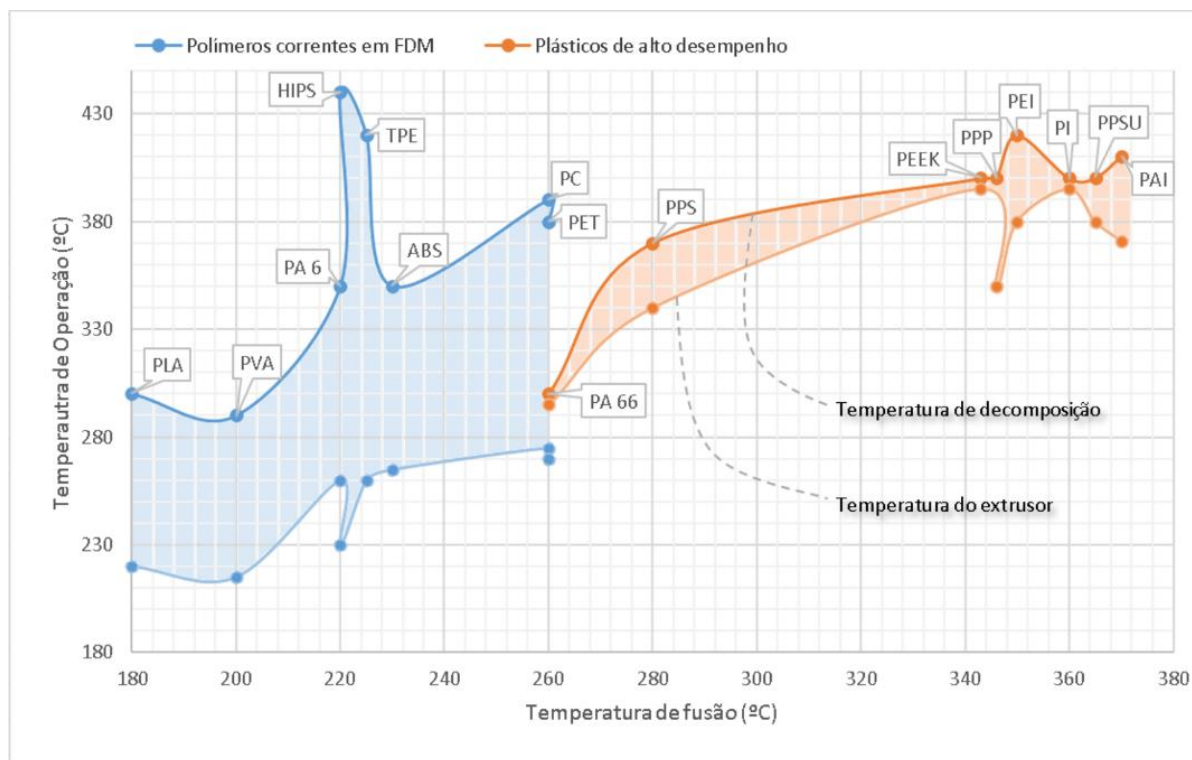


Figura 2.1 - Gamas de temperatura de operação dos termoplásticos comuns na impressão tridimensional e dos de alto desempenho (Moreira 2016)

Após a fusão do termoplástico a temperatura dos filamentos e camadas já impressas decresce rapidamente e o material solidifica, geralmente, antes da deposição de um novo filamento. Esse novo filamento não tende a aderir à camada inferior e dá origem a uma série de problemas no processo.

Com termoplásticos comuns estes problemas não são tão influentes na qualidade de impressão uma vez que o extrusor pode aquecer o termoplástico cerca de 50 °C acima da temperatura de fusão sem haver detrimento da qualidade do material.

2.3 Problemas da impressão tridimensional de termoplásticos de alto desempenho

Precisão geométrica

Obter uma peça com um elevado grau de perfeição geométrica depende de um bom controlo do sistema da impressora, dos eixos, da extrusão do material e das temperaturas de extrusão e da peça. A precisão geométrica está também fortemente relacionada com o desgaste e folga das peças que fixam os eixos e peças que se movimentam.

Gradientes de temperatura

As temperaturas de extrusão são superiores à temperatura da mesa onde a base da peça está pousada e superiores à temperatura do interior da impressora por motivos de segurança e durabilidade dos motores e controladores da impressora. Estas condições geram gradientes de temperatura no objeto impresso e por isso pode ocorrer um fenómeno denominado “curl”, que significa “enrolar” pois a peça acaba por dobrar por pontos onde o arrefecimento ocorre mais rápido e contrai o material em volta como podemos ver na imagem 2.2.



Figura 2.2 - Efeito dos gradientes de temperatura no processo de impressão.

Como podemos observar a curvatura do objeto impresso depende das dimensões do mesmo, no entanto, outros parâmetros da impressão são igualmente influentes na criação de gradientes de temperatura nas peças.

De igual modo é possível verificar o efeito dos gradientes de temperatura na impressão tridimensional na figura 2.3.



Figura 2.3 - Efeito dos gradientes de temperatura no processo de impressão

Fixação da peça à base

Quer resultado do efeito “curl” mencionado anteriormente, quer por má escolha de materiais ou errada calibração do eixo z, o eixo da mesa, a peça pode não ter toda a área da base em contacto com a mesa durante todo o processo de impressão. Este problema arruína geralmente a impressão.

Anisotropia

Dado o processo de fabricação por camadas e o facto dessas camadas serem formadas por deposição de filamentos de termoplásticos em várias direções (segundo a geometria da peça final e o modelo de impressão) a anisotropia da peça é evidente, fenómeno em virtude do qual certas propriedades mecânicas – resistência, elasticidade - de um mesmo corpo dependem da direção em que são medidas. A anisotropia dos objetos impressos em FDM pode ser drasticamente reduzida se a ligação entre camadas e filamentos for melhorada.

Esta característica típica das impressões tridimensionais é uma grande desvantagem do ponto de vista estrutural para a aplicação dos componentes em engenharia.

A resistência mecânica das peças na direção normal ao plano da base é 10% a 65% da resistência na direção dos filamentos depositados (Ravi *et al.* 2016).

A falta de resistência mecânica na direção de construção levanta constrangimentos significativos no design das peças produzidas por FDM concebidas para cargas dinâmicas ou cargas estáticas multidirecionais (Ravi *et al.* 2016).

Acabamento superficial

Consequência do processo FDM as peças resultantes deste tipo de impressão têm superfícies rugosas indesejadas para as suas funções. Processos de acabamento superficial adicionais tais como o polimento adicionam custos, tempo de fabricação e incertezas geométricas.

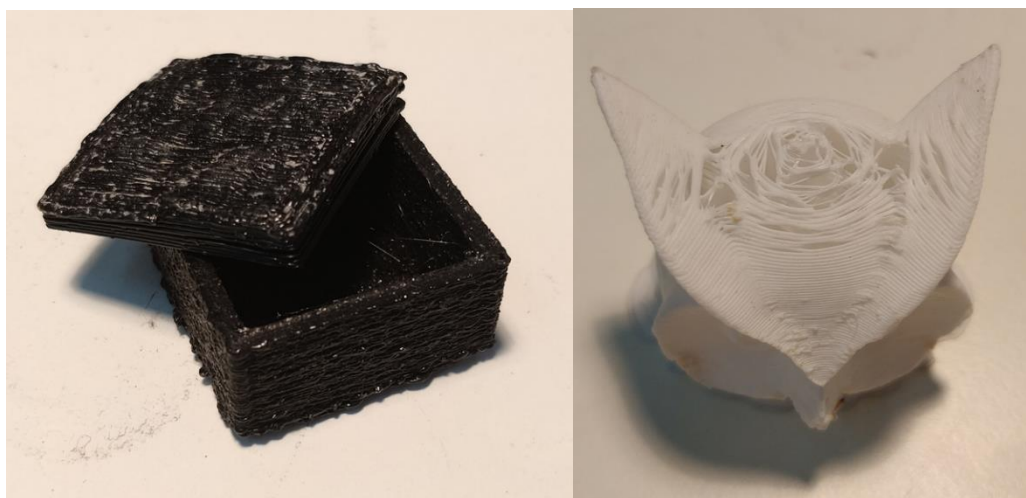


Figura 2.4 - Efeito do mau acabamento superficial na impressão tridimensional

3 Tratamento de superfícies em FDM

O constante crescimento do mercado da impressão tridimensional reflete-se na incessante procura de novos métodos de tornar físico um modelo tridimensional virtual. As impressoras, os procedimentos de impressão e ainda mecanismos de melhoria funcional de impressoras existentes são os veículos de progressão desta tecnologia. Estudos do mercado, das tecnologias e dos materiais indicam o caminho a seguir no mundo da impressão 3D.

Com a expiração da patente original do processo FDM em 2009 muitas empresas se debruçaram sobre a criação de impressoras FDM de baixo custo tendo resultado numa revolução na comunidade do design (Ravi *et al.* 2016).

No mercado das impressoras tridimensionais por deposição fundida as técnicas que geralmente mudam de um modelo para outro são o método de aquecimento dos polímeros e o método de manter a temperatura da peça.

Manter a temperatura da peça permite que esta não vá arrefecendo durante a impressão gerando gradientes de temperatura ao longo da peça.

Regra geral todos os modelos têm uma base aquecida a uma temperatura constante, outros já incluem uma câmara fechada para que a temperatura ambiente e correntes de ar não influenciem as temperaturas dos diferentes pontos da peça a ser impressa.

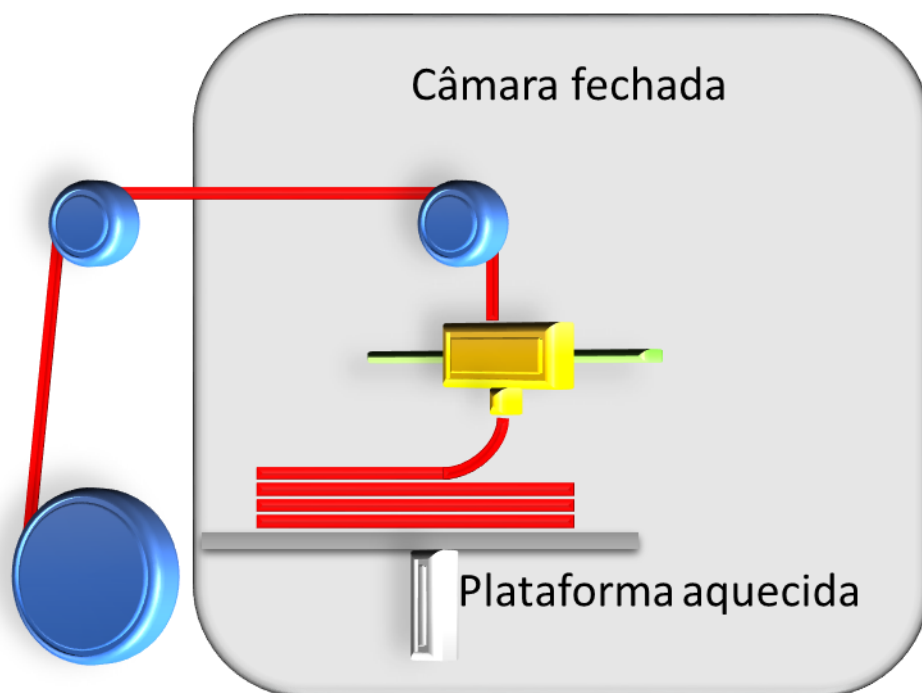


Figura 3.1 - Esquema de uma impressora FDM

O facto da impressão por FDM necessitar que o plástico seja aquecido a temperaturas perto da temperatura de fusão faz com que este entre num estado visco-plástico e, depois do seu contacto com a base ou camadas já impressas, com o seu arrefecimento, endurece. O fio de deposição, por mais quente que esteja, não consegue aquecer as camadas já arrefecidas a uma temperatura que permita a integral união visco-plástica do material e esta ligação entre camadas acaba por ser um ponto frágil das peças ou, em determinadas condições, não chega a existir.

Pode-se então concluir que esta ligação pode ser melhorada com o aumento da temperatura das camadas já impressas ou com o tratamento da superfície dessas camadas.

3.1 Métodos de tratamento de superfícies

3.1.1 Lasers

Comummente utilizados no aquecimento de metal os lasers podem aquecer também outros materiais com a radiação que emitem. Podendo variar na potência emitida, comprimento de onda e polarização do feixe os lasers são uma ótima escolha para o aquecimento rápido e localizado.

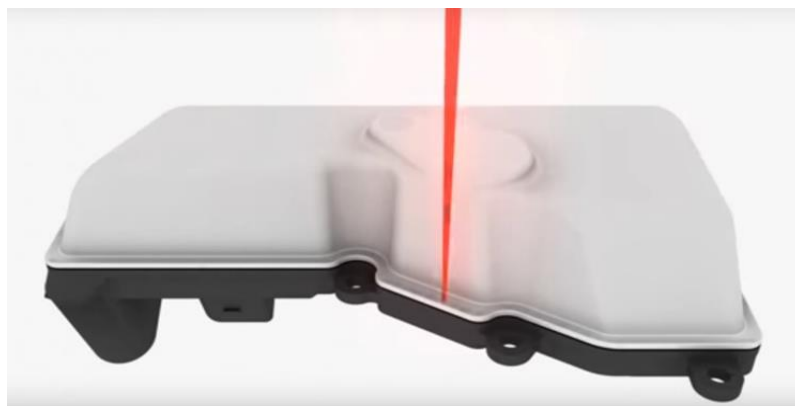


Figura 3.2 - Utilização de lasers na soldadura de plásticos (LPKF laser & Electronics 2016)

Na indústria metalúrgica os lasers são utilizados no corte, soldadura e tratamento de peças para a melhoria das suas características como o acabamento superficial e o processo a utilizar no sistema da impressora 3D assemelhar-se-á em diversos aspetos. Durante o tratamento por transferência de calor com a radiação laser o material é aquecido localmente, envolvendo uma curta exposição cíclica (ILT 2009). A frequência e temperatura máxima podem ser definidas por ações de controlo (ILT 2009).

Também na indústria dos plásticos os lasers são utilizados, na soldadura de duas ou mais peças. Podem ser distinguidas quatro técnicas principais do uso de lasers na soldadura de plásticos: soldadura por scanner, soldadura por contorno, soldadura simultânea e soldadura híbrida (LPKF laser & Electronics 2016). A melhor aproximação ao sistema pretendido neste trabalho é a técnica de soldadura por contorno. Esta envolve passar o laser pelo contorno pretendido, tipicamente uma única vez (LPKF laser & Electronics 2016).

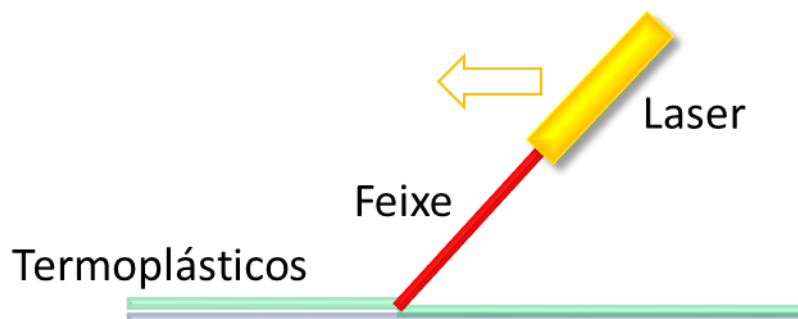


Figura 3.3 - Esquema da passagem de um laser na união de dois termoplásticos

Reflexão e refração dos lasers

Quando um feixe de luz se propaga num meio de fase constante e incide numa superfície refletora o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão formados pelos feixes e a normal à superfície são iguais.

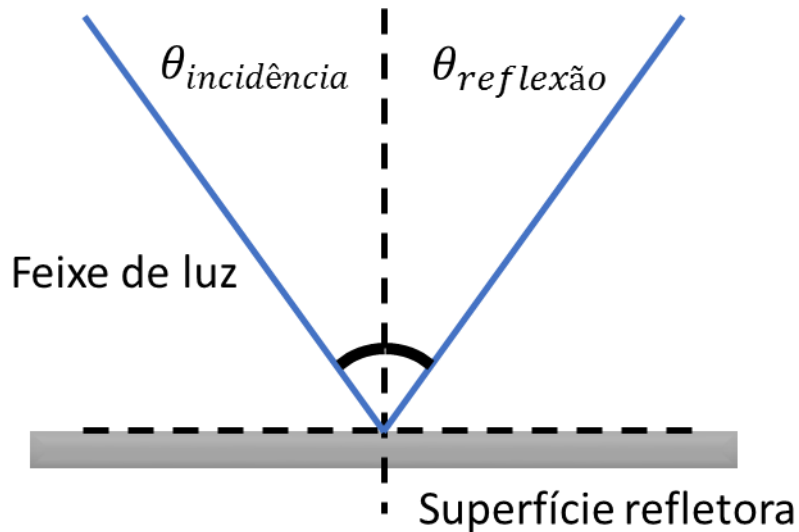


Figura 3.4 - Esquema da reflexão de um feixe de luz

A direção da luz refratada pela mudança de fase abrupta do meio em que o feixe de luz se propaga pode ser estudada através do princípio de Fermat e da sua simplificação para a lei de Snell representada pela equação 3.1.(Yu *et al.* 2011).

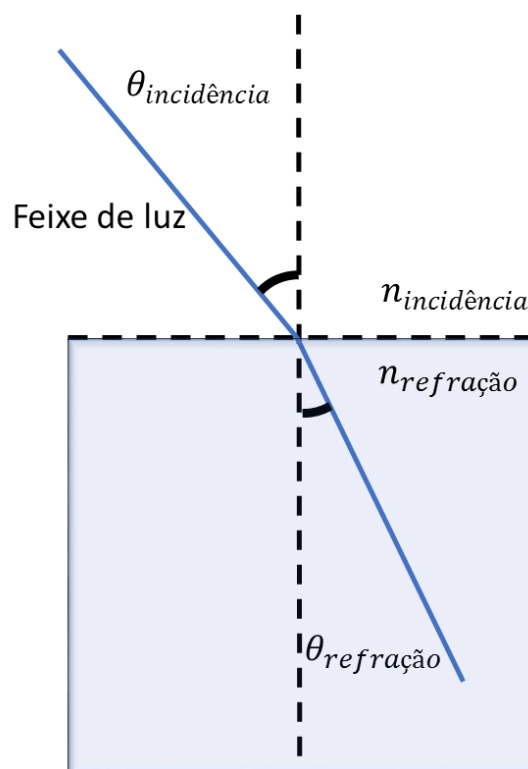


Figura 3.5 - Esquema da refração de um feixe de luz

$$\sin(\theta_{\text{incidência}}) n_{\text{incidência}} = \sin(\theta_{\text{refração}}) n_{\text{refração}} \quad (3.1)$$

Onde:

$\theta_{\text{incidência}}$ - Ângulo entre o feixe de luz incidente e a normal ao plano de incidência;

$\theta_{\text{refração}}$ - Ângulo entre o feixe de luz refratado e a normal ao plano de refração.

$n_{\text{incidência}}$ - Índice de refração do meio onde ocorre a incidência;

$n_{\text{refração}}$ - Índice de refração do meio onde ocorre a refração

Os índices são obtidos pela divisão da velocidade da luz propagada no vácuo pela velocidade da luz propagada nesse meio.

Polarização dos lasers

A polarização de um feixe laser resulta na propagação de um feixe de luz com o campo magnético e elétrico alterado (Luo *et al.* 2011). Estes campos podem ser alterados de modo a que a polarização seja linear, circular ou elíptica.

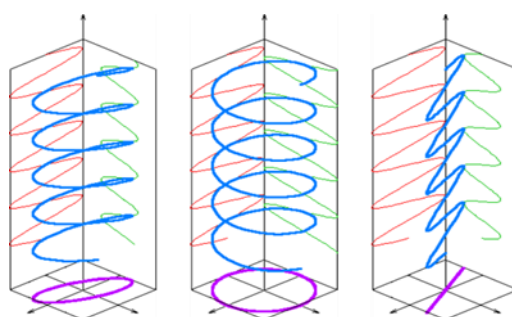


Figura 3.6 - Polarização de um feixe laser.
Esquemas obtidos com a utilização do GnuPlot

A polarização pode ser obtida pela passagem do feixe de luz por lâminas de faces paralelas, num prisma de Nicol ou pela reflexão da luz em determinadas condições, entre outros. Os polarizadores podem ser conjugados e estar em rotação sobre o eixo de incidência de modo a obter a polarização desejada.

Para a obtenção de luz polarizada pela reflexão do feixe este tem de incidir numa superfície tal que o feixe refletido e feixe refratado façam um ângulo de 90° . Nestas condições o ângulo de incidência é denominado ângulo de Brewster e a luz refletida está polarizada linearmente (Paschotta 2008).

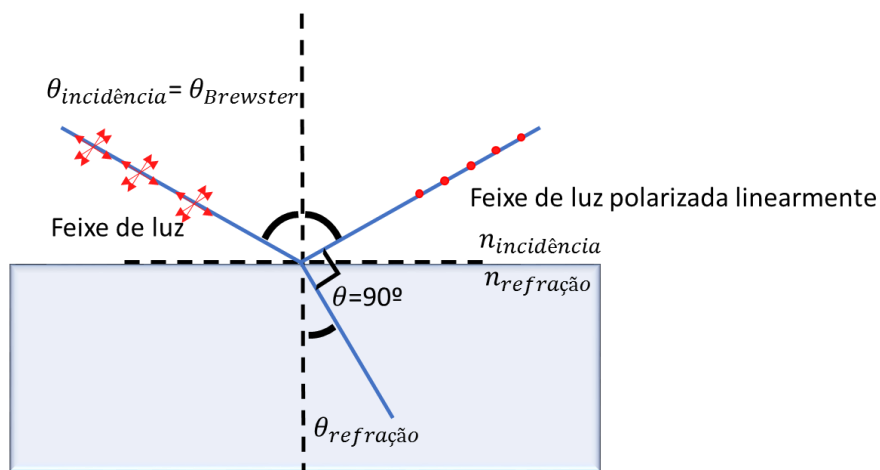


Figura 3.7 - Esquema do ângulo de Brewster

Recorrendo à equação (3.1) podemos obter o ângulo de Brewster da seguinte forma:

$$\sin(\theta_{\text{incidência}}) n_{\text{incidência}} = \sin(\theta_{\text{refração}}) n_{\text{refração}} \quad (3.2)$$

$$\sin(\theta_{\text{incidência}}) n_{\text{incidência}} = \sin(90^\circ - \theta_{\text{incidência}}) n_{\text{refração}} \quad (3.3)$$

$$\sin(\theta_{\text{incidência}}) n_{\text{incidência}} = \cos(\theta_{\text{incidência}}) n_{\text{refração}} \quad (3.4)$$

$$\frac{\sin(\theta_{\text{incidência}})}{\cos(\theta_{\text{incidência}})} = \frac{n_{\text{refração}}}{n_{\text{incidência}}} \quad (3.5)$$

$$\tan(\theta_{\text{incidência}}) = \tan(\theta_{\text{Brewster}}) = \frac{n_{\text{refração}}}{n_{\text{incidência}}} \quad (3.6)$$

$$\theta_{\text{Brewster}} = \tan^{-1} \frac{n_{\text{refração}}}{n_{\text{incidência}}} \quad (3.7)$$

A polarização dos feixes é particularmente interessante para o controlo dos mesmos para diferentes aplicações como, por exemplo, na elipsometria. A elipsometria é a análise da luz polarizada e refletida numa superfície para a caracterização da composição da superfície. É um meio não destrutivo de caracterização de sólidos (El-Agez & Taya 2011).

Para o caso descrito nesta dissertação, o interesse da utilização de um laser polarizado recai na utilização da polarização linear de modo a que o campo elétrico do laser seja paralelo ao plano de incidência. Este plano é formado pela normal à superfície e os feixes de incidência e reflexão. Deste modo a energia refletida é mínima e a energia absorvida no ponto de incidência é máxima com ganhos na ordem dos 80% relativamente à utilização de radiação não polarizada (The Welding Institute 2017).

Laser de fibras óticas

Este tipo de laser é ideal para o transporte do feixe de laser para pontos específicos. Muito utilizado em máquinas de soldadura e corte a laser este laser tem o processo de geração representado na figura 3.8.

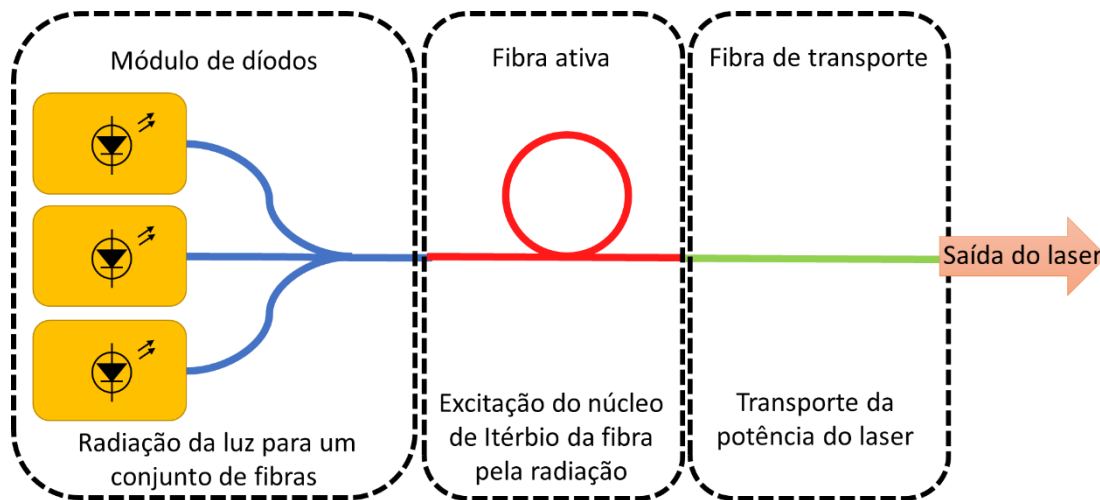


Figura 3.8 - Esquema do processo de geração de laser de fibras óticas

Um conjunto de díodos transmite radiação para um conjunto de fibras óticas que se intercetam num acoplador de fibras aumentando assim a intensidade de radiação numa única fibra (Coherent 2016). Uma fibra de núcleo de itérbio, material que aquando da passagem do estado excitado para o estado normal emite radiação com uma eficiência ótica excelente, é colocado em frente à primeira fibra de tal modo que a radiação é transmitida. A curvatura da fibra permite que a reflexão da radiação no seu interior excite o núcleo (Amada Miyachi America 2015). Por fim o feixe laser é transmitido no interior de fibras de transporte com núcleos de sílica e revestimentos adequados (Nufern 2009).

3.1.2 Radiação infravermelha

Vulgarmente utilizadas no aquecimento de edifícios, armazéns, ou pequenos volumes como habitáculos, as lâmpadas de luz infravermelha permitem o aquecimento através da transferência de calor por ondas eletromagnéticas. Diferenciam-se pela gama de comprimento de ondas que emitem e, ao contrário dos lasers, o processo de transferência de calor ocorre sem foco numa pequena área.

À semelhança dos lasers, o aumento de temperatura pode ser obtido sem contacto com o alvo, mas, no caso prático do aquecimento da camada depositada no processo de impressão, iria originar um aumento da temperatura da câmara da impressora que iria influenciar negativamente o funcionamento de todos os motores e respetivos eixos.

Apesar de estudos indicarem que o aumento da temperatura envolvente no processo de impressão diminui a anisotropia das peças, a diminuição da precisão geométrica da peça é também resultado do aumento de temperatura (Ravi *et al.* 2016).

3.1.3 Plasma frio

O plasma é um estado da matéria que pode ser classificado em plasma de alta temperatura ou plasma de baixa temperatura. O primeiro é produzido por processos de fusão nuclear a temperaturas superiores a 50 000 °C e o segundo pode ser dividido em plasma térmico e não térmico, ou plasma frio. Os plasmas térmicos estão em equilíbrio termodinâmico e a temperatura dos eletrões é igual à temperatura das restantes partículas. No caso do plasma frio o equilíbrio termodinâmico não existe e as partículas constituintes do plasma encontram-se a uma temperatura próxima da temperatura ambiente. Apesar da temperatura, o plasma frio é um gás constituído por eletrões, átomos e moléculas excitadas, iões, radicais, fotões e partículas neutras, no qual os eletrões têm muito mais energia do que as restantes partículas (Borges 2012; Nishume 2015).

O método de tratamento de superfície utilizando plasma frio tem vindo a ser utilizado para a alteração das propriedades das superfícies de diversos materiais sem que as propriedades gerais das peças sejam postas em causa.

Este tratamento inclui a esterilização das superfícies que tem um grande impacto no sector biomédico, mas também no que toca a adesivos pela redução de impurezas entre as camadas a juntar. Adicionalmente pode melhorar as qualidades hidrofílicas das superfícies, o que permite melhorar a adesão (Borges 2012).

O plasma frio é formado em equipamentos próprios que atravessam um fluxo de gás por um eléctrodo, de diferentes geometrias e arranjos, como exemplificado na figura 3.9.

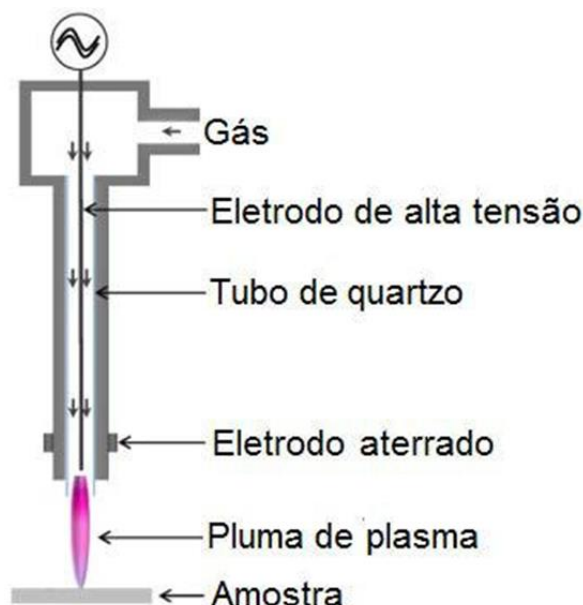


Figura 3.9 - Esquema dos dispositivos de formação de plasma frio. (Nishume 2015)

Este princípio de funcionamento permite que haja diferentes arranjos dos elétrodos, diferentes gases utilizados e diferentes frequências e tensões aplicadas aos elétrodos, adequando-se assim a diferentes utilizações.

A transferência de energia ao gás pelo elétrodo é feita para os estados vibracionais e rotacionais das moléculas e não para os níveis de excitação e ionização dos eletrões pois estes são geralmente níveis superiores de energia (Nishume 2015). Daqui se conclui que gases com estados vibracionais e rotacionais mais estáveis, como os gases nobres, sejam mais fáceis de ionizar.

É possível configurar o equipamento de modos diferentes para conseguir diferentes aplicações (Nishume 2015):

Jatos com elétrodos sem revestimento dielétrico (dielectric-free electrode jets – DFE);

Jatos de plasma DBD (Dielectric-barrier discharge jet);

Jatos de plasma tipo corona ou jatos de elétrodo único (single electrode jets – SE).

Jatos com elétrodos sem revestimento dielétrico (dielectric-free electrode jet)

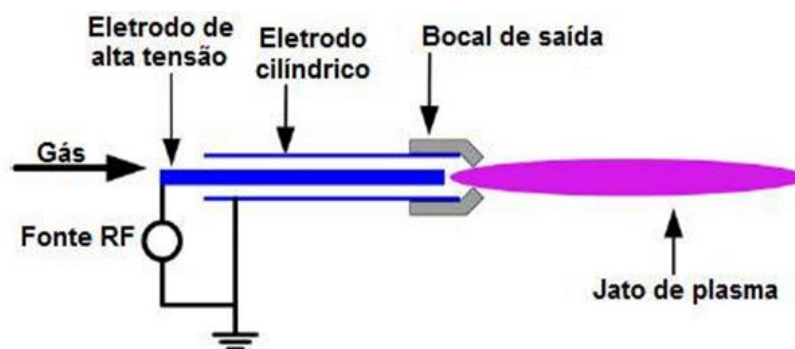


Figura 3.10 - Esquemática dos jatos com elétrodos sem revestimento dielétrico (Nishume 2015)

Nesta configuração temos um eléctrodo interno ligado a uma fonte e outro externo, cilíndrico oco, ligado à terra. Para este formato de arranjo dos eléctrodos é necessária a utilização de um sistema de arrefecimento a água para evitar o sobreaquecimento proveniente do pulsar da fonte que origina um arco entre os eléctrodos (Nishume 2015).

A potência deste jato é muito elevada e confere ao plasma uma temperatura e reatividade elevadas (Nishume 2015).

Jatos de plasma DBD (Dielectric-barrier discharge jet)

Neste tipo de configuração uma barreira dielétrica é colocada entre os eléctrodos e o percurso do gás, o que permite que a temperatura do gás não seja alterada pela corrente que percorre o eléctrodo, mas apenas a reatividade do mesmo. Estão representados na figura 3.11 cinco esquemas possíveis.

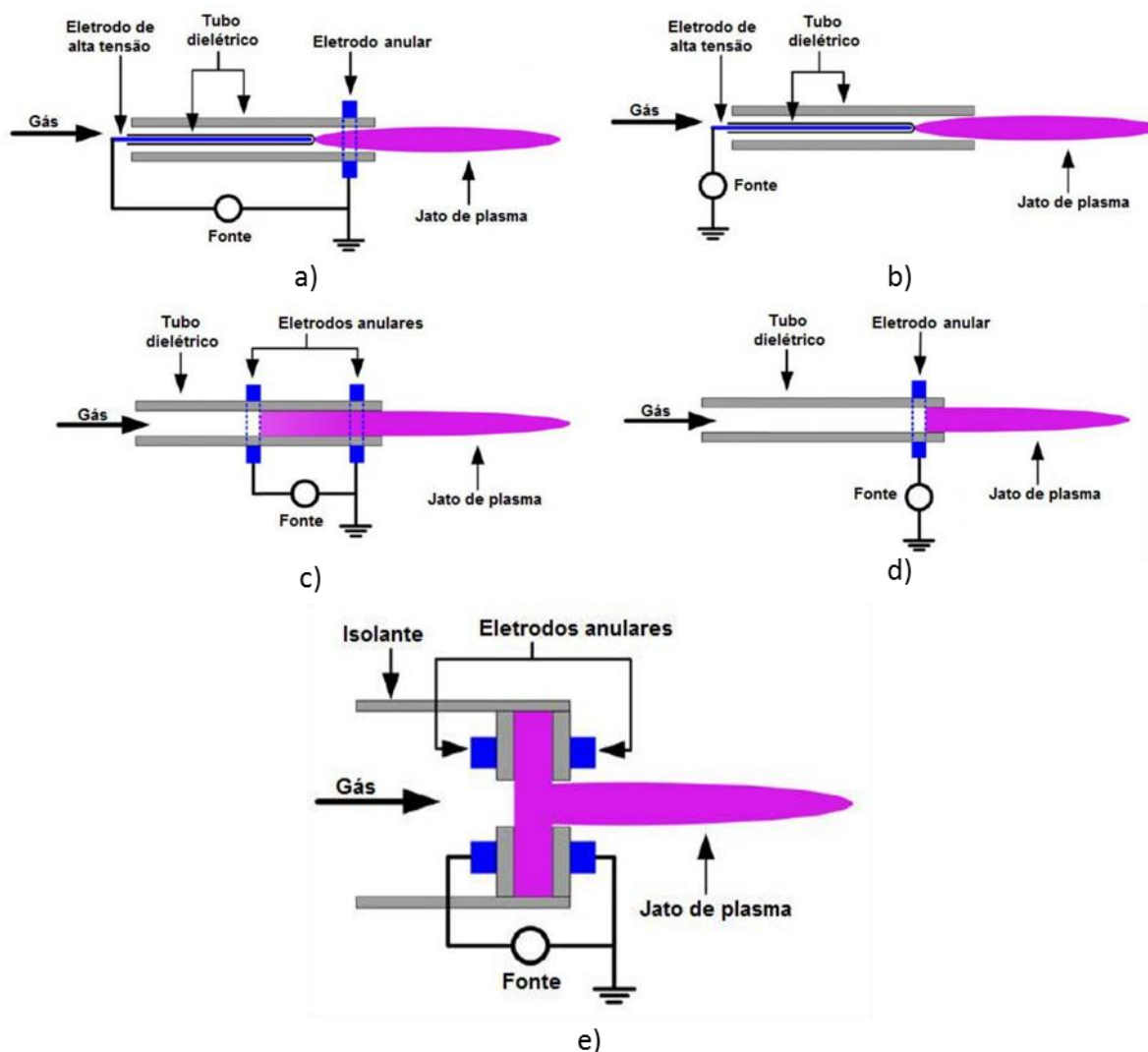


Figura 3.11 – Representação esquemática dos jatos de plasma DBD (Nishume 2015)

Na primeira figura (a) a configuração consiste em dois anéis em torno de um tubo dielétrico por onde o gás flui. A fonte aplica uma tensão alternada que resulta na formação de uma pluma de plasma frio no fim do tubo. Dado que o segundo anel está ligado à terra o plasma no interior deste é bem intenso o que leva à formação de mais espécies reativas no gás (Nishume 2015). No caso da segunda configuração (b), sem o segundo eléctrodo, o jato é menos reativo. Na terceira imagem (c) podemos observar que o eléctrodo anelar foi substituído por um eléctrodo em forma de haste, coberto por um revestimento dielétrico no centro do tubo dielétrico, que

confere ao gás um contacto maior com o campo eletromagnético. Estudos demonstram que o aumento deste contacto permite a formação de uma pluma de plasma mais longa e formação de espécies mais reativas (Nishume 2015). À semelhança da segunda configuração, a quarta (d) é equivalente à terceira removendo o eléctrodo anelar. Por último (e) temos dois eléctrodos anelares montados nas faces exteriores de dois discos perfurados e acoplados com o seu eixo no centro do tubo dielétrico.

Face à configuração DFE, a configuração DBD trabalha com plasmas a temperaturas próximas da temperatura ambiente dada a utilização de elementos dielétricos que impedem a formação de arco eléctrico entre os eléctrodos (Nishume 2015).

Jatos de plasma tipo corona ou jatos de eléctrodo único (single electrode jet)

Este tipo de configuração utiliza apenas um eléctrodo de alta tensão em esquemas de montagem semelhante aos jatos DBD mas sem uma barreira dielétrica entre o eléctrodo e o gás. O tubo dielétrico exterior serve apenas para conduzir o gás. A mistura de dois gases pode ser feita antes ou após a passagem no equipamento como é o caso da figura da direita em 3.12.

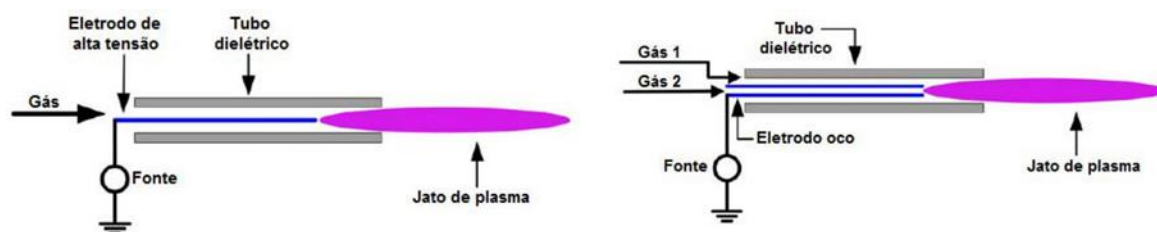


Figura 3.12 – Representação esquemática dos jatos de plasma tipo corona ou jatos de eléctrodo único (Nishume 2015)

3.1.4 Vibração por ultrassons

Também a utilização de ultrassons pode ser utilizada para uma melhoria da junção de camadas de plástico pela vibração das partículas. Esta tecnologia envolve o contacto com a peça por cada camada depositada o que iria influenciar imenso o tempo de produção pois a impressora teria de parar para que um dispositivo pudesse melhorar a ligação das duas últimas camadas impressas.

A soldadura por vibração linear move uma de duas partes sob pressão, criando aquecimento por fricção através da vibração (Dukane IAS 2016), o que influenciaria a geometria final da peça. Principalmente por este motivo a utilização deste sistema necessitaria de um controlo delicado das condições de funcionamento e mesmo de uma reestruturação dos comandos de impressão, sendo, portanto, excluído dos processos plausíveis.

3.2 Interação dos métodos de tratamento com os polímeros

3.2.1 Lasers

Modelos comportamentais de diversos materiais quando sujeitos à radiação de lasers são de extrema importância e têm vindo a ser estudados nas últimas décadas dada a vasta aplicabilidade da utilização dos lasers, tais como tratamento de superfícies, perfuração, fresagem, soldadura e sintetização de cerâmicas.

Num processo comum de transferência de calor utilizando um laser este emite uma radiação que ao atingir a superfície transfere parte da sua energia. A absorção de energia pelo material depende de inúmeros fatores inerentes ao material (como as suas propriedades físicas) e ao laser (como a sua potência e o comprimento de onda) (Mazumder & Steen 1980; Torii & Yang 2005).

O vasto estudo e modelação dos comportamentos de superfícies onde incidem feixes de laser recai muito sobre superfícies metálicas, de propriedades bem definidas. Tal impossibilita a sua utilização neste trabalho em que se lida com superfícies demasiado irregulares.

No entanto e tendo em conta que a potência do laser está diretamente relacionada com a transferência de calor e consequente aumento de temperatura da superfície polimérica, a potência deve ter sido em conta consoante a temperatura pretendida.

A potência será controlada tendo em conta a gama de temperaturas de operação dos termoplásticos consoante o gráfico da figura 3.13 construído a partir dos dados da tabela 2.1.

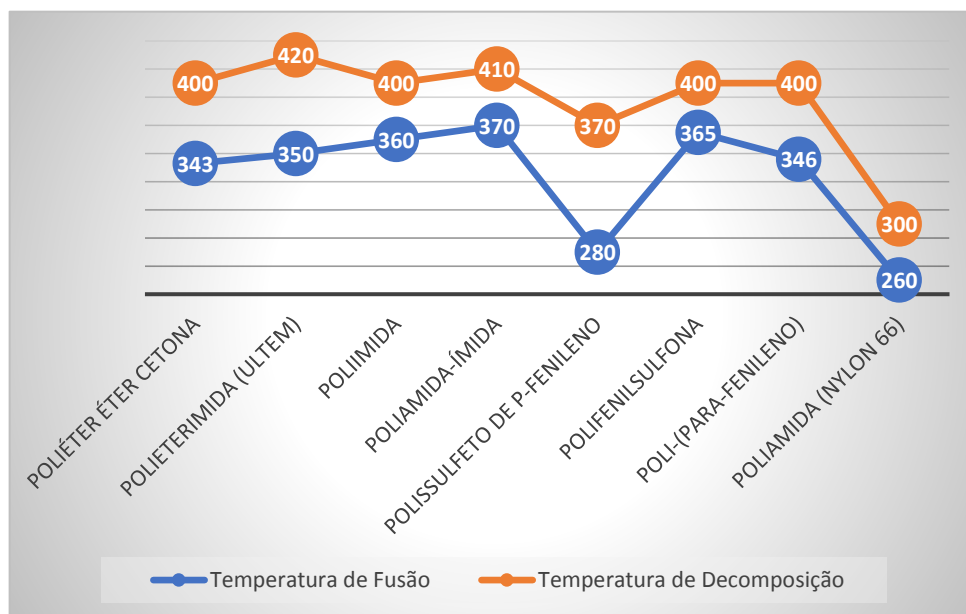


Figura 3.13 - Temperaturas de fusão e de decomposição dos termoplásticos de alto desempenho

3.2.2 Plasma frio

O grau de ionização de um plasma é medido pela temperatura eletrónica, que numa descarga DBD varia entre 1 e 10 eV (Santos 2010). Esta energia é da mesma ordem de grandeza da energia de ligação molecular da superfície de polímeros.

Tabela 3.1 - Energia de ligações moleculares nos polímeros (Santos 2010)

Ligação	Energia(eV)	Ligação	Energia (eV)
C – N	3,2	O – H	4,8
C – C	3,6	C = C	6,4
C – O	3,7	C = O	7,8
N – H	4,0	C = N	9,3
C – H	4,3		

Dada a possibilidade dos eletrões do plasma à pressão atmosférica poderem atingir a energia de ligação das moléculas dos polímeros podem ocorrer excitações atómicas de espécies moleculares e dissociação molecular.

A pluma de um plasma frio contém fotões e radicais ativos que podem quebrar ligações e cadeias poliméricas, ionizar e excitar átomos, ou efetuar processos como a dissociação, rompimento, ramificação e entrecruzamento de ligações moleculares. Também os iões presentes no plasma, devido ao campo elétrico que os acelera, atingem a superfície do polímero (Nishume 2015).

O tratamento de superfícies poliméricas com plasma frio é capaz de alterar as propriedades hidrofílicas da superfície de tal modo que altera o seu ângulo de contacto.

Ângulo de contacto

O ângulo de contacto é definido pela tensão superficial na superfície de contacto entre um sólido e de um líquido e é usado como um avaliador das propriedades hidrófobas ou hidrófilas da superfície. A propriedade hidrofílica de uma superfície define se essa superfície permite que um fluido adira à superfície, e é tão maior quanto menor for a tensão superficial da superfície.

O método de caracterização do ângulo de contacto é realizado pela obtenção do ângulo formado entre a superfície do material e a reta tangente à superfície da gota.

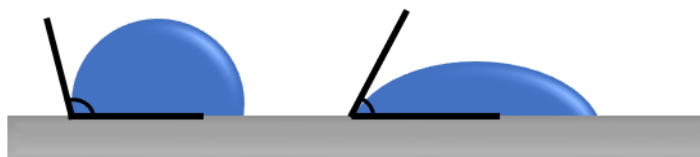


Figura 3.14 – Esquema do ângulo de contacto de uma gota com uma superfície hidrófoba (esquerda) e hidrófila (direita)

Quanto maior o ângulo de contacto mais hidrófoba é a superfície.

Dependendo do gás utilizado as qualidades hidrofílicas das superfícies poliméricas podem ser alteradas para se aproximar de uma superfície hidrófila, usando por exemplo Hélio, ou hidrófoba, usando por exemplo Flúor (Wagner *et al.* 2003).

Conclui-se então que a utilização de plasma em polímeros é capaz de ativar as superfícies tornando-as melhores para o contacto com outras substâncias, no caso em estudo, termoplástico extrudido pela cabeça de deposição.

3.3 Sistemas adicionais à impressão tridimensional e resultados

De modo a permitir a utilização em larga escala da tecnologia FDM tem havido esforços no melhoramento da qualidade das peças, melhoramento do processo, desenvolvimento de novos materiais, propriedades dos materiais e aplicações.

Segue-se uma abordagem realizada na Faculdade de Engenharia Ira A. Fulton, no estado de Arizona.

3.3.1 Aquecimento prévio à deposição com laser

Para melhorar os problemas da FDM Abinesh Kurapatti Ravi, Anagh Deshpande e Keng H. Hsu utilizaram um método de aquecimento da superfície da camada já impressa. O método utiliza a tecnologia laser, onde o feixe incide num ponto imediatamente antes do material fundido ser depositado.

Esta abordagem é feita aumentando a temperatura da interface entre camadas acima da temperatura de transição vítrea do polímero para aumentar a força da ligação inter-camadas. Foi conseguido um aumento de 50% na força de ligação inter-camadas utilizando esta abordagem (Ravi *et al.* 2016).

Esta aproximação permite a monitorização e controlo em tempo real da potência do laser nas inter-camadas e interfaces dos inter-filamentos ao longo do volume total de uma peça, permitindo o controlo das propriedades físicas do processo FDM de modo a obter as propriedades mecânicas desejadas (Ravi *et al.* 2016).

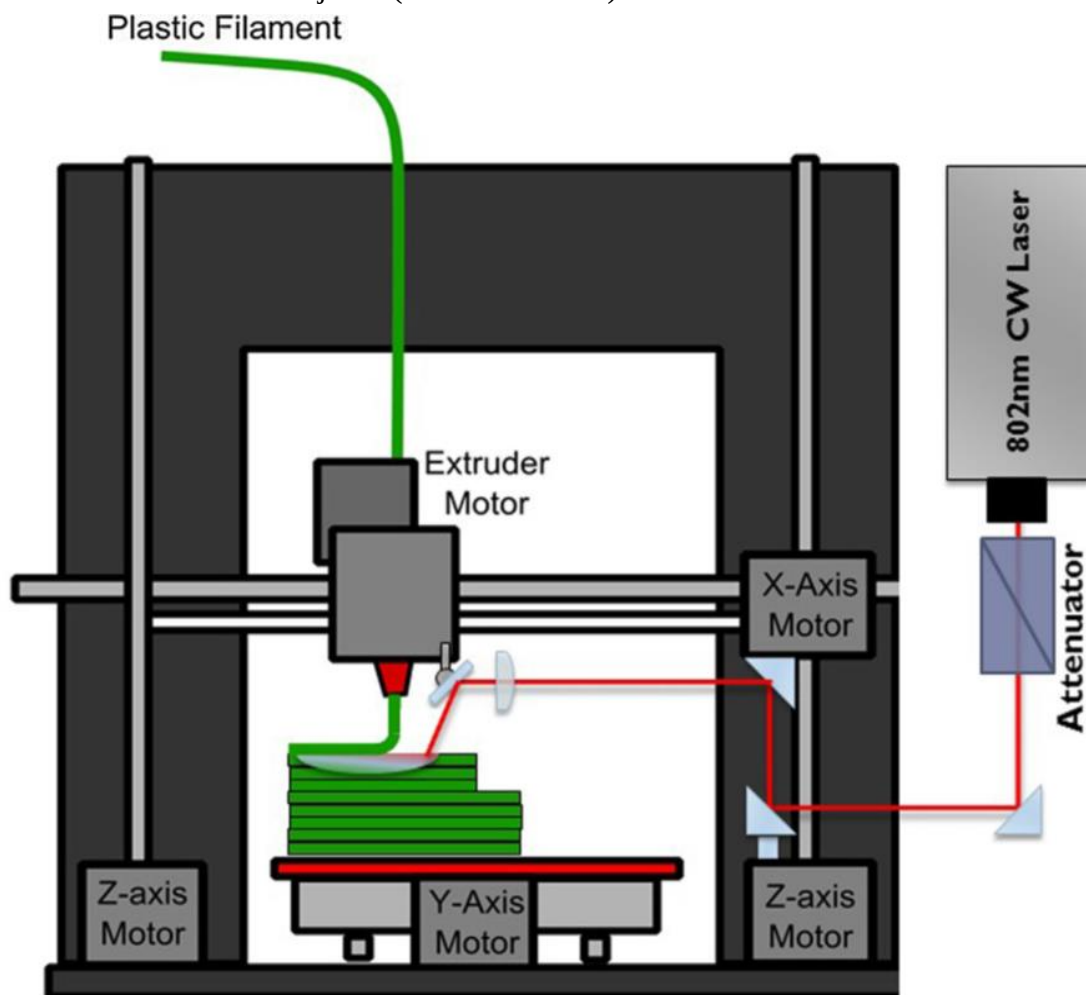


Figura 3.15 - Esquema da utilização de um processo adicional à impressão tridimensional de aquecimento prévio por laser (Ravi *et al.* 2016)

Para a abordagem acima referida foi utilizado um laser de estado sólido de 802 *nm* com uma intensidade máxima de 2 Watt e filamentos de ABS de cor preta. O feixe de laser passa por um atenuador, polarizador rotativo e polarizador de Glan, para permitir o controlo de intensidade ótica e a modulação do aquecimento. O feixe é então dirigido por dois espelhos revestidos a Ouro e uma lente de focagem para ser projetado num ponto a 1 *mm* de distância do bocal da extrusora.

Os testes de resistência mecânica foram realizados através da flexão de provetes impressos. O processo de impressão foi alterado para que houvesse deposição na direção que o laser cobria.

Parâmetros e características da abordagem

Os ensaios acima descritos foram realizados em condições muito específicas mas que permitem averiguar a possibilidade desta abordagem para outras condições comparando os valores expostos nas tabelas 3.2 e 3.3 com os valores desejados.

Tabela 3.2 - Parâmetros do processo de impressão utilizados na abordagem (Ravi *et al.* 2016)

Padrão de impressão	Retilíneo
Densidade de impressão	90 %
Altura da camada	0,4 mm
Largura de extrusão	0,5 mm
Velocidade do extrusor	1-10 mm/s
Número de perímetros	5
Temperatura de extrusão	230 °C
Temperatura da base de impressão	110 °C
Diâmetro do extrusor	0,5 mm
Velocidade do scanner do laser	1 - 10 mm/s
Potência de entrada do laser	0,4 - 1 W

Pela observação dos valores de impressão utilizados concluímos que o processo de impressão é um processo simples.

A temperatura de extrusão é indicativa da utilização de um termoplástico comum na impressão tridimensional e não um termoplástico de alto desempenho.

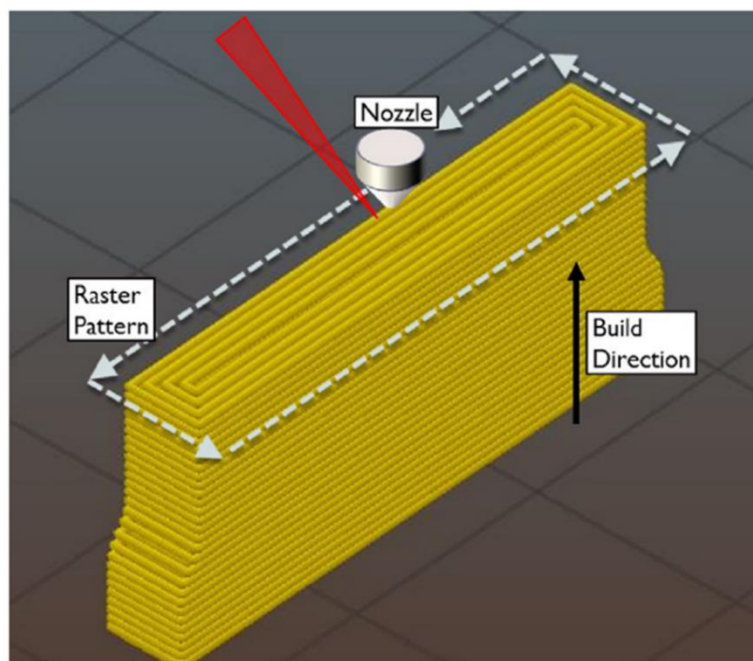


Figura 3.16 - Esquema da impressão dos provetes (Ravi *et al.* 2016)

O padrão utilizado nesta abordagem não é comumente utilizado em impressão de peças estruturais ou que exigem propriedades mecânicas elevadas dada a anisotropia elevada resultante. Na figura 3.16 podemos observar o esquema de passagem do laser durante a impressão.

Esta abordagem não invalida, porém, a utilização de outros parâmetros do processo de impressão para a implementação em termoplásticos de alto desempenho.

Tabela 3.3 - Tabela comparativa de propriedades de dois termoplásticos, um comum e outro de alto desempenho

	ABS Preto	Ultem 1000
Reflexão do substrato	0,2	
Coefficiente de absorção do substrato	174 cm^{-1}	
Calor específico do substrato	1053 J/Kg.K	$1470\text{-}1530 \text{ J/Kg.K}$ (Dielectric Corporation 2012)
Condutividade térmica do substrato	$0,3 \text{ W/m.K}$	$0,24 \text{ W/m.K}$ (Cycloc 2014)
Coefficiente de transferência de calor por convecção do substrato	$300 \text{ W/m}^2\text{K}$	

As propriedades do termoplástico utilizado neste processo são diferentes das propriedades dos termoplásticos de alto desempenho, no entanto estas são da mesma ordem de grandeza o que leva a acreditar que um pequeno ajuste dos parâmetros da impressão pode ser suficiente para efetuar os ensaios com outros termoplásticos. Deste modo seria possível perceber se esta abordagem pode ser utilizada para melhorar a adesão entre camadas.

Impressão, provetes e ensaios

A colocação do ponto de incidência do feixe do laser fixo relativamente ao ponto de extrusão limita a atuação do mesmo apenas num dos sentidos de impressão. Como mostra a figura 3.16, na impressão retilínea optada na abordagem, o feixe do laser incide durante a impressão de um filamento de um dos perímetros de cada retângulo de cada camada.

A geometria do provete e o ensaio de flexão estudado na abordagem permitem que o ponto de rutura seja previsível e analisado comparativamente em dois tipos de provetes de diferentes impressões, com e sem o sistema adicional.

O ensaio realizado nos provetes impressos foi o de flexão em 3 pontos como se pode observar na figura 3.17.

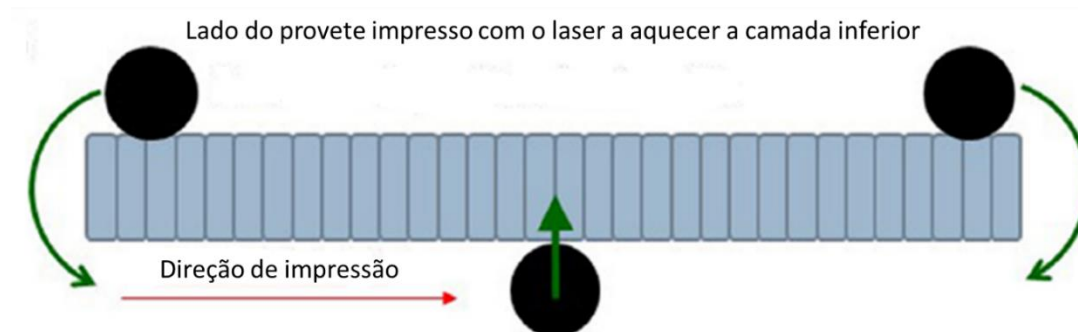


Figura 3.17 - Esquema do ensaio de flexão em 3 pontos (Ravi *et al.* 2016)

A zona de maior tensão no ensaio, onde o momento fletor é máximo, é a zona onde o processo de impressão foi aquecido com o laser. Deste modo obtiveram a resistência à flexão dos provetes impressos.

Resultados

Para diferentes velocidades da cabeça extrusora os resultados obtidos nos ensaios foram os apresentados na figura 3.18.

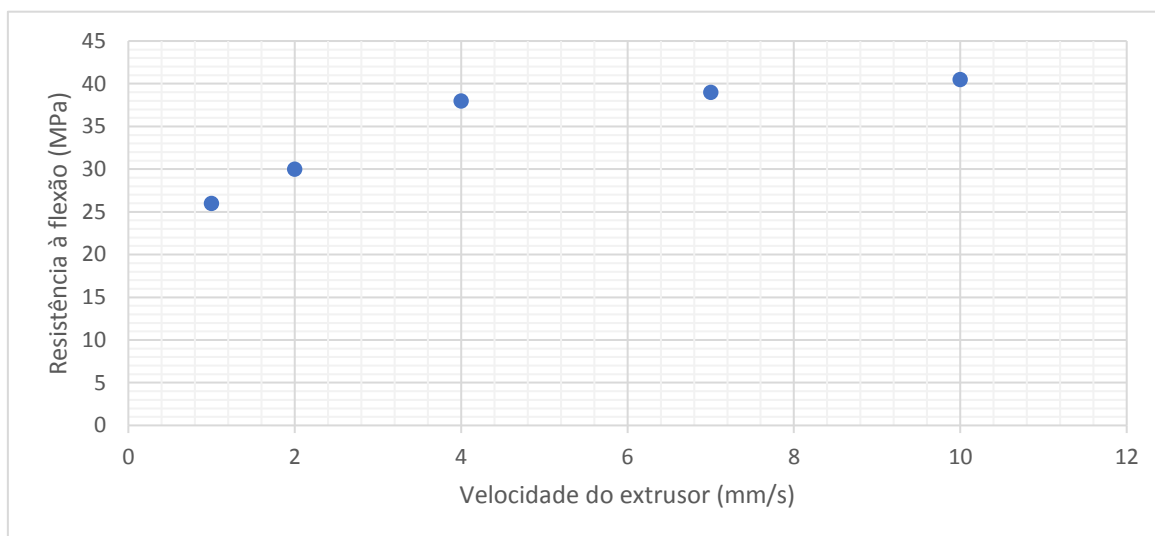


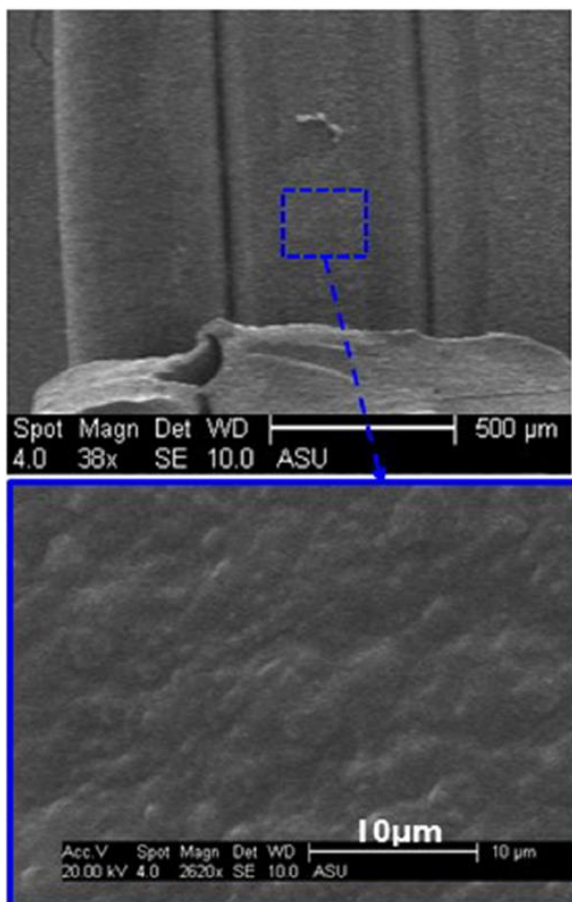
Figura 3.18 - Resultados dos ensaios de resistência à flexão para diferentes velocidades do extrusor (*Ravi et al. 2016*)

A velocidade do processo influencia os resultados de tal modo que é possível observar que a velocidade ideal será sempre superior a 4 mm/s . Segundo os autores isto deve-se ao efeito de evaporação de material que ocorre nos pontos de incidência do laser. A evaporação resulta na formação de pequenos defeitos entre camadas que mais tarde funcionam como pontos de concentração de stress nos ensaios à flexão.

A diminuição da velocidade de extrusão resulta no aumento da energia transferida pelo laser para o material, que resulta no aumento do material evaporado.

Análises microscópicas do ponto de rutura do provete mostram que este se encontra entre camadas. Nas seguintes imagens pode ser observado o efeito do aquecimento da superfície nas ligações entre camadas.

Sem aquecimento por laser



Com aquecimento por laser

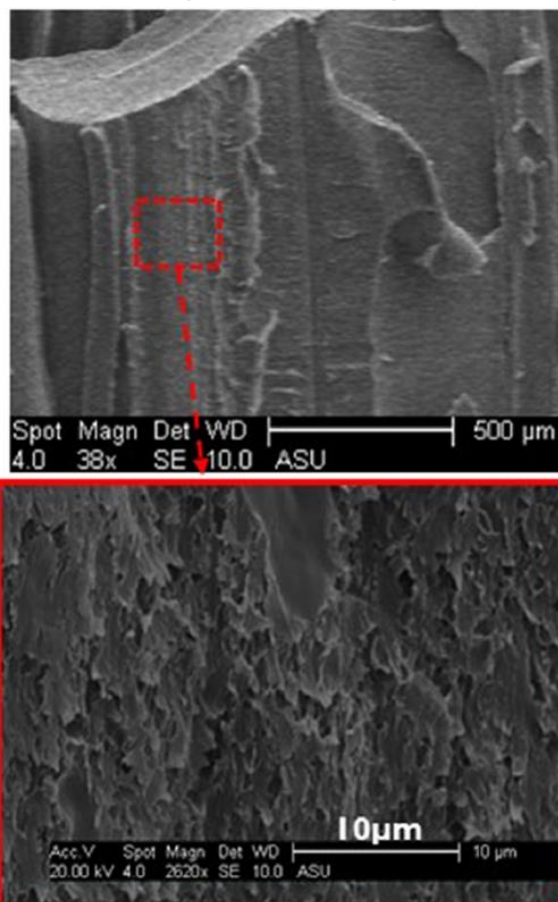


Figura 3.19 - Imagens microscópicas do ponto de rutura dos provetes (Ravi *et al.* 2016)

É possível visualizar que quando o provete é impresso com o laser ligado o ponto de fissura demonstra remoção de material entre as duas camadas, indicador de uma melhor adesão entre estas.

No gráfico da figura 3.20 estão os valores comparativos dos resultados obtidos nos ensaios. Por fim podemos ainda comparar imagens das sucessivas deposições de camadas com e sem o processo de as aquecer utilizando um laser.

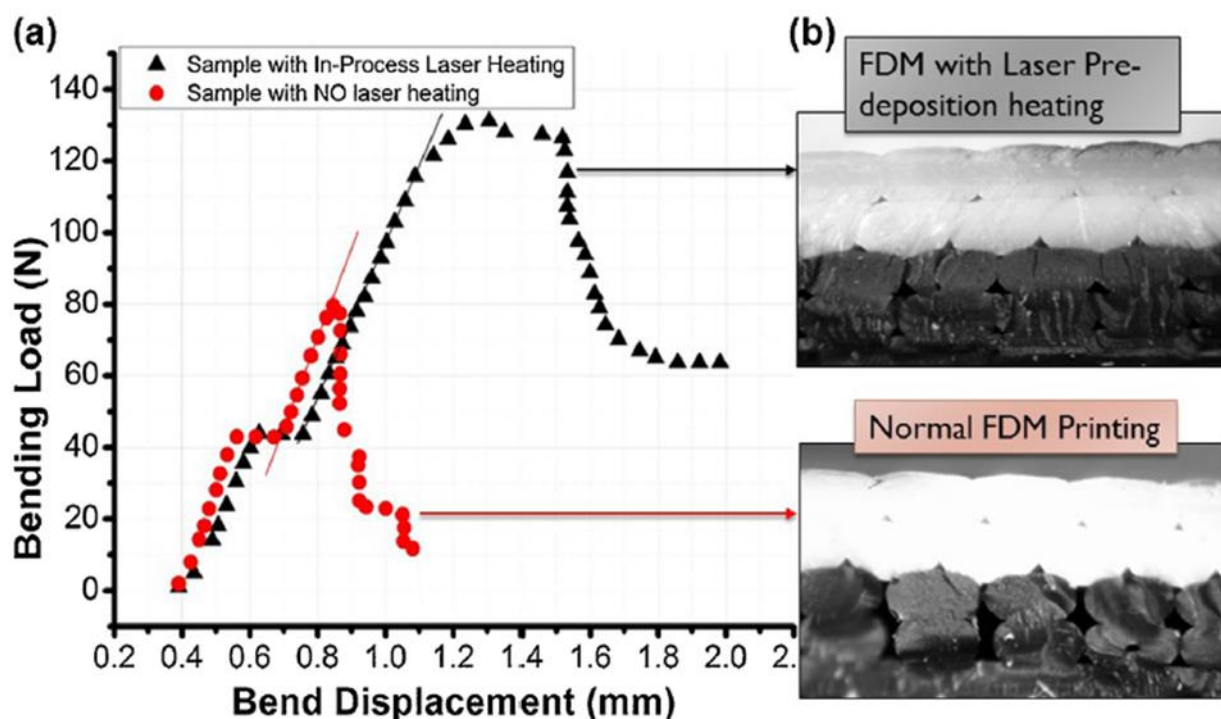


Figura 3.20 - Gráfico de resultados e imagens comparativas do processo com e sem laser (Ravi *et al.* 2016)

Ilacões desta abordagem

A utilização do laser para o aquecimento da superfície revela-se uma boa maneira de melhorar a adesão entre camadas. A forma de implementação do laser é limitadora quanto à produção de peças de propriedades não anisotrópicas pois o laser só incide durante alguns intervalos do processo de impressão.

3.3.2 Tratamento de polímeros com plasma frio

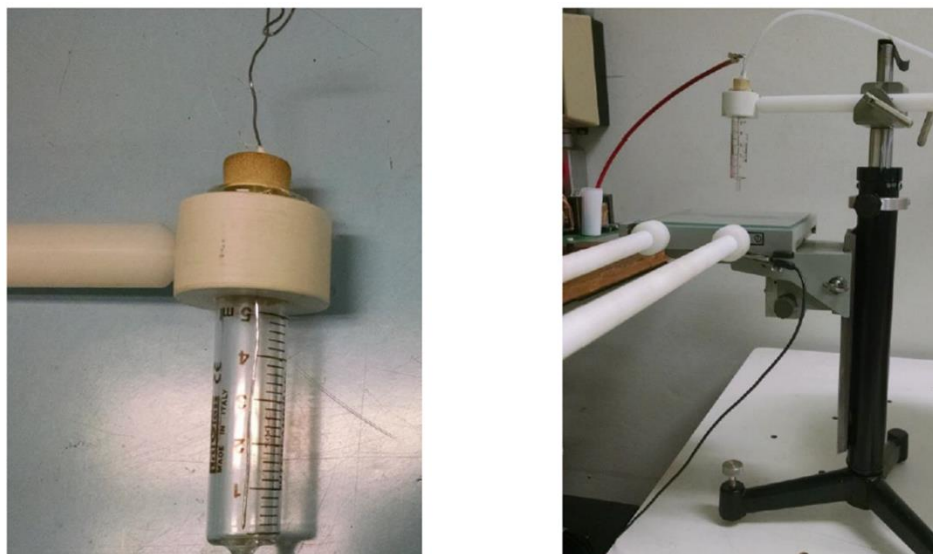


Figura 3.21 - Construção de uma configuração estilo corona de tratamento de superfícies com plasma frio (Nishume 2015)

A exposição dos polímeros ao plasma frio constitui um tratamento da superfície com vista a melhorar as suas propriedades. Os tratamentos possíveis diferem consoante as descargas elétricas, gases utilizados, tempos de exposição, entre outros.

Segue-se uma abordagem do tratamento de superfícies poliméricas realizada na Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

Caracterização dos ensaios

Os ensaios foram realizados com configurações de jatos de plasma frio do tipo corona.

Nos seus ensaios Thalita Mayumi Castaldelli Nishime utilizou os parâmetros tabelados em 3.4.

Tabela 3.4 - Características dos ensaios de plasma frio (Nishume 2015)

Frequência da descarga elétrica	37 KHz
Amplitude de tensão aplicada	10 KV
Caudal de Hélio	1,8 l/min
Caudal de Árgon	5,4 l/min
Potência da descarga no jato de Hélio	2,4 W
Potência da descarga no jato de Árgon	2 W
Comprimento da pluma de Hélio	25 mm
Comprimento da pluma de Árgon	20 mm

A utilização dos caudais expostos na tabela 3.4 tem que ver com a necessidade de aplicação de um fluxo laminar no jato de plasma de modo a que a pluma ativa seja mais comprida e que as espécies reativas e a sua energia alcance a superfície (Nishume 2015).

As potências de descarga foram obtidas pelo método da figura de Lissajous. Esta figura é um gráfico da carga transferida em função da tensão periódica aplicada e a sua área corresponde à energia elétrica média dissipada. A potência média da descarga é calculada pela multiplicação do valor de energia elétrica média dissipada pela frequência do sinal. A diferença dos dois valores de potência deve-se ao facto do Hélio ser mais fácil de ionizar (Nishume 2015).

As ondas da tensão e corrente aplicadas nas descargas podem ser observadas na imagem 3.22.

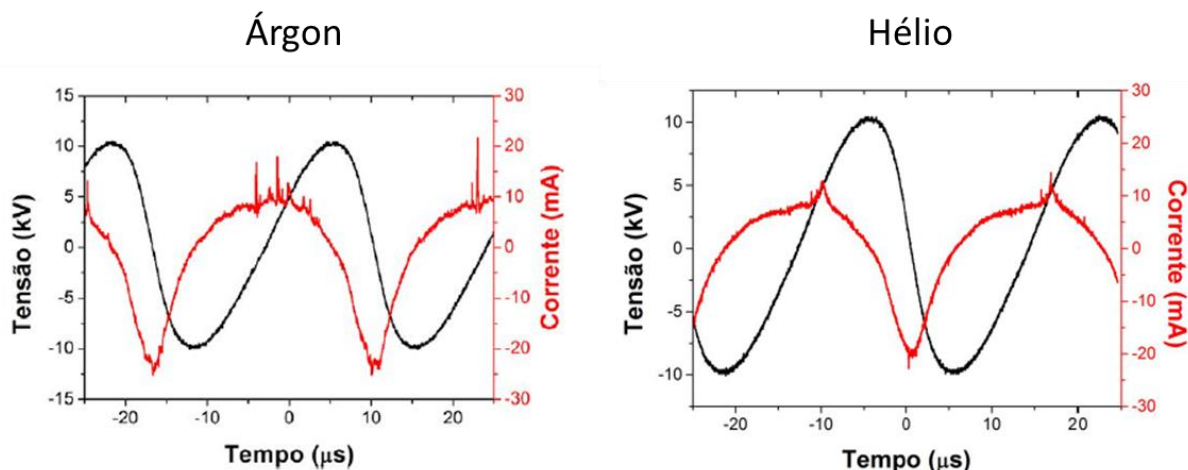


Figura 3.22 - Caracterização das descargas elétricas aplicadas (Nishume 2015)

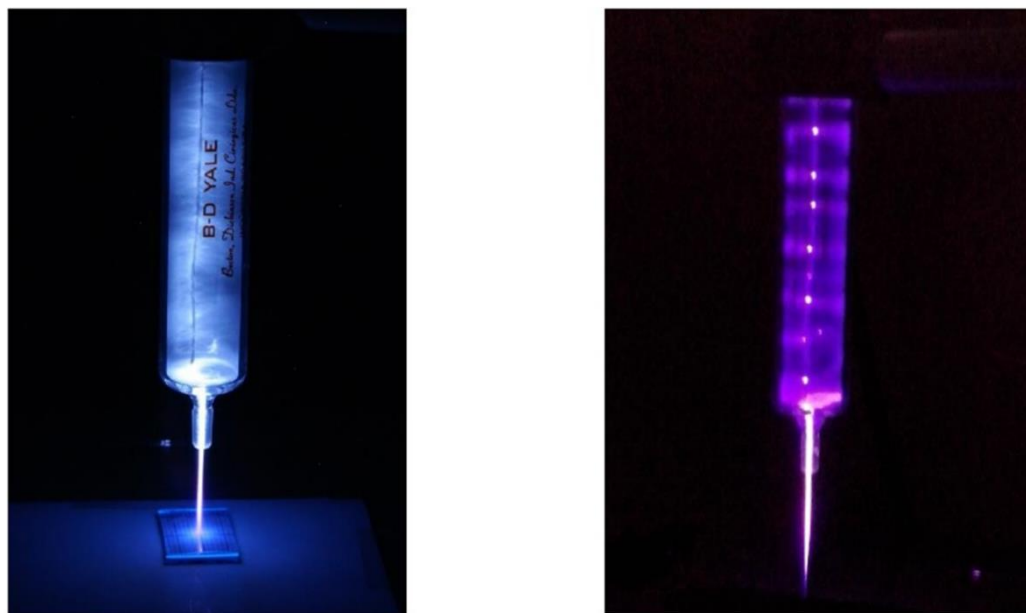


Figura 3.23 - Fotografia da aplicação do tratamento de plasma frio com árgon e hélio (Nishume 2015)

Tratamento de polipropileno (PP)

A exposição da amostra ao plasma foi efetuada através da passagem da pluma num movimento retilíneo semelhante à deslocação do extrusor de uma impressora 3D como se pode observar pelo esquema da figura 3.24. A amostra é de 20x15 mm e toda a sua superfície é percorrida em espaços de tempo como referido nos resultados.

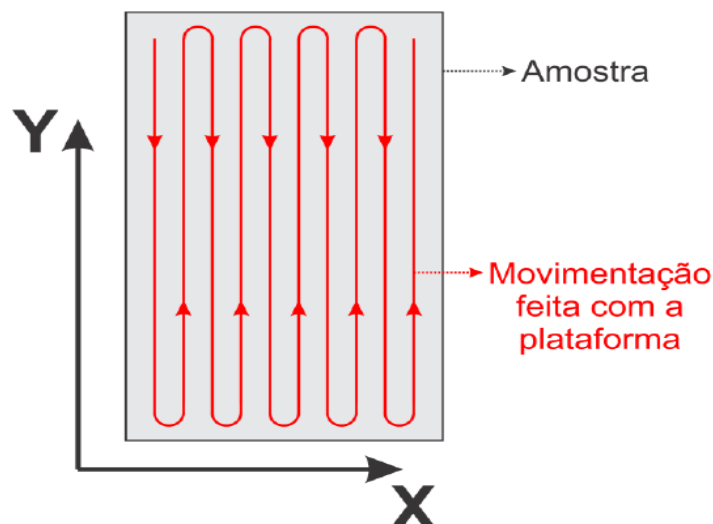


Figura 3.24 - Esquema do padrão de exposição da amostra ao plasma frio (Nishume 2015)

Os resultados dos testes de ensaios ao tratamento da superfície foram obtidos pela análise da rugosidade da superfície e ângulo de contato.

A rugosidade da superfície resultante da atuação do plasma frio é devida à formação de grupos polares e a lavagem após o tratamento ajuda a remover pequenos fragmentos de polímero, que se encontravam aglomerados em estruturas grandes e homogêneas (Nishume 2015).

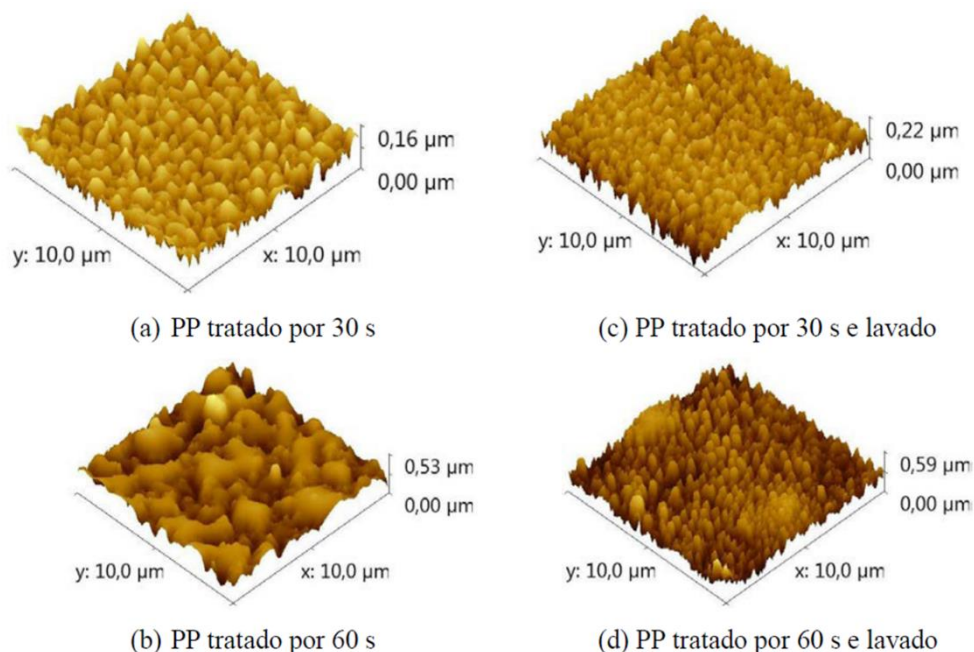


Figura 3.25 - Imagens microscópicas da superfície das amostras de PP (Nishume 2015)

Os valores de ângulo de contato resultantes de diferentes tempos de exposição ao tratamento por plasma frio são os apresentados na figura 3.26.

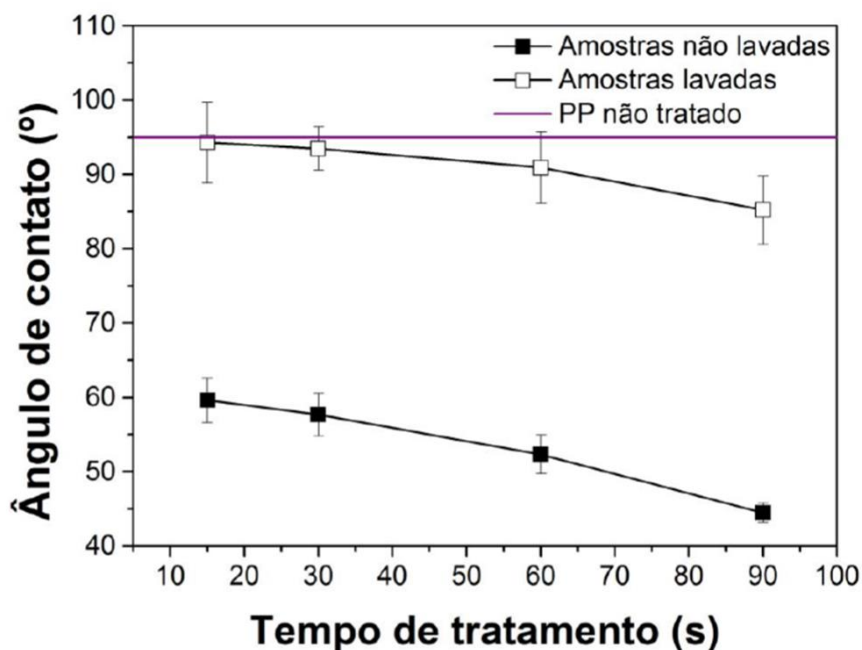


Figura 3.26 - O efeito do tempo de exposição com utilização de árgon na hidrofília da superfície medida pelo ângulo de contato (Nishume 2015)

Tratamento de politereftalato de etileno (PET)

Com as mesmas condicionantes do tratamento de polipropileno só que neste caso variando também a distância do bocal de saída da pluma de plasma frio os resultados do ângulo de contacto são os expostos nas figuras 3.27 (árgon) e 3.28 (hélio).

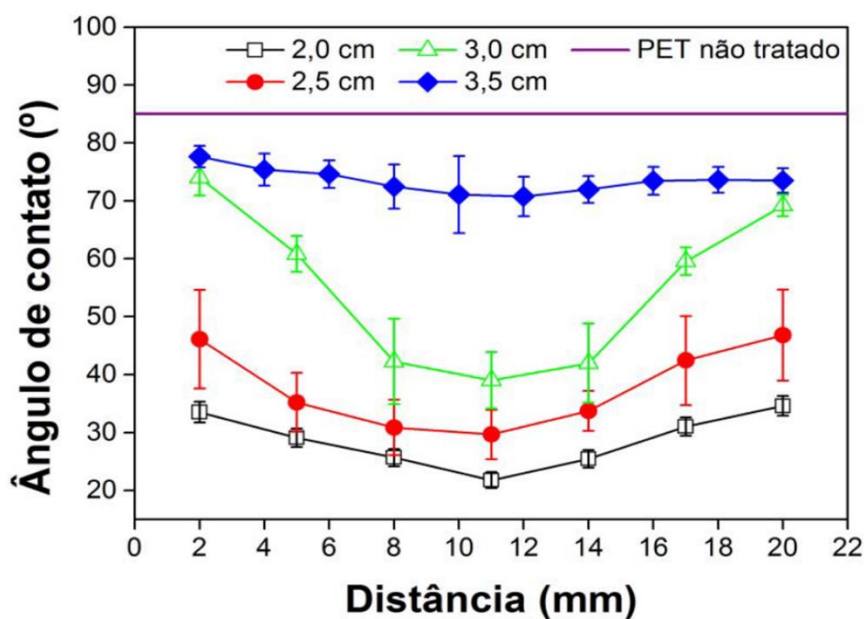


Figura 3.27 - Resultados dos tratamentos de superfícies de PET com plasma frio de árgon. (Nishume 2015)

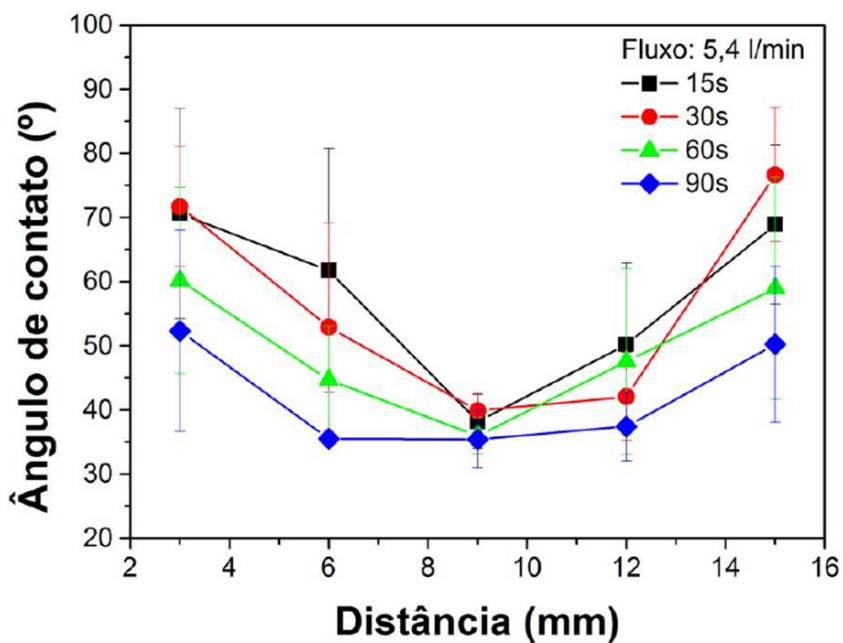


Figura 3.28 - Resultados dos tratamentos de superfícies de PET com plasma frio de hélio (Nishume 2015)

O efeito do tratamento depende também do tempo decorrido após a exposição do polímero ao plasma frio como podemos observar na figura 3.29.

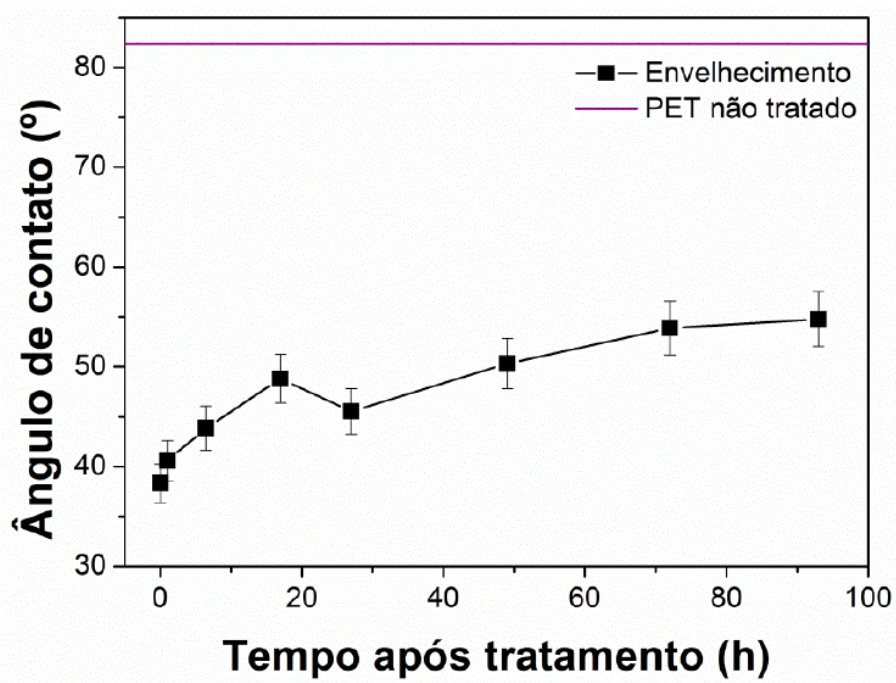


Figura 3.29 - Efeito do tempo decorrido após o tratamento da superfície de PET (Nishume 2015)

Ilacões desta abordagem

Quer a rugosidade, quer as propriedades hidrofílicas da superfície são dependentes do tempo de exposição, da movimentação do dispositivo em relação à superfície a ser tratada e da lavagem da superfície com água ou outro solvente polar. (Nishume 2015) . O tempo de exposição revela que foram percorridos cerca de 215 *mm* em 15 s, o que corresponde à atuação do tratamento a uma velocidade de 14,33 *mm/s*. Também o tempo após o tratamento influencia as propriedades hidrofílicas.

A utilização deste tratamento durante a impressão tridimensional pode resultar num aumento da hidrofília da superfície da porção de peça já extrudida e pode melhorar a adesão entre camadas quando aplicado durante o processo de impressão.

3.3.3 FuseBox da empresa Essentium

Para ultrapassar os problemas de adesão entre camadas na impressão tridimensional por deposição fundida a Essentium desenvolveu um equipamento que reformula o modo de manter a temperatura da peça enquanto a mesma está a ser impressa. A empresa fabrica e comercializa este equipamento para desenvolvedoras de impressoras tridimensionais por FDM ou para interessados em aplicar este mecanismo nas suas impressoras 3D.

O mecanismo

Este equipamento, denominado FuseBox, contempla uma cabeça de extrusão onde ocorre o processo normal de aquecimento do material. Para além disso, em torno do extrusor ainda existe um circuito elétrico que em proximidade do material já depositado forma um conjunto de arcos de descarga elétrica que passam pelo material já impresso até à mesa de impressão. Esta passagem de corrente aquece o material mantendo a temperatura do objeto a ser impresso durante todo o processo e ainda permite soldar os filamentos uns aos outros (Essentium 2017).



Figura 3.30 - Descargas elétricas na impressão tridimensional utilizando a tecnologia da FuseBox (Essentium 2017)

O método de aquecimento afeta diretamente apenas a peça mantendo todos os outros componentes da impressora livres de sobreaquecimento para temperaturas acima da temperatura de funcionamento.

O aquecimento é feito no material em todo o seu volume e não apenas na superfície (Essentium 2017). Assim, o material tem de ser condutor e é também desenvolvido pela empresa.

O material

A tecnologia da FuseBox depende do material que está a ser impresso. Os filamentos do material a ser fundido são revestidos com uma camada de nano materiais, à base de carbono, de elevada condutibilidade elétrica (Essentium 2017). A empresa diz conseguir fabricar filamentos para serem impressos com esta tecnologia em todo o tipo de polímeros e resinas apenas adicionando o revestimento condutivo.

Resultados do sistema

A empresa afirma conseguir um aumento de até 98% da força de ligação entre camadas com o processo de passagem da descarga elétrica no momento da impressão.



Figura 3.31 - Equipamento FuseBox. (Essentium 2017)

Ilacões desta abordagem

Esta abordagem tem pontos extremamente positivos no que toca à impressão de peças com propriedades mecânicas elevadas dado o aumento da força de ligação entre as camadas da impressão. No entanto, o facto desta tecnologia ser dependente de uma adição de material condutor ao material a ser impresso inviabiliza a utilização de componentes impressos pela FuseBox quando são necessárias propriedades não condutoras. Além da condução elétrica ser possível outras propriedades mecânicas podem ser alteradas no material quando é adicionado o revestimento aos filamentos.

3.4 Patentes de tratamento de superfícies

Dada a história da impressão tridimensional, nomeadamente o seu crescimento exponencial aquando do término da vigência de uma série de patentes que protegiam as técnicas básicas, é importante saber que tecnologias continuam atualmente cobertas por patentes.

Torna-se, portanto, necessário entender que as patentes da impressão tridimensional são válidas e até quando, se ainda não expiraram.

Stratasys

A Stratasys está no mercado das impressoras 3D há mais de 25 anos tendo já evoluído em diversas áreas como a aeroespacial, automóvel, produtos para consumidores finais, medicina e dentária.

A empresa reclama ter mais de 800 patentes e estar a aguardar por mais que ainda estão em processo de aceitação pendente. É a empresa com mais patentes na área da impressão tridimensional.

Com uma pesquisa no Instituto Nacional de Propriedade Industrial é possível verificar que das 28 patentes em nome da Stratasys nenhuma tem Portugal como país designado, mas visto que se trata de patentes Europeias o European Patent Office (EPO) torna-se um motor de pesquisa indispensável.

Desde técnicas de aquecimento da cabeça de deposição a mecanismos de diminuição do erro de posicionamento é possível encontrar mais de 600 registos no EPO. Outro exemplo são técnicas de cristalização por energia cinética (European Patent Office 2017).

Mais concretamente, uma pesquisa cruzada com o termo “laser” permite perceber que existem duas patentes que usam esta tecnologia para o aquecimento do material a depositar e para o controlo de dimensão do material já depositado.

Apium

Esta empresa diz ter uma patente pendente no processo de impressão na qual baseou a introdução no mercado da sua nova impressora Apium P 155. Esta parece ter um bloco emissor de calor em torno do extrusor que pode aumentar a qualidade de ligação entre as camadas impressas e a camada que está a ser depositada.

Outras patentes

Existem muitas patentes na impressão tridimensional de plásticos que protegem avanços tecnológicos nesta área por impedirem investimentos de empresas em pesquisa de possíveis soluções que possam interferir com as patentes de outras.

De um modo resumido temos patentes nas seguintes áreas (European Patent Office 2017) :

- Métodos de aquecimento do extrusor/cabeça de impressão
 - ☐ Indução magnética
 - ☐ Utilização de lasers
- Modos multifilares de alimentação
- Design da impressora
- Métodos de melhoria
 - ☐ Comunicação (impulsos elétricos)
 - ☐ Ruído
 - ☐ Incertezas (da movimentação das partes móveis)
- Sistemas de arrefecimento
 - ☐ Dos motores axiais
 - ☐ Do extrusor/cabeça de impressão
- Dispositivos de cura do material
- Scanners tridimensionais

Ilacões retiradas das patentes

Apesar de todos estes avanços e patentes em investigação de métodos de melhoria das impressoras 3D nenhum se debruça única e exclusivamente sobre a melhoria da adesão de camadas impressas. No entanto qualquer alteração do método de aquecimento, do material a usar ou mesmo dos controladores pode significar uma melhoria em qualquer uma das problemáticas inerentes à impressão tridimensional.

Sem incidir sobre a matéria protegida por patentes esta dissertação irá procurar soluções para a realização de um sistema de melhoria de adesão entre camadas.

4 Propostas de sistemas de melhoria da adesão entre camadas na impressão tridimensional

Dos diferentes métodos de preparação da porção de peça já impressa analisados no terceiro capítulo podemos concluir que a utilização de lâmpadas de luz infravermelha e a utilização de ultrassons não serão eficazes nem práticos. O excesso de aquecimento da atmosfera dentro da câmara da impressora pode provocar o mau funcionamento dos seus componentes no primeiro caso e o processo moroso e possivelmente destruidor da soldadura por ultrassons invalida esta alternativa.

A exposição da superfície da camada já impressa a um feixe de laser ou a uma pluma de plasma frio são as hipóteses em estudo. Para estas serão avaliados os materiais e métodos de modo a maximizar a sua eficácia e estudo dos resultados.

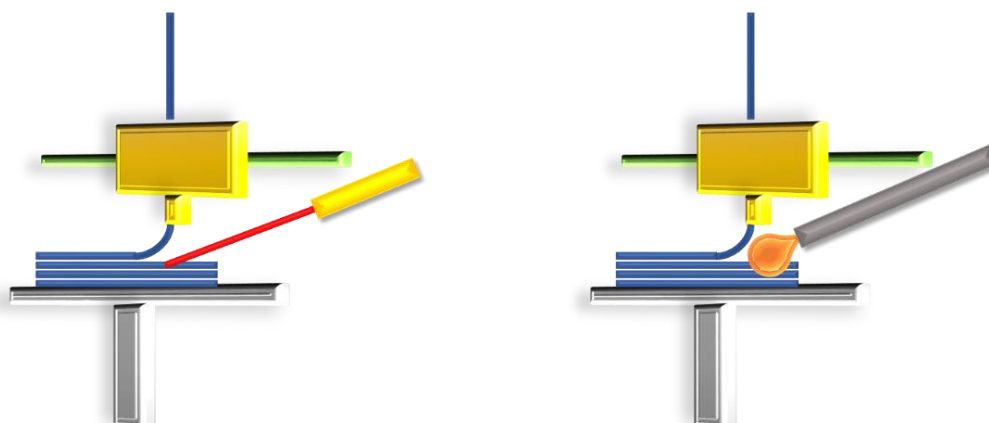


Figura 4.1 - Esquema de preparação ou aquecimento da camada inferior no processo de impressão tridimensional por FDM

A incidência do tratamento deve ser de tal forma que o material a ser tratado seja aquele sobre o qual vai ser impressa uma nova camada.

4.1 Avaliação das condicionantes das impressoras FDM

O método de tratamento das camadas a utilizar no sistema a conceber terá de ter em conta o tempo e espaço disponível.

Avaliação do espaço disponível para implementação do sistema

Uma vez que o extrusor se movimenta nos eixos x e y ao longo de todo o plano XoY qualquer objeto que não seja solidário com este movimento implica possíveis colisões durante a impressão.

A fixação de um laser num componente da impressora, como um dos seus eixos, de tal modo que a radiação incida na peça a ser impressa tem de ser estudada de modo a que nenhum outro componente da impressora, durante a sua deslocação, interrompa o feixe de atuar na peça.

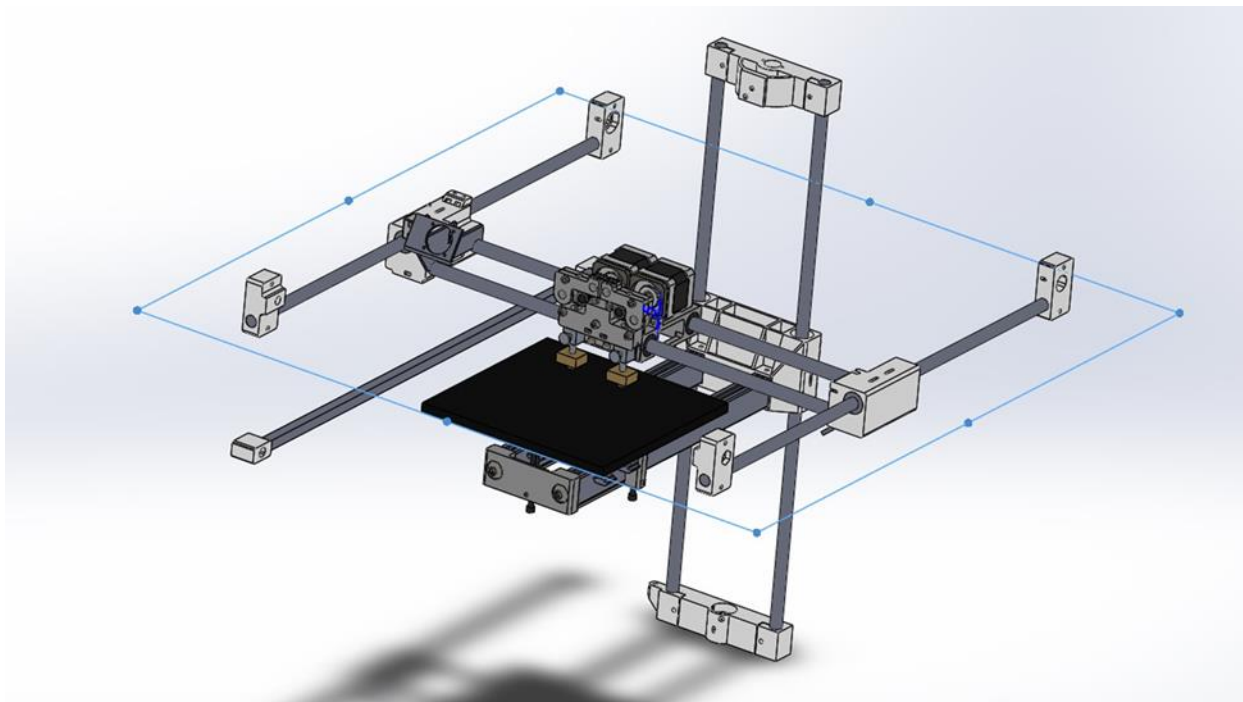


Figura 4.2 - Plano de movimentação horizontal do extrusor da impressora 3D FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial

O facto da distância entre o ponto extremo do extrusor e a porção de peça já impressa ser na ordem das décimas de milímetros, atendendo à dimensão do extrusor, implicaria que o laser incidisse quase paralelamente ao plano da última camada impressa, logo a eficiência de transferência de calor do laser por radiação no ponto pretendido seria muito baixa.

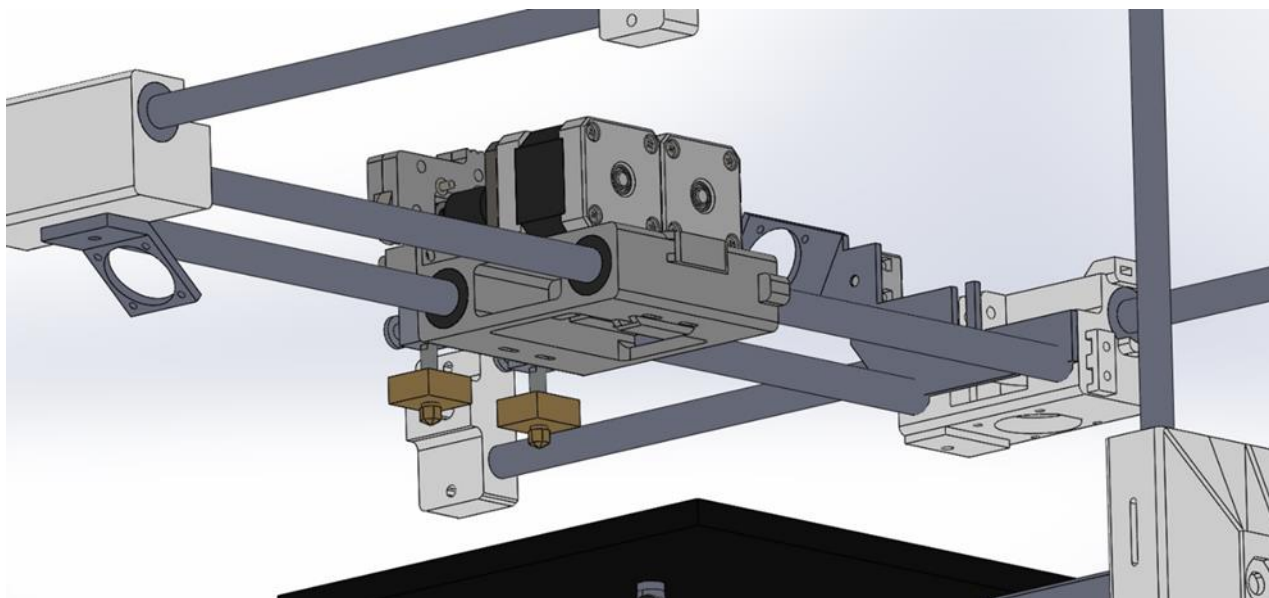


Figura 4.3 - Vista mais pormenorizada do plano horizontal do extrusor da impressora 3D FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial

Para os tratamentos por radiação laser ou exposição a um feixe de plasma frio, estes equipamentos terão de ser solidários com os movimentos do extrusor.

Avaliação do tempo disponível para atuação do sistema

A impressora tridimensional FDM Kühling&Kühling RepRap Industrial trabalha com velocidades de impressão até 200 mm/s , no entanto para minimizar os erros relativos a más impressões por falta de qualidade os procedimentos e testes a realizar serão a 25 mm/s . Esta velocidade de impressão permitirá um tempo de exposição ao tratamento da porção de peça já impressa de 0,04 s por milímetro de fio.

4.2 Sistema de aquecimento das camadas por laser direcionado em fibra ótica

O laser utilizado deverá atingir valores de potência largamente superiores ao valor de referência do artigo analisado na secção 3.3.1. Esta decisão é baseada no facto de, no estudo em questão, terem sido consideradas as propriedades do material, como os índices de absorção e a cor, como também o laser ter sido utilizado em condições ideais de focagem e comprimento de onda. Para a adaptabilidade a um conjunto alargado de termoplásticos de alto desempenho a potência máxima será de 50 W com possibilidade de variação. O objetivo do laser será o aumento da temperatura da camada já impressa para valores próximos da temperatura de transição vítrea do termoplástico a ser utilizado.

A possibilidade da polarização linear do laser é outro fator de escolha uma vez que se o campo eletromagnético da radiação for paralelo ao plano de incidência do laser na superfície é maximizada a energia absorvida pela superfície.

Um gerador de laser para fibra ótica que cumpre os requisitos de potência, a possibilidade de polarização linear do feixe e é indicado para a soldadura de termoplásticos é o módulo de laser de díodos, refrigerado a ar, DLM50 da IPG Photonics cujas características principais se encontram na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características principais do laser DLM50 da IPG Photonics (IPG photonics Corporation 2017a)

Potência máxima de saída	50 W
Comprimentos de onda	915, 940, 960, 970 nm
Dimensões	$150 \times 60 \times 226 \text{ mm}^3$
Potência máxima de consumo	120 W



Figura 4.4 - Laser DLM50 da IPG Photonics (IPG photonics Corporation 2017b)

O preço deste tipo de lasers ronda os 600 euros.

Dada a dimensão e peso do laser este não poderá ser solidário com a cabeça extrusora pois os motores e eixos não o suportariam. Neste sistema temos então um laser fixo à estrutura da impressora e um conjunto de fibras óticas que levam o feixe ao ponto de extrusão consoante a direção de impressão.

Hipóteses de múltiplas fibras a incidir em vários pontos ou uma fibra acoplada a um motor giratório em torno do eixo de extrusão são ambas válidas para o aquecimento de toda a camada inferior no momento de deposição. A hipótese de múltiplas fibras é mais simples no que toca ao controlo do sistema, mas, no entanto, é mais limitadora quanto aos pontos de incidência.

Os cabos de controlo e potência do mecanismo giratório e as fibras óticas deverão ser encaminhados para o extrusor pelo passa-cabos da impressora 3D de modo a não interferir com os movimentos dos motores da impressora.

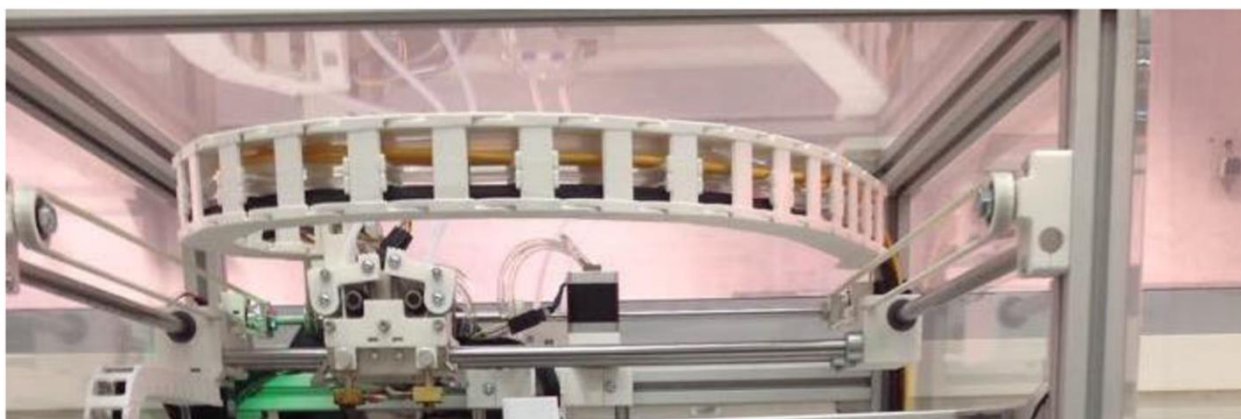


Figura 4.5 - Passa-cabos do extrusor da impressora tridimensional Kühling&Kühling RepRap industrial (Moreira 2016)

4.2.1 Hipótese de múltiplas fibras

Com o objetivo de incidir apenas em quatro pontos (situados estrategicamente de modo a que esses pontos estejam imediatamente antes em quatro direções de impressão perpendiculares) permite que o aquecimento seja efetuado em peças impressas com padrões retilíneos.

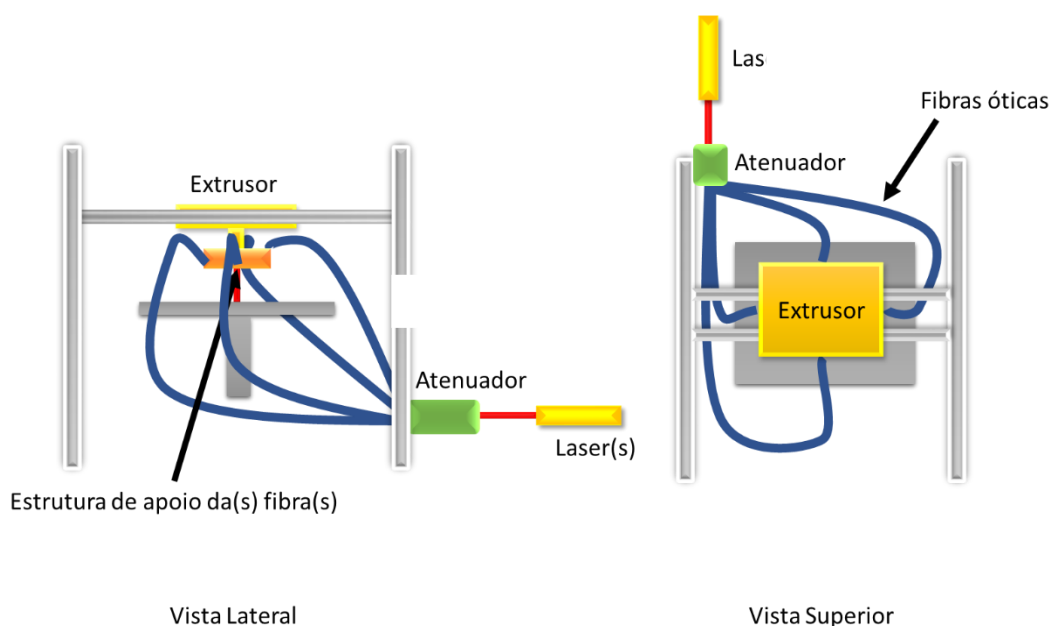


Figura 4.6 - Esquema da utilização de fibras óticas transportadoras do feixe laser

O padrão retilíneo resulta em limitações de utilização deste sistema em perímetros não coincidentes com as direções de impressão retilíneas. No entanto eleva a fasquia de utilidade em comparação com a solução estudada em 3.3.1.

Para a hipótese de múltiplas fibras poderão ser utilizados tantos lasers como pontos de incidência em torno do ponto de extrusão ou então poderão ser utilizados dispositivos como o da figura 4.7 que funciona como um comutador de um feixe para um de 4 canais.



Figura 4.7 - Comutador de um feixe laser para 4 canais (IPG photonics Corporation 2017b)

Lentes de focagem, ou colimadores, poderão ser colocadas no término das fibras consoante a distância ao ponto de extrusão para que a absorção de energia por parte do termoplástico seja maximizada. No entanto o laser acima mencionado permite a saída do feixe pelo fim de uma fibra. As lentes de focagem final ou o fim das fibras direcionais deverão ser apoiadas numa estrutura acoplada ao extrusor. Dada a dimensão e peso dos colimadores que, para este tipo de pequenas aplicações, rondam os 30 *mm* de diâmetro, 140 *mm* de comprimento e 0,5 *kg* de peso, esta não é uma solução ideal para acoplar ao extrusor da impressora.



Figura 4.8 - Colimador de feixe de laser (IPG photonics Corporation 2017b)

Quanto mais pontos de incidência em torno do ponto de extrusão maior é o peso suportado pela estrutura, principalmente se se utilizarem lentes de focagem, no entanto a utilização de mais do que 4 fibras e dois ou mais lasers permite a possibilidade de cobrir de forma mais eficiente todas as direções de impressão da impressora como mostra a figura 4.9.

No esquema da figura 4.9 existem 8 pontos de incidência com no máximo dois ativos ao mesmo tempo. Esta configuração necessita de dois módulos geradores de laser ligados, cada um, a um comutador de quatro saídas. Em torno do ponto de extrusão estão intercaladas saídas de cada um dos comutadores de modo a possibilitar a ativação simultânea de dois pontos de incidência adjacentes.

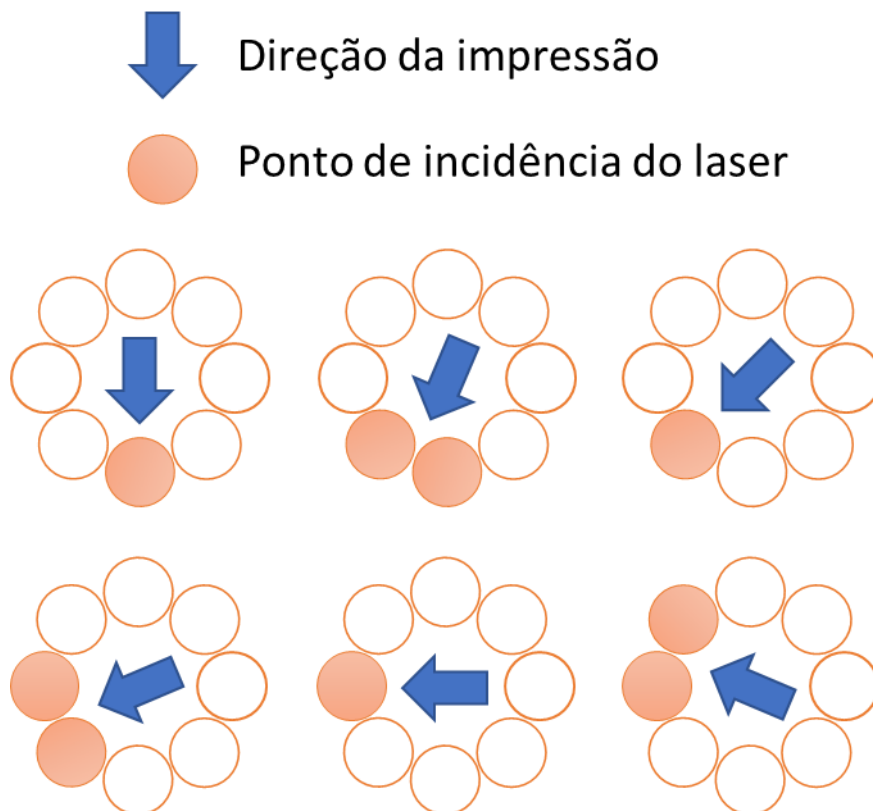


Figura 4.9 – Esquema de ativação dos pontos de incidência do feixe laser em torno do ponto de extrusão, consoante a direção de impressão

Para a hipótese de múltiplas fibras (8 fibras, 2 módulos laser e 2 comutadores) foi realizado um grafcet comportamental do sistema exposto na figura 4.10. No grafcet a leitura do ângulo de atuação é feita pela interpretação do código G que movimenta o extrusor.

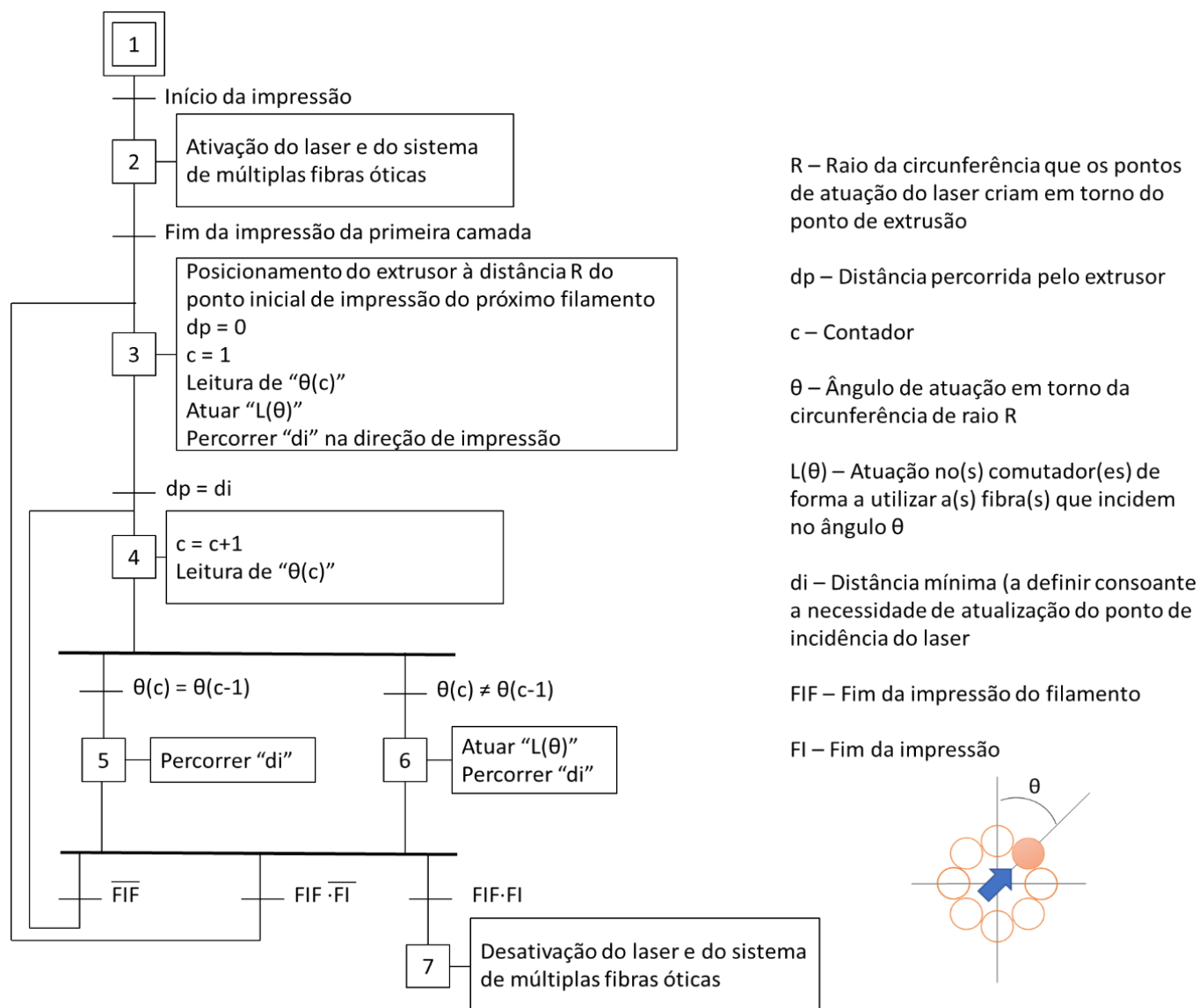


Figura 4.10 - Grafcet comportamental da hipótese de múltiplas fibras em torno do ponto de extrusão

4.2.2 Hipótese de orientação de fibra(s) com um motor giratório

No caso de utilização de uma ou mais fibras orientadas com um motor giratório acoplado ao extrusor resulta na necessidade do controlo desse motor giratório de tal modo que o ponto de incidência está sempre afastado do ponto de extrusão, mas na direção de impressão. Este controlo é atingível pela utilização de um motor passo a passo.

O facto do motor ter de ser suportado pelo extrusor da impressora cria a necessidade da escolha de um motor leve e de dimensões reduzidas. Para este caso é posto em consideração o motor passo a passo de duas fases NEMA11 da IGUS, cujas características principais estão expostas na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características principais do motor passo a passo NEMA11 da IGUS (Igus 2017)

Voltagem nominal	24-48 V(DC)
Corrente nominal	1,0 A
Ângulo do passo	1,8 °
Dimensão do veio (diâmetro, comprimento)	5, 20 mm
Dimensões totais	28x28x70 mm ³
Peso	0.2 Kg



Figura 4.11 - Motor passo a passo da IGUS (Igus 2017)

O preço destes motores ronda os 10 euros.

A figura 4.12 mostra a estrutura que suporta todo o mecanismo composta por uma base, o motor passo a passo e 4 engrenagens. As duas primeiras permitem a passagem do eixo de rotação horizontal para um eixo de rotação vertical, já as outras permitem a redução do ângulo de rotação por passo do motor e ainda a adaptação de uma fibra no interior da engrenagem maior.

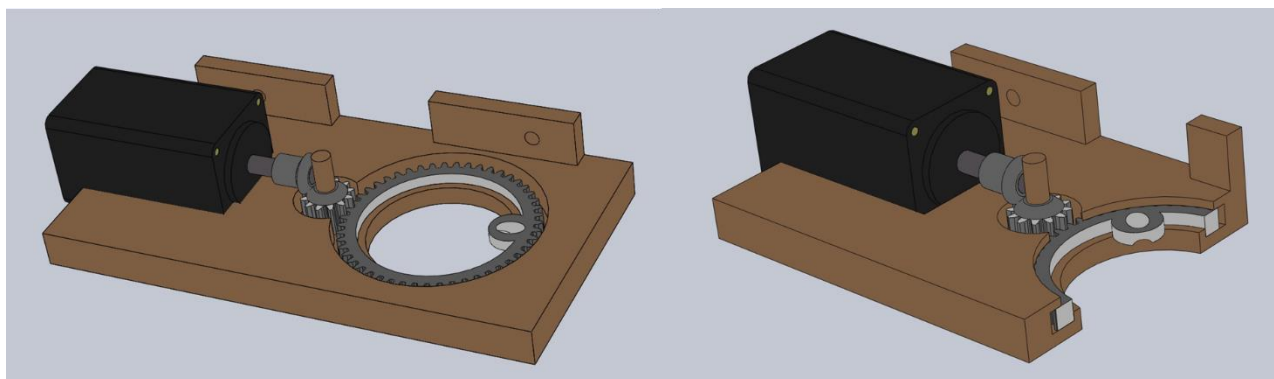


Figura 4.12 - Estrutura e mecanismo de rotação da fibra em torno do ponto de extrusão

A estrutura pode ser realizada utilizando uma impressora 3D de modo a obter uma peça leve. Para o correto posicionamento das engrenagens a impressão deve ser interrompida na altura máxima da engrenagem maior, para a colocação da mesma, e ter em conta a impressão de suportes para uma pequena aba que impede o movimento vertical da engrenagem. Este último detalhe é exposto na vista em corte do lado direito da figura 4.12.

O acoplamento da estrutura ao extrusor da impressora é feito através de uma placa de alumínio e 4 parafusos M4 que também possibilitam o ajuste vertical para calibração e ajuste para diferentes comprimentos das cabeças extrusoras. O mecanismo giratório resulta no aumento significativo do peso do bloco extrusor. Este aumento de peso pode significar imprecisão geométrica na impressão bem como desgaste indevido dos motores da impressora tridimensional.

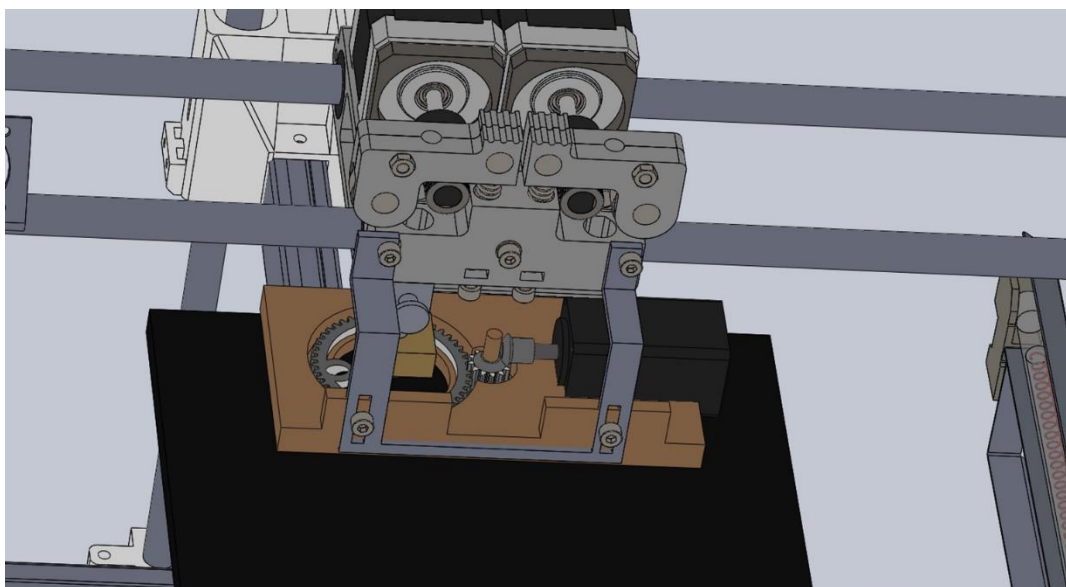


Figura 4.13 - Estrutura e mecanismo de rotação da fibra em torno do ponto de extrusão acoplados ao extrusor

O graficet desta solução de condução do feixe de laser por uma fibra ótica com motor giratório acoplado ao extrusor está exposto na figura 4.14.

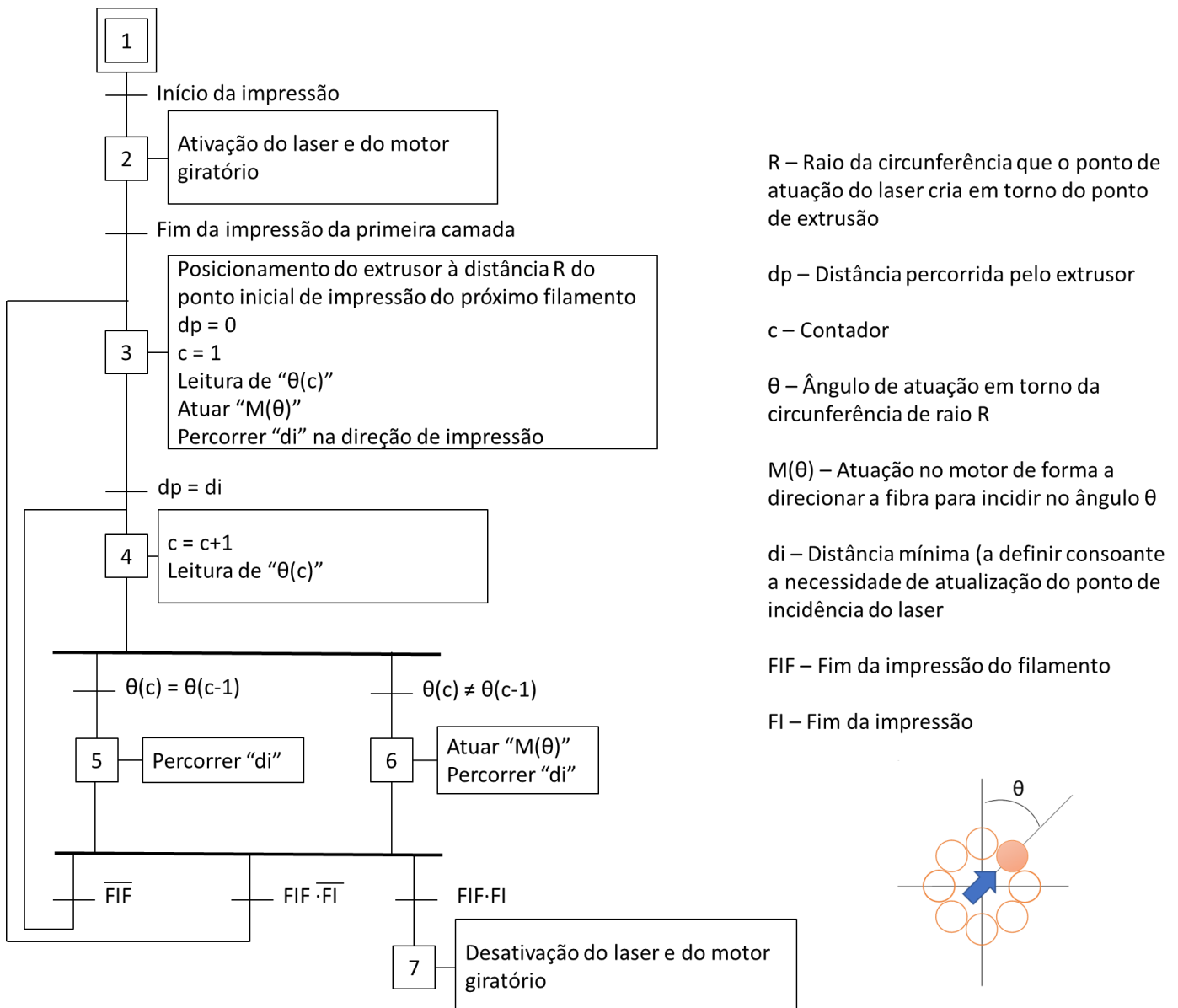


Figura 4.14 - Grafcet comportamental da hipótese de uma fibra e um motor giratório em torno do ponto de extrusão

4.3 Sistema de aquecimento das camadas por laser com reflexão do feixe

De um modo semelhante ao descrito em 4.2 a escolha do laser deverá ser feita de tal modo que a potência máxima será de 50 W com possibilidade de variação para a adaptabilidade a um conjunto alargado de termoplásticos de alto desempenho. O objetivo do laser será igualmente o aumento da temperatura da camada já impressa para valores próximos da temperatura de transição vítrea do termoplástico a ser utilizado. Também a possibilidade de polarização será ideal de modo que após as sucessivas reflexões do feixe até ao ponto de incidência o campo elétrico da radiação seja paralelo ao plano formado pelo feixe incidente, feixe refletido e normal à superfície.

O mesmo módulo gerador de laser utilizado em 4.2 pode ser escolhido, mas em vez da transmissão do feixe através de fibras óticas será necessária uma lente de focagem que permita distâncias de focagem variáveis em torno dos 500 mm. Esta distância corresponde ao caminho que o feixe percorre nas suas respetivas reflexões como exposto mais à frente.

Durante a impressão tridimensional o extrusor desloca-se paralelamente à base nos dois eixos x e y. De modo a que o laser atue na camada já impressa no momento em que a nova camada esteja a ser depositada então este terá de ser direcionado consoante a direção da deposição.

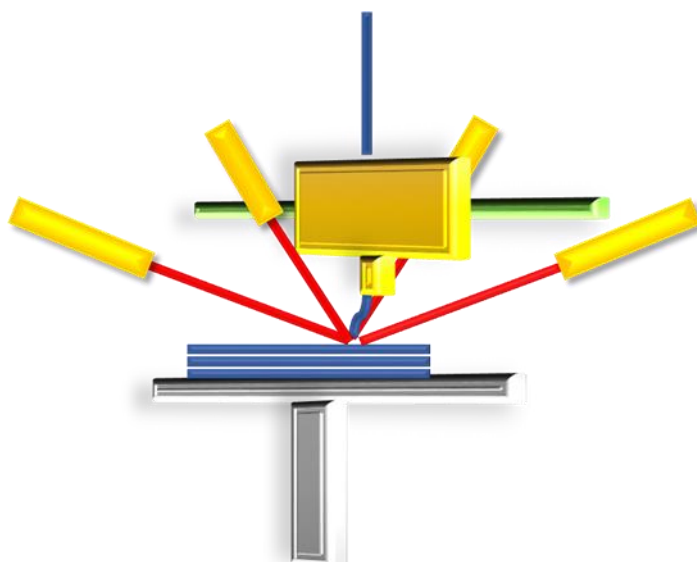


Figura 4.15 - Esquema da utilização de 4 lasers

Idealmente teríamos um laser que contornasse a cabeça extrusora com um ou mais conjuntos de lasers galvanométricos de modo a atuar a 360°. Num laser galvanométrico o feixe é orientado através de uma dupla reflexão de tal modo que uma o orienta horizontalmente e a outra verticalmente como mostra o esquema da figura 4.16. O plano de incidência seria a superfície da peça a ser impressa na zona em torno do ponto de extrusão.

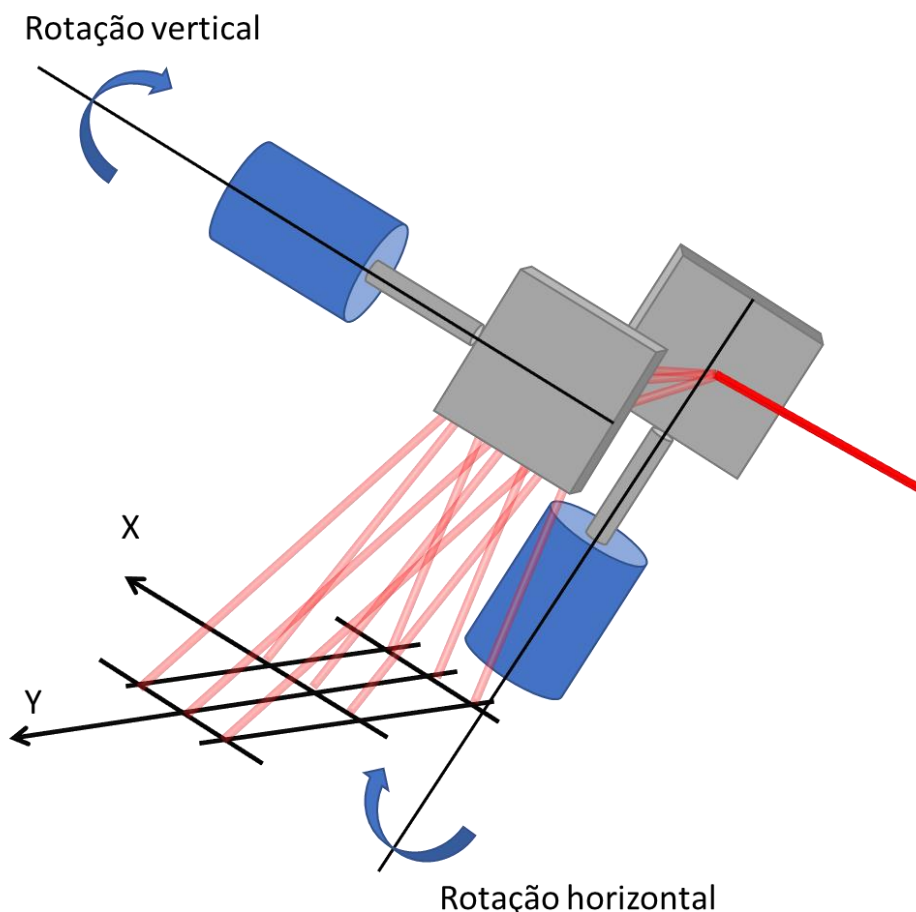


Figura 4.16 - Esquema representativo do funcionamento de um laser galvanométrico

No entanto, o uso desta solução resultaria num excesso de peso para a cabeça extrusora com os motores de acionamento do laser galvanométrico, e se a atuação for dividida em 4 sentidos ortogonais será suficiente para o teste da eficácia do sistema e possível utilização em impressões de padrão retilíneo.

Dado que a impressão só é realizada num sentido de cada vez o mesmo laser poderá ser refletido de tal modo que atue em 4 pontos diferentes. Temos então o direcionamento do feixe do laser para 4 locais diferentes com a utilização de um conjunto de espelhos que o refletem.

A reflexão do feixe mesmo que efetuada dentro da câmara de impressão da impressora acarreta riscos de segurança sendo necessário um correto manuseamento e controlo dos objetos que refletem o feixe bem como proteções de possíveis reflexões para o exterior da câmara.

Para realizar o direcionamento do feixe laser foi idealizado um veio com 4 espelhos fixos de tal modo que a reflexão de um feixe paralelo ao eixo seja em direção perpendicular ao mesmo. Estes estão dispostos em 4 distâncias ao topo do veio diferentes e cada um fixo a 90° de rotação do anterior segundo o eixo do veio.

O motor passo a passo utilizado na hipótese do capítulo 4.2.2 é também o ideal para esta solução dada a sua dimensão e peso reduzidos.

O direcionamento do feixe para quatro pontos diferentes é obtido através da rotação do veio como é possível visualizar na figura 4.17.

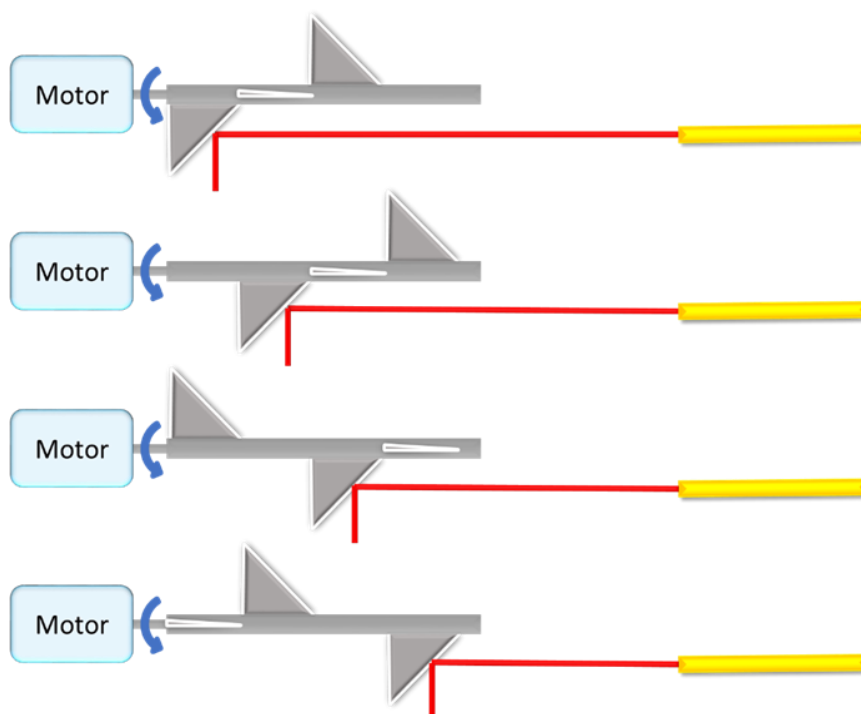


Figura 4.17 - Esquema de direcionamento do feixe do laser para 4 pontos diferentes por meio de um eixo com espelhos

O motor terá de ser capaz de rodar 90° com precisão e repetibilidade elevada e será comandado por um algoritmo capaz de interpretar o código G da impressão.

Este direcionamento será obtido através de um veio com espelhos acoplados, solidário com o movimento da guia do eixo onde está o extrusor, como mostra a figura 4.18.

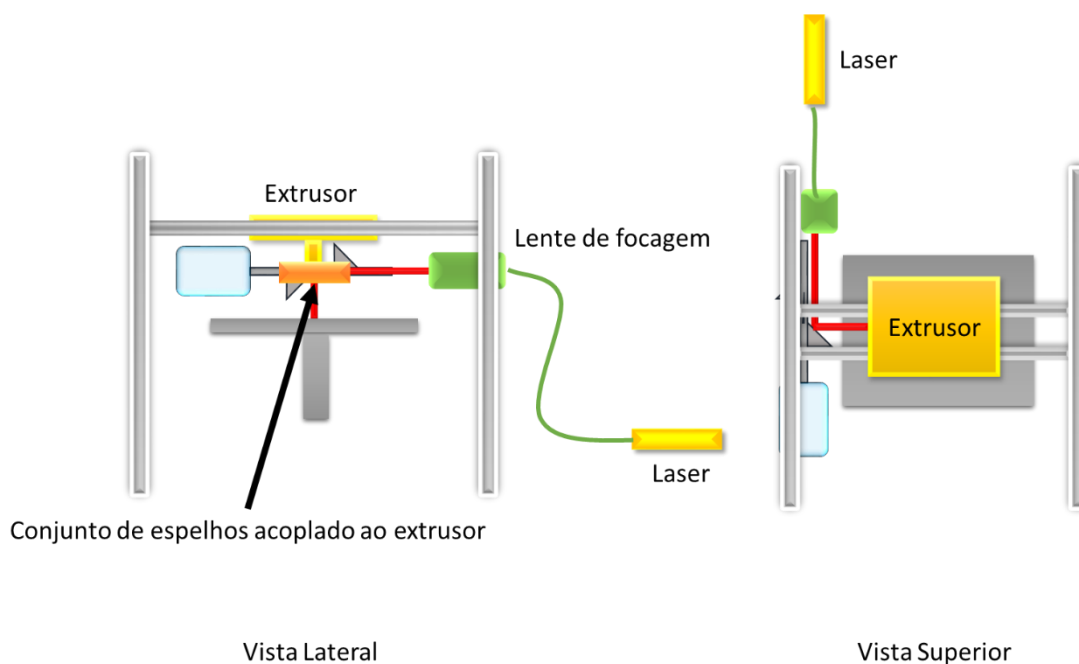


Figura 4.18 - Esquema da localização dos componentes da hipótese de utilização de um feixe laser e um veio de espelhos acoplado a um motor

Por fim esse feixe sofrerá mais um conjunto de reflexões consoante o ponto no qual deve incidir na peça já depositada. Para isso foi idealizada uma estrutura acoplada ao extrusor.



Figura 4.19 - Impressão tridimensional da estrutura idealizada

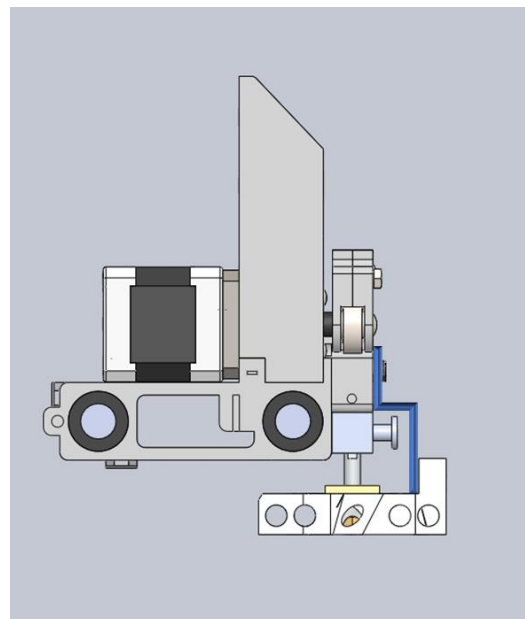


Figura 4.20 - Desenho em SolidWorks do acoplamento do suporte dos espelhos e da cabeça de deposição

A estrutura que segura o conjunto de espelhos acoplado ao extrusor foi desenhada no SolidWorks. Os orifícios por onde passa o feixe laser e as faces que se destinam à colocação de espelhos foram calculados para que a reflexão do feixe incidisse antes do ponto de extrusão.

A estrutura pode ser realizada utilizando uma impressora 3D de modo a obter uma peça leve.

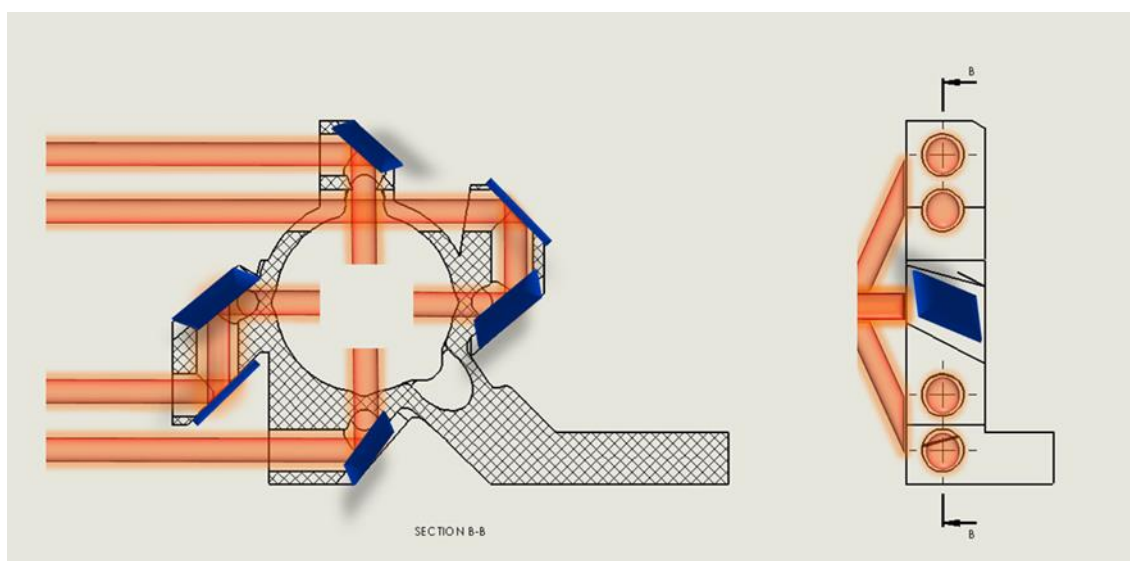


Figura 4.21 - Vista em corte e lateral do suporte de espelhos com esquema de reflexão dos feixes

O ajuste vertical para calibração e ajuste para diferentes comprimentos das cabeças extrusoras é conseguido através de uma placa de alumínio e 4 parafusos M4. Este ajuste vertical permite também afastar ou aproximar cada um dos feixes para a atuação a diferentes distâncias do ponto de extrusão. Este ajuste deve ser acompanhado do ajuste vertical do veio de reflexão do feixe para quatro pontos diferentes.

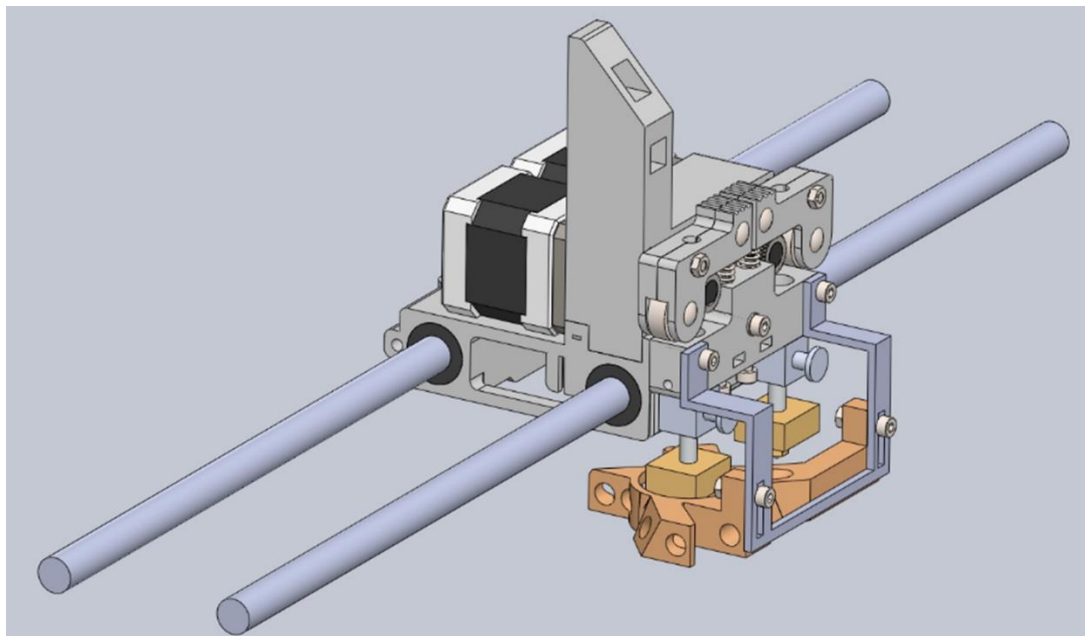


Figura 4.22 - Desenho em SolidWorks do acoplamento do suporte dos espelhos e da cabeça de deposição

Esta solução é a que menos peso adiciona ao extrusor. O motor e o veio de espelhos acoplados à guia do veio onde está o extrusor não representa um problema dado o seu peso.

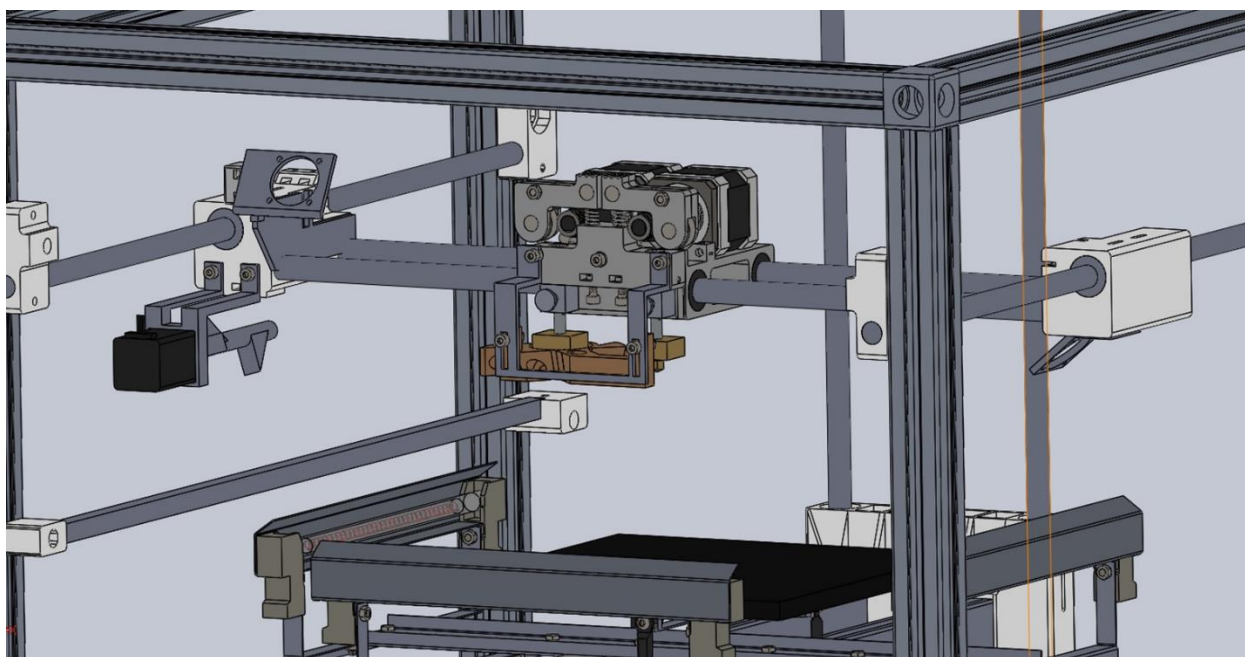


Figura 4.23 - Desenho em SolidWorks do acoplamento do suporte dos espelhos, da cabeça de deposição e do veio de espelhos acoplado a um motor

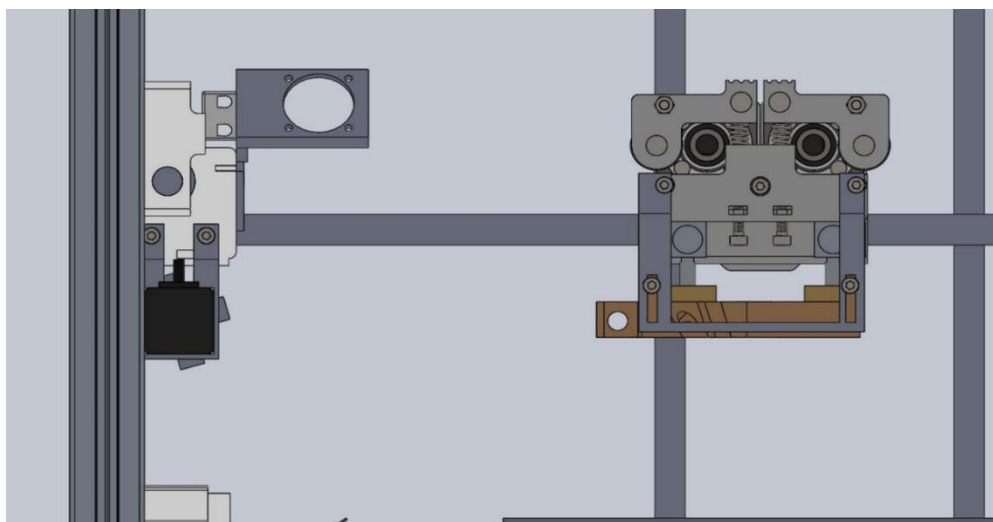


Figura 4.24 - Desenho em SolidWorks do acoplamento do suporte dos espelhos, da cabeça de deposição e do veio de espelhos acoplado a um motor

O grafcet desta solução de reflexão do feixe de laser num veio de espelhos acoplado a um motor giratório é o exposto na figura 4.25.

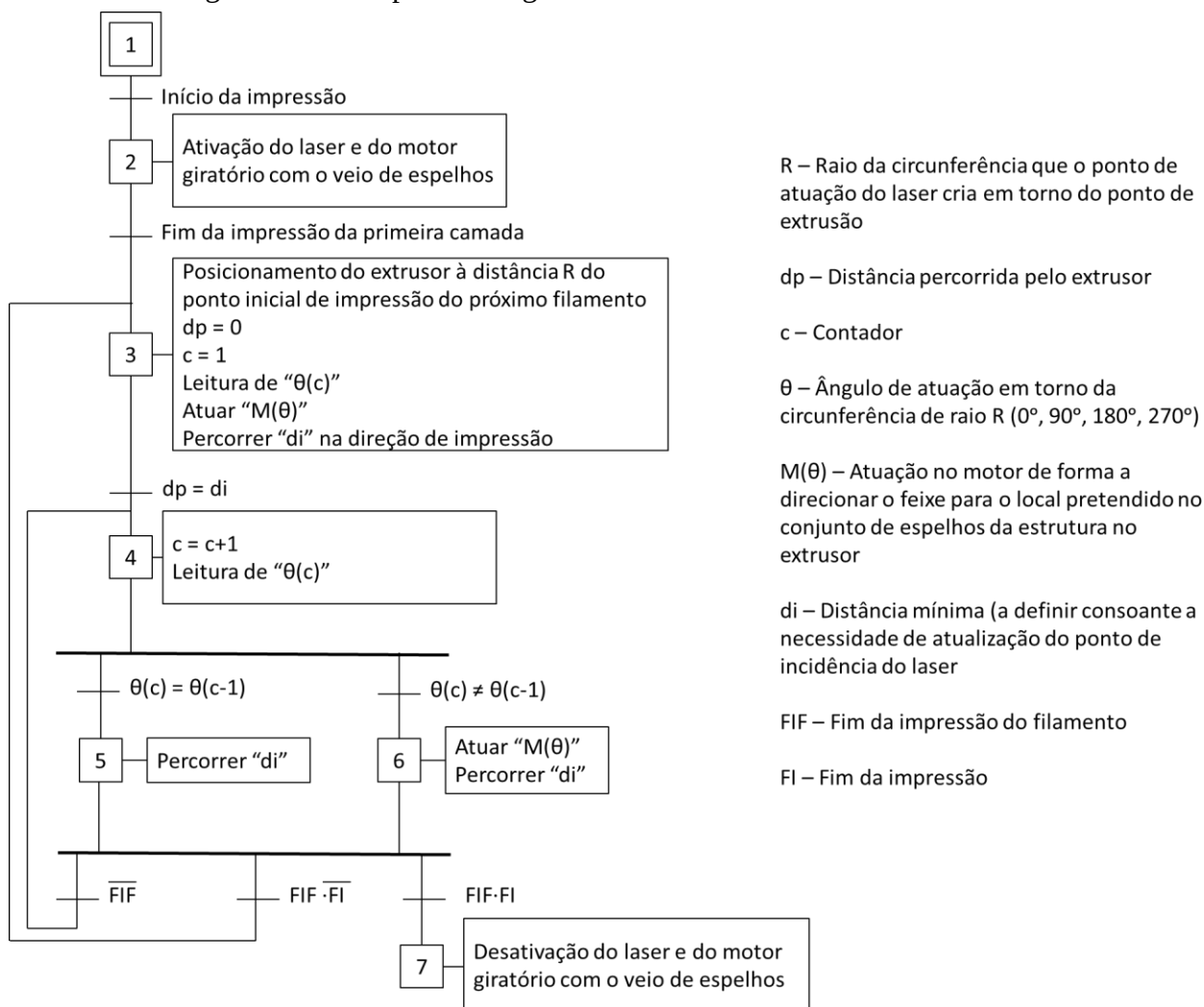


Figura 4.25 - Grafcet comportamental da solução do suporte dos espelhos, da cabeça de deposição e do veio de espelhos acoplado a um motor

4.4 Sistema de preparação das camadas por plasma frio aquando da impressão

O método de obtenção de plasma frio idealizado é um jato de plasma tipo Corona com um eléctrodo e a utilização de Hélio ou Árgon num tubo de vidro como tubo dielétrico. Existem, no entanto, opções de sistemas de geração de plasma frio que utilizam ar comprimido como gás a ser ionizado. Tais soluções apresentam resultados de ativação semelhantes e apenas um estudo das influências das ionizações de outro tipo de gases poderia revelar o efeito que causaria na panóplia de termoplásticos de alto desempenho a serem utilizados na impressão tridimensional.

A estrutura que segura o dispositivo que cria o jato de plasma frio é acoplado ao extrusor da mesma forma como a estrutura idealizada na secção 4.3. O direccionamento do jato é feito de tal modo que a incidência é no ponto de extrusão. O tratamento é conseguido pela passagem dos filamentos extrudidos pela pluma de plasma frio originada no sistema gerador de plasma.

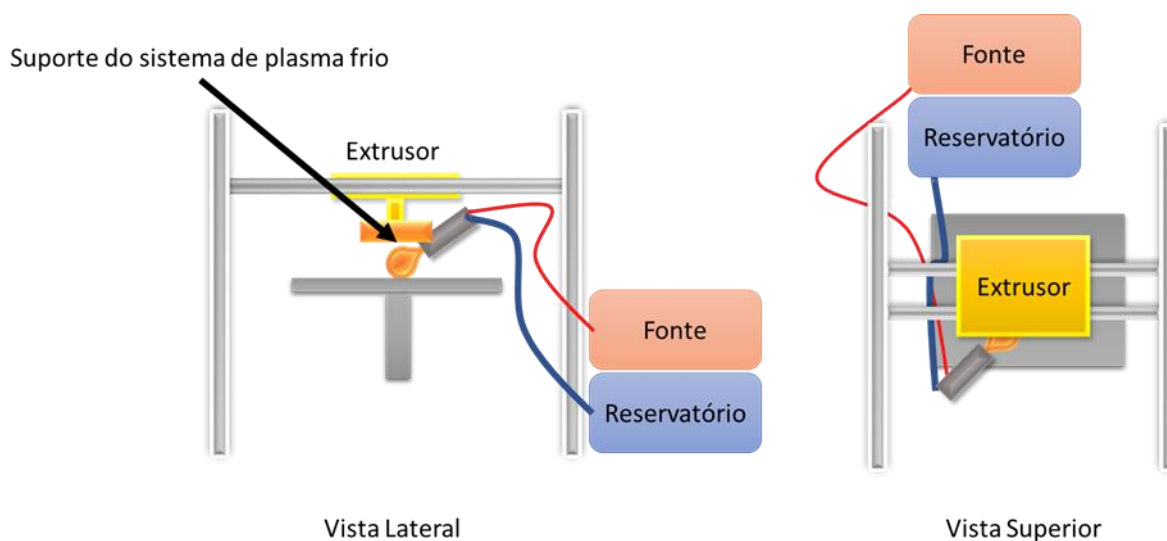


Figura 4.26 - Esquema da utilização de plasma frio

Esta passagem será suficiente para a ativação da superfície melhorando as suas propriedades hidrofílicas de tal modo que a adesão entre camadas na impressão tridimensional possa ser obtida. Uma comparação dos resultados da secção 3.3.2, no tratamento de 15 s, que corresponde a uma velocidade de $14,33 \text{ mm/s}$, permite assegurar ativação da superfície no tratamento a velocidades de 25 mm/s uma vez que este último é realizado com passagens muito mais próximas que acabam por ativar a superfície em filamentos já depositados.

O ajuste vertical para calibração e ajuste para diferentes comprimentos das cabeças extrusoras é conseguido através de uma placa de alumínio e 4 parafusos M4 tal como no caso da estrutura da secção 4.3.

O ajuste vertical pode ainda influenciar a distância da pluma à peça já impressa. Consoante esta distância a pluma pode também efetuar o tratamento na superfície já impressa e melhorar a influência do tratamento nas propriedades das superfícies ainda não cobertas com uma nova camada.

Os tubos de transporte do gás e os cabos de transporte da eletricidade para o eléctrodo deverão ser encaminhados para o extrusor pelo porta-cabos da impressora 3D de modo a não interferir com os movimentos dos motores da impressora.

Os parâmetros de descarga elétrica e controlo do fluxo de gás devem poder ser variáveis com vista a avaliar diferentes parâmetros para maximizar o efeito pretendido, consoante o termoplástico.

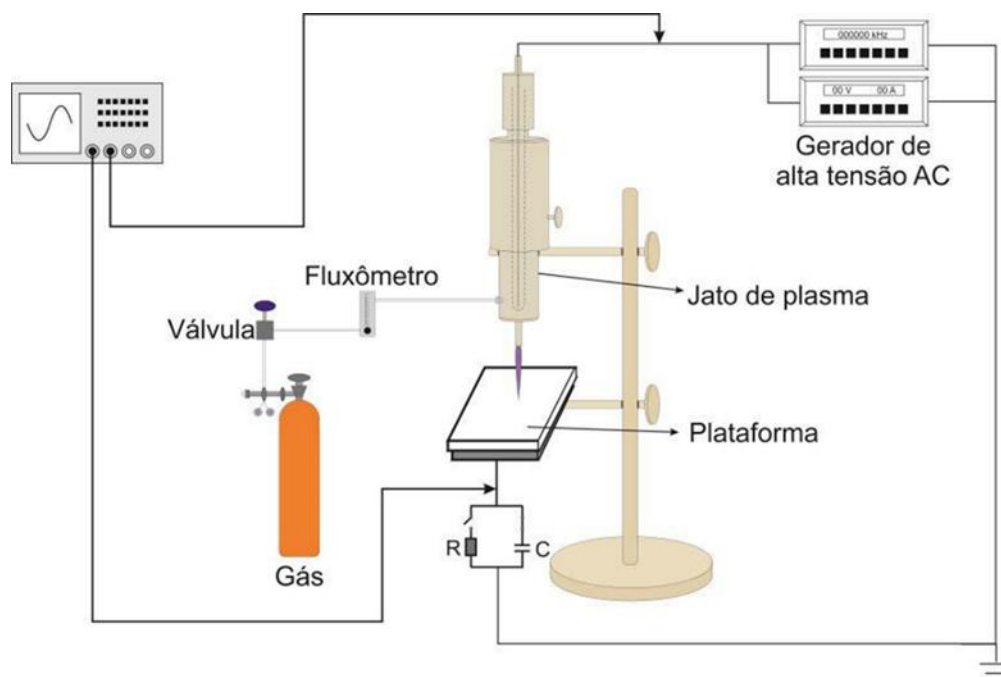


Figura 4.27 - Esquema de montagem dos aparelhos constituintes do sistema de geração de plasma frio

Em vez da realização do equipamento gerador de plasma pode ser adquirida uma solução pronta a utilizar como o exemplo da PlasmaBeam Standard da Diener Electronic cujas características principais estão descritas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Características principais do PlasmaBeam Standard da Diener Electronic (Electronic 2017)

Potência do gerador	300 W
Frequência do gerador	20 KHz
Comprimento do cabo do gerador de plasma	3 m
Peso do gerador de plasma	0,6 Kg
Comprimento da pluma de plasma	12 mm
Consumo de gás	2 m ³ /h

Este tipo de equipamentos geradores de plasma podem ser adquiridos por valores que rondam os 6000 euros.

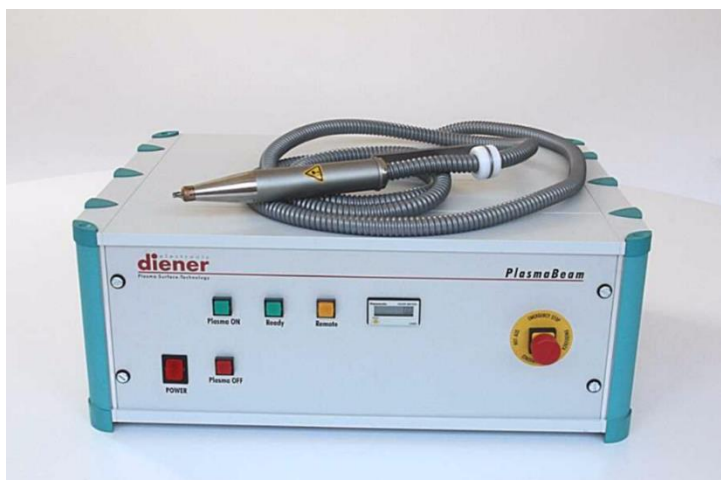


Figura 4.28 - Fotografia do gerador de plasma PlasmaBeam Standard da Diener Electronic (Electronic 2017)

4.5 Sistema de preparação das camadas por plasma frio em intervalos da impressão

Utilizando os mesmos métodos de obtenção de plasma frio idealizados na secção 4.4 outro tratamento da superfície foi idealizado de tal modo que este é realizado no término da impressão de uma camada sobre toda a sua superfície.

Com a utilização de um braço robótico que levasse a pluma de plasma frio sobre toda a superfície ou com a utilização das deslocações do próprio extrusor que transportasse o jato de plasma, a superfície já impressa seria alvo do tratamento antes do início da impressão da próxima camada.

Este sistema permitiria o consumo do gás utilizado na formação de plasma frio apenas na quantidade necessária para a ativação da superfície e consequente não desperdício da energia gasta no sistema adicional à impressão. No entanto, os tempos de produção das peças utilizando este mecanismo são claramente maiores, necessitando de um intervalo na impressão ou de uma análise das movimentações do extrusor de forma a implementar um braço robótico que ativasse a superfície já impressa enquanto o extrusor estivesse a imprimir sobre outra superfície já ativada.

Para esta última questão teriam de ser avaliadas as necessidades do projeto de impressão quanto às propriedades necessárias do objeto, tempos de impressão, qualidade, quantidade e custos de modo a optar pela melhor solução. Se o pretendido for a impressão de um exemplar ou poucas cópias do mesmo, será melhor optar pela utilização do movimento do extrusor para a ativação da superfície com o plasma uma vez que a ativação da superfície dura tempo suficiente para a impressão de uma nova camada.

Um graficet comportamental da proposta do sistema de ativação da superfície com plasma frio nos intervalos entre impressão de camadas distintas é exposto na figura 4.29.

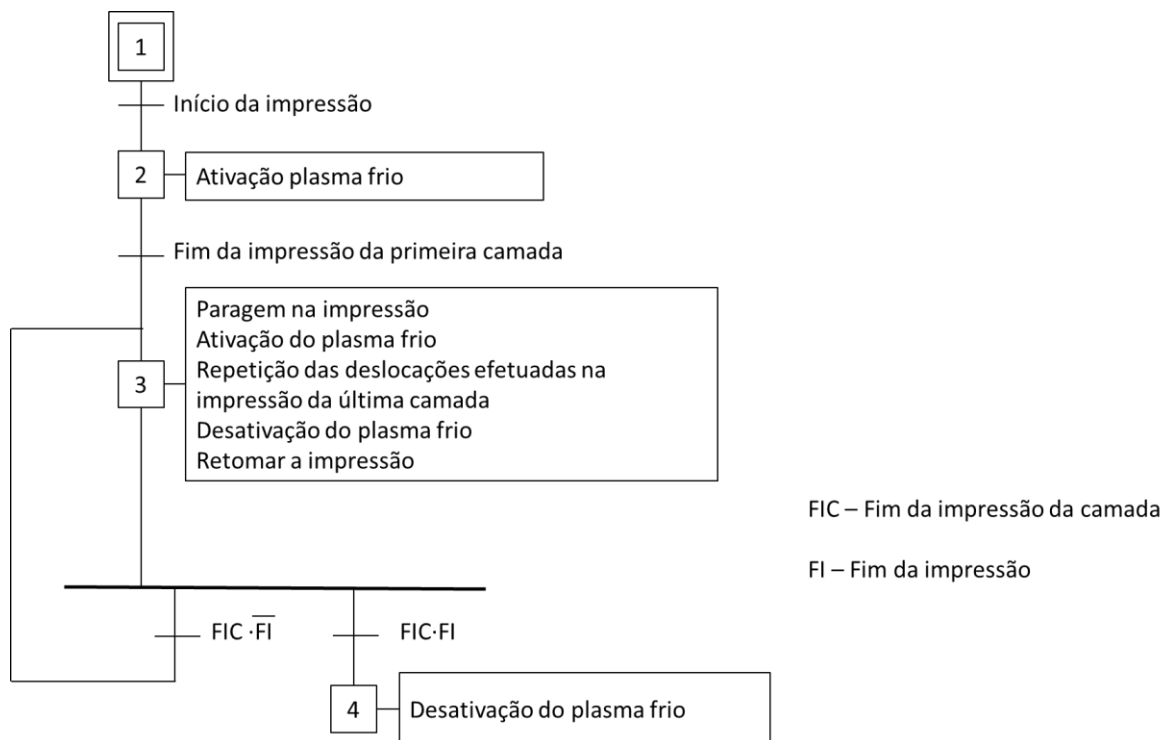


Figura 4.29 - Grafcet comportamental da solução de ativação da superfície com plasma frio em intervalos de impressão de camadas

Neste caso é possível estudar e implementar diferentes tempos de passagem do tratamento necessários bem como os parâmetros de descarga elétrica e controlo do fluxo de gás para serem avaliados com vista a maximizar o efeito pretendido consoante o termoplástico.

5 Conclusões da dissertação e perspectivas de desenvolvimento

5.1 Conclusões

A necessidade de mecanismos adicionais para a melhoria da adesão entre camadas aquando da impressão de termoplásticos de alto desempenho em comparação com os termoplásticos comuns foi exposta e analisada.

A avaliação dos diferentes métodos de preparação da superfície já impressa para a extrusão de uma nova camada na impressão tridimensional por deposição fundida revelou que as opções mais viáveis a adaptar a um sistema de melhoria da adesão entre camadas são o aquecimento da superfície com radiação laser e a ativação da superfície pela exposição da mesma ao plasma frio.

O aumento da temperatura localizado da camada já impressa aquando da impressão de uma nova camada revelou ser uma excelente forma de melhoria nas propriedades mecânicas das peças impressas com resultados de até 50 % de melhoria.

A condução do feixe laser em fibras óticas, ou por sucessivas reflexões do mesmo, foram as alternativas expostas que realizam o aumento da temperatura do ponto da camada já impressa onde é depositado o novo filamento extrudido. Com as limitações de pontos de incidência em torno do extrusor as hipóteses de reflexão do feixe e das múltiplas fibras são menos indicadas para a possibilidade de impressão de padrões complexos. Conclui-se que a proposta que requer fibras óticas e um motor giratório em torno do eixo de extrusão viabiliza a impressão tridimensional sem condicionantes, sendo a melhor alternativa a escolher dada a sua segurança e eficácia.

Quanto à ativação da superfície por exposição ao plasma frio também duas possibilidades foram propostas sendo que uma é a ativação contínua do filamento extrudido e da superfície já impressa e outra executa a ativação da superfície após a sua impressão entre cada camada. A segunda possibilita a utilização do sistema adicional na sua eficiência máxima pois a exposição do termoplástico já extrudido de forma constante durante a impressão pode significar um excesso de consumo energético e de gás. No entanto o estudo da ativação dos termoplásticos a temperaturas mais elevadas (acabados de extrudir em comparação com já depositados) pode comprovar a preferência pela exposição ao plasma frio durante todo o processo de impressão. Dentro da proposta de tratamento entre camadas há duas possibilidades, sendo que uma é a utilização de um braço robótico adicional para o tratamento da superfície já impressa enquanto o extrusor imprime sobre superfície ativada, e a outra, a utilização dos movimentos do extrusor para a passagem da pluma sobre a superfície. Conclui-se que a melhor solução depende do tipo e quantidade de impressões pretendidas, mas o sistema com mais versatilidade e simplicidade de aplicar seria a repetição dos movimentos do extrusor por cada camada impressa, com o jato de plasma ativo e velocidades de varrimento, caudal de gás e potência do circuito elétrico calculadas para o material em causa.

A junção das propostas de aquecimento do ponto onde ocorrerá a extrusão de novo material e a ativação da superfície com plasma frio é possível e poderá resultar na melhor opção de escolha do sistema de melhoria na adesão entre camadas na impressão tridimensional por deposição fundida de termoplásticos de alto desempenho.

5.2 Trabalhos futuros

A partir do percurso já caminhado nesta dissertação na concepção de um sistema de melhoria na adesão entre camadas na impressão tridimensional por deposição fundida o caminho a seguir deve passar pelo desenvolvimento de tais mecanismos.

O teste das várias variáveis do mecanismo desenvolvido deve ser executado pela impressão de provetes em vários termoplásticos de alto desempenho, a diferentes velocidades de impressão, potências dos sistemas adicionais, comprimentos de onda no caso do laser e gás a ionizar no caso do plasma.

Os provetes impressos com os sistemas adicionais devem ser comparados com os provetes impressos sem os sistemas adicionais de tal modo a obter resultados quanto às propriedades mecânicas, precisão geométrica, qualidade de impressão, acabamento superficial e ainda custos adicionais da utilização dos sistemas.

Referências

- Airwolf 3D Printers, 2017. Airwolf3d. Available at: <https://airwolf3d.com/3d-printer-product/> [Accessed October 4, 2017].
- Amada Miyachi America, I., 2015. Laser Welding Fundamentals. Available at: http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=/apex/educationalresources_fundamentals&file=01580000001Jz8A.
- Borges, A. de M.G., 2012. *Estudo de adesão e proliferação celular sobre superfícies de filmes poliméricos modificados por processo de plasma frio com descarga de barreira dielétrica*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Coherent, N., 2016. Coherent, Nufern. Available at: http://www.nufern.com/tech_center/ [Accessed May 16, 2017].
- Cycolac, M.W., 2014. Fused Deposition. Available at: https://pc-api-public.sabic.com/uploads/61cf5360/9b3b/e711/80fb/005056857ef3/SABIC_Filament_Specifications_May_2017_v1.pdf.
- Dielectric Corporation, 2012. Ultem® (Polyetherimide, PEI). Available at: <http://www.dielectriccorp.com/downloads/thermoplastics/ultem.pdf>.
- Dukane IAS, L., 2016. Importance of Balanced Vibration Welding Tools. , 510(Rev 01). Available at: <https://www.dukane.com/us/Documents/AppNote/An510.pdf>.
- El-Agez, T.M. and Taya, S.A., 2011. Development and construction of rotating polarizer analyzer ellipsometer. *Optics and Lasers in Engineering*, 49(4), pp.507–513. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816611000066>.
- Electronic, D., 2017. Diener Electronic. Available at: <https://www.plasma.com/en/produkte/plasmaanlagen/atmospheric-pressure-plasma/plasmabeam-standard/> [Accessed September 1, 2017].
- Essentium, 2017. Essentium Fusebox. Available at: essentiummaterials.com/fusebox [Accessed August 18, 2017].
- European Patent Office, 2017. Espacenet Patent search. Available at: Worldwide.espacenet.com [Accessed December 27, 2016].
- Igus, 2017. *Igus Stepper motor*, Available at: www.igus.eu/drylinE-datasheets.
- ILT, F. institute for laser technology, 2009. Heat treatment using laser radiation. , pp.1–2.
- IPG photonics Corporation, 2017a. Laser Module DLM 50 Air-cooled Diode Laser Module. Available at: <http://www.ipgphotonics.com/143/FileAttachment/DLM+50+Datasheet.pdf>
- IPG photonics Corporation, 2017b. IPG photonics. Available at: <http://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers> [Accessed August 20, 2017].
- LPKF laser & Electronics, 2016. LPKF laser & Electronics. Available at: <http://www.lpkf-laserwelding.com> [Accessed December 22, 2016].
- Luo, H., Zhou, X., Shu, W., Wen, S. and Fan, D., 2011. Enhanced and switchable spin Hall effect of light near the Brewster angle on reflection. *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 84(4).
- Mazumder, J. and Steen, W.M., 1980. Heat transfer model for cw laser material processing. *Journal of Applied Physics*, 51(2), pp.941–947.
- Moreira, R.M.D., 2016. *Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- Nishume, T.M.C., 2015. *Jato De Plasma Frio Em Pressão Atmosférica Para Tratamento De Materiais e Esterilização*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
- Nufern, 2009. Delivering Light Energy. Available at: www.nufern.com.
- Paschotta, R., 2008. Brewsters angle. *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*. Available at: https://www.rp-photonics.com/brewsters_angle.html
- Ravi, A.K., Deshpande, A. and Hsu, K.H., 2016. An in-process laser localized pre-deposition heating approach to inter-layer bond strengthening in extrusion based polymer additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 24, pp.179–185. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.08.007>.
- Santos, A.L.R., 2010. *Estudo dos polímeros comerciais tratados a plasma em pressão atmosférica*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá
- The Welding Institute, 2017. The Welding Institute. Available at: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-laser-beam-polarisation-and-is-it-important/>.
- Torii, S. and Yang, W.J., 2005. Heat transfer mechanisms in thin film with laser heat source. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(3–4), pp.537–544.
- Wagner, H.-E., Brandenburg, R., Kozlov, K.V., Sonnenfeld, A. and Michel, P., Behnke, J.F. 2003. The barrier discharge: basic properties and applications to surface treatment. *Vacuum*, 71(3), pp.417–436. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0042207X02007650>.
- Yu, N., Genevet, P., Kats, M., Aieta, F., Tetienne, J.-P. and Capasso, F., 2011. Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction. *Science*, 334(October), pp.333–337.