

Desenvolvimento de um Sistema de Coextrusão de precisão

Trabalho de Projeto apresentado para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Autor

Filipe André dos Santos

Orientador

Doutora Cândida Maria dos Santos Pereira Malça

Coimbra, Abril de 2018

Agradecimentos

Aproveito esta oportunidade para manifestar a minha profunda gratidão à Doutora Cândida Malça pelo seu apoio incondicional e empenho no acompanhamento deste trabalho. A sua constante disponibilidade e partilha de conhecimentos foram essenciais e, sem o seu contributo, a realização deste trabalho não teria sido possível. Pelo entusiasmo contagiante e motivação transmitidos desde o primeiro dia, o meu sincero obrigado.

Agradeço também ao Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado do Produto (CDRsp) da Marinha Grande pela disponibilização de meios literários e pela partilha de conhecimentos muito importantes para a realização deste trabalho, em particular um especial obrigado ao Pedro Carreira pelo seu contributo.

Quero agradecer de forma muito especial à minha família pelo seu constante apoio, compreensão e por me terem proporcionado esta oportunidade. Sem vocês, não teria chegado aqui. Deixo um agradecimento também aos meus amigos, em particular ao José Santos e ao Fernando Brites, por toda a ajuda e força transmitida ao longo desta longa jornada. Por fim, agradeço de uma forma muito profunda e especial à minha namorada que esteve sempre do meu lado nos melhores e, sobretudo, nos piores momentos. Sem a sua compreensão, apoio, encorajamento e paciência nada disto teria sido possível.

Resumo

A aplicação das técnicas de fabrico aditivo (TFA) é hoje uma realidade incontornável nas diferentes áreas da indústria graças às vantagens que lhe estão associadas. Quando comparadas com os processos de fabrico subtrativos convencionais as TFA permitem a produção de componentes com geometrias, internas e externas, complexas e oferecem uma maior liberdade na seleção de materiais ou combinação de materiais a utilizar. Uma das áreas onde a aplicação destas técnicas é determinante é a engenharia de tecidos pela produção de *scaffolds*. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo a criação de uma coextrusora de precisão que permita o fabrico aditivo de *scaffolds* utilizando a combinação de dois materiais diferentes durante o processo, conferindo aos *scaffolds* características correspondentes a cada um dos materiais que o constituem. Adicionalmente, a coextrusora a desenvolver terá dimensões tão reduzidas quanto possível, e os componentes que a constituem devem ser de fácil montagem/desmontagem.

O processo de desenvolvimento realizado baseia-se no compromisso entre a aplicação de expressões empíricas associadas ao dimensionamento de extrusoras e a obtenção das características pretendidas para a coextrusora de precisão. Ao longo de todo o processo de desenvolvimento da coextrusora foram analisadas todas as geometrias no sentido de prevenir eventuais problemas futuros originados pelas reduzidas dimensões da mesma, implementando alterações no sentido de evitar esses mesmos problemas.

Adicionalmente, foi realizado um estudo relativo ao processo de extrusão que envolveu a previsão das características do processo tais como a pressão gerada e o caudal de saída esperado para diferentes condições de serviço e diferentes materiais. Obtidas as características de processo, foi ainda realizado um estudo numérico, recorrendo ao método dos elementos finitos, no sentido de estudar a viabilidade mecânica do(s) elemento(s) sujeito(s) a esforços mais significativos. Cumulativamente, foram ainda apresentadas sugestões de maquinação CNC para todos os elementos criados recorrendo a um software comercialmente disponível de CAD/CAM.

A coextrusora de precisão desenvolvida ao longo do presente trabalho vai de encontro aos objetivos propostos e mostra-se muito promissora no que ao sucesso do processo de coextrusão diz respeito.

Palavras-chave: técnicas de fabrico aditivo, *scaffolds*, coextrusora de precisão, método dos elementos finitos, viabilidade mecânica, maquinação CNC.

Abstract

The application of the techniques of additive manufacturing (TAF) is now an unavoidable reality in the different areas of the industry thanks to the advantages associated with it. Compared to conventional subtractive manufacturing processes, TAF allows the production of components with complex internal and external geometries and offers greater freedom in the selection of materials or combination of materials to be used. One of the areas where the application of these techniques is determinant is the tissue engineering by the production of scaffolds. In this context, this work aims at the creation of a precision coextruder that allows the additive manufacture of scaffolds using the combination of two different materials during the process, giving the scaffolds characteristics corresponding to each of the materials that constitute it. In addition, the coextruder to be developed will have dimensions as small as possible, and the components that constitute it should be easy to assemble / disassemble.

The development process is based on the compromise between the application of empirical expressions associated with the design of extruders and the achievement of the desired characteristics for the precision coextruder. Throughout the entire coextrusion development process, all geometries were analysed in order to avoid any future problems caused by the reduced dimensions of the coextruder, implementing changes in order to avoid these same problems.

In addition, a study was carried out on the extrusion process, which involved the prediction of process characteristics such as the pressure generated and the expected output flow for different service conditions and different materials. Once the process characteristics were obtained, a numerical study was carried out using the finite element method, in order to study the mechanical viability of the element (s) subject to the most significant loads. Cumulatively, were also presented suggestions for CNC machining for all created elements using a commercially available CAD / CAM software.

The precision coextruder developed throughout the present work is in line with the proposed objectives and is very promising in terms of the success of the coextrusion process.

Keywords: techniques of additive manufacturing, scaffolds, precision coextruder, finite element method, mechanical viability, CNC machining.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice de Tabelas	xv
Simbologia	xvii
Abreviaturas	xviii
Capítulo 1 – Introdução	1
Capítulo 2 – Revisão bibliográfica	3
2.1 Extrusão	3
2.2 Tipos de extrusoras	3
2.3 Extrusoras de fuso	5
2.4 Metodologia empírica para o dimensionamento de extrusoras de fuso.....	7
Capítulo 3 – Conceção e Desenvolvimento da extrusora	9
3.1 Condições iniciais	9
3.2 Desenvolvimento	9
3.2.1 Fuso	9
3.2.2 Camisa anterior e camisa posterior	13
3.2.3 Acoplamento	15
3.2 Doseador.....	22
3.2.5 Refrigeração da zona de alimentação.....	28
3.2.7 Fixação da extrusora.....	33
3.2.8 Acoplamento do fuso	35
3.2.9 Aquecimento do material a extrudir	36
3.3 Escolha de materiais para cada elemento.....	37
3.4 Análise do processo.....	38
3.5 Análise de esforços	48
3.6 – Maquinação dos componentes da extrusora	57
Capítulo 4 – Desenvolvimento da ferramenta de coextrusão	67
4.1 Considerações iniciais	68
4.2 Desenvolvimento	69
4.2.1 Corpo central.....	69
4.2.2 Acoplamento.....	71
4.2.3 Zona de junção	73
4.2.4 Bico de coextrusão.....	76
4.2.5 - Aquecimento do material	84

4.2.6 - Alinhamento e aperto entre o bloco superior e inferior	86
4.3 Escolha de materiais para cada componente da ferramenta de coextrusão	87
4.4 – Maquinação dos componentes da ferramenta de coextrusão	88
Capítulo 5 – Conclusões e trabalhos futuros	95
5.1 Conclusões	95
5.2 Trabalhos futuros	95
Capítulo 6 – Referências bibliográficas	97
Capítulo 7 - Anexos.....	99
7.1 - Desenhos técnicos da extrusora.....	99
7.2 – Desenhos técnicos da ferramenta de coextrusão.....	104
7.3 – Anexos gerais	113

Índice de figuras

Figura 1 – Esquema de uma extrusora de pistão (John R. Wagner, Jr, et al 2013).....	4
Figura 2 – Esquema de uma extrusora de fuso(www.britannica.com/technology/screw-type-extruder, 2017)	4
Figura 3 – Identificação das três zonas de um fuso (Chris Rauwendaal, 2014)	6
Figura 4 – Gráfico da evolução da pressão ao longo do fuso (Osvaldo H. Campanella e Jean-Marie Bouvier, 2014)	6
Figura 5 – Gráfico que relaciona o diâmetro do fuso com o débito da extrusora (John R. Wagner, Jr, et al 2013).....	7
Figura 6 – Constituição genérica de uma extrusora (www.uttutextiles.wordpress.com, 2017)	9
Figura 7 - Formato do fuso (1ª versão)	10
Figura 8 – Formato do fuso (2ª versão).....	12
Figura 9 – Formato final do fuso	12
Figura 10 – Estrutura base da camisa posterior.....	14
Figura 11 – Estrutura base da camisa anterior em corte	14
Figura 12 – Formato do canal de alimentação de material, em corte.....	15
Figura 13 – Assemblagem do fuso com as estruturas base de ambas as camisas.....	15
Figura 14 - Rolamento axial de esferas (www.skf.com, 2017).....	16
Figura 15 – Forma de montagem de rolamentos axiais de esferas (www.skf.com, 2017).....	16
Figura 16 – Lista de rolamentos axiais e respetivas dimensões fornecidos pela SKF (www.skf.com, 2017)	17
Figura 17 – Requisitos das dimensões de encosto do rolamento axial de esferas (www.skf.com, 2017)	18
Figura 18 – Caixa para o rolamento axial de esferas, em corte	18
Figura 19 – Formato do veio do fuso	19
Figura 20 – Assemblagem do fuso com a camisa anterior, em corte	19
Figura 21 – Lista de rolamentos axiais de agulhas e respetivas dimensões (www.skf.com, 2017)	20
Figura 22 – Características do rolamento axial de agulhas selecionado (www.skf.com, 2017)	20
Figura 23 – Assemblagem do fuso, camisa anterior e ambos os rolamento axiais, em corte	20
Figura 24 – Formato da tampa de aperto da caixa do rolamento	21
Figura 25 – Formato final do acoplamento entre o fuso e a camisa anterior.....	21
Figura 26 - Formato final do acoplamento entre o fuso e a camisa anterior, em corte.....	22
Figura 27 - Formato final do acoplamento entre ambas as camisas, em corte	22
Figura 28 – Formato da zona de transição do doseador.....	23
Figura 29 - Formato da zona de transição do doseador, em corte.....	24
Figura 30 – Representação do sentido de rotação do fuso	24
Figura 31 – Rosca de aperto do doseador executada no doseador, em corte	25
Figura 32 – Rosca de aperto do doseador executada na camisa posterior	26
Figura 33 – Geometria da agulha de modelação	26
Figura 34 – Zona de encaixe da agulha de modelação	27
Figura 35 – Assemblagem da agulha ao doseador, em corte	27
Figura 36 – Configuração da final da zona de acoplamento da agulha de modelação.....	27
Figura 37 – Configuração final do doseador	28
Figura 38 – Formato do elemento de aperto da agulha de modelação	28
Figura 39 – Assemblagem dos elementos constituintes do aperto da agulha de modelação.....	28
Figura 40 – Entrada e saída do canal de refrigeração do fuso	29
Figura 41 – Formato do canal de refrigeração do fuso, em corte.....	29
Figura 42 – Geometria do canal de refrigeração da camisa anterior (vista 1).....	30
Figura 43 - Geometria do canal de refrigeração da camisa anterior (vista 2).....	30
Figura 44 – Acessório de engate rápido para tubos de ar comprimido (www.ddsequipamentos.com.br, 2017)	31
Figura 45 – Espigão para acoplamento de tubos de escoamento de fluidos (www.aignep.com, 2017)	31

Figura 46 – Introdução das bases roscadas para os conectores do circuito de refrigeração	32
Figura 47 – Base para acoplamento de sistemas de alimentação (vista 1)	32
Figura 48 - Base para acoplamento de sistemas de alimentação (vista 2)	33
Figura 49 – Tampa da caixa do rolamento adaptada às novas dimensões.....	33
Figura 50 – Geometria sugerida do funil de alimentação.....	33
Figura 51 – Bases de fixação da extrusora (vista 1)	34
Figura 52 - Bases de fixação da extrusora (vista 2)	34
Figura 53 – Exemplo de fixação da extrusora	34
Figura 54 – Elementos de acoplamento helicoidais (www.sdp-si.com, 2017)	35
Figura 55 – Acoplamento helicoidal Tollflex (www.imporseal.pt/213/toolflex-tipo-fole/, 2017	35
Figura 56 – Rasgo do veio do fuso para chaveta mecânica	36
Figura 57 – Posicionamento do elemento de aquecimento na extrusora.....	37
Figura 58 – Gráfico caudal/pressão de uma extrusora (www.edisciplinas.usp.br, 2017)	39
Figura 59 – Gráfico gradiente de velocidade/viscosidade dinâmica do 12 MFI PP (John R. Wagner, Jr, et al 2013)	41
Figura 60 – Gráfico da característica da extrusora e da característica da matriz para PP extrudido a 20 rpm	43
Figura 61 – Gráfico da característica da extrusora e da característica da matriz para PP extrudido a 60 rpm	44
Figura 62 – Gráfico da característica da extrusora e da característica da matriz para PP extrudido a 100 rpm	44
Figura 63 – Gráfico Viscosidade/Gradiente de velocidade do PLA (www.researchgate.net, 2017).....	45
Figura 64 – Gráfico da característica da extrusora e da característica da matriz para PLA extrudido a 20 rpm	46
Figura 65 – Gráfico da característica da extrusora e da característica da matriz para PLA extrudido a 60 rpm	47
Figura 66 – Gráfico da característica da extrusora e da característica da matriz para PLA extrudido a 100 rpm	47
Figura 67 – Características do aço nitruado 1.8519 do catálogo de materiais do SolidWorks®	48
Figura 68 – Fixações e restrições aplicadas ao fuso (estudo 1)	49
Figura 69 – Perfil de tensões de corte na secção transversal redonda maciça (Chris Rauwendaal, 2014)	50
Figura 70 – Cargas e fixações aplicadas ao fuso (estudo 1)	50
Figura 71 – Gráfico de convergência de malha inicial (estudo 1)	51
Figura 72 – Gráfico otimizado de convergência de malha (estudo 1).....	52
Figura 73 – Malha utilizada no estudo do fuso (estudo 1).....	53
Figura 74 – Tensões Von-Mises resultantes do estudo no fuso (estudo 1)	53
Figura 75 – Deslocamentos resultantes do estudo no fuso (estudo 1)	54
Figura 76 – Fixações e cargas aplicadas ao fuso (estudo 2)	55
Figura 77 – Gráfico de convergência de malha (estudo 2).....	56
Figura 78 - Malha utilizada no estudo do fuso (estudo 2)	56
Figura 79 - Tensões Von-Mises resultantes do estudo no fuso (estudo 2).....	56
Figura 80 – Stock inicial de maquinaria do fuso	57
Figura 81 – Ciclos de maquinaria da zona de acoplamento do fuso	58
Figura 82 – Simulação da maquinaria da zona de acoplamento do fuso	58
Figura 83 – Ciclos de maquinaria da zona útil do fuso	59
Figura 84 – Geometria final da simulação da maquinaria completa do fuso.....	59
Figura 85 – Stock inicial de maquinaria da camisa posterior	60
Figura 86 – Ciclos de maquinaria da zona de menor diâmetro da camisa posterior	60
Figura 87 – Simulação da maquinaria da zona de menor diâmetro da camisa posterior	60
Figura 88 – Ciclos de maquinaria da zona de maior diâmetro da camisa posterior	61
Figura 89 – Geometria final da simulação da maquinaria completa da camisa posterior	61

Figura 90 - Stock inicial de maquinação do doseador	61
Figura 91 – Ciclos de maquinação da zona de maior diâmetro do doseador	62
Figura 92 – Simulação da maquinação da zona de maior diâmetro do doseador	62
Figura 93 – Ciclos de maquinação da zona de menor diâmetro do doseador	62
Figura 94 - Geometria final da simulação da maquinação completa do doseador	63
Figura 95 - Stock inicial de maquinação do elemento de aperto da agulha modeladora	63
Figura 96 - Ciclos de maquinação do elemento de aperto da agulha modeladora	64
Figura 97 - Geometria final da simulação da maquinação completa do elemento de aperto da agulha modeladora	64
Figura 98 - Stock inicial de maquinação da tampa da caixa do rolamento	64
Figura 99 - Ciclos de maquinação da tampa da caixa do rolamento	65
Figura 100 - Geometria final da simulação da maquinação completa da tampa da caixa do rolamento	65
Figura 101 – Esquema de um sistema de coextrusão (www.researchgate.net/figure/271379102_fig1_Fig-1-Sketch-of-multilayered-co-extrusion-technology-A-B-single-screw-extruder , 2017)	67
Figura 102 – Princípio de funcionamento de uma coextrusora (www.howarequipment.com/products/extrusion_crossheads/co_extrusion/ , 2017)	68
Figura 103 – Exemplo de uma ferramenta de coextrusão (tipsanddies.com/ , 2017)	69
Figura 104 – Exemplificação do bloco inferior de um sistema de coextrusão a meia cana	69
Figura 105 - Exemplificação do bloco superior de um sistema de coextrusão a meia cana	70
Figura 106 – Exemplificação da montagem dos blocos de um sistema de coextrusão a meia cana	70
Figura 107 – Dimensões do bloco base a ser trabalhado no desenvolvimento da coextrusão	70
Figura 108 – Zona de transição do doseador	71
Figura 109 – Projeção da base de acoplamento da extrusora	72
Figura 110 – Criação da gola de acoplamento da extrusora	72
Figura 111 – Geometria final do acoplamento da extrusora	72
Figura 112 – Criação da zona de envolvimento do acoplamento da extrusora	72
Figura 113 – União de caudais através de uma agulha modeladora	74
Figura 114 – Encaixe da agulha modeladora no acoplamento da extrusora	74
Figura 115 – Montagem do acoplamento da extrusora com a agulha modeladora, em corte	74
Figura 116 – Criação do negativo da agulha modeladora nos blocos superior e inferior	75
Figura 117 – Montagem dos blocos superior e inferior, acoplamento da extrusora e da agulha modeladora, em corte	75
Figura 118 – Representação do segundo canal de admissão do material	76
Figura 119 – Geometria final na zona de admissão dos blocos superior e inferior	76
Figura 120 – Falha no envolvimento do escoamento na estrutura da agulha de modelação	77
Figura 121 – Estrutura base do elemento de ligação	78
Figura 122 – Abertura do canal para acoplamento do elemento de ligação nos blocos superior e inferior	78
Figura 123 – Corte no elemento de ligação para admissão de material	79
Figura 124 – Posicionamento do elemento de ligação na ferramenta de coextrusão	79
Figura 125 – Encaixe entre o elemento de ligação e a agulha de modelação	80
Figura 126 – Criação do rasgo para chaveta mecânica no elemento de ligação	80
Figura 127 – Montagem das meias luas com a agulha de modelação	81
Figura 128 - Montagem das meias luas com a agulha de modelação, em corte	81
Figura 129 – Alterações nos blocos superior e inferior para fixação da agulha de modelação final	81
Figura 130 – Posicionamento da agulha de modelação final na ferramenta de coextrusão	82
Figura 131 – Furação e roscagem dos blocos superior e inferior para fixação da agulha de modelação final	82
Figura 132 – Chapa de fixação da agulha de modelação final	82

Figura 133 – Abertura do rasgo para chaveta mecânica no bloco inferior.....	83
Figura 134 – Chaveta mecânica para fixação abgular do elemento de ligação	83
Figura 135 – Assemblagem da forma de fixação angular do elemento de ligação.....	83
Figura 136 – Formato final do bico de coextrusão.....	84
Figura 137 – Resistências elétricas de cartucho.....	84
Figura 138 – Abertura de furo no bloco inferior para inserção de resistência de cartucho	85
Figura 139 - Abertura de furo no bloco superior para inserção de resistência de cartucho	86
Figura 140 – Furação, roscagem e criação de rasgos para chaveta mecânica nos blocos superior e inferior.....	86
Figura 141 – Assemblagem e aperto dos blocos superior e inferior.....	87
Figura 142 – Stock inicial da maquinação do bloco inferior	88
Figura 143 - Ciclos de maquinação do bloco inferior	89
Figura 144 – Geometria final da simulação da maquinação completa do bloco inferior	89
Figura 145 - Ciclos de maquinação do bloco superior	90
Figura 146 – Geometria final da simulação da maquinação completa do bloco superior	90
Figura 147 – Stock inicial da maquinação do elemento de aperto da extrusora.....	90
Figura 148 – Ciclos de maquinação da zona de maior diâmetro do elemento de aperto da extrusora.....	91
Figura 149 – Simulação da maquinação da zona de maior diâmetro do elemento de aperto da extrusora	91
Figura 150 – Ciclos de maquinação da zona de menor diâmetro do elemento de aperto da extrusora	91
Figura 151 - Geometria final da simulação da maquinação completa do elemento de aperto da extrusora	92
Figura 152 – Stock inicial da maquinação do elemento de ligação	92
Figura 153 - Ciclos de maquinação do elemento de ligação.....	93
Figura 154 - Geometria final da simulação da maquinação completa do elemento de ligação.....	93
Figura 155 – Stock inicial da maquinação da chapa de fixação da agulha modeladora final	93
Figura 156 - Ciclos de maquinação da chapa de fixação da agulha modeladora final.....	94
Figura 157 - Geometria final da simulação da maquinação completa da chapa de fixação da agulha modeladora final	94
Figura 158 – Desenho técnico da tampa da caixa do rolamento.....	99
Figura 159 – Desenho técnico da camisa posterior	100
Figura 160 – Desenho técnico do elemento de aperto da agulha de modelação	101
Figura 161 – Desenho técnico do doseador.....	102
Figura 162 – Desenho técnico do fuso.....	103
Figura 163 – Desenho técnico do bloco inferior	104
Figura 164 – Desenho técnico do bloco superior.....	105
Figura 165 – Desenho técnico da chapa de fixação do bico de coextrusão.....	106
Figura 166 – Desenho técnico do elemento de aperto da extrusora	107
Figura 167 – Desenho técnico do elemento de ligação	108
Figura 168 – Vista explodida e legendada da extrusora	109
Figura 169 - Vista explodida e legendada da Coextrusora.....	111
Figura 170 – Tabela da norma DIN 6885/1 para furos e rasgos de chaveta mecânica.....	113

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Lista de roscas métricas finas e respetivas dimensões.....	25
Tabela 2 – Valores do gradiente de velocidade para 20, 60 e 100 rpm.....	41
Tabela 3 - Valor da viscosidade do PP para 20, 60 e 100 rpm	42
Tabela 4 – Valor da pressão máxima para extrusão de PP a 20, 60 e 100 rpm	42
Tabela 5 - Valor do caudal máximo de saída na extrusão de PP a 20, 60 e 100 rpm.....	42
Tabela 6 – Valor do fator de forma do PP a 20, 60 e 100 rpm.....	42
Tabela 7 – Valores do ponto de operação referentes à extrusão de PP.....	44
Tabela 8 – Valor da viscosidade do PLA a 20, 60 e 100 rpm	45
Tabela 9 Valor da pressão máxima para extrusão de PLA a 20, 60 e 100 rpm	45
Tabela 10 - Valor do caudal máximo de saída na extrusão de PLA a 20, 60 e 100 rpm.....	46
Tabela 11 – Valor do fator de forma do PLA a 20, 60 e 100 rpm	46
Tabela 12 – Valores do ponto de operação referentes à extrusão de PLA.....	47
Tabela 13 – Valores da tensão máxima para cada tamanho de elemento (estudo 1)	51
Tabela 14 – Percentagem de elementos com rácio de aspeto inferior a 3 (estudo 1).....	52
Tabela 15 - Valores da tensão máxima para cada tamanho de elemento (estudo 2)	55

Simbologia

$^{\circ}\text{C}$ – Temperatura em graus Celsius

d – Diâmetro interior [mm]

D – Diâmetro exterior [mm]

L – Comprimento [mm]

H – profundidade [mm]

C – Carga dinâmica [kN]

$P_{\text{máx}}$ – Pressão máxima [MPa]

$Q_{\text{máx}}$ – Caudal máximo [mm^3/s]

N - velocidade angular em rotações por segundo

η – viscosidade dinâmica (Pa.s)

K_s – Fator de forma [$\text{mm}^3/\text{Pa.s}$]

Υ – Gradiente de velocidade [1/s]

p - Passo da hélice [mm]

φ – ângulo da hélice [$^{\circ}$]

τ – Tensão de corte [MPa]

τ_{ADM} – Tensão de corte admissível [MPa]

T – Binário [N.m]

T_{ADM} – Binário admissível [N.m]

J – Momento polar [mm^4]

Abreviaturas

FR – Fabrico Rápido

CAD – Computer Aided Design

CAM – Computer Aided Manufacturing

FDM – Fused Deposition Modeling

MEF – Método dos Elementos Finitos

SLM – Selective Laser Melting

PP – Polipropileno

PLA – Poly Lactic Acid

CNC – Computacional Numerical Control

TC – Taxa de Compressão

Capítulo 1 – Introdução

Quando comparadas com os processos subtrativos de fabrico clássicos, as técnicas aditivas associadas ao Fabrico Rápido (FR) de componentes apresentam como principal vantagem a inexistência de ferramentas, o que se traduz numa liberdade quase total na geração de geometrias complexas. Esta liberdade é extensível à seleção de materiais, associada à ausência de desperdício de material na construção dos protótipos, independentemente da forma mais ou menos complexa, do tipo de material ou da técnica aditiva utilizada. O FR assume-se como uma tecnologia de reprodução de protótipos virtuais tridimensionais em protótipos físicos com geometrias complexas alicerçada no princípio de produção de camada após camada resultado da integração de diversos processos físicos e químicos, independentemente da forma mais ou menos complexa, do tipo de material ou da técnica aditiva utilizada. Também aspetos como o baixo volume de material requerido, a celeridade, a qualidade e o baixo custo de produção justificam a razão pela qual as técnicas aditivas de FR têm sido largamente aplicadas nas distintas áreas da indústria, e.g., automóvel, aeronáutica, aeroespacial, construção civil, têxtil, retalho, ensino, medicina e, mais recentemente, na produção de *scaffolds* na área da engenharia dos tecidos humanos.

Doenças relacionadas com a cartilagem estão na lista de principais preocupações da Organização Mundial de Saúde (OMS), assumindo-se a degeneração da cartilagem articular como uma importante questão de saúde para a qual existem poucas soluções eficazes. Por outro lado, o envelhecimento, a obesidade, deficiências nutricionais e a (in)atividade física são problemas primários para a sociedade Portuguesa, e que estão diretamente associados a grande número de doenças reumáticas. O mundo atual enfrenta um problema sério, com mais de 250 milhões de pessoas afetadas com osteoartrite (OA) crónica. Com uma tendência demográfica para o envelhecimento da população, hoje em dia a sociedade arrastou-se para um ciclo vicioso devido à relação comprovada entre a OA e a obesidade, e o aumento da prevalência de ambos. Para contribuir para a resolução destes problemas é obrigatório ter perspectivas e abordagens de intervenção integrada multidisciplinares, e.g., Bioengenharia, Biomecânica, Fisioterapia, Desporto e Envelhecimento Ativo.

É neste enquadramento que surge o presente projeto que tem como propósito desenvolver um novo sistema/equipamento de micro co-extrusão com a capacidade de extrudir filamentos interior e exterior, com elevada fiabilidade para a construção de *scaffolds* híbridas e funcionais de arquitetura controlada e com as propriedades mecânicas específicas que possam substituir a cartilagem articular.

Capítulo 2 –Revisão bibliográfica

2.1 Extrusão

O interesse nas técnicas aditivas do fabrico rápido (FR) de componentes atingiu um ímpeto considerável nas últimas décadas. A grande motivação para o desenvolvimento desta tecnologia adveio das necessidades da indústria em explorar as vantagens destes processos de produção conjuntamente com as pesquisas levadas a cabo pela comunidade académica na procura de avanços tecnológicos e de uma otimização constante destes processos que apresentam, comparativamente a técnicas convencionais de fabricação, como vantagem adicional a liberdade geométrica de construção. As técnicas aditivas de FR oferecem uma ampla gama de vantagens na produção de protótipos ou componentes, e.g., um menor *time-to-market*, uma elevada taxa de utilização de materiais, produção direta a partir do modelo CAD tridimensional, um elevado nível de flexibilidade, i.e., produtos com geometrias diferentes podem ser produzidas no mesmo lote, flexibilidade do material em ser processado uma enorme flexibilidade na seleção dos materiais suscetíveis de serem utilizados, maior taxa de produção, personalização em massa, versatilidade, precisão, liberdade geométrica e a capacidade de criar designs exclusivos com características intrínsecas de engenharia.

Dentro das diferentes técnicas aditivas de FR, aquela que está na base deste trabalho é o FDM (*Fused Deposition Modeling*) uma vez que tem como princípio base de funcionamento a extrusão e deposição de filamentos termoplásticos camada a camada no perímetro que constitui a secção transversal do protótipo a produzir. A componente de extrusão é fulcral no que diz respeito à precisão dimensional do equipamento de FDM uma vez que quanto menor for a secção transversal do filamento, maior será a precisão dimensional dos elementos produzidos.

A extrusão é um processo de conformação mecânica que consiste em forçar a passagem de um material através de um orifício que lhe vai conferir a forma desejada. De uma forma geral, existem dois tipos de extrusoras: a extrusora de pistão e a extrusora de fuso.

2.2 Tipos de extrusoras

O princípio de funcionamento de uma extrusora de pistão consiste na aplicação de uma pressão num pistão que vai forçar o material a sair pela matriz, como ilustra a Figura 1. Este processo requer o aquecimento do material até à sua temperatura de fusão o que faz com a sua viscosidade baixe e, conciliado com uma pressão adequada, provoca a saída do material pela matriz com a forma desejada. Por outro lado, o princípio de funcionamento de uma extrusora de fuso consiste, de uma forma resumida e conforme representado na Figura 2, na entrada de material num canal de alimentação que orienta o material até a um fuso que se encontra em rotação, empurrando o material ao longo de um cilindro, que está aquecido até à temperatura de fusão do material, fazendo o material sair através de uma matriz que lhe confere a forma desejada.

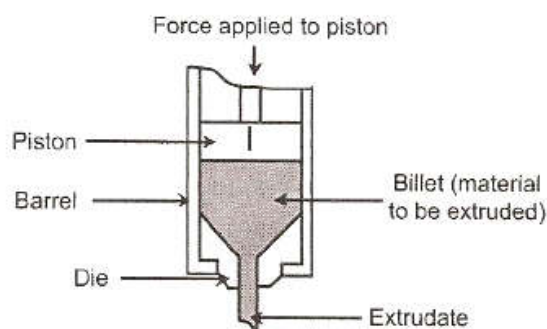


Figura 1– Esquema de uma extrusora de pistão (John R. Wagner, Jr, et al 2013)

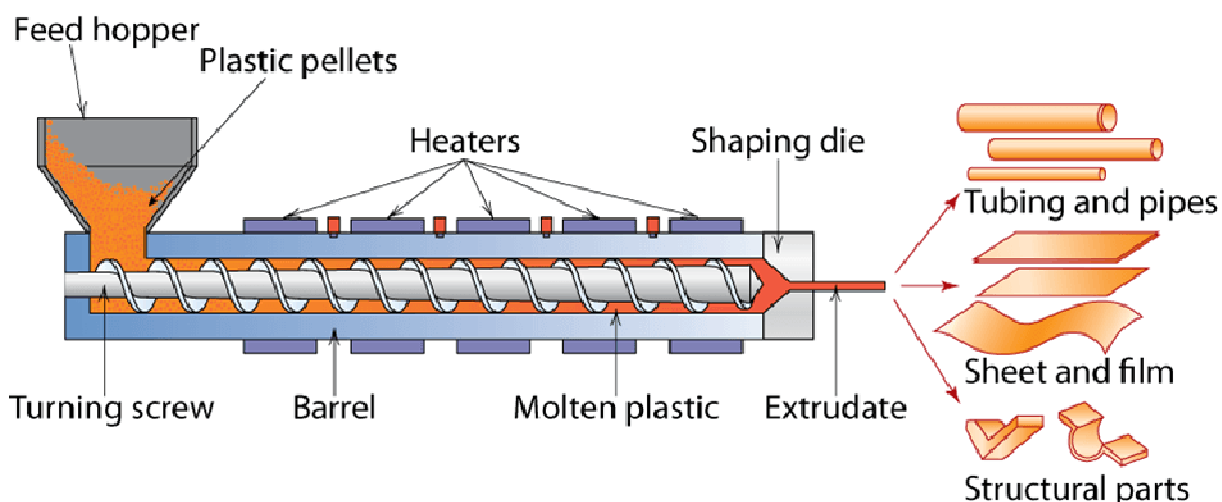


Figura 2– Esquema de uma extrusora de fuso(www.britannica.com/technology/screw-type-extruder, 2017)

Conhecidos os dois tipos de extrusoras, é importante salientar as principais diferenças entre ambas. A diferença mais significativa consiste no facto de a extrusora de pistão ser caracterizada por um processo descontínuo e a extrusora de fuso, por outro lado, é caracterizada por um processo contínuo. Numa extrusora de pistão, o movimento de avanço do pistão provoca a extrusão do material, sendo que no movimento de recuo dá-se a alimentação do cilindro com novo material, tornando este processo descontínuo. Na extrusora de fuso, a alimentação da extrusora e a extrusão de material acontecem de forma independente e continuada tornando o processo contínuo. Outra diferença entre os dois processos está relacionada com o aquecimento do material a extrudir. Apesar de em ambos os processos o aquecimento do material ser realizado de fora para dentro, na extrusora de pistão o material não aquece de forma uniforme pois o material encontra-se estático no cilindro e não há grande contacto entre o material e as paredes do cilindro o que se traduz num aquecimento mais demorado para obter uma temperatura uniforme. Relativamente à extrusora de fuso, como o material circula na periferia do fuso e existe maior contacto com a parede do cilindro, o aquecimento do material é realizado de forma mais célere e uniforme.

Tendo em conta as principais diferenças entre os tipos de extrusão, facilmente se conclui que a extrusora de fuso consiste no método mais indicado para este trabalho pois oferece um processo contínuo, mais fiável, mais rápido e eficaz.

2.3 Extrusoras de fuso

De forma a compreender melhor todo o processo de desenvolvimento da extrusora a ser realizado neste trabalho, é essencial compreender de forma mais aprofundada o princípio de funcionamento da mesma bem como todos os detalhes do processo. A extrusora de fuso caracteriza-se por um processo muito direto e contínuo.

A fase inicial do processo consiste na alimentação da extrusora que, geralmente, se dá através de um recipiente de alimentação em forma de funil em que o material flui para o interior da extrusora pela gravidade. Porém, este formato de alimentação pode variar devido a características dos materiais que não lhes permita fluir de forma natural para dentro da extrusora. À medida que o material vai caindo dentro da extrusora, este vai integrar-se no espaço anelar entre a periferia do fuso e a parede interior do cilindro da extrusora e é delimitado axialmente pelos flancos ativo e passivo da hélice do fuso, que consiste no canal do fuso.

O cilindro do fuso é estacionário e o fuso é rotativo, o que vai originar forças de atrito entre o material e ambos os componentes. Essa força de atrito vai ser responsável pelo avanço do material ao longo da extrusora, pelo menos enquanto o material se encontrar no seu estado sólido, ou seja, abaixo da sua temperatura de fusão.

À medida que o material vai avançando, a sua temperatura vai subindo devido ao calor gerado pela fricção entre o material e a extrusora e também devido ao calor fornecido pelos elementos de aquecimento colocados no cilindro da extrusora que, geralmente, são resistências elétricas. Quando esta temperatura excede a temperatura de fusão do material, forma-se uma película de material fundido junto à superfície do cilindro da extrusora. Neste ponto do processo, termina a zona de transporte do material, iniciando-se a zona de plastificação do mesmo. À medida que o material avança, a quantidade de material sólido vai reduzindo e, no ponto em que deixa de existir material sólido, deixamos de estar na zona de plastificação do fuso para dar início à zona de transporte de material fundido. Nesta zona, o material é simplesmente bombeado para a matriz da extrusora. Ao fluir através da matriz, o material ficará com o mesmo formato do canal de saída da mesma.

É importante realçar que todo o processo de extrusão tem um elemento chave que é responsável pela maior parte do processamento do material que é o fuso. O fuso é responsável pelo transporte axial do material, pela sua compressibilidade e também pela sua homogeneização. Posto isto, é importante perceber quais são as características inerentes ao fuso que lhe permitem ter todas estas valências. O fuso é composto por três zonas distintas que são as zonas de alimentação, compressão e dosagem, que estão representadas na imagem da Figura 3.

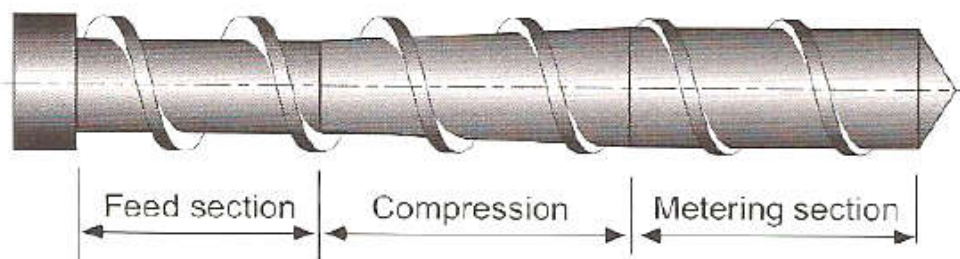


Figura 3 – Identificação das três zonas de um fuso(Chris Rauwendaal, 2014)

- **Zona de alimentação** – esta zona é caracterizada por uma elevada capacidade de transporte devido ao canal do fuso mais profundo ou por um passo mais largo;
- **Zona de compressão** – nesta zona o material é comprimido e densificado devido ao efeito compressivo aplicado pelo fuso provocado pela diminuição da profundidade do canal ou do passo do mesmo. É a partir do início desta zona que se dá o aquecimento do material tanto pela fricção entre o material e a extrusora bem como pelo aquecimento externo pois os elementos de aquecimentos são aplicados a partir desta zona;
- **Zona de dosagem** – a característica que define esta zona é a profundidade do canal ou o passo muito reduzido. Isto leva a que o material apresente uma distribuição laminar e que atinja um estado completamente fundido. Devido ao facto de o material deixar de existir no estado sólido, o transporte do material dá-se por bombagem uma vez que deixa de existir fricção. Esta bombagem acontece a uma pressão capaz de fazer o material passar pela matriz.

Numa extrusora em que seja aplicado o fuso standard representado na Figura 3, a variação da pressão no interior da extrusora ao longo do seu comprimento é dada pelo gráfico da Figura 4.

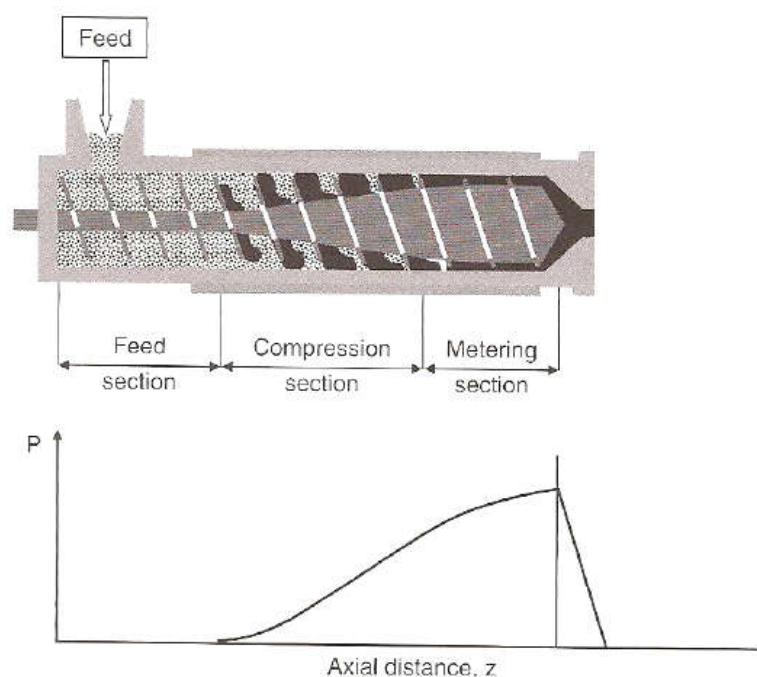


Figura 4– Gráfico da evolução da pressão ao longo do fuso(Osvaldo H. Campanella e Jean-Marie Bouvier, 2014)

2.4 Metodologia empírica para o dimensionamento de extrusoras de fuso

Nos dias de hoje, existem várias opções de desenvolvimento de extrusoras, existindo geometrias e parâmetros diferentes para cada tipo de processo e aplicação pretendida. Como a extrusora a ser desenvolvida neste trabalho é distinta das extrusoras existentes no mercado, o processo de dimensionamento irá basear-se na metodologia mais simples e objetiva presente na literatura, sendo que serão realizadas alterações ao longo do desenvolvimento de forma a obter as características desejadas da extrusora. Posto isto, serão agora apresentadas um conjunto de etapas que vão definir o desenvolvimento e o dimensionamento da extrusora.

A primeira fase do dimensionamento da extrusora passa pela definição do diâmetro externo do fuso da mesma a partir de um gráfico que relaciona o diâmetro externo do fuso com o caudal de saída da mesma. Desta forma, é escolhido um diâmetro a partir do caudal de saída desejado. Este gráfico está representado na imagem da Figura 5. É importante realçar que as unidades do caudal estão em libras/hora e o diâmetro está em polegadas.

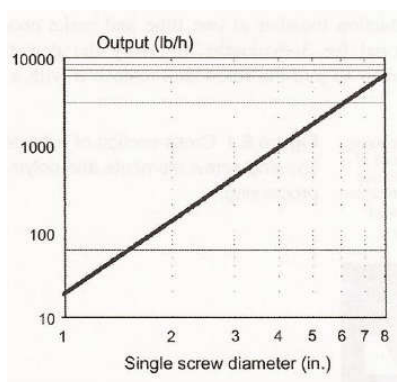


Figura 5 – Gráfico que relaciona o diâmetro do fuso com o débito da extrusora (John R. Wagner, Jr, et al 2013)

Uma vez definido o diâmetro do fuso, segue-se o seu dimensionamento completo. Este processo de dimensionamento não é realizado através de métodos numéricos, mas sim através de um método empírico desenvolvido ao longo das últimas décadas com base em análises efetuadas ao funcionamento das extrusoras construídas ao longo do tempo. Foi assim criado um fuso standard que não constitui um fuso otimizado, mas sim um género de fuso universal que apresenta um comportamento razoável para a utilização de uma grande maioria de polímeros. É de salientar que a maioria dos fusos existentes atualmente, foram concebidos com recurso à maioria de expressões empíricas que relacionam os vários parâmetros do fuso com o diâmetro do mesmo. Estas expressões empíricas são apresentadas infra (Chris Rauwendaal, 2014):

- **Comprimento total** – de 20D a 30D (L/D de 20 a 30)
- **Comprimento da zona de alimentação** – 4D a 8D
- **Comprimento da zona de dosagem** – 6D a 10D
- **Número de hélices** – 1
- **Passo da hélice** – 1D com ângulo de 17,66°
- **Largura da hélice** – 0,1D
- **Profundidade do canal na zona de alimentação** – 0,15D a 0,2D

○ **Taxa de compressão** – 2 a 4

A taxa de compressão, TC, é dada pela seguinte relação (John R. Wagner, Jr, *et al* 2013):

$$\text{TC} = \frac{\text{Profundidade do canal na zona de alimentação}}{\text{Profundidade do canal na zona de dosagem}}$$

Estes elementos vão servir de base para o desenvolvimento do fuso. Todavia, serão introduzidas algumas alterações com o propósito de cumprir objetivos pretendidos. Após a criação do fuso, segue-se a definição de outros elementos preponderantes na extrusora. No que diz respeito ao cilindro da extrusora, é essencial definir o espaçamento entre o fuso e a parede interna do mesmo, o que vai permitir definir o seu diâmetro interior. Tal como no dimensionamento do fuso, este espaçamento é definido tendo como referência o diâmetro externo do fuso, razão pela qual se faz a distinção entre extrusoras pequenas e extrusoras grandes (extrusoras pequenas $\leq 203\text{mm}$ \leq extrusoras grandes). No caso das extrusoras pequenas, o espaçamento entre o fuso e a parede interior do cilindro é igual a $0,025D$ enquanto que, nas extrusoras maiores, este valor é igual a $0,062D$. Definido este espaçamento, o diâmetro interior do cilindro vai ser igual à soma do diâmetro externo do fuso ao dobro do valor do espaçamento. Quanto ao diâmetro externo do cilindro, vai ser definido através de análise de esforços, ou seja, vai ter um valor que permita sustentar a pressão desenvolvida dentro da extrusora.

Por último, é importante mencionar o dimensionamento da matriz. Este elemento tem como finalidade principal a extração do material da extrusora a uma velocidade constante e com a forma desejada. No que diz respeito ao dimensionamento propriamente dito, não existe um método mas sim um conjunto de recomendações a ter em conta tais como:

- Evitar variações bruscas na geometria de escoamento;
- Utilizar ângulos de aproximação o mais reduzidos possível;
- Evitar pontos de obstrução ao escoamento;
- Utilizar um comprimento de transição 10 vezes superior ao espaçamento de transição.

Capítulo 3 – Conceção e Desenvolvimento da extrusora

3.1 Condições iniciais

O desenvolvimento da extrusora vai ser realizado elemento a elemento pelo que é importante identificar os componentes base da mesma para que se possam ordenar as peças a ser trabalhadas ao longo deste capítulo. A imagem da Figura 6 ilustra precisamente a estrutura base de uma extrusora com a identificação dos elementos que a constituem.

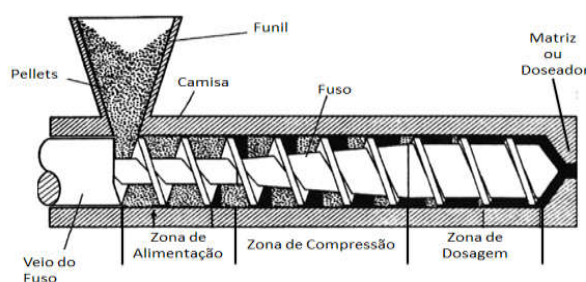


Figura 6– Constituição genérica de uma extrusora (www.uttutextiles.wordpress.com, 2017)

É importante realçar que o desenvolvimento da extrusora vai ser baseado nas regras apresentadas anteriormente, sendo que serão realizadas algumas alterações justificadas pela aplicação específica a que se destina a extrusora em desenvolvimento, nomeadamente, a minimização das dimensões da extrusora. Consequentemente, é necessário precaver alguns problemas que poderão surgir causados por essas mesmas dimensões. Com vista a ter uma referência dimensional no desenvolvimento da extrusora foi estabelecido o comprimento de 100mm como limite máximo do comprimento do fuso. Adicionalmente, pretende-se extrudir um perfil tubular com um diâmetro máximo de 1mm, utilizando para tal uma agulha de modelação disponível no mercado. A inserção da agulha na estrutura da extrusora tem como objetivo poder variar o diâmetro de saída da extrusora sempre que seja necessário, uma vez que existe uma gama de agulhas disponíveis no mercado com diferentes diâmetros internos. Esta variação de diâmetro pode ser obtida através da troca da agulha em utilização sendo, para tal, necessário criar um sistema de fácil acoplamento/desacoplamento da agulha na extrusora.

Tomadas as considerações agora descritas, estão reunidas todas as condições para dar início ao desenvolvimento propriamente dito da extrusora.

3.2 Desenvolvimento

3.2.1 Fuso

No desenvolvimento da extrusora, o primeiro componente a ser desenvolvido é o fuso, uma vez tratar-se de um elemento determinante para o bom funcionamento da extrusora. Como tal, o desenvolvimento da extrusora estará centrado no desenvolvimento, dimensionamento e otimização da geometria do fuso. Este procedimento inicia-se com o estabelecimento do diâmetro do fuso (D). Como base nas expressões empíricas anteriormente apresentadas o diâmetro do fuso é definido tendo em conta o caudal de saída pretendido recorrendo, para tal, a

um gráfico que relaciona o caudal de saída com o diâmetro do fuso. Neste caso, como o comprimento do fuso está limitado a 100mm, o seu diâmetro vai ser definido pela relação entre o diâmetro e o comprimento do fuso, tal como apresentado anteriormente. Pelas regras de dimensionamento, é sabido que a razão L/D do fuso estar compreendida entre os 20D e os 30D (Chris Rauwendaal, 2014). Uma vez que o comprimento do fuso é de 100mm, significa que o diâmetro do fuso deverá estar compreendido entre os 3,33mm e os 5mm. Dado que o fuso vai estar sujeito a consideráveis esforços de torção, a seleção do diâmetro do fuso recaiu sobre o valor máximo, isto é, os 5mm.

Numa segunda fase deve definir-se o comprimento das três zonas do fuso como componente integrante de uma extrusora. Como descrito anteriormente, a zona de alimentação deve ter um comprimento compreendido entre os 4D a 8D; a zona de dosagem entre 6D a 10D; e o restante do comprimento corresponde à zona de compressão (Chris Rauwendaal, 2014). Uma vez tratar-se de uma extrusora de pequenas dimensões, os comprimentos das três zonas vão ser muito idênticos podendo ser atribuído maior comprimento à zona de alimentação, de forma a facilitar o processo de alimentação, e à zona de compressão para reduzir o impacto causado pela diminuição da secção. Desta forma, os comprimentos selecionados foram de 35mm (7D) para as zonas de alimentação e de compressão e de 30mm (6D) para a zona de dosagem.

A terceira fase corresponde à definição da hélice do fuso. Com base nas expressões empíricas, anteriormente apresentadas, o fuso vai conter uma única hélice com um ângulo de $17,66^\circ$; um passo igual ao diâmetro, ou seja, 5mm e uma largura da hélice de 10% do diâmetro do fuso, i.e. de 0,5mm (Chris Rauwendaal, 2014).

Para terminar o dimensionamento do fuso é ainda necessário proceder à definição da profundidade do canal na zona de alimentação e na zona de dosagem. A zona de alimentação deve ter uma profundidade de 0,15D a 0,2D (Chris Rauwendaal, 2014). Uma vez que na zona de alimentação é conveniente a profundidade ser a máxima possível para facilitar a entrada do material (pellets), optou-se por uma profundidade de 1mm. Pelas expressões empíricas de dimensionamento sabe-se que a profundidade da zona de dosagem é definida por um rácio entre a mesma e a profundidade da zona de alimentação. Este rácio deve estar compreendido entre 2 e 4 (Chris Rauwendaal, 2014). Dado que a profundidade da zona de alimentação é extremamente baixa optou-se pelo rácio mínimo para maximizar a profundidade da zona de dosagem que, neste caso, vai ser de 0,5mm.

Seguindo as expressões empíricas gerais de dimensionamento de fusos de extrusoras e cumprindo a premissa dos 100 mm para o comprimento do veio, o fuso standard resultante é o apresentado na imagem seguinte:



Figura 7 - Formato do fuso (1ª versão)

Como a extrusora a desenvolver possui, face aos propósitos a que se destina, dimensões invulgarmente reduzidas, procedeu-se a uma análise crítica e rigorosa do fuso pré-concebido de forma a perceber se o mesmo terá as características indicadas para o processo produtivo a que se destina. Como resultado desta análise foram constatados os seguintes problemas:

- **Diâmetro do fuso demasiado pequeno** – tendo em conta que o fuso vai estar sujeito a um esforço de torção constante, é facilmente perceptível que um diâmetro de 4mm (diâmetro externo subtraído da altura da hélice) na zona de alimentação é crítico no que diz respeito aos esforços mecânicos a que este vai estar sujeito;
- **Largura da hélice muito estreita** – de forma a extrudir o material, o fuso vai rodar fazendo com que a hélice “empurre” o material para a saída da extrusora. O material vai aplicar a força em sentido contrário, ou seja, vai contrariar o movimento do fuso aplicando uma força na hélice. Deste modo, é expectável que a hélice não tenha resistência mecânica suficiente com apenas 0,5mm de largura. É importante referir que a maquinação do fuso é tanto mais difícil quanto mais pequena for a largura da hélice o que implica custos adicionais na produção do equipamento;
- **Profundidade dos canais demasiado pequena** – em virtude da extrusora ser alimentada com pellets, cuja altura está compreendida entre 3 e 4mm, conclui-se que a profundidade de 1mm na zona de alimentação deverá ser insuficiente para o processamento do material.

Feita esta análise, torna-se necessário redimensionar o diâmetro do fuso, a profundidade do canal e a largura da hélice de modo a garantir a necessária resistência mecânica do equipamento e o cumprimento do valor imposto para o comprimento do fuso. Conclui-se que é impossível seguir as tradicionais expressões empíricas de dimensionamento para a aplicação em causa, sendo necessário encontrar um compromisso entre as ditas expressões e a viabilidade da resistência mecânica do fuso de forma a garantir a estabilidade do processo de extrusão.

Em primeiro lugar, é preciso rever o diâmetro do fuso. Os 5mm definidos pelas regras são nitidamente insuficientes, logo é necessário aumentar este valor. Numa primeira iteração, este valor vai ser aumentado para 10mm, revendo-se de seguida todo o processo de dimensionamento anterior:

- i) Relativamente ao comprimento das zonas do fuso, não há nada a alterar devido ao comprimento do fuso permanecer de 100mm;
- ii) Relativamente à hélice, a largura da mesma é demasiado reduzida pelo que é necessário retificar os valores obtidos tendo como referência o diâmetro de 10mm do fuso. Mantém-se uma única hélice com um ângulo de $17,66^\circ$ mas com um passo de 10mm e uma largura de 1mm (0,1D) (Chris Rauwendaal, 2014);
- iii) Por último, é necessário rever o canal do fuso por este ser pouco profundo. Sendo o diâmetro de 10mm, este vai traduzir-se numa profundidade de 1,5mm (0,15D) (Chris Rauwendaal, 2014), o que implica um diâmetro da alma do fuso de 7 mm. Uma vez que a

profundidade na zona de alimentação sofreu um aumento considerável, o rácio escolhido é de 3. Sendo o rácio escolhido um valor médio, permite tornar a extrusora mais versátil uma vez que cada material tem um comportamento ótimo para diferentes valores de compressibilidade. Assim sendo, o canal na zona de dosagem apresentará uma profundidade de 0,5mm e um diâmetro da alma de 9mm. A Figura 8 ilustra a geometria do fuso após a implementação das alterações descritas.



Figura 8 – Formato do fuso (2ª versão)

Ao analisar o fuso já alterado pode concluir-se que, tanto ao nível do diâmetro como da largura da hélice, os problemas descritos atrás ficaram resolvidos, mas relativamente à profundidade do canal na zona da alimentação é perceptível que o problema se persiste. A altura do canal é de 1,5mm o que é ainda manifestamente insuficiente tendo em conta que as pellets podem chegar aos 4mm de altura.

Para solucionar este problema não existe a possibilidade de aumentar a profundidade do canal na zona de alimentação pois pode constituir um risco para a resistência mecânica do fuso. Por outro lado, um novo aumento do fuso será a última opção visto que é pretendido a redução de dimensões ao máximo. Como tal, a solução encontrada foi aumentar a altura da hélice nessa zona e, para tal, é preciso ter em consideração que não podem existir variações bruscas no canal de passagem do material sob o risco de obstruir a extrusora. Posto isto, a maneira encontrada para resolver esta questão foi aumentar a altura da hélice de forma cônica nos primeiros 25mm da zona de alimentação apenas para fazer a admissão do material como mostra a imagem da Figura 9.

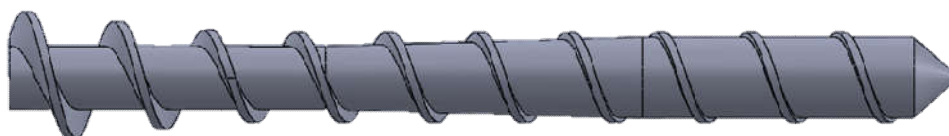


Figura 9 – Formato final do fuso

Este incremento resultou num diâmetro do fuso de 15mm na parte mais alta da hélice, diminuindo progressivamente até 10mm e até atingir 25mm de comprimento longitudinal do fuso. Desta forma, fica assegurado que o canal tem a profundidade necessária para realizar a admissão do material sem arriscar uma eventual obstrução durante o funcionamento da extrusora.

Por último, falta apenas analisar o ângulo da hélice. Pelas expressões empíricas, o ângulo standard da hélice é de $17,66^\circ$ (Chris Rauwendaal, 2014) e foi exatamente esse o ângulo adotado. Considerando que o material ao ser extrudido vai resistir ao movimento provocado pela rotação da hélice aplicando uma força na hélice no sentido inverso, facilmente concluímos que, devido ao facto de a hélice ter a inclinação de $17,66^\circ$, se corre o risco de haver um retorno de material pelo espaçamento existente entre o fuso e a camisa da extrusora.

Para evitar este retorno, optou-se por anular a inclinação da hélice na face responsável pelo avanço do material no fuso.

Está, desta forma, terminado o desenvolvimento do fuso. Falta agora desenvolver o veio do fuso que vai ser responsável pelo seu acoplamento. Como o veio vai depender das dimensões de outros elementos da extrusora, vai ser desenvolvido mais à frente quando existirem condições para tal.

3.2.2 Camisa anterior e camisa posterior

Tal como descrito anteriormente, um dos objetivos proposto é que a extrusora seja fácil de desmontar. Para tal, dividiu-se a camisa da extrusora em duas, a camisa anterior e a camisa posterior. Inicialmente, é importante definir onde repartir a camisa para que esta divisão não influencie o funcionamento da extrusora e facilite, ao máximo, a desmontagem da mesma. Como tal, optou-se por dividir a camisa no limite final da zona de alimentação do fuso, desde logo pela própria geometria do fuso nesta zona e também porque as etapas do processo de extrusão são divididas nesta zona. Antes de iniciar o desenvolvimento das camisas individualmente, é importante definir um parâmetro que é comum às duas e que consiste no espaçamento entre o fuso e a parede interna das camisas. Recorrendo às expressões empíricas de dimensionamento, o que é dito é que, para extrusoras pequenas, o espaçamento entre o fuso e a parede interna da camisa é de 0,025 vezes o diâmetro do fuso (John R. Wagner, Jr, *et al* 2013). Como o fuso tem 10mm de diâmetro, o espaçamento vai ser de 0,25mm. Posto isto, avança-se agora para o desenvolvimento individual das camisas, começando pela camisa posterior.

Camisa posterior

A camisa posterior vai ser definida com recurso à especificação de 4 parâmetros essenciais que são: o diâmetro interior, a espessura, o comprimento e a forma de acoplamento com a camisa anterior. De seguida vão ser, individualmente, definidos cada um destes parâmetros:

- **Diâmetro interior** – o diâmetro interior vai ser definido pela soma do diâmetro do fuso com o espaçamento entre o fuso e a camisa. Nas zonas de compressão e de dosagem o fuso tem um diâmetro de 10mm, como referido anteriormente, sendo o espaçamento entre o fuso e a camisa de 0,25mm. Posto isto, o diâmetro interno da camisa vai ser de 10,25mm;
- **Espessura** – A espessura da camisa posterior tem como principal requisito proporcionar uma boa resistência mecânica à mesma para que a mesma resista à pressão gerada no processo sem qualquer problema. Como não existe um método para definir o valor da espessura, o mesmo vai ser arbitrado com 4 mm.
- **Comprimento** – Como foi definido anteriormente, a camisa posterior vai envolver as zonas de compressão e dosagem pelo que o seu comprimento vai resultar da soma dos comprimentos destas duas zonas. Como tal, a camisa posterior vai ter um comprimento de 65mm;

- **Acoplamento** – Dado que a extrusora vai ter uma forma geométrica cilíndrica, a forma mais simples de efetuar este acoplamento é através de uma flange aparafusada. As dimensões da flange vão depender das medidas da camisa anterior;

Posto isto, a camisa posterior vai ter a estrutura base representada na Figura 10.

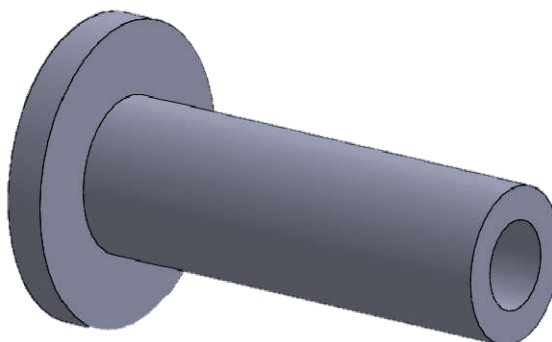


Figura 10 – Estrutura base da camisa posterior

Camisa anterior

O desenvolvimento da camisa anterior vai ser feito ao longo deste trabalho uma vez que é um componente que depende da definição de outros componentes. Posto isto, a primeira fase será definir a estrutura base deste componente que tem como elemento mais importante a zona que vai envolver o fuso. Como foi definido acima, a camisa anterior vai envolver a zona de alimentação do fuso, que se caracteriza pela sua geometria cónica. Apesar de o espaçamento entre o fuso e a camisa ser proporcional ao diâmetro do fuso, o espaçamento vai ser mantido constante tendo como referência o diâmetro de 10mm, uma vez que se fosse cumprida a regra empírica com rigor seria esperado um espaçamento variável na zona cónica o que iria complicar a maquinação deste elemento e porque não iria ter efeitos práticos no processo. Relativamente ao diâmetro externo e à zona de acoplamento apenas vão ser abordados mais à frente quando for definida a forma de acoplamento mais em concreto. Assim sendo, o esboço deste elemento é apresentado em corte na Figura 11 com um diâmetro externo de 35mm, sendo que apenas a zona envolvente do fuso é definitiva.

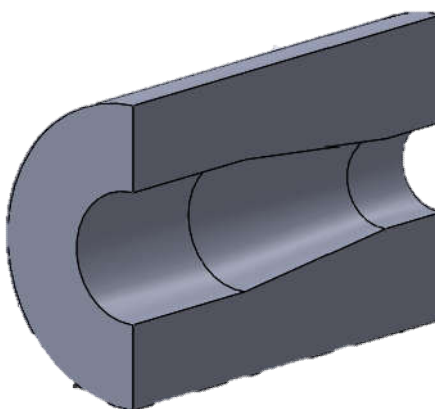


Figura 11 – Estrutura base da camisa anterior em corte

Uma vez definida a estrutura base, é possível desde já representar o canal de alimentação da extrusora. Dado que a extrusora vai ter um caudal de saída extremamente baixo, não existe a necessidade de uma taxa de alimentação elevada pelo que o canal de alimentação pode ser mais reduzido. Como já foi referido, o material a ser processado pela extrusora consiste em pellets com dimensões de, no máximo, 4mm de dimensão maior pelo que um canal de 10x10mm é suficiente. Relativamente à posição do mesmo, a sua face mais recuada deve coincidir com o início da zona de alimentação do fuso. Por último, o canal vai ser criado com uma inclinação de 45° de forma a facilitar a admissão do material pelo fuso. Posto isto, o canal de alimentação terá a configuração representada na imagem em corte da Figura 12:

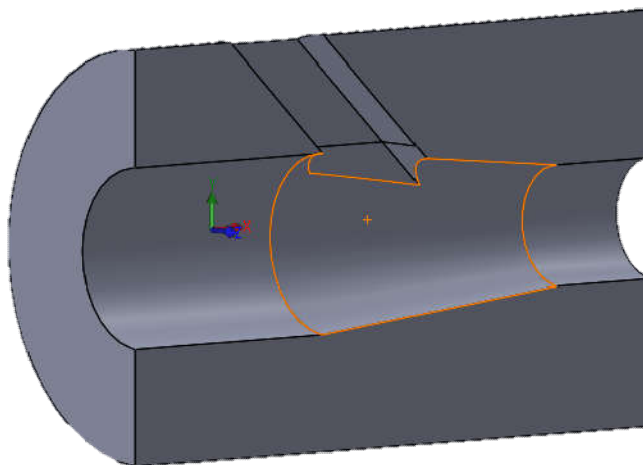


Figura 12 – Formato do canal de alimentação de material, em corte

3.2.3 Acoplamento

Nesta secção vai ser definido o acoplamento entre as peças desenvolvidas até agora, sendo que este mesmo acoplamento vai permitir fazer grandes progressos no que diz respeito ao desenvolvimento dessas mesmas peças. Em primeiro lugar vai ser executada uma primeira junção dos três componentes já criados para perceber quais são os parâmetros a ser definidos. Esta junção está representada na Figura 13, imagem em corte, sendo que os três componentes têm colorações diferentes para facilitar a análise.

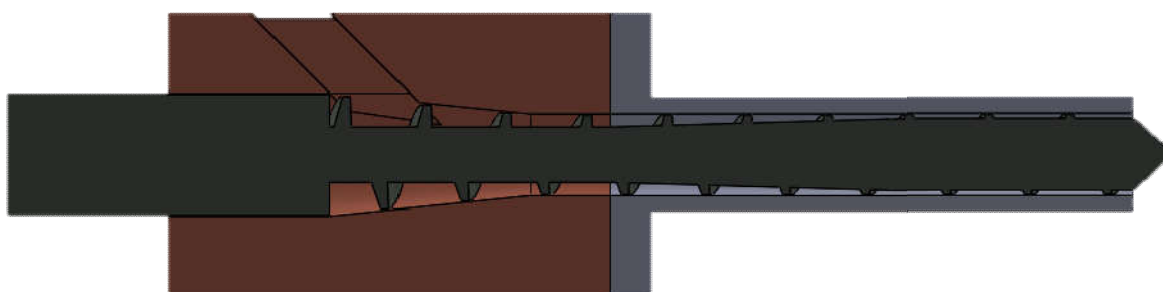


Figura 13 – Assemblagem do fuso com as estruturas base de ambas as camisas

Como se pode observar é necessário criar dois acoplamentos: um entre o fuso e a camisa anterior e outro entre ambas as camisas. O primeiro a ser desenvolvido vai ser o acoplamento entre o fuso e a camisa anterior sendo, para tal, importante definir o tipo de acoplamento mais adequado tendo em conta os esforços que vão ser criados durante o processo de extrusão. Os esforços gerados no processo vão ser maioritariamente axiais pelo que facilmente se conclui que a forma de acoplamento mais indicada, neste caso, é através de um rolamento axial.

Dentro dos rolamentos axiais, existem rolamentos axiais de esferas e rolamentos axiais de rolos, dentro dos quais ainda existe a subcategoria de rolamentos axiais de agulhas, em que a maior diferença entre eles consiste na carga que suportam, sendo que os rolamentos axiais de rolos suportam cargas mais elevadas. Dada a dimensão da extrusora não é de esperar que sejam gerados esforços muito elevados pelo que o rolamento escolhido vai ser o rolamento axial de esferas pois estes têm um custo inferior.

Antes de prosseguir, é importante apresentar as características e os requisitos deste tipo de rolamento que está apresentado na Figura 14.



Figura 14 - Rolamento axial de esferas (www.skf.com, 2017)

Um rolamento axial de esferas é constituído por um anel central de esferas, uma arruela de eixo e uma arruela de mancal. A arruela de eixo e a arruela de mancal distinguem-se pelo facto de terem diâmetros internos e externos diferentes de modo a que a arruela de eixo fixe o rolamento somente ao eixo e a arruela de mancal fixe a arruela exclusivamente ao mancal. Aplicando isto à extrusora em desenvolvimento, o eixo corresponde ao fuso e o mancal vai ser a camisa anterior. De seguida, na Figura 15, é apresentada a forma de montagem deste tipo de rolamentos.

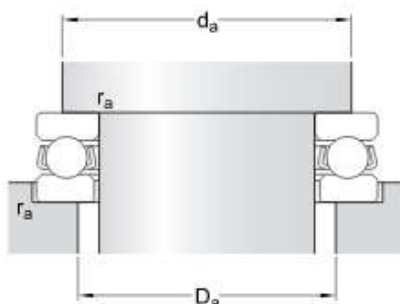


Figura 15 – Forma de montagem de rolamentos axiais de esferas (www.skf.com, 2017)

Da análise da Figura 15 pode concluir-se que é necessário ter em conta três parâmetros com vista à montagem do rolamento. Estes três parâmetros são:

- Diâmetro de encosto entre o rolamento e o fuso (d_a);
- Diâmetro interno da base do rolamento (D_a);
- Folga entre a lateral do rolamento e a lateral da base do rolamento (r_a);

Conhecidas as especificações deste tipo de rolamentos, pode agora seleccionar-se o rolamento a ser utilizado. Os fatores que vão influenciar a escolha do rolamento são: o diâmetro interior, o diâmetro exterior, a profundidade e a carga suportada tendo como objetivo minimizar, ao máximo, as dimensões do mesmo sem comprometer a viabilidade mecânica. Neste momento o diâmetro do fuso na zona de acoplamento é de 15mm e a camisa anterior tem como diâmetro externo 35mm, ou seja, o diâmetro exterior do rolamento deverá ser, preferencialmente, abaixo desse valor para que não seja necessário aumentar o diâmetro da camisa exterior. Tendo estes valores como referência, as opções de rolamentos fornecidos pela SKF estão representados na Figura 16.

Dimensões principais			Classificações de carga básica		Limite de carga de fadiga	Classificações de velocidade		Designações		
d	D	H	H ₁	C	C ₀	P _u	Velocidade de referência	Velocidade-limite	Rolamento	Arruela de assento
mm			kN		kN		r/min			
↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕	↕
3	8	3.5		0.806	0.72	0.027	26000	36000	BA 3	
4	10	4		0.761	0.72	0.027	22000	30000	BA 4	
5	12	4		0.852	0.965	0.036	20000	28000	BA 5	
6	14	5		1.78	1.92	0.071	17000	24000	BA 6	
7	17	6		2.51	2.9	0.108	14000	19000	BA 7	
8	19	7		3.19	3.8	0.143	12000	17000	BA 8	
9.2	19.8	7		3.12	3.8	0.143	12000	16000	BA 9	
10	24	9		9.95	15.3	0.56	9500	13000	51100	
10	26	11		12.7	18.6	0.695	8000	11000	51200	
12	28	11.4	13	13.3	20.8	0.765	8000	11000	53201	U 201
12	26	9		10.4	16.6	0.62	9000	13000	51101	
12	28	11		13.3	20.8	0.765	8000	11000	51201	
15	32	13.3	15	15.9	25	0.915	7000	10000	53202	U 202
15	28	9		10.6	18.3	0.67	8500	12000	51102	
15	32	12		15.9	25	0.915	7000	10000	51202	
17	35	13.2	15	16.3	27	1	6700	9500	53203	U 203
17	35	12		16.3	27	1	6700	9500	51203	
17	30	9		11.4	21.2	0.78	8500	12000	51103	

Figura 16 – Lista de rolamentos axiais e respetivas dimensões fornecidos pela SKF (www.skf.com, 2017)

Os itens a ser analisados na imagem 16 são o d (diâmetro interior), o D (diâmetro exterior), o H (profundidade) e o C (carga dinâmica). Como foi dito anteriormente, o objetivo será encontrar um compromisso entre estes parâmetros de forma a obter as dimensões mínimas sem comprometer a resistência mecânica. Considerando os 15mm para o diâmetro interior e uma medida abaixo dos 35mm para o diâmetro exterior, a primeira escolha recairia para o rolamento 51102 mas, ao analisar os rolamentos com dimensões semelhantes e comparando as respectivas cargas dinâmicas suportadas, o rolamento 51201 será também uma escolha acertada pois suporta uma carga mais elevada, tem um diâmetro interior mais reduzido, um diâmetro exterior igual e apenas tem mais 2mm de profundidade. Ao analisar as

características destes dois rolamentos, aquele que apresenta melhor relação dimensão/carga será o rolamento 51201 pois suporta uma carga superior e apenas tem mais 2mm de profundidade, o que não representa um aumento significativo do volume ocupado sendo assim o rolamento escolhido. As características e os requisitos deste rolamento estão presentes na Figura 17, abaixo.

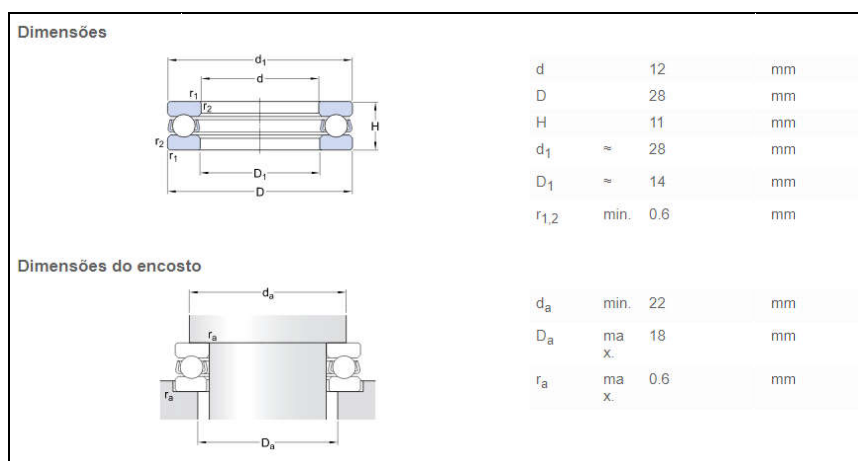


Figura 17– Requisitos das dimensões de encosto do rolamento axial de esferas (www.skf.com, 2017)

Dados os requisitos do rolamento, é necessário adaptar o fuso e a camisa anterior aos mesmos. Em primeiro lugar vai ser executada a adaptação da camisa anterior, em que vai ser criada a caixa para o rolamento com o diâmetro adequado ao mesmo e com a profundidade máxima possível tendo em conta a geometria da camisa anterior. Posto isto, o diâmetro interior da camisa anterior vai ser de 28mm, que corresponde ao diâmetro externo do rolamento (28mm), de forma a obter uma concentricidade perfeita entre o fuso e a camisa que, devido ao espaçamento muito reduzido entre o fuso e as camisas, é extremamente importante para evitar prisões mecânicas no fuso. Relativamente à profundidade da caixa, vai ter como referência o canal de alimentação, pois é o componente mais recuado da camisa, não podendo ser comprometido com a caixa do rolamento. Desta forma, a caixa do rolamento na camisa anterior vai ter a configuração presente na Figura 18.

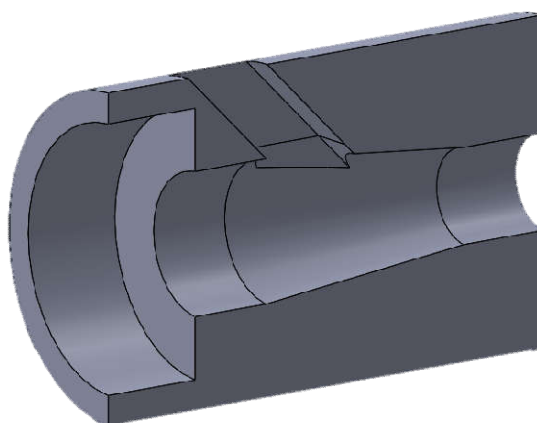


Figura 18– Caixa para o rolamento axial de esferas, em corte

Está assim definida a estrutura base da camisa anterior no que diz respeito à caixa do rolamento, sendo que agora é necessário realizar a adaptação do fuso para acoplar o rolamento. No que diz respeito ao fuso, é necessário criar um encosto para o rolamento axial com, pelo menos, 22mm e também é preciso rebaixar o diâmetro da zona de acoplamento para 12mm, sendo essencial manter o diâmetro imediatamente a seguir à zona “útil” de 15mm para evitar o aparecimento de material na zona de acoplamento. Executando estas alterações, o fuso vai ficar com a geometria ilustrada na Figura 19.

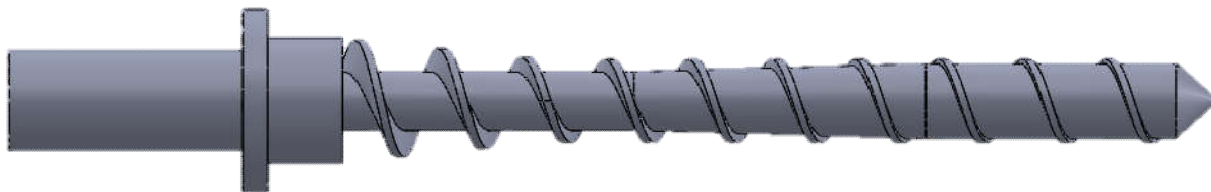


Figura 19– Formato do veio do fuso

Ao acoplar a estrutura base da camisa anterior e o fuso, é perceptível a existência de uma falha situada na geometria de encosto do rolamento no fuso. O rolamento vai ser colocado a montante do encosto, sendo que a jusante o encosto vai ficar em contacto direto com a camisa anterior como se pode ver na imagem, em corte, da Figura 20.

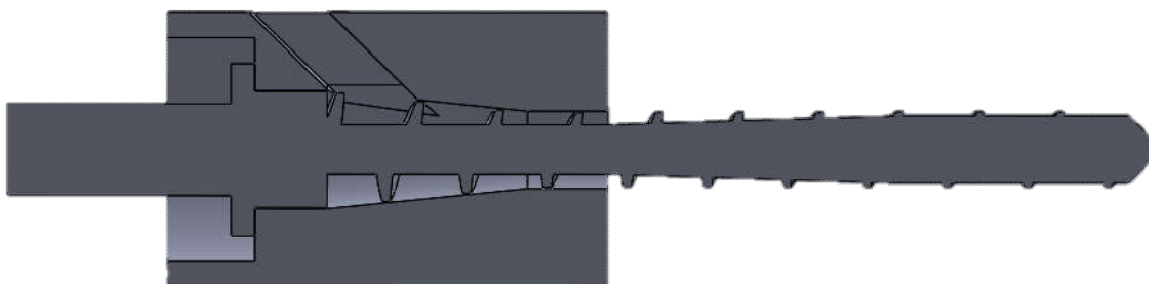


Figura 20– Assemblagem do fuso com a camisa anterior, em corte

Como o fuso vai estar em rotação e a camisa anterior vai permanecer fixa, este contacto entre ambos vai provocar desgaste nestes componentes, o que irá comprometer o funcionamento da extrusora a médio prazo sendo, por isso, necessário encontrar uma forma de evitar este contacto. A resolução deste problema deve ser realizada tentando minimizar ao máximo as dimensões que lhe estão associadas. Para tal, a solução encontrada foi a utilização de um rolamento axial de agulhas pois, neste caso, é dispensável a utilização de arruelas e a espessura destes rolamentos são muito baixas. É de realçar que o diâmetro interior a ser utilizado é, obrigatoriamente, de 15mm pois o fuso não pode sofrer alterações nesta zona. A tabela de rolamentos axiais de agulhas disponíveis da SKF está ilustrada na Figura 21.

Dimensões principais			Classificações de carga básica		Limite de carga de fadiga	Classificações de velocidade		Designação
d	D	D _w	C	C ₀	P _u	Velocidade de referência	Velocidade-limite	
mm			kN		kN	r/min		
4	14	2	4.15	8.3	0.95	7500	15000	AXK 0414 TN
5	15	2	4.5	9.5	1.08	6700	14000	AXK 0515 TN
6	19	2	6.3	16	1.86	6000	12000	AXK 0619 TN
8	21	2	7.2	20	2.32	5600	11000	AXK 0821 TN
10	27	2	8.5	26	3	5300	10000	AXW 10
10	24	2	8.5	26	3	5300	10000	AXK 1024
12	26	2	9.15	30	3.45	5000	10000	AXK 1226
12	29	2	9.15	30	3.45	5000	10000	AXW 12
15	28	2	10.4	37.5	4.3	4800	9500	AXK 1528
15	31	2	10.4	37.5	4.3	4800	9500	AXW 15
17	30	2	11	40.5	4.75	4500	9500	AXK 1730

Figura 21– Lista de rolamentos axiais de agulhas e respetivas dimensões (www.skf.com, 2017)

Neste caso, apenas existem dois rolamentos com 15mm de diâmetro interior sendo que um deles tem exatamente o mesmo diâmetro externo do rolamento axial de esferas e o outro tem um diâmetro externo superior. Como tal, a escolha mais indicada é, naturalmente, o rolamento com diâmetro externo igual, que consiste no rolamento AXK1528. As características deste rolamento estão representadas na Figura 22.



Figura 22– Características do rolamento axial de agulhas selecionado (www.skf.com, 2017)

Dadas as dimensões deste rolamento, o diâmetro do encosto criado no fuso vai ser aumentado para 27mm para que as agulhas deste rolamento estejam totalmente apoiadas. Não foi considerado um diâmetro superior para evitar o risco de ocorrer algum bloqueio entre o fuso e a camisa anterior uma vez que o diâmetro interno da camisa anterior é de 28mm. Inserindo os rolamentos no acoplamento, o resultado é a configuração ilustrada na Figura 23.

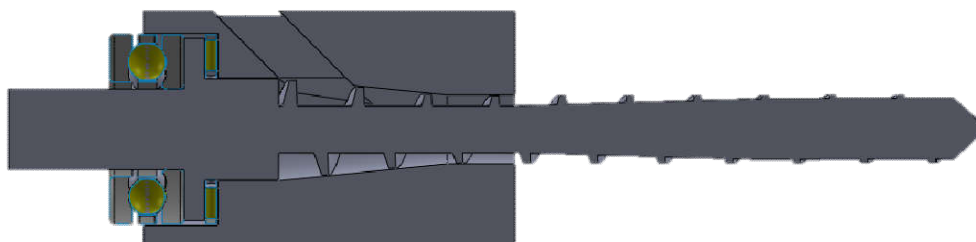


Figura 23– Assemblagem do fuso, camisa anterior e ambos os rolamento axiais, em corte

Uma vez definido o tipo de acoplamento, falta agora ajustar o comprimento da camisa anterior e criar a tampa de aperto do acoplamento. Relativamente ao comprimento da camisa anterior, optou-se por aumentá-lo até envolver parcialmente a arruela de mancal do rolamento

axial, ficando o restante dessa mesma arruela envolvida pela tampa de aperto, isto com o intuito de garantir a concentricidade de todos os elementos. Relativamente à tampa de aperto, esta vai ser aparafusada à camisa anterior, através de 4 parafusos M4, e vai ter um furo central de 13mm para que não interfira com o fuso. Como a espessura da camisa anterior é de 3,5mm $((35-28)/2)$, o que impossibilita a furação da camisa anterior e posterior roscagem para a medida dos parafusos pretendida, é necessário aumentar o diâmetro da camisa anterior para tornar isto possível. Sendo um dos propósitos do projeto aqui apresentado minimizar, ao máximo, as dimensões da extrusora, vai ser criada apenas uma gola na camisa anterior com um diâmetro exterior de 40mm para que a tampa possa ser aparafusada. Desta forma, a tampa da caixa do rolamento fica totalmente definida, com um furo central de 13mm, um diâmetro externo de 40mm, 4 furos de 4mm coincidentes com o centro da secção da parede da camisa anterior e, por fim, uma espessura de 5mm de modo a garantir uma boa fixação do rolamento. Além disto, é necessário criar a restante caixa do rolamento neste componente, de forma a garantir a concentricidade dos elementos. Posto isto, a tampa de aperto da caixa do rolamento vai ficar com a geometria apresentada na Figura 24.

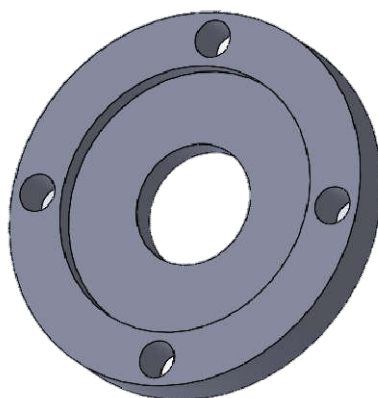


Figura 24– Formato da tampa de aperto da caixa do rolamento

Implementadas todas estas alterações descritas e acrescentando a tampa de aperto, o acoplamento fica concluído conforme ilustra a imagem da Figura 25 e a imagem, em corte da Figura 26.

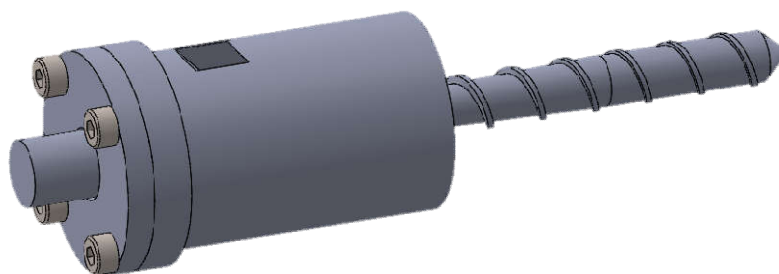


Figura 25– Formato final do acoplamento entre o fuso e a camisa anterior

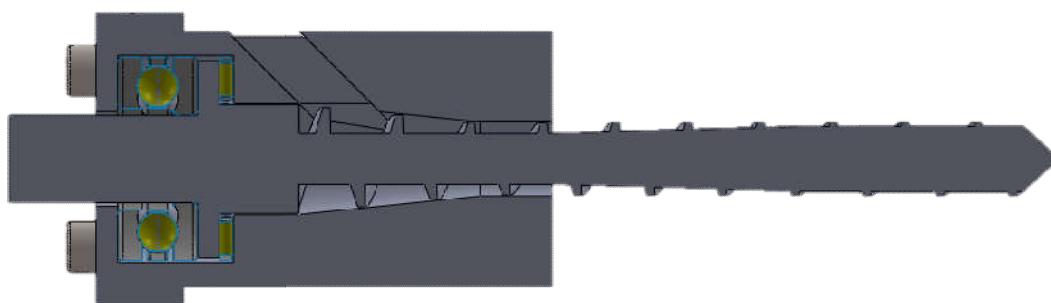


Figura 26- Formato final do acoplamento entre o fuso e a camisa anterior, em corte

Uma vez concluído o acoplamento entre o fuso e a camisa anterior falta agora definir o acoplamento entre as duas camisas. Como foi referido anteriormente, este acoplamento vai ser realizado através de uma flange criada na camisa posterior que vai ser aparafusada à camisa anterior. Para tal, o diâmetro da flange vai ser igualado ao diâmetro exterior da camisa anterior (35mm) e a camisa anterior vai ser furada e roscada para fixar os dois componentes através de parafusos M4. Uma vez que o espaçamento entre o fuso e as camisas é muito reduzido, vai ser introduzido um anel na camisa anterior e um entalhe de iguais dimensões na camisa posterior que vão garantir a concentricidade dos dois elementos, conforme mostra a Figura 27.

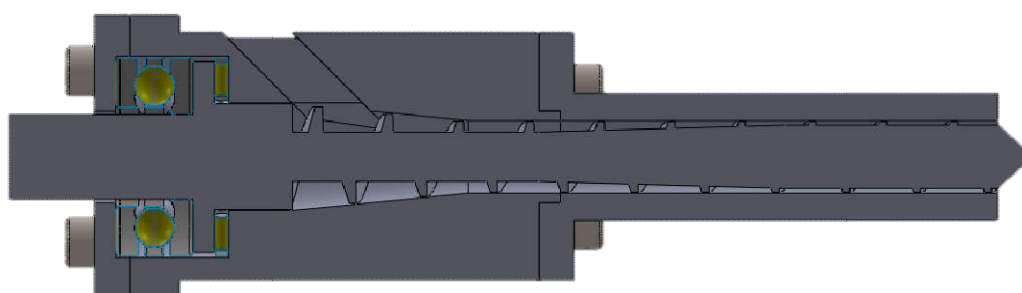


Figura 27 - Formato final do acoplamento entre ambas as camisas, em corte

3.2 Doseador

O doseador é um elemento determinante para o bom funcionamento da extrusora, uma vez que é nesta zona que se dá a conformação final do material e a sua respetiva saída. Como tal, existe um conjunto base de regras a ter em consideração no desenvolvimento do doseador tais como (Chris Rauwendaal, 2014):

- A montagem e desmontagem devem ser simples e fácil;
- Evitar variações bruscas na geometria de escoamento;
- Utilizar ângulos de aproximação o mais reduzidos possível;
- Evitar pontos de obstrução ao escoamento;
- Utilizar um comprimento de transição 10 vezes superior ao espaçamento de transição.

A acrescentar a estas regras é importante referir que um dos objetivos no desenvolvimento deste componente é permitir a utilização de agulhas de modelação disponíveis no mercado com o intuito de poder variar o diâmetro de saída da extrusora consoante seja necessário uma

vez que existem agulhas com várias medidas no que diz respeito ao seu diâmetro interno. Desta forma, é possível subdividir o desenvolvimento deste componente em três partes distintas, em que uma delas consiste na transição do caudal periférico transportado pelo fuso para um caudal uniforme à saída do doseador, outra consiste num mecanismo de fixação das agulhas mencionadas acima e, por último, a fixação deste elemento à camisa posterior.

O início do desenvolvimento do doseador vai ser efetuado precisamente pela zona de transição de causal, que é a parte determinante deste componente. No processo de desenvolvimento do fuso, foi adicionado uma zona terminal cónica, apesar de não ter sido mencionada, que consiste numa das partes da zona de transição da extrusora. Como foi mencionado quando do desenvolvimento do fuso, a zona de dosagem do mesmo tem um diâmetro de 9mm na alma do fuso ao qual acresce 1mm de hélice e 0,25mm de espaçamento entre o fuso e a camisa. No que diz respeito ao desenvolvimento do doseador, o dado a realçar é o caudal de 0,5 mm de espessura periférica abrangido pela hélice do fuso, podendo ser desprezado o espaçamento entre o fuso e a camisa visto ser uma zona que não é abrangida pela hélice. Para manter um escoamento constante e evitar variações de geometria no escoamento, o espaçamento entre a geometria cónica do fuso e o doseador vai ser mantido em 0,5 mm ao longo da transição, que é a dimensão com que chega a esta zona. Posto isto, e seguindo as regras, o comprimento desta zona vai ser de 5mm (10 vezes superior ao espaçamento), que é, precisamente, o comprimento da zona cónica de transição já criada no fuso. A zona de transição do doseador vai ter um espaçamento axial de 1mm relativamente ao fuso, um diâmetro inicial de 10,25 de modo a não existir obstrução de caudal entre a camisa posterior e o doseador; e vai terminar com um diâmetro de saída de 1mm, tal como é pretendido. Quanto ao seu diâmetro externo, este vai ser de 18mm, tal como a camisa posterior. A zona de transição do doseador vai ter a configuração apresentada nas imagens das Figuras 28 e 29.

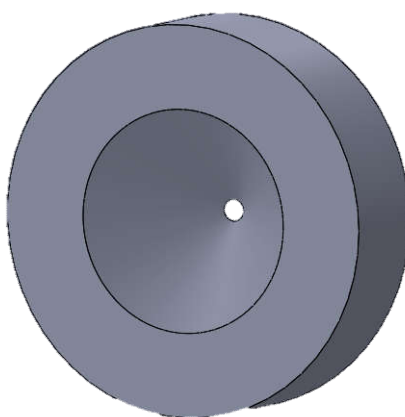


Figura 28– Formato da zona de transição do doseador

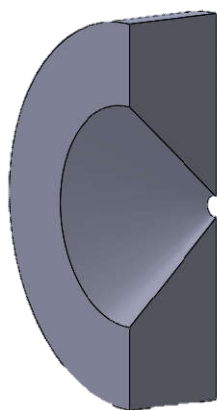


Figura 29- Formato da zona de transição do doseador, em corte

Determinada a zona de transição, é necessário definir a zona de acoplamento do doseador à camisa posterior. A forma mais simples de executar este acoplamento é através da roscagem entre eles, uma vez que permite a manutenção do mesmo diâmetro exterior, não comprometendo a resistência dos componentes e facilita a montagem/desmontagem e do equipamento. O primeiro parâmetro a definir vai ser a rosca a ser usada e, para tal, é importante analisar os diâmetros internos e externos dos dois componentes e também a espessura para encontrar a rosca mais adequada. Os três parâmetros mencionados são iguais em ambos os componentes e consistem num diâmetro exterior de 18mm, um diâmetro interior de 10,25mm e, conseqüentemente, uma espessura de aproximadamente 4mm. Analisando estes parâmetros, facilmente se conclui que a rosca mais adequada será a M14 pois permite um acoplamento simétrico uma vez que as partes exterior e interior da rosca vão ficar com, aproximadamente, a mesma espessura. Antes de executar a rosca é importante analisar a influência da rotação do fuso no aperto ou desaperto do doseador. A hélice criada no fuso é direita, ou seja, a rotação do fuso vai dar-se no sentido horário. É essencial que o aperto do doseador seja executado no mesmo sentido que a rotação do fuso para que, dessa forma, se a rotação do fuso tiver alguma influência no aperto do doseador, essa influência resulte no aperto do doseador e não no oposto, o que seria prejudicial para a extrusora. No sentido de garantir isto, o aperto do doseador vai ser realizado através de uma rosca esquerda, como mostra a Figura 30.

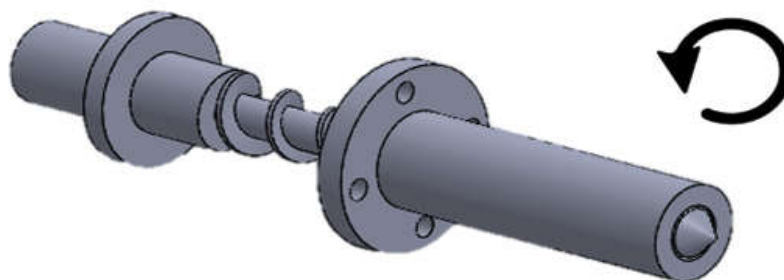


Figura 30- Representação do sentido de rotação do fuso

Para criar a rosca pretendida, é necessário projetar a zona de acoplamento no doseador e desbastar a zona de acoplamento na camisa posterior de acordo com as medidas da rosca M14. Antes de realizar essas alterações, é necessário optar entre rosca grossa ou fina. Para a medida M14 existe a possibilidade de utilizar rosca grossa com a medida de M14x2 ou rosca fina M14x1, M14x1.25 e M14x1.5. A escolha da rosca a utilizar vai ter como principal objetivo a obtenção de um aperto preciso da agulha de modelação e, simultaneamente, uma boa base de contacto entre os filetes das roscas dos dois elementos. Posto isto, a rosca que mais se adequa a esse propósito é a M14x1,5. Estão resumidas na Tabela 1 as dimensões relativas às roscas métricas finas de forma a poder criar a rosca pretendida.

MB (MF) Rosca Métrica Fina 60°			
D x passo mm	Diâmetro do núcleo (mm)		Diâmetro da broca (mm)
	máximo	mínimo	
3x0.35	2.721	2.621	2.65
3.5x0.35	3.221	3.121	3.15
4x0.50	3.599	3.459	3.5
5x0.50	4.599	4.459	4.5
6x0.75	5.378	5.188	5.2
7x0.75	6.378	6.188	6.2
8x0.75	7.378	7.188	7.2
8x1.00	7.153	6.917	7.0
9x0.75	8.378	8.188	8.2
9x1.00	8.153	7.917	8.0
10x0.75	9.378	9.188	9.2
10x1.00	9.153	8.917	9.0
10x1.25	8.912	8.647	8.8
12x1.00	11.153	10.917	11.0
12x1.25	10.912	10.647	10.8
12x1.50	10.676	10.376	10.5
14x1.00	13.153	12.917	13.0
14x1.25	12.912	12.647	12.8
14x1.50	12.676	12.376	12.5
16x1.00	15.153	14.917	15.0
16x1.50	14.676	14.376	14.5
18x1.00	17.153	16.917	17.0
18x1.50	16.676	16.376	16.6
18x2.00	16.210	15.853	16.0
20x1.00	19.153	18.917	19.0
20x1.50	18.676	18.376	18.5
20x2.00	18.210	17.835	18.0

Tabela 1 – Lista de roscas métricas finas e respetivas dimensões
(http://dipal.com.br/m/wa_files/rosca_20e_20passo.pdf,2017)

Com base nas dimensões da Tabela 1, o doseador vai ter uma projeção com o diâmetro interno de 12.5mm para posterior roscagem a M14. Esta projeção vai ser realizada com um comprimento de 10mm para proporcionar uma boa base de acoplamento. Desta forma, com a projeção efetuada, o doseador vai ficar com a configuração da imagem, em corte, representada na Figura 31.

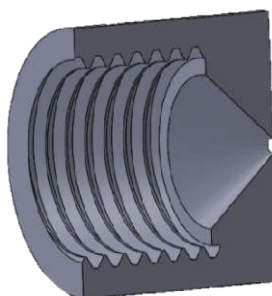


Figura 31– Rosca de aperto do doseador executada no doseador, em corte

No que diz respeito à camisa posterior, vai ser realizada a operação oposta à anterior, ou seja, vai ser executado um desbaste com um comprimento de 10mm para um diâmetro de 14mm que vai ser, posteriormente, roscado a M14. Desta forma, a camisa posterior vai ficar com a geometria definida na Figura 32.

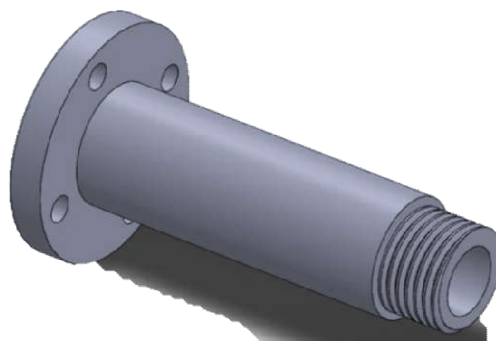


Figura 32– Rosca de aperto do doseador executada na camisa posterior

Está, desta forma, definido o acoplamento entre a camisa posterior e o doseador, faltando apenas definir o acoplamento da agulha de modelação no doseador. Como foi dito anteriormente, um dos objetivos é possibilitar a troca de agulha de modelação com alguma facilidade dado que existem agulhas de modelação com diferentes diâmetros internos. Estas agulhas de modelação têm em comum a geometria, variando apenas as dimensões da agulha propriamente dita. A Figura 33 ilustra uma agulha de modelação.

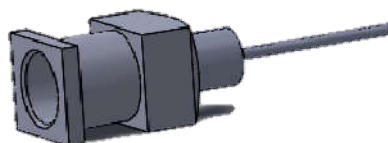


Figura 33 – Geometria da agulha de modelação

Primeiramente, é importante criar uma ponte entre o doseador e a agulha para que o material a extrudir avance sem obstruções ou fugas. Para tal, vai ser aproveitado o furo interior da estrutura da agulha de modelação, que tem 4mm de diâmetro, para fazer essa ligação. Posto isto, vai ser criada uma projeção no doseador com um diâmetro externo de 4mm para se ajustar à agulha, com um furo interior de 1mm que consiste no limite de diâmetro de saída máximo pretendido. O comprimento desta projeção vai ser de 8mm, que consiste no comprimento aproximado do furo mencionado. Implementadas estas considerações, o doseador evoluiu para a configuração apresentada na Figura 34. A Figura 35 mostra, em corte, o conjunto doseador e agulha de modelação.

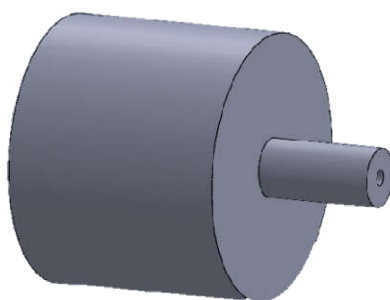


Figura 34– Zona de encaixe da agulha de modelação

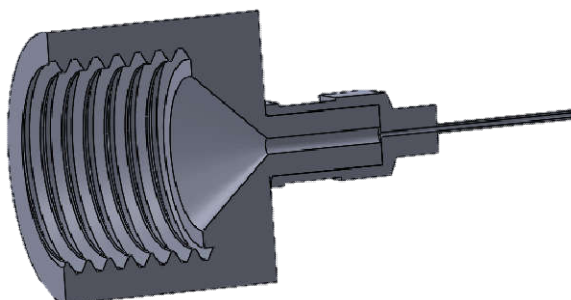


Figura 35– Assemblagem da agulha ao doseador, em corte

Com esta alteração está executada a ligação entre o doseador e a agulha no que diz respeito à transição de material entre ambos, sendo que é necessário fixar mecanicamente os dois elementos. Para tal, vai ser criada, em volta da agulha de modelação, uma parede cilíndrica com rosca exterior para depois fixar a agulha através de outra peça. Por uma questão de coerência, facilidade de produção e de facilidade de montagem, a rosca a ser criada vai ser igualmente a M14x1,5 esquerda, apesar de já não existir uma influência da rotação do fuso. A Figura 36 ilustra a configuração da final da zona de acoplamento da agulha de modelação.

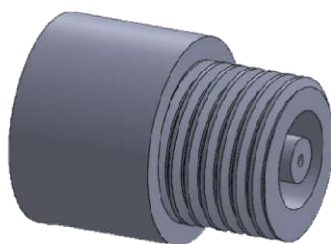


Figura 36– Configuração da final da zona de acoplamento da agulha de modelação

É importante realçar que o diâmetro interior da parede criada coincide com a largura máxima da agulha. Definidos todos estes parâmetros relativamente ao doseador falta apenas criar uma base para poder apertar este componente à camisa posterior através de uma ferramenta. Para tal, vão ser criadas duas zonas planas alinhadas e em extremos opostos da periferia da zona de diâmetro maior do doseador de forma a inserir uma chave de bocas. Uma vez realizada esta alteração, o doseador vai ter a configuração final apresentada na Figura 37.

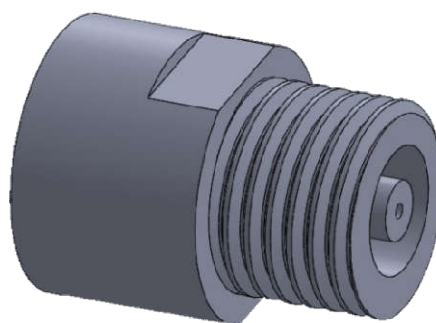


Figura 37– Configuração final do doseador

Para finalizar este subcapítulo falta apenas criar a peça que vai apertar a agulha ao doseador. Este componente vai ter uma rosca interior M14 esquerda tal como o doseador, um diâmetro exterior de 18mm, uma tampa frontal para apertar a agulha com um furo central de 4 mm e uma base para aperto tal como o doseador. O comprimento da zona roscada deste componente vai ser ligeiramente inferior ao do doseador para garantir que a agulha fica bem apertada para não existirem fugas de material. A Figura 38 apresenta a configuração deste componente.

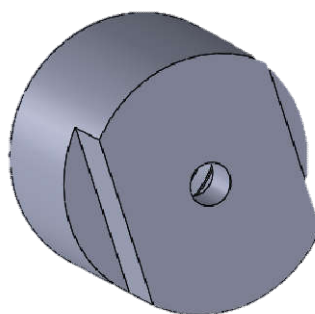


Figura 38– Formato do elemento de aperto da agulha de modelação

A Figura 39 ilustra, em corte, todos os elementos que proporcionarão o aperto da agulha de modelação.

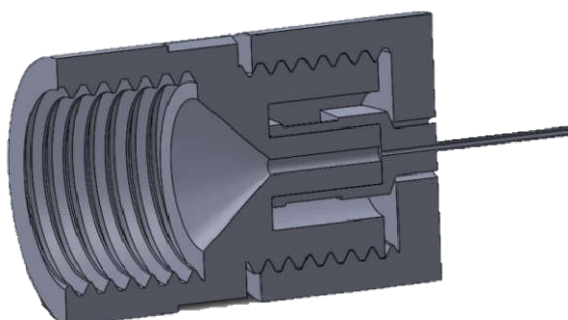


Figura 39– Assemblagem dos elementos constituintes do aperto da agulha de modelação

3.2.5Refrigeração da zona de alimentação

O princípio de funcionamento das extrusoras de fuso inclui o aquecimento do material a extrudir em duas fases, em que a primeira surge devido à fricção do material com as paredes e o fuso da extrusora sendo, numa segunda fase, o material aquecido através de fornecimento de

calor externo até temperaturas próximas da sua temperatura de fusão. Como consequência, a transmissão de calor ao longo do fuso, aliada às reduzidas dimensões do fuso, vai fazer com que o calor transmitido chegue facilmente à zona de alimentação da extrusora. Este aquecimento da zona de alimentação do fuso acarreta consequências negativas ao processo pois conduz à fusão prematura do material. Adicionalmente, e como esta zona se caracteriza por uma taxa de compressão reduzida, o material vai ficar agarrado ao fuso sem que este tenha capacidade de o fazer avançar provocando um bloqueio no escoamento da extrusora. Como tal, torna-se essencial introduzir uma forma de arrefecer a extrusora nesta zona. Uma vez que a transmissão de calor se dá pelo fuso, seria eficiente encontrar uma forma de o arrefecer. Isto é possível através da criação de um canal interior no fuso, em que a entrada e a saída seriam localizadas na parte de trás do mesmo. Este canal está representado na imagem da Figura 40 e, em corte, na imagem da Figura 41.

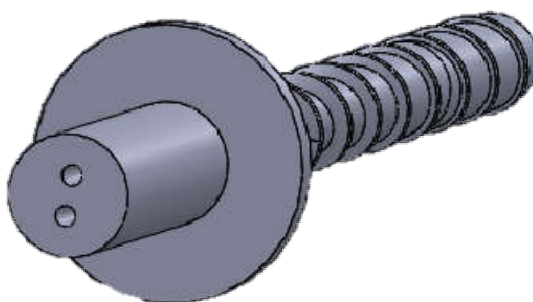


Figura 40– Entrada e saída do canal de refrigeração do fuso

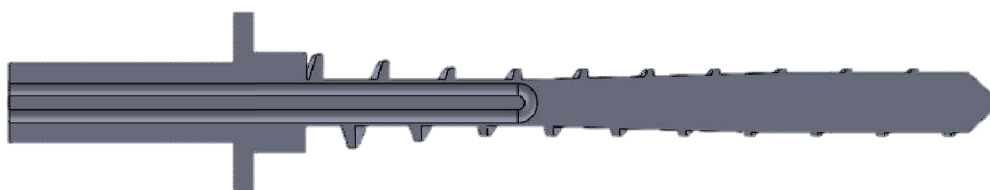


Figura 41– Formato do canal de refrigeração do fuso, em corte

Ao analisar a viabilidade da existência de um canal interior no fuso, conclui-se que não é a melhor opção por dois motivos:

- i) Em primeiro lugar, a execução deste canal interior implicaria diminuir drasticamente a secção útil da fuso, fragilizando a sua resistência mecânica, o que é agravado pelo facto de esta secção coincidir com a zona de menor diâmetro do fuso (zona de alimentação);
- ii) O segundo motivo está relacionado com a fabricação deste componente, difícil de executar pelos métodos subtrativos tradicionais sendo necessário recorrer à técnica de fabrico aditivo Selective Laser Melting (SLM), cujo equipamento disponível apenas tem capacidade para produzir componentes com uma dimensão máxima de 100mm e o fuso excede essas dimensões.

Como tal, foi necessário encontrar outra solução para o arrefecimento da zona de alimentação, que passa por criar um canal de refrigeração na camisa anterior. Neste caso, a geometria do

canal vai ter um formato diferente devido à geometria da peça, que é cilíndrica. O canal vai ser criado em forma de espiral ao longo da peça, sendo que é preciso ter em conta o canal de alimentação e os furos roscados da mesma, de modo a não comprometer nenhum destes itens. O início e o fim do canal de refrigeração vão localizar-se do mesmo lado da camisa de modo a facilitar a conexão a uma rede externa de arrefecimento. É de realçar que a construção deste canal é executada por tentativa/erro de forma a encontrar a geometria mais adequada à peça com o propósito de não comprometer nenhum constituinte deste componente. Após várias iterações, o canal de refrigeração ficou com a geometria apresentada nas Figuras 42 e 43.

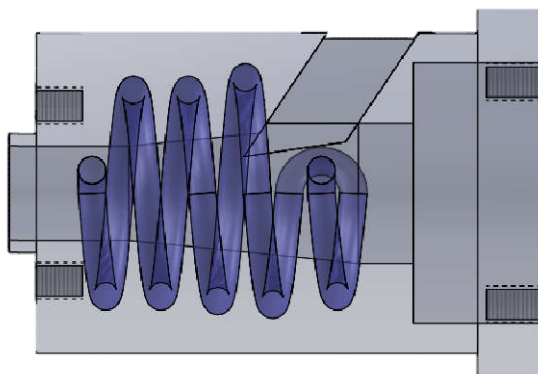


Figura 42– Geometria do canal de refrigeração da camisa anterior (vista 1)

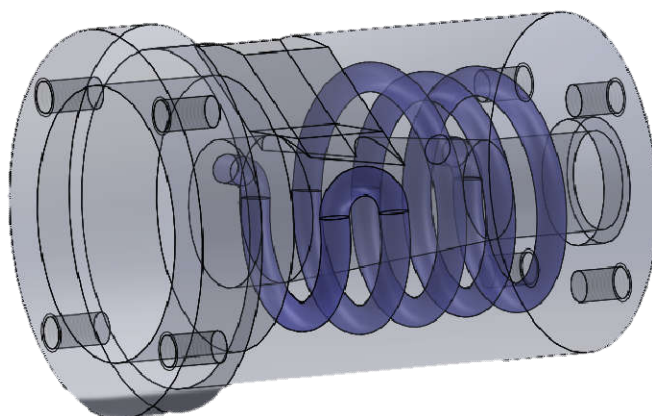


Figura 43- Geometria do canal de refrigeração da camisa anterior (vista 2)

Nas Figuras 42 e 43 o canal está com uma tonalidade azul e o restante da peça está transparente de modo a facilitar a análise da viabilidade do canal de refrigeração. O canal apresenta um diâmetro final de 3mm em todo o seu comprimento, sendo o diâmetro máximo possível de adotar. Ao analisar o canal, facilmente se conclui que a sua existência parece não comprometer a resistência mecânica da peça e que poderá solucionar o problema do aquecimento na zona de alimentação da extrusora. A criação deste canal obriga a que esta peça seja produzida através de SLM, o que não constitui um problema uma vez que a peça é inferior a 100mm em todas as suas dimensões. Tratando-se de um canal de refrigeração, este vai ser atravessado por um fluido refrigerante, pelo que é necessário criar duas conexões para permitir a entrada e a saída desse mesmo fluido. Para tal, vão ser criados dois furos roscados

de modo a permitir a aplicação de acessórios que permitam a conexão de tubos que vão encaminhar o fluido até à entrada e admiti-lo à saída do canal de refrigeração. Uma vez que as dimensões do canal são reduzidas, a conexão do acessório vai ser realizada através da rosca com dimensão menor disponível no mercado, que é a rosca métrica M5. Os acessórios a serem utilizados vão depender do tipo de fluido selecionado para a aplicação em causa, ou seja, se for utilizado ar comprimido para arrefecimento será utilizado um acessório de engate rápido como mostra a Figura 44, por outro lado se for utilizado um líquido refrigerante será utilizado um espigão como o que está ilustradona imagem da Figura 45.



Figura 44 – Acessório de engate rápido para tubos de ar comprimido (www.ddsequipamentos.com.br, 2017)



Figura 45 – Espigão para acoplamento de tubos de escoamento de fluidos (www.aignep.com, 2017)

Posto isto, vai ser realizada uma projeção na entrada e saída do canal de refrigeração por dois motivos:

- i) Em primeiro para ter comprimento suficiente para executar a rosca;
- ii) Em segundo lugar, para ter uma base plana para encosto dos acessórios, o que vai permitir uma melhor vedação. A Figura 46 representa canal de refrigeração com as alterações supramencionadas implementadas.

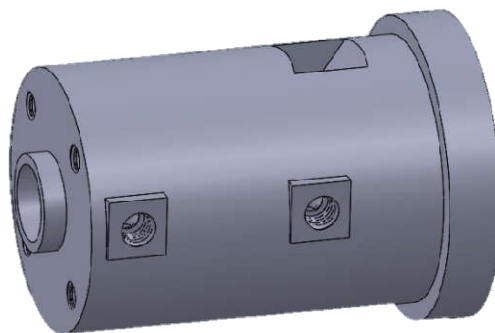


Figura 46– Introdução das bases roscadas para os conectores do circuito de refrigeração

3.2.6 Acoplamento de sistemas de alimentação

A alimentação externa de uma extrusora é realizada através de componentes que guiam o material a extrudir até ao canal de alimentação da extrusora que, por sua vez, vai levar o material até ao fuso. Estes componentes podem adotar formas, orientações e dimensões distintas dependendo da posição de trabalho, das dimensões da extrusora ou até mesmo pelo tipo de material. Posto isto, e como vem sendo hábito ao longo deste trabalho, o objetivo passa por tornar a extrusora versátil no que diz respeito ao componente de alimentação, para que possamos adaptar este componente a qualquer tipo de utilização da extrusora. Para tal, a forma encontrada de proporcionar a versatilidade pretendida, foi a projeção de uma base plana no topo da extrusora com quatro furos roscados M4 que permite a fixação de um qualquer tipo de componente, desde que o canal do mesmo coincida com o canal de alimentação da extrusora após a sua fixação. A criação desta base, representada nas Figuras 47 e 48, é facilitada pelo facto da camisa anterior ter, obrigatoriamente, de ser produzida por SLM o que providencia total liberdade nas geometrias utilizadas. É importante realçar que, tal como ilustrado na Figura 49, o diâmetro da gola de aperto da tampa da caixa do rolamento foi ligeiramente aumentado, bem como o diâmetro exterior da própria tampa, além disso foi feito um corte em ambos de modo a tornar a base criada e os parâmetros mencionados coincidentes para tornar a extrusora esteticamente mais apelativa.

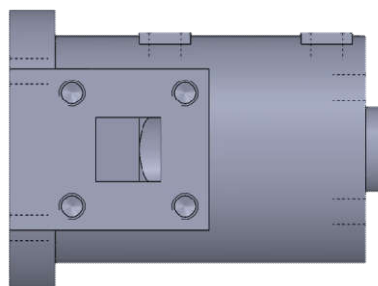


Figura 47– Base para acoplamento de sistemas de alimentação (vista 1)

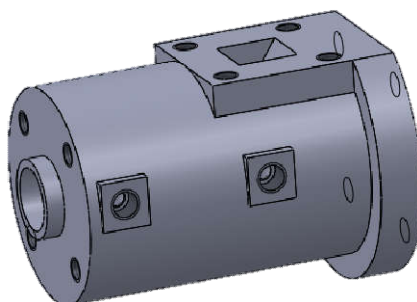


Figura 48- Base para acoplamento de sistemas de alimentação (vista 2)

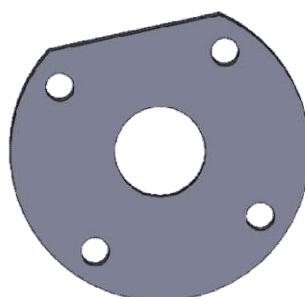


Figura 49- Tampa da caixa do rolamento adaptada às novas dimensões

Para terminar a abordagem a este tema, vai ser gerado um exemplo de uma geometria possível de ser acoplar a esta base projetada para proporcionar maior funcionalidade e versatilidade à extrusora. O exemplo consiste na geometria mais utilizada no mercado das extrusoras, que é o funil de alimentação. Na construção do exemplo, vai ser admitida a posição de trabalho horizontal e, deve ser tido em conta, que a geometria criada deve conter uma base furada perfeitamente coincidente com a base da extrusora e deve também ter uma projeção vertical de forma a não interferir com a área das cabeças dos parafusos. A configuração do conjunto funil mais extrusora está representado na Figura 50. Através deste exemplo é perceptível a versatilidade obtida com a criação desta base de aperto uma vez que, desde que a geometria criada seja perfeitamente coincidente com a base da extrusora, é possível criar qualquer tipo de componente de alimentação.

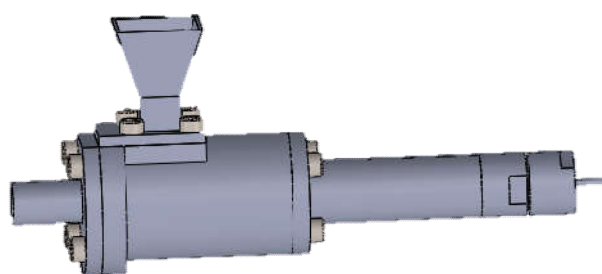


Figura 50 – Geometria sugerida do funil de alimentação

3.2.7 Fixação da extrusora

Como é sabido o funcionamento da extrusora consistem movimento rotativo do fuso sendo que os restantes elementos permanecem estáticos, pelo que se torna essencial fixar a extrusora a uma fundação externa. Ao analisar a estrutura da extrusora, é facilmente perceptível que a

fixação da mesma é mais simples e estável se for realizada na camisa anterior. O facto de este componente ser produzido por SLM, facilita bastante a conceção de elementos que permitem a fixação da extrusora. Como tal, vão ser projetados dois suportes na parte inferior deste elemento em que, cada um, terá dois furos roscados M5 de forma a aparafusar a peça exteriormente. Desta forma, a camisa anterior fica com a forma final apresentada nas Figuras 51 e 52.

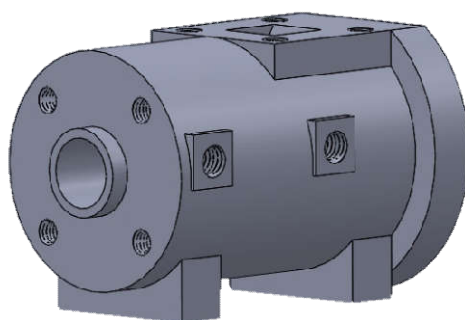


Figura 51– Bases de fixação da extrusora (vista 1)

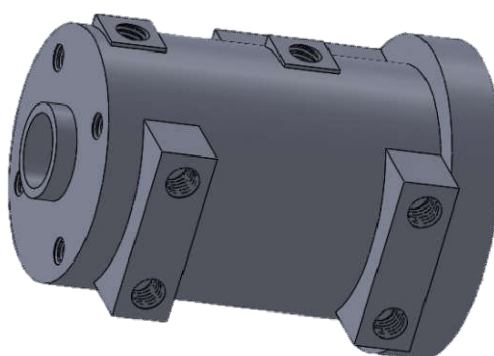


Figura 52- Bases de fixação da extrusora (vista 2)

Desta forma, é possível fixar a extrusora e o motor que vai ser acoplado ao fuso numa mesma base, o que torna a aplicação da extrusora muito versátil e simples. Para demonstrar a funcionalidade da criação destes suportes vai ser construído um exemplo de aplicação deste conceito, através da utilização da estrutura de um motor escolhido aleatoriamente. Este exemplo está representado na Figura 53. Como se pode verificar, foi criada uma chapa de fixação que está aparafusada a extrusora e um suporte para o motor que está fixo nessa mesma chapa. É de salientar que o aperto do suporte do motor pode ser ajustado axialmente, devido ao rasgo criado na chapa de fixação, de forma a obter um posicionamento preciso do motor relativamente à extrusora mediante o tipo de acoplamento que for utilizado entre ambos.

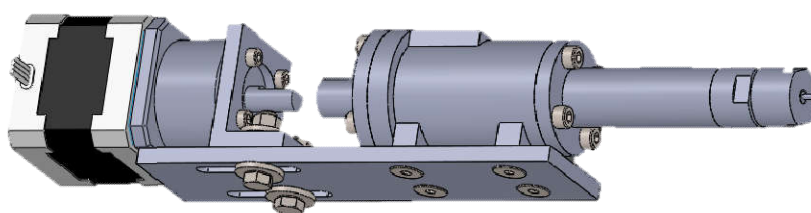


Figura 53 – Exemplo de fixação da extrusora

3.2.8 Acoplamento do fuso

Apesar de não estar definido qual o motor a ser utilizado para promover a rotação do fuso, é importante perceber quais as opções mais adequadas para concretizar o acoplamento entre ambos. Mais uma vez, um dos requisitos a ter em conta será as dimensões do acoplamento e a facilidade de montagem e desmontagem. Os parâmetros mais importantes a ter em conta na escolha do acoplamento vão ser o alinhamento entre eixos, o binário admitido e a absorção de eventuais picos de binário. Com base nestes requisitos, a solução mais indicada será o tipo de acoplamento helicoidal ilustrado na Figura 54.



Figura 54 – Elementos de acoplamento helicoidais (www.sdp-si.com, 2017)

Dentro do acoplamento helicoidal, salienta-se o acoplamento tipo Toolflex, ilustrado na Figura 55, pois é aquele que tem uma gama superior no que às dimensões diz respeito e, também, promove uma relação carga suportada/dimensão bastante boa. Este tipo de acoplamento oferece ainda as seguintes vantagens adicionais:

- Não apresenta folga rotacional;
- Dimensões reduzidas e baixo momento de inércia;
- Correção do desalinhamento radial e axial entre os eixos;
- Elevada rigidez torsional e flexibilidade angular, o que lhe permite absorver eventuais picos de binário;
- Indicado para torque médio ou alto;
- Não requer manutenção e é de fácil inspeção;
- Alta resistência à corrosão e a temperaturas até 200°C.



Figura 55 – Acoplamento helicoidal Toolflex (www.imporseal.pt/213/toolflex-tipo-fole/, 2017)

Relativamente à fixação aos eixos, este tipo de acoplamento possibilita fazê-lo de três formas distintas que são as seguintes:

- Aperto transversal de pernos contra os eixos;
- Aperto periférico ao eixo, tipo abraçadeira;

- Chaveta mecânica combinada com pernos de aperto ao eixo.

Das três formas de fixação, a mais indicada será através de chaveta mecânica pois representa uma fixação angular mais firme e tem maior eficácia na transmissão de potência. De modo a utilizar esta forma de aperto é necessário criar um rasgo no fuso, segundo a norma DIN 6885, para a conexão através da chaveta. Ao consultar esta norma, que se encontra em anexo, para o diâmetro de 12mm do fuso conclui-se que o tamanho do rasgo será de 4x4mm ao qual corresponde uma profundidade do rasgo no fuso de 2,5mm e a profundidade correspondente no acoplamento de 1,8mm. Desta forma, o rasgo no fuso deverá ter a configuração representada na Figura 56.

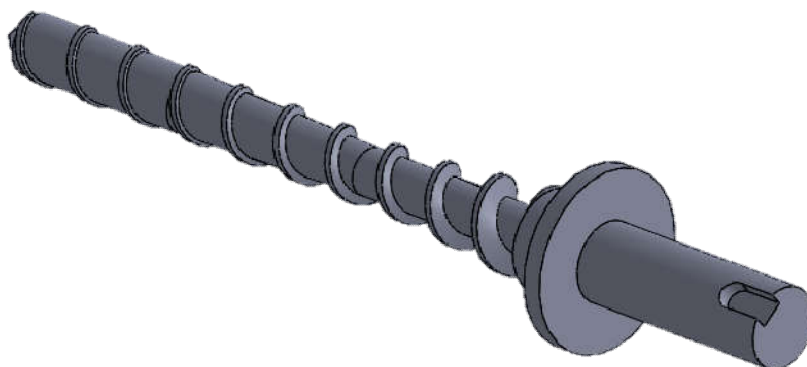


Figura 56 – Rasgo do veio do fuso para chaveta mecânica

3.2.9 Aquecimento do material a extrudir

Como foi mencionado anteriormente, o aquecimento do material vai ser realizado de duas formas distintas: através da fricção do material nas paredes da extrusora, quando começa a ser comprimido e, numa segunda fase, por aquecimento externo do mesmo. A área de aquecimento do material envolve as zonas de compressão e dosagem. O aquecimento externo pode ser realizado de duas formas, através de uma resistência elétrica ou através de aquecimento por indução. O aquecimento por indução é, claramente, uma melhor escolha pois caracteriza-se por uma elevada produtividade e rendimento uma vez que o aquecimento por indução se dá instantaneamente eliminando tempos de aquecimento e as perdas que lhe estão associadas. Todavia, é possível a utilização de qualquer um dos métodos de aquecimento, sendo que é necessário ter alguns cuidados com a geometria do equipamento de forma a maximizar o rendimento do mesmo. O aquecimento do material deve ser realizado de uma forma uniforme ao longo da extrusora e, para tal, a geometria do elemento de aquecimento deve ter um formato em espiral ao longo da extrusora de forma a promover um aquecimento distribuído e uniforme. A potência da resistência é definida pelo diâmetro e pelo comprimento da mesma pelo que, com o formato em espiral, é possível utilizar uma resistência de qualquer potência, fixando o seu diâmetro interior igual ao diâmetro exterior da extrusora na zona em que vai ser aplicado (18mm). A Figura 57 representa a geometria do elemento de aquecimento.

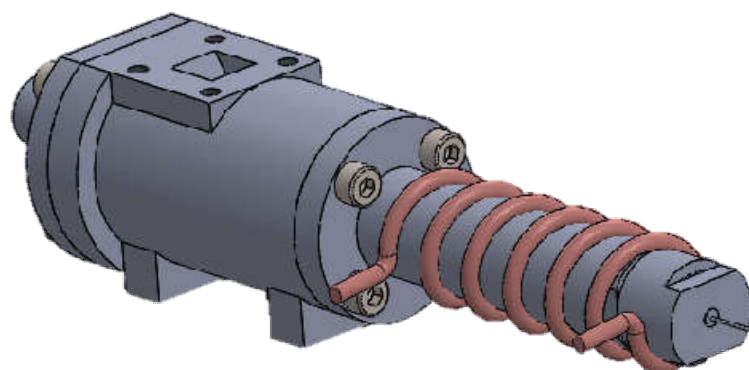


Figura 57 – Posicionamento do elemento de aquecimento na extrusora

3.3 Escolha de materiais para cada elemento

Ao longo deste subcapítulo vai ser abordado cada elemento constituinte da extrusora no que diz respeito aos materiais utilizados para fabricar os mesmos. Para tal, vão ser consideradas as condições de serviço, os esforços envolvidos e a precisão dimensional de cada componente.

➤ Fuso

O fuso consiste no elemento da extrusora sujeito a maiores esforços ao longo do processo de extrusão, nomeadamente esforços de torção e de pressão gerada na extrusão. Como tal, destaca-se desde logo o facto de que o material selecionado deverá ter uma elevada resistência mecânica. Para além disto, é essencial conferir um excelente acabamento superficial a este elemento para diminuir o desgaste causado pelo contacto do material a extrudir e, simultaneamente, para promover ao máximo o transporte desse mesmo material uma vez que quanto melhor for o acabamento superficial do fuso, menor será o atrito gerado pelo contacto entre o mesmo e o material a ser extrudido.

Com base nestes requisitos, uma solução muito viável seria a utilização de um aço ligado com um tratamento de nitruração posterior à maquinação. A nitruração é um tratamento de endurecimento superficial aplicado aos aços que proporciona maior durabilidade a componentes sujeitos a atrito ou desgaste. Comparativamente com os tratamentos de têmpera, a nitruração realiza-se a temperaturas mais baixas o que implica menor ou nenhuma variação dimensional (www.ramada.pt).

➤ Camisa anterior

Na escolha do material para este elemento deve ser tido em conta o facto de que vai circular líquido refrigerante no seu interior o que requer um material com boa resistência à corrosão e ainda vai ser o suporte de acoplamento do fuso o que implica uma boa resistência mecânica. Com base nestes requisitos existem alguns materiais que se adequam mas é necessário aliar o custo de fabrico aos requisitos de projeto e, como tal, um material muito viável a ser utilizado no fabrico da camisa anterior seria o aço inoxidável, de preferência austenítico com visto a potenciar a resistência à corrosão.

➤ **Camisa posterior**

A camisa posterior apresenta como principal requisito a resistência mecânica uma vez que vai estar sujeita a pressões geradas no processo de extrusão. Um aço ligado com boa resistência mecânica é uma boa opção.

➤ **Tampa da caixa do rolamento**

Como o nome indica, este elemento tem como função fixar o rolamento de acoplamento do fuso, de forma axial. A escolha do material para este elemento segue o mesmo raciocínio do realizado na camisa posterior, portanto, um aço ligado com boa resistência mecânica seria uma boa opção.

➤ **Doseador**

As condições de serviço deste elemento são muito semelhantes às da camisa posterior, ou seja, vai estar sujeito a pressões geradas no processo de extrusão. Mais uma vez, um aço ligado com boa resistência mecânica é uma opção muito viável.

➤ **Aperto da agulha de modelação**

Como o próprio nome indica, este elemento tem como função fixar a agulha modeladora no final da extrusora pelo que não vai estar sujeito a esforços significativos. Como tal, um aço ao carbono comum pode ser utilizado.

3.4 Análise do processo

Uma vez terminado o desenvolvimento da extrusora, é possível determinar os parâmetros de escoamento com base nas características geométricas do fuso da extrusora, nomeadamente a pressão e no caudal obtidos no processo de extrusão. Como o fuso possui dimensões geométricas variáveis ao longo do seu comprimento, os cálculos vão ser realizados com base nas dimensões da zona de dosagem do fuso pois é a zona em que o canal do fuso tem menores dimensões, o que implica que seja a zona em que o caudal seja menor. É importante salientar que essas mesmas características variam consoante o material a ser extrudido e com a velocidade angular do fuso pelo que vão ser analisados dois materiais diferentes a velocidades angulares diferentes. Os materiais selecionados para esta análise são o polipropileno (PP) e o ácido polilático (PLA) para velocidades angulares de 20, 60 e 100 rpm.

A determinação do caudal de saída e da pressão inerente ao processo de extrusão é realizado através do gráfico da Figura 58.

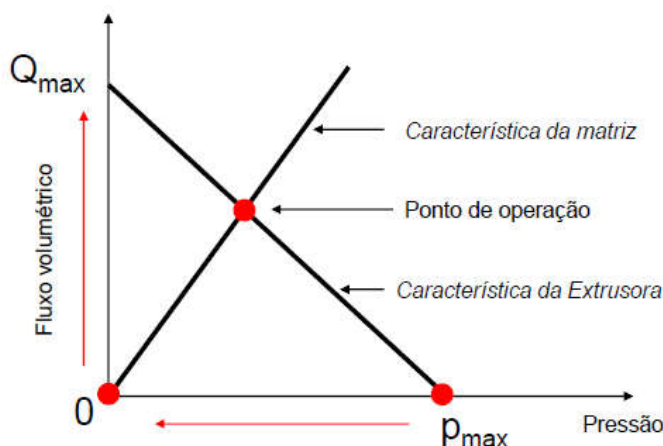


Figura 58—Gráfico caudal/pressão de uma extrusora (www.edisciplinas.usp.br, 2017)

A pressão e o caudal de saída são obtidos pela determinação das coordenadas do ponto de operação representado no gráfico. Este ponto é obtido pela interseção de duas retas que traduzem o escoamento na extrusora (característica da extrusora) e da matriz (característica da matriz). De uma forma simplificada, a característica da extrusora é obtida pelo cálculo do valor máximo do caudal e da pressão ao passo que a característica da matriz é definida pelo fator de forma da matriz. Posto isto, vai ser demonstrado de seguida os passos para obter os valores mencionados.

Numa primeira fase vai ser analisada a característica da extrusora. O valor do caudal máximo corresponde a um cenário em que a oposição ao escoamento do material no interior da extrusora seria zero, ou seja, a pressão seria nula. Por outro lado, o valor máximo da pressão implica um caudal de saída nulo, ou seja, o material ficaria retido dentro da extrusora. Estes dois valores consistem nos extremos opostos do escoamento e podem ser obtidos pelas expressões (1) e (2) (USP, 2017).

$$\circ P_{\text{máx.}} = 6 \times \pi \times D \times N \times H^{-2} \times L \times \eta \times \cot \varphi \quad (1)$$

Em que:

- $P_{\text{máx.}}$ – Pressão máxima (Pa)
- D – Diâmetro do fuso (mm)
- N – Velocidade angular do fuso (rot/s)
- H – Profundidade do canal (mm)
- L – Comprimento do fuso (mm)
- η – Viscosidade do fluido (Pa.s)
- φ – Ângulo da hélice do fuso

$$\circ Q_{\text{máx.}} = 0,5 \times \pi^2 \times D^2 \times N \times H \times \sin \varphi \times \cos \varphi \quad (2)$$

Em que:

- $Q_{\text{máx.}}$ – Caudal máximo no fuso (mm^3/s)

- D – Diâmetro do fuso (mm)
- N– Velocidade angular do fuso (rot/s)
- H– Profundidade do canal (mm)
- φ – Ângulo da hélice do fuso

Calculando estes dois valores é possível traçar a reta que constitui a característica da extrusora. Falta agora definir a reta da característica da matriz. Esta reta é definida pelo fator de forma da matriz, que constitui o declive da reta e pode ser calculado pela seguinte expressão(3) (USP, 2017):

$$\circ K_s = \pi \times D_m^4 \times (128 \times \eta \times L_m)^{-1} \quad (3)$$

Em que:

- K_s – fator de forma ($mm^3/Pa.s$)
- D_m – Diâmetro da abertura da matriz (mm)
- η – Viscosidade do fluido (Pa.s)
- L_m – Comprimento da abertura da matriz (mm)

Com o cálculo destes valores é possível determinar a pressão e caudal resultantes do funcionamento da extrusora. É de salientar que alguns dos valores utilizados nos cálculos apresentados não são diretos pelo que vai ser apresentado, de seguida, a forma de os obter. Em primeiro lugar, vai ser demonstrado como é obtido o valor da viscosidade de um fluido. Como estamos perante fluidos não-newtonianos, a viscosidade dos mesmos não é constante, sendo influenciada pelo gradiente de velocidade. O gradiente de velocidade é calculado pela equação (4) (USP, 2017):

$$\circ \gamma = \frac{\pi \times D \times N}{H} \quad (4)$$

Em que:

- γ – Gradiente de velocidade (1/s)
- D – Diâmetro do fuso (mm)
- N – Velocidade angular do fuso (rot/s)
- H – Profundidade do canal (mm)

Depois de calculado o valor do gradiente de velocidade, retira-se o valor da viscosidade de material através de um gráfico que relaciona o gradiente de velocidade com a viscosidade dinâmica do fluido.

Outro valor que é necessário calcular é o ângulo da hélice do fuso que pode ser obtido através de uma expressão de cálculo do passo da hélice como é demonstrado pela expressão (5)(USP, 2017):

$$\circ p = \pi \times D \times \tan \varphi \Leftrightarrow \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{p}{\pi \times D} \right) \quad (5)$$

Em que:

- p – Passo da hélice (mm)
- D – Diâmetro do fuso (mm)

- φ – Ângulo da hélice do fuso

Posto isto, estão reunidas as condições para proceder à análise do escoamento da extrusora para cada material mencionado anteriormente.

➤ **Polipropileno**

Ângulo da hélice:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{p}{\pi \times D} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{10}{\pi \times 10} \right) = 17,66^\circ$$

Gradiente de velocidade:

$$\gamma = \frac{\pi \times D \times N}{H} = \frac{\pi \times 10 \times N}{0,5}$$

Velocidade angular (rot/s)	Gradiente de velocidade (1/s)
20	20,944
60	62,832
100	104,72

Tabela 2 – Valores do gradiente de velocidade para 20, 60 e 100 rpm

Viscosidade dinâmica:

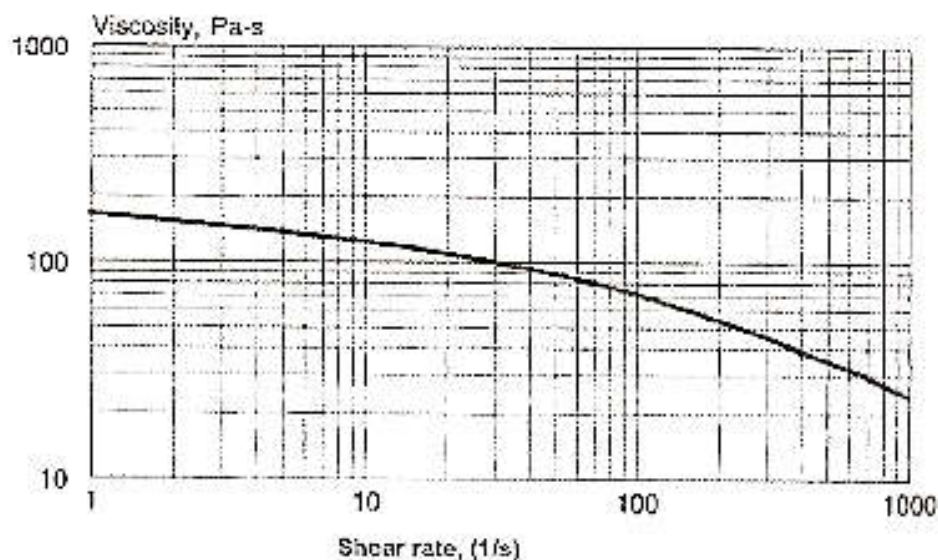


Figura 59 – Gráfico gradiente de velocidade/viscosidade dinâmica do 12 MFI PP (John R. Wagner, Jr, et al 2013)

Velocidade angular (rot/s)	Gradiente de velocidade (1/s)	Viscosidade (Pa.s)
20	20,944	110
60	62,832	90
100	104,72	80

Tabela 3 - Valor da viscosidade do PP para 20, 60 e 100 rpm

$$P_{m\acute{a}x.} = 6 \times \pi \times D \times N \times H^{-2} \times L \times \eta \times \cot \varphi = 6 \times \pi \times 10 \times N \times 0,5^{-2} \times 100 \times \eta \times \cot 17,66^\circ$$

Velocidade angular (rot/s)	Gradiente de velocidade (1/s)	Viscosidade (Pa.s)	Pressão máxima (MPa)
20	20,944	110	8,68
60	62,832	90	21,3
100	104,72	80	31,58

Tabela 4 – Valor da pressão máxima para extrusão de PP a 20, 60 e 100 rpm

$$Q_{m\acute{a}x.} = 0,5 \times \pi^2 \times D^2 \times N \times H \times \sin \varphi \times \cos \varphi = 0,5 \times \pi^2 \times 10^2 \times N \times 0,5 \times \sin 17,66^\circ \times \cos 17,66^\circ$$

Velocidade angular (rot/s)	Caudal máximo (mm ³ /s)
20	23,775
60	71,325
100	118,876

Tabela 5 - Valor do caudal máximo de saída na extrusão de PP a 20, 60 e 100 rpm

$$K_s = \pi \times D_m^4 \times (128 \times \eta \times L_m)^{-1} = \pi \times 1^4 \times (128 \times \eta \times 22)^{-1}$$

Velocidade angular (rot/s)	Viscosidade (Pa.s)	Fator de forma (mm ³ /MPa.s)
20	110	10,142
60	90	12,396
100	80	13,945

Tabela 6 – Valor do fator de forma do PP a 20, 60 e 100 rpm

Uma vez calculados todos os valores, é necessário construir um gráfico para cada valor de velocidade angular. Como se trata de um processo algo repetitivo, vai ser feita a apresentação do cálculo integral dos valores para a velocidade angular de 20 rpm apresentando apenas os valores finais para as restantes velocidades. Na figura 60 está representado o gráfico que ilustra as retas da característica da extrusora e da característica da matriz para 20 rpm.

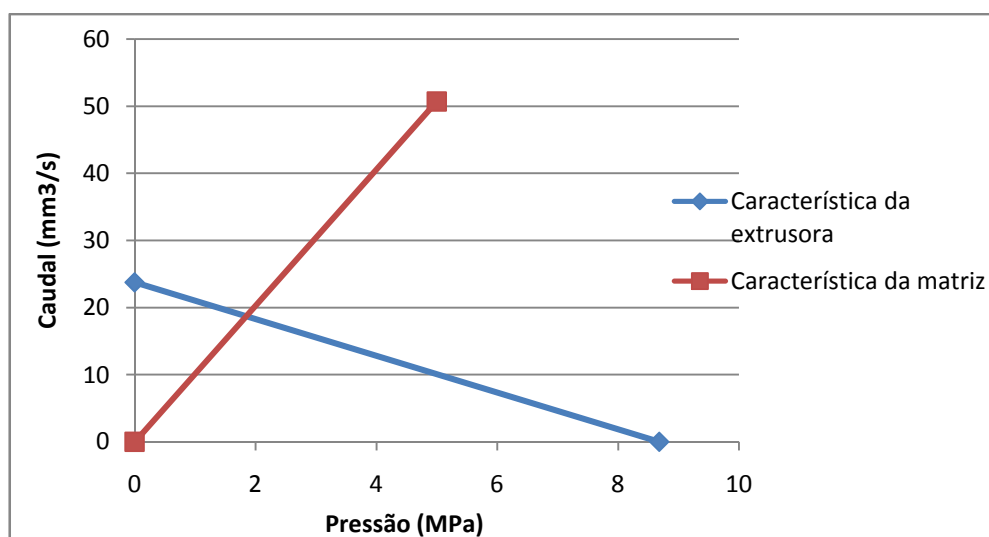


Figura 60 – Gráfico da característica da extrusora e da característica da matriz para PP extrudido a 20 rpm

As coordenadas do ponto de operação são obtidas ao igualar a equação característica das duas retas presentes no gráfico. No caso da reta da característica da extrusora são conhecidos dois pontos da mesma o permite obter a equação da reta da seguinte forma:

$$y=m \times x+b \Leftrightarrow 0=m \times 8,68+23,775 \Leftrightarrow m=-\frac{23,775}{8,68}=-2,74$$

Igualando a equação da reta a zero obtém-se a seguinte equação:

$$y+2,74 \times x-23,775=0$$

Quanto à reta da característica da matriz já é conhecido o declive da mesma pelo que a sua equação é a seguinte:

$$y=10,142 \times x$$

Igualando a equação da reta a zero fica:

$$y-10,142 \times x=0$$

Igualando as duas equações:

$$y+2,74 \times x-23,775=y-10,142 \times x$$

Resolvendo esta igualdade, os valores da pressão e do caudal são os seguintes:

- P=1,85 MPa
- Q=18,7 mm³/s

Para encontrar os valores da pressão e do caudal para as velocidades de 60 e 100 rpm deve repetir-se todo este processo pelo que vão ser apresentados os gráficos e os valores finais para efeitos de comparação entre eles. Os gráficos mencionados estão ilustrados nas Figuras 61 e 62.

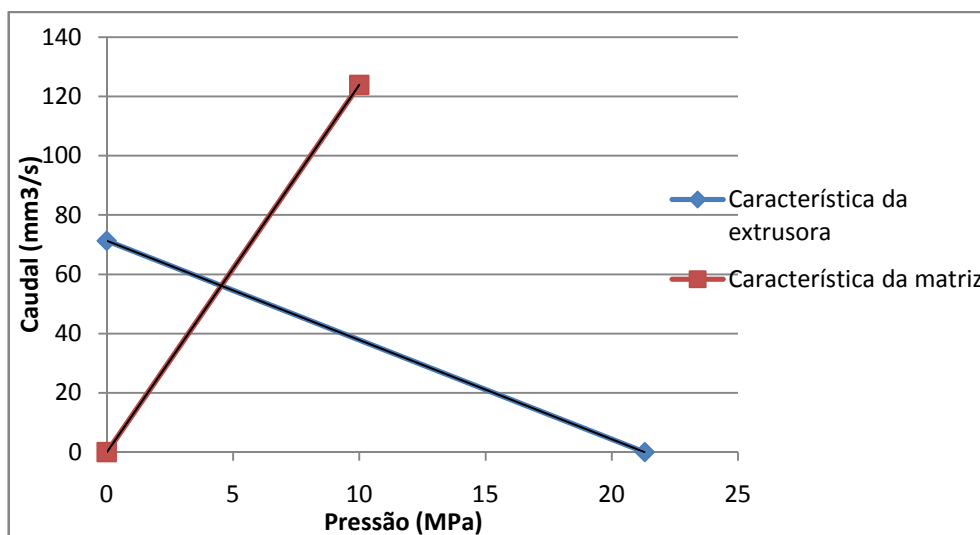


Figura 61 – Gráfico da característica da extrusora e da característica da matriz para PP extrudido a 60 rpm

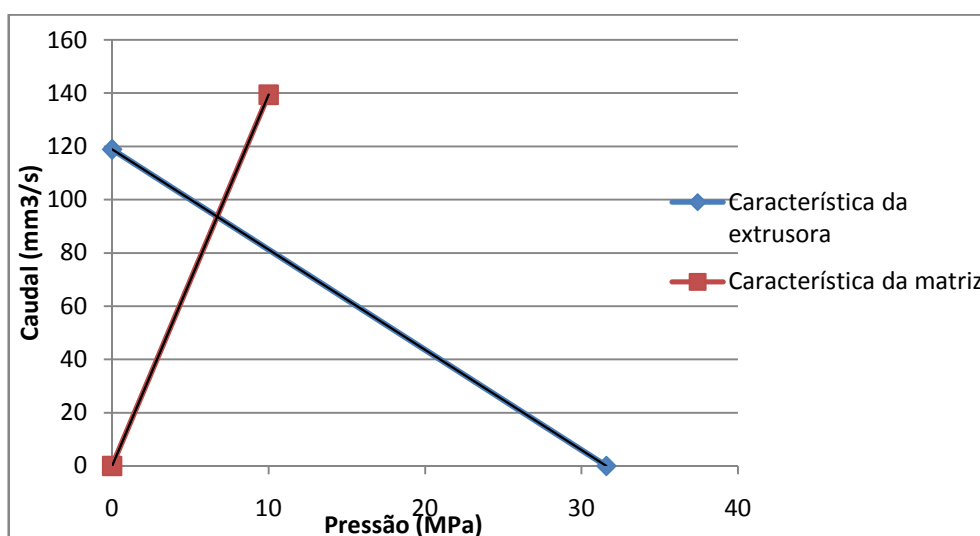


Figura 62 – Gráfico da característica da extrusora e da característica da matriz para PP extrudido a 100 rpm

Após realizar os cálculos para encontrar os valores da pressão e do caudal para as velocidades angulares de 60 e 100 rpm, os valores finais referentes ao PP são os apresentados na Tabela 7.

	20 rpm	60 rpm	100 rpm
Pressão (MPa)	1,85	4,53	6,71
Caudal (mm ³ /s)	18,7	56,15	93,57

Tabela 7 – Valores do ponto de operação referentes à extrusão de PP

Numa primeira análise, facilmente se verifica que tanto a pressão como o caudal são proporcionais à velocidade angular do fuso. De seguida vai ser repetido todo este processo de cálculo mas para a extrusão de ácido polilático.

➤ **Ácido Polilático**

A forma de obter os valores referentes à extrusão do PLA é em tudo igual à apresentada para o PP pelo que os valores vão ser apresentados de forma mais direta e resumida. No que diz respeito ao gradiente de velocidade, os valores vão ser os mesmos que na análise do PP visto que as velocidades angulares vão ser as mesmas. Como tal, é possível retirar os valores correspondentes da viscosidade com base na imagem da Figura 63.

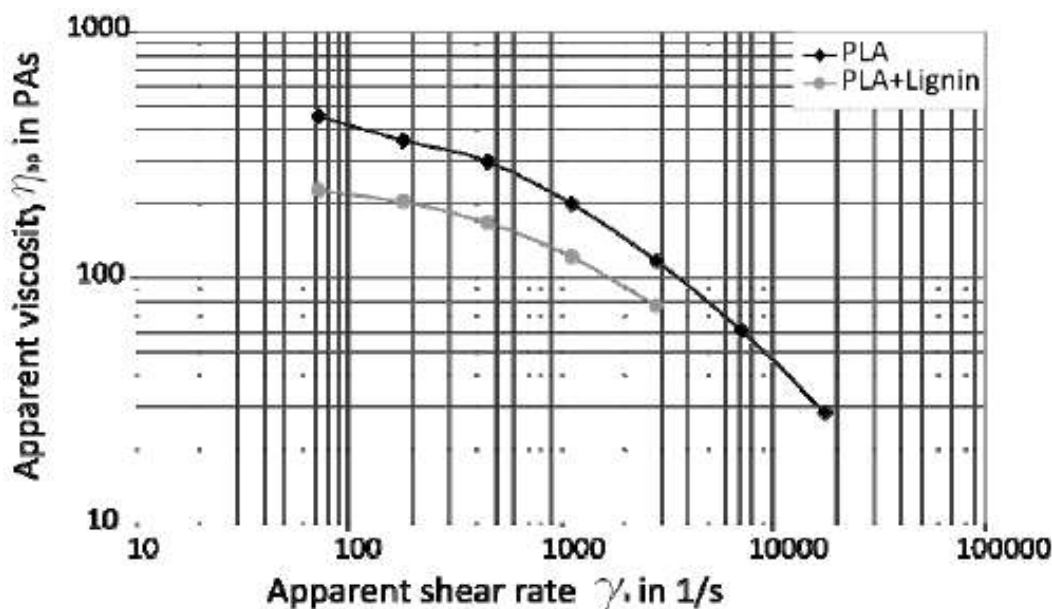


Figura 63–Gráfico Viscosidade/Gradiente de velocidade do PLA (www.researchgate.net, 2017)

Velocidade angular (rot/s)	Gradiente de velocidade (1/s)	Viscosidade (Pa.s)
20	20,944	800
60	62,832	650
100	104,72	500

Tabela 8 – Valor da viscosidade do PLA a 20, 60 e 100 rpm

$$\circ P_{\text{máx.}} = 6 \times \pi \times D \times N \times H^{-2} \times L \times \eta \times \cot \varphi = 6 \times \pi \times 10 \times N \times 0,5^{-2} \times 100 \times \eta \times \cot 17,66^\circ$$

Velocidade angular (rot/s)	Gradiente de velocidade (1/s)	Viscosidade (Pa.s)	Pressão máxima (MPa)
20	20,944	800	63,15
60	62,832	650	153,9
100	104,72	80	197,35

Tabela 9 Valor da pressão máxima para extrusão de PLA a 20, 60 e 100 rpm

$$\circ Q_{\text{máx.}} = 0,5 \times \pi^2 \times D^2 \times N \times H \times \sin \varphi \times \cos \varphi = 0,5 \times \pi^2 \times 10^2 \times N \times 0,5 \times \sin 17,66^\circ \times \cos 17,66^\circ$$

Velocidade angular (rot/s)	Caudal máximo (mm ³ /s)
20	23,775
60	71,325
100	118,876

Tabela 10 - Valor do caudal máximo de saída na extrusão de PLA a 20, 60 e 100 rpm

$$K_s = \pi \times D_m^4 \times (128 \times \eta \times L_m)^{-1} = \pi \times 1^4 \times (128 \times \eta \times 22)^{-1}$$

Velocidade angular (rot/s)	Viscosidade(Pa.s)	Fator de forma (mm ³ /MPa.s)
20	110	1,39
60	90	1,72
100	80	2,23

Tabela 11 – Valor do fator de forma do PLA a 20, 60 e 100 rpm

Como o processo de cálculo é em tudo idêntico ao realizado no PP, vão ser apresentados os três gráficos que demonstram a característica da extrusora e a característica da matriz e os resultados finais do cálculo da pressão e caudal referente a cada velocidade angular. Os gráficos estão ilustrados nas Figuras 64, 65 e 66 para 20, 60 e 100 rpm, respetivamente.

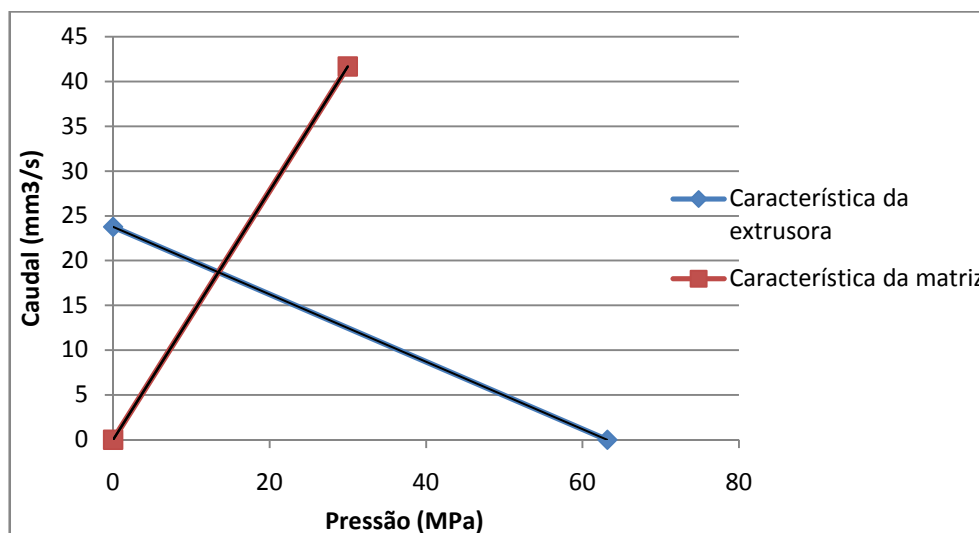


Figura 64 – Gráfico da característica da extrusora e da característica da matriz para PLA extrudido a 20 rpm

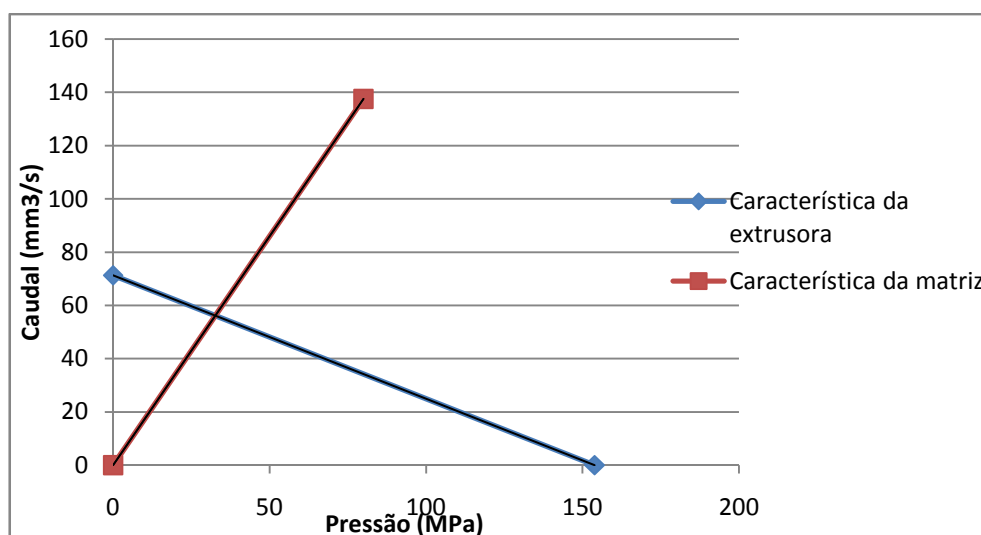


Figura 65 – Gráfico da característica da extrusora e da característica da matriz para PLA extrudido a 60 rpm

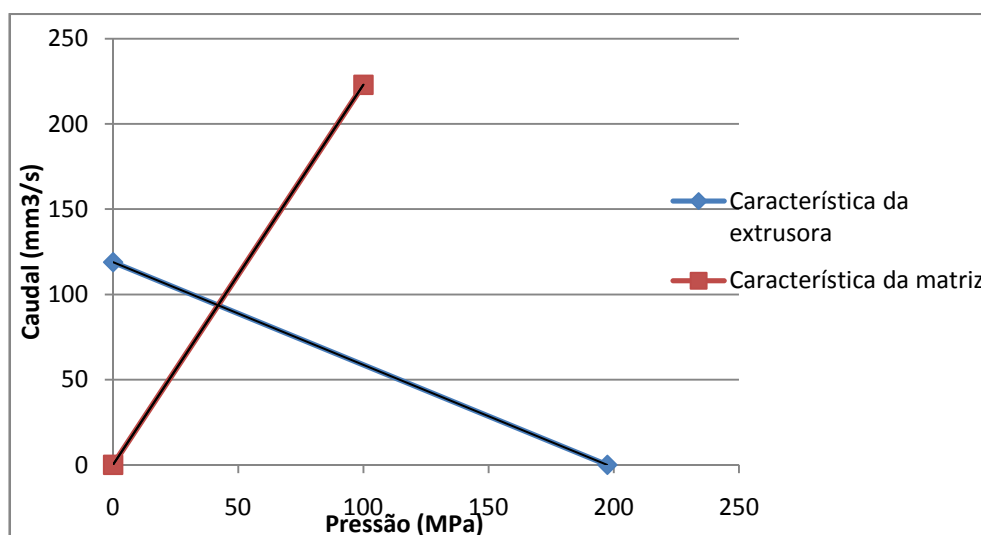


Figura 66 – Gráfico da característica da extrusora e da característica da matriz para PLA extrudido a 100 rpm

Os resultados finais da pressão e do caudal referentes à extrusão de PLA estão representados na Tabela 12.

	20 rpm	60 rpm	100 rpm
Pressão (MPa)	13,46	32,67	42
Caudal (mm³/s)	18,7	56,19	93,66

Tabela 12 – Valores do ponto de operação referentes à extrusão de PLA

Terminado o cálculo das pressões e caudais referentes à extrusão de PP e de PLA a 20, 60 e 100 rpm, conclui-se que tanto a pressão como o caudal são diretamente proporcionais à viscosidade do material a ser extrudido bem como à velocidade angular do fuso. É importante realçar que é conveniente calcular os valores referentes a outros materiais antes de os extrudir, em especial para velocidades angulares e/ou viscosidades superiores às que foram analisadas neste capítulo.

3.5 Análise de esforços

Com o propósito de garantir a viabilidade mecânica da extrusora, foi analisada a influência dos esforços gerados no processo de extrusão nos componentes que estão sujeitos a esses mesmos esforços. Esta análise foi realizada com recurso ao Método dos Elementos Finitos (MEF), sendo utilizado para tal o software comercial SolidWorks®.

De uma forma geral, o MEF subdivide o modelo em estudo em pequenas partes, designados elementos, unidas entre si por nós. O conjunto de elementos unidos pelos nós constitui uma malha cujas características ditam a precisão dos resultados obtidos. Definidas as características da malha, o software vai calcular a deformação em cada nó, convertendo de seguida este valor de deformação em tensão através da lei de Hooke. A análise computacional de um modelo através do MEF permite subdividir uma análise complexa numa série de pequenas análises o que aumenta a eficácia computacional na geração de resultados bem como na sua precisão.

No caso da extrusora desenvolvida ao longo deste trabalho, o elemento onde é crucial realizar este tipo de análise é o fuso, em virtude de ser o componente sujeito a maiores esforços no processo de extrusão.

Numa fase inicial da análise é essencial definir o material utilizado no fabrico do fuso. Como já foi referido anteriormente, um aço nitrurado é um material muito viável para fabricar o fuso pelo que a análise recorrendo ao MEF vai ser realizada com esse material. O aço nitrurado selecionado tem as características mecânicas e físicas resumidas na Figura 67 que ilustra a interface de seleção do material do SolidWorks®.

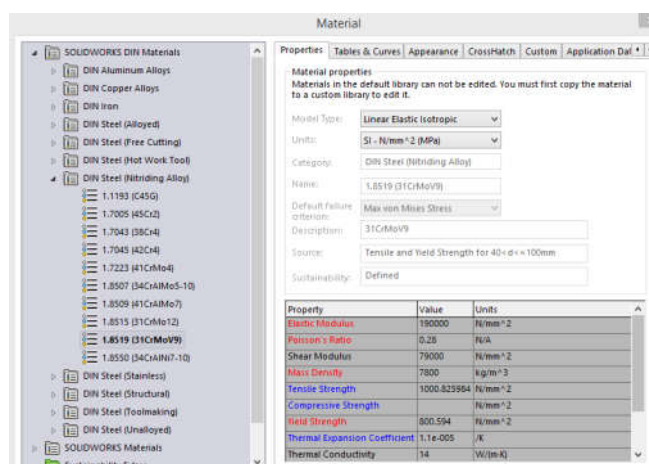


Figura 67 – Características do aço nitrurado 1.8519 do catálogo de materiais do SolidWorks®

Uma vez definido o material, o próximo passo será aplicar as condições de fronteira no fuso. A fixação radial do fuso vai ser realizada pelo rolamento axial de esferas e a fixação axial está aplicada na geometria de encosto do rolamento, conforme ilustra a Figura 68.

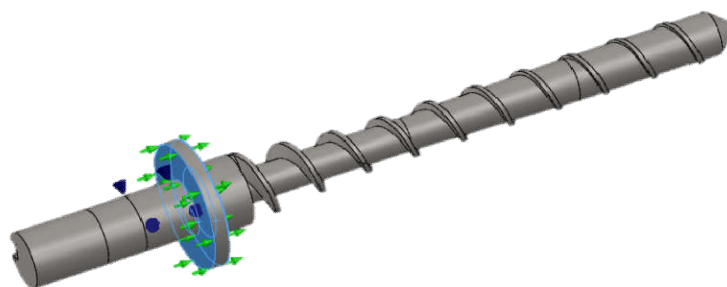


Figura 68 – Fixações e restrições aplicadas ao fuso (estudo 1)

Definidas as fixações, é necessário aplicar as cargas no fuso. A primeira carga a ser aplicada é o binário transmitido pelo motor. Como não é conhecido o valor do binário necessário para extrudir o material, vai ser calculado o valor admissível pelo fuso que constitui o binário máximo que pode ser transmitido pelo motor. A tensão gerada pelo binário aplicado numa secção circular maciça é definida pela expressão:

$$\bullet \quad \tau = \frac{T \times r}{J} \quad (6)$$

Onde:

- τ – Tensão de corte
- T – Binário aplicado
- r – Distância ao centro da secção transversal o torque aplicado
- J – Momento polar de inércia

Uma vez que o valor que pretendemos é o binário admissível pelo fuso sem a ocorrência da rotura do mesmo, será considerada a expressão (7) para cálculo do binário admissível.

$$\circ \quad T_{Adm} = \frac{\tau_{Adm} \times J}{r} \quad (7)$$

Em que:

- T_{Adm} – Binário admissível
- τ_{Adm} – Tensão admissível

O valor do momento polar de inércia para uma secção circular é dado por:

$$\circ \quad J = \frac{\pi \times r^4}{2} \quad (8)$$

Como a zona mais frágil do fuso é a zona de alimentação, todos os cálculos vão ser realizados com referência à secção transversal desta zona que tem um diâmetro maciço de 7mm. Sendo a hélice do fuso desprezada neste cálculo, o momento polar de inércia vai ter o seguinte valor:

$$\circ \quad J = \frac{\pi \times 3,5^4}{2} = 235,7 \text{ mm}^4$$

Considerando que a tensão de corte máxima ocorre no ponto mais afastado da linha neutra, conforme ilustra a Figura 69, pode concluir-se que a tensão de corte máxima deste material ronda os 800 MPa. Com o intuito de garantir que o fuso suporta qualquer tipo de esforço resultante do processo de extrusão sem qualquer deformação plástica, vai ser utilizado um

coeficiente de segurança igual a 2. Dividindo a tensão de corte máxima do material pelo coeficiente de segurança, obtêm-se a tensão de corte admissível que assume o valor aproximado de 400 MPa. Assim, falta definir o valor da distância ao centro da secção transversal que define o valor da tensão de corte em cada ponto desta mesma secção.

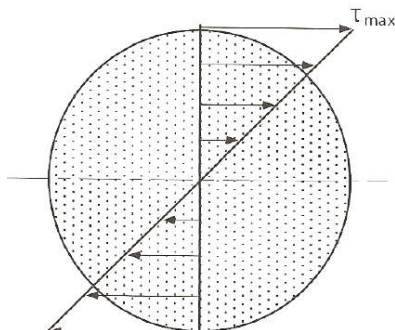


Figura 69– Perfil de tensões de corte na secção transversal redonda maciça (Chris Rauwendaal, 2014)

Posto isto, r vai ter o valor de 3,5mm que é o raio da secção transversal, ou seja, o ponto mais afastado da linha neutra ao qual corresponde a tensão de corte máxima. Neste momento, estão reunidas as condições para executar o cálculo do binário admissível a ser aplicado no veio que tem o valor seguinte:

$$\circ T_{Adm} = \frac{400,297 \times 235,7}{3,5} = 26957 \text{ N.mm} = 26,957 \text{ N.m}$$

O valor do binário calculado vai ser aplicado na zona de acoplamento do motor no fuso, faltando aplicar a pressão gerada no processo de extrusão. A pressão, de valor igual a 42 MPa, vai ser aplicada desde o início da zona de dosagem do fuso até ao ponto de entrada do material na matriz, como mostrado na Figura 70. Como a zona do fuso responsável pelo avanço do material ao longo da extrusora é a face ativa da hélice, a pressão vai ser aplicada nesta zona na direção normal à mesma. Além desta zona, a geometria cónica no final do fuso também vai estar sujeita a esta pressão na direção axial ao fuso.



Figura 70 – Cargas e fixações aplicadas ao fuso (estudo 1)

Aplicado o conjunto de condições fronteira ao fuso, as cargas e restrições de movimento, é necessário definir a malha que permita obter resultados fiáveis ao um razoável custo computacional. Numa primeira fase, é essencial definir qual o tipo de malha mais indicada à geometria do fuso. Como o fuso é maioritariamente constituído por superfícies curvas, o tipo de malha mais apropriado é a “Curvature-based mesh”. De forma a encontrar o compromisso entre a precisão dos resultados e o custo computacional, é necessário fazer o estudo de convergência de malha. Esta análise consiste em comparar as tensões máximas obtidas para

uma determinada gama de tamanhos de elementos considerada. A tabela 2 resume as tensões máximas referentes a uma gama de tamanhos de elementos que vai de 1 a 10 mm com intervalos de 0,5 mm.

Tamanho dos elementos (mm)	Tensão máxima (MPa)	Tamanho dos elementos (mm)	Tensão máxima (MPa)
10	220,7	5	221,2
9,5	217,8	4,5	226,6
9	223,4	4	215,4
8,5	211,8	3,5	292,3
8	213,6	3	216,4
7,5	225,9	2,5	258,4
7	248,1	2	237,6
6,5	216,3	1,5	333,8
6	211,4	1	302,8
5,5	215,8		

Tabela 13 – Valores da tensão máxima para cada tamanho de elemento (estudo 1)

Obtidos os valores da tensão máxima para cada tamanho de elemento, é necessário construir um gráfico com base nestes mesmos valores, em que a curva resultante representa a convergência de malha como se pode verificar no gráfico representado na Figura 71.

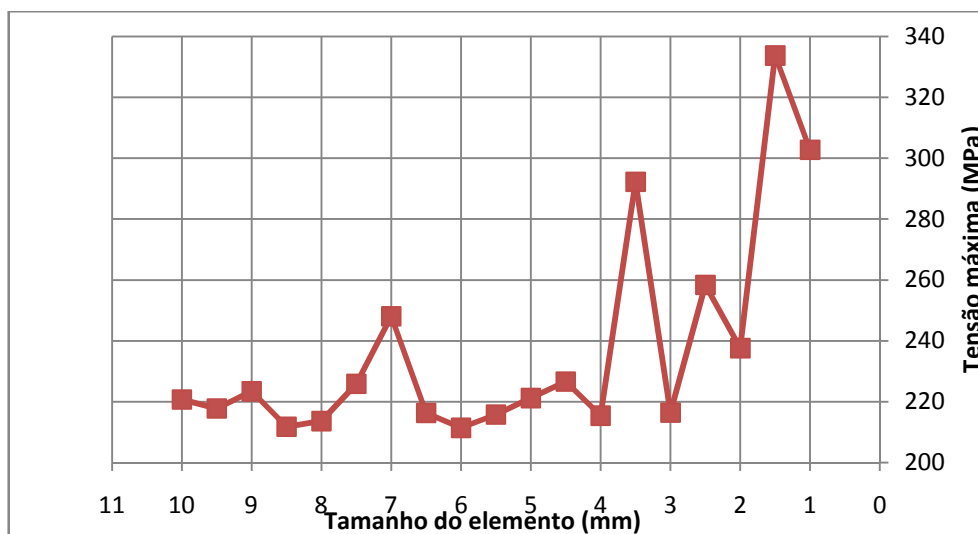


Figura 71 – Gráfico de convergência de malha inicial (estudo 1)

Ao analisar a Figura 65 é possível, desde logo, concluir que, para elementos inferiores a 3 mm, os valores de tensão correspondentes divergem de todos os outros resultados, pelo que podem ser excluídos. Quanto aos restantes valores, verifica-se que a maioria apresenta tensões máximas entre 210 e 220 MPa. Para refinar esta análise, optou-se por otimizar o gráfico da Figura 65 através da eliminação dos valores do tamanho do elemento abaixo dos 3 mm sendo o resultado o mostrado na Figura 72.

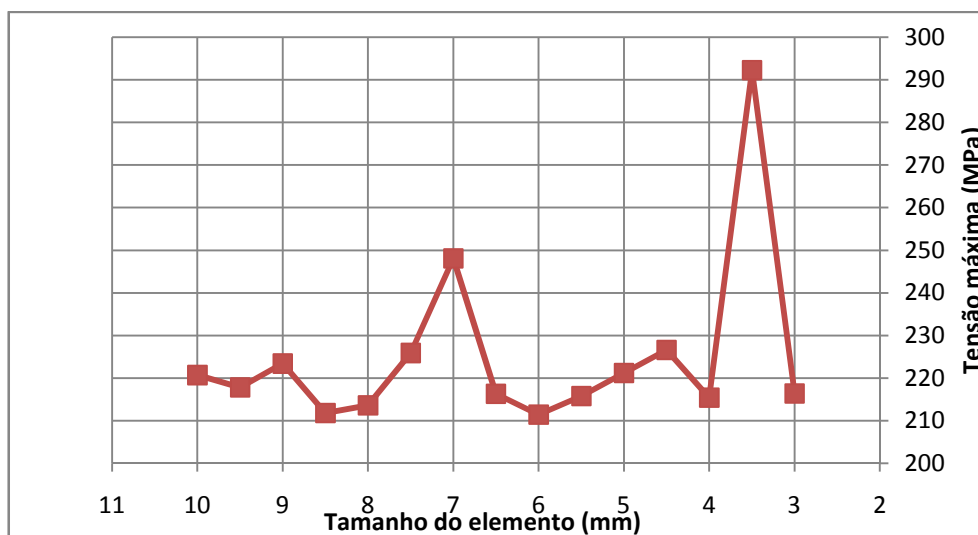


Figura 72 – Gráfico otimizado de convergência de malha (estudo 1)

O gráfico otimizado exibe uma maior concentração de pontos entre os 210 e os 220 MPa. Como tal, é possível afirmar que esta gama de valores constitui a convergência de malha pretendida, sendo agora necessário definir qual o tamanho do elemento mais indicado a este caso. Com base no que foi mencionado, as opções de tamanho de elemento possíveis são 9,5, 8,5, 8, 6,5, 6, 5,5, 4 e 3 mm. Para definir o elemento mais viável, dentro dos que foram selecionados, foi analisado o parâmetro “*aspect ratio*” que traduz a uniformidade da malha uma vez que o valor do rácio é obtido pela divisão da aresta maior pela aresta menor de cada elemento. Na Tabela 3 está representada a percentagem de elementos com um “*aspect ratio*” inferior a 3.

Tamanho do elemento	“ <i>aspect ratio</i> ”
9,5	86,5%
8,5	86,3%
8	86,4%
6,5	86,6%
6	86,4%
5,5	86,5%
4	88,8%
3	92,8%

Tabela 14 – Percentagem de elementos com rácio de aspeto inferior a 3 (estudo 1)

Analisando os valores da tabela 3, facilmente se conclui que o tamanho do elemento igual a 3 mm surge como a melhor opção pois corresponde a um dos valores de convergência de malha e conduz a uma maior uniformidade de malha comparativamente com os restantes valores convergentes. Posto isto, o estudo do fuso foi realizado com um tamanho de elemento igual a 3 mm sendo a malha obtida a representada na Figura 73.

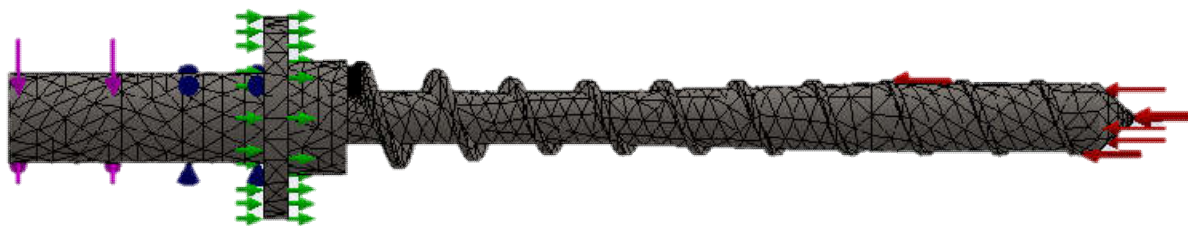


Figura 73 – Malha utilizada no estudo do fuso (estudo 1)

Uma vez definida a malha estão reunidas as condições para realizar o estudo numérico do fuso. É importante realçar que antes de se proceder ao estudo foi acionada a opção “*Use soft Spring to stabilize model*” visto que o fuso vai ser analisado isoladamente; esta opção elimina possíveis condições de fronteira erradas originadas pelo facto de o fuso estar livre no espaço. A distribuição de tensões de Von-Mises resultante é a representada na Figura 74.

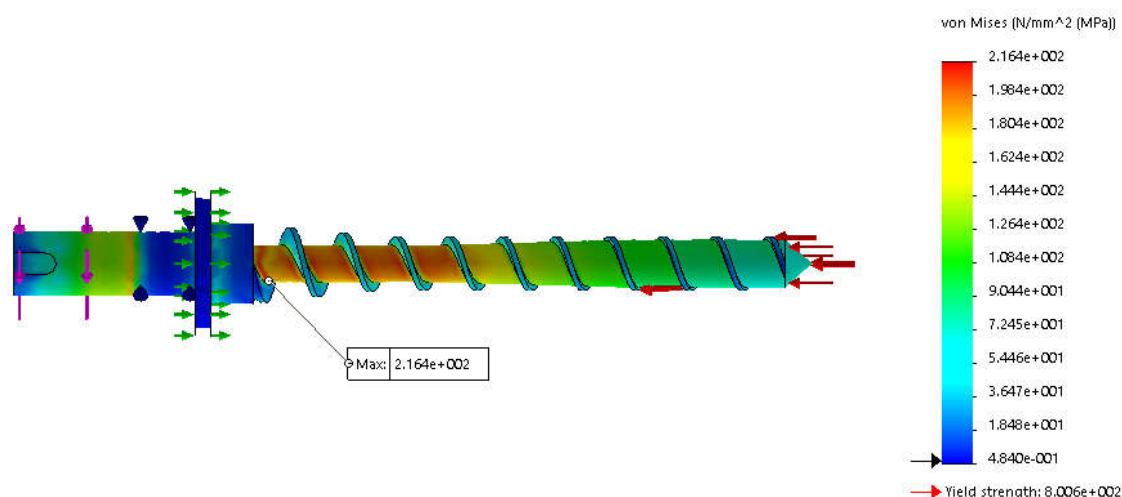


Figura 74 – Tensões Von-Mises resultantes do estudo no fuso (estudo 1)

Ao analisar o campo das tensões resultantes é perceptível que é na zona de alimentação do fuso onde estão concentradas as tensões mais elevadas. Este resultado era expectável pois os esforços resultantes do processo de extrusão são maioritariamente de torção e, por isso, a zona de secção transversal menor é a mais afetada. No que aos valores diz respeito, pode concluir-se que a tensão máxima de 216,4 MPa obtida não tem qualquer repercussão negativa no fuso uma vez que a tensão de cedência do material que constitui o fuso é de cerca de 800 MPa, garantindo-se, assim, a não ocorrência de deformação plástica. É importante lembrar que este estudo não inclui todos os esforços originados no processo, e.g. o efeito da viscosidade do material na base do canal de transporte, em virtude da sua difícil quantificação. Todavia, pode afirmar-se com relativa segurança que tais esforços não comprometerão a resistência mecânica do fuso dado que a tensão máxima resultante do estudo numérico é cerca de 3,5 vezes inferior à tensão de cedência do material o que garante uma elevada margem de segurança.

Além das tensões geradas no processo é, igualmente, importante analisar os deslocamentos que lhe deram origem. A Figura 75 representa o campo de deslocamentos obtidos.

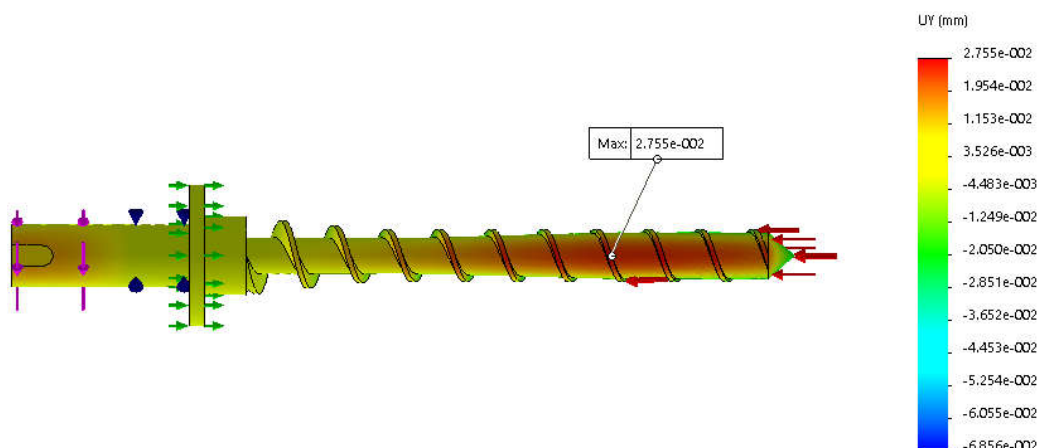


Figura 75 – Deslocamentos resultantes do estudo no fuso (estudo 1)

O deslocamento máximo verifica-se na zona mais afastada do acoplamento do fuso que corresponde à zona onde se irão gerar as maiores pressões. Como o deslocamento máximo ocorre lateralmente ao eixo do fuso, este deve ser comparado com o valor do espaçamento entre o fuso e a camisa posterior. Recordando que o espaçamento entre o fuso e a camisa posterior é de 0,25 mm tal implica que um deslocamento máximo de 0,027 mm não tem qualquer tipo de influência no funcionamento da extrusora nem na resistência do fuso.

De uma forma geral, o estudo realizado, que corresponde à extrusão de PLA a 100 rpm, não deixa dúvidas no que à viabilidade mecânica do fuso diz respeito. Apesar disto, é importante lembrar que os valores da pressão resultantes do processo podem atingir valores mais elevados aos aqui calculados, bastando para isso extrudir um material com viscosidade superior e/ou a uma velocidade angular superior às consideradas nos cálculos apresentados. Como tal, é interessante analisar o cenário mais desfavorável no que diz respeito aos esforços aplicados ao fuso. Num processo de extrusão, os cenários mais desfavoráveis estão associados a pressões extremamente elevadas geradas pelas propriedades do material, pela velocidade angular do fuso ou, ainda, por um eventual bloqueio no escoamento que poderá resultar num caudal de saída nulo. Como a pressão é gerada pela rotação do fuso, é plausível afirmar que, numa situação limite, a pressão gerada provoca o bloqueio do fuso, levando a uma velocidade angular nula. Com base nisto, é de todo interessante realizar um novo estudo numérico ao fuso, mas, desta feita, assumindo a zona de dosagem fixa. Como tal, em vez de a pressão ser aplicada na zona de dosagem, vai ser restringida a rotação nesta zona. As restrições e cargas consideradas nesta nova análise são as representadas na Figura 76.

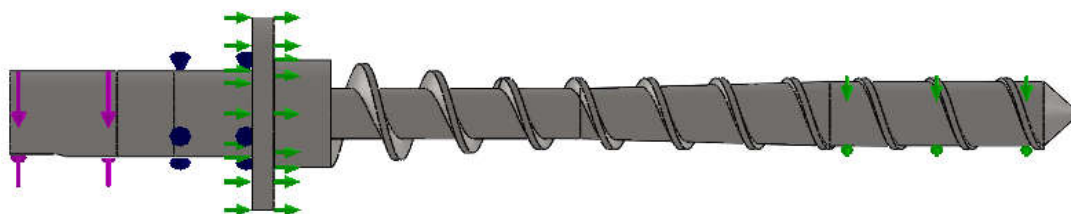


Figura 76 – Fixações e cargas aplicadas ao fuso (estudo 2)

Para a definição da malha foram analisados os mesmos tamanhos de elemento do estudo anterior. A Tabela 4 resume os valores da tensão máxima correspondente a cada um dos tamanhos de elemento considerados. Com base nestes valores, foi construído o gráfico de convergência de malha da Figura 77.

Tamanho dos elementos (mm)	Tensão máxima (MPa)	Tamanho dos elementos (mm)	Tensão máxima (MPa)
10	681,2	5	687,8
9,5	678,9	4,5	682
9	714,2	4	695,9
8,5	689,9	3,5	726,6
8	691,7	3	683,6
7,5	698,7	2,5	713,4
7	710	2	731
6,5	680,9	1,5	903
6	690,6	1	822,8
5,5	685,5		

Tabela 15 - Valores da tensão máxima para cada tamanho de elemento (estudo 2)

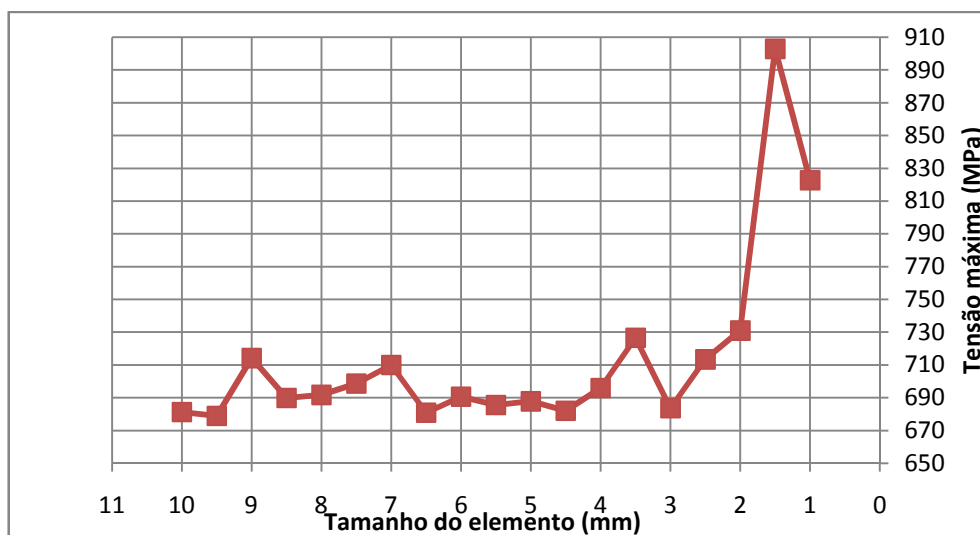


Figura 77 – Gráfico de convergência de malha (estudo 2)

O gráfico da convergência de malha apresenta uma gama maioritária de valores localizados entre os 670 e os 690 MPa o que permite considerar que a convergência da malha se situa nesta gama de valores. Tal como foi feito anteriormente, o tamanho de elemento a considerar é o que apresenta um "aspect ratio" mais favorável. Assim, facilmente se conclui que o tamanho de 3 mm se destaca dentro da gama admissível. A Figura 78 ilustra a malha, as condições fronteira e as cargas aplicadas ao fuso para realizar esta análise numérica.

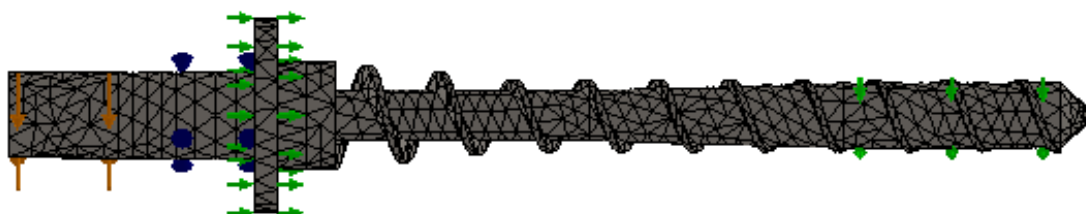


Figura 78 - Malha utilizada no estudo do fuso (estudo 2)

As tensões de Von-Mises resultantes deste estudo são as apresentadas na Figura 79.

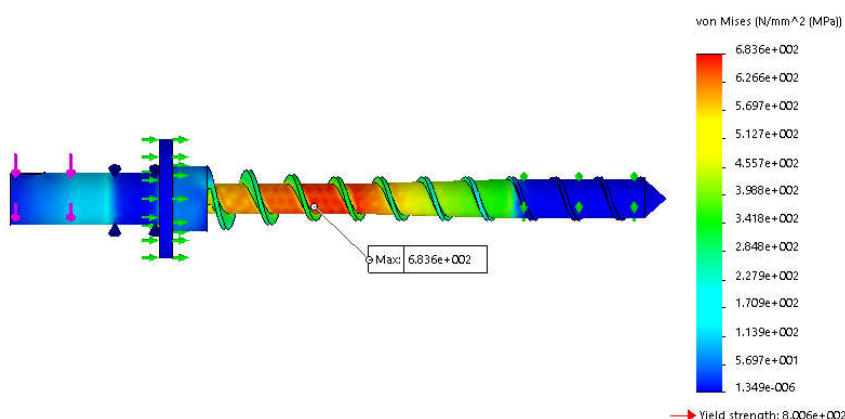


Figura 79 - Tensões Von-Mises resultantes do estudo no fuso (estudo 2)

Mais uma vez, e como era expectável, a zona onde ocorrem as tensões máximas é a zona de alimentação do fuso, observando-se, relativamente ao estudo anterior, um aumento muito significativo do valor das tensões. Ainda assim, a tensão gerada pelo bloqueio da rotação do

fuso é inferior à tensão de cedência do material do fuso o que significa que o fuso resiste àquela que é a situação mais adversa possível para o fuso. Este resultado reitera a necessidade de limitar o binário a aplicar ao fuso aos 27 N.m de forma a garantir a integridade do fuso em situação extrema correspondente ao bloqueio da rotação.

3.6 – Maquinação dos componentes da extrusora

Uma vez terminado o desenvolvimento e o estudo da viabilidade mecânica da extrusora, é seguro afirmar que a sua geometria não vai sofrer alterações podendo, assim, avançar para a maquinação dos elementos constituintes da extrusora. Ao longo desta secção vão ser apresentadas sugestões de maquinação para cada elemento da extrusora elaborados no software comercial Mastercam®.

○ Fuso

O primeiro componente a ser abordado é o fuso, que consiste no elemento com a geometria mais complexa. Tendo em conta a geometria maioritariamente cilíndrica do fuso, a sua maquinação deve ser realizada num torno CNC. A sua geometria cónica na alma do fuso torna a sua maquinação inexecutável num torno CNC convencional exigindo um torno CNC multieixos. A maquinação gerada no Mastercam® para o fuso foi realizada no equipamento “*MULTI – AXIS MILL/TURN LATHE 2 – 4 MM*”. O stock inicial de material utilizado é um cilindro de diâmetro 30 mm e comprimento 180 mm como ilustra a Figura 80.

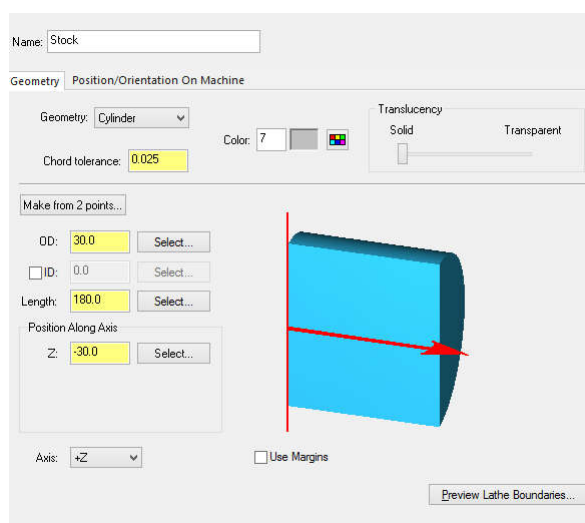


Figura 80 – Stock inicial de maquinação do fuso

A maquinação do fuso foi subdividida em duas partes distintas, a primeira maquinando a zona de acoplamento do fuso utilizando a bucha esquerda do torno transferindo-se depois o stock para a bucha direita maquinando a zona do fuso propriamente dita. Para a maquinação da zona de acoplamento do fuso foram utilizados ciclos de facejamento, desbaste, acabamento e contornos com o eixo C como se pode verificar na Figura 81.



Figura 81 – Ciclos de maquinação da zona de acoplamento do fuso

Através da simulação gráfica de maquinação do software Mastercam®, depois de realizados os ciclos apresentados na Figura 80, o fuso ficou com o formato representado na Figura 82.

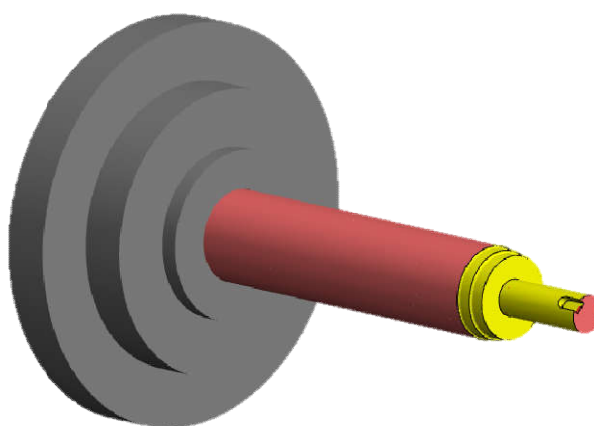


Figura 82 – Simulação da maquinação da zona de acoplamento do fuso

Concluída a maquinação da zona de acoplamento do fuso foi executada a transferência de stock para a bucha direita do torno e posteriormente a maquinação da zona útil do fuso. As principais dificuldades encontradas na maquinação desta zona do fuso foram a maquinação da zona cónica do fuso sendo necessário recorrer aos multieixos dividindo a maquinação por várias etapas. Os ciclos de maquinação realizados nesta zona estão ilustrados na Figura 83.

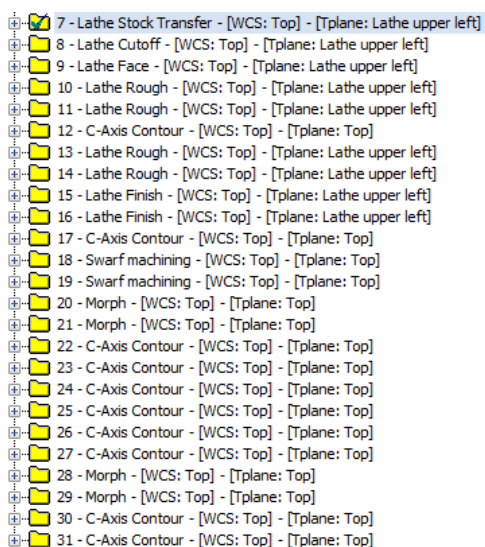


Figura 83 – Ciclos de maquinação da zona útil do fuso

A simulação gráfica da maquinação dos ciclos presentes na Figura 82 dá origem à geometria final do fuso, como ilustrado na Figura 84.

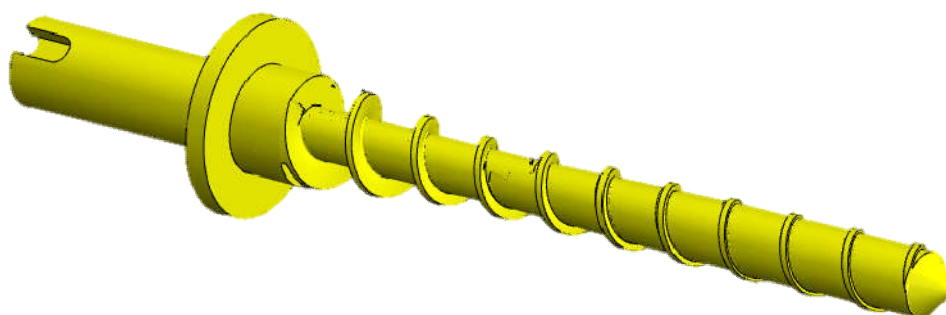


Figura 84 – Geometria final da simulação da maquinação completa do fuso

○ Camisa posterior

Tendo em conta que a geometria da camisa posterior é completamente cilíndrica, o equipamento mais adequado para a sua maquinação é um torno CNC com eixo C e, preferencialmente, com duas buchas. Na maquinação gerada para este elemento foi utilizado o mesmo torno CNC que para o fuso pois era o único disponível no software com duas buchas e eixo C servindo apenas para efeito de simulação pois, como foi mencionado, não existe a necessidade de recorrer a um torno multieixos para maquinar este elemento. O stock inicial definido para este elemento é um cilindro de 40 mm de diâmetro com um comprimento de 100 mm, como está apresentado na Figura 85.

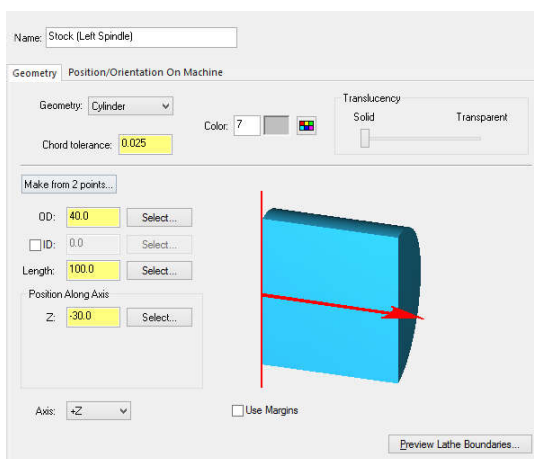


Figura 85 – Stock inicial de maquinação da camisa posterior

A maquinação propriamente dita foi separada em duas fases distintas, tal como no fuso. Numa primeira fase foi maquinada a zona de menor diâmetro da camisa na bucha esquerda e numa segunda fase foi maquinada a zona de maior diâmetro e o canal interior na bucha direita. Os ciclos utilizados na primeira fase de maquinação foram o facejamento, desbaste, acabamento, contorno com eixo C e roscagem tal como ilustrado na Figura 86.

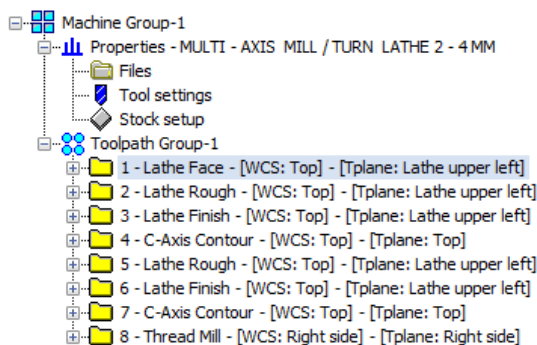


Figura 86 – Ciclos de maquinação da zona de menor diâmetro da camisa posterior

Ao executar a simulação gráfica destes ciclos, a camisa fica com a geometria apresentada na Figura 87.

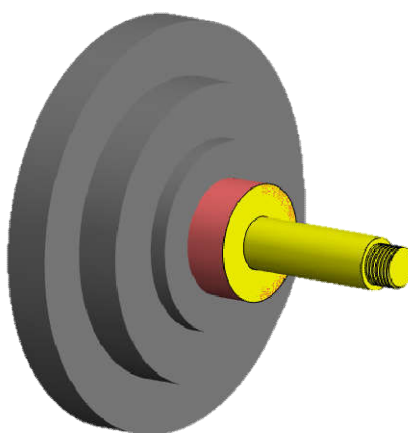


Figura 87 – Simulação da maquinação da zona de menor diâmetro da camisa posterior

Após a maquinação da zona de menor diâmetro, foi realizada a transferência de stock para a bucha direita e os ciclos de maquinação executados foram corte, facejamento, desbaste, acabamento, contorno com eixo C e furação, como apresentado na Figura 88.

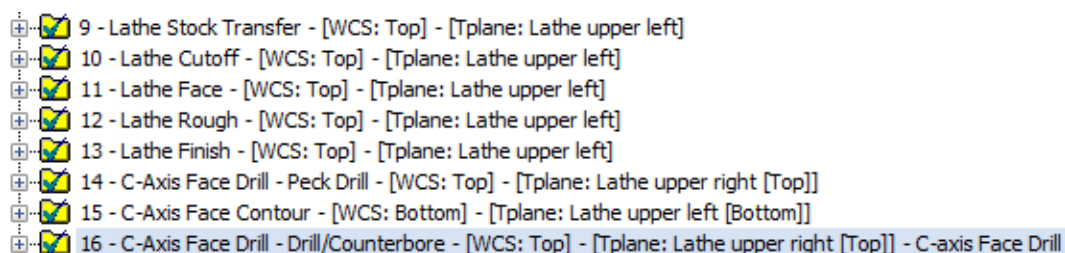


Figura 88 – Ciclos de maquinação da zona de maior diâmetro da camisa posterior

Ao correr a simulação gráfica completa da maquinação da camisa posterior resulta na geometria representada na Figura 89.

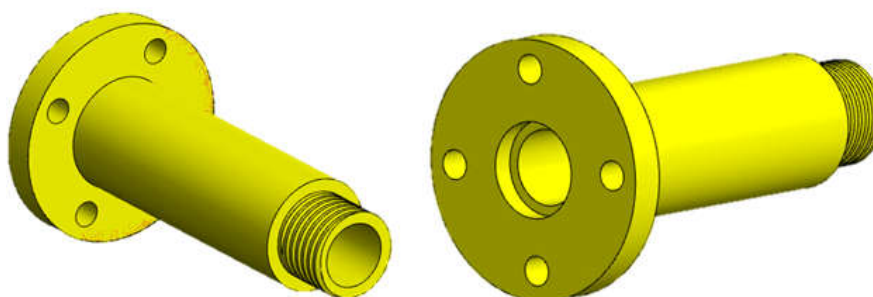


Figura 89 – Geometria final da simulação da maquinação completa da camisa posterior

○ Doseador

A definição das condições de maquinação do doseador é em tudo idêntico ao que foi definido na maquinação da camisa posterior, ou seja, o equipamento apropriado é um torno CNC com eixo C e, preferencialmente, com duas buchas. O stock inicial para maquinar este elemento é um cilindro de diâmetro 25 mm e de comprimento 50 mm tal como ilustrado na Figura 90.

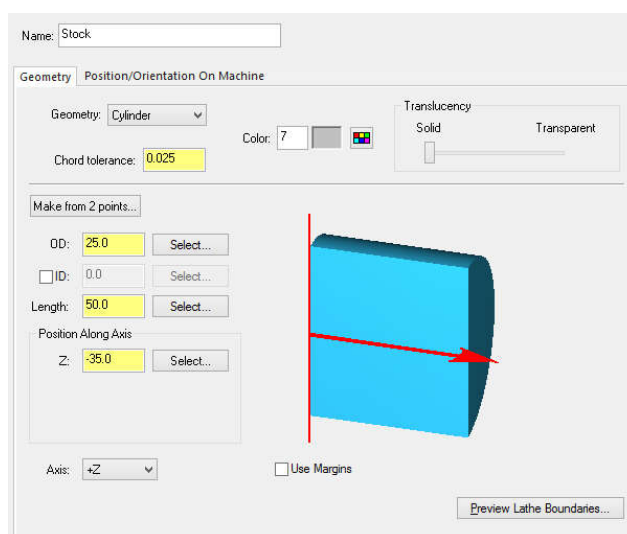


Figura 90 - Stock inicial de maquinação do doseador

Mais uma vez, a maquinação foi dividida em duas partes distintas sendo a primeira a maquinação do diâmetro maior bem como a sua zona interior e numa segunda fase foi maquinado a zona de diâmetro menor e o seu interior. Os ciclos definidos para a primeira fase estão ilustrados na Figura 91.



Figura 91 – Ciclos de maquinação da zona de maior diâmetro do doseador

Simulando graficamente os ciclos apresentados, a geometria obtida é a representada na Figura 92.

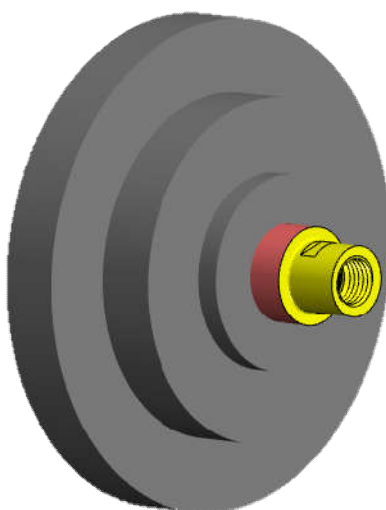


Figura 92 – Simulação da maquinação da zona de maior diâmetro do doseador

Terminada a primeira fase de maquinação, procedeu-se à transferência de stock para a bucha direita e foram definidos os ciclos de maquinação ilustrados na Figura 93.

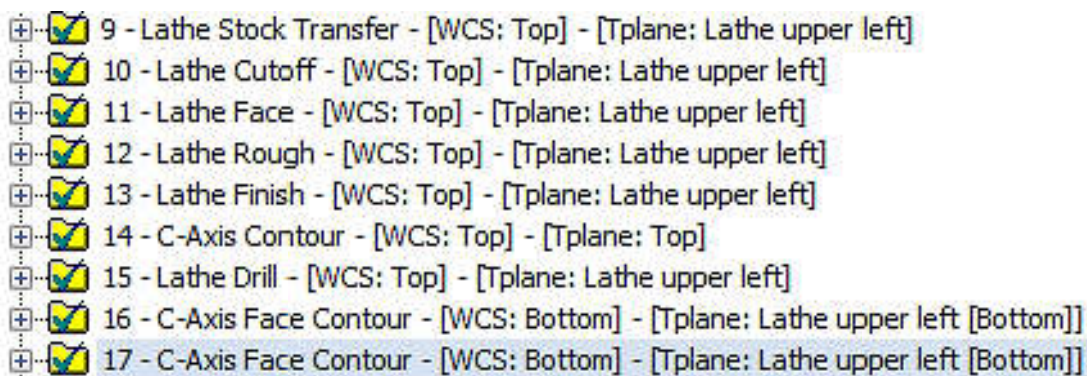


Figura 93 – Ciclos de maquinação da zona de menor diâmetro do doseador

Executando a simulação gráfica de todos os ciclos criados, obtém-se a geometria representada na Figura 94.

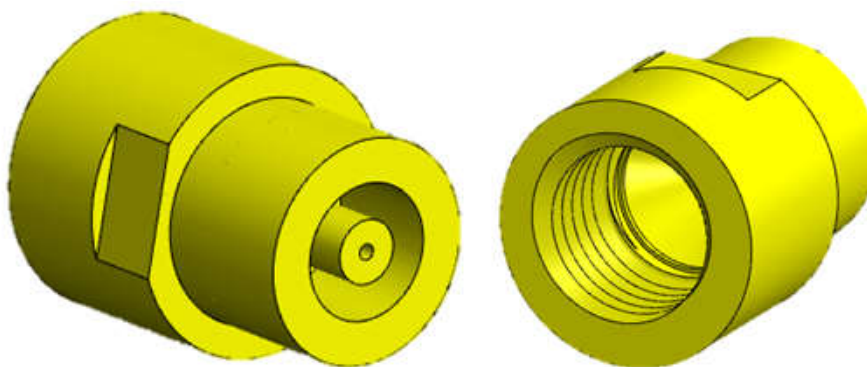


Figura 94 - Geometria final da simulação da maquinação completa do doseador

○ **Aperto da agulha**

Tal como nos componentes anteriores, também o elemento de aperto da agulha modeladora apresenta uma geometria cilíndrica pelo que o equipamento mais viável para maquinar este elemento é um torno CNC. Neste caso, a maquinação pode ser realizada com uma única bucha pois a geometria deste elemento é muito mais simples comparativamente com os componentes abordados até agora. Posto isto, o equipamento adequado para maquinar este elemento é um torno CNC com eixo C de uma bucha. O stock inicial para maquinar este elemento é um cilindro que foi definido com um diâmetro de 40 mm e comprimento de 50 mm tal como representado na Figura 95.

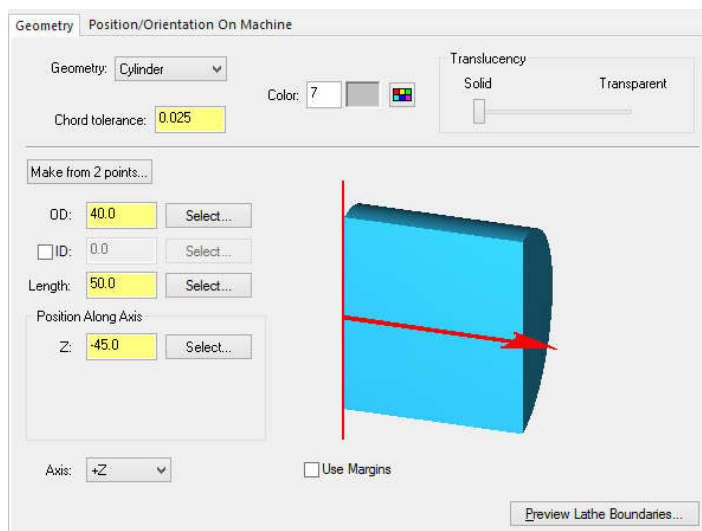


Figura 95 - Stock inicial de maquinação do elemento de aperto da agulha modeladora

De modo a maquinar este elemento num torno CNC de uma só bucha devem ser definidos todos os ciclos de maquinação sendo que o último ciclo deve ser o corte da peça na face mais próxima à bucha. Os ciclos de maquinação utilizados estão representados na Figura 96.



Figura 96 - Ciclos de maquinação do elemento de aperto da agulha modeladora

Executando a simulação gráfica da maquinação deste elemento, a geometria obtida é a representada na Figura 97.

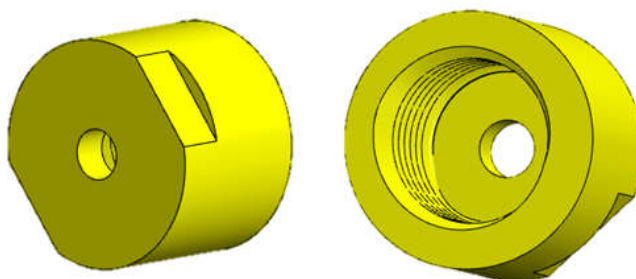


Figura 97 - Geometria final da simulação da maquinação completa do elemento de aperto da agulha modeladora

○ **Tampa da caixa do rolamento**

No que à extrusora diz respeito, apenas falta definir a maquinação da tampa da caixa do rolamento. Avaliando a geometria deste elemento, a sua maquinação tanto pode ser realizada num torno CNC com eixo C como num centro de maquinação CNC de 3 eixos embora a segunda opção seja mais vantajosa devido à baixa espessura deste elemento. O equipamento selecionado no software foi “*GENERIC HAAS 3 – AXIS VMC MM*” e foi definido um stock inicial de dimensões 50x50x10 mm definido através da opção “*bounding box*” tal como ilustrado na Figura 98.

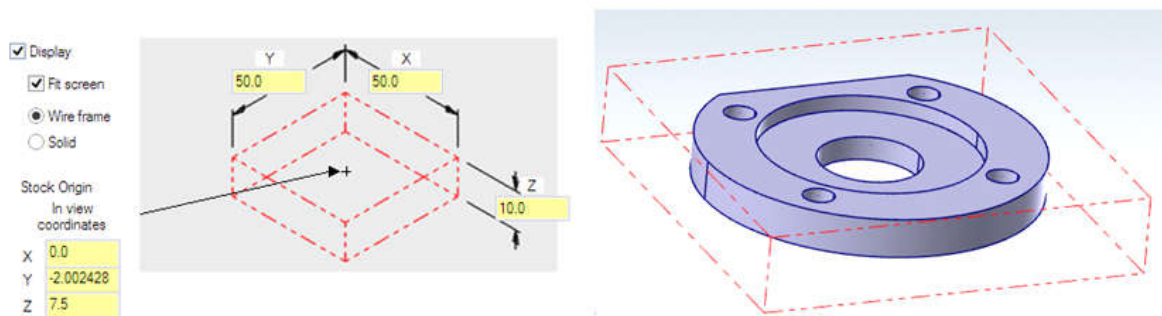


Figura 98 - Stock inicial de maquinação da tampa da caixa do rolamento

A maquinação deste elemento é bastante simples e inclui ciclos de faceamento, contorno e furação tal como apresentado na Figura 99.

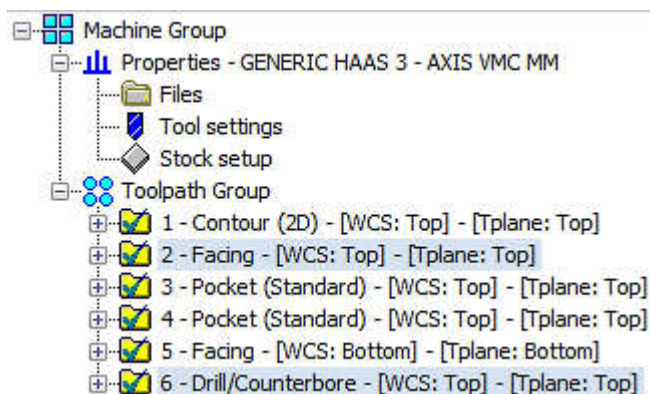


Figura 99 - Ciclos de maquinação da tampa da caixa do rolamento

Através da simulação gráfica dos ciclos apresentados, a geometria final obtida está representada na Figura 100.

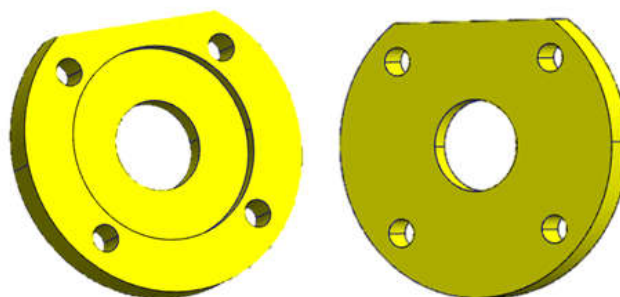


Figura 100 - Geometria final da simulação da maquinação completa da tampa da caixa do rolamento

Capítulo 4 – Desenvolvimento da ferramenta de coextrusão

O processo de coextrusão consiste, de forma resumida, na junção do caudal de saída de duas ou mais extrusoras pressionando esses caudais através de uma matriz formando um perfil único. Este processo permite combinar diferentes materiais formando um produto final que apresenta as propriedades originais dos materiais que o constituem, desde que não haja lugar à mistura dos materiais envolvidos. A coextrusão apresenta como principal vantagem a possibilidade de produzir materiais e perfis que não seriam possíveis de obter por outra via.

A informação relativa ao processo ou a sistemas/equipamentos de coextrusão existente na literatura é muito reduzida que, aliado aos requisitos singulares presentes neste trabalho, dificulta o processo de desenvolvimento desta ferramenta. Ao contrário do que sucedeu no desenvolvimento da extrusora, a ferramenta de coextrusão não tem um método de desenvolvimento associado, existindo apenas algumas referências a alguns problemas existentes com este processo. Posto isto, o desenvolvimento da ferramenta de coextrusão vai ser realizado tendo como referência os requisitos comuns a todo este trabalho que são a facilidade de montagem/desmontagem, a redução de dimensões e a versatilidade no diâmetro de saída. É necessário salientar que, devido ao facto de serem pretendidas dimensões extremamente reduzidas, é importante ter em consideração a limitação que essas mesmas dimensões implicam no que concerne aos métodos de fabrico a aplicar.

A estrutura base de uma coextrusora é constituída apenas pelas extrusoras pretendidas e pela ferramenta de coextrusão como mostra a Figura 101.

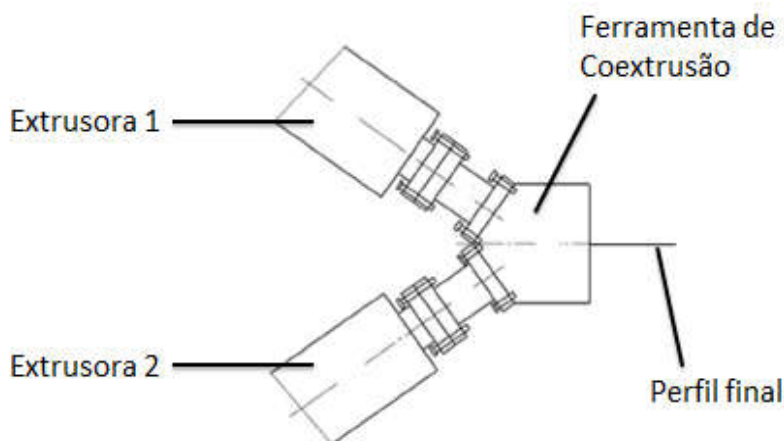


Figura 101– Esquema de um sistema de coextrusão (www.researchgate.net/figure/271379102_fig1_Fig-1-Sketch-of-multilayered-co-extrusion-technology-A-B-single-screw-extruder, 2017)

Feita a apresentação da coextrusora, é importante agora compreender a estrutura base da ferramenta de coextrusão. A estrutura deste componente pode ser dividida em três partes distintas que são o aperto das extrusoras, a junção dos materiais e, por último, a extração do produto final. A Figura 102 ilustra, de forma genérica, o princípio de funcionamento da ferramenta de coextrusão.

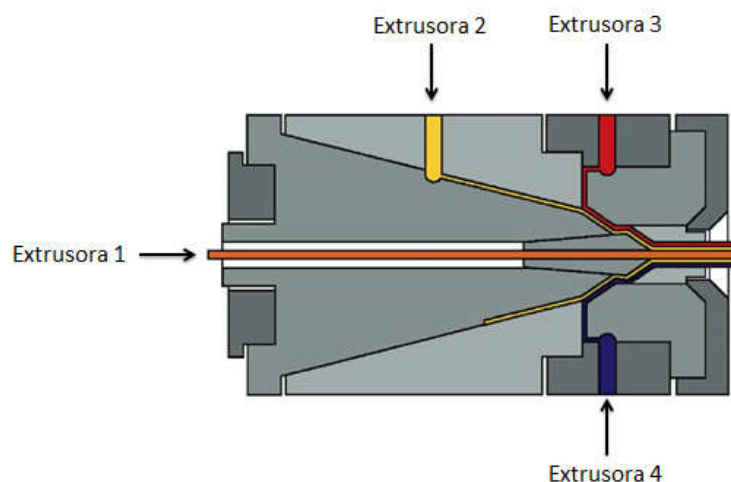


Figura 102– Princípio de funcionamento de uma coextrusora
(www.howarequipment.com/products/extrusion_crossheads/co_extrusion/, 2017)

A ferramenta de coextrusão pretendida vai ter como base de desenvolvimento a estrutura presente na imagem apresentada acima, sendo que vão ser introduzidas alterações significativas devido ao facto de a coextrusora pretendida ter dimensões invulgarmente reduzidas.

4.1 Considerações iniciais

Como foi mencionado anteriormente, existe pouca informação relativa à coextrusão pelo que o desenvolvimento deste componente vai ser realizado através do compromisso entre a estrutura base apresentada anteriormente com as características de funcionamento pretendidas. Para tal, é necessário definir alguns aspetos antes de iniciar o desenvolvimento do componente. Em primeiro lugar, e como já referido, o desenvolvimento da ferramenta de coextrusão vai ser subdividida em três etapas que são o acoplamento das extrusoras, o corpo central da ferramenta onde ocorre a convergência dos materiais e, por último, a matriz de saída do produto final. O primeiro elemento a ser abordado vai ser o corpo central da ferramenta uma vez que é a partir deste elemento que vão ser definidos os restantes parâmetros.

Outro parâmetro que é muito influente no desenvolvimento da ferramenta de coextrusão é o formato pretendido para o produto final. O formato pretendido para esta ferramenta é o tubular, isto é, a alma de um material e a periferia de outro. Adicionalmente, e tal como aconteceu no desenvolvimento da extrusora, é pretendida a possibilidade de variação dos diâmetros possíveis de saída do perfil, ou seja, é pretendido que o diâmetro da alma, da periferia e, por consequência, o diâmetro final sejam passíveis de ser alterados consoante sejam necessário. Estão, assim, verificadas todas as condições para dar início ao desenvolvimento da ferramenta de coextrusão.

4.2 Desenvolvimento

4.2.1 Corpo central

O corpo central da ferramenta tem como funções o transporte dos materiais provenientes das extrusoras de forma convergente e a união desses mesmos materiais de forma a obter um formato próximo daquele que vai ser o formato final. Numa primeira fase, é essencial definir a estrutura deste corpo e a forma como vão ser criados os canais que vão ser responsáveis pelo transporte do material. Ao procurar ferramentas de coextrusão já existentes, a estrutura mais frequente consiste em diferentes elementos cónicos encostados entre si com uma ligeira folga que vão formar os canais de transporte. De forma a compreender melhor o que foi dito é apresentada na Figura 103 a ferramenta de coextrusão criada pela *Tips and Dies*.

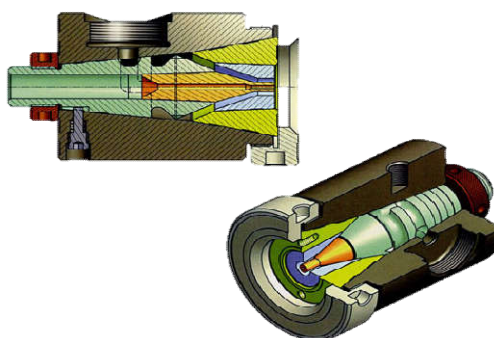


Figura 103 – Exemplo de uma ferramenta de coextrusão (tipsanddies.com/, 2017)

Da análise da Figura 103 é perceptível que o caudal de uma das extrusoras flui pelo centro da ferramenta e o caudal da outra extrusora entra perpendicularmente ao da anterior fluindo através de uma peça cônica até entrar em contacto com o caudal central formando a sua periferia. Este mecanismo não é o mais indicado para a ferramenta de coextrusão pretendida uma vez que é muito complicado produzir estes elementos de forma a obter canais com 1mm de diâmetro. Posto isto, foi necessário encontrar uma alternativa à criação dos canais e à convergência dos mesmos. A alternativa encontrada foi a criação dos canais em meia cana que são obtidos a partir de dois blocos, com as mesmas dimensões, onde se geram metade dos canais pretendidos numa superfície para que, unindo as duas superfícies trabalhadas, o resultado sejam canais completos. A primeira fase consiste na abertura dos rasgos a meia cana numa das superfícies como representado na Figura 104. De seguida cria-se o negativo dos mesmos canais noutra superfície com as mesmas dimensões como é mostrado na Figura 105.

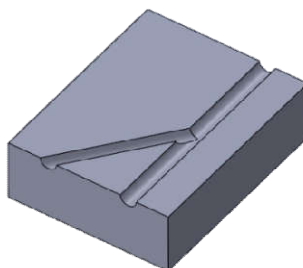


Figura 104– Exemplificação do bloco inferior de um sistema de coextrusão a meia cana

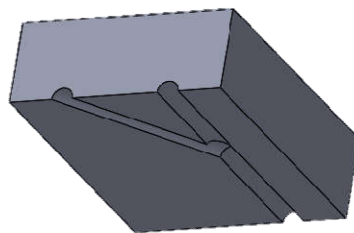


Figura 105- Exemplicação do bloco superior de um sistema de coextrusão a meia cana

Ao sobrepor estes dois elementos, vai formar-se um canal entre ambos, como se pode ver na Figura 106.

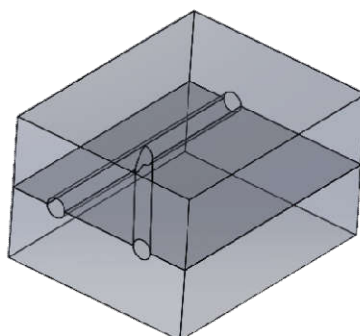


Figura 106– Exemplicação da montagem dos blocos de um sistema de coextrusão a meia cana

O desenvolvimento do corpo central da ferramenta de coextrusão com esta configuração possibilita a criação dos canais de uma forma mais precisa e simples e, além disto, reduz significativamente as dimensões da mesma comparativamente com o exemplo dado anteriormente. Assim sendo, o desenvolvimento da ferramenta de coextrusão vai basear-se neste conceito, em que estes elementos serão denominados de bloco superior e bloco inferior. O formato destes blocos vai estar diretamente relacionado com o desenvolvimento de outros parâmetros como o acoplamento das extrusoras, o mecanismo de junção de caudais e a matriz de saída pelo que o desenvolvimento destes blocos vai ser realizado paralelamente com os parâmetros mencionados. Desta forma, vai ser definido um bloco base que vai ser trabalhado ao longo do desenvolvimento de toda a ferramenta de coextrusão. As dimensões globais deste bloco base estão representadas na Figura 107.

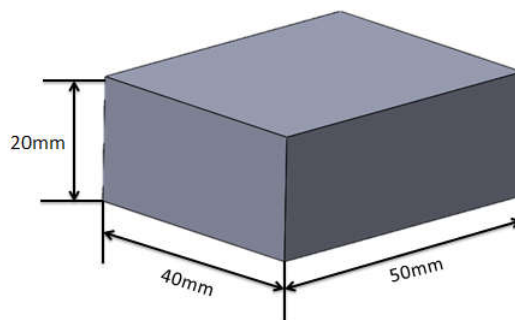


Figura 107– Dimensões do bloco base a ser trabalhado no desenvolvimento da coextrusão

4.2.2 Acoplamento

Com o propósito de promover uma transição adequada de caudal entre cada extrusora e a ferramenta de coextrusão, devem ser tidos em conta alguns parâmetros tais como as geometrias dos elementos envolvidos, o risco de retorno ou fuga de material e o risco de obstrução ao escoamento do material.

Relativamente à geometria dos elementos, é importante considerar o formato do corpo central da ferramenta de coextrusão dado que a mesma consiste na união de dois blocos, o que restringe as formas de acoplamento possíveis e seguras. No que diz respeito à extrusora, é expectável que sejam realizadas algumas alterações no seu elemento de saída de material, ou seja, no doseador. As alterações mencionadas vão incidir fundamentalmente no mecanismo de saída do material no sentido de adaptar esse mesmo mecanismo a uma forma de acoplar a extrusora à ferramenta de coextrusão.

No que respeita à transição de caudal deve ser promovida a utilização de canais retos e com diâmetro constante, anulando assim a possibilidade de obstrução ao escoamento e reduzindo significativamente o risco de fugas. É importante lembrar que, além de tudo o que foi dito, o desenvolvimento deste acoplamento deve obedecer ao requisito de projeto de uma fácil montagem/desmontagem.

Assim, a forma escolhida de realizar o acoplamento recaiu na criação de uma gola exterior no doseador da extrusora que, por sua vez, irá encaixar na ferramenta de coextrusão onde vai ser criado um entalhe com as mesmas dimensões desta gola. Desta forma, este componente vai ter como funções a transição de caudal periférico do fuso para o caudal redondo de 1mm e, simultaneamente, permitir o acoplamento da extrusora à ferramenta de coextrusão. De forma a facilitar o desenvolvimento, foi aproveitada a zona de transição do doseador da extrusora para iniciar o desenvolvimento do componente pretendido como se pode verificar na Figura 108.

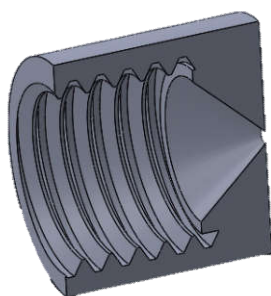


Figura 108– Zona de transição do doseador

Para poder criar a gola referida, é necessário criar um canal de saída tubular para proporcionar uma base para a gola. O diâmetro do caudal de saída vai manter-se em 1mm, tal como na extrusora, pelo que o furo do canal interior deste elemento vai, igualmente, possuir 1mm. Este elemento apresentará a configuração ilustrada na Figura 109.

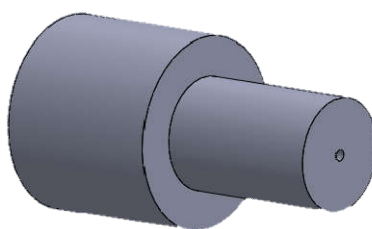


Figura 109– Projeção da base de acoplamento da extrusora

A criação da gola tem como propósito a fixação da extrusora pelo que a mesma vai ser posicionada a meio do canal de saída. De forma a obter uma fixação axial, radial e angular, a geometria da gola vai ser quadrangular, como ilustra a Figura 110. Tal implica que a gola fique envolvida pela ferramenta de coextrusão em toda a sua superfície como se verá mais à frente.

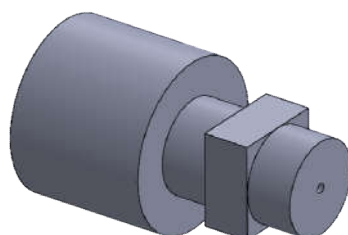


Figura 110– Criação da gola de acoplamento da extrusora

Para terminar a definição deste elemento, é necessário criar uma forma de o acoplar à extrusora. Este acoplamento vai consistir na aplicação de duas faces planas, tal como foi realizado no doseador da extrusora, exatamente com as mesmas dimensões, como mostra a Figura 111.

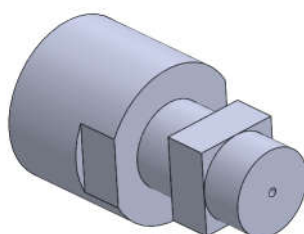


Figura 111 – Geometria final do acoplamento da extrusora

No que diz respeito à componente de acoplamento relativo ao doseador da extrusora, o seu desenvolvimento está concluído. Relativamente à ferramenta de coextrusão é apenas necessário subtrair a zona de acoplamento do doseador nos blocos superior e inferior, conforme ilustra a Figura 112.

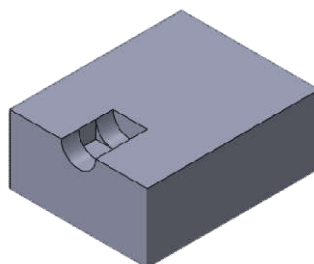


Figura 112– Criação da zona de envolvimento do acoplamento da extrusora

4.2.3 Zona de junção

A zona de junção consiste numa parte fundamental no que diz respeito ao processo de coextrusão uma vez que, tal como o nome indica, é nesta zona que se dá o processamento e união dos caudais das extrusoras. De uma forma geral, esta zona vai ser constituída pelos canais de transporte dos materiais e pelo mecanismo de união dos mesmos. Todo o desenvolvimento desta zona de junção deve ser realizado com o propósito de obter um perfil maciço redondo em que a alma do perfil é constituída por um material e a periferia por outro. O desenvolvimento desta zona vai ter início na definição do ponto de união uma vez que, tendo este parâmetro definido, facilita todo o processo de desenvolvimento restante.

Com o propósito de obter um mecanismo de junção simples e viável, é necessário definir alguns detalhes tais como a orientação dos caudais quanto estes se encontram, o desfasamento entre eles e a forma de os unir. Em primeiro lugar, no que diz respeito à orientação dos caudais, é necessário encontrar o formato ótimo com vista a obter o formato de saída pretendido. Para tal, a opção mais simples e que mais se adequa será o escoamento reto de um dos caudais que vai constituir a alma do perfil e a adição lateral do outro caudal de modo a formar a periferia. Relativamente ao desfasamento entre estes canais, este diz mais respeito ao canal que forma a periferia do perfil uma vez que vai ser este a entrar lateralmente em relação ao outro caudal. Este desfasamento entre os caudais é importante no que diz respeito a uma correta dispersão do caudal lateral com vista a formar a periferia do perfil sem quaisquer falhas ou incoerências. Para tal, o ângulo escolhido foi o de 45° , uma vez que se fosse escolhido um ângulo inferior poderia induzir incoerências no lado oposto à entrada do caudal e para um ângulo superior podia acontecer o mesmo para o lado mais próximo à entrada do caudal e, para além disto, quanto mais o ângulo tendesse para 90° , maior seria o risco de obstrução ou retorno de material. Por último, falta definir a forma como os caudais se vão unir uma vez que não se pode injetar um material diretamente contra o outro pois isso iria afetar de forma significativa o perfil de saída que deixaria de ser constituído por uma alma e uma periferia, passando a ser um perfil único formado por dois materiais misturados entre si. Assim sendo, a junção de materiais deve ser realizada de forma colinear, ou seja, no momento de junção os dois caudais devem seguir na mesma direção. Uma vez que a junção de caudais ocorrerá a 45° é necessário encontrar uma forma de converter este ângulo de aproximação num escoamento paralelo. Introduzindo já neste ponto o objetivo de tornar a ferramenta de coextrusão versátil no que toca aos diâmetros obtidos, foi solucionada a questão da junção de caudais e, simultaneamente, tornou-se desde já o diâmetro da alma do perfil versátil através da inserção de uma agulha, já utilizada neste trabalho aquando do desenvolvimento da extrusora, na zona de união de caudais. A introdução desta agulha tem como objetivo a passagem do caudal referente à alma do perfil de saída no interior da agulha e o caudal lateral vai incidir na parte exterior da agulha encontrando-se ambos os caudais no final da agulha. Desta forma, o diâmetro da alma pode ser facilmente alterado através da troca da agulha e a união dos caudais dá-se de forma paralela sem que um interfira com o outro. A Figura 11 ilustra o efeito pretendido com a agulha.

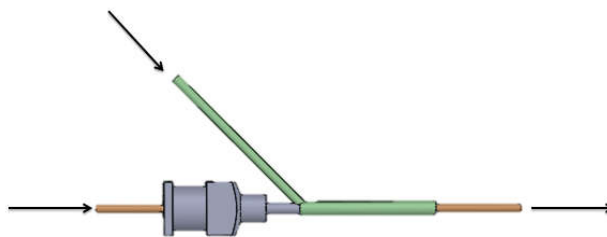


Figura 113– União de caudais através de uma agulha modeladora

No que diz respeito à zona de junção de materiais apenas falta abordar os canais de transporte que já se encontram perfeitamente definidos uma vez que a junção de materiais se dá com uma convergência a 45° . Este facto aliado à vantagemem ter canais retos de forma a anular o risco de obstrução de caudal, implica que os canais responsáveis por fazer a ponte entre as extrusoras a o ponto de junção adotem as mesmas características. Desta forma, está concluída a análise e definição de todos os parâmetros envolvidos nesta zona de junção, sendo agora necessário aplicar os mesmos aos blocos superior e inferior para finalizar esta zona.

A aplicação destes elementos implica a minimização das dimensões da ferramenta de coextrusão e a garantia do correto funcionamento da mesma. Uma vez que os blocos superior e inferior já contêm o acoplamento para uma das extrusoras, a aplicação dos elementos definidos vai começar a partir desse ponto. Como tal, o primeiro elemento a ser aplicado vai ser a agulha, uma vez que vai receber o caudal proveniente da extrusora que vai definir a alma do perfil. Com o objetivo de anular o risco de fugas, a agulha vai ser diretamente aplicada ao componente de acoplamento da extrusora e, para tal, vai ser projetado um sistema, tal como foi realizado para a extrusora, que adote as dimensões do furo na estrutura da agulha como ilustra a Figura 114.

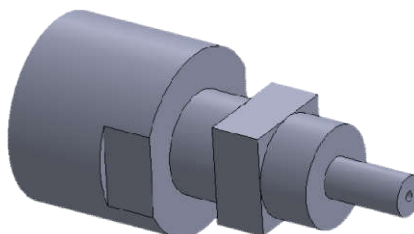


Figura 114– Encaixe da agulha modeladora no acoplamento da extrusora

Através deste encaixe pode inserir-se a agulha no componente de acoplamento da extrusora melhorando a transição de caudal entre ambos, tal como representado, em corte na Figura 115.

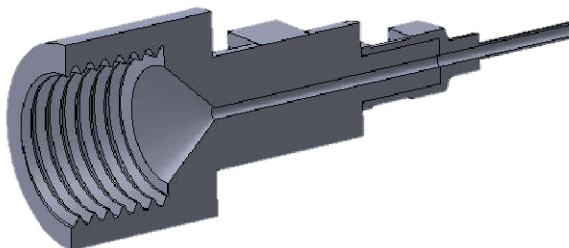


Figura 115– Assemblagem do acoplamento da extrusora com a agulha modeladora, em corte

Relativamente à agulha, falta conceber a sua fixação na ferramenta de coextrusão. Tal como foi feito no acoplamento da extrusora à ferramenta de coextrusão, vai ser criado o negativo da agulha nos blocos superior e inferior para que a agulha fique fixa quando forem acoplados ambos os blocos. É importante salientar que isto é apenas válido para a estrutura da agulha, sendo que a parte tubular da agulha vai estar livre para poder executar a junção de caudais pelo que, para já, vai ser criada uma base para o tubo da agulha que vai ser alterado mais à frente. Os blocos superior e inferior vão adotar a configuração representada na Figura 116.

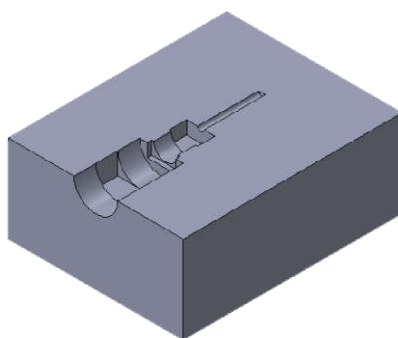


Figura 116– Criação do negativo da agulha modeladora nos blocos superior e inferior

Ao introduzir o acoplamento da extrusora juntamente com a agulha no bloco inferior e juntando, posteriormente, o bloco superior obtém-se a fixação da agulha como pretendido e representado, em corte, na Figura 117.

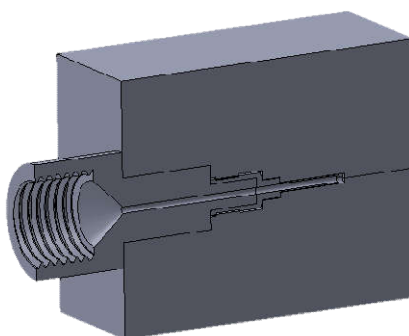


Figura 117– Assemblagem dos blocos superior e inferior, acoplamento da extrusora e da agulha modeladora, em corte

Uma vez aplicada a agulha, falta agora criar o canal que vai transportar o material proveniente da outra extrusora que, tal como definido anteriormente, vai ser colocado com um ângulo de 45° relativamente ao canal formado essencialmente pela agulha. A injeção do material transportado por este canal deve ocorrer numa zona mais recuada do tubo da agulha com o propósito de estabilizar o escoamento do material antes deste se juntar ao caudal proveniente do interior da agulha. Quanto ao diâmetro do canal a ser criado, vai ser de 1mm uma vez que a extrusora foi desenvolvida com o intuito de extrudir um caudal com um diâmetro máximo de 1mm. A criação deste canal é ilustrada, para ambos os blocos, na Figura 118.

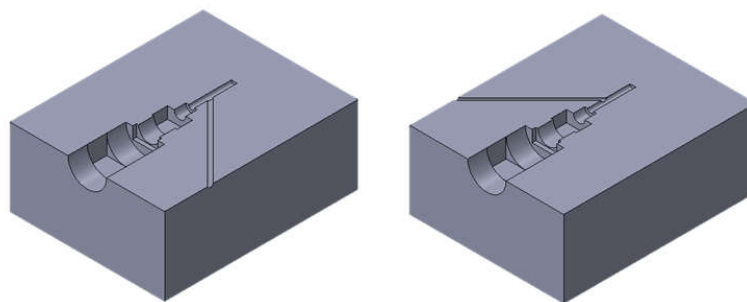


Figura 118 – Representação do segundo canal de admissão do material

Criado o canal de transporte, pode agora ser criada a base de acoplamento da segunda extrusora. Tendo em conta que o canal está posicionado a 45° existem duas hipóteses de colocação do acoplamento da extrusora:

- i) uma que passa por introduzir a extrusora de forma colinear com o canal criado;
- ii) pode colocar-se a extrusora paralelamente à outra extrusora e acertar o canal de transporte através de uma curva. Analisando as duas opções, é mais sensato e seguro colocar a segunda extrusora de forma colinear com o canal de transporte pois a introdução de curvas pode levar à obstrução ou redução de velocidade de escoamento do material o que implicaria efeitos nefastos para o processo. Definida a posição da segunda extrusora resta adaptar ambos os blocos de forma a obter a geometria mais adequada para acoplar a mesma. Depois de várias tentativas a configuração obtida é a representada na Figura 119. Encontra-se assim terminado o desenvolvimento da zona de junção do material.

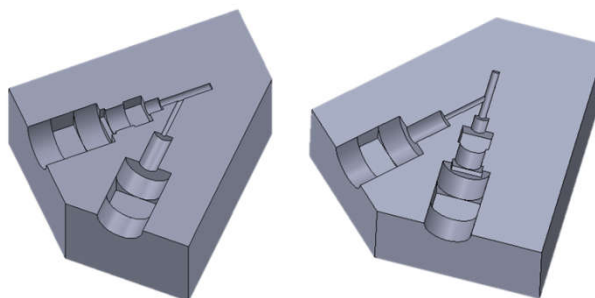


Figura 119 – Geometria final na zona de admissão dos blocos superior e inferior

4.2.4 Bico de coextrusão

O bico de coextrusão é a zona da ferramenta onde é finalizada a modelação do perfil pretendido e a extração do mesmo, ou seja, é a fase terminal do processo de coextrusão. O processo, nesta zona da ferramenta de coextrusão, é caracterizado pela admissão do escoamento proveniente da zona de mistura, estabilização desse mesmo escoamento, modelação final do mesmo através da definição do diâmetro exterior do perfil e, por último, a extração do material. É importante relembrar que é pretendido que o diâmetro exterior do perfil possa ser alterado consoante as necessidades, pelo que é necessário criar um mecanismo versátil que permita a alteração desse mesmo diâmetro. Antes de mais, é necessário perceber quais os valores limite ao nível das dimensões do caudal nos diferentes pontos da ferramenta de coextrusão e também na gama de agulhas disponíveis. No que diz respeito aos caudais na ferramenta de coextrusão, existem três pontos distintos com escoamentos diferentes que são o

canal de transporte, referente à alma do perfil; o canal de transporte, referente à periferia e, por último, a zona do bico de coextrusão. Destes três pontos, o único que tem as dimensões de escoamento perfeitamente definidas é o canal de transporte, referente à periferia do perfil, sendo que o diâmetro do canal de transporte, referente à alma do perfil, vai depender da agulha aplicada na zona de junção dos materiais. Assim, resta definir as dimensões máximas que podem ser utilizadas na agulha que define o diâmetro da alma do perfil e na agulha que define o diâmetro externo do perfil no bico de coextrusão. Ao consultar as dimensões das agulhas comercialmente disponíveis, conclui-se que a dimensão máxima, no que toca ao diâmetro interior máximo, é de 2mm. Uma vez que a dimensão máxima de todo o processo está localizada no bico de coextrusão, a agulha com dimensões máximas tem, obrigatoriamente, de ser aplicada nesta zona. Como tal, as dimensões máximas ficam perfeitamente definidas sendo que o bico de coextrusão pode ir até 2mm, a alma do perfil pode ir até 1mm e o canal referente à periferia é fixado em 1mm. Reunidos todos os requisitos pretendidos para o bico de coextrusão pelo que vai dar-se início ao processo de desenvolvimento do mesmo.

No desenvolvimento do bico de coextrusão é necessário ter em conta a geometria da estrutura da agulha que se caracteriza por um furo interior bastante superior ao diâmetro do furo interior da agulha propriamente dita o que vai criar um espaço vazio entre a admissão do material e a entrada do material na agulha como mostra a Figura 120.



Figura 120– Falha no envolvimento do escoamento na estrutura da agulha de modelação

A Figura 85 ilustra a forma como o escoamento proveniente da zona de junção entraria na estrutura da agulha caso fosse introduzida apenas a agulha para moldar o diâmetro externo do perfil. Da análise da Figura 85 pode concluir-se que, como o escoamento proveniente da zona de junção já é composto pela alma e periferia de materiais diferentes, o espaçamento entre a entrada de material na estrutura da agulha e a entrada de material na agulha propriamente dita iria causar uma distorção no formato do perfil motivado pela falta de orientação do material até à agulha. De forma a evitar este efeito provocado pela estrutura da agulha, optou-se por adicionar um elemento de ligação responsável por fazer a ponte entre a zona de junção dos materiais com a agulha. O desenvolvimento deste elemento tem como objetivos:

- i) Melhorar a transição do material entre a zona de junção e a agulha reduzindo os efeitos de distorção no perfil;
- ii) Transportar o material de forma estável e sem obstruções até à agulha;
- iii) proporcionar uma montagem/desmontagem simples e prática.

Outro detalhe a ter em conta é a simplificação do processo de fabrico do mesmo, uma vez que estão associadas dimensões muito reduzidas. Para iniciar o desenvolvimento do elemento de ligação optou-se por conceber a sua geometria base que será um cilindro com um furo passante localizado no centro da secção transversal do elemento. O primeiro obstáculo neste desenvolvimento surge na atribuição das dimensões ao elemento de ligação. O diâmetro do seu furo interior vai estar diretamente relacionado com o diâmetro da agulha sendo que, num cenário ótimo, ambos deveriam ter sempre as mesmas dimensões. Isto significa que seria necessário ter um elemento de ligação por cada agulha, mas uma vez que os diâmetros internos das diferentes agulhas disponíveis possuem dimensões que variam entre si, numa média de 0,2mm, possibilita que se utilize o mesmo elemento para duas ou três agulhas de dimensões muito próximas. Como tal, será desenvolvido um elemento de ligação com base na utilização de uma agulha com 2mm de diâmetro interno. Relativamente ao diâmetro externo e ao comprimento do elemento de ligação serão arbitrados os valores de 5 e 10mm, respetivamente. A Figura 121 representa a estrutura base do elemento de ligação.

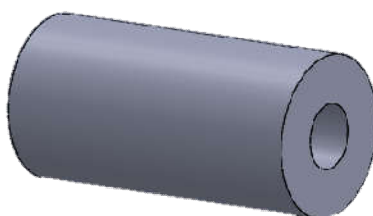


Figura 121– Estrutura base do elemento de ligação

Antes de prosseguir com o desenvolvimento deste elemento de ligação, é necessário definir o seu posicionamento dentro dos blocos superior e inferior. Uma vez que este elemento realiza a admissão do material proveniente da zona de mistura, deve ser procurada uma posição que permita a melhor transição possível. Atendendo que a zona de mistura consiste na passagem de um escoamento no interior de uma agulha e o outro na parte exterior, a posição deste elemento de ligação deve ser o mais encostado à agulha quanto possível. Para tal, nesta fase inicial, vai ser criado um furo nos blocos superior e inferior desde o topo até ao início da agulha com um diâmetro de 5mm como se pode observar na Figura 122 para o bloco inferior.

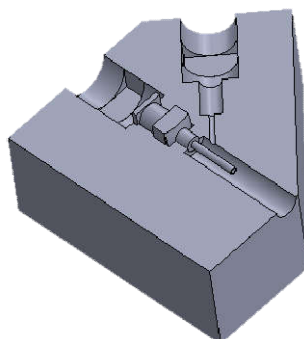


Figura 122– Abertura do canal para acoplamento do elemento de ligação nos blocos superior e inferior

Regressando ao desenvolvimento do elemento de ligação, o primeiro parâmetro a ser definido vai ser a forma de admissão de material proveniente da zona de junção. Analisando a forma

como é processada a união dos materiais, o procedimento mais viável para realizar a admissão do escoamento por parte do elemento de ligação resulta do encosto do elemento de ligação à estrutura da agulha fazendo, para tal, um corte no elemento de ligação para promover a passagem do material que vai formar a periferia do perfil como exemplificam as Figuras 123 e 124.

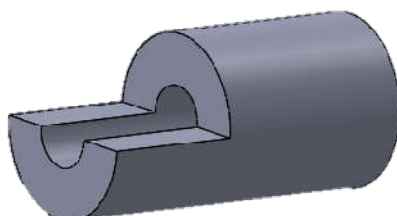


Figura 123 – Corte no elemento de ligação para admissão de material

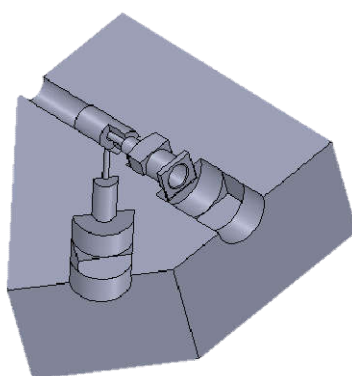


Figura 124– Posicionamento do elemento de ligação na ferramenta de coextrusão

O próximo parâmetro a ser abordado diz respeito ao comprimento do elemento de ligação que, dado ser exatamente o mesmo que o da agulha, vai ficar completamente coincidente com a agulha em virtude do seu posicionamento. Esta situação não é de todo desejável uma vez que é necessário ter em conta o efeito causado pelo facto de ambos os escoamentos deixarem de ser separados pela parede da agulha. Tal irá traduzir-se, desde logo, numa pequena quebra do diâmetro pois deixa de existir a parede da agulha e também numa pequena perturbação no escoamento motivada pelo contacto entre os dois materiais. Assim, torna-se necessário aumentar o comprimento do elemento de ligação com o objetivo de estabilizar o escoamento após o final do contacto com a agulha. Existindo esta necessidade de aumento do comprimento do elemento de ligação, é promovido, desde já, o encaixe entre o elemento de ligação e a agulha final para promover a minimização de dimensões. Desta forma, vai ser executada um encaixe com as dimensões do furo interior da estrutura da agulha como é mostrado na Figura 125.

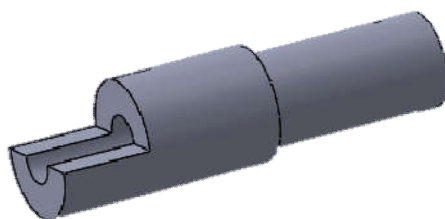


Figura 125– Encaixe entre o elemento de ligação e a agulha de modelação

Após a definição do comprimento do elemento de ligação falta definir um último detalhe relacionado com a sua fixação ao nível rotacional. Após a criação do corte para a admissão do material proveniente da zona de junção, passou a existir uma posição de funcionamento para este elemento que tem de ser, obrigatoriamente, com o corte coincidente com o canal do material relativo à periferia do perfil tal como ilustrado na Figura 89. Como tal, é necessário criar uma forma de fixação angular para que este elemento não se desloque da sua posição durante o processo. A forma mais simples encontrada para criar esta fixação é através de uma chaveta, cuja definição de dimensões não necessita de ser realizada pela norma DIN, uma vez que não estão em causa nem elementos em rotação nem consideráveis esforços envolvidos. A escolha da chaveta foi feita considerando as dimensões mais adequadas face às já existentes. A escolha recaiu assim numa chaveta que tem largura e altura de 2mm. Relativamente ao comprimento, foi escolhido o valor de 4mm pois não interfere com a zona cortada deste elemento e, além disso, providencia uma boa base de contacto. No que diz respeito aos rasgos, um vai ser aplicado na superfície inferior do elemento de ligação na sua zona de maior diâmetro e o outro no bloco inferior na zona coincidente com a anterior, ambos com 1mm de altura. A zona de maior diâmetro do elemento de ligação contém mais 1mm relativamente ao diâmetro menor, o que se traduz numa diferença de 0,5mm na parede do elemento de ligação. Como tal, de modo a viabilizar a aplicação da chaveta, o diâmetro maior deste elemento vai ser aumentado para 6mm para que, desta forma, o rasgo para a chaveta fique tangencial ao diâmetro menor como se pode verificar na Figura 126.

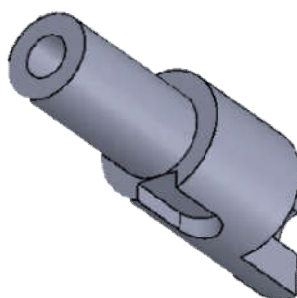


Figura 126– Criação do rasgo para chaveta mecânica no elemento de ligação

A definição da geometria da chaveta e o rasgo no bloco inferior vai ser realizado mais à frente quando a geometria do bloco inferior for definitiva.

Estando definido o elemento de ligação, resta agora desenvolver uma forma de fixar a agulha à ferramenta de coextrusão. É importante salientar que é desejável que a agulha fique o mais saliente possível em relação à ferramenta de coextrusão para criar uma zona livre em torno da saída do perfil final o que permitirá obter um bom campo de visão que possibilite controlar o

escoamento da coextrusora. Com o intuito de promover essa mesma saliência, a fixação da extrusora à ferramenta de coextrusão vai ser realizada através da geometria cilíndrica da estrutura da agulha uma vez que a mesma se situa numa zona recuada da mesma. O mecanismo de fixação consiste em envolver a zona mencionada com duas meias luas com as mesmas dimensões e com furo interior com o mesmo diâmetro que a face exterior da zona da agulha mencionada. Este conceito está representado nas Figuras 127 e 128.

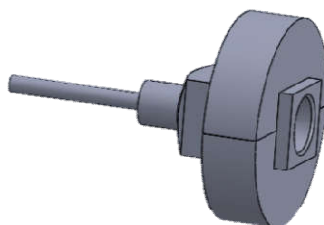


Figura 127 – Assemblagem das meias luas com a agulha de modelação

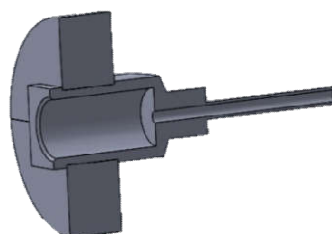


Figura 128 - Assemblagem das meias luas com a agulha de modelação, em corte

A etapa seguinte assenta na definição da fixação da agulha. A geometria dos blocos superior e inferior é desenvolvida de forma a envolver as meias luas e, simultaneamente, posicionar a agulha de forma precisa de modo a que esta fique completamente encostada ao elemento de ligação. As alterações efetuadas nos blocos estão representadas na Figura 129. A Figura 130 ilustra o conjunto constituído pelo bloco inferior, a agulha final e as respetivas meias luas de fixação. Como se pode observar na Figura 130, as meias luas que fixam a agulha ficam com a face frontal perfeitamente alinhada com a face frontal dos blocos superior e anterior pelo que, para finalizar a fixação da agulha, vão ser introduzidos dois furos em cada bloco e vai ser aparafusada uma placa contra as meias luas, fixando dessa forma a agulha. Os furos mencionados encontram-se representados na Figura 131.

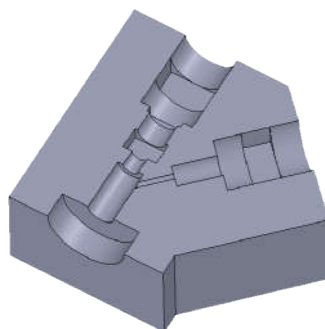


Figura 129 – Alterações nos blocos superior e inferior para fixação da agulha de modelação final

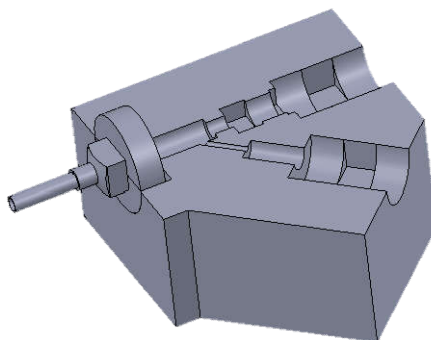


Figura 130 – Posicionamento da agulha de modelação final na ferramenta de coextrusão

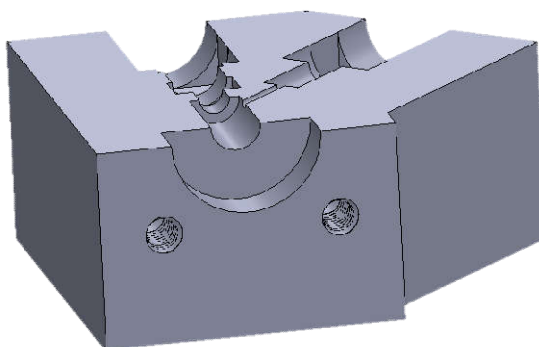


Figura 131– Furação e roscagem dos blocos superior e inferior para fixação da agulha de modelação final

Depois da execução dos furos, é construída a chapa de fixação final que deve conter 4 furações perfeitamente alinhadas com os furos criados nos blocos, um entalhe central para a passagem da agulha e, por último, os 4 furos devem ser escareados de forma a permitir o acoplamento da chapa através de parafusos de cabeça cônica com sextavado interior pois estes parafusos permitem obter uma superfície plana e menos volumosa de forma a não prejudicar o campo de visão lateral relativamente à agulha. A chapa de fixação concebida apresenta a configuração da Figura 132.

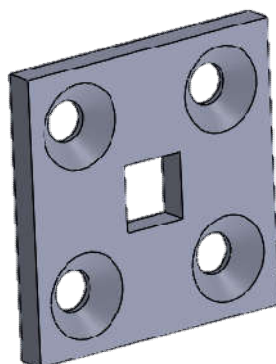


Figura 132 – Chapa de fixação da agulha de modelação final

Para terminar o desenvolvimento do bico de coextrusão, é necessário terminar a execução da fixação angular do elemento de ligação, sendo para tal criado o rasgo para a chaveta neste elemento. Para terminar esta fixação, falta criar o rasgo no bloco inferior e gerar a própria chaveta de acordo com as geometrias que a envolvem. Desta forma, o rasgo a criar no bloco

inferior deve ser, naturalmente, coincidente com o rasgo criado no elemento de ligação e deve ter uma profundidade que, juntamente com o rasgo do elemento de ligação, tenha 2mm de altura. Posto isto, o rasgo criado no bloco inferior tem a geometria e localização representadas na Figura 133.

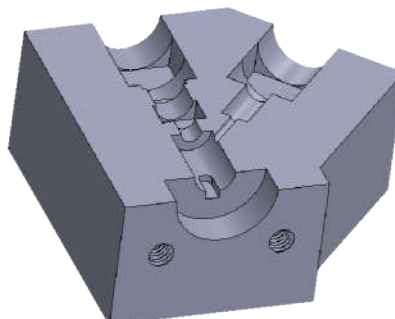


Figura 133 – Abertura do rasgo para chaveta mecânica no bloco inferior

Analisando a geometria dos rasgos e tendo em conta que uma das extremidades da chaveta vai estar em contacto com as meias luas, a geometria da chaveta que mais se adequa é a ilustrada na Figura 134 e que apresenta uma extremidade arredondada e outra perfeitamente plana.

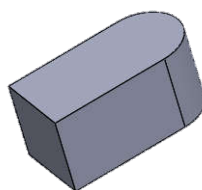


Figura 134– Chaveta mecânica para fixação abgular do elemento de ligação

Para terminar a abordagem a esta fixação, a Figura 135 ilustrada a *assemblagem* dos três elementos envolvidos. Está assim terminado o desenvolvimento do bico de coextrusão. A Figura 136 apresenta uma imagem que ilustra a configuração exterior da ferramenta de coextrusão após as alterações descritas neste subcapítulo.

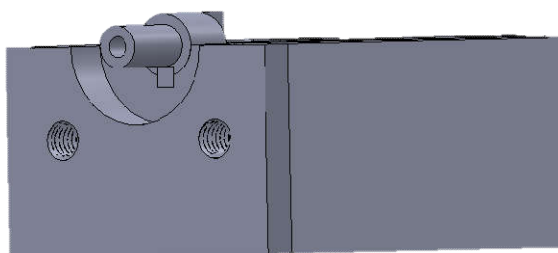


Figura 135– Assemblagem da forma de fixação angular do elemento de ligação

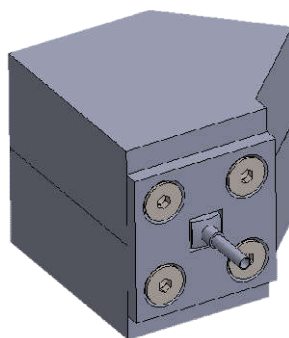


Figura 136 – Formato final do bico de coextrusão

4.2.5 - Aquecimento do material

Como já foi abordado neste trabalho, o processo de extrusão contempla o aquecimento do material até à sua temperatura de fusão. Ora, numa coextrusora, o escoamento proveniente de cada uma das extrusoras transita diretamente para a ferramenta de coextrusão e, se não forem tomadas quaisquer medidas, a temperatura do material vai cair significativamente ao entrar em contacto com a extrusora, implicando de imediato o aumento da sua viscosidade e, consequentemente, a obstrução ao escoamento. Posto isto, é necessário introduzir elementos de aquecimento na ferramenta de coextrusão para promover a manutenção da temperatura dos materiais. Ao analisar a geometria da ferramenta de coextrusão, facilmente se conclui que não podem ser aplicados elementos de aquecimento a mesma geometria dos que foram aplicados na extrusora. Como tal, e analisando os diferentes formatos de resistências existentes, aquele que mais se adequa à geometria da ferramenta de coextrusão é a resistência elétrica de cartucho que está representada na Figura 137.



Figura 137 – Resistências elétricas de cartucho

Uma grande vantagem deste tipo de resistências elétricas existentes no mercado é que existem já com termopares integrados o que facilita, desde logo, o controlo de temperatura. A aplicação destes elementos na ferramenta de coextrusão deve ser realizado o mais próximo possível dos pontos a aquecer para rentabilizar o calor gerado por estes dispositivos. Com base nesta informação, a forma mais indicada de inserir estes elementos na ferramenta de coextrusão consiste na execução de furos paralelos ao escoamento dos materiais nos blocos superior e inferior. Antes de mais, é necessário averiguar as dimensões deste tipo de resistências de forma a perceber quais as dimensões que mais se adequam às da ferramenta de coextrusão. Para tal, foi consultada a gama de medidas fornecidas por uma empresa de fabrico deste tipo de elementos que se encontra em anexo. Foi definido o valor de 40mm para o comprimento da resistência uma vez que os comprimentos dos blocos superior e inferior

rondam esse valor. Relativamente ao diâmetro, a escolha do mesmo não foi tão linear uma vez que, se considerarmos estritamente a dimensão, a melhor escolha seriam os 6,5mm pois é a menor medida existente; todavia é também necessário ter em conta a potência que corresponde a cada diâmetro. Como tal, optou-se por definir a localização das resistências na ferramenta de coextrusão para, depois, encontrar a melhor relação diâmetro/potência possível tendo em conta a geometria dos blocos superior e inferior.

Como é sabido, a ferramenta de coextrusão é constituída por dois canais na fase inicial da sua geometria que se vai reduzir a um único canal o que, aliado às reduzidas dimensões da ferramenta de coextrusão, reduz bastante as formas possíveis de inserir as resistências no seu interior. Posto isto, uma hipótese de colocação das resistências de forma a abrangerem todos os elementos será através da inserção de uma resistência em cada bloco com orientações distintas, em que cada resistência deve ser alinhada com cada canal de admissão de material e, uma vez que os canais são convergentes entre si, as resistências também o deverão ser. Em primeiro lugar, vai ser criado um furo cego no bloco inferior orientado com o canal que define a periferia do perfil final. Ao criar este furo vai ser, desde logo, analisado qual a melhor e mais viável opção no que diz respeito ao diâmetro do furo sendo que é necessário ter em conta a área que vai ser ocupada pelo componente de acoplamento da extrusora. Com base nestas considerações, o furo ilustrado na Figura 138 foi o que mostrou ser mais viável.

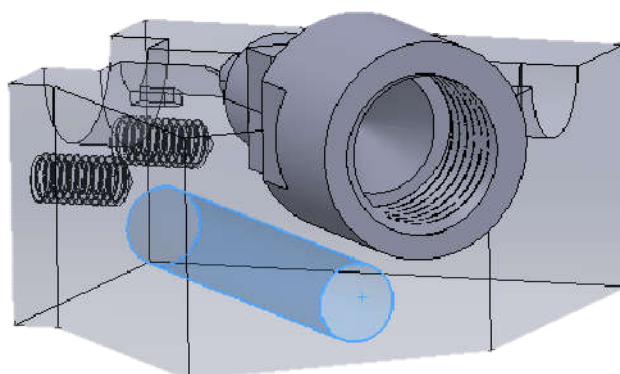


Figura 138– Abertura de furo no bloco inferior para inserção de resistência de cartucho

Após a análise da geometria do bloco inferior juntamente com o componente de acoplamento da extrusora, a geometria do furo mais viável é a que apresenta um diâmetro de 6,5mm e um comprimento de 40mm. Está, desta forma, definido o furo atinente ao bloco inferior. No que diz respeito ao bloco superior, o diâmetro do furo vai ser de 6,5mm, tal como o anterior, e o comprimento deve ser de 40mm, se o mesmo for viável. Estão assim reunidas as condições para a criação do furo no bloco superior que está representado na Figura 139.

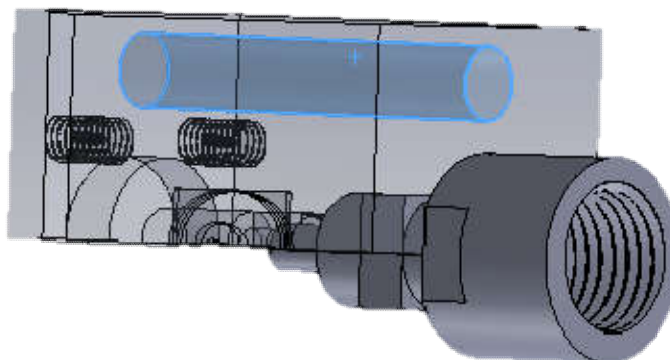


Figura 139 - Abertura de furo no bloco superior para inserção de resistência de cartucho

Para terminar esta abordagem ao aquecimento da ferramenta de coextrusão, é importante salientar que a utilização de resistência de cartucho com termopar integrado é de todo aconselhável, uma vez que é necessário um controlo rigoroso da temperatura aplicada, que deve ser específica para cada material.

4.2.6 - Alinhamento e aperto entre o bloco superior e inferior

Para terminar o desenvolvimento da ferramenta de coextrusão vai ser realizado o alinhamento e o aperto dos dois blocos. O alinhamento dos dois elementos é extremamente importante uma vez que estes elementos são o espelho um do outro e a sua união deve ser rigorosamente coincidente de forma a garantir a viabilidade de todo o processo de coextrusão. Posto isto, o alinhamento entre ambos vai ser realizado através da introdução de duas chavetas com alinhamentos diferentes de forma a garantir que ambos ficam coincidentes em todas as direções. Mais uma vez, as dimensões das chavetas devem ser definidas de forma a criar uma boa base de contacto e não pela norma DIN que lhe está associada. Relativamente ao aperto entre ambos, vai ser realizado através de do aparafusamento de um elemento no outro em que a localização dos parafusos vai ser o mais próxima possível dos canais de escoamento de forma a garantir a ausência de fugas entre os blocos. Implementado o agora descrito à geometria dos blocos, as suas configurações passam a ser as representadas na Figura 140.

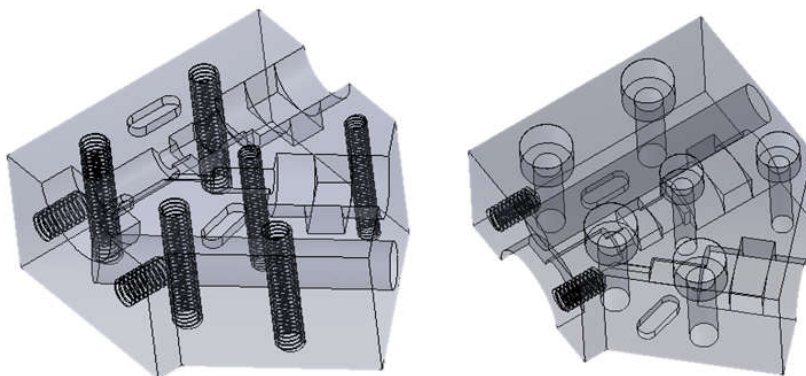


Figura 140 – Furação, roscagem e criação de rasgos para chaveta mecânica nos blocos superior e inferior

É importante salientar que, no que diz respeito à criação dos furos para aplicação dos parafusos de aperto, a localização dos mesmos teve como referência a área envolvente aos canais de escoamento para garantir um melhor aperto dos componentes internos da ferramenta

de coextrusão. Foram criados no total 6 furos em que os furos no bloco superior são os furos não roscados com um furo mais largo no topo para envolver a cabeça do parafuso e no bloco inferior foram criados os furos roscados. Dos 6 furos criados, 4 foram criados com rosca M4 e, pelo facto de existir menos espaço disponível para realizar o furo, os restantes furos são M3 e estão localizados entre os dois canais de admissão de material das extrusoras. No que diz respeito às chavetas, as suas dimensões são de 3x3x8mm e a definição da sua localização foi baseada nos requisitos mencionados anteriormente. Com vista a finalizar este tópico, é apresentada a Figura 141 que ilustra a *assemblagem* dos componentes abordados. Os parafusos a utilizar têm um comprimento de 35mm de forma a coincidirem com a face inferior da ferramenta de coextrusão.

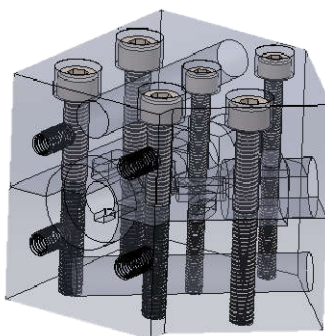


Figura 141 – Assemblagem e aperto dos blocos superior e inferior

4.3 Escolha de materiais para cada componente da ferramenta de coextrusão

No sentido de melhorar o processo de coextrusão ao máximo, é importante avaliar as condições de serviço a que cada componente constituinte da ferramenta de coextrusão vai estar sujeito, definido o material mais adequado a cada componente com base nessas mesmas condições de serviço. Como tal, é apresentado a seguir a definição do material mais adequado a cada componente da ferramenta de coextrusão tendo em conta as condições de serviço de cada um.

- **Bloco superior e bloco inferior**

Os blocos inferior e superior são responsáveis pelo acoplamento e fixação de todos os elementos constituintes da ferramenta de coextrusão e, como tal, devem ter uma resistência mecânica razoável. Adicionalmente, o material selecionado deve ter uma boa condutividade térmica de forma tornar a resistência de cartucho mais eficaz e, simultaneamente, uniformizar ao máximo a temperatura em toda a ferramenta de coextrusão. Com base nestes requisitos, uma liga de alumínio com boa resistência mecânica é um material muito viável para o fabrico destes elementos.

- **Aperto da extrusora**

O elemento de aperto da extrusora vai estar sujeito a condições de serviço muito idênticas às do doseador da extrusora, ou seja, vai estar sujeito às pressões geradas no processo de

extrusão. Assim, tal como no caso do doseador, um aço ligado é uma boa opção para este elemento.

- **Elemento de ligação**

Uma vez que o elemento de ligação não vai estar sujeito a esforços significativos, o principal requisito ao nível do material é que o mesmo tenha uma boa condutividade térmica de forma a manter a temperatura do material extrudido. Assim, a escolha de uma liga de alumínio é uma opção válida.

- **Meia-lua**

Como este elemento apenas tem como objetivo a fixação da agulha modeladora final, o principal requisito é uma resistência mecânica razoável, portanto, um aço ao carbono é uma boa opção.

- **Chapa de fixação da agulha modeladora final**

Tal como no caso da meia-lua, a chapa de fixação apenas tem como propósito a fixação da agulha modeladora final. Assim, tal como definido para a meia-lua, um aço ao carbono é uma opção viável.

4.4 – Maquinação dos componentes da ferramenta de coextrusão

Dado que a ferramenta de coextrusão não vai estar sujeita a esforços mecânicos significativos, não se justifica a análise numérica de nenhum dos seus componentes o que permite concluir que nenhuma das geometrias dos mesmos vai sofrer alterações. Como tal, vão ser apresentadas ao longo desta secção sugestões de maquinação dos componentes que constituem a ferramenta de coextrusão recorrendo novamente ao software comercial Mastercam®.

- **Bloco inferior**

Avaliando a geometria deste componente, conclui-se que o equipamento mais adequado para a sua maquinação é um centro de maquinação CNC de 4 eixos. A denominação do equipamento selecionado no software é “*GENERIC HAAS 4 – AXIS VMC MM*”. O stock inicial definido tem de dimensões 50x60x30 mm tal como ilustrado na Figura 143.

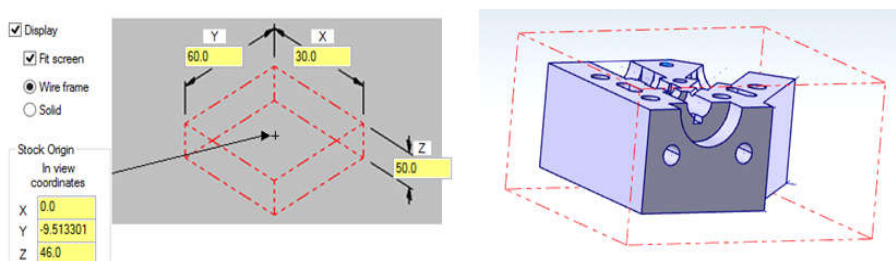


Figura 142 – Stock inicial da maquinação do bloco inferior

Os ciclos de maquinação definidos incluem fresagem, furação, roscagem e facejamento tal como ilustrado na Figura 144.



Figura 143 - Ciclos de maquinação do bloco inferior

Executando a simulação gráfica da maquinação deste elemento, a geometria obtida é a representada na Figura 145.

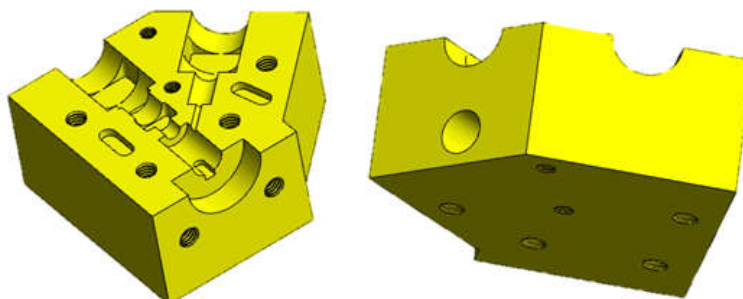


Figura 144 – Geometria final da simulação da maquinação completa do bloco inferior

○ **Bloco superior**

A maquinação do bloco superior é realizada utilizando exatamente o mesmo equipamento e o mesmo stock inicial comparativamente com a maquinação do bloco inferior. Quanto aos ciclos de maquinação, são maioritariamente os mesmos à exceção da maquinação dos 6 furos passantes e do rasgo para a chave de dimensões 4x2x2 pois o bloco superior não contém esta geometria. Como o stock inicial é exatamente o mesmo do apresentado na Figura 143 relativa ao bloco inferior, apresenta-se desde já os ciclos utilizados na maquinação do bloco superior na Figura 146 e a simulação gráfica da maquinação na Figura 147.

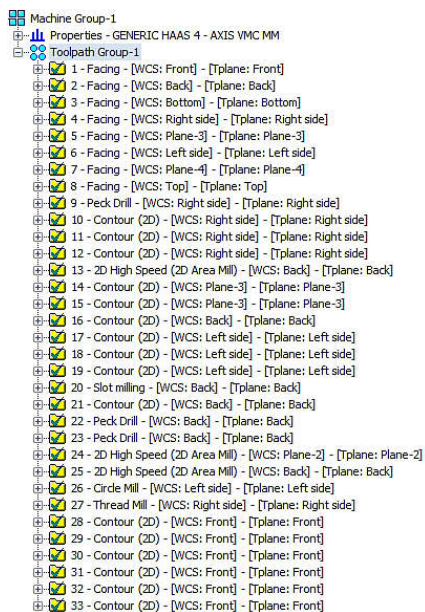


Figura 145 - Ciclos de maquinação do bloco superior

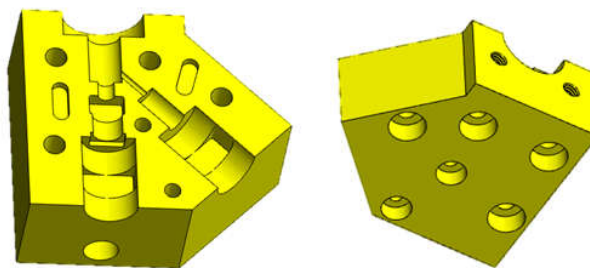


Figura 146 – Geometria final da simulação da maquinação completa do bloco superior

○ Aperto da extrusora

A geometria deste elemento é em tudo idêntica à do doseador pelo que a sua maquinação é também semelhante. O equipamento mais adequado para maquinar esta peça é um torno CNC com eixo C de, preferencialmente, duas buchas e o stock inicial de maquinação deste elemento é um cilindro com diâmetro de 30 mm e comprimento de 60 mm tal como representado na Figura 148.

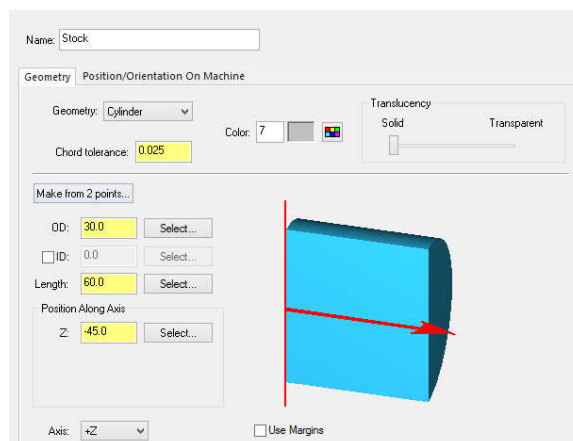


Figura 147 – Stock inicial da maquinação do elemento de aperto da extrusora

O ciclo de maquinação gerado foi dividido em duas fases distintas, uma referente à zona de maior diâmetro e seu interior que foi maquinada na bucha esquerda e após transferir o stock para a bucha direita foi definida a maquinação da restante geometria. Os ciclos de maquinação correspondentes à primeira fase encontram-se ilustrados na Figura 149.



Figura 148 – Ciclos de maquinação da zona de maior diâmetro do elemento de aperto da extrusora

Ao simular graficamente estes 8 ciclos de maquinação, obtém-se a geometria presente na Figura 150.

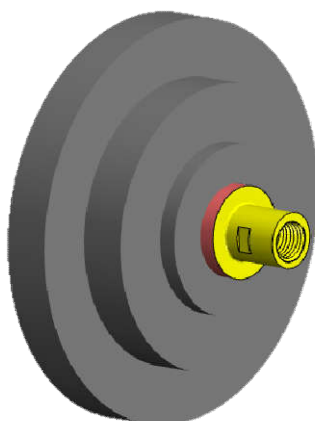


Figura 149 – Simulação da maquinação da zona de maior diâmetro do elemento de aperto da extrusora

De seguida é transferido o stock para a bucha direita definindo depois os ciclos de maquinação para a restante geometria do elemento representados na imagem 151.

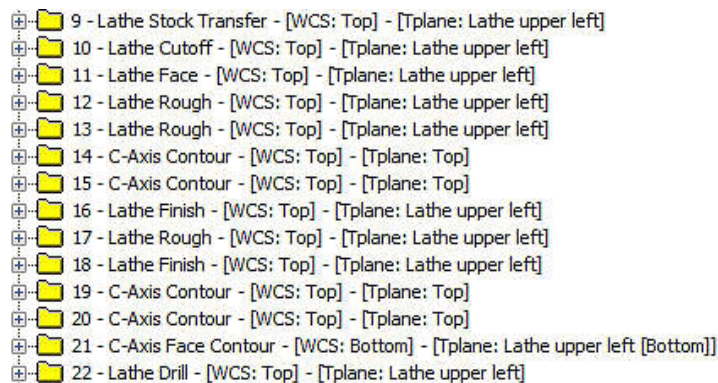


Figura 150 – Ciclos de maquinação da zona de menor diâmetro do elemento de aperto da extrusora

Após a simulação dos ciclos apresentados obtém-se a geometria final deste elemento representada na Figura 152.

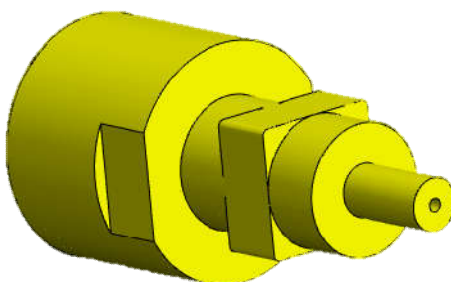


Figura 151 - Geometria final da simulação da maquinação completa do elemento de aperto da extrusora

É de salientar que a maquinação da secção quadrada deste elemento, responsável pela sua fixação na ferramenta de coextrusão, foi realizada tendo em conta a geometria obtida na maquinação da caixa onde este elemento vai encaixar, isto é, a caixa maquinação nos blocos inferior e superior ficou arredondada nos cantos devido a ter sido maquinação com uma fresa e, como tal, a secção quadrada mencionada foi também arredondada nos cantos com raio igual ao da fresa usada na maquinação da caixa. Desta forma, o encaixe entre os elementos dá-se de forma perfeita.

○ Elemento de ligação

O elemento de ligação possui uma geometria plenamente cilíndrica, que necessita de fresagem de uma face e que não necessita de ser maquinação em ambas as secções transversais pelo que o equipamento mais adequado para realizar a sua maquinação é um torno CNC de uma bucha com eixo C. O stock inicial de maquinação deste elemento é um cilindro com diâmetro de 10 mm e um comprimento de 50 mm como apresentado na Figura 153.

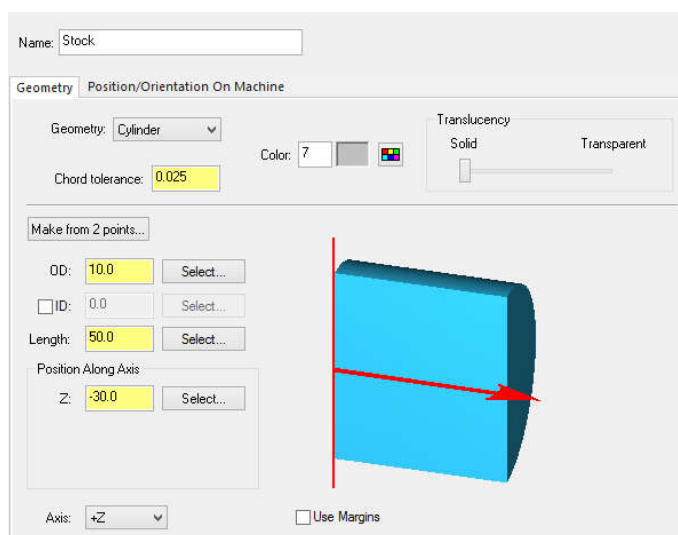


Figura 152 – Stock inicial da maquinação do elemento de ligação

Como este componente vai ser maquinação numa só bucha o ciclo final deve ser o corte da face junto à bucha de forma a extrair o componente já completo. Os ciclos de maquinação utilizados estão presentes na Figura 154.



Figura 153 - Ciclos de maquinação do elemento de ligação

Procedendo à simulação gráfica dos ciclos apresentados, a geometria final deste elemento é a apresentada na Figura 155.

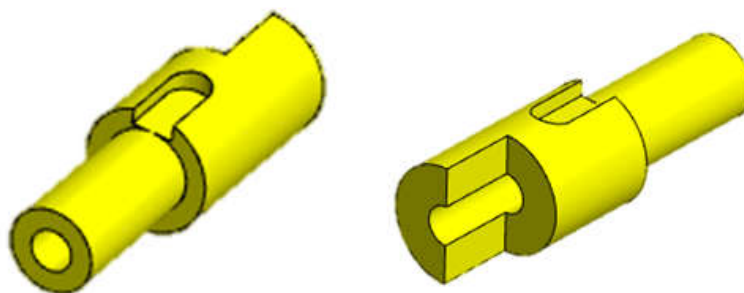


Figura 154 - Geometria final da simulação da maquinação completa do elemento de ligação

○ Chapa de fixação da agulha modeladora final

A chapa de fixação é um elemento de geometria bastante simples e que, pelas suas características, deve ser fabricado num centro de maquinação CNC de 3 eixos. O stock inicial de maquinação deste elemento tem dimensões 40x40x8 mm como mostrado na Figura 156.

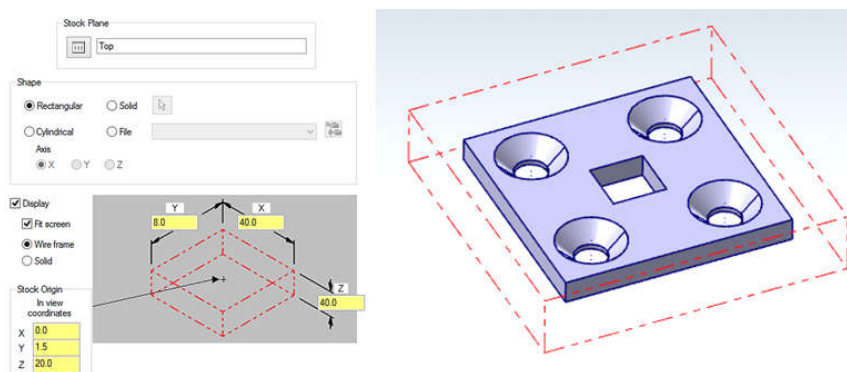


Figura 155 – Stock inicial da maquinação da chapa de fixação da agulha modeladora final

A maquinação deste elemento é realizada através de poucos ciclos como se pode verificar na Figura 157.

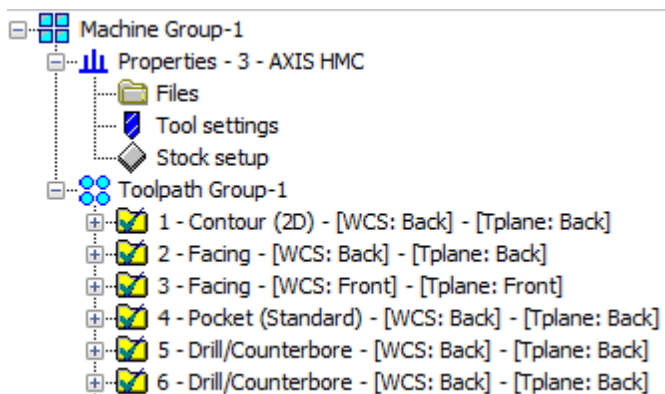


Figura 156 - Ciclos de maquinação da chapa de fixação da agulha modeladora final

Ao simular graficamente a execução dos ciclos apresentados, a geometria final obtida é a representada na Figura 158.

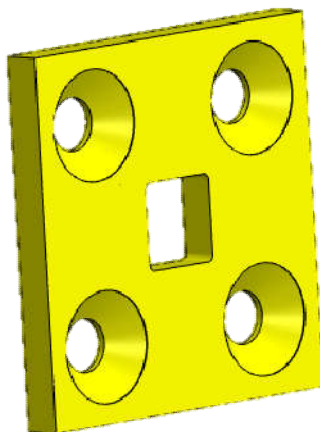


Figura 157 - Geometria final da simulação da maquinação completa da chapa de fixação da agulha modeladora final

Capítulo 5 – Conclusões e trabalhos futuros

5.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma coextrusora de precisão de dimensões muito reduzidas seguindo ao máximo as expressões empíricas de dimensionamento referentes às extrusoras no geral. Este desenvolvimento teve como referências a minimização das dimensões da coextrusora ao máximo bem como providenciar uma fácil montagem/desmontagem do equipamento. De uma forma geral, este trabalho subdividiu-se em duas fases distintas que foram o desenvolvimento da extrusora e, posteriormente, o desenvolvimento da coextrusora.

No caso do desenvolvimento da extrusora, foi impossível seguir a totalidade das expressões empíricas de dimensionamento devido às dimensões singulares e extremamente reduzidas pretendidas para o equipamento. Para além disto, foi procurado ao máximo a previsão de problemas provenientes das dimensões adotadas implementando formas de evitar os mesmos. Por fim, foi analisada e testada numericamente a viabilidade mecânica do elemento sujeito a maiores esforços originados no processo de extrusão, revelando um resultado positivo no que à viabilidade do estudo diz respeito.

Relativamente à coextrusão, as maiores dificuldades encontradas deveram-se à falta de informação sobre o dimensionamento deste tipo de equipamentos e à impossibilidade de seguir sistemas já existentes devido à incompatibilidade das dimensões dos caudais pretendidos com esses mesmos sistemas. O processo de desenvolvimento da ferramenta de coextrusão baseou-se num compromisso entre a criatividade e o espírito crítico relativo à viabilidade de cada item no que diz respeito ao processo.

De uma forma geral, o resultado final deste trabalho cumpre todos os requisitos e objetivos a que se propôs de forma muito satisfatória e com grandes expectativas no que ao processo de coextrusão diz respeito.

5.2 Trabalhos futuros

Como este projeto surge no âmbito de um Mestrado em Engenharia Mecânica o desenvolvimento da coextrusora de precisão efetuado neste trabalho teve como foco a componente mecânica sendo que a componente elétrica foi muito pouco abordada. Nesse sentido, é necessário definir os parâmetros elétricos indispensáveis para o funcionamento do equipamento. Adicionalmente, é de todo o interesse procurar uma melhoria constante no desenvolvimento deste equipamento baseado na análise do seu funcionamento. Posto isto, são enumerados de seguida alguns fatores meritórios de estudo e análise futura:

1. Definição do motor adequado a acoplar a cada extrusora;
2. Escolha e dimensionamento do dispositivo de aquecimento do material a aplicar em cada extrusora;

3. Implementação de um circuito de proteção e controlo da coextrusora;
4. Aplicação de um sistema de monitorização da temperatura ao longo da extrusora e da coextrusora;
5. Introdução de um sistema de monitorização da pressão gerada na zona crítica durante o processo;
6. Construção de um circuito de arrefecimento que alimente o canal de refrigeração das extrusoras;
7. Analisar a estanquicidade dos canais de transporte de material ao longo da ferramenta de coextrusão;
8. Estudar o comportamento da extrusora e da coextrusora com diferentes condições de serviço e diferentes materiais;

Capítulo 6 – Referências bibliográficas

- John R. Wagner, Jr, et al (2013). *Extrusion*.
- Chris Rauwendaal (2014). *Polymer Extrusion*.
- Osvaldo H. Campanella e Jean-Marie Bouvier(2014). *Extrusion Processing Technology*.
- Imporseal (2017). <http://www.imporseal.pt/213/toolflex-tipo-fole/>.
- GH Group (2017). <http://www.ghinduction.com/sobre-aquecimento-por-inducao/?lang=pt-br>.
- Dotest (1997). <http://www.dotest.es/agujas.php>.
- Resisterma (2017). <http://www.resisterma.com/pt/produtos>.

- USP (2017). <https://edisciplinas.usp.br>. Universidade de São Paulo (sebenta da disciplina de Processos de Fabricação Mecânica), Brasil.

Capítulo 7 - Anexos

7.1 - Desenhos técnicos da extrusora

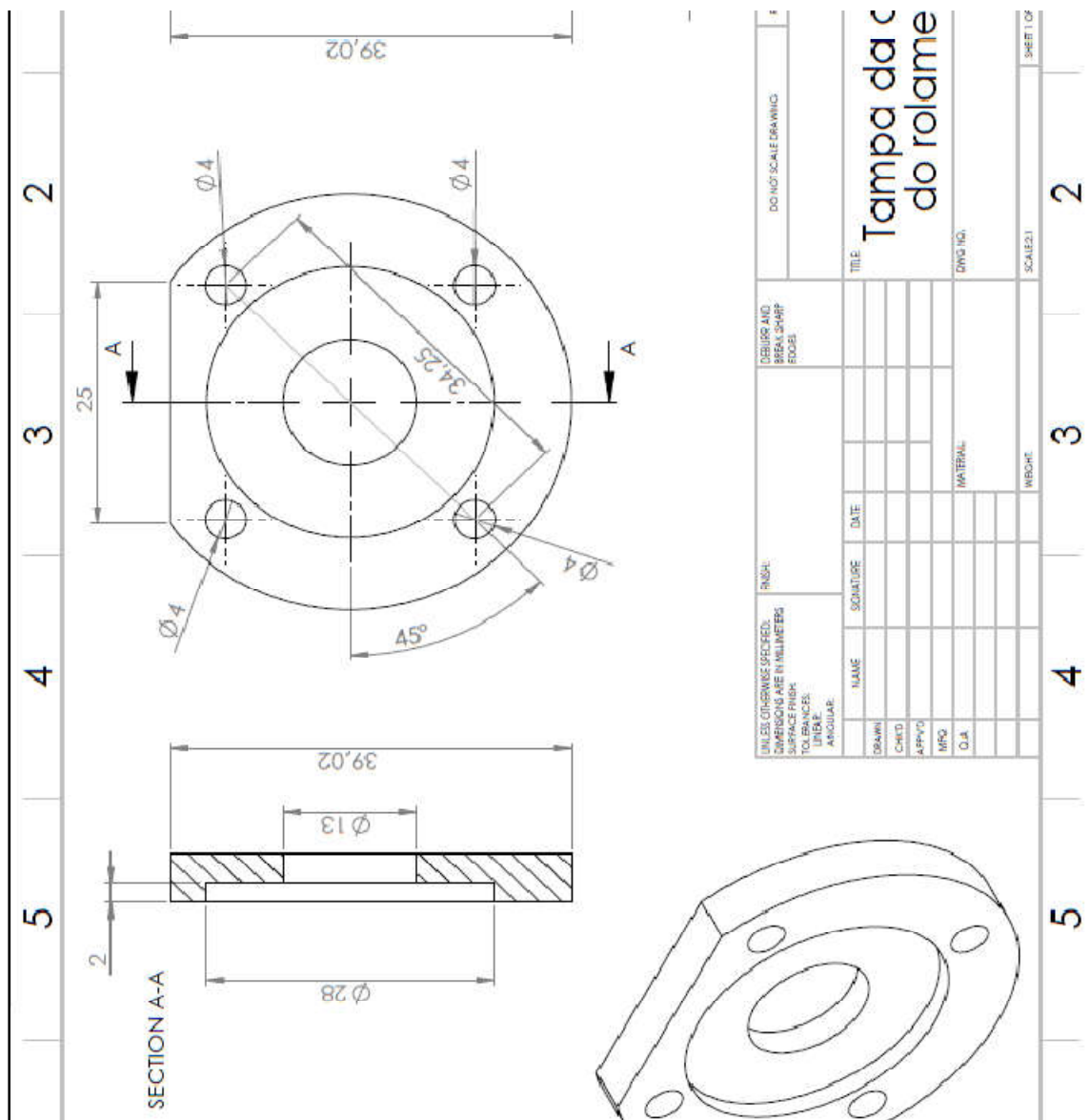


Figura 158 – Desenho técnico da tampa da caixa do rolamento

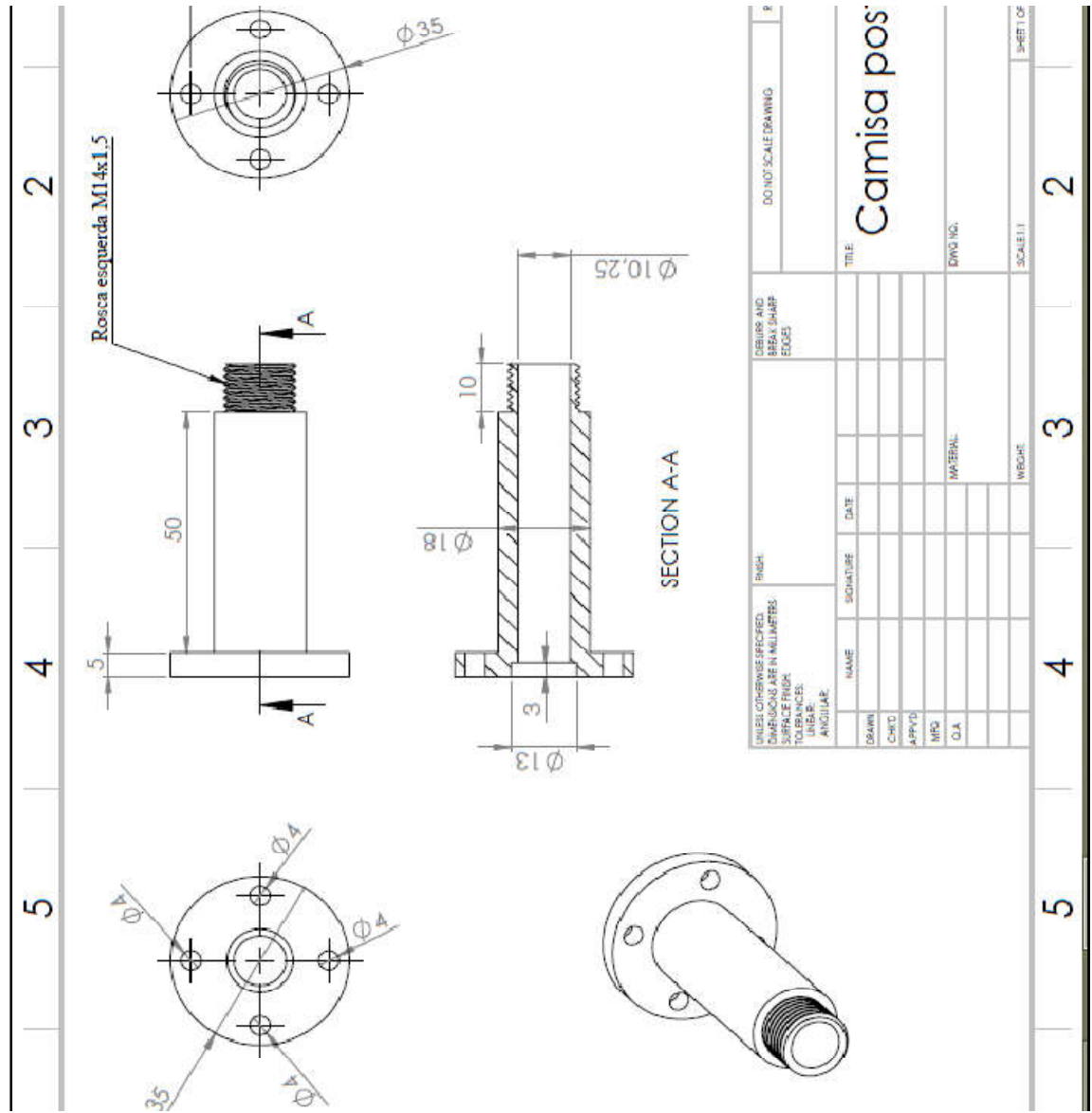


Figura 159 – Desenho técnico da camisa posterior

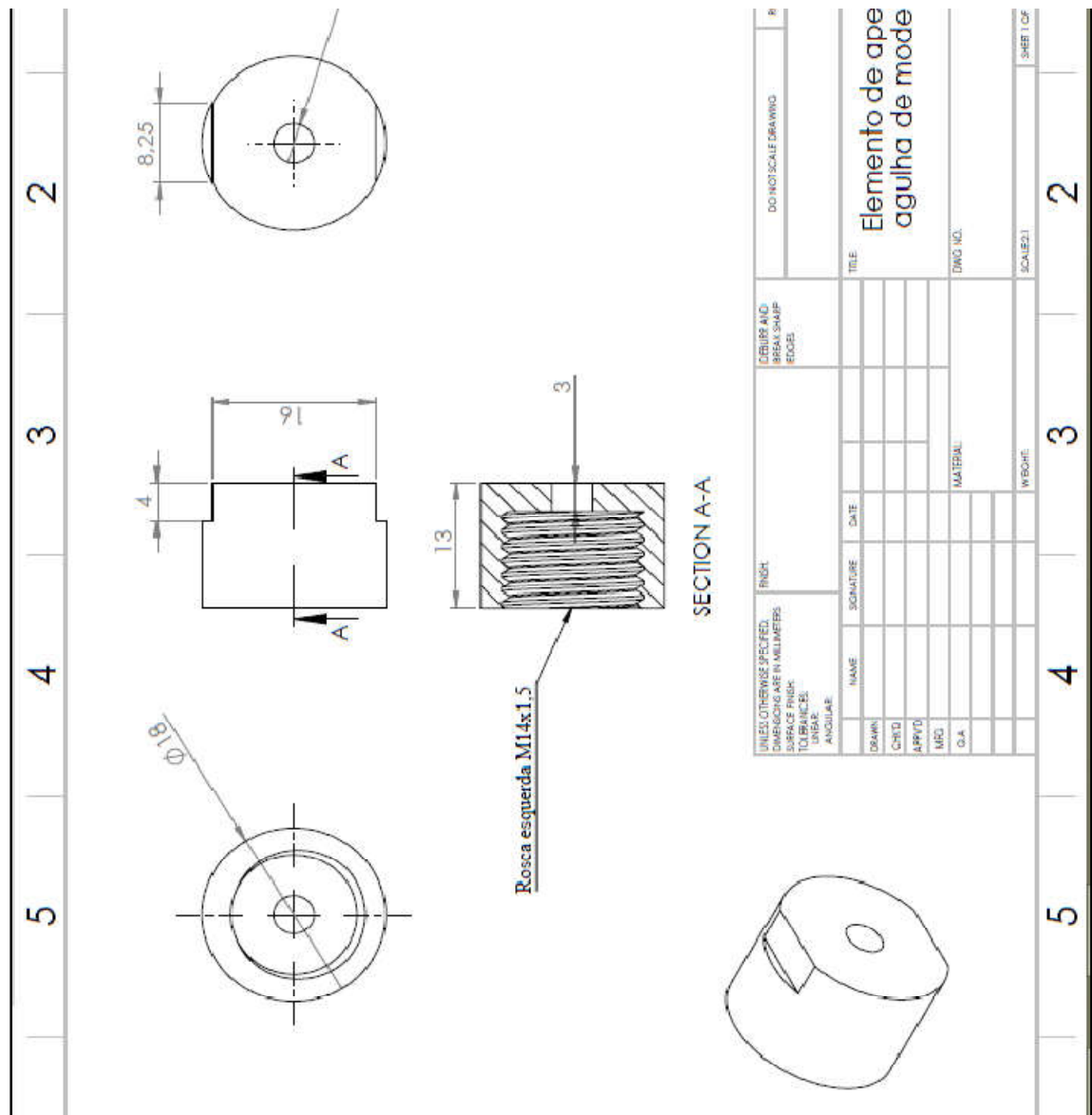


Figura 160 – Desenho técnico do elemento de aperto da agulha de modelação

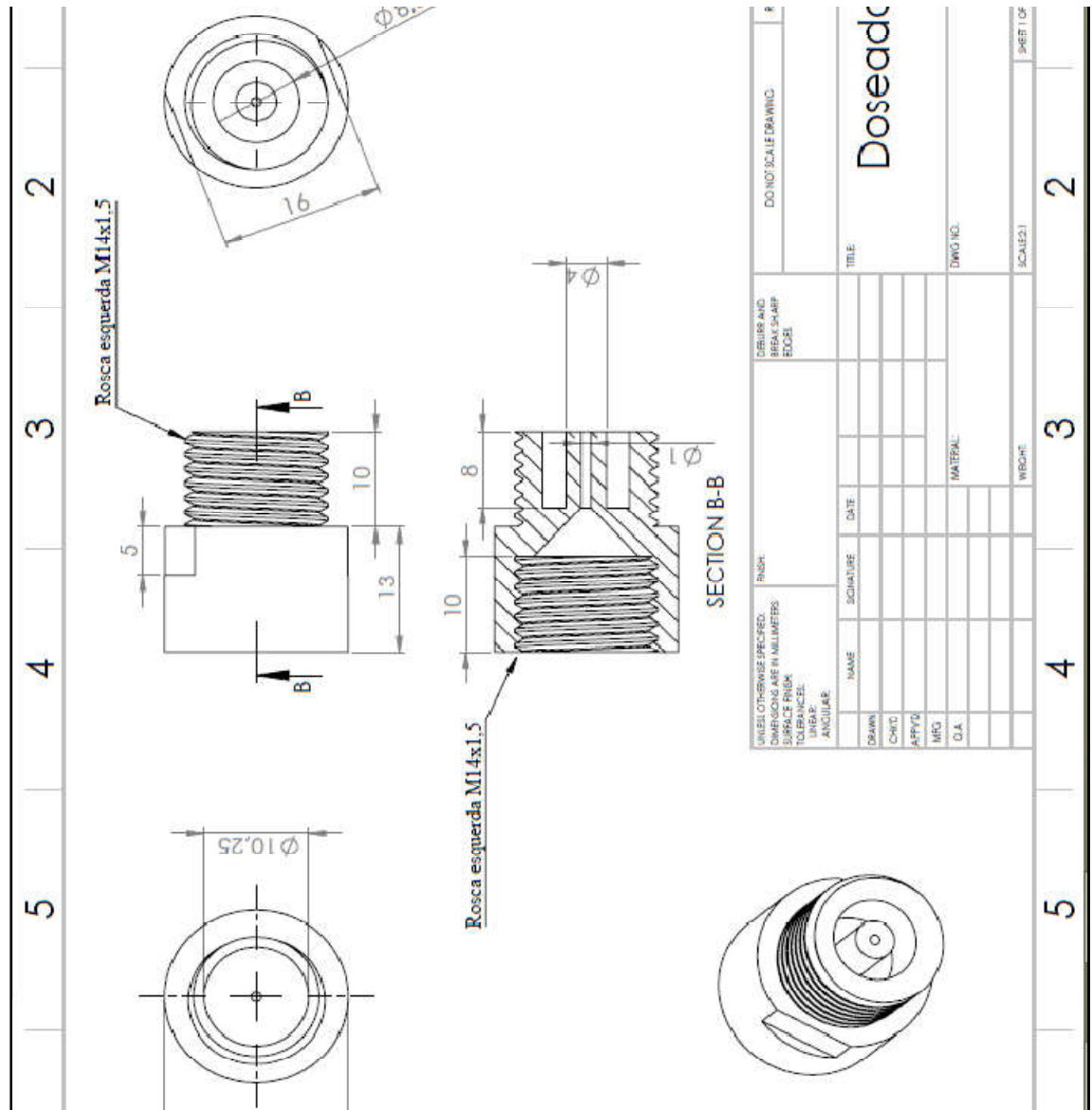


Figura 161 – Desenho técnico do doseador

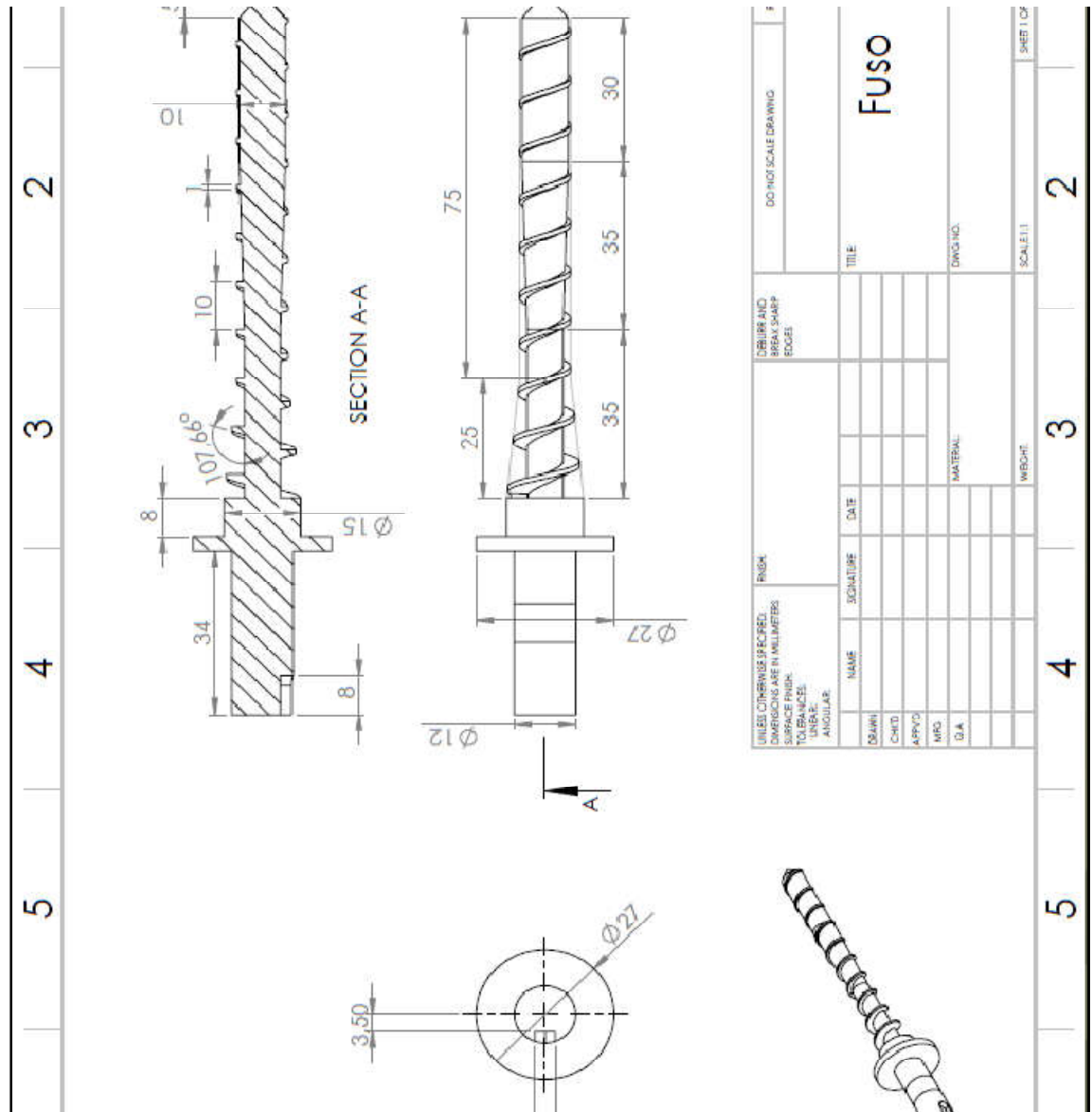


Figura 162 – Desenho técnico do fuso

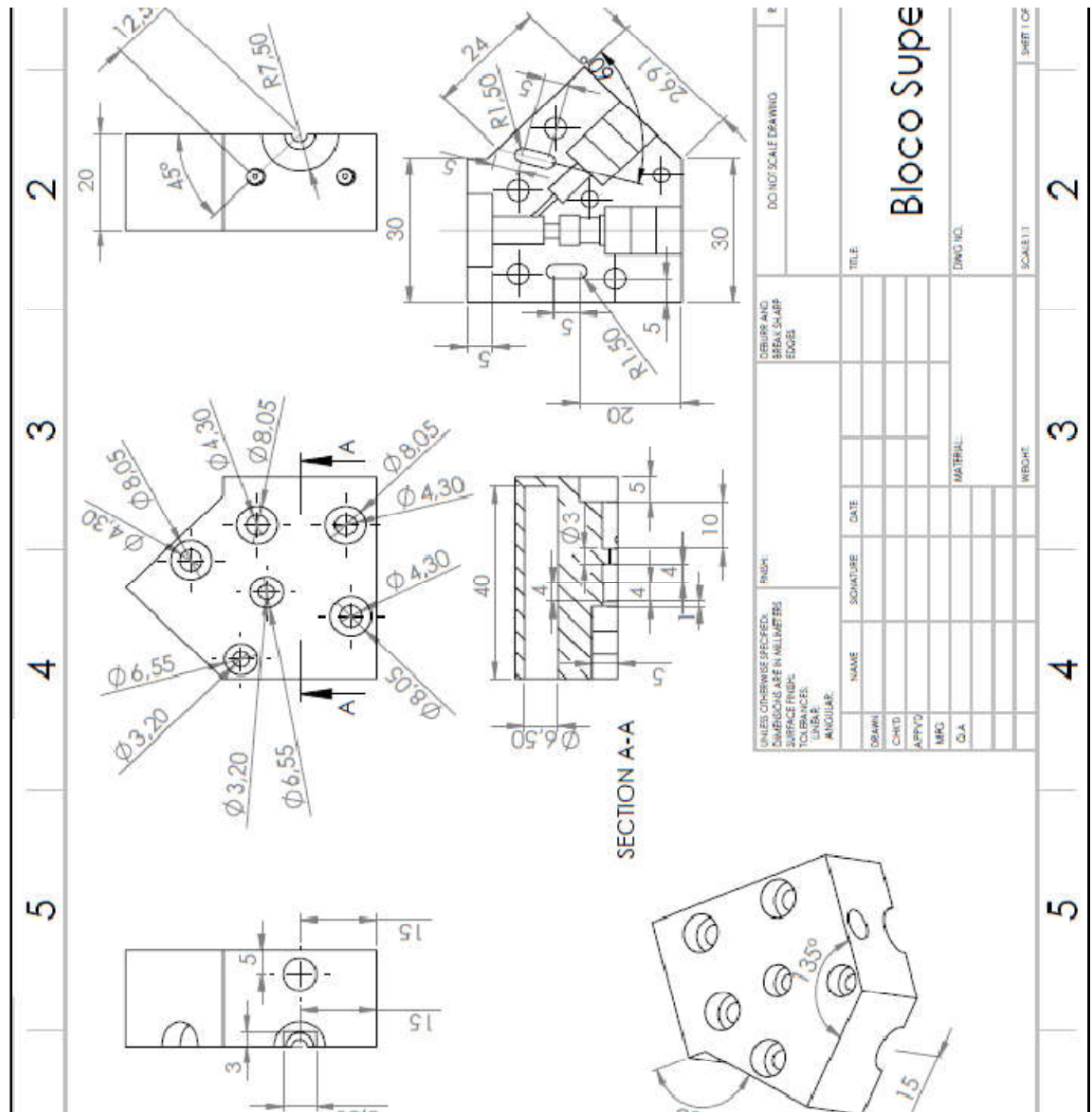


Figura 164 – Desenho técnico do bloco superior

Substituir pela folha A3 “Extrusora”

Figura 168 – Vista explodida e legendada da extrusora

Substituir pela folha A3 “Coextrusora”

Figura 169 - Vista explodida e legendada da Coextrusora

7.3 – Anexos gerais

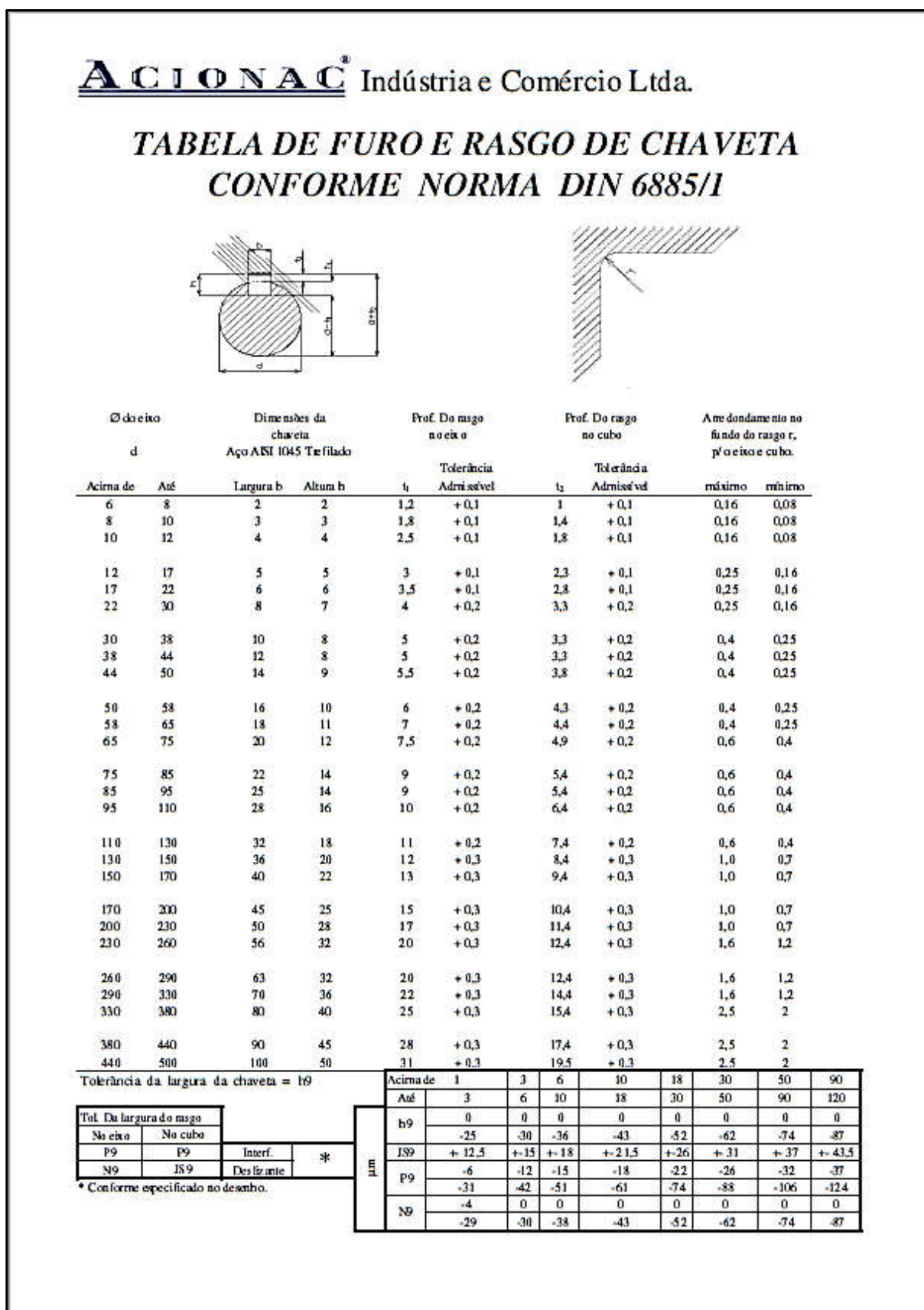


Figura 170 – Tabela da norma DIN 6885/1 para furos e rasgos de chaveta mecânica