



Adrian Munteanu

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Desenvolvimento da Tecnologia
Friction Stir Channeling Helicoidal Cilíndrico:
Aplicação no Fabrico de Permutadores

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa

Janeiro, 2022



Desenvolvimento da tecnologia
Friction Stir Channeling Helicoidal Cilíndrico: Aplicação no
Fabrico de Permutadores

Adrian Munteanu

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Júri:

Presidente: Doutora Carla Maria Moreira Machado,
Professora Auxiliar, FCT-NOVA

Arguentes: Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos,
Professor Associado com Agregação, FCT-NOVA
Doutor António José Freire Mourão,
Professor Associado, FCT-NOVA

Orientadora: Doutora Catarina Isabel Silva Vidal,
Professora Auxiliar, FCT-NOVA

Desenvolvimento da Tecnologia *Friction Stir Channeling* Helicoidal Cilíndrico: Aplicação no fabrico de Permutadores

Copyright © Adrian Munteanu, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

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

AGRADECIMENTOS

Gostava de começar por prestar um agradecimento especial à Professora Doutora Catarina Isabel Silva Vidal, pela excelente orientação, disponibilidade e conhecimento que me permitiu a realização desta dissertação.

Agradeço ao Professor Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos pelo seu conhecimento, prestação e mestria na realização dos ensaios.

Um obrigado ao Francisco Ferreira pela ajuda prestada, conhecimento e paciência. Ao Sr. Paulo Magalhães pelo auxílio prestado, ao Sr. António Campos pela perícia e ao Professor Wagner Sabor pelo conhecimento transmitido.

Deixo um enorme obrigado aos meus amigos mais próximos, colegas, companheiros e futuros Engenheiros, Tiago Silva e Mihail Vasilache. Por estarem presentes desde o primeiro dia. Agradeço toda ajuda e pelas memórias que levarei para a vida.

Demonstro, também, a minha gratidão ao António Ferreira, Daniel Damásio, Luís Gonçalves e Miguel Ameixas pela amizade e aventuras vividas.

Agradeço à Professora Marina Gomes e Professor António Prates pela disciplina, dedicação para comigo e pela motivação para alcançar mais.

Um grande obrigado à Lili, Henrique, Catarina e Miguel por acreditarem em mim, pela incentivo, compaixão e apoio.

O mais sincero e profundo obrigado à Carolina, meu porto seguro. Agradeço todo o amor, confiança e apoio incondicional. Grato pela presença, motivação e força de vontade transmitida. Sem isso, não estaria onde estou agora.

E por fim, devo o maior obrigado à minha família. À irmãzinha, Ariana, pelo amor e ao irmãozinho, Dorin, por trazer o melhor de mim. E, finalmente, aos papás, Angela e Ion, pela coragem e sacrifícios. Posso dizer, com certeza, que não foram em vão.

"Do not go gentle into that good night.
Rage, rage against the dying of the light."

Dylan Thomas

RESUMO

Com esta dissertação contribuiu-se para o desenvolvimento do processo *Friction Stir Channeling* Helicoidal Cilíndrico, uma tecnologia de processamento no estado sólido que permite a produção de canais internos contínuos, num componente monolítico cilíndrico e numa única passagem.

O principal objetivo foi a determinação dos parâmetros e seleção de ferramentas para a produção de canais estanques, com secções transversais constantes. Foram efetuados ensaios com diversas combinações de parâmetros e de ferramentas. Concluiu-se que é necessário ter especial atenção à razão entre o diâmetro da ferramenta e o diâmetro do componente cilíndrico a processar.

Após a determinação dos parâmetros e ferramentas, procedeu-se à produção de um canal helicoidal cilíndrico. Desta forma foi possível produzir, com sucesso, um permutador de calor tubular funcional. Posteriormente, o permutador foi colocado em funcionamento demonstrando a viabilidade desta tecnologia.

PALAVRAS-CHAVE

Canal interno

Estado sólido

Orbital

Helicoidal cilíndrico

Permutador de calor

ABSTRACT

In this dissertation, a contribution was made to the development of the Cylindrical Helical Friction Stir Channeling process, a solid-state processing technology that allows the production of continuous internal channels in a monolithic cylindrical component and in a single pass.

The main objective was to determine the parameters and tools for producing watertight channels with constant cross sections. Tests were carried out with various combinations of parameters and tools. It was concluded that special attention needs to be paid to the ratio of the tool diameter and the diameter of the cylindrical component.

After determining the tools and parameters, the cylindrical helical channel was produced. In this way a functional cylindrical heat exchanger could be successfully manufactured. Subsequently, the exchanger was put into operation, demonstrating the feasibility of this technology.

KEYWORDS

Internal channel
Solid State
Orbital
Cylindrical helical
Heat exchanger

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	III
RESUMO	VII
PALAVRAS-CHAVE	VII
ABSTRACT.....	IX
KEYWORDS.....	IX
ÍNDICE.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABELAS	XIX
SIGLAS	XXI
NOMENCLATURA.....	XXIII
Nomenclatura Romana.....	xxiii
Nomenclatura Grega	xxiv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Estrutura da Dissertação.....	4
2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	5
2.1 <i>Friction Stir Welding</i>	5
2.2 <i>Friction Stir Welding</i> Orbital.....	8
2.3 <i>Friction Stir Channeling</i> e as suas variantes	10
2.3.1 <i>FSC with Clearance</i>	11
2.3.2 <i>Friction Stir Channeling without Clearance</i>	13
2.3.3 <i>Modified Friction Stir Channeling</i>	14
2.3.4 <i>Hybrid Friction Stir Channeling</i>	17

2.3.5	<i>Stationary Shoulder Friction Stir Channeling</i>	18
2.3.6	Aplicações industriais e tecnologias alternativas.....	19
2.4	<i>Friction Stir Channeling</i> Orbital.....	21
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	23
3.1	Equipamento Utilizado.....	23
3.2	Escolha dos Materiais	26
3.3	Ferramentas Utilizadas	28
3.4	Escolha dos Parâmetros.....	30
3.5	Produção dos Canais Orbitais e Helicoidais Cilíndricos	34
3.6	Avaliação dos Ensaios.....	36
3.6.1	Geometria dos Canais	36
3.6.2	Caracterização Metalográfica	37
3.6.3	Mapa de Microdurezas	37
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	39
4.1	Produção dos Canais Orbitais	39
4.1.1	Conjunto Ferramenta A	39
4.1.2	Conjunto Ferramenta B.....	40
4.1.3	Conjunto Ferramenta C.....	42
4.1.4	Conjunto Ferramenta D.....	43
4.1.5	Conjunto Ferramenta E.....	44
4.1.6	Conjunto Ferramenta E'.....	47
4.1.7	Conjunto Ferramenta F.....	54
4.2	Mapa de Microdurezas	54
4.3	Caracterização Metalográfica	56
4.4	Produção do Canal Helicoidal Cilíndrico.....	58
4.5	Medição de Gradientes Térmicos em Regime Transiente do Permutador de Calor Tubular	62
5	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	67
5.1	Conclusões.....	67
5.2	Desenvolvimentos Futuros	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

APÉNDICES	73
A0	73
A1	77
A2	79
A3	81
A4	83
A5	85
A6	87
A7	89
A8	91
A9	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Processamentos baseados na tecnologia de fricção, adaptado de [2].	1
Figura 1.2 - Representação esquemática do processo FSW, adaptado de [2].	2
Figura 1.3 - Imagem microscópica do <i>wormhole</i> , adaptado de [6].	3
Figura 1.4 - Componente de trocas de calor produzido por FSC e imagem térmica deste em funcionamento, adaptado de [8].	3
Figura 2.1 - <i>Keyhole</i> obtido no FSW, adaptado de [12].	6
Figura 2.2 - Esquematização do método do pino retrátil.	6
Figura 2.3 - Flexão de um componente cilíndrico no processo FSWO. Em a) com apoios afastados e em b) com apoios próximos do ponto de ação da ferramenta.	8
Figura 2.4 - Processo FSWO num componente tubular com um apoio interno, representado a azul.	8
Figura 2.5 - Secção transversal do início de uma soldadura de tubos (AA3003 e Cobre puro), adaptado de [11].	9
Figura 2.6 - a) Esquematização das trajetórias da ferramenta no processo FSWO. Trajetória normal representada a preto e a trajetória extra representada a vermelho. b) Método <i>Run-off Ramp</i> .	9
Figura 2.7 - Esquematização da técnica <i>FSC with Clearance</i> , adaptado de [2].	11
Figura 2.8 - Regiões da técnica <i>FSC with Clearance</i> , adaptado de [18].	12
Figura 2.9 – Área da secção transversal de um canal em função da velocidade de rotação e avanço da ferramenta, adaptado de [18].	12
Figura 2.10 – Secção longitudinal dos canais. a) $\omega_f = 1200 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e $\nu_f = 2.11 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, b) $\omega_f = 800 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e $\nu_f = 1.27 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, c) $\omega_f = 800 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e $\nu_f = 0.42 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, adaptado de [18].	13
Figura 2.11 - Representação esquemática das técnicas <i>FSC with Clearance</i> (à esquerda) e <i>FSC without Clearance</i> (à direita), adaptado de [2].	13
Figura 2.12 - Ferramentas utilizadas na técnica <i>FSC without Clearance</i> , adaptado de [2].	14
Figura 2.13 – Esquematização da tecnologia MFSC, adaptado de [2].	15
Figura 2.14 - Secções transversais do canal obtido por MFSC, em 3 localizações diferentes, adaptado de [21].	15

Figura 2.15 - Representação esquemática do SCP (à direita) e UCP (à esquerda), adaptado de [2].	16
Figura 2.16 - Canal obtido com a utilização do pino SCP (à esquerda) e UCP (à direita), adaptado de [22].	16
Figura 2.17 - Representação esquemática da técnica HFSC, adaptado de [2][23].	17
Figura 2.18 - Esquematização da técnica SSFSC, adaptado de [24].	18
Figura 2.19 - Secção transversal de um canal produzido pela técnica SSFSC, adaptado de [25].	19
Figura 2.20 - Vista superior de moldes com os respetivos canais de refrigeração. À esquerda canais obtidos por processos alternativos e à direita canais obtidos por FSC.	20
Figura 2.21 - Imagem microscópica do topo e da base de um canal produzido pela técnica SSFSC, adaptado de [28].	20
Figura 2.22 - Processo FSCO efetuado pelo TWI, adaptado de [8].	21
Figura 3.1 - Representação dos componentes chave do sistema de rotação do componente.	23
Figura 3.2 – Suporte que impede a deslocação axial do varão (amarelo) e grampo de fixação (vermelho).	24
Figura 3.3 – Sistema que permite a ligação da cremalheira z_2 ao varão.	25
Figura 3.4 – Sistema final utilizado para a realização dos canais orbitais e helicoidais... ..	25
Figura 3.5 – Montagem da câmara termográfica.	26
Figura 3.6 - Vista lateral com representação do <i>offset</i> da ferramenta. Variante orbital à esquerda e variante linear à direita.	28
Figura 3.7 - Ferramenta A.	28
Figura 3.8 - Componentes da ferramenta. a) Corpo da ferramenta, b) <i>Shoulder</i> e c) pino.	29
Figura 3.9 - Restantes ferramentas utilizadas. a) Ferramenta B, b) Ferramenta C, c) Ferramenta D, d) Ferramenta E e e) Ferramenta F.	29
Figura 3.10 – Vista superior de um varão com rotação θ . À esquerda o varão apresenta apenas rotação e à direita apresenta, também, avanço ao longo do eixo l.	31
Figura 3.11 - Matriz que revela os passos possíveis de fabricar e os respetivos parâmetros.	32
Figura 3.12 – Matriz que revela as velocidades de avanço globais que se inserem no intervalo pretendido e os respetivos parâmetros.	33
Figura 3.13 – Matrizes que revelam que passo é possível de fabricar com os respetivos parâmetros, com base nos intervalos de parâmetros e passos inseridos.	33
Figura 3.14 - Método de corte do varão após o ensaio.	36
Figura 3.15 - Mapa de microdurezas efetuado.	37
Figura 4.1 - Secção transversal do canal produzido no ensaio 1.1, pelo conjunto ferramenta A.	39

Figura 4.2 - Secções transversais dos canais em 3 zonas dos ensaios 2.1 (à esquerda) efetuado com $\omega F = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e 2.4 (à direita) efetuado a $\omega F = 900 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, efetuados com o conjunto ferramenta B.....	40
Figura 4.3 - Imagens termográficas dos ensaios 2.1 (à esquerda) e 2.4 (à direita) nos respetivos picos de temperaturas registados.....	41
Figura 4.4 - Ensaios efetuados com o conjunto ferramenta B. Acabamentos exteriores dos ensaios 2.1 (à esquerda) e 2.4 (à direita).	41
Figura 4.5 – Ensaios efetuados com o conjunto ferramenta C. Acabamentos exteriores dos ensaios 3.1 efetuado com $\omega F = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ (à esquerda) e 3.2 efetuado com $\omega F = 1120 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ (à direita).....	42
Figura 4.6 – Comparação da penetração necessária para o contacto total de <i>shoulders</i> com diâmetros de 19 mm (à esquerda) e 15 mm (à direita).	43
Figura 4.7 - Ensaios efetuados com o conjunto ferramenta D. Acabamentos exteriores dos ensaios 4.1 (à esquerda) e 4.2 (à direita), ambos efetuados com $\omega F = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$	44
Figura 4.8 - Secções transversais dos canais em 3 zonas do ensaio 5.4, efetuados com o conjunto ferramenta E e com $\omega F = 900 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$	45
Figura 4.9 - Ensaio efetuado com o conjunto ferramenta E. Acabamentos exterior do ensaio 5.4.....	45
Figura 4.10 - Imagem termográfica do ensaio 5.4 no respetivo pico de temperatura registado.....	46
Figura 4.11 - Secções transversais dos canais em 3 zonas efetuados com o conjunto ferramenta E'. a) Ensaio 6.1 efetuado com $\omega F = 450 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, b) Ensaio 6.2 efetuado com $\omega F = 560 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e c) Ensaio 6.3 efetuado com $\omega F = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$...	47
Figura 4.12 - Imagens termográficas dos ensaios 6.2 (à esquerda) e 6.3 (à direita) nos respetivos picos de temperatura.	48
Figura 4.13 - Ensaios efetuados com o conjunto ferramenta E'. Acabamentos exteriores dos ensaios 6.1 em a), 6.2 em b) e 6.3 em c).	49
Figura 4.14 - Secções transversais dos canais em 3 zonas dos ensaios efetuados com o conjunto ferramenta E'. Ensaio 6.4 (à esquerda) efetuado com $\omega F = 900 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e 6.5 (à direita) efetuado com $\omega F = 1120 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$	49
Figura 4.15 - Secções transversais dos canais em 3 zonas do ensaio 6.6 efetuado com o conjunto ferramenta E e com $\omega F = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$	50
Figura 4.16 - Imagens termográficas dos ensaios 6.4 (à esquerda) e 6.5 (à direita) nos respetivos picos de temperatura.	51
Figura 4.17 - Ensaios efetuados com o conjunto ferramenta E'. Acabamentos exteriores dos ensaios 6.4 em a), 6.5 em b) e 6.6 em c).	52
Figura 4.18 - Comparação entre acabamentos exteriores dos ensaios 6.1 (à esquerda) efetuado com $\omega F = 450 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e 6.5 (à direita) efetuado com $\omega F = 1120 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$. 52	
Figura 4.19 – Secções de algumas aparas produzidas.	53

Figura 4.20 - Secções transversais dos canais em 3 zonas dos ensaios efetuados com o conjunto ferramenta E'. Ensaio 8.2 (à esquerda) efetuado com $\omega F = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e ensaio 8.4 efetuado com $\omega F = 900 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$	53
Figura 4.21 - Ensaio efetuado com o conjunto ferramenta F. Acabamento exterior do ensaio 7.2.....	54
Figura 4.22 - Mapa de microdurezas da primeira secção do ensaio 6.6.....	55
Figura 4.23 - Gráfico da variação transversal da microdureza das primeiras 6 linhas superiores.....	55
Figura 4.24 - Fluxo de material na totalidade do <i>Nugget</i> no ensaio 6.1.....	56
Figura 4.25 - Padrão do fluxo de material nos ensaios 6.1 (à esquerda) e 8.4 (à direita).	57
Figura 4.26 - Aumento do <i>Nugget</i> entre a primeira (à esquerda) e última (à direita) secção do ensaio 6.4.....	57
Figura 4.27 - Dimensão do <i>Nugget</i> constante entre a primeira (à esquerda) e última (à direita) secção do ensaio 8.2.....	57
Figura 4.28 - Camadas fortemente das encostadas. a) Ensaio 6.3, b) Ensaio 6.6, c) Ensaio 8.2 e d) Ensaio 8.3.....	58
Figura 4.29 - Parâmetros revelados pelo ficheiro <i>Exce/</i> para um intervalo de passos de 15 mm a 35 mm e um intervalo de νG de $70 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a $76 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$	59
Figura 4.30 - Aspeto final do varão após o ensaio helicoidal cilíndrico.....	59
Figura 4.31 - Aparas produzida no ensaio helicoidal cilíndrico.....	60
Figura 4.32 - Início (à esquerda) e final (à direita) da apara produzida no ensaio helicoidal cilíndrico.....	60
Figura 4.33 - Vista da secção inicial (à esquerda) e da secção final (à direita) do ensaio helicoidal cilíndrico.....	61
Figura 4.34 - Permutador de calor tubular produzido através do processo FSCO.....	62
Figura 4.35 - Direções dos caudais no permutador térmico tubular. Caudal quente representado a vermelho e o frio a azul.....	63
Figura 4.36 - Montagem efetuada para a observação dos efeitos de refrigeração do permutado de calor produzido.....	63
Figura 4.37 - Imagem termográfica da estabilidade do permutador de calor tubular com a circulação do fluido quente.....	64
Figura 4.38 - Imagem termográfica do permutador de calor tubular após o início do fluxo do líquido refrigerante.....	64
Figura 4.39 - Estabilidade térmica do ensaio térmico 2 minutos após se ter ligado a bomba do fluido refrigerante.....	65

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3-1 - Propriedades seleccionadas das 3 ligas de alumínio, adaptado de [30][31][32].	27
Tabela 3-2 - Composição química da liga AA6082-T6 (valores em %) [33]......	27
Tabela 3-3 – Parâmetros e ferramentas dos ensaios.	35
Tabela 4-1 - Áreas transversais dos canais dos ensaios 2.1 e 2.4 nas 3 secções.....	40
Tabela 4-2 - Áreas transversais dos canais dos ensaios 6.1, 6.2 e 6.3 nas 3 secções.	48
Tabela 4-3 - Áreas transversais dos canais dos ensaios 6.4, 6.5 e 6.6 nas 3 secções.	51
Tabela 4-4 - Áreas transversais dos canais dos ensaios 8.2 e 8.4 nas 3 secções.....	54

SIGLAS

AA	Aluminum alloy
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i>
FSC	<i>Friction Stir Channeling</i>
FSP	<i>Friction Stir Processing</i>
FSW	<i>Friction Stir Welding</i>
HFSC	<i>Hybrid Friction Stir Channeling</i>
MB	Material Base
MFSC	<i>Modified Friction Stir Channeling</i>
N	<i>Nugget</i>
SCP	<i>Straight Cylindrical Pin</i>
SSFSC	<i>Stationary Shoulder Friction Stir Channeling</i>
TWI	<i>The Welding Institute</i>
UCP	<i>Upward Conical Pin</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZTMA	Zona Termomecanicamente Afetada

NOMENCLATURA

Nomenclatura Romana

i_{cx}	Relação de transmissão da caixa
i_s	Relação de transmissão do sistema
i_z	Relação de transmissão das cremalheiras
L_p	Comprimento do pino a partir do <i>shoulder</i> [mm]
p	Passo de hélice [mm]
d_v	Diâmetro do varão [mm]
T_v	Período do varão [s]
v_f	Velocidade de avanço da ferramenta [mm·min ⁻¹]
v_G	Velocidade de avanço global da ferramenta [mm·min ⁻¹]
v_M	Velocidade de avanço da mesa da fresadora [mm·min ⁻¹]
v_t	Velocidade tangencial [mm·s ⁻¹]
v_{tv}	Velocidade tangencial do varão [mm·min ⁻¹]
z	Número de dentes

Nomenclatura Grega

α	Ângulo de ataque da ferramenta [°]
ω_F	Velocidade de rotação da ferramenta [rev·min ⁻¹]
ω_m	Velocidade de rotação do motor [rev·min ⁻¹]
ω_v	Velocidade de rotação do varão [rev·min ⁻¹]
ϕ_s	Diâmetro do <i>shoulder</i> [mm]

INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo será efetuado o enquadramento desta dissertação, destacando-se a tecnologia *Friction Stir Welding* e como a originou o desenvolvimento de um novo processo, o *Friction Stir Channeling*. Serão descritos, também, a motivação e objetivos desta dissertação.

1.1 Enquadramento

A necessidade da otimização de processos de produção tem crescido ao longo do tempo. Nesta evolução constante, o conhecimento adquirido de uma técnica pode ser utilizado para a melhoria de uma outra técnica ou desenvolvimento de uma nova. Um exemplo deste caso é o *Friction Stir Channeling* (FSC) que ocorreu a partir do *Friction Stir Welding* (FSW). O *Friction Stir Welding* baseia-se na união de componentes no estado sólido com a ação de uma ferramenta não consumível. Este foi patenteado pelo *The Welding Institute* (TWI), por Wayne Thomas em 1991 [1]. Este, em conjunto com o FSC e outros, indicados na Figura 1.1 são tecnologias baseadas no processamento por fricção.

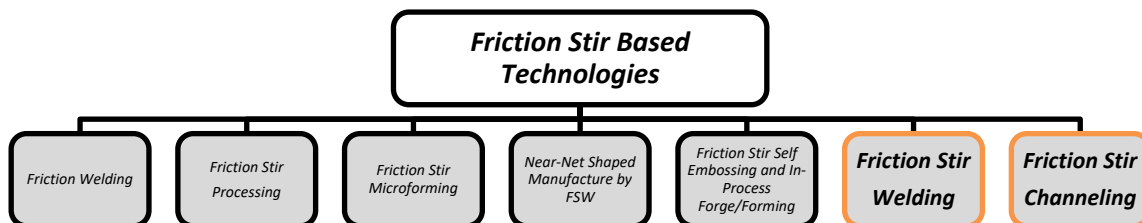


Figura 1.1 - Processamentos baseados na tecnologia de fricção, adaptado de [2].

Estas tecnologias podem ser aplicadas em diversos materiais tais como alumínio, magnésio, cobre, titânio e alguns aços [3].

Na Figura 1.2 observa-se a representação do processo FSW em conjunto com a sua nomenclatura e parâmetros. Este processo consiste numa ferramenta, composta por um pino e uma base, colocada em rotação e translação. Esta ferramenta irá efetuar o seu percurso provocando deformação plástica intensa a temperaturas elevadas, ainda que abaixo da temperatura de fusão, provocando a mistura no estado sólido dos materiais e, conseqüentemente, a soldadura [4].

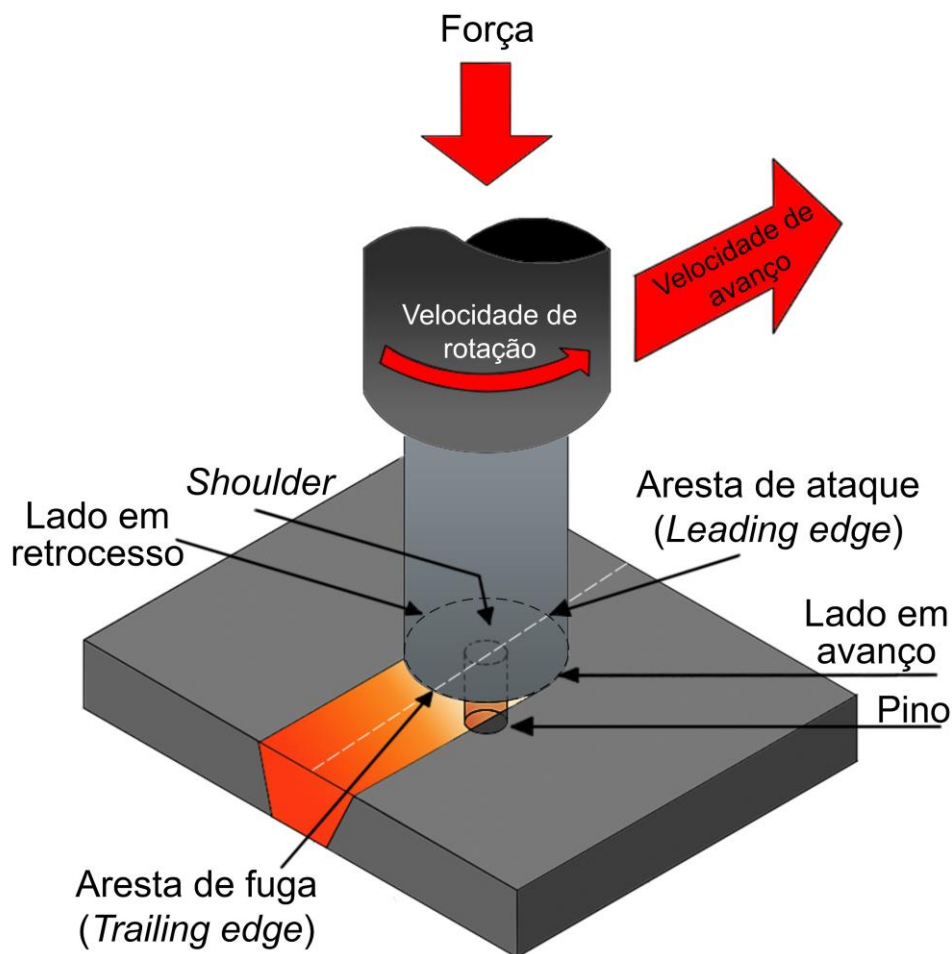


Figura 1.2 - Representação esquemática do processo FSW, adaptado de [2].

Na Figura 1.3 observa-se um dos defeitos mais comuns que ocorre no processo *Friction Stir Welding*, a criação de vazios, conhecidos por *wormholes*, no interior da zona processada. Este defeito ocorre quando os parâmetros do processo não são ideais, dando origem a pressões insuficientes debaixo da base da ferramenta, provocando escoamento de material para fora da zona processada [5].

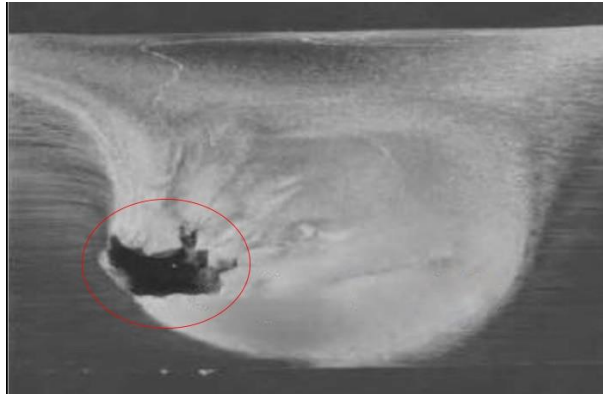


Figura 1.3 - Imagem microscópica do *wormhole*, adaptado de [6].

A origem do FSC deve-se à investigação deste defeito, determinando quais são as causas e manipulando parâmetros para que se pudesse obter um canal contínuo intencional. Esta tecnologia de produção de canais contínuos vem como resposta às limitações de outras tecnologias de produção de canais como, por exemplo, a furação, fresagem ou eletroerosão (EDM).

Em 2005, Rajiv Mishra propôs o FSC, pela primeira vez, como um processo de produção de permutadores de calor [7].

Com a utilização de uma ferramenta rotativa não consumível, produzem-se canais contínuos em componentes monolíticos, numa única passagem. Observa-se na Figura 1.4 um componente de trocas de calor produzido por FSC em conjunto com uma imagem térmica deste em funcionamento.

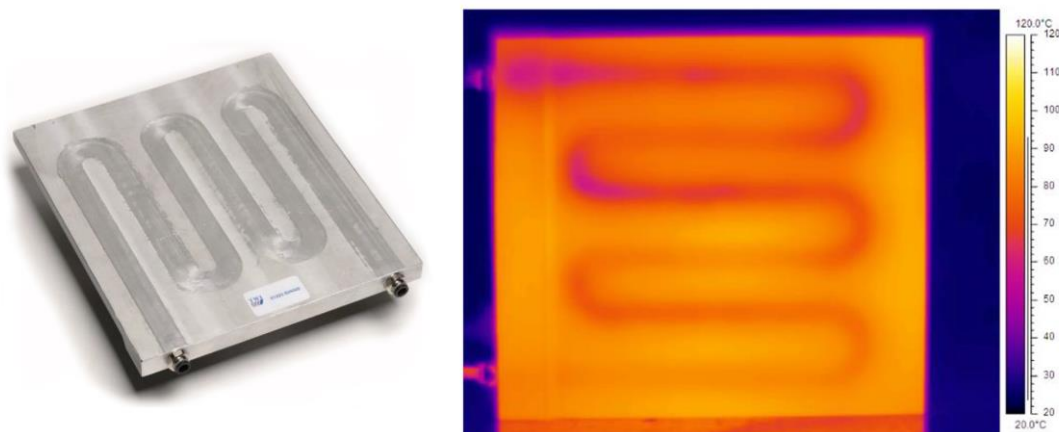


Figura 1.4 - Componente de trocas de calor produzido por FSC e imagem térmica deste em funcionamento, adaptado de [8].

Este processo apresenta potencial para se tornar muito relevante na indústria, mais particularmente onde as trocas de calor são críticas para o bom funcionamento do componente, como por exemplo moldes de injeção ou câmaras de combustão.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consistiu na determinação de ferramentas e de parâmetros adequados para a realização do FSC Helicoidal Cilíndrico, de modo a produzir canais sub-superficiais contínuos e helicoidais num componente cilíndrico. Para tal, estabeleceram-se os seguintes objetivos intermédios:

- Modificação do equipamento disponível, que permitiu o *Friction Stir Welding* Orbital (FSWO).
- Estabelecer uma correlação empírica entre os parâmetros e morfologia do canal
- Produção de canais orbitais.
- Caracterização dos canais orbitais produzidos e seleção dos parâmetros e ferramentas mais adequadas.
- Produção, caracterização e validação do canal helicoidal cilíndrico produzido.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação é composta por 5 capítulos. No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão breve do estado da arte da tecnologia *Friction Stir Welding* e a sua variante orbital, e posteriormente, uma revisão mais detalhada da tecnologia *Friction Stir Channeling*.

No Capítulo 3 está descrita a metodologia experimental deste estudo. Estão descritos os equipamentos utilizados, o material processado, as ferramentas e os parâmetros utilizados e a metodologia de produção e avaliação dos canais obtidos.

No Capítulo 4 foram analisados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios relativos à geometria dos canais e à caracterização metalográfica.

E por fim, no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões retiradas com base nos resultados obtidos e uma proposta para desenvolvimentos futuros.

REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é descrito de forma mais detalhada o processo *Friction Stir Welding* e a sua variante orbital. Serão apresentadas e explicadas de forma cronológica, as variantes tecnológicas do *Friction Stir Channeling*. E, de forma breve, algumas das principais aplicações industriais da tecnologia serão apresentadas em conjunto com as suas tecnologias alternativas. E, por fim, será apresentado o progresso existente no processo *Friction Stir Channeling* Orbital.

2.1 Friction Stir Welding

Desde o seu desenvolvimento, o FSW tem sido aplicado cada vez mais na indústria e, simultaneamente, tem sido um processo muito investigado [2].

Como explicado no capítulo anterior, o processo efetua a ligação, no estado sólido, de dois componentes com a utilização de uma ferramenta não consumível composta por um pino e um *shoulder*. O pino ao ser colocado em rotação e translação, provoca deformação plástica elevada e um acréscimo da temperatura que, dependendo dos parâmetros do processo, pode chegar a 80% da temperatura de fusão do material [9].

Com base nas referências analisadas, de modo genérico, os componentes soldados mantêm as propriedades mecânicas do material base. Essa tendência é mais acentuada nos componentes de espessura fina que apresentam essas propriedades muito próximas ou até iguais ao do seu material base.

Num artigo de revisão, publicado por Murray W. Mahoney, é mencionado que para chapas de 4 mm de espessura, a tensão de cedência mantém-se entre 66% e 87% da tensão de cedência do material base. Para chapas finas, com espessura de 1.6 mm, esta é mantida entre 90% a 100% da tensão de cedência do material base. Foi, também, apontado que as ligações soldadas mantinham cerca de 80% da tensão de rotura do material base [10].

Num outro estudo concluiu-se que, numa soldadura dissimilar de componentes de espessura fina de alumínio e cobre, a soldadura apresentou 100% da tensão de rotura do alumínio e 94% da do cobre [11].

Na Figura 2.1 pode-se observar o *keyhole* obtido na saída da ferramenta, no final do processo FSW.

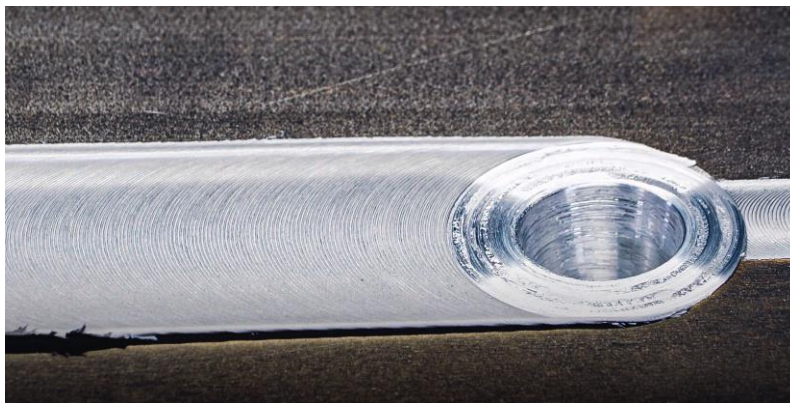


Figura 2.1 - *Keyhole* obtido no FSW, adaptado de [12].

Os métodos mais comuns que se utilizam para evitar o *keyhole* no componente são a utilização de material de sacrifício ou de pinos retráteis.

O método do material de sacrifício consiste em colocar um material de sacrifício em contacto com o componente e terminar a trajetória da ferramenta nesse material, para que o *keyhole*, criado pela saída da ferramenta, fique no mesmo e não no componente. E, no final do processo, o material de sacrifício é removido ficando com o componente processado sem o *keyhole*.

Na Figura 2.2 observa-se o método do pino retrátil. Este consiste, tal como o nome sugere, num pino móvel que, ao se aproximar do final do seu percurso, vai sendo removido da zona de mistura (a laranja) para dentro do *shoulder* da ferramenta [16].

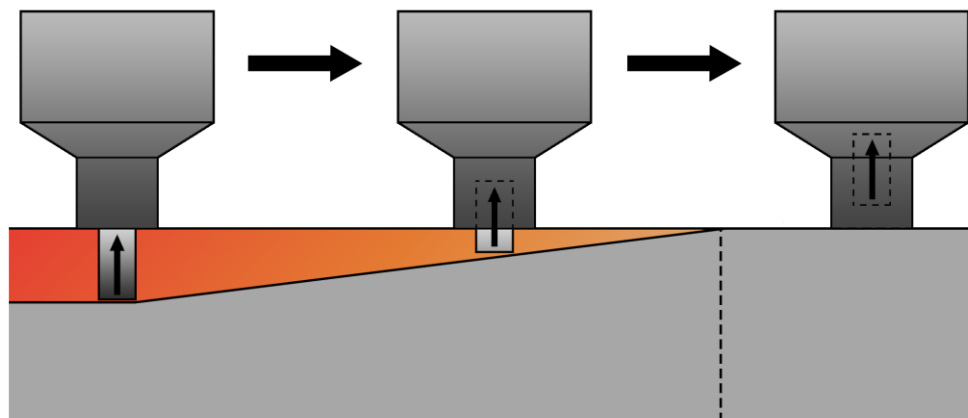


Figura 2.2 - Esquematização do método do pino retrátil.

As vantagens desta tecnologia são [4]:

- Obtenção de ligações com grande resistência mecânica sem a necessidade de aplicação de calor externo.
- Possibilidade de ligação entre materiais similares e dissimilares.
- Os componentes apresentam um bom acabamento superficial.
- Não é utilizado material de adição ao contrário dos processos de soldadura por arco elétrico.
- De forma geral, não afeta, significativamente, as propriedades do material.

Enquanto as suas desvantagens são [11]:

- A ferramenta ao ser retirada no final do processo, forma um *keyhole* no componente.
- São necessárias forças verticais de forjamento elevadas, entre 53-85 kN [14].
- É necessária uma fixação muito robusta.
- Como apresenta velocidades de avanço lentas, 16-350 mm·min⁻¹ [14,15,16], mostra-se menos flexível comparativamente aos processos de soldadura por fusão.

É de notar que os intervalos de forças verticais de forjamento e de velocidades de avanço, dependem fortemente dos materiais processados, das ferramentas e dos parâmetros.

2.2 Friction Stir Welding Orbital

O processo *Friction Stir Welding* Orbital (FSWO) consiste na aplicação do processo FSW em componentes cilíndricos ou tubulares. Estes são processos muito semelhantes, sendo as principais diferenças o equipamento utilizado, a trajetória da ferramenta e o método de fixação do componente.

O FSW Orbital requer especial atenção à localização dos apoios do componente. Observando a Figura 2.3, verifica-se que se a distância entre os apoios e a ferramenta for elevada, haverá flexão provocada pela força descendente da ferramenta que poderá comprometer o processo.

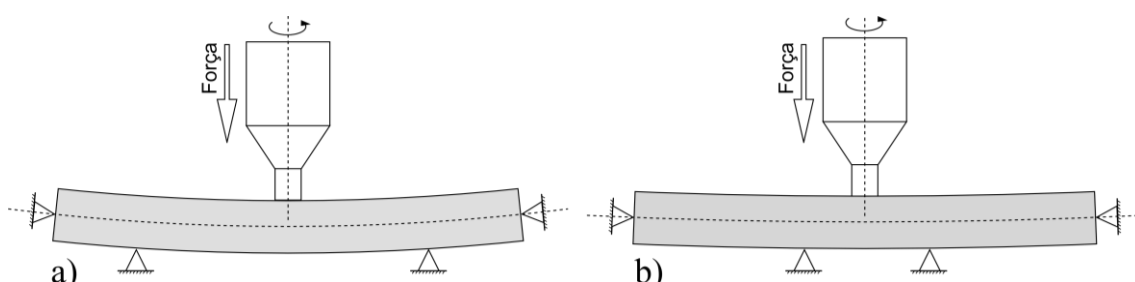


Figura 2.3 - Flexão de um componente cilíndrico no processo FSWO.

Em a) com apoios afastados e em b) com apoios próximos do ponto de ação da ferramenta.

Quando se pretende efetuar FSW em componentes tubulares tem de se ter em conta, para além do que foi mencionado anteriormente, a necessidade de um apoio interno para evitar, ainda mais, esses efeitos da flexão, tal como se pode observar na Figura 2.4.

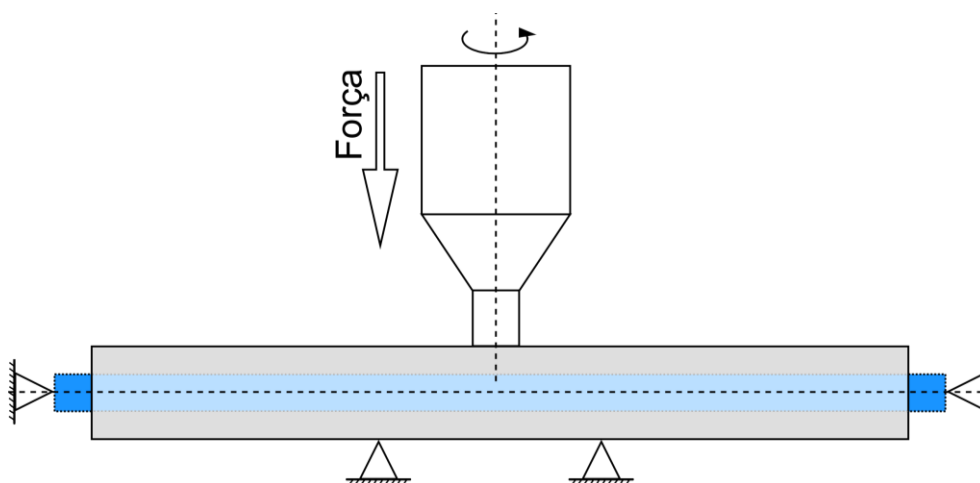


Figura 2.4 - Processo FSWO num componente tubular com um apoio interno, representado a azul.

Os defeitos que ocorrem no FSWO, tal como seria de esperar, são os mesmos que no processo FSW, sendo o principal deles o *wormhole*, com a particularidade de ser mais comum no início do processo, geralmente nos primeiros 40° da rotação, para um tubo de 19 mm de diâmetro [11].

Na Figura 2.5 observa-se esse defeito numa soldadura orbital de 2 tubos finos de alumínio e cobre.



Figura 2.5 - Secção transversal do início de uma soldadura de tubos (AA3003 e Cobre puro), adaptado de [11].

Para evitar a sua ocorrência, a ferramenta percorre, para além da rotação completa, 40° extra de modo a voltar a processar o início da soldadura, mitigando o defeito [11]. Este método pode ser observado na Figura 2.6-a).

Utiliza-se, tal como no FSW, material de sacrifício para efetuar a saída da ferramenta sem deixar o *keyhole* no componente. Na vertente orbital utiliza-se um método denominado *Run-Off Ramp*, onde o material de sacrifício, o componente a vermelho na Figura 2.6-b), é removido no final do processo. Também é possível utilizar a tecnologia do pino retrátil, explicada no processo FSW.

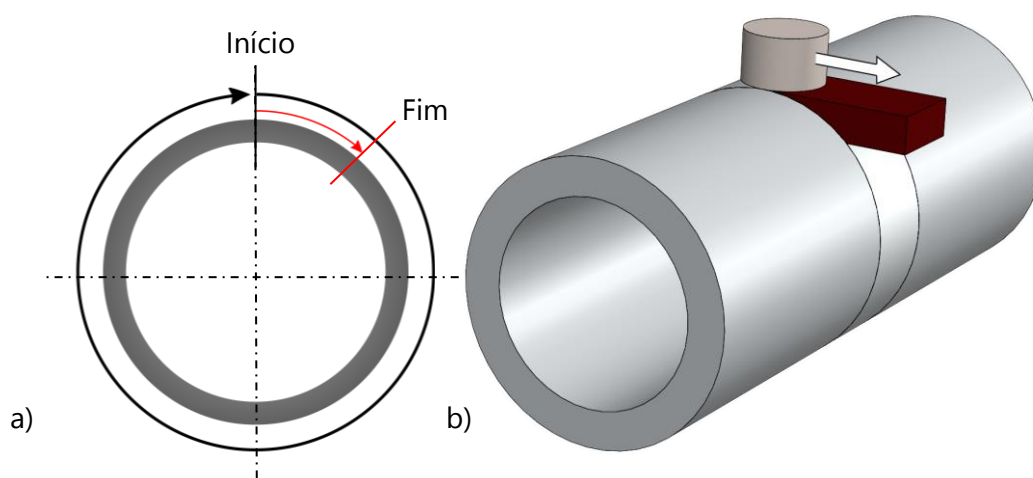


Figura 2.6 - a) Esquemática das trajetórias da ferramenta no processo FSWO. Trajetória normal representada a preto e a trajetória extra representada a vermelho.
b) Método *Run-off Ramp*.

2.3 *Friction Stir Channeling* e as suas variantes

O FSC é um processo, recente e em desenvolvimento, de processamento no estado sólido. Neste, a ferramenta, não consumível constituída por um *shoulder* e um pino, é colocada em rotação e translação e efetuará a trajetória definida. Obtendo assim, um canal contínuo, interno e estável num componente monolítico, com uma só passagem [2].

No entanto, como com qualquer processo de fabrico, os parâmetros têm de estar corretamente definidos de forma que se obtenham canais contínuos, estanques e com a sua geometria constante ao longo do seu comprimento.

Os principais parâmetros do processo FSC são [17]:

- Geometria da ferramenta;
- Velocidade de avanço da ferramenta
- Velocidade e sentido (horário ou anti-horário) de rotação da ferramenta;
- Controlo de posição ou de força;

Os parâmetros secundários são [17]:

- Espessura da peça;
- Ângulo de ataque da ferramenta, α [°];
- Material da ferramenta;
- Comprimento do pino;
- Penetração do pino;
- Trajetória da ferramenta;

Os processos FSW e FSC são muito semelhantes entre si, funcionam na base dos mesmos fundamentos físicos (deformação plástica, estado viscoplástico e atrito). A principal diferença entre estes processos reside na forma como são realizados.

O FSW foi desenvolvido para ligar materiais, utilizando um fluxo descendente de material com o objetivo de preencher e forjar a junta. São utilizadas uma ferramenta e uma conjugação da rosca do pino e sentido de rotação que permite a ligação dos materiais.

Enquanto no FSC utiliza-se o fluxo de material ascendente para o extrair do interior de um componente maciço. Neste é utilizado uma ferramenta semelhante com uma conjugação de rosca e sentido de rotação que permite a extração do material. Por isso os parâmetros acabam por ser comuns aos dois processos.

Os processos FSW e FSC são, também, muito semelhantes quanto à saída da ferramenta no final do seu percurso. No FSC pode-se utilizar a mesma estratégia do material de sacrifício ou utilizar o *keyhole* no final do canal como entrada ou saída de fluido.

2.3.1 FSC *with Clearance*

A primeira variante do FSC que surgiu foi o FSC *with Clearance*. Baseou-se na conversão da formação do defeito, *wormhole*, do processo FSW. Os parâmetros foram de tal forma manipulados que foi possível obter um canal interno, fechado e contínuo em componentes monolíticos.

Existem dois aspetos relevantes desta variante, um deles consiste na utilização de um pino roscado, onde a sua rotação provoca um escoamento ascendente do material até encontrar o *shoulder* da ferramenta. Outro aspeto relevante consiste na utilização de um espaçamento entre o *shoulder* da ferramenta e o componente a processar, tal como se observa na Figura 2.7. Este é o aspeto que mais diferencia o processo do FSW e *Friction Stir Processing* (FSP), nestes, esse espaçamento não pode existir. O espaçamento permite a deposição do material na superfície do componente dando origem ao canal. Podendo ser alterado de forma a controlar a geometria, dimensão, e integridade do canal [18].

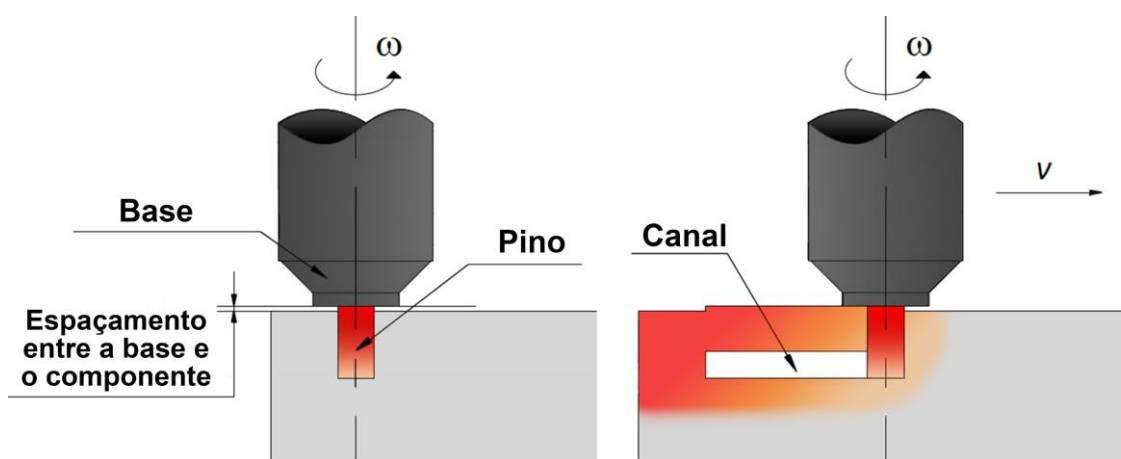


Figura 2.7 - Esquematização da técnica *FSC with Clearance*, adaptado de [2].

Em 2009, Balasubramanian *et al.* efetuaram a primeira caracterização dos canais, na liga de alumínio comercial AA6061. Foi concluído que a trajetória da ferramenta e, consequentemente, do canal pode ser tanto linear como curvilínea, no plano [18].

Na Figura 2.8 observa-se a secção transversal de um canal obtido e as suas regiões. A região A e B representam a zona de mistura (também conhecida por *Nugget*), a região C representa o material não processado, a região D o canal e a região E o material extraído e depositado.

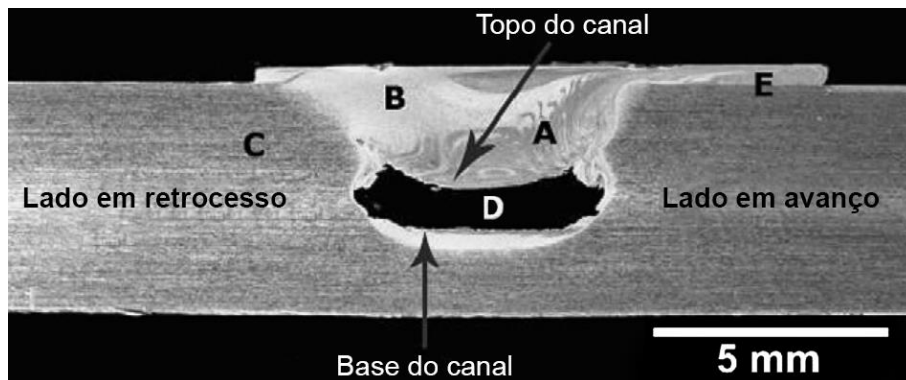


Figura 2.8 - Regiões da técnica FSC *with Clearance*, adaptado de [18].

Concluiu-se que a geometria do canal está diretamente relacionada com as velocidades de rotação e de avanço da ferramenta como se pode observar na Figura 2.9.

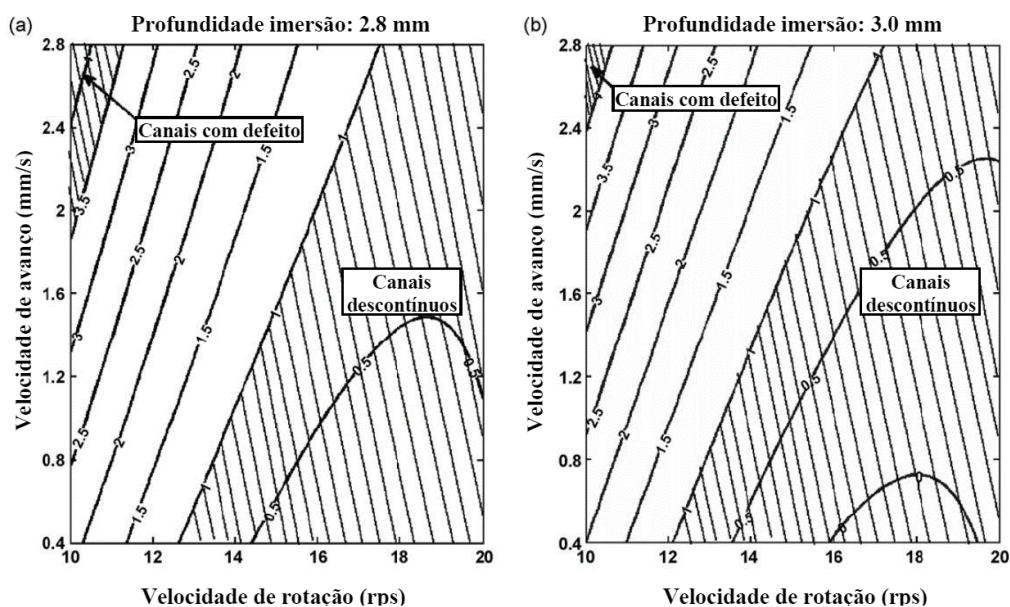


Figura 2.9 – Área da secção transversal de um canal em função da velocidade de rotação e avanço da ferramenta, adaptado de [18].

Observou-se que a rugosidade do topo do canal era superior quando comparada à dos restantes lados. Observando a Figura 2.10, esta rugosidade é previsível, pois a sua periodicidade relaciona-se como volume de material extraído e com a distância que a ferramenta avança por revolução.

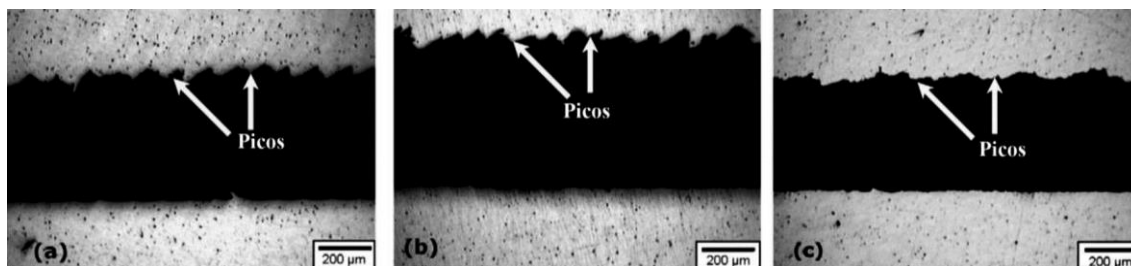


Figura 2.10 – Secção longitudinal dos canais.

a) $\omega_f = 1200 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e $v_f = 2.11 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, b) $\omega_f = 800 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e $v_f = 1.27 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, c) $\omega_f = 800 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e $v_f = 0.42 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, adaptado de [18].

2.3.2 Friction Stir Channeling without Clearance

A variante anteriormente apresentada, altera a dimensão dos componentes, seja por deposição ou por desvio. Em 2012, Vidal *et al.* patentearam uma nova variante de abertura de canais internos e contínuos sem alterar a dimensão do componente [19].

Comparando com a variante FSC *with Clearance*, existem duas diferenças entre elas. Uma consiste na eliminação do espaçamento entre a ferramenta e o componente. A outra consiste na forma como é depositado o material extraído. É possível visualizar na Figura 2.11 que na técnica FSC *with Clearance* o material é depositado acima da zona processada, enquanto no FSC *without Clearance* o material é removido para a periferia da zona processada, sob forma de rebarba, não alterando a dimensão do componente.

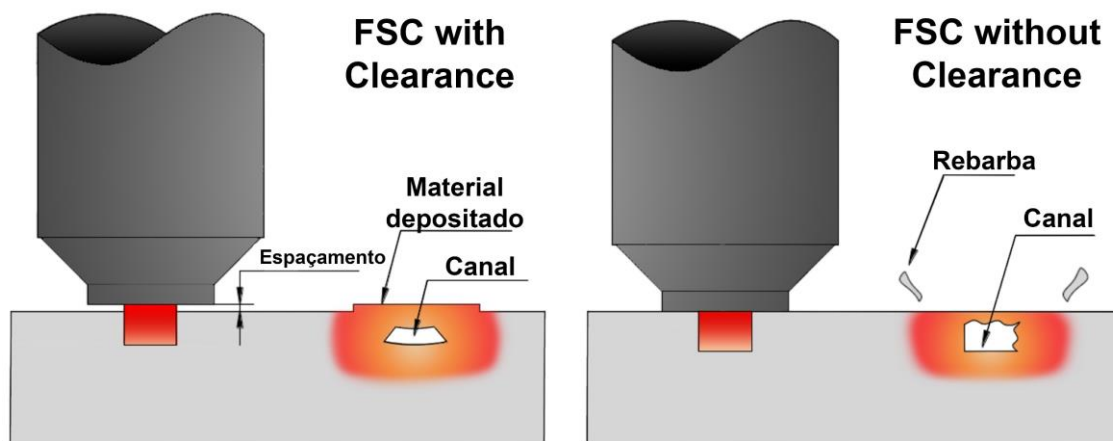


Figura 2.11 - Representação esquemática das técnicas FSC *with Clearance* (à esquerda) e FSC *without Clearance* (à direita), adaptado de [2].

A remoção do material extraído sob forma de rebarba deve-se à geometria do *shoulder* da ferramenta.

Na Figura 2.12 podem ser observadas algumas ferramentas utilizadas nesta técnica, a face do *shoulder* que está em contacto com o componente apresenta uma ou mais estrias em espiral que, quando o material extraído chega ao *shoulder*, é expulso sob forma de rebarba para a periferia da zona processada [19].



Figura 2.12 - Ferramentas utilizadas na técnica FSC *without Clearance*, adaptado de [2].

É possível acoplar ao *shoulder* da ferramenta uma pastilha de corte que removerá o material depositado sob forma de rebarba. Assim, o processo efetua-se numa única passagem obtendo um componente com um acabamento superficial tornando possível a sua utilização imediata [19].

Na variante onde existe um espaçamento entre o *shoulder* da ferramenta e do componente, a capacidade de efetuar canais numa gama de dimensões superiores é limitada. O espaçamento tem de ser pequeno o suficiente de forma a manter o canal fechado. Enquanto, nesta variante, o *shoulder* da ferramenta está em constante contacto com a superfície do componente. Assim, a dimensão do canal pode ser ajustada com a alteração dos parâmetros ou com a alteração da geometria da ferramenta, o que aumenta a gama de dimensões possíveis dos canais [20].

2.3.3 *Modified Friction Stir Channeling*

Em 2013, Rashidi *et al.* apresentaram uma nova variante que consistia em modificações simples em relação ao *FSC with Clearance*. Estas modificações, que se podem observar na Figura 2.13, consistiram na utilização de um pino cilíndrico sem rosca e na inclinação ligeira da ferramenta em relação ao componente a processar.

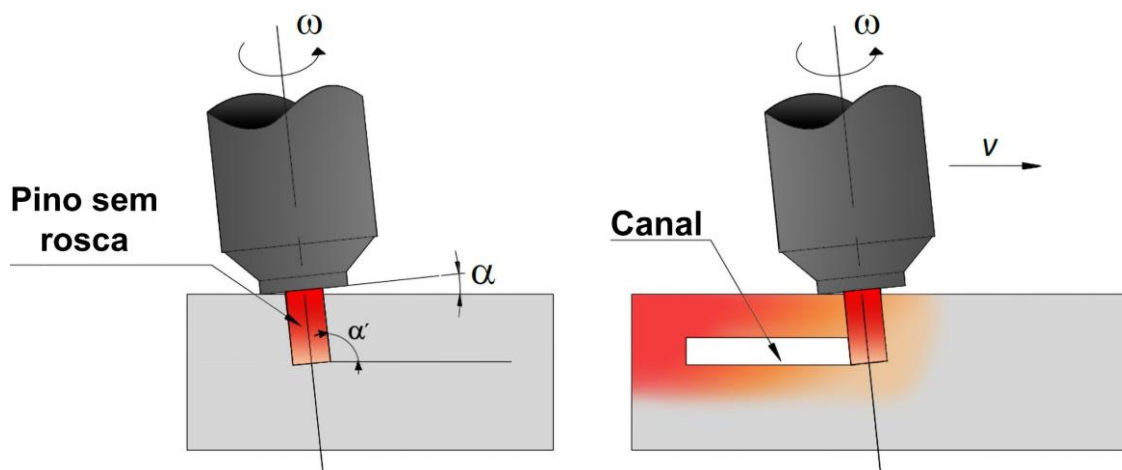


Figura 2.13 – Esquemática da tecnologia MFSC, adaptado de [2].

Estas modificações mostraram melhores resultados em relação ao FSC *with Clearance*. Na Figura 2.14 observa-se o canal obtido por MFSC com uma geometria retangular e longitudinalmente constante.

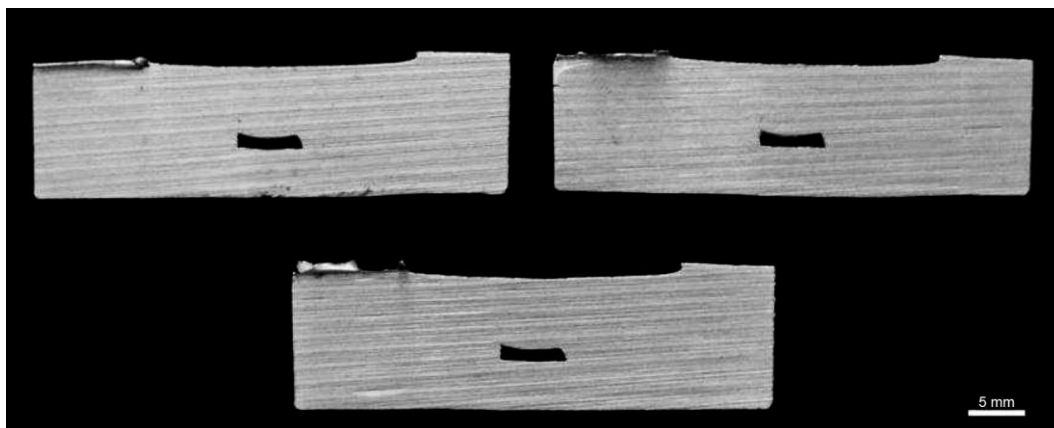


Figura 2.14 - Secções transversais do canal obtido por MFSC, em 3 localizações diferentes, adaptado de [21].

Há uma relação direta entre a geometria do pino e a geometria do canal obtida. O canal obtido apresenta uma geometria retangular pelo facto de se ter utilizado um pino cilíndrico [21]. Por outras palavras, a geometria da base e do lado em avanço do canal são definidos pela geometria do pino, enquanto a geometria do topo e do lado em retrocesso dependem dos parâmetros do processo. Se estes não forem ideais, o topo e o lado em retrocesso serão irregulares.

A extração do material é possível pela existência da inclinação da ferramenta em relação ao componente. Rashidi *et al.* concluíram que, para haver extração de material, o ângulo de ataque da ferramenta, α da Figura 2.13, terá de ser igual ou superior a 2° [21]. Por outras palavras, o ângulo α' deverá ser igual ou superior a 92° .

Em 2015, Rashidi *et al.* efetuaram uma comparação entre 2 tipos de pinos, que se podem observar na Figura 2.15, *Straight Cylindrical Pin* (SCP) e *Upward Conical Pin* (UCP).

Como se pode observar na Figura 2.15, não é necessário inclinar a ferramenta em relação ao componente a processar quando se utiliza o pino UCP, visto que a superfície do pino, α' , apresenta um ângulo igual ou superior a 92° .

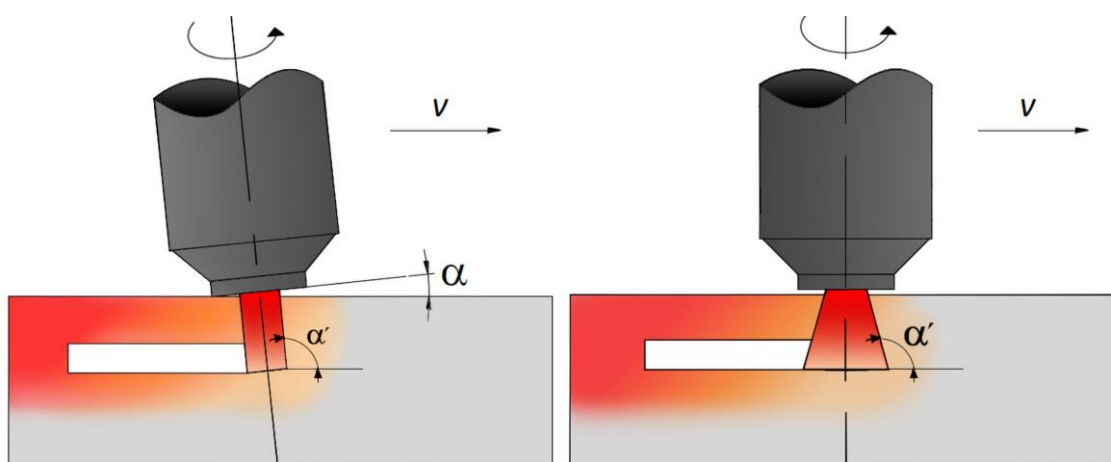


Figura 2.15 - Representação esquemática do SCP (à direita) e UCP (à esquerda), adaptado de [2].

Concluiu-se que o pino UCP apresenta uma maior capacidade de extrair material e, portanto, obter canais com uma secção transversal superior em relação ao pino SCP, como se pode observar na Figura 2.16. Também se chegou à conclusão que os canais produzidos pelo pino UCP apresentavam-se mais uniformes longitudinalmente [22].

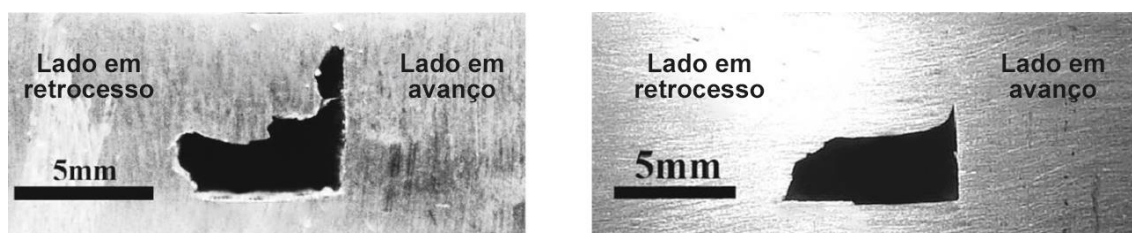


Figura 2.16 - Canal obtido com a utilização do pino SCP (à esquerda) e UCP (à direita), adaptado de [22].

2.3.4 Hybrid Friction Stir Channeling

Em 2017, Vilaça *et al.* patentearam uma nova variante da técnica FSC. Esta consiste na união das técnicas FSW e FSC *without Clearance* numa técnica só, denominada de *Hybrid Friction Stir Channeling* (HFSC). Com esta variante é possível efetuar a soldadura no estado sólido em pelo menos dois componentes e, simultaneamente, obter um canal contínuo interno numa única passagem [20].

Ilustra-se na Figura 2.17 a união de dois componentes, A e B, e a produção de um canal interno. O pino é composto por duas roscas distintas. A verde está representada a rosca com efeito descendente que efetua soldadura, misturando os materiais. A azul está representada a rosca, com efeito ascendente, que produz o canal extraíndo o material até ao *shoulder*. E a laranja está representada a estria helicoidal do *shoulder* que expulsa o material extraído do canal para a periferia da zona processada [23].

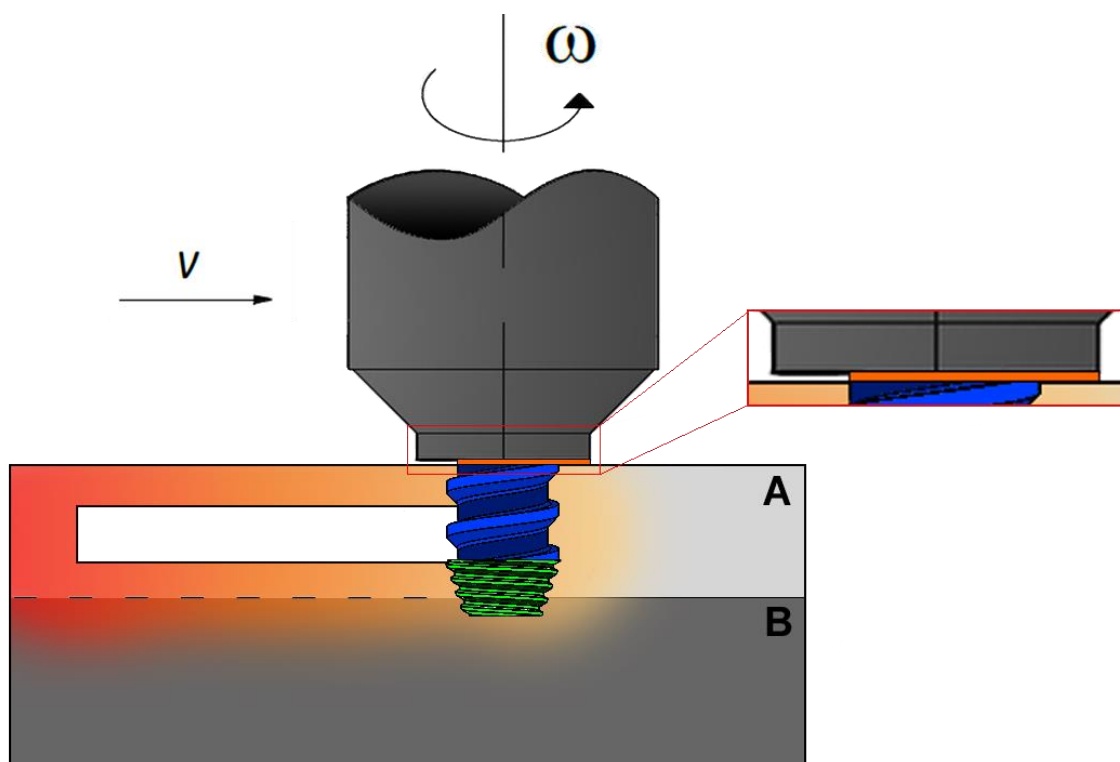


Figura 2.17 - Representação esquemática da técnica HFSC, adaptado de [2][23].

Esta variante apresenta uma capacidade de produzir canais estáveis, com uma área de secção constante ou variável ao longo do seu trajeto. O HFSC, para além das capacidades descritas, também é aplicável em componentes finos o que torna esta tecnologia mais flexível quando comparada às variantes anteriormente descritas [19].

2.3.5 *Stationary Shoulder Friction Stir Channeling*

Em 2018, João Gandra em conjunto com o *The Welding Institute* (TWI) patentearam uma nova variante desta técnica [1]. O que a difere das outras variantes é a estacionariedade do *shoulder* e a forma como o material é extraído para efetuar o canal. Na Figura 2.18 observa-se que, nesta variante, o material ao ser extraído flui de forma ascendente pela superfície roscada do pino e é expulso por dentro do *shoulder*, ao contrário das outras variantes onde o material flui até encontrar o *shoulder*.

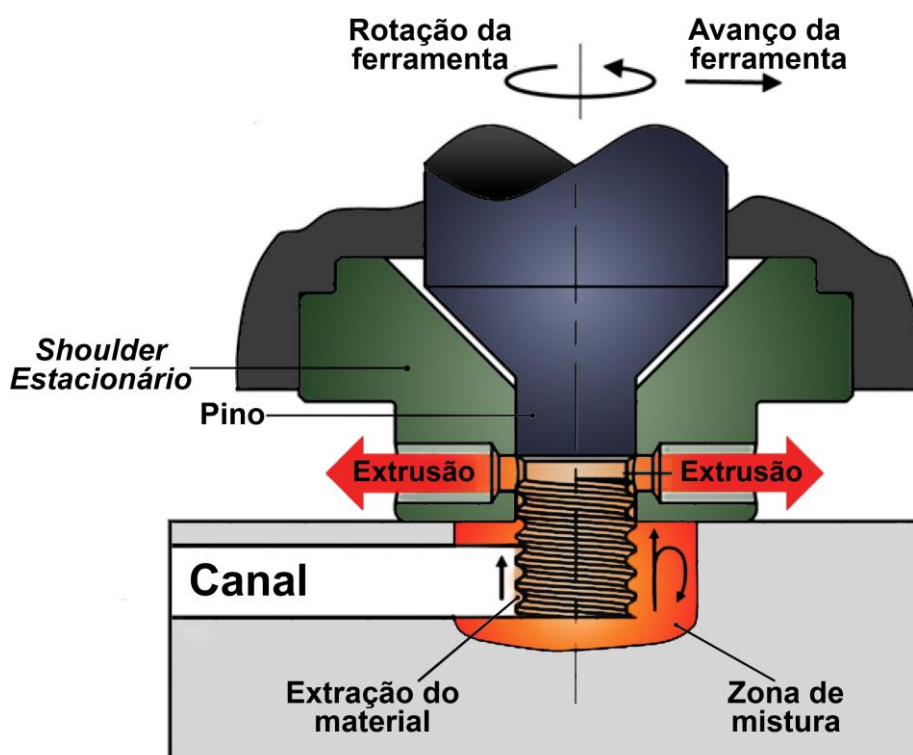


Figura 2.18 - Esquemática da técnica SSFSC, adaptado de [24].

O *shoulder* da ferramenta apresenta pelo menos um canal por onde o material extraído é expulso. Dependendo da aplicação, a ferramenta poderá apresentar tanto um, como múltiplos canais posicionados de forma simétrica.

Na produção de canais com trajetórias curvilíneas, a utilização de um *shoulder* com múltiplos canais de saída permite obter um canal mais consistente ao longo da sua trajetória.

A pressão do material extraído é mantida constante aumentando a capacidade da ferramenta de efetuar a translação [1].

Na Figura 2.19 observa-se uma secção transversal de um canal produzido por esta técnica.

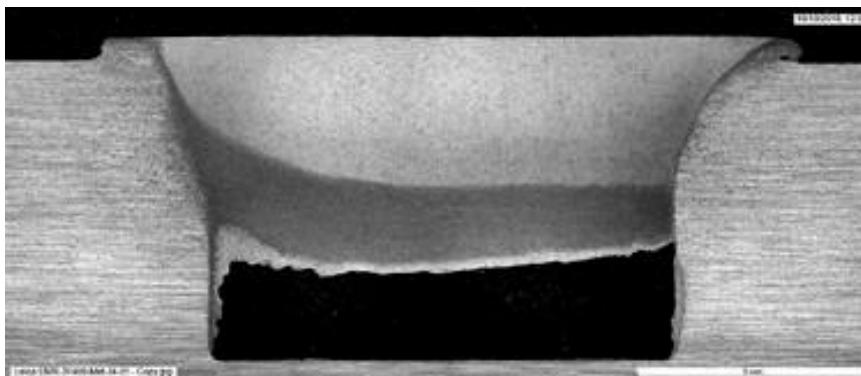


Figura 2.19 - Secção transversal de um canal produzido pela técnica SSFSC, adaptado de [25].

Como foi mencionado anteriormente, o *shoulder* é estacionário, o que permite a utilização de *shoulders* com geometrias complexas. Assim, esta técnica demonstra ser mais adequada a componentes não planos (cilíndricos por exemplo) do que as variantes mencionadas anteriormente. Devido ao facto do *shoulder* ser capaz de conformar o componente a processar, esta variante mostra potencial para ser utilizada na componente orbital [1].

2.3.6 Aplicações industriais e tecnologias alternativas

Dependendo da aplicação, determinados componentes necessitam de um sistema de refrigeração no seu interior sólido como, por exemplo, câmaras de combustão, permutadores de calor ou componentes da indústria dos moldes, onde é crítico um sistema de refrigeração eficiente, de modo a maximizar as trocas de energia e uniformizar as temperaturas no interior do molde [2].

Existem, no entanto, tecnologias alternativas ao FSC, que apresentam as suas vantagens e desvantagens. As alternativas mais comuns são a furação, Eletroerosão (EDM) e a fresagem [26].

A furação é um processo simples, com uma produtividade elevada e um custo reduzido. Porém, esta tecnologia está limitada à produção de canais lineares e com um comprimento limitado, o que não é uma limitação no FSC. Além disso, o FSC tem a capacidade de variar a área de secção do canal ao longo do mesmo, o que é impossível de se realizar através da furação.

O EDM permite efetuar furações de maior comprimento e numa elevada gama de materiais (metais termicamente tratados, cerâmicos e alguns materiais compósitos), em comparação com a furação [27]. Porém, apresenta a desvantagem de não ser possível efetuar canais não lineares, ao contrário do FSC.

A fresagem permite efetuar canais não lineares com áreas de secção variáveis. Porém, a desvantagem em relação ao FSC é que os canais produzidos são abertos, por isso, é necessário maquinar a tampa e, posteriormente, unir ambos os componentes com processos de ligação [26].

O processo FSC apresenta um elevado potencial nas áreas onde o controlo de temperaturas é crítico, como por exemplo na indústria dos moldes. Observando a Figura 2.20, o FSC tem a capacidade de produzir canais que conformam mais os moldes, originando um controlo de temperaturas mais eficaz, quando comparados a canais lineares.

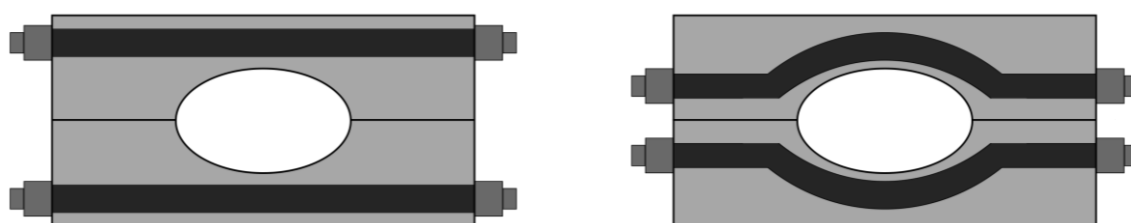


Figura 2.20 - Vista superior de moldes com os respetivos canais de refrigeração.
À esquerda canais obtidos por processos alternativos e à direita canais obtidos por FSC.

O processo FSC, comparativamente aos seus processos alternativos, apresenta canais com paredes mais rugosas, especialmente o topo, como se pode observar na Figura 2.21.

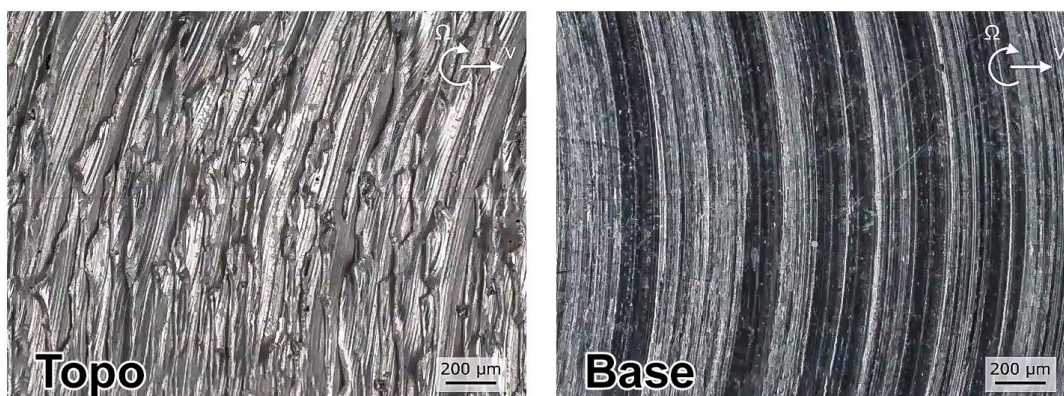


Figura 2.21 - Imagem microscópica do topo e da base de um canal produzido pela técnica SSFSC, adaptado de [28].

No entanto, se o componente produzido por FSC, for um dispositivo de trocas de calor, a rugosidade provocará um escoamento turbulento que promove uma maior capacidade de trocas de calor, e uma maior eficiência do componente [29].

2.4 *Friction Stir Channeling Orbital*

O objetivo desta dissertação consistiu na escolha de ferramentas e de parâmetros adequados para a realização do FSC Helicoidal Cilíndrico, de modo a produzir canais sub-superficiais contínuos e helicoidais.

Retrocedendo para a técnica SSFSC, a estacionariedade do *shoulder* permite a produção de canais orbitais ou helicoidais em componentes cilíndricos. Esta particularidade mostra ser interessante na produção de canais em componentes cilíndricos, sejam maciços ou tubulares.

The Welding Institute já efetuou ensaios experimentais deste processo, utilizando a técnica SSFSC mencionada anteriormente, tal como se pode observar na Figura 2.22.

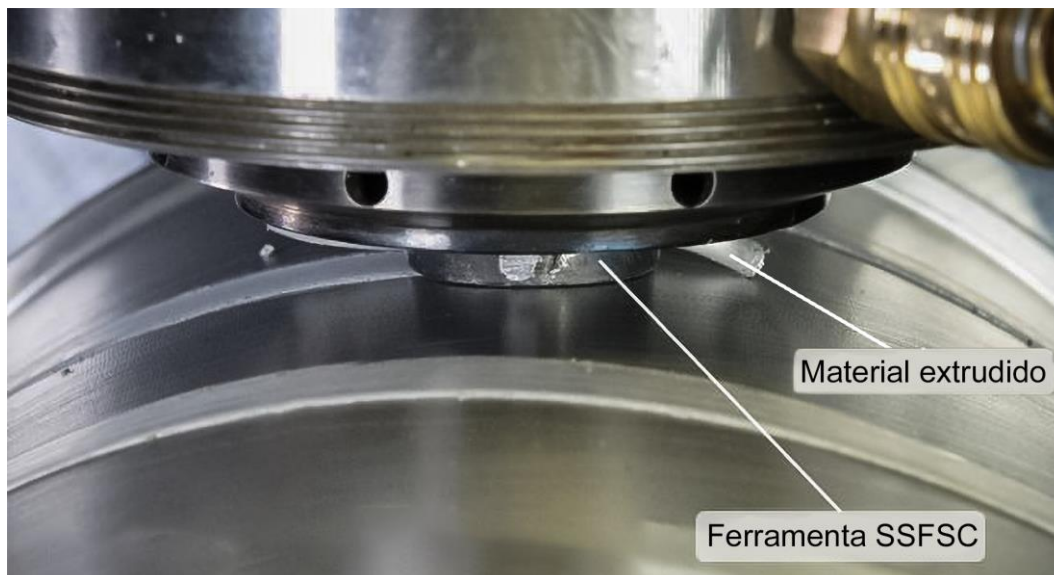


Figura 2.22 - Processo FSCO efetuado pelo TWI, adaptado de [8].

Foi mostrado o sucesso na produção de canais orbitais e helicoidais. No entanto, não foi divulgado nenhum artigo científico sobre a matéria.

Associando o FSCO com o FSWO, deverá tomar-se uma especial atenção no início do processo, visto que, no FSWO observa-se a presença de defeitos no início da trajetória da ferramenta (primeiros 40° de translação). Porém, ao contrário do FSWO, a ferramenta não poderá sobrepor a zona já processada, pois este processo funciona à base de extração de material.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo será discutida a metodologia experimental deste estudo. Apresentar-se-ão os equipamentos e ferramentas utilizadas, a escolha dos materiais e parâmetros. Será discutida a metodologia de avaliação dos canais produzidos e por fim, será descrito o ensaio térmico do permutador produzido.

3.1 Equipamento Utilizado

Para o desenvolvimento da tecnologia FSCO foi necessária a utilização de uma fresadora e de um sistema responsável pela rotação dos varões (anteriormente utilizado para a tecnologia FSWO). Para ser possível efetuar os ensaios do processo FSCO foi necessário modificar o sistema. Este equipamento, assenta na mesa da fresadora, tal como se pode observar na Figura 3.1.

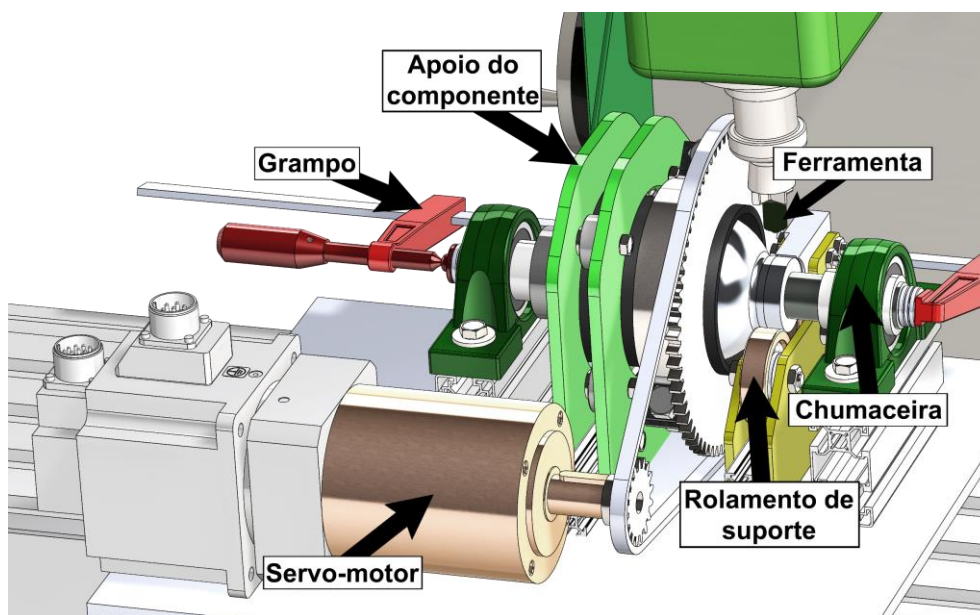


Figura 3.1 - Representação dos componentes chave do sistema de rotação do componente.

O sistema assenta numa chapa de aço com 8 mm de espessura. Este é composto por um servomotor com potência de 2kW - *BCH2MM2021CA6C* - alimentado por tensão trifásica (cuja ficha técnica encontra-se nos Apêndice - A0), uma caixa de redução, um pinhão, z_1 e uma cremalheira z_2 , 3 suportes do varão, compostos por perfis Bosch e por rolamentos axiais, 2 chumaceiras e um grampo.

Nesse processo, a ferramenta não efetua translação axial, assim a ação da ferramenta era aplicada acima dos rolamentos de suporte. Porém, no processo FSCO existe translação relativa entre o eixo do varão e a ferramenta. Para tal, foi necessário rearranjar ou remover componentes de forma que houvesse comprimento axial suficiente para que essa translação fosse possível e houvesse a produção de um canal helicoidal cilíndrico com comprimento suficiente para se efetuarem as avaliações necessárias.

O grampo foi removido, contudo, ao haver translação da mesa da fresadora, também haverá esforços axiais que terão de ser restringidos. De forma a manter o varão imóvel, mas mantendo a sua rotação, foram utilizados 2 suportes em conjunto com rolamentos radiais, que se observam na Figura 3.2, com o propósito de restringir as deslocamentos axiais do varão. Posteriormente, o sistema foi fixo à mesa da fresadora através de grampos de fixação.

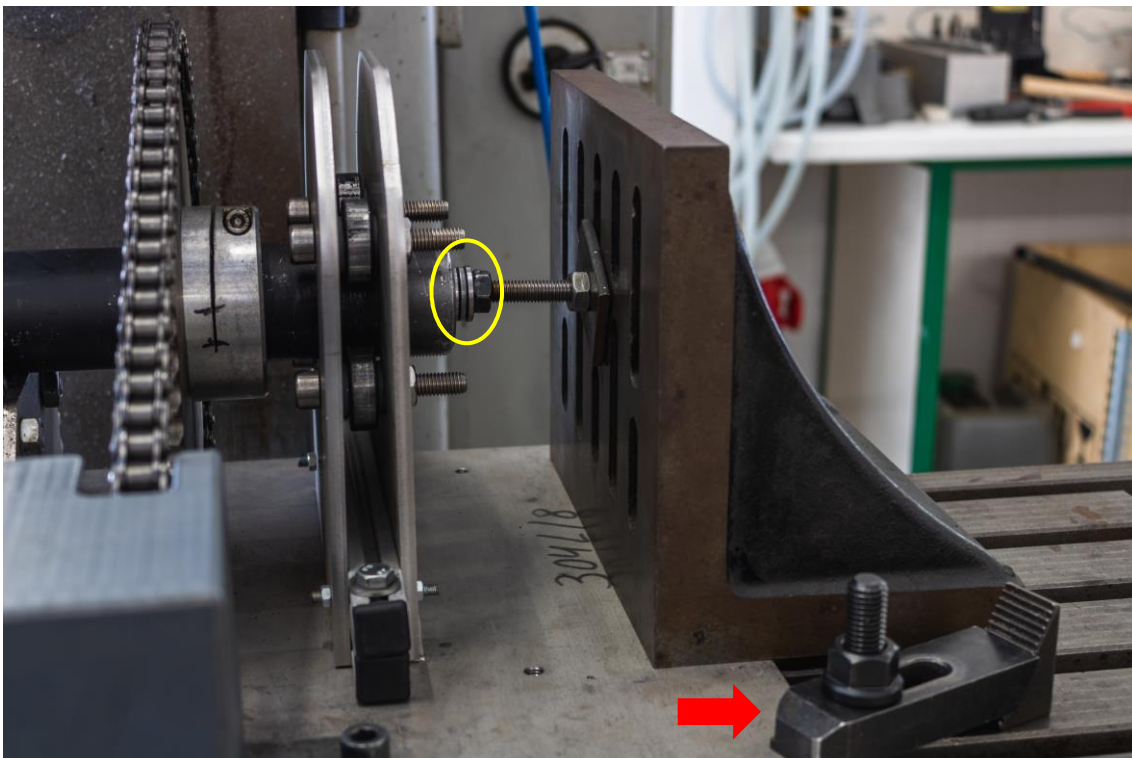


Figura 3.2 – Suporte que impede a deslocação axial do varão (amarelo) e grampo de fixação (vermelho).

O varão foi fixo à cremalheira através de uma abraçadeira de alumínio, que se pode observar na Figura 3.3. Este apresentou um corte parcial, destacado a vermelho, que permitiu a fixação do varão através do aperto de um parafuso.

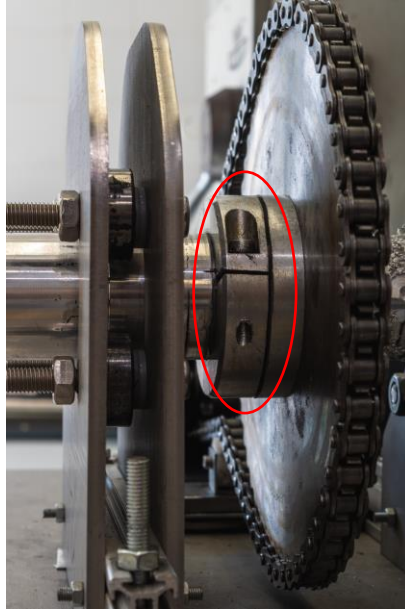


Figura 3.3 – Sistema que permite a ligação da cremalheira z_2 ao varão.

Após todas as modificações ao sistema anterior estarem concluídas, o sistema final foi montado na mesa da fresadora. Na Figura 3.4 observa-se o sistema adaptado para o processo FSCO.

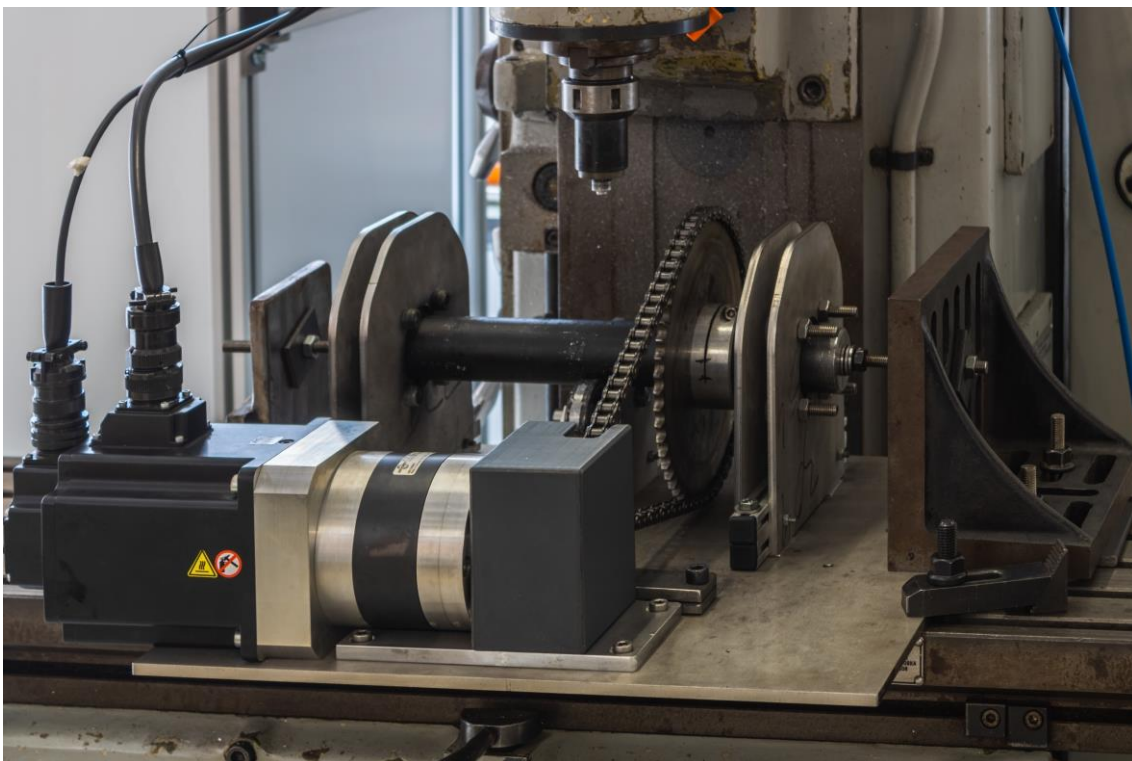


Figura 3.4 – Sistema final utilizado para a realização dos canais orbitais e helicoidais.

A rotação do motor e, conseqüentemente, do varão foi controlada através do controlador *Schneider Electric – LXM28AU20M3X*.

Ao longo dos ensaios também foram medidas as temperaturas do processo utilizando uma câmara termográfica *Fluke Ti400 IR FUSION TECHNOLOGY*, que foi fixa acima do sistema onde foram realizados os ensaios, tal como se pode observar na Figura 3.5.



Figura 3.5 – Montagem da câmara termográfica.

Os varões foram pintados de preto com uma tinta resistente a altas temperaturas com o objetivo de se observar as temperaturas no decorrer dos ensaios. Para a leitura dos ficheiros produzidos pela câmara termográfica, foi utilizado o *software Smartview*.

3.2 Escolha dos Materiais

Foi necessário efetuar a escolha do material a utilizar. Estavam disponíveis varões de 3 ligas de alumínio diferentes (AA2017-T451, AA6082-T6 e AA7075-T6), todos com 3 m de comprimento e 50 mm de diâmetro.

Como a tecnologia FSC permite a produção de dispositivos de trocas de calor, a condutividade térmica do material é uma característica importante que se deve ter em conta na escolha deste.

É importante, também, analisar a aplicabilidade do material para o processo, isto é, compreender a dificuldade no processamento do material. Outra das características a analisar é a integridade final do componente, isto é, se as propriedades mecânicas do material são adequadas para o seu funcionamento.

A tensão de rotura não será analisada, pois os componentes não deverão ultrapassar o regime elástico, isto é, sofrer tensões superiores à de cedência.

Concluiu-se, então, que as propriedades do material a considerar são a condutividade térmica, o módulo de elasticidade e a tensão de cedência. Os valores destas propriedades para as 3 ligas mencionadas são apresentados na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 - Propriedades selecionadas das 3 ligas de alumínio, adaptado de [30][31][32].

	Condutividade térmica [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de cedência [MPa]
AA6082-T6	170	70,0	255
AA2017-T451	134	72,4	276
AA7075-T6	130	71,7	503

Porém, um material ao apresentar boas propriedades mecânicas, a capacidade do seu processamento, geralmente, mostra-se difícil de se efetuar devido ao desgaste elevado ou quebra da ferramenta. Por isso, será efetuado um compromisso, dando maior importância à capacidade de processamento do material do que às suas propriedades mecânicas. Este compromisso não apresentará consequências visto que os 3 materiais são ligas comerciais de alumínio estrutural, e por isso, mesmo que se escolha o material com as menores propriedades mecânicas, estas são suficientes para garantir a integridade e bom funcionamento do componente.

Após a avaliação das propriedades dos materiais disponíveis, a liga AA7075-T651 não foi utilizada devido à dificuldade de a processar, mesmo que apresente propriedades mecânicas relativamente elevadas. A liga AA2017-T451, também, não foi utilizada pois, apesar de apresentar propriedades mecânicas muito semelhantes à liga AA6082-T6, a sua condutividade térmica é significativamente menor. Por isso escolheu-se a liga AA6082-T6, para além disso, existe experiência prática no processamento desta liga no laboratório o que foi muito benéfico para iniciar a componente prática.

Na Tabela 3-2 apresenta-se a composição química da liga escolhida.

Tabela 3-2 - Composição química da liga AA6082-T6 (valores em %) [33].

Composição química (%) da liga AA6082-T6									
Elementos	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Cr</i>	<i>Zn</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>
Máximo	1,30	0,50	0,1	1,00	1,2	0,25	0,2	0,1	Resto
Mínimo	0,70	-	-	0,40	0,6	-	-	-	Resto

3.3 Ferramentas Utilizadas

Neste estudo, procurou-se estabelecer os parâmetros e as ferramentas adequados para a produção de canais orbitais e helicoidais estanques. Para tal, foram utilizadas as técnicas FSC *without Clearance* utilizando *shoulders* estriados ou côncavos em conjunto com pinos roscados. Para todos os ensaios efetuados neste estudo, a ferramenta foi avançada da tangente do varão para simular o ângulo de ataque, tal como pode existir no FSW. Este *offset* ilustra-se na Figura 3.6.

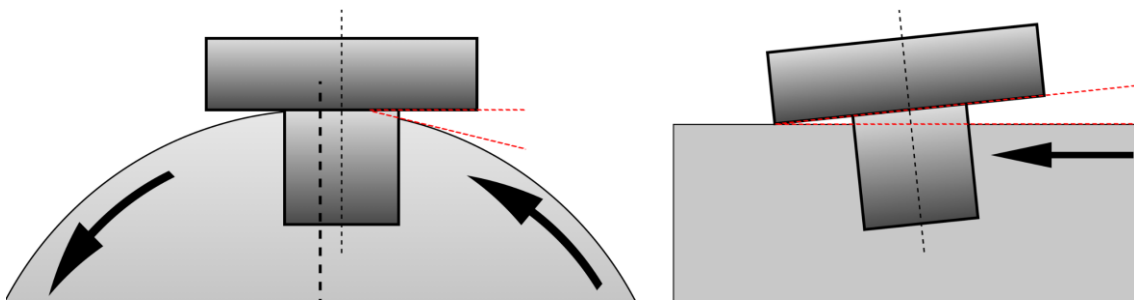


Figura 3.6 - Vista lateral com representação do *offset* da ferramenta.
Variante orbital à esquerda e variante linear à direita.

Foram utilizados, no total, 6 conjuntos de ferramenta. A escolha das ferramentas será explicada no capítulo seguinte onde se irá abordar o desenvolvimento da tecnologia.

A produção dos canais orbitais foi iniciada com a ferramenta A, que foi utilizada anteriormente para efetuar o processo FSWO, esta pode-se observar na Figura 3.7 e consiste num um *shoulder* estriado com $\phi_s = 12$ mm e pino cónico roscado com 4 mm de comprimento com um diâmetro de 5 mm na base e 3 mm no topo.



Figura 3.7 - Ferramenta A.

Nos restantes ensaios os conjuntos ferramenta utilizados foram compostos por 3 elementos, o corpo (Apêndice A1), o *shoulder* e o pino. Observa-se na Figura 3.8, os componentes de um conjunto ferramenta.

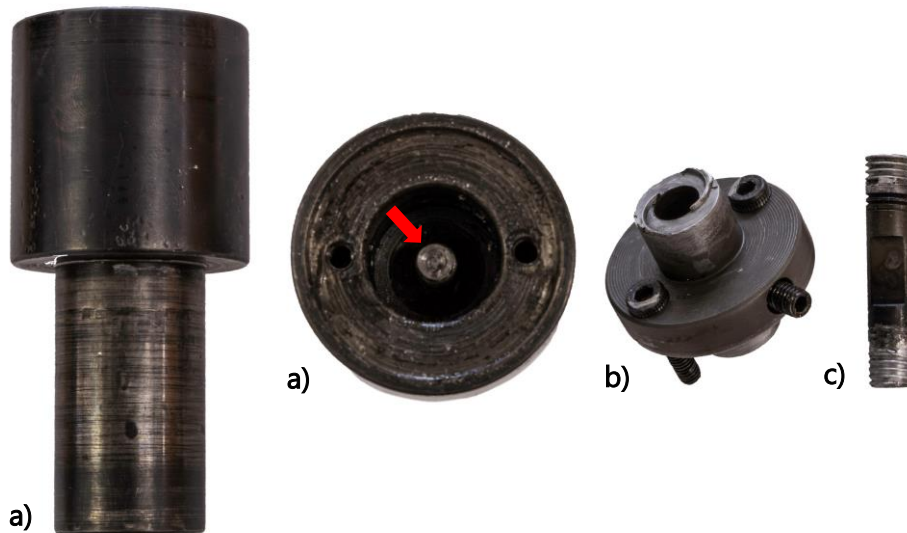


Figura 3.8 - Componentes da ferramenta.
a) Corpo da ferramenta, b) *Shoulder* e c) pino.

O corpo, colocado na cabeça da fresadora, fixa o *shoulder* com o auxílio de 2 parafusos. O pino encaixa no *shoulder*, este é fixo por um perno e, simultaneamente, é restringido por um parafuso (a vermelho) que encosta por detrás deste.

Na Figura 3.9 observam-se as restantes montagens dos conjuntos ferramenta utilizados neste estudo. Os correspondentes desenhos técnicos encontram-se nos Apêndices.

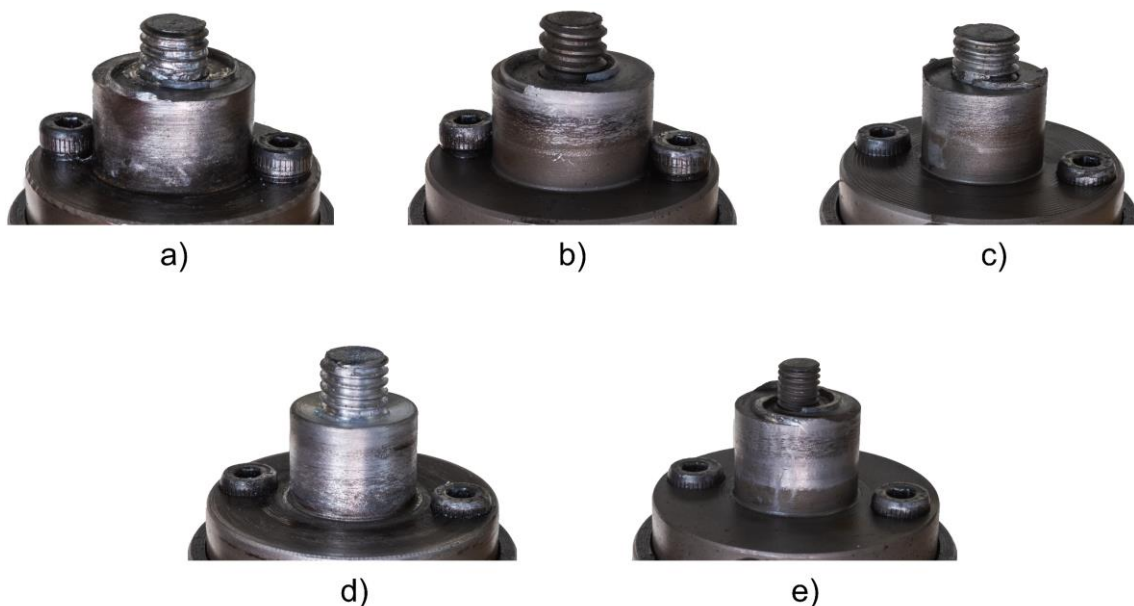


Figura 3.9 - Restantes ferramentas utilizadas.
a) Ferramenta B, b) Ferramenta C, c) Ferramenta D, d) Ferramenta E e e) Ferramenta F.

Na Figura 3.9 a) observa-se a montagem do conjunto ferramenta B que consistiu num pino cilíndrico roscado M8 (Apêndice A2) e com um *shoulder* plano estriado com $\phi_s = 19$ mm (Apêndice A3).

Na Figura 3.9 b), o conjunto ferramenta C consistiu num *shoulder* plano estriado com $\phi_s = 19$ mm (Apêndice A4) e um pino cilíndrico roscado M8 (Apêndice A5). O *shoulder* e o pino apresentaram uma maior capacidade de extração de material. Esta capacidade superior deve-se às estrias do *shoulder* com maior altura e ao pino com um passo superior comparativamente com o conjunto de ferramenta anterior.

Na Figura 3.9 c), o conjunto ferramenta D consistiu num *shoulder* com $\phi_s = 15$ mm, plano estirado (Apêndice A6), e com o mesmo pino cilíndrico roscado M8.

Na Figura 3.9 d), o conjunto ferramenta E consistiu num *shoulder* com $\phi_s = 15$ mm, sendo este côncavo sem estrias, e com o mesmo pino cilíndrico roscado M8.

E na Figura 3.9 e), o conjunto ferramenta F consistiu num *shoulder* plano estriado com $\phi_s = 16$ mm (Apêndice A7) e com o mesmo pino cilíndrico roscado M5 (Apêndice A8).

3.4 Escolha dos Parâmetros

Buinho concluiu que os melhores resultados, para FSC, foram obtidos com a velocidade de avanço da ferramenta de $71 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ [17]. Porém, a velocidade de rotação da ferramenta, ω_F [$\text{rev}\cdot\text{min}^{-1}$], ideal depende do material. Desta forma, a velocidade de rotação do varão, ω_v [$\text{rev}\cdot\text{min}^{-1}$], e, conseqüentemente, do motor, ω_m [$\text{rev}\cdot\text{min}^{-1}$], foram escolhidas de forma que a velocidade tangencial do varão, v_{t_v} [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$], se equipare com a velocidade de avanço que obtém os resultados desejados para o FSC.

A velocidade de rotação do servomotor (ω_m) é diferente da velocidade de rotação do varão (ω_v). O sistema apresenta uma relação de transmissão, i_s , que advém de uma caixa de redução com uma razão de transmissão, i_{cx} , e de um par de cremalheiras com uma relação de transmissão, i_z . Assim, foi necessário obter a velocidade tangencial do varão, que será equiparada à velocidade de avanço da ferramenta na técnica FSC.

A equação da velocidade tangencial do varão, v_{t_v} , com um diâmetro, $d_v = 50$ mm, em ordem à velocidade de rotação do motor (ω_m), foi obtida recorrendo às equações 3.1 e 3.2, tendo resultado na equação 3.3.

$$\omega_v = i_s \times \omega_m \quad 3.1$$

$$i_s = i_z \times i_{cx} \quad 3.2$$

$$z_1 = 17 \text{ dentes}; z_2 = 54 \text{ dentes}; i_{cx} = 8$$

$$v_{t_v} = 3991,7 \times \omega_m \quad 3.3$$

Tal como mencionado anteriormente, os ensaios foram iniciados com a variante orbital para se determinar quais os parâmetros que produzem os melhores resultados, isto é, canais estanques com geometrias uniformes e constantes. E posteriormente, efetuaram-se os ensaios helicoidais, com o objetivo de produzir um permutador de calor como prova de conceito.

Contudo, os parâmetros da variante orbital e helicoidal cilíndrica não são iguais pois, neste último é adicionado um novo parâmetro, a velocidade de avanço da mesa da fresadora, v_M [mm·s⁻¹]. Este parâmetro contribui para o aumento da velocidade de avanço global da ferramenta, v_G [mm·s⁻¹], tal como esquematizado na Figura 3.10.

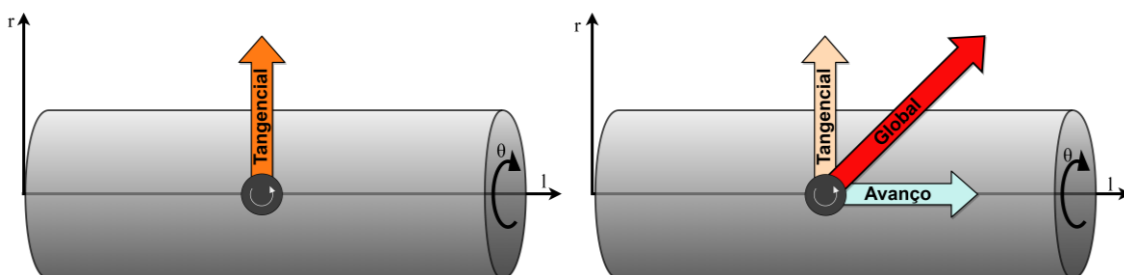


Figura 3.10 – Representação esquemática de um varão com rotação θ .

À esquerda o varão apresenta apenas rotação e à direita apresenta, também, avanço ao longo do eixo l.

Para que os melhores resultados sejam obtidos foi necessário ter em conta a velocidade de avanço da ferramenta equivalente, que depende da velocidade de rotação do varão (ω_v), e da velocidade de avanço da mesa da fresadora (v_M). Simultaneamente, o passo do canal helicoidal cilíndrico, p [mm], que se deseja obter também depende da ω_v e da v_M .

A fresadora utilizada limitou o processo de escolha da ω_v e da v_M uma vez que só permitia valores pré-definidos de v_M . Isto é, para obter um canal com as características desejadas deve-se escolher as ω_v e as v_M para que a soma vetorial seja a velocidade de avanço global (v_G) ideal. Simultaneamente, as mesmas velocidades originam um dado passo do canal helicoidal cilíndrico, que pode não ser o desejado. A dificuldade está na escolha das velocidades de forma que se obtenha tanto o canal com as características desejadas, como o passo do canal helicoidal cilíndrico. No entanto, é importante mencionar que mesmo com uma fresadora com controlo numérico, que permite a escolha de qualquer valor de v_M , o requisito do passo poderá comprometer a velocidade de avanço global da ferramenta ideal.

Esta particularidade revela uma dificuldade na escolha dos parâmetros para o processo helicoidal cilíndrico. Para resolver este problema, foi programado em *Excel* um ficheiro que permite inserir um intervalo de passo e de velocidade de avanço global da ferramenta (v_G). Onde, para estas, se obtêm as v_M e ω_m ou ω_v e o passo (p) do canal, caso este pertencer ao intervalo de passos inserido.

A equação do passo (3.6) foi obtida através da equação do período de rotação do varão, T_v [s], (3.4) e da equação 3.5:

$$T_v = \frac{1}{\omega_v} \quad 3.4$$

$$p = v_M \times T_v \quad 3.5$$

$$p = \frac{25,41 \times v_M}{\omega_m} \quad 3.6$$

No ficheiro *Excel*, o intervalo de passos que seria aceitável obter, neste caso sendo entre 15 mm a 50 mm, apresentam-se a cinzento e os restantes valores foram ignorados, tal como se pode observar na Figura 3.11.

RPM		Velocidades de Avanço					
Motor	Z2	11,2	14	18	22,4	28	35,5
1	0,04	284,6	355,8	457,4	569,2	711,5	902,1
2	0,08	142,3	177,9	228,7	284,6	355,8	451,1
3	0,12	94,9	118,6	152,5	189,7	237,2	300,7
4	0,16	71,2	88,9	114,4	142,3	177,9	225,5
5	0,20	56,9	71,2	91,5	113,8	142,3	180,4
6	0,24	47,4	59,3	76,2	94,9	118,6	150,4
7	0,28	40,7	50,8	65,3	81,3	101,6	128,9
8	0,31	35,6	44,5	57,2	71,2	88,9	112,8
9	0,35	31,6	39,5	50,8	63,2	79,1	100,2
10	0,39	28,5	35,6	45,7	56,9	71,2	90,2
11	0,43	25,9	32,3	41,6	51,7	64,7	82,0
12	0,47	23,7	29,6	38,1	47,4	59,3	75,2
13	0,51	21,9	27,4	35,2	43,8	54,7	69,4

Figura 3.11 - Matriz que revela os passos possíveis de fabricar e os respetivos parâmetros.

Noutra matriz, que se pode observar na Figura 3.12, foram inseridas as velocidades tangenciais provocadas pela rotação do servomotor, coluna v_{tan} , e as velocidades de avanço da mesa da fresadora, obtendo a velocidade de avanço global da ferramenta. O intervalo das v_G que se permitem obter são, para este exemplo, entre $70 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ e $73 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. As velocidades que pertencem ao intervalo referido apresentam-se destacadas a azul, assim os parâmetros que originam essa velocidade global podem ser lidos nas linhas e colunas da tabela.

RPM		mm/min	Velocidades de Avanço								
Motor	Z2	Vtan	11,2	14	18	22,4	28	35,5	45	56	71
1	0,04	6,18	12,8	15,3	19,0	23,2	28,7	36,0	45,4	56,3	71,3
2	0,08	12,36	16,7	18,7	21,8	25,6	30,6	37,6	46,7	57,3	72,1
3	0,12	18,54	21,7	23,2	25,8	29,1	33,6	40,1	48,7	59,0	73,4
4	0,16	24,73	27,1	28,4	30,6	33,4	37,4	43,3	51,3	61,2	75,2
5	0,20	30,91	32,9	33,9	35,8	38,2	41,7	47,1	54,6	64,0	77,4
6	0,24	37,09	38,7	39,6	41,2	43,3	46,5	51,3	58,3	67,2	80,1
7	0,28	43,27	44,7	45,5	46,9	48,7	51,5	56,0	62,4	70,8	83,1
8	0,31	49,45	50,7	51,4	52,6	54,3	56,8	60,9	66,9	74,7	86,5
9	0,35	55,63	56,7	57,4	58,5	60,0	62,3	66,0	71,6	78,9	90,2
10	0,39	61,81	62,8	63,4	64,4	65,7	67,9	71,3	76,5	83,4	94,1
11	0,43	68,00	68,9	69,4	70,3	71,6	73,5	76,7	81,5	88,1	98,3
12	0,47	74,18	75,0	75,5	76,3	77,5	79,3	82,2	86,8	92,9	102,7
13	0,51	80,36	81,1	81,6	82,3	83,4	85,1	87,9	92,1	97,9	107,2

Figura 3.12 – Matriz que revela as velocidades de avanço globais que se inserem no intervalo pretendido e os respetivos parâmetros.

Por fim, os valores que se desejam obter da segunda matriz, são intercetados na primeira. Isto é, as posições das células da segunda matriz são destacadas na primeira matriz a vermelho, tal como se pode observar na Figura 3.13

Obtendo, assim, os parâmetros que obedecem a todas as condições inseridas e os consequentes passos dos canais helicoidais.

Motor	Z2	11,2	14	18	22,4	28	35,5				
1	0,04	284,6	355,8	457,4	569,7	711,3	902,1				
2	0,08	142,3	177,9	228,7	284,6	355,8	451,1				
3	0,12	94,9	118,6	152,5	189,7	237,3	300,7				
4	0,16	71,2	88,9	114,4	142,3	177,9	225,5				
5	0,20	56,9	71,2	91,5	113,8	142,3	180,4				
6	0,24	47,4	59,3	76,2	94,9	118,6	150,4				
7	0,28	40,7	50,8	65,3	81,3	101,6	128,9				
8	0,31	35,6	44,5	57,2	71,2	88,9	112,8				
9	0,35	31,6	39,5	50,8	63,2	79,1	100,2				
10	0,39	28,5	35,6	45,7	56,9	71,2	90,2				
11	0,43	25,9	32,3	41,6	51,7	64,7	82,0				
12	0,47	23,7	29,6	38,1	47,4	59,3	75,2				

Motor	Z2	Vtan	11,2	14	18	22,4	28	35,5	45	56	71
1	0,04	6,18	12,8	15,3	19,0	23,2	28,7	36,0	45,4	56,3	71,3
2	0,08	12,36	16,7	18,7	21,8	25,6	30,6	37,6	46,7	57,3	72,1
3	0,12	18,54	21,7	23,2	25,8	29,1	33,6	40,1	48,7	59,0	73,4
4	0,16	24,73	27,1	28,4	30,6	33,4	37,4	43,3	51,3	61,2	75,2
5	0,20	30,91	32,9	33,9	35,8	38,2	41,7	47,1	54,6	64,0	77,4
6	0,24	37,09	38,7	39,6	41,2	43,3	46,5	51,3	58,3	67,2	80,1
7	0,28	43,27	44,7	45,5	46,9	48,7	51,5	56,0	62,4	70,8	83,1
8	0,31	49,45	50,7	51,4	52,6	54,3	56,8	60,9	66,9	74,7	86,5
9	0,35	55,63	56,7	57,4	58,5	60,0	62,3	66,0	71,6	78,9	90,2
10	0,39	61,81	62,8	63,4	64,4	65,7	67,9	71,3	76,5	83,4	94,1
11	0,43	68,00	68,9	69,4	70,3	71,6	73,5	76,7	81,5	88,1	98,3
12	0,47	74,18	75,0	75,5	76,3	77,5	79,3	82,2	86,8	92,9	102,7

Figura 3.13 – Matrizes que revelam que passo é possível de fabricar com os respetivos parâmetros, com base nos intervalos de parâmetros e passos inseridos.

Resumindo, se se pretender efetuar um canal com um passo entre 15 mm e 50 mm e com uma v_G entre $70 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ e $73 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, existe apenas uma configuração possível. Para os intervalos escolhidos, a velocidade de avanço da mesa da fresadora e velocidade de rotação do motor devem ser, respetivamente, $18 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ e $11 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$. Estes parâmetros permitirão obter um canal helicoidal cilíndrico com um passo de $41,6 \text{ mm}$, efetuado com $v_G = 70,3 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

3.5 Produção dos Canais Orbitais e Helicoidais Cilíndricos

Os ensaios foram iniciados colocando o pino no pré-furo previamente efetuado, quando a ferramenta penetrou o varão à profundidade necessária, deu-se início à rotação do servomotor e, conseqüentemente, do varão. A rotação do varão foi controlada no software do controlador do servomotor de forma que este efetuasse apenas uma rotação de 350° com o objetivo de não haver interseção da trajetória do canal.

Existiu o cuidado de não se efetuarem os ensaios no topo dos rolamentos de suporte. Durante os ensaios as dimensões externas do varão foram alteradas devido à penetração do *shoulder* ou formação de aparas acima da zona processada. Se estes defeitos passassem por cima dos rolamentos de suporte, isto implicaria mudanças da força vertical exercida ou penetração da ferramenta.

Na Tabela 3-3 estão presentes os ensaios efetuados neste estudo e as respectivas ferramentas e parâmetros. Os ensaios foram organizados com os parâmetros por ordem crescente. Foram efetuados, no total, 27 ensaios. Contudo, não serão todos comentados pelo facto de alguns dos ensaios terem sido repetidos.

Tabela 3-3 – Parâmetros e ferramentas dos ensaios.

Ensaio	Ferramenta	L_p [mm]	ω_F [rev·min ⁻¹]	ω_m [rev·min ⁻¹]	v_M [mm·min ⁻¹]
1.1	A	4	540	11,5	-
2.1	B	7	710	11,5	-
2.2			710		-
2.3			710	12,9	-
2.4			900	11,5	-
3.1	C	6	710	11,5	-
3.2			1120		-
4.1	D	5,6	710	11,5	-
4.2			710		-
5.1	E	4,5	560	11,5	-
5.2			560		-
5.3			710		-
5.4			900		-
6.1	E'	6,6	450	11,5	-
6.2			560		-
6.3			710		-
6.4			900		-
6.5			1120		-
6.6			710		-
7.1	F	5,5	710	11,5	-
7.2			900		-
8.1	E'	6,6	710	11,5	-
8.2			710	14,6	-
8.3			710		-
8.4			900		-
9.1			710		14,0
9.2			710	12,0	11,2

3.6 Avaliação dos Ensaios

3.6.1 Geometria dos Canais

Para analisar a variação da geometria dos canais produzidos ao longo da sua trajetória, os varões foram cortados em 2 zonas, tal como se pode observar na Figura 3.14. Os cortes foram efetuados com uma serra de corte com refrigeração, *GBS-218 Eco AutoCut*.

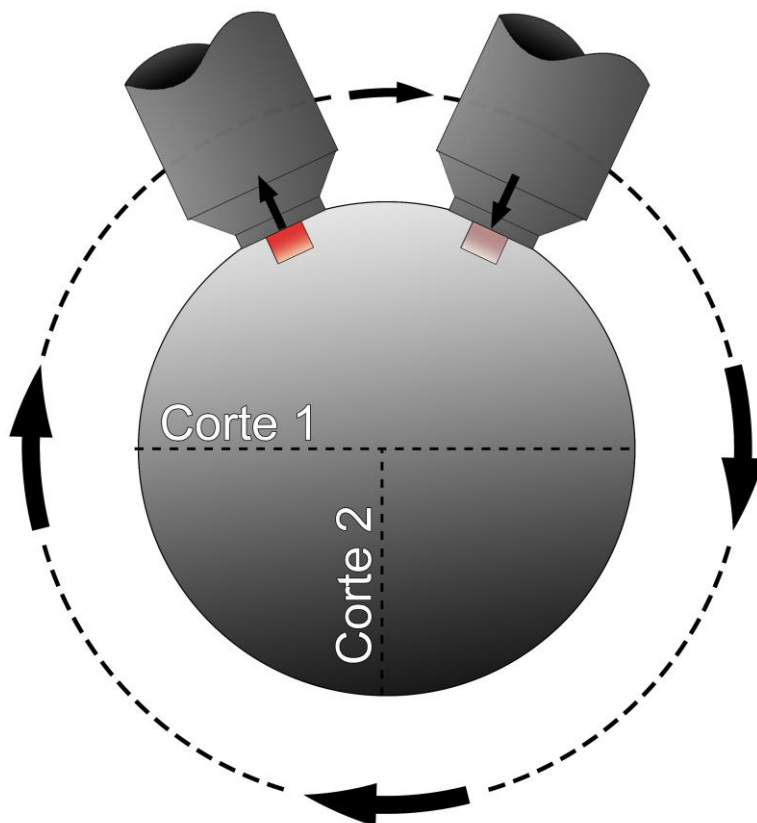


Figura 3.14 - Método de corte do varão após o ensaio.

Foram obtidas, desta forma, 3 vistas do canal, no início, meio e final da trajetória. Decidiu-se não cortar o varão em mais secções pelo facto de estas tornarem-se menores à medida dos cortes, tornando difícil de se obter um corte que seja perpendicular à trajetória do canal. Para além disso, de acordo com a literatura, há possibilidade do início do canal não se encontrar estabilizado o que pode inviabilizar a caracterização [11].

A variação da área transversal do canal ao longo das 3 vistas fotografadas foi medida utilizando um *software* que permite a medição de comprimentos e áreas de imagens, *ImageJ*.

3.6.2 Caracterização Metalográfica

De forma a efetuar a análise metalográfica, foram escolhidas as amostras com interesse a estudar. Estas foram polidas numa lixadora e polidora giratória *Buehler Phoenix Alpha* em conjunto com lixas de água *Buehler CarbiMet* de grão P80 até à P4000. Foi ainda usado um disco de pano, *MicroFloc*, em conjunto com uma solução abrasiva de alumina com granulometria de 1 μm para obter um acabamento espelhado.

Para que se pudesse observar o *Nugget* e a zona termomecânica (ZTMA) efetuou-se um contraste químico. Para tal foi utilizado o reagente *Tucker* adaptado cuja composição química consiste em: 121 ml de HCl (a 37%), 23ml de HNO₃ (a 65%) e 15 ml de HF (a 48%).

O ataque foi efetuado dentro de uma *hotte*, deixando a amostra imersa no reagente entre 8 e 10 segundos, sendo que foi efetuado incrementalmente com períodos de 2 segundos. O tempo total de imersão dependeu da amostra.

3.6.3 Mapa de Microdurezas

Para compreender de que forma as propriedades mecânicas do material foram afetadas, avaliaram-se as durezas em torno de um canal. Isto é, através de um mapa de microdurezas é possível revelar a variação ou homogeneidade das propriedades mecânicas na proximidade do canal. O mapa foi realizado utilizando um microdurómetro, *Mitutoyo HM_112 Micro-Vickers*, de acordo com a norma ISO 6507-1:2018.

Escolheu-se o canal cuja geometria mostrou ser a mais uniforme e cujos parâmetros foram iguais aos do ensaio final helicoidal cilíndrico. Na Figura 3.15 observam-se as indentações que foram efetuadas com uma carga de 0,5 kg, com um espaçamento de 0,5 mm e com um tempo de indentação de 10 segundos.

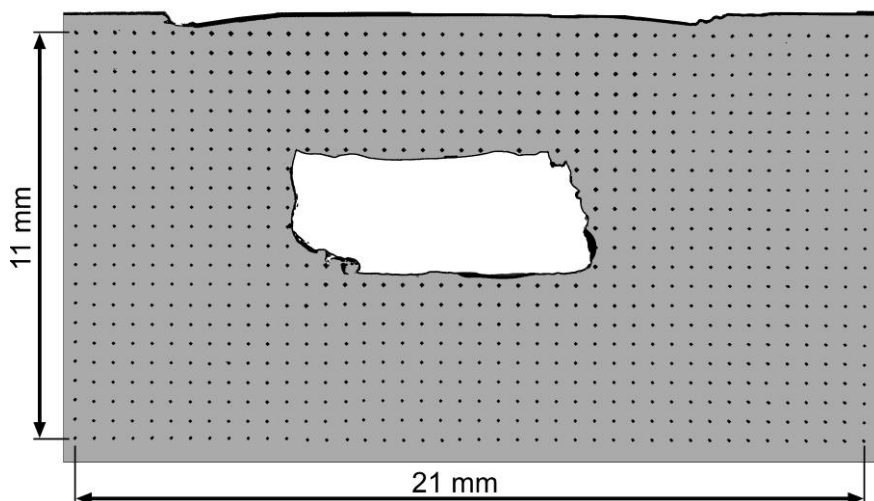


Figura 3.15 - Mapa de microdurezas efetuado.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados e comentados os resultados obtidos nos ensaios efetuados com a tecnologia FSCO. São apresentados e analisados os canais produzidos e os respetivos parâmetros, o mapa de microdurezas, as caracterizações metalográficas, o canal helicoidal cilíndrico e o ensaio térmico do permutador térmico produzido.

4.1 Produção dos Canais Orbitais

4.1.1 Conjunto Ferramenta A

Deu-se início à vertente experimental utilizando o conjunto ferramenta A, com $\omega_m = 11,5 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e $\omega_F = 540 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$. Devido às suas dimensões reduzidas, momentos depois de se ter dado início ao ensaio, o pino fraturou.

O canal produzido pelo pino, como seria de esperar, apresentou uma dimensão muito reduzida, tal como se pode observar na Figura 4.1. Foi medida a área do canal numa secção e obteve-se uma área de $4,32 \text{ mm}^2$. Assim, a utilização deste pino foi excluída.

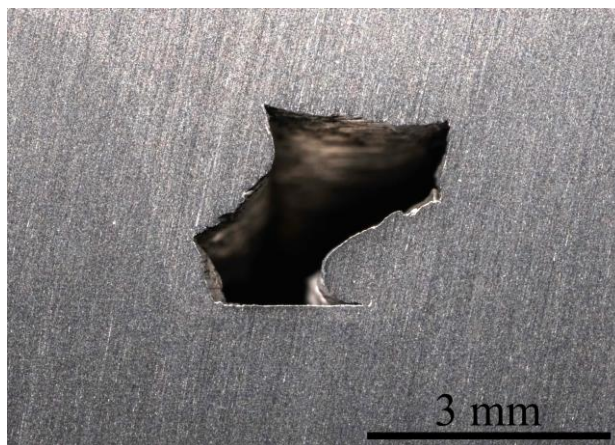


Figura 4.1 - Secção transversal do canal produzido no ensaio 1.1, pelo conjunto ferramenta A.

4.1.2 Conjunto Ferramenta B

Os ensaios efetuados com o conjunto ferramenta B, apresentaram canais com as áreas transversais maiores, contudo, o acabamento exterior dos canais foi bastante irregular. Isto aconteceu pelo facto do *shoulder* ter penetrado bastante para que este entrasse em contacto total com o varão e as aparas produzidas revelaram-se difíceis de retirar.

Na Figura 4.2 apresenta-se as 3 secções dos canais dos ensaios 2.1 e 2.4, ambos efetuados com $\omega_m = 11,5 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$.

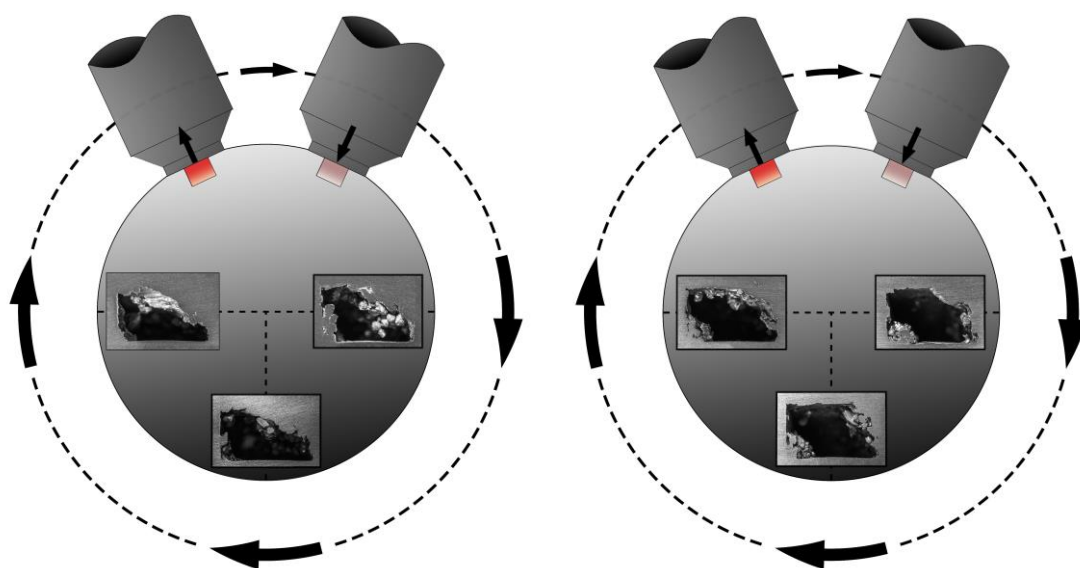


Figura 4.2 - Secções transversais dos canais em 3 zonas dos ensaios 2.1 (à esquerda) efetuado com $\omega_F = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e 2.4 (à direita) efetuado a $\omega_F = 900 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, efetuados com o conjunto ferramenta B.

Observa-se que, para este conjunto ferramenta, o canal com maior secção transversal ocorreu no ensaio com maior $\omega_F = 900 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$. O canal que demonstrou uma geometria mais próxima da retangular foi, também, o ensaio com maior ω_F .

Na Tabela 4-1 apresentam-se as variações das áreas transversais dos canais, dos ensaios 2.1 e 2.4, nas 3 secções.

Tabela 4-1 - Áreas transversais dos canais dos ensaios 2.1 e 2.4 nas 3 secções.

	Secção 1 [mm ²]	Secção 2 [mm ²]	Secção 3 [mm ²]
Ensaio 2.1	23,3	24,7	24,9
Ensaio 2.4	27,9	29,8	27,5

No decorrer dos ensaios registaram-se, no conjunto ferramenta, temperaturas entre 77 °C e 82 °C. Apesar de não ter sido possível registar a temperatura do pino por este se encontrar dentro do varão, esta foi, certamente, muito superior dado o facto de ter sido introduzida deformação plástica.

No ensaio 2.1, efetuado com $\omega_F = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, o varão atingiu uma temperatura máxima de 230° C na vizinhança da ferramenta. Enquanto no ensaio 2.4, efetuado com $\omega_F = 900 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, o varão atingiu 260 °C. A diferença de temperaturas entre estes ensaios deve-se a uma maior ω_F e à temperatura inicial do varão no ensaio 2.4 ser mais elevada, consequência dos ensaios anteriores.

Na Figura 4.3 observam-se as imagens termográficas dos ensaios 2.1 e 2.4 no instante onde foi registada a temperatura de pico.

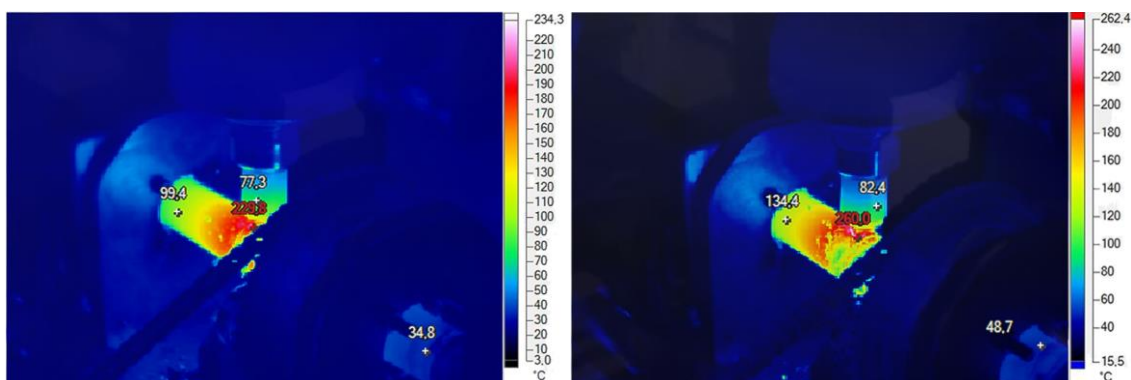


Figura 4.3 - Imagens termográficas dos ensaios 2.1 (à esquerda) e 2.4 (à direita) nos respetivos picos de temperaturas registados.

Na Figura 4.4 observam-se os acabamentos exteriores dos ensaios 2.1 e 2.4. Este conjunto ferramenta deixou um acabamento exterior irregular.

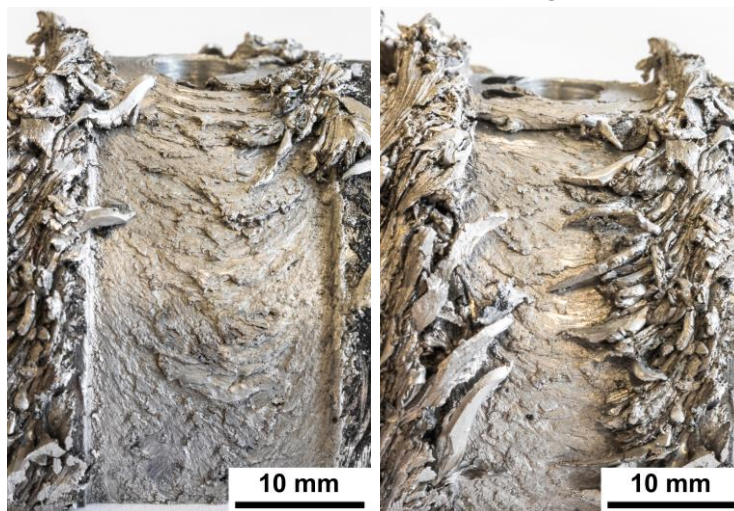


Figura 4.4 - Ensaios efetuados com o conjunto ferramenta B. Acabamentos exteriores dos ensaios 2.1 (à esquerda) e 2.4 (à direita).

Para que a ferramenta funcione como projetado, o *shoulder* tem que estar em total contacto com o componente, seja chapa ou varão. Para o diâmetro do varão utilizado, o *shoulder*, devido ao seu elevado diâmetro, ϕ_s [mm], penetrou bastante o varão alterando as suas dimensões exteriores. É de notar que, para remover as aparas aderentes, o componente terá de ser maquinado pois estas são difíceis de remover manualmente.

Comparando os dois ensaios, o ensaio 2.4 apresentou o acabamento exterior mais irregular devido à ação da temperatura, visto que esta foi superior ao do ensaio anterior, o que agravou o acabamento exterior.

4.1.3 Conjunto Ferramenta C

Nestes ensaios, foi utilizado um *shoulder* com uma maior capacidade de extração do material em conjunto com um pino cilíndrico com um passo de rosca superior. O objetivo foi compreender se uma extração de material superior seria benéfica.

Para $\omega_m = 11,5 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, este conjunto ferramenta mostrou-se inutilizável para este tipo de ensaios. Como já foi mencionado, um *shoulder* com $\phi_s = 19 \text{ mm}$ teve que penetrar bastante o componente para que este entrasse em contacto total. Porém, quanto mais se penetrava a ferramenta mais esta removia o material. Devido a esta elevada capacidade de extração do material pelo *shoulder* e pino, os ensaios terminaram com as dimensões do varão muito alteradas e os canais produzidos apresentaram-se inutilizáveis, tal como se pode observar na Figura 4.5.

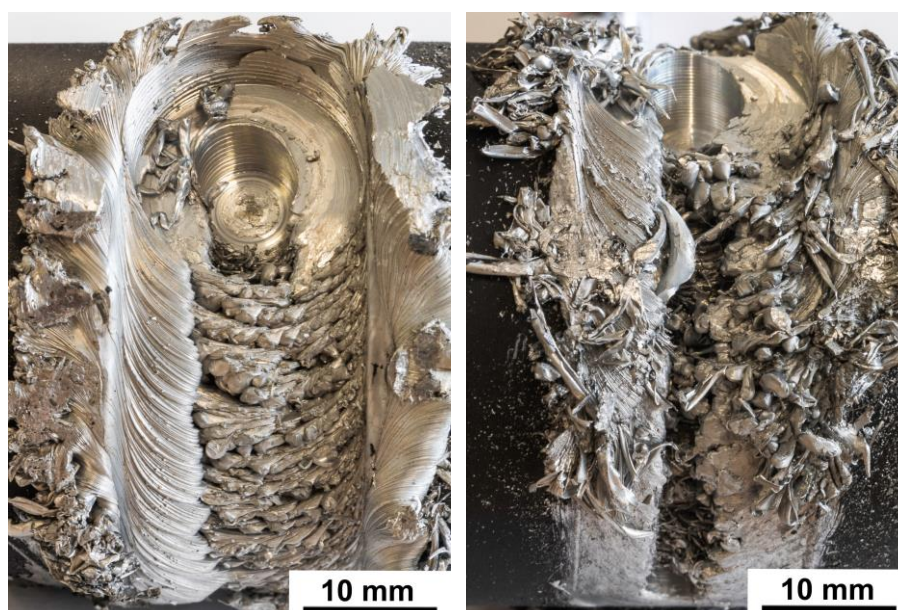


Figura 4.5 – Ensaios efetuados com o conjunto ferramenta C.

Acabamentos exteriores dos ensaios 3.1 efetuado com $\omega_F = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ (à esquerda) e 3.2 efetuado com $\omega_F = 1120 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ (à direita).

Após a avaliação dos ensaios efetuados com os conjuntos ferramenta B e C (com os *shoulders* com $\phi_s = 19$ mm), concluiu-se que os seus diâmetros eram elevados para o diâmetro do varão utilizado. Ilustra-se na Figura 4.6 uma comparação entre dois *shoulders* com $\phi_s = 19$ mm e $\phi_s = 15$ mm.

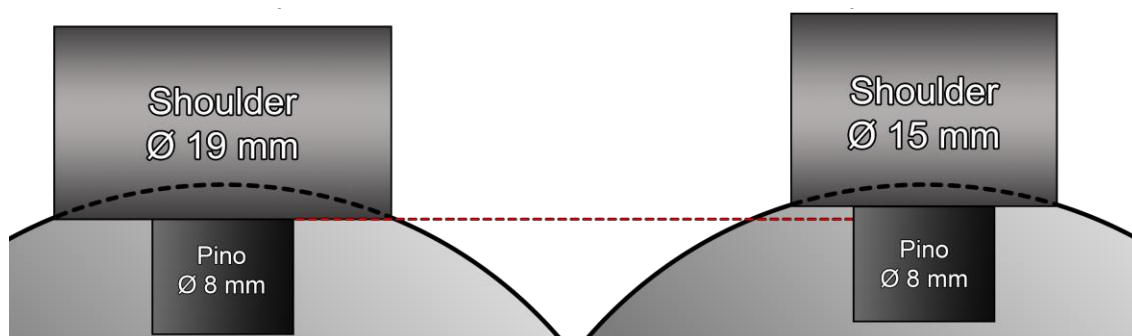


Figura 4.6 – Comparação da penetração necessária para o contacto total de *shoulders* com diâmetros de 19 mm (à esquerda) e 15 mm (à direita).

Para que o *shoulder* com $\phi_s = 19$ mm entrasse em total contacto com o varão, o *shoulder* teria de penetrar pelo menos 1,9 mm o que alterava as dimensões externas do varão e o processo terminava com um acabamento superficial grosseiro. Um *shoulder* com $\phi_s = 15$ mm teria de penetrar pelo menos 1,15 mm para que este entre em contacto total com o varão. Assim, a superfície do varão não sofria alterações tão elevadas comparativamente à um *shoulder* com $\phi_s = 19$ mm. Decidiu-se não reduzir ainda mais o diâmetro do *shoulder* pois, para além de aumentar a dificuldade de o produzir, apresentaria uma área efetiva muito reduzida para exercer força e fechar o topo do canal. Assim, foi projetado um novo *shoulder*, cujo desenho 2D encontra-se no Apêndice - A6. O perfil de estria continua a ser igual ao do *shoulder* do conjunto ferramenta B, variando apenas o seu diâmetro, ϕ_s .

4.1.4 Conjunto Ferramenta D

Nos ensaios efetuados com o conjunto ferramenta D e com $\omega_m = 11,5 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, o *shoulder* removeu material excessivamente, não permitindo a formação correta do canal, obtendo assim um canal totalmente aberto. Na segunda tentativa, foi aumentando a penetração da ferramenta de forma a compreender se é possível obter um canal fechado com a configuração da ferramenta.

Contudo, apesar do canal se ter mostrando mais fechado que o primeiro, o resultado foi semelhante e conclui-se que a ferramenta não é adequada para este processo. Na Figura 4.7 observam-se os ensaios mencionados.

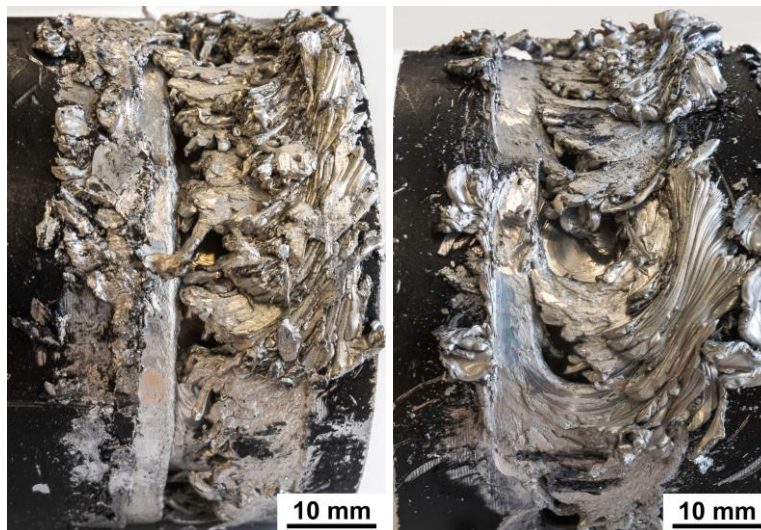


Figura 4.7 - Ensaios efetuados com o conjunto ferramenta D.
Acabamentos exteriores dos ensaios 4.1 (à esquerda) e 4.2 (à direita), ambos efetuados com $\omega_p = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$.

4.1.5 Conjunto Ferramenta E

Decidiu-se utilizar o lado contrário do *shoulder* pertencente ao conjunto ferramenta anterior, com o objetivo de compreender qual seria o impacto na utilização de um *shoulder* côncavo sem estrias.

Optou-se, também, por utilizar um comprimento de pino, $L_p = 4,5 \text{ mm}$, com o objetivo de compreender qual é o comprimento mínimo necessário para que haja formação de um canal.

Após o corte do varão, não foi produzido nenhum canal com dimensão aceitável. Observa-se que o pino não apresentou comprimento suficiente e, conseqüentemente, este não foi capaz de extrair material suficiente para que houvesse a produção do canal. Foram testadas outras velocidades de rotação, porém o resultado foi semelhante.

Na Figura 4.8 observam-se as secções transversais dos canais em 3 zonas do ensaio 5.4, efetuados com $\omega_m = 11,5 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$.

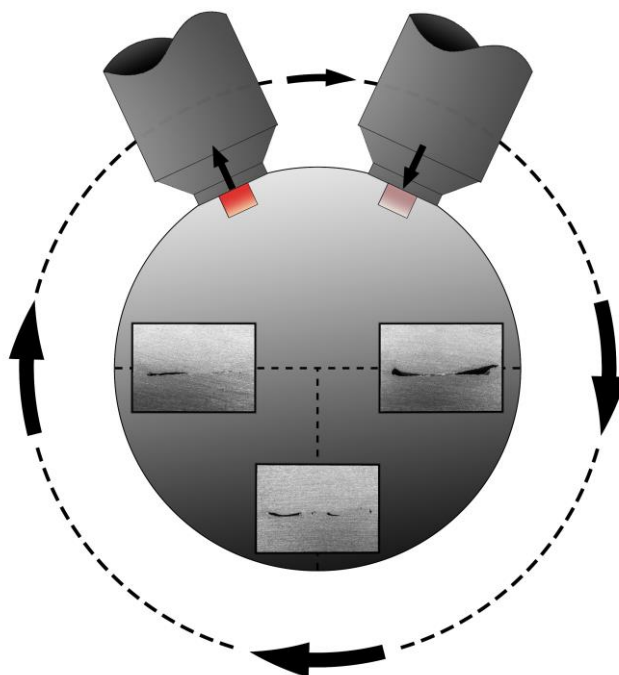


Figura 4.8 - Secções transversais dos canais em 3 zonas do ensaio 5.4, efetuados com o conjunto ferramenta E e com $\omega_F = 900 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$.

Contudo, apesar de não haver uma formação de canal, observa-se a iminência para a sua formação. Concluindo, assim, que o comprimento de pino escolhido foi o comprimento a partir do qual se dá a formação de um canal.

Na Figura 4.9 apresenta-se o acabamento exterior do ensaio 5.4 e é possível observar uma melhoria elevada comparando com os acabamentos dos ensaios anteriores.



Figura 4.9 - Ensaio efetuado com o conjunto ferramenta E. Acabamentos exterior do ensaio 5.4.

Esta melhoria deve-se à inexistência das estrias no *shoulder* da ferramenta. Os acabamentos exteriores destes ensaios demonstraram-se muito semelhantes entre si, sem aparas aderentes e com as dimensões exteriores pouco afetadas.

Como os ensaios com este L_p são muito semelhantes, as restantes vistas transversais encontram-se nos Apêndice - A9. Observa-se na Figura 4.10 a imagem termográfica do pico de temperatura registado.

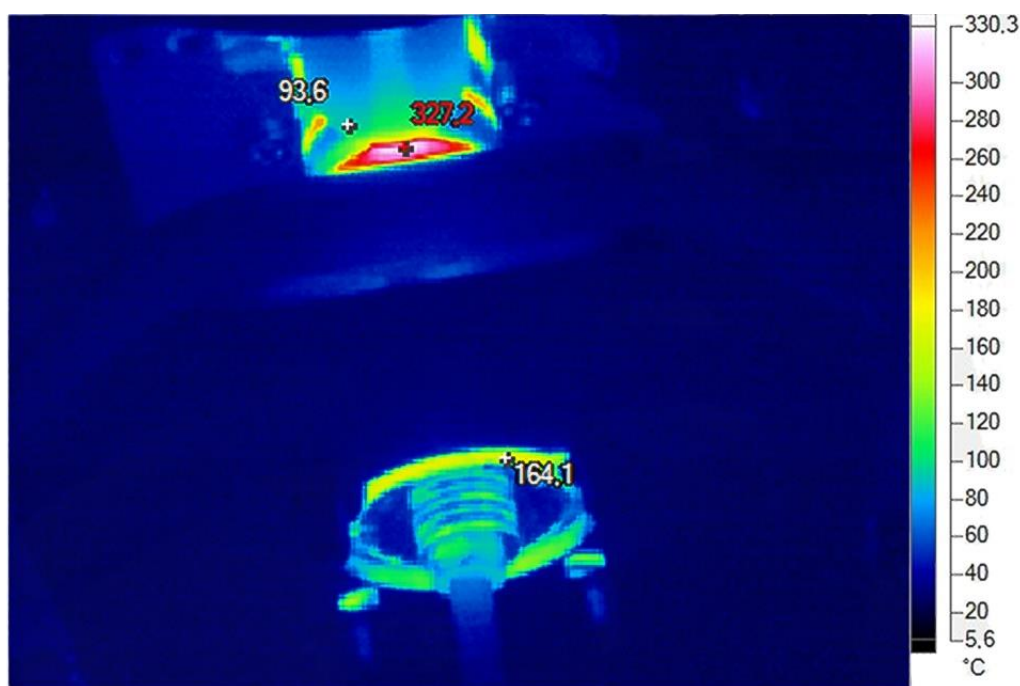


Figura 4.10 - Imagem termográfica do ensaio 5.4 no respetivo pico de temperatura registado.

No ensaio com este conjunto ferramenta a $900 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, o varão atingiu uma temperatura de $327 \text{ }^\circ\text{C}$ na vizinhança da ferramenta, enquanto na ferramenta a temperatura máxima registada pela câmara termográfica foi de $93,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Apesar de não ter sido possível registar a temperatura do pino por este encontrar-se dentro do varão, esta foi, certamente, muito superior dado o facto do material ter sofrido formação plástica.

Uma dificuldade sentida no procedimento experimental deste estudo foi o facto dos varões se encontrarem inicialmente quentes devido ao(s) ensaio(s) anterior(es) (entre $60 \text{ }^\circ\text{C}$ e $100 \text{ }^\circ\text{C}$). Para reduzir a temperatura inicial os varões foram arrefecidos com ar comprimido, o que implicou maiores intervalos de tempo entre ensaios. E nem sempre foi possível reduzir a temperatura dos varões à temperatura ambiente.

4.1.6 Conjunto Ferramenta E'

Seguidamente, o comprimento do pino foi aumentado para 6,6 mm e os ensaios para este conjunto ferramenta foram repetidos. Para este L_p , ocorreu a formação de canais com dimensões superiores relativamente ao L_p utilizado no conjunto ferramenta E. Na Figura 4.11 observam-se as vistas transversais dos canais dos ensaios 6.1, 6.2 e 6.3.

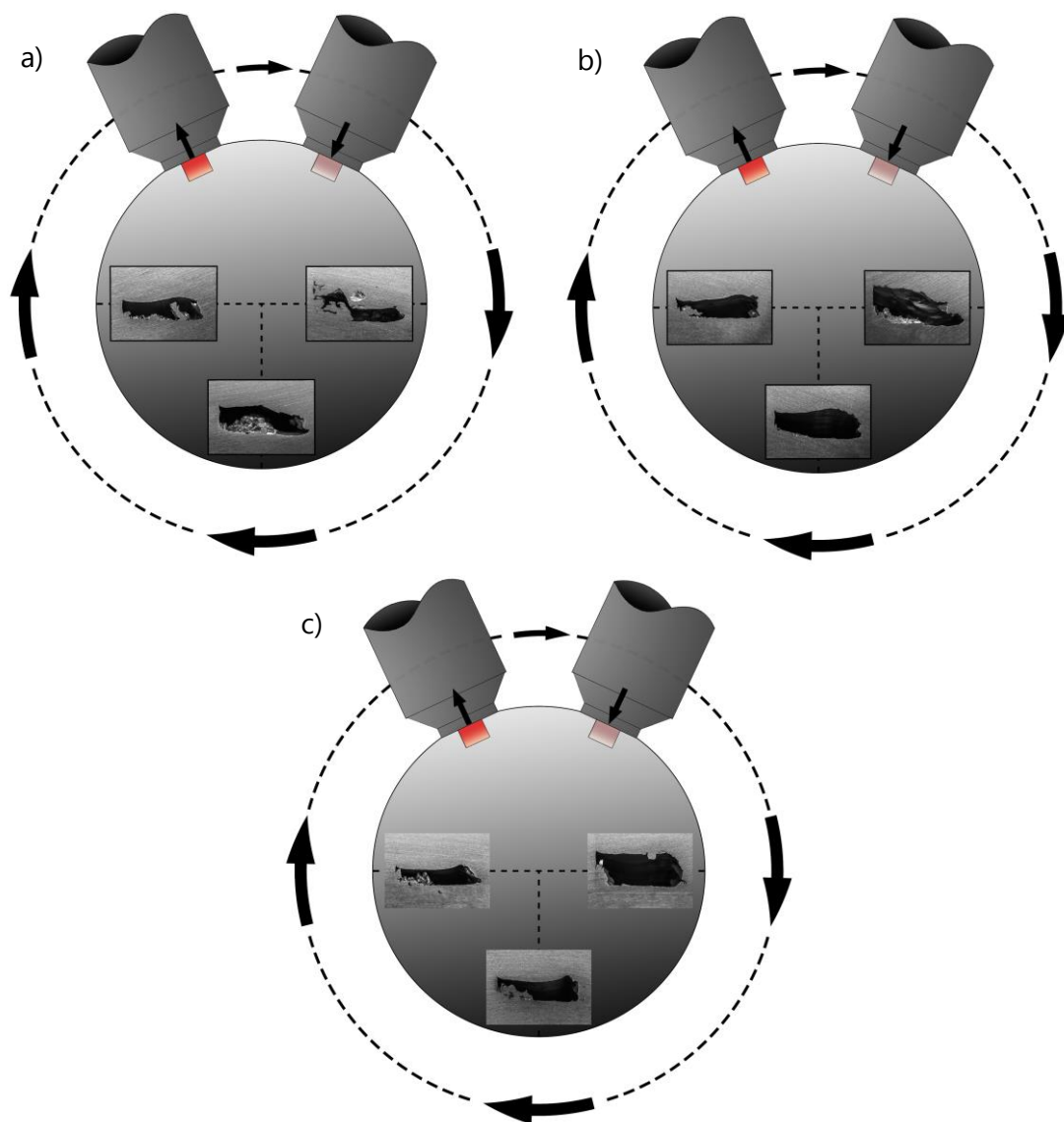


Figura 4.11 - Secções transversais dos canais em 3 zonas efetuados com o conjunto ferramenta E'.

a) Ensaio 6.1 efetuado com $\omega_F = 450 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, b) Ensaio 6.2 efetuado com $\omega_F = 560 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e

c) Ensaio 6.3 efetuado com $\omega_F = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$.

A primeira secção do ensaio 6.1 efetuado com a ω_F mais reduzida, revelou que, inicialmente, o processo não se encontrava estacionário. Contudo, após atingida a estacionaridade do processo, a geometria permaneceu relativamente consistente ao longo da trajetória.

É possível observar que, na primeira secção dos canais destes 3 ensaios, o ensaio 6.2, com $\omega_F = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, promoveu o canal com uma maior secção transversal. Contudo, nas restantes secções, o ensaio 6.3 com a $\omega_F = 560 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ mostrou ser o ensaio com a secção transversal mais consistente.

Na Tabela 4-2 observam-se as áreas transversais dos canais dos ensaios 6.1, 6.2 e 6.3.

Tabela 4-2 - Áreas transversais dos canais dos ensaios 6.1, 6.2 e 6.3 nas 3 secções.

	Secção 1 [mm ²]	Secção 2 [mm ²]	Secção 3 [mm ²]
Ensaio 6.1	7.3	12.1	9.7
Ensaio 6.2	15.9	15.2	10.4
Ensaio 6.3	18.5	9.6	7.6

Na Figura 4.12 observam-se as imagens termográficas dos ensaios 6.2 e 6.3 nos respetivos picos de temperatura.

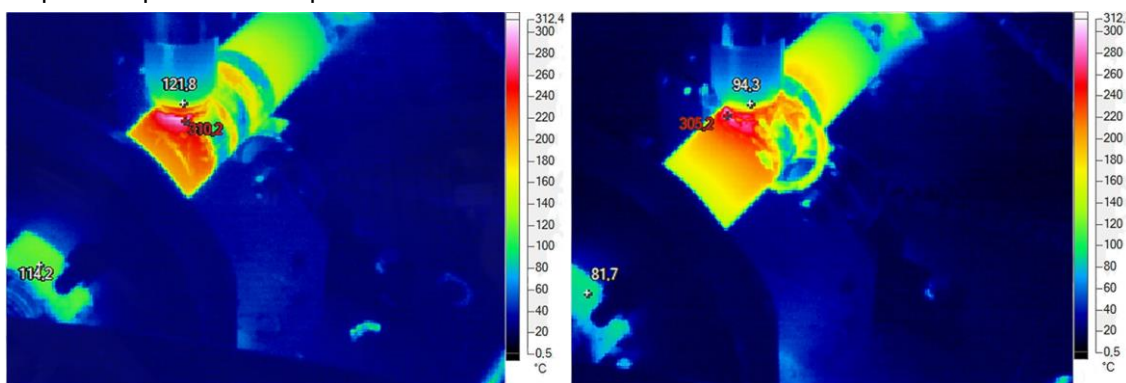


Figura 4.12 - Imagens termográficas dos ensaios 6.2 (à esquerda) e 6.3 (à direita) nos respetivos picos de temperatura.

Observa-se que, em ambos os ensaios, foi atingida uma temperatura na vizinhança da ferramenta entre 305 °C e 310 °C. Apesar do ensaio 6.3 ter sido efetuado com uma ω_F superior, este foi efetuado antes do ensaio 6.2. Tanto o varão como a ferramenta apresentaram uma temperatura inicial superior à do ensaio 6.2.

Como a única diferença entre os conjuntos ferramenta E e E' foi o comprimento do pino, os acabamentos exteriores destes ensaios foram muito semelhantes entre si. Na Figura 4.13 observam-se os acabamentos exteriores dos ensaios 6.1, 6.2 e 6.3.

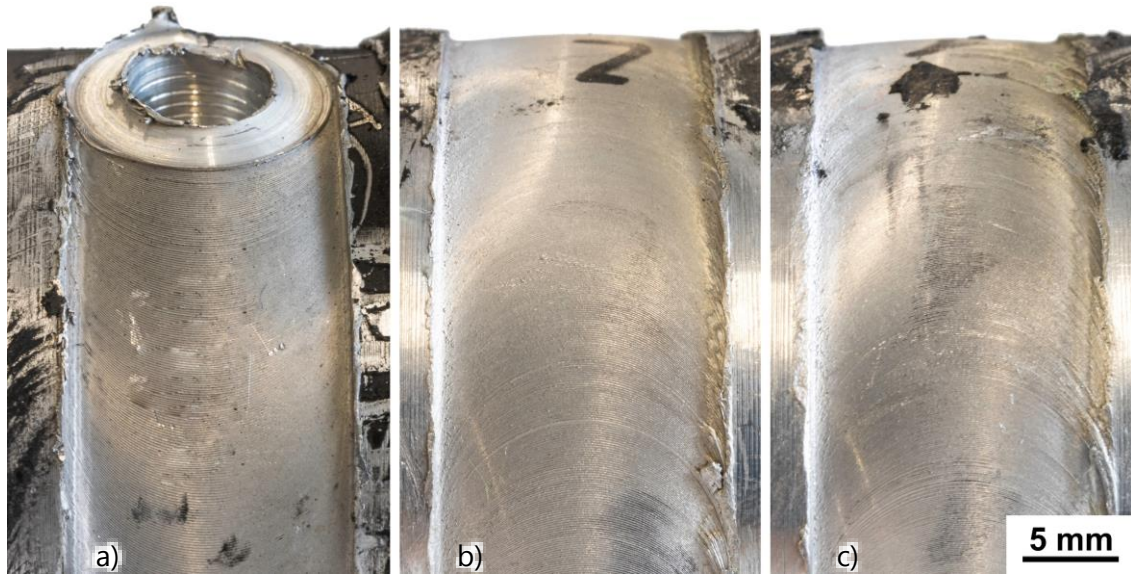


Figura 4.13 - Ensaios efetuados com o conjunto ferramenta E'.
Acabamentos exteriores dos ensaios 6.1 em a), 6.2 em b) e 6.3 em c).

Na Figura 4.14 observam-se as vistas transversais dos canais dos ensaios 6.4 e 6.5.

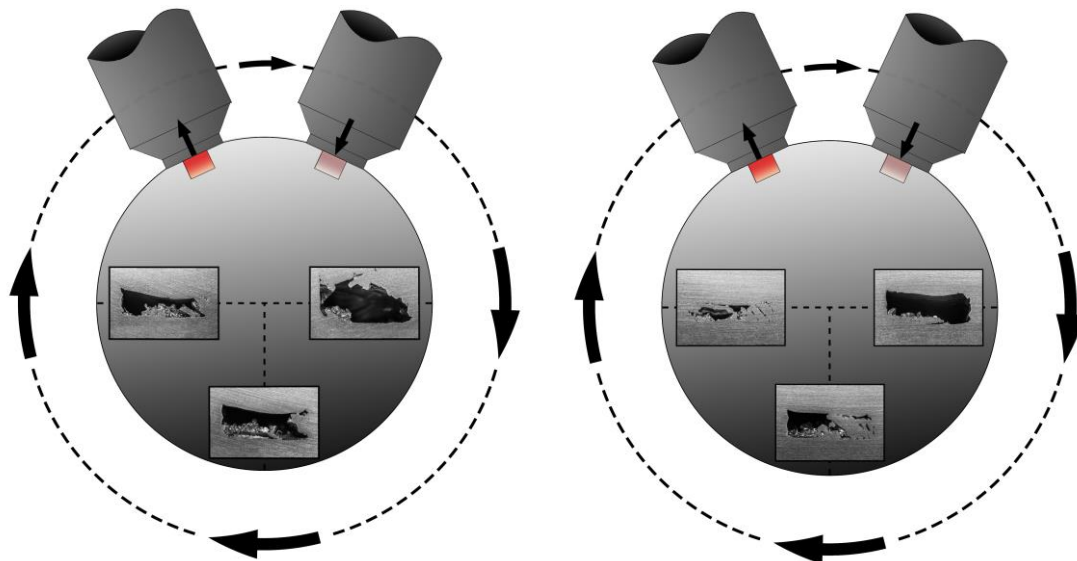


Figura 4.14 - Secções transversais dos canais em 3 zonas dos ensaios efetuados com o conjunto ferramenta E'.

Ensaio 6.4 (à esquerda) efetuado com $\omega_F = 900 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e 6.5 (à direita) efetuado com $\omega_F = 1120 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$.

O ensaio 6.4, efetuado a $900 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, na primeira secção formou um canal de geometria irregular e nas restantes secções a geometria aproximou-se da retangular, contudo, apresentou muitas irregularidades na base do canal.

Destes 2 ensaios é possível concluir que o acréscimo da ω_F , para $1120 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, provoca uma redução significativa das áreas transversais após a primeira secção do canal.

A primeira secção do ensaio 6.5 revela uma geometria bastante retangular e com uma secção transversal elevada, contudo as próximas secções demonstram-se muito inferiores à primeira secção. Isto deve-se à elevada temperatura, originada pela elevada ω_F , que provoca uma redução da secção transversal do canal.

O ensaio 6.6, cujas secções transversais se podem observar na Figura 4.15, efetuado com $\omega_F = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, foi repetido a seguir de um ensaio que deixou o varão a uma temperatura de cerca $167 \text{ }^\circ\text{C}$.

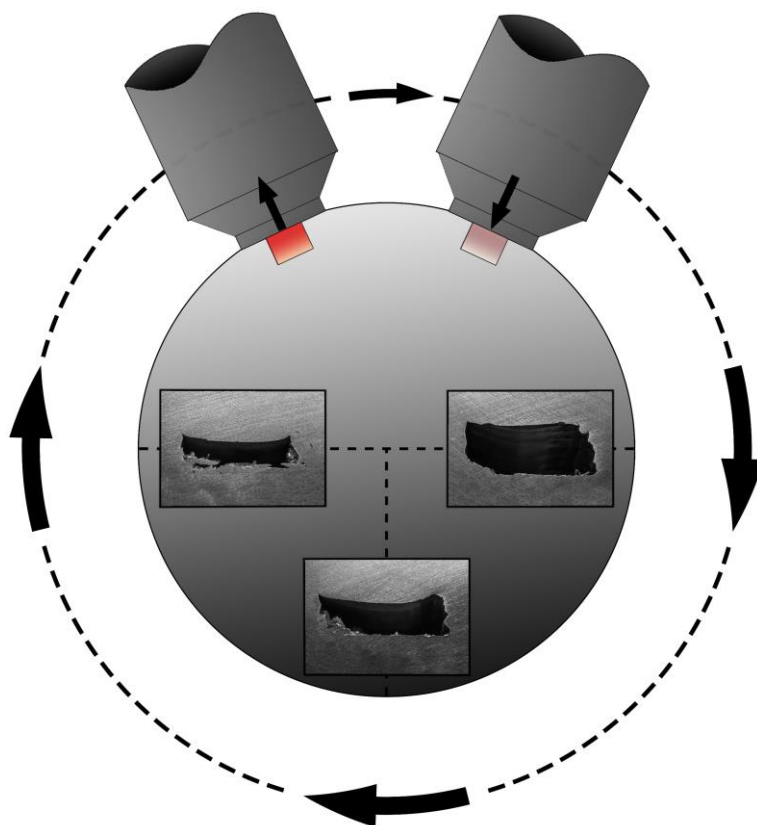


Figura 4.15 - Secções transversais dos canais em 3 zonas do ensaio 6.6 efetuado com o conjunto ferramenta E e com $\omega_F = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$.

Observou-se não só uma boa estabilidade geométrica do canal, ao contrário dos outros ensaios com este conjunto ferramenta, mas também as secções transversais mais elevadas. Concluiu-se que esta velocidade de rotação de ferramenta, quando o varão apresenta uma temperatura inicial de cerca $160 \text{ }^\circ\text{C}$, permite uma produção de um canal estável e que se mostra não ser afetado pelo aumento da temperatura durante o ensaio. Dado isto, foi esta velocidade de rotação da ferramenta escolhida para a realização do canal helicoidal cilíndrico.

Na Tabela 4-3 observam-se as áreas transversais dos canais dos ensaios 6.4, 6.5 e 6.6.

Tabela 4-3 - Áreas transversais dos canais dos ensaios 6.4, 6.5 e 6.6 nas 3 secções.

	Secção 1 [mm ²]	Secção 2 [mm ²]	Secção 3 [mm ²]
Ensaio 6.4	17,6	9,9	7,6
Ensaio 6.5	14,5	9,8	3,8
Ensaio 6.6	20,1	12,7	8,4

Na Figura 4.16 visualizam-se as imagens termográficas dos ensaios 6.4 e 6.5 nos respetivos picos de temperatura.

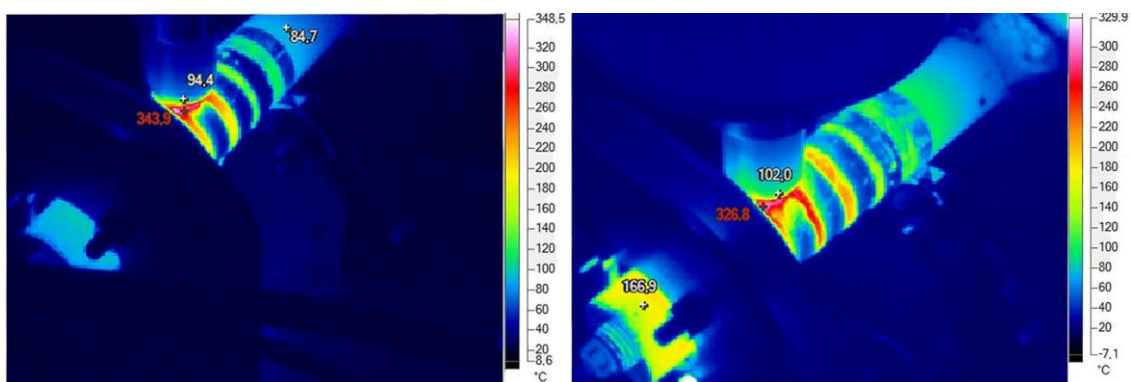


Figura 4.16 - Imagens termográficas dos ensaios 6.4 (à esquerda) e 6.5 (à direita) nos respetivos picos de temperatura.

Observa-se que em ambos os ensaios a temperatura das ferramentas atingiram entre 95 °C a 102°C. Apesar de não ter sido possível registar a temperatura do pino por este se encontrar dentro do varão, esta foi, certamente, muito superior dado o facto de o material ter atingido o regime viscoplástico.

Apesar do ensaio 6.4 ter sido efetuado com uma ω_F mais reduzida (900 rev·min⁻¹), a temperatura na vizinhança da ferramenta foi 17 °C superior (343,9 °C) à registada no ensaio 6.5 efetuado com $\omega_F = 1120$ rev·min⁻¹ (326,8 °C). Contrariamente, o varão do ensaio 6.5 apresentou o dobro da temperatura máxima do varão do ensaio 6.4 (166,9 °C).

Os acabamentos exteriores destes ensaios demonstraram-se muito semelhantes entre si, sem aparas aderentes e com as dimensões externas pouco afetadas.

Na Figura 4.17 observam-se os acabamentos dos ensaios 6.4, 6.5 e 6.6.



Figura 4.17 - Ensaios efetuados com o conjunto ferramenta E'.
Acabamentos exteriores dos ensaios 6.4 em a), 6.5 em b) e 6.6 em c).

É possível também observar a diferença do acabamento exterior. Para este *shoulder* para a mesma velocidade de avanço, quanto maior a ω_F , e conseqüentemente mais quente, mais irregular se torna o acabamento. Pois apesar do menor espaçamento entre as estrias provocadas pelo *shoulder*, a temperatura mais elevada provoca rugosidades aleatórias entre as estrias, tal como se pode observar na Figura 4.18.

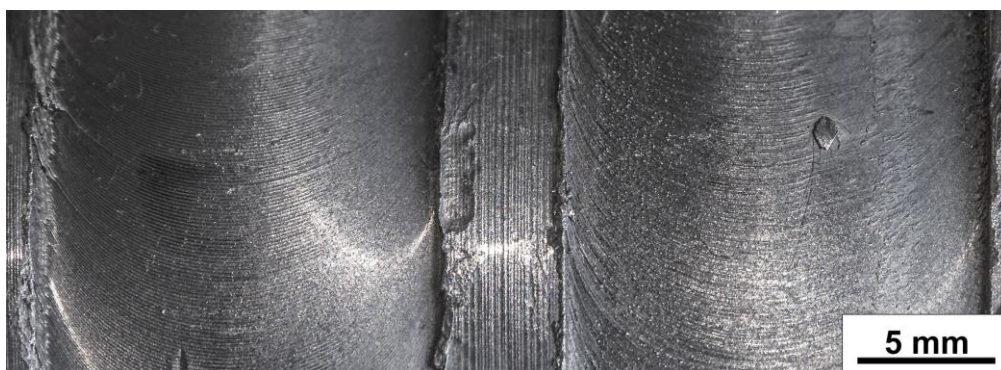


Figura 4.18 - Comparação entre acabamentos exteriores dos ensaios 6.1 (à esquerda) efetuado com $\omega_F = 450 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e 6.5 (à direita) efetuado com $\omega_F = 1120 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$.

No decorrer dos ensaios 6.1, 6.5 e 6.6 observou-se que o material extraído provocava uma apara contínua ou secções de comprimento elevado o suficiente, tal que foi possível coletá-las e pesá-las. Desta forma foi possível estimar o volume do canal helicoidal cilíndrico produzido. Algumas aparas podem ser observadas na Figura 4.19.



Figura 4.19 – Secções de algumas aparas produzidas.

Para terminar os ensaios com este conjunto ferramenta decidiu-se compreender qual seria a influência do aumento da v_G , isto é, aumentando a velocidade de rotação do varão. A velocidade de rotação do motor, ω_M , foi aumentada de $11,5 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ (equivalentes a $71 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) para $14,6 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ (equivalentes a $90 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$). Na Figura 4.20 observam-se as secções transversais dos ensaios 8.2 e 8.4.

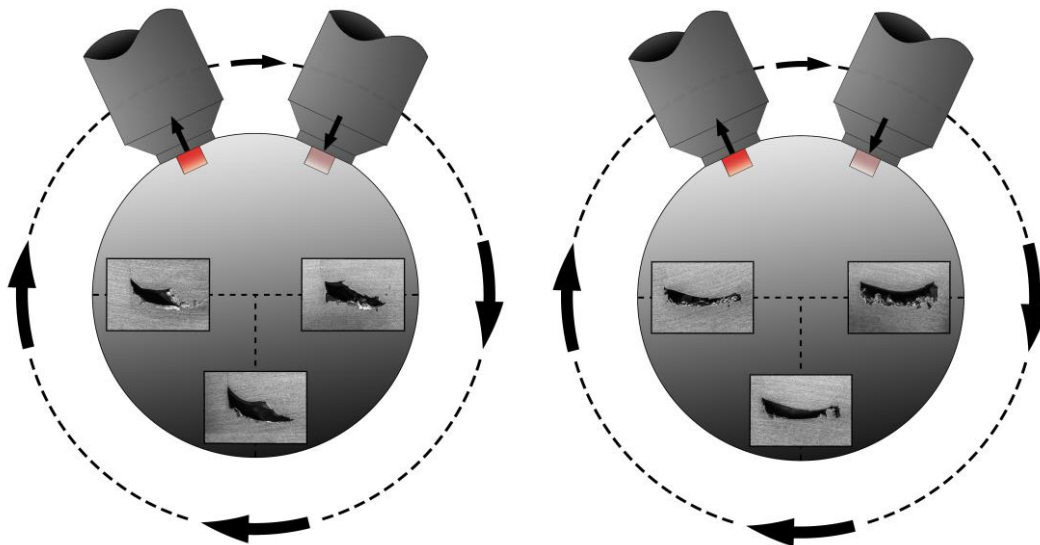


Figura 4.20 - Secções transversais dos canais em 3 zonas dos ensaios efetuados com o conjunto ferramenta E'. Ensaio 8.2 (à esquerda) efetuado com $\omega_F = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e ensaio 8.4 efetuado com $\omega_F = 900 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$.

É possível visualizar que no ensaio 8.2 foi formado um canal com uma geometria bastante consistente, mas com uma secção transversal menor quando comparado com um ensaio com uma v_G inferior. No ensaio 8.4 compreende-se que aumentando a ω_F dificulta ainda mais a formação do canal obtendo uma geometria do canal irregular e com as secções transversais mais reduzidas.

Na Tabela 4-4 observam-se as áreas transversais dos canais dos ensaios 8.2 e 8.4.

Tabela 4-4 - Áreas transversais dos canais dos ensaios 8.2 e 8.4 nas 3 secções.

	Secção 1 [mm ²]	Secção 2 [mm ²]	Secção 3 [mm ²]
Ensaio 8.2	6,99	6,88	5,08
Ensaio 8.4	6,97	5,51	4,20

4.1.7 Conjunto Ferramenta F

Foram efetuados, com este conjunto ferramenta, 2 ensaios. Iniciou-se com $\omega_F = 900 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e com $v_G = 71 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Foi formado um canal que não atingiu a estacionariedade e apresentou-se aberto no final do seu percurso, tal como se pode observar na Figura 4.21.



Figura 4.21 - Ensaio efetuado com o conjunto ferramenta F. Acabamento exterior do ensaio 7.2.

Posteriormente tentou-se reduzir a ω_F , contudo, esta redução aumentou os esforços no pino. Devido à redução da temperatura do ensaio e, conseqüentemente, da plasticidade do material, momentos após ter-se dado início ao ensaio o pino partiu. Desta forma concluiu-se que, para as velocidades de rotação da ferramenta utilizadas, a utilização de pinos de diâmetro reduzido não é possível.

4.2 Mapa de Microdurezas

Foi escolhida a primeira secção do ensaio 6.6 pelo facto dos parâmetros terem sido semelhantes aos do ensaio helicoidal cilíndrico final. Foi efetuada uma matriz de indentações constituídas por 22 linhas e 42 colunas.

Apresenta-se, na Figura 4.22, o mapa de microdurezas da amostra.

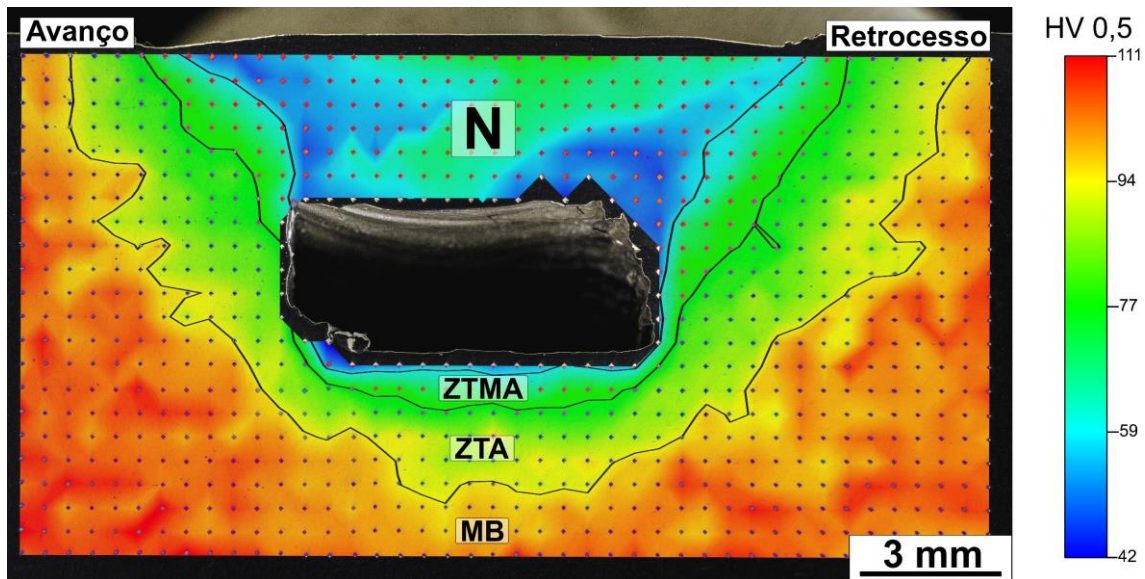


Figura 4.22 - Mapa de microdurezas da primeira secção do ensaio 6.6.

Visualizam-se as zonas microestruturais na vizinhança do canal, o *Nugget* (*N*) e a Zona Termomecanicamente Afetada (ZTMA), a Zona Termicamente Afetada (ZTA) e o Material Base (MB). Dentro da zona do *Nugget* é possível observar uma orientação oblíqua das durezas, este efeito deve-se ao fluxo do material criado pelo pino da ferramenta.

Na Figura 4.23 observa-se o gráfico da variação da dureza transversal das primeiras 6 linhas superiores da amostra. Sendo a linha mais superior a mais escura e a mais clara a mais inferior.

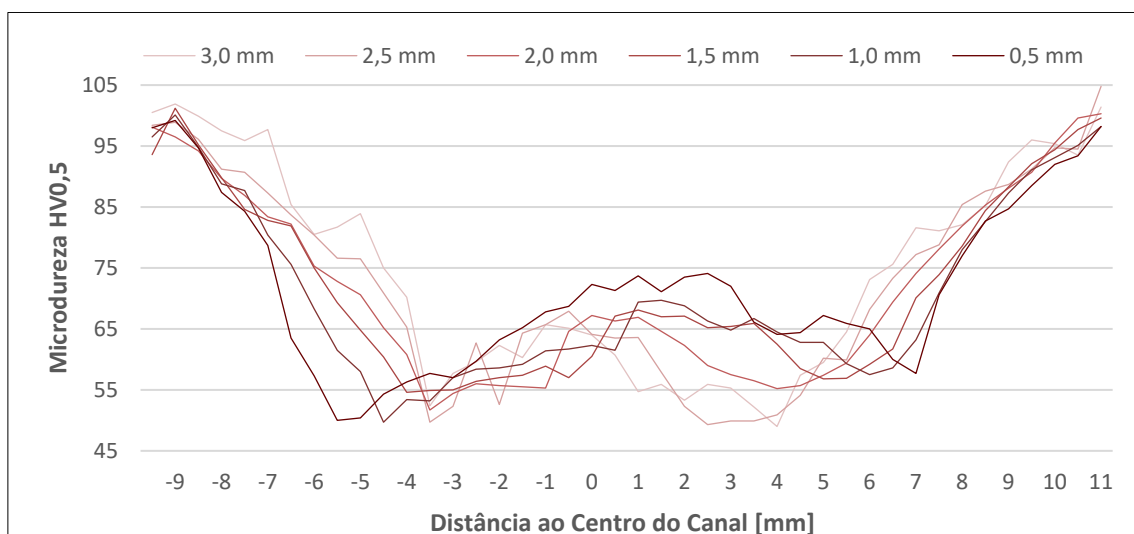


Figura 4.23 - Gráfico da variação transversal da microdureza das primeiras 6 linhas superiores.

Os perfis de microdureza apresentam-se em forma de W, dependendo da temperatura aplicada, seguem a forma típica para esta liga de alumínio [34][35]. Quando a temperatura é elevada (acima de 400 °C no *Nugget* e acima de 300 °C na ZTA), não sendo o caso para nenhum dos ensaios efetuados, o perfil de microdureza apresenta-se em forma de U [36].

Observa-se que existe uma grande queda da microdureza, relativa ao material base, na zona afetada pela ação do pino e *shoulder*, onde os valores mínimos são atingidos na interface entre a ZTMA e a ZTA. Como a temperatura foi reduzida, devido à deformação plástica observa-se uma subida ligeira da dureza na zona central do *Nugget* [37].

É possível observar a influência do *shoulder* na microdureza no topo do canal, visto que a influência do *shoulder* vai sendo reduzida à medida da profundidade, provocando, assim, uma redução da microdureza. Isto observa-se com mais clareza na Figura 4.23, no intervalo 2 mm – 4 mm

Dentro da zona da ação da ferramenta, devido à elevada deformação plástica sofrida pelo material obtiveram-se microdurezas superiores no *Nugget* e na ZTMA, comparativamente à ZTA. Como esta última não sofreu deformação plástica, a sua microdureza é inferior devido a ação térmica. À medida que se vai deslocando da zona de ação da ferramenta até ao MB, onde os efeitos térmicos são cada vez menos sentidos e os valores das microdurezas atingem os valores do MB, aproximadamente 100 HV. A dureza do material base segundo o fornecedor é de 95 HB que equivale a 100 HV - 105 HV.

4.3 Caracterização Metalográfica

Após o contraste químico, numa das amostras, foi possível observar o fluxo do material que ocorreu na totalidade do *Nugget*, este efeito observa-se na Figura 4.24. Este foi o único ensaio em que isto foi possível observar-se. Uma possível justificação para esta ocorrência é a menor ω_F utilizada (450 rev·min⁻¹).

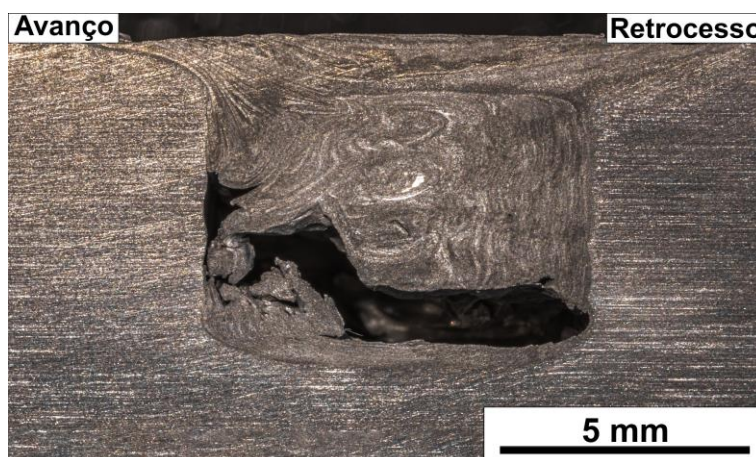


Figura 4.24 - Fluxo de material na totalidade do *Nugget* no ensaio 6.1.

Visualiza-se o padrão, mencionado e observado no subcapítulo anterior, no *Nugget* provocado pelo fluxo do material. Este efeito foi também verificado noutros ensaios, tal como se pode observar na Figura 4.25.

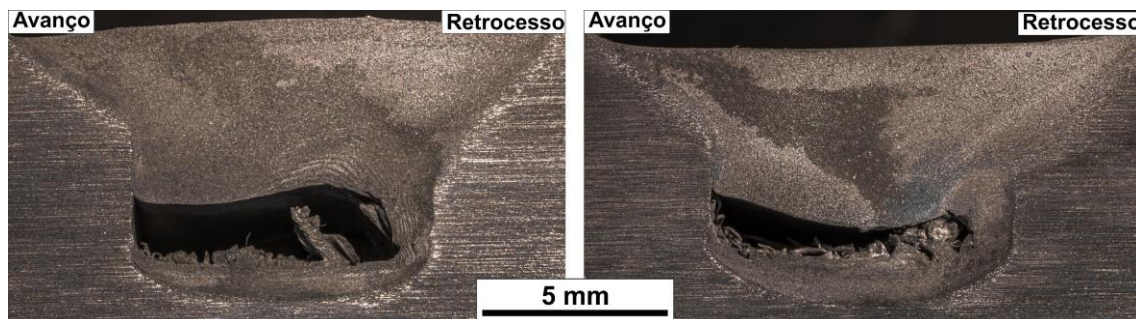


Figura 4.25 - Padrão do fluxo de material nos ensaios 6.1 (à esquerda) e 8.4 (à direita).

É possível também observar, na Figura 4.26, a diferença da geometria do *Nugget* entre a primeira e última secção do ensaio 6.1 efetuado com $\omega_F = 900 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e uma $v_G = 71 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

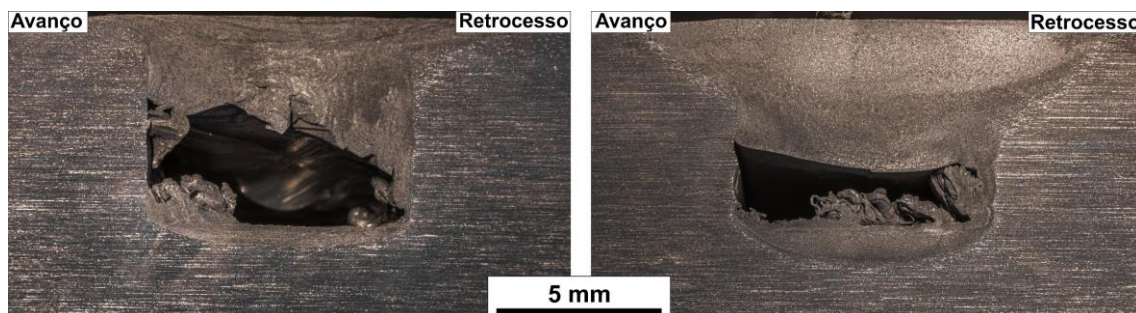


Figura 4.26 - Aumento do *Nugget* entre a primeira (à esquerda) e última (à direita) secção do ensaio 6.4.

Porém, na Figura 4.27, observa-se que a redução da ω_F e aumento v_G não influencia o aumento do *Nugget*. A dimensão constante do *Nugget* deve-se à menor temperatura provocada por uma ω_F mais reduzida ($710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$) e uma v_G superior ($90 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$).

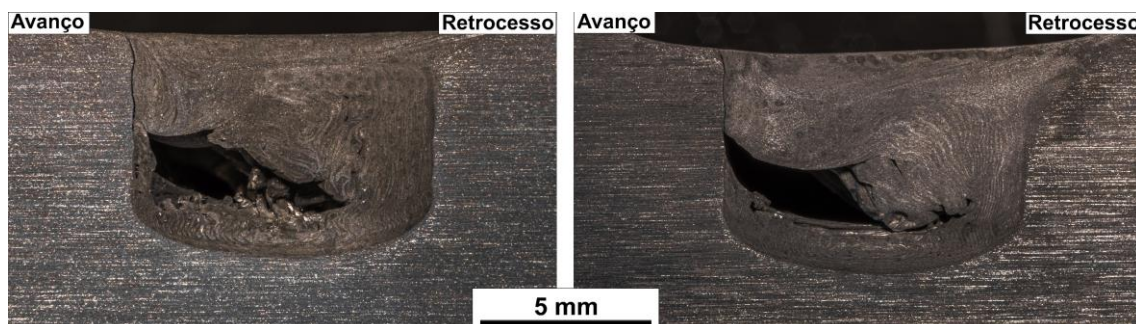


Figura 4.27 – Dimensão do *Nugget* constante entre a primeira (à esquerda) e última (à direita) secção do ensaio 8.2.

Em todas as amostras contrastadas, observou-se uma redução significativa do grão no *Nugget* comparativamente ao material base. Isto justifica a subida ligeira da dureza no centro do *Nugget* mencionada no subcapítulo acima. Os grãos do material base demonstram-se alongados e paralelos entre si pelo facto dos varões utilizados terem sido fabricados por extrusão.

Foi possível observar camadas fortemente encostadas no lado em Avanço. Apesar destas não afetarem necessariamente a estanquidade dos canais, estas camadas mostram-se ser zonas de menor resistência. Se o componente produzido sofrer maiores esforços, é provável que nessas zonas ocorram falhas. Na Figura 4.28 observam-se 4 ensaios, em a) e b) $v_G = 71 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ e em c) e d) $v_G = 90 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, todos efetuados com $\omega_F = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$.

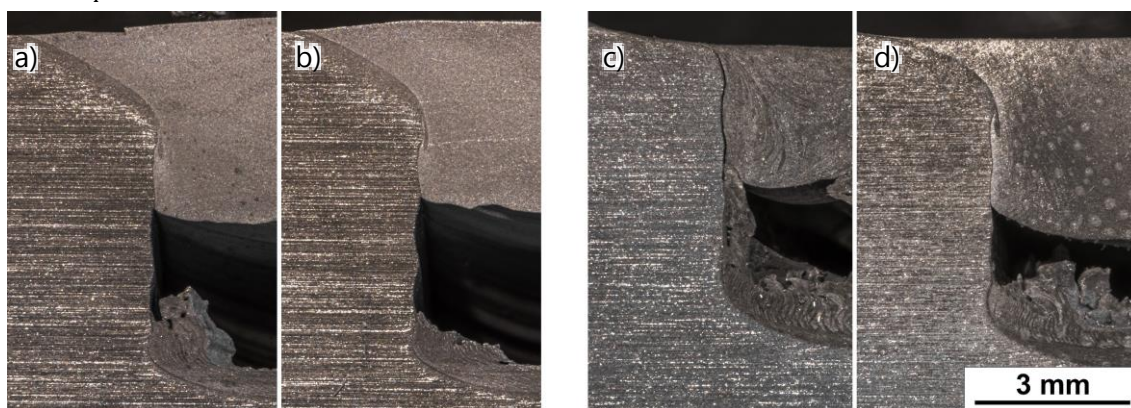


Figura 4.28 - Camadas fortemente das encostadas.

a) Ensaio 6.3, b) Ensaio 6.6, c) Ensaio 8.2 e d) Ensaio 8.3.

Foi possível compreender que estas camadas fortemente encostadas apresentam um maior afastamento nos ensaios onde a v_G foi mais elevada. Uma possível justificação para este acontecimento deve-se à menor temperatura provocada pelo aumento da v_G .

4.4 Produção do Canal Helicoidal Cilíndrico

Como foi referido, para o ensaio helicoidal cilíndrico decidiu-se utilizar $\omega_F = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$, pois esta ω_F permitiu uma produção de um canal estável que se mostra não ser afetado pelo aumento da temperatura.

No entanto, para efetuar o ensaio com a mesma velocidade de avanço da ferramenta do ensaio 4.6, obter-se-ia um canal helicoidal cilíndrico com um passo de 41,6 mm. Como o comprimento útil do varão permitido foi era cerca de 95 mm, com um passo de 41,6 mm obter-se-ia um componente com aproximadamente 2 voltas. Assim, decidiu-se aumentar o intervalo da velocidade de avanço global da ferramenta no ficheiro *Excel* anteriormente referido entre $70 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ e $76 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Na Figura 4.29 visualizam-se os parâmetros revelados.

RPM					
Motor	Z2	11,2	14	18	22,4
1	0,04	284,6	355,8	457,4	569,2
2	0,08	142,3	177,9	228,7	284,6
3	0,12	94,9	118,6	152,5	189,7
4	0,16	71,2	88,9	114,4	142,3
5	0,20	56,9	71,2	91,5	113,8
6	0,24	47,4	59,3	76,2	94,9
7	0,28	40,7	50,8	65,3	81,3
8	0,31	35,6	44,5	57,2	71,2
9	0,35	31,6	39,5	50,8	63,2
10	0,39	28,5	35,6	45,7	56,9
11	0,43	25,9	32,3	41,6	51,7
12	0,47	23,7	29,6	38,1	47,4
13	0,51	21,9	27,4	35,2	43,8
14	0,55	20,3	25,4	32,7	40,7
15	0,59	19,0	23,7	30,5	37,9

RPM		mm/min				
Motor	Z2	Vtan	11,2	14	18	22,4
1	0,04	6,18	12,8	15,3	19,0	23,2
2	0,08	12,36	16,7	18,7	21,8	25,6
3	0,12	18,54	21,7	23,2	25,8	29,1
4	0,16	24,73	27,1	28,4	30,6	33,4
5	0,20	30,91	32,9	33,9	35,8	38,2
6	0,24	37,09	38,7	39,6	41,2	43,3
7	0,28	43,27	44,7	45,5	46,9	48,7
8	0,31	49,45	50,7	51,4	52,6	54,3
9	0,35	55,63	56,7	57,4	58,5	60,0
10	0,39	61,81	62,8	63,4	64,4	65,7
11	0,43	68,00	68,9	69,4	70,3	71,6
12	0,47	74,18	75,0	75,5	76,3	77,5
13	0,51	80,36	81,1	81,6	82,3	83,4
14	0,55	86,54	87,3	87,7	88,4	89,4
15	0,59	92,72	93,4	93,8	94,5	95,4

Figura 4.29 - Parâmetros revelados pelo ficheiro *Excel* para um intervalo de passos de 15 mm a 35 mm e um intervalo de v_G de $70 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a $76 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Com este compromisso foi possível obter um passo de 23,7 mm o que permitiu produzir um componente com 4 voltas completas, com $v_G = 75 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Para este passo a velocidade de rotação do varão foi de $0,47 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ ou com o servomotor a $12 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ e com a $v_M = 11,2 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

O ensaio permaneceu totalmente estável, não havendo necessidade de correções na profundidade da ferramenta. Na Figura 4.30 observa-se o varão com o ensaio helicoidal cilíndrico terminado.

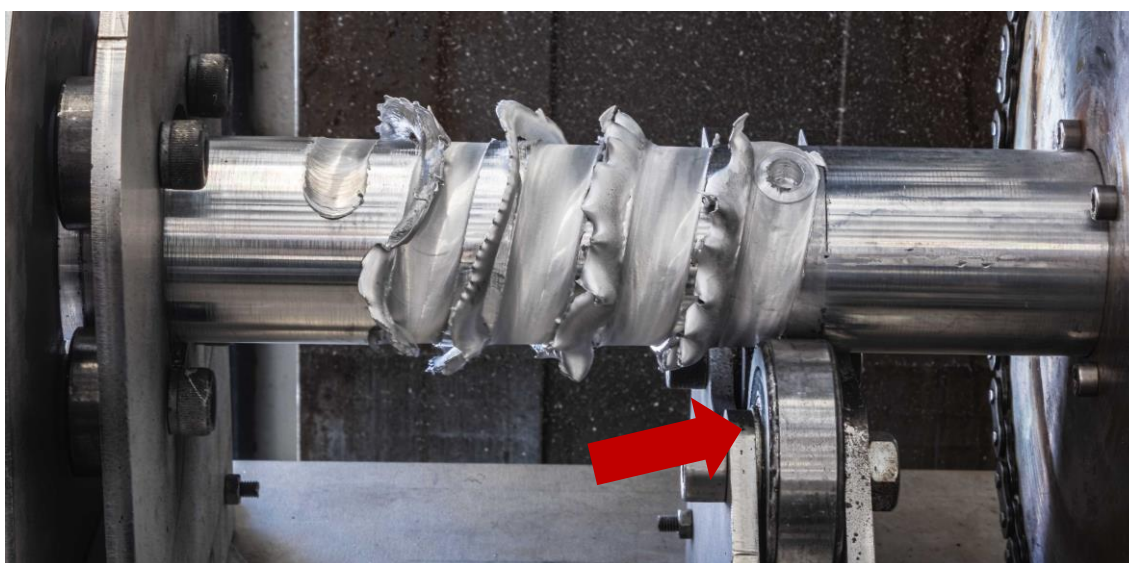


Figura 4.30 - Aspeto final do varão após o ensaio helicoidal cilíndrico.

Foi referido anteriormente que o comprimento útil que o sistema permitia foi cerca de 95 mm, esta restrição advém dos rolamentos de suporte (destacados a vermelho na Figura 4.30). Decidiu-se não efetuar o ensaio para além desses rolamentos pois se assim se fizesse, a apara produzida interferiria com os rolamentos, alterando a penetração e força exercida pela ferramenta, instabilizando o processo.

Como foi mencionado anteriormente, os ensaios efetuados com o conjunto ferramenta E produziam uma apara contínua. Na Figura 4.31 observa-se a apara extraída do ensaio helicoidal cilíndrico.



Figura 4.31 - Apara produzida no ensaio helicoidal cilíndrico.

Observando detalhadamente a apara, é possível visualizar que durante cerca de metade do ensaio este ocorreu a uma temperatura reduzida e na restante atingiu uma temperatura mais elevada. Na Figura 4.32 observam-se as secções inicial e final da apara.



Figura 4.32 - Início (à esquerda) e final (à direita) da apara produzida no ensaio helicoidal cilíndrico.

Na primeira metade do ensaio a apara foi expulsa sem estar fixa ao varão, sendo que na segunda metade do ensaio a apara permaneceu aderente no lado em retrocesso, contudo foi possível removê-la manualmente utilizando um alicate.

A apara foi o único material extraído no ensaio, o que implica que a maior parte do volume do canal é representado pelo volume da apara. Desta forma foi possível estimar, de forma aproximada, o volume do canal. A apara foi pesada, obtendo-se uma massa de 23,82 g que equivaleu a um volume de 8,82 cm³.

Foi efetuado um furo no início da trajetória da ferramenta e o *keyhole* foi aumentado. Desta forma foi possível observar a secção inicial e final do canal para obter uma ideia do sucesso do ensaio. Na Figura 4.33 observam-se as vistas inicial e final do canal helicoidal.

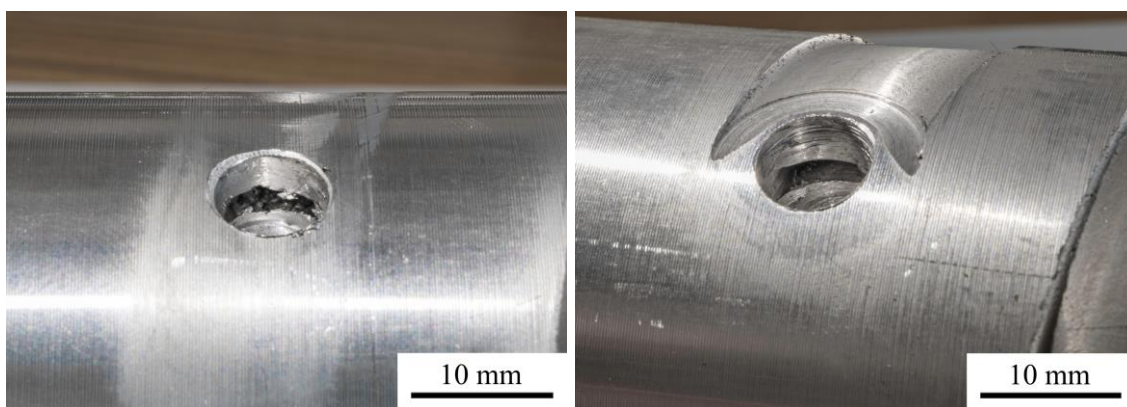


Figura 4.33 - Vista da secção inicial (à esquerda) e da secção final (à direita) do ensaio helicoidal cilíndrico.

Observa-se que na zona inicial o canal não atingiu a estacionariedade, porém apresenta uma geometria próxima da retangular. Enquanto a secção final apresenta uma geometria retangular e uma secção transversal relativamente elevada. Observa-se, também, que apesar do maior comprimento do canal, as temperaturas não afetaram a formação do canal tal como foi observado em alguns dos ensaios orbitais.

4.5 Medição de Gradientes Térmicos em Regime Transiente do Permutador de Calor Tubular

Decidiu-se efetuar um ensaio de prova de conceito deste processo. Para tal foi necessário cortar o varão e efetuar um furo axial que será utilizado para passagem do fluido quente, neste caso da água. Escolheu-se utilizar uniões de encaixe de 1/2 " da *Festo* como adaptadores para as mangueiras do fluído quente. Assim, o varão foi furado axialmente, no torno, incrementalmente até atingir um diâmetro de 18,6 mm e posteriormente ambas as extremidades foram roscadas.

Escolheu-se utilizar uniões de encaixe de 1/8 " da *Festo* como adaptadores para as mangueiras do líquido refrigerante. Para tal os furos efetuados no início e final da trajetória do canal foram aumentados para 8,6 mm de diâmetro e posteriormente roscados.

Por fim, o varão foi pintado de preto para se poder dar início ao ensaio para medição de gradientes térmicos em regime transiente e observar o componente em funcionamento. Na Figura 4.34 observa-se o permutador produzido.



Figura 4.34 - Permutador de calor tubular produzido através do processo FSCO.

Foram utilizadas 2 bombas idênticas para criar o fluxo dos fluídos. Estas provocam um caudal de $18 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Devido a limitação térmica das bombas, a água foi aquecida a $45 \text{ }^\circ\text{C}$ e o fluído refrigerante foi arrefecido a $-20 \text{ }^\circ\text{C}$.

As mangueiras foram ligadas de forma que os caudais estejam em contracorrente, tal como se observa na Figura 4.35.



Figura 4.35 - Direções dos caudais no permutador térmico tubular.
Caudal quente representado a vermelho e o frio a azul.

Os efeitos de refrigeração do permutador de calor tubular foram observados através da utilização da câmara termográfica tal como se pode observar na Figura 4.36.

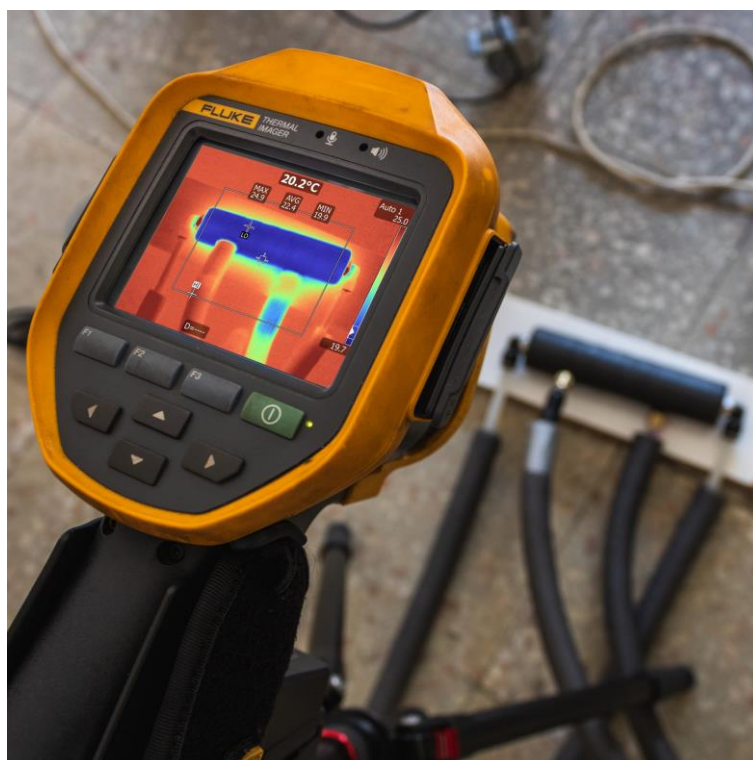


Figura 4.36 - Montagem efetuada para a observação dos efeitos de refrigeração do permutado de calor produzido.

O fluxo de água quente foi iniciado até se atingir a estabilidade térmica. Observa-se, na Figura 4.37, o instante em que se deu essa estabilidade.

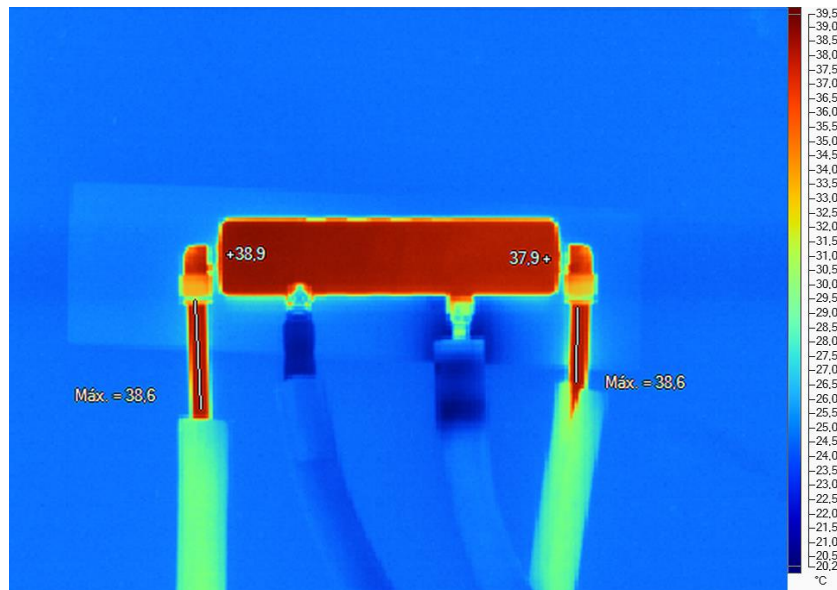


Figura 4.37 – Imagem termográfica da estabilidade do permutador de calor tubular com a circulação do fluido quente.

Apesar de não ter sido possível medir diretamente a temperatura da água em tempo real, a sua variação da temperatura foi medida a partir das imagens termográficas. Como esses valores da temperatura foram medidos nas mangueiras, os valores não foram absolutos. Contudo, mediu-se a diferença entre a entrada e saída da água, obtendo uma variação de temperatura relativa.

Após se ter dado a estabilidade térmica, foi ligada a bomba que produziu o fluxo do fluido refrigerante. Na Figura 4.38 observa-se a imagem térmica instantes depois de se ter ligado a bomba.

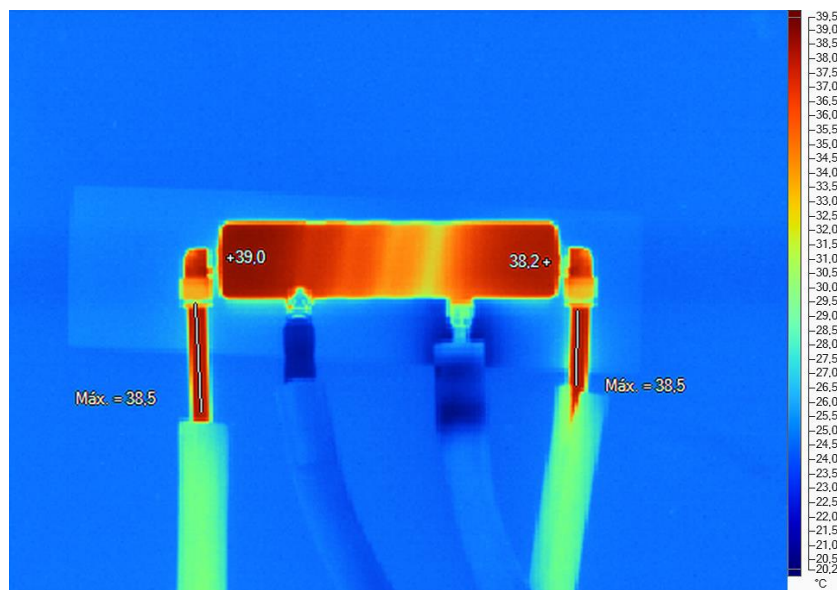


Figura 4.38 - Imagem termográfica do permutador de calor tubular após o início do fluxo do líquido refrigerante.

Observa-se na Figura 4.39, a imagem termográfica 2 minutos após se ter ligado a bomba do fluido refrigerante onde se deu a estabilidade térmica do ensaio.

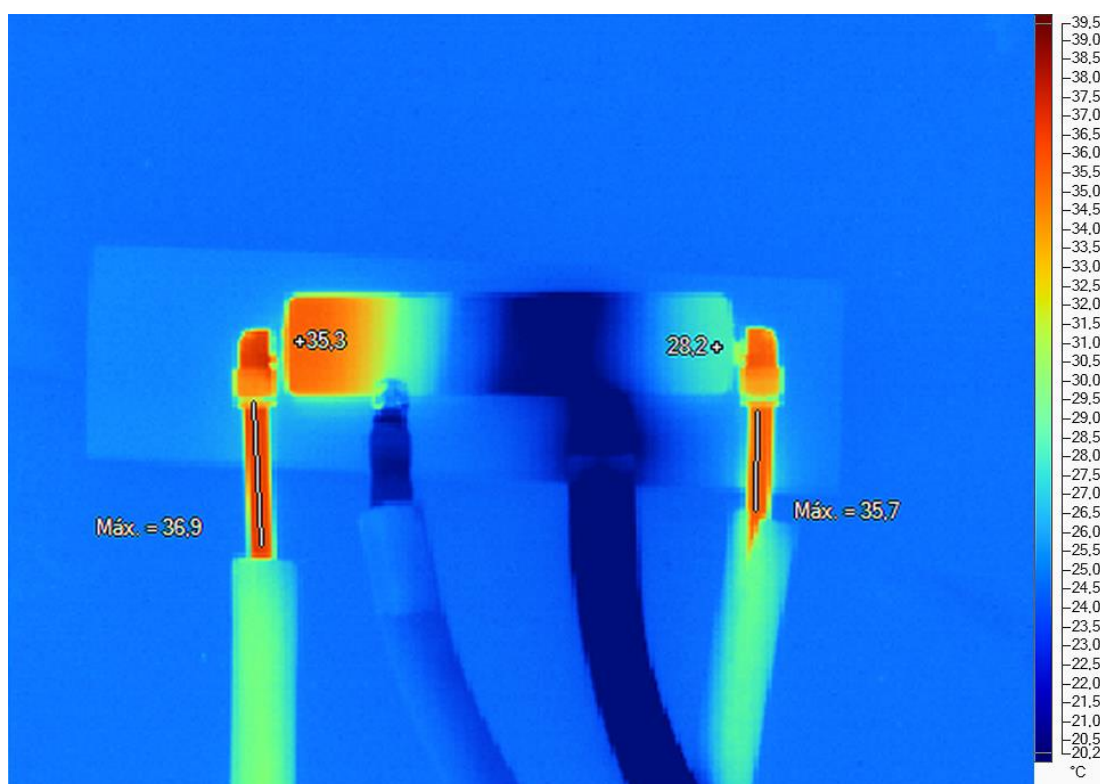


Figura 4.39 – Estabilidade térmica do ensaio térmico 2 minutos após se ter ligado a bomba do fluido refrigerante.

Analisando a Figura 4.37, Figura 4.38 e Figura 4.39, conclui-se que a temperatura na entrada do permutador variou $-1,7\text{ °C}$ e na saída variou $-2,9\text{ °C}$. A variação da temperatura foi reduzida dado o facto do volume de água quente, dentro do permutador, ter sido 3 vezes superior ao volume de líquido refrigerante. Sendo o comprimento do permutador de 210 mm e o diâmetro do canal da água quente de 12,7 mm, o volume da água no interior do canal corresponde a $26,6\text{ cm}^3$, enquanto o volume do canal helicoidal cilíndrico corresponde a $8,82\text{ cm}^3$. Assim, o diâmetro do furo axial ou o comprimento do permutador deviam ter sido inferiores de forma que os volumes dos fluidos serem semelhantes obtendo, desta forma, uma variação de temperatura superior.

Este ensaio serviu também para testar a estanquidade do canal helicoidal cilíndrico produzido. Após a conclusão do ensaio não foi observado qualquer líquido fora do componente, podendo admitir o canal produzido como estanque.

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste capítulo final são apresentadas as conclusões tiradas ao longo desta dissertação. É também apresentada uma sugestão para a continuação do desenvolvimento desta tecnologia.

5.1 Conclusões

Na pesquisa e revisão de trabalhos realizados, não foi possível encontrar algum estudo ou artigo científico que mostre a tecnologia FSCO. Apenas foi mostrando que a tecnologia é exequível no *website* da TWI.

Neste estudo procurou-se determinar parâmetros e selecionar ferramentas para as quais o processo apresentava canais estanques e com geometrias uniformes. Desta forma foi possível produzir, com sucesso, um permutador de calor tubular funcional.

Na realização dos ensaios houve uma dificuldade em determinar a penetração correta do conjunto ferramenta, isto é, uma penetração que permitisse a formação de um canal fechado e que, simultaneamente, não fosse elevada ao ponto de alterar as dimensões externas do varão. Adicionando a esta, houve também a dificuldade no controlo da penetração visto que este controlo, na fresadora, foi manual.

Neste estudo foi possível concluir que:

- Para um diâmetro do varão de 50 mm e para o conjunto ferramenta E', os parâmetros que produziram canais com geometrias mais elevadas e mais uniformes foram: velocidades de avanço globais da ferramenta de $71 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ até $75 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ e velocidades de rotação da ferramenta de $710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$ a $900 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$.

- Dentro dos conjuntos ferramenta utilizados, o *shoulder* côncavo sem estrias e com uma razão entre diâmetro do *shoulder* e do varão de 15/50 promoveu o acabamento exterior mais uniforme e com as dimensões externas do varão pouco afetadas.
- O pino cilíndrico roscado M8 demonstrou-se funcional para um intervalo de velocidades de rotação da ferramenta de 450 rev·min⁻¹ a 1120 rev·min⁻¹. Contudo, deve-se ter em atenção a sua integridade durante o ensaio. Existe uma relação inversamente proporcional entre o diâmetro do pino e a velocidade de rotação da ferramenta. Isto é, se a velocidade de rotação da ferramenta for muito reduzida, o diâmetro do pino terá de ser superior.
- Os ensaios efetuados com uma maior velocidade de avanço formaram camadas fortemente encostadas de maior dimensão, sendo uma zona onde poderão ocorrer falhas na integridade física do componente ou falhas de estanquidade.

5.2 Desenvolvimentos Futuros

Apesar de ter sido possível produzir um permutador funcional, o sistema responsável pela rotação do varão não permitiu a produção de um canal helicoidal cilíndrico com um comprimento elevado. Como continuação deste estudo, sugere-se alterar o sistema de forma que este permita a produção de canais helicoidais de maior comprimento.

Compreendeu-se, também, que se os ensaios forem muito demorados a temperatura do varão poderá elevar-se ao ponto de o comprometer. Uma forma de contornar este efeito seria aumentar a v_G ou reduzir a ω_F . Porém, esta alteração afetaria a geometria do canal, o que não se demonstra ser uma solução adequada.

Uma possível solução para reduzir a temperatura do varão no decorrer do ensaio sem alterar os parâmetros, seria a utilização de refrigeração ativa. Processar-se-ia um tubo em vez de um varão maciço e pelo seu furo axial inserir-se-ia um outro tubo, em aço, onde por este seria passado um líquido refrigerante. Desta forma, o tubo de aço garantiria a integridade do varão, não permitindo a sua flexão durante o processo, e, simultaneamente, o seu controlo da temperatura.

Isto permitirá obter componentes com canais de maior comprimento e deixará de ser necessário maquinar o componente para obter o furo axial. Esta solução torna possível efetuar ensaios com ω_F superiores e estudar a influência do controlo da temperatura no processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Gandra, "Methods and apparatus for creating channels in workpieces," 2018
- [2] C. Vidal, "Development and mechanical characterization of a new manufacturing technology: Friction Stir Channelling," 2014.
- [3] S. Rathee, S. Maheshwari, and A. N. Siddiquee, "Issues and strategies in composite fabrication via friction stir processing: A review," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 33, no. 3, pp. 239–261, 2018, doi: 10.1080/10426914.2017.1303162.
- [4] Ponmurugan. M. Kishore prasaath. K, Manikandan. T, Shanmugapaveen. S, "Friction Stir Welding in Circular Pipes," pp. 664–666, 2018.
- [5] R. S. Mishra, *Friction Stir Welding and Processing*. ASM International, 2007. doi: 10.1361/fswp2007p001.
- [6] T. Stepinski, F. Lingvall, E. Wennerstrom, and P. Wu, "Inspection of copper canisters for spent nuclear fuel by means of ultrasound," *Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co*, p. 100, 2004.
- [7] Rajiv S. Mishra, "Integral Channels in metal components and fabrication thereof," 2005
- [8] J. Gandra, "Integrating Thermal Management Networks in Structures by Friction Stir Channelling," vol. 44, no. 0, pp. 3–6.
- [9] R. Miranda, J. Gandra, and P. Vila, "Surface Modification by Friction Based Processes," *Modern Surface Engineering Treatments*, pp. 1–20, 2013, doi: 10.5772/55986.
- [10] M. Mishra, Rajiv, Mahoney W., "Mechanical Properties of Friction Stir Welded Aluminum Alloys," p. 40, 2007, doi: 10.1361/fswp2007p071.
- [11] B. Chen *et al.*, "Friction stir welding of small-dimension Al3003 and pure Cu pipes," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 223, pp. 48–57, 2015, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.03.044.
- [12] "Rührreibschweißanlage FOOKE FSW 150." <https://www.youtube.com/watch?v=Wvfm8eksbF8> (accessed Feb. 13, 2021).

- [13] G. Wang, Y. Zhao, and Y. Hao, "Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing," *Journal of Materials Science and Technology*, vol. 34, no. 1, pp. 73–91, 2018, doi: 10.1016/j.jmst.2017.11.041.
- [14] J. G. Parrett, J. Martin, P. L. Threadgill, and M. M. Z. Ahmed, "Friction Stir Welding of Thick Section Aluminium Alloys," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 23, no. 6, pp. 1936–1953, 2014.
- [15] B. Singh, P. Singhal, and K. K. Saxena, "Effect of transverse speed on mechanical and microstructural properties of friction stir welded aluminium AA2024-T351," *Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 6, no. 3, pp. 519–529, 2020, doi: 10.1080/2374068X.2020.1728642.
- [16] J. J. Muhsin, M. H. Tolephih, and A. M. Muhammed, "Effect of friction stir welding parameters (rotation and transverse) speed on the transient temperature distribution in friction stir welding of AA 7020-t53," *ARPV Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 7, no. 4, pp. 436–446, 2012.
- [17] M. Buinho, "Desenvolvimento da tecnologia Friction Stir Channelling - estudo da influência da base no processamento de ligas de alumínio" Dissertação de Mestrado, FCT-UNL 2020.
- [18] N. Balasubramanian, R. S. Mishra, and K. Krishnamurthy, "Friction stir channeling: Characterization of the channels," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 8, pp. 3696–3704, 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.08.036.
- [19] C. Vidal, "Processo De Abertura De Canais Internos Contínuos Em Componentes Maciços Sem Alteração Da Cota De Superfície Processada E Respectiva Ferramenta Modular Ajustável," vol. 105628, no. 11, pp. 1–23, 2012.
- [20] H. Karvinen, D. Nordal, T. Galkin, and P. Vilaça, "Application of hybrid friction stir channeling technique to improve the cooling efficiency of electronic components," *Welding in the World*, vol. 62, no. 3, pp. 497–509, 2018, doi: 10.1007/s40194-018-0576-8.
- [21] A. Rashidi, A. Mostafapour, S. Salahi, and V. Rezazadeh, "Modified friction stir channeling: A novel technique for fabrication of friction stir channel," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 302, pp. 365–370, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.302.365.
- [22] A. Rashidi and A. Mostafapour, "Influence of tool pin geometry and moving paths of tool on channel formation mechanism in modified friction stir channeling technique," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 80, no. 5–8, pp. 1087–1096, 2015, doi: 10.1007/s00170-015-7049-7.

- [23] D. Nordal, "Design, Development and Analysis of Tools for Hybrid Friction Stir Channeling," 2017.
- [24] J. Gandra, "Friction Stir Channelling: A leaner method of manufacturing heat exchangers for aerospace," *Advanced Engineering Show, The welding Institute, UK*, no. November, pp. 1–23, 2018, [Online]. Available: https://www.easyfairs.com/fileadmin/groups/8/Advanced_Engineering/Advanced_Engineering_2018/Presentations/1415__JoaoGandra_Friction_Stir_Channelling.pdf
- [25] "COREFLOW™: A SUB-SURFACE MACHINING PROCESS." <https://www.twi-global.com/media-and-events/insights/coreflow-a-sub-surface-machining-process> (accessed Feb. 10, 2021).
- [26] M. Ferraz, "Friction Stir Channeling Industrial Applications," 2012. [Online]. Available: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/%0AdownloadFile/395144527870/Dissertacao_.pdf%0A
- [27] K. H. Ho and S. T. Newman, "State of the art electrical discharge machining (EDM)," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, no. 13, pp. 1287–1300, 2003, doi: 10.1016/S0890-6955(03)00162-7.
- [28] "Webinar: CoreFlow - Technology Launch Webinar." <https://www.youtube.com/watch?v=zvjVKNxKSd4&t=966s> (accessed Feb. 11, 2021).
- [29] H. Karvinen, P. Vilaça, and D. Nordal, "A non-consumable tool and a process for solid-state production of a channel and a weld joint, and a structure of at least two components based on originally bulk components of similar, or dissimilar, materials." 2017. [Online]. Available: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2017220863%7B%5C&%7Dtab=PCTBIBLIO>
- [30] "Aluminum 6082-T6." <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=fad29be6e64d4e95a241690f1f6e1eb7&ckck=1> (accessed Feb. 10, 2021).
- [31] "Aluminum 2017-T451." <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=53d0e31ee66f4cf9b28abb87c08e4d39> (accessed Feb. 10, 2021).
- [32] "Aluminum 7075-T6." <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4f19a42be94546b686bbf43f79c51b7d> (accessed Feb. 10, 2021).
- [33] "Polylanema AA6082-T6." <https://www.polylanema.pt/pt/aluminios-tecnicos/placas/aw-6082/> (accessed May 20, 2021).
- [34] K. Mroczka and A. Pietras, "FSW characterization of 6082 aluminium alloys sheets," vol. 40, no. 2, pp. 104–109, 2009.

- [35] G. Singh, A. S. Kang, K. Singh, and J. Singh, "Experimental comparison of friction stir welding process and TIG welding process for 6082-T6 Aluminium alloy," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, pp. 3590–3600, 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.02.251.
- [36] K. Krasnowski, C. Hamilton, and S. Dymek, "Influence of the tool shape and weld configuration on microstructure and mechanical properties of the Al 6082 alloy FSW joints," pp. 1–9, 2014, doi: 10.1016/j.acme.2014.02.001.
- [37] L. Wan, Y. Huang, W. Guo, S. Lv, and J. Feng, "Mechanical Properties and Microstructure of 6082-T6 Aluminum Alloy Joints by Self-support Friction Stir Welding," *Journal of Materials Science & Technology*, 2014, doi: 10.1016/j.jmst.2014.04.009.

APÊNDICES

A0

Apêndice 0.1 - Ficha Técnica do Servomotor, página 1.

Product data sheet
Characteristics

BCH2MM2021CA6C
servo motor BCH - 130mm - 2000W - no oil seal -
w key - straight con



Main

Range compatibility	Lexium 28
Product or component type	Servo motor
Device short name	BCH2

Complementary

Maximum mechanical speed	3000 rpm
[Us] rated supply voltage	220 V
Network number of phases	Three phase
Continuous stall current	9.95 A
Continuous stall torque	9.55 N.m for LXM28... at 12 A, 220 V, three phase
Continuous power	2000 W
Peak stall torque	28.65 N.m for LXM28... at 12 A, 220 V, three phase
Nominal output power	2000 W for LXM28... at 12 A, 220 V, three phase
Nominal torque	9.55 N.m for LXM28... at 12 A, 220 V, three phase
Nominal speed	2000 rpm for LXM28... at 12 A, 220 V, three phase
Maximum current I _{ms}	32.85 A for LXM28... at 2 kW, 220 V
Maximum permanent current	11.25 A
Product compatibility	LXM28... servo drive motor at 2 kW, 220 V, three phase
Shaft end	Keyed
Shaft diameter	22 mm
Shaft length	55 mm
Key width	8 mm
Feedback type	20 bits single turn absolute encoder
Holding brake	Without
Mounting support	Asian standard flange
Motor flange size	130 mm
Electrical connection	MIL connector
Torque constant	0.96 N.m/A at 20 °C
Back emf constant	58 V/krpm at 20 °C
Rotor inertia	13.5 kg.cm ²
Stator resistance	0.34 Ohm at 20 °C

Disclaimer: This documentation is not intended as a substitute for and is not to be used for determining suitability or reliability of these products for specific user applications

Apêndice 0.2 - Ficha Técnica do Servomotor, página 2.

Stator inductance	4.5 mH at 20 °C
Stator electrical time constant	13.24 ms at 20 °C
Maximum radial force Fr	670 N 2000 rpm
Maximum axial force Fa	200 N
Brake pull-in power	19.7 W
Type of cooling	Natural convection
Length	187 mm
Number of motor stacks	4
Centring collar diameter	110 mm
Centring collar depth	8 mm
Number of mounting holes	4
Mounting holes diameter	9.2 mm
Circle diameter of the mounting holes	145 mm
Distance shaft shoulder-flange	8 mm
Product weight	9.7 kg

Environment

IP degree of protection	IP54 IM B5, IM V1 IP50 IM V3
Ambient air temperature for operation	-20...40 °C

Offer Sustainability

RoHS (date code: YYWW)	Compliant - since 1442 - Schneider Electric declaration of conformity Schneider Electric declaration of conformity
REACH	Reference not containing SVHC above the threshold Reference not containing SVHC above the threshold

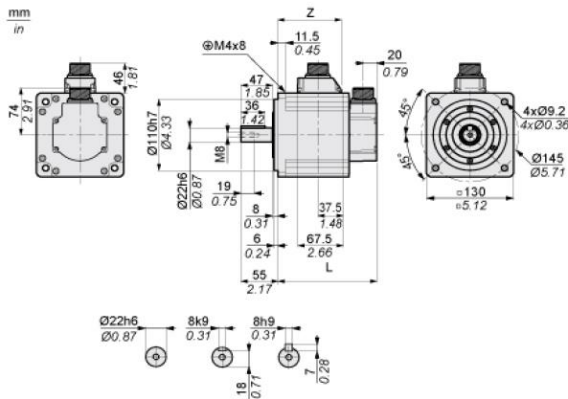
Apêndice 0.3 - Ficha Técnica do Servomotor, página 3.

Product data sheet
Dimensions Drawings

BCH2MM2021CA6C

Dimensions

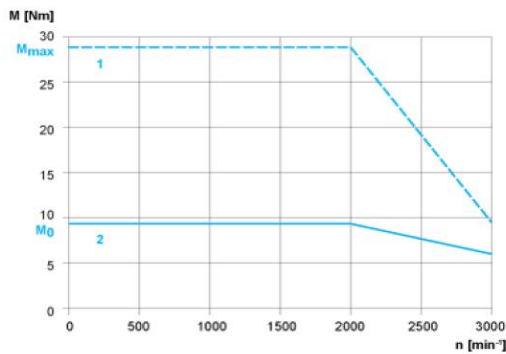
Dimensions of Motor



	mm	in.
L (without holding brake)	187	7.36
L (with holding brake)	216	8.5
Z	134.5	5.30

Torque/Speed Curves with 230 V Three Phase Supply Voltage

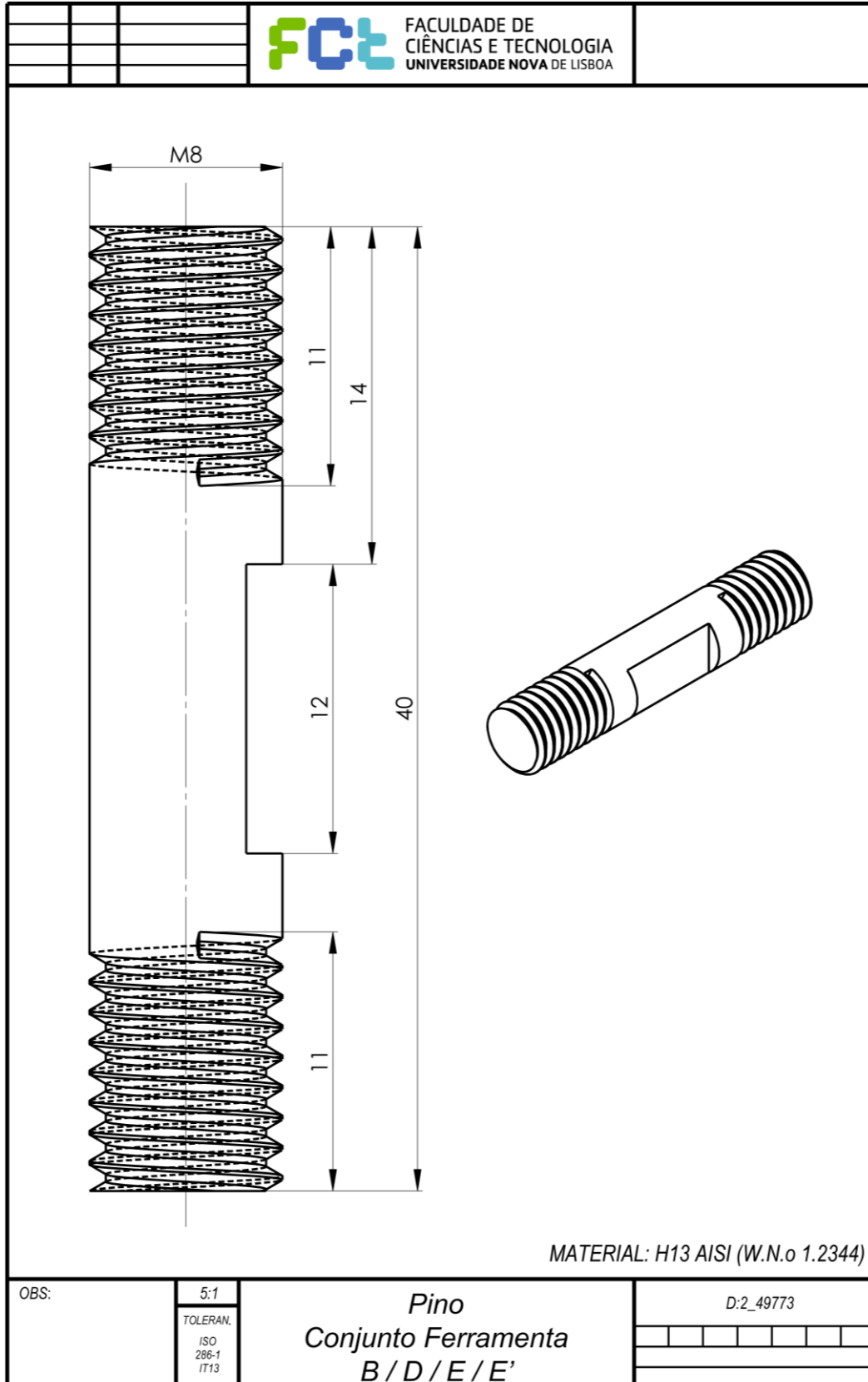
Servo Motor with LXM28AU20••• Servo Drive



- 1 : Peak torque
2 : Continuous torque

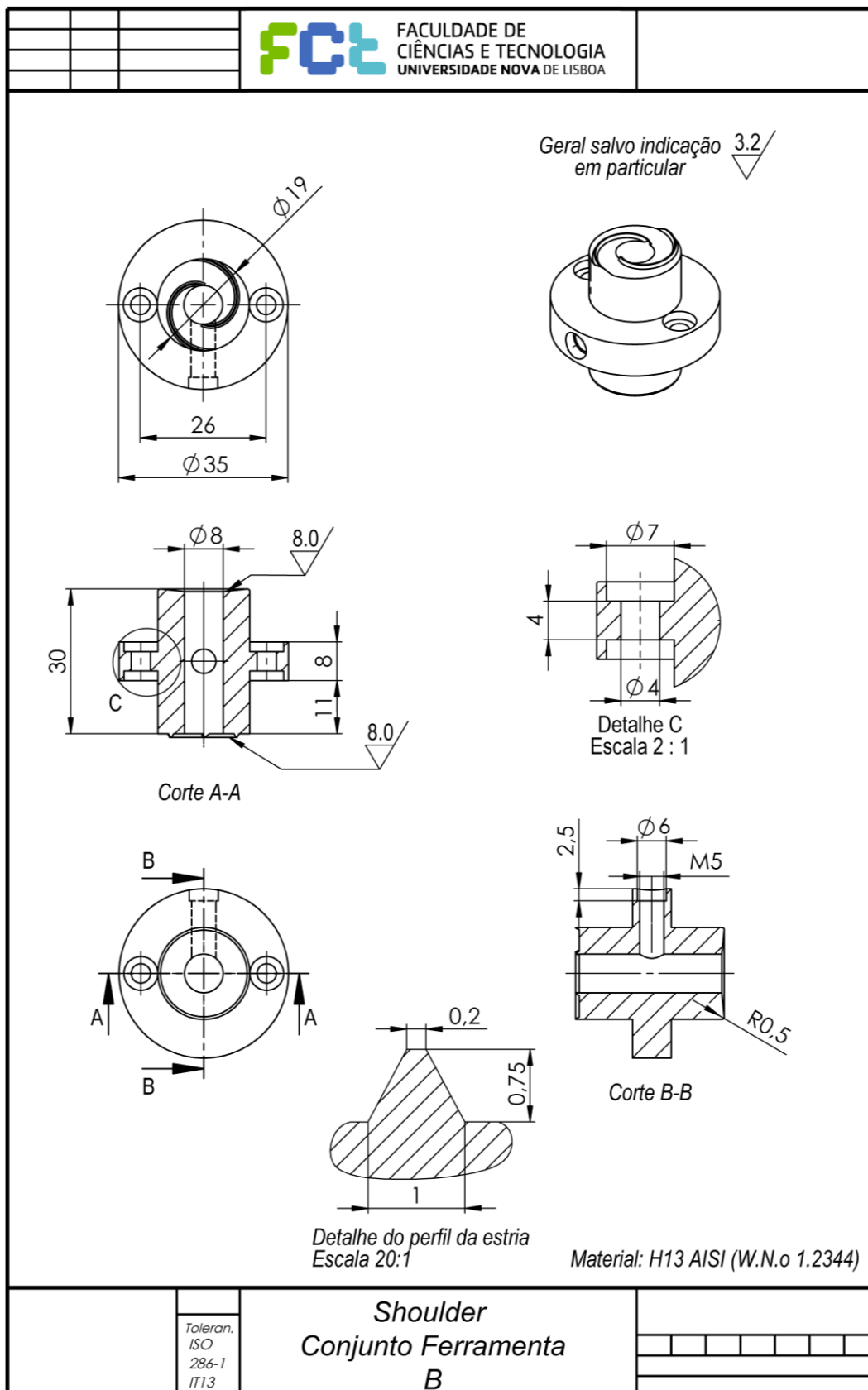
A2

Apêndice 2.1 - Pino dos Conjuntos Ferramenta B, D, E e E'.



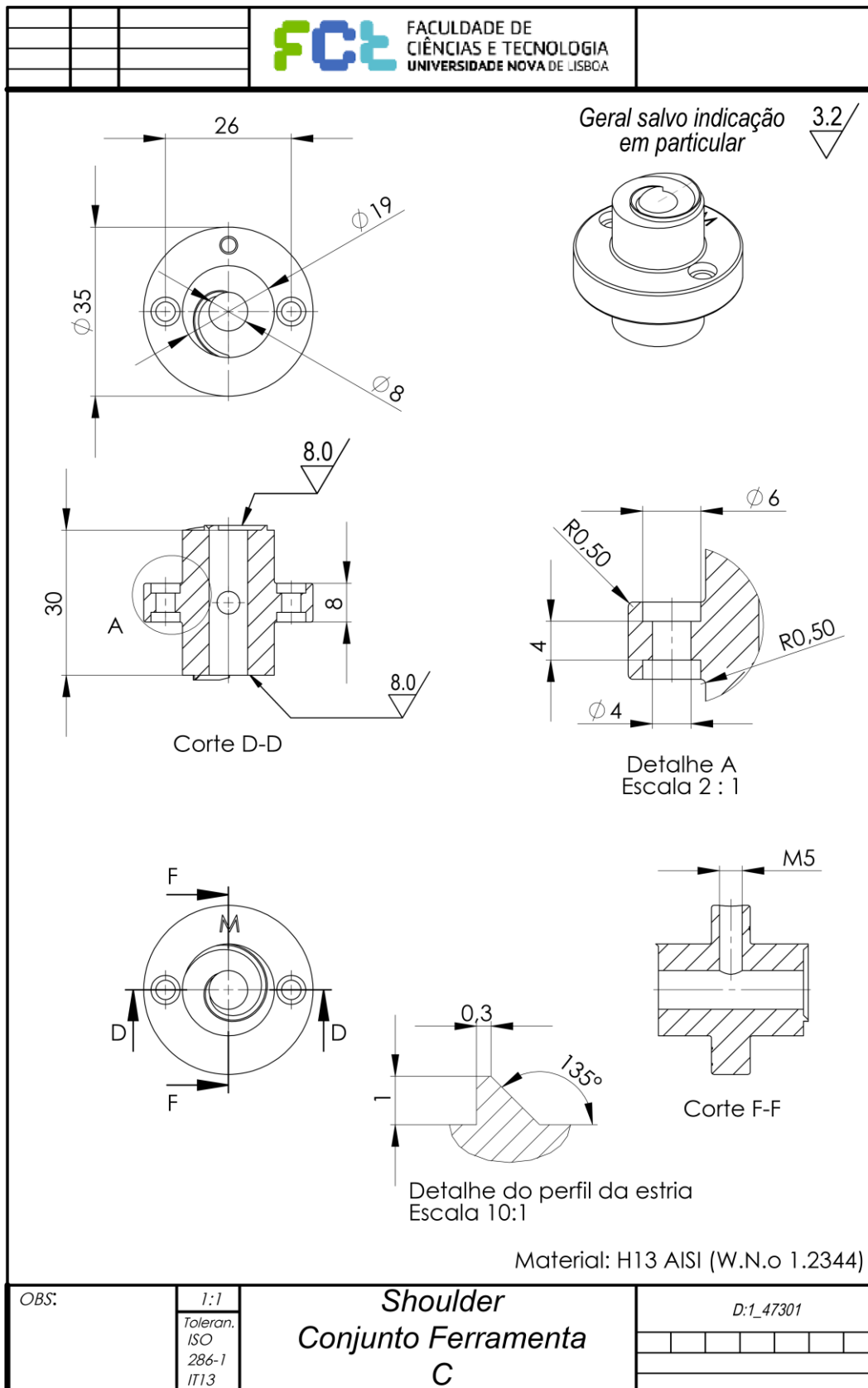
A3

Apêndice 3.1 - *Shoulder* do Conjunto Ferramenta B.



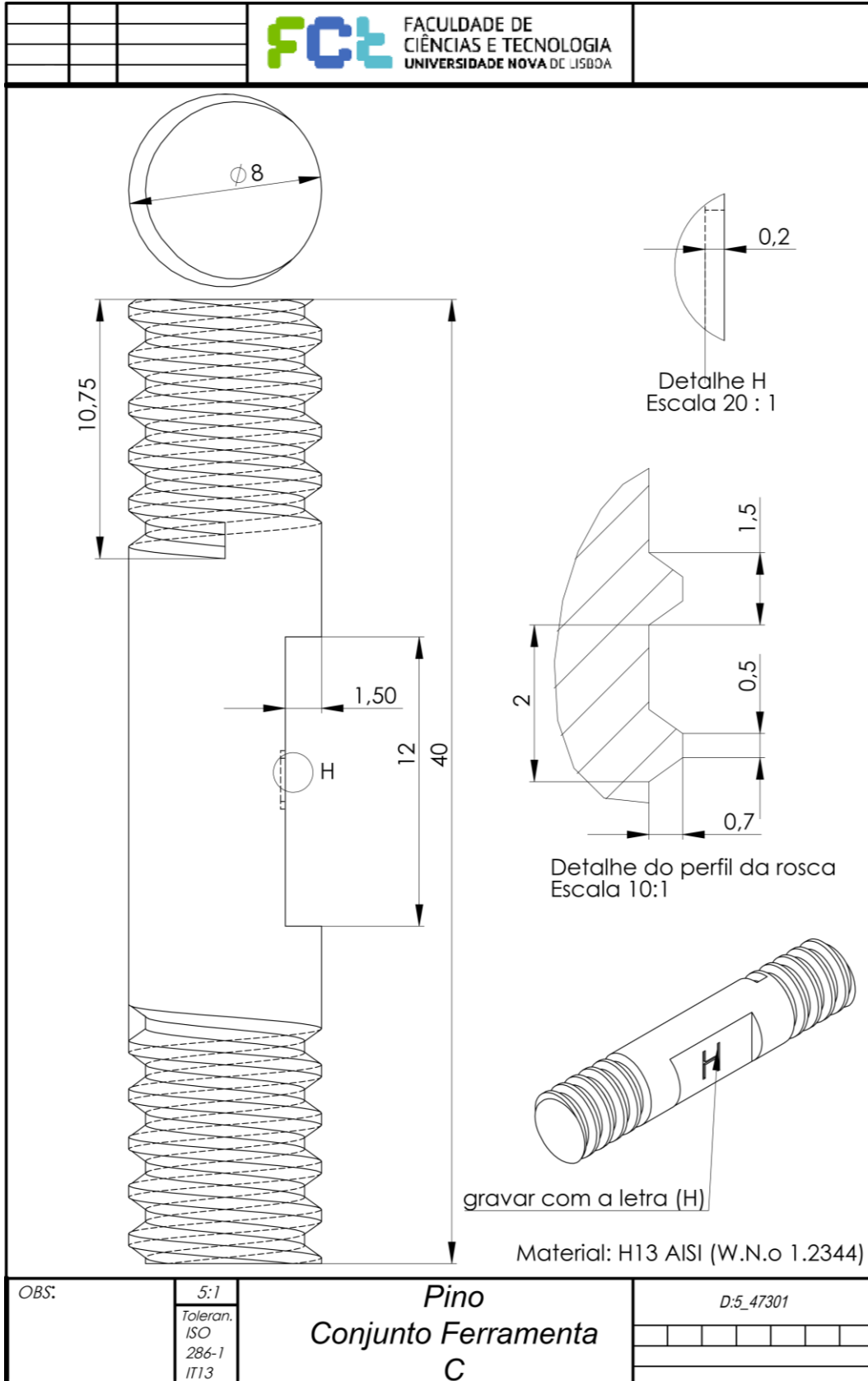
A4

Apêndice 4.1 - *Shoulder* do Conjunto Ferramenta C.



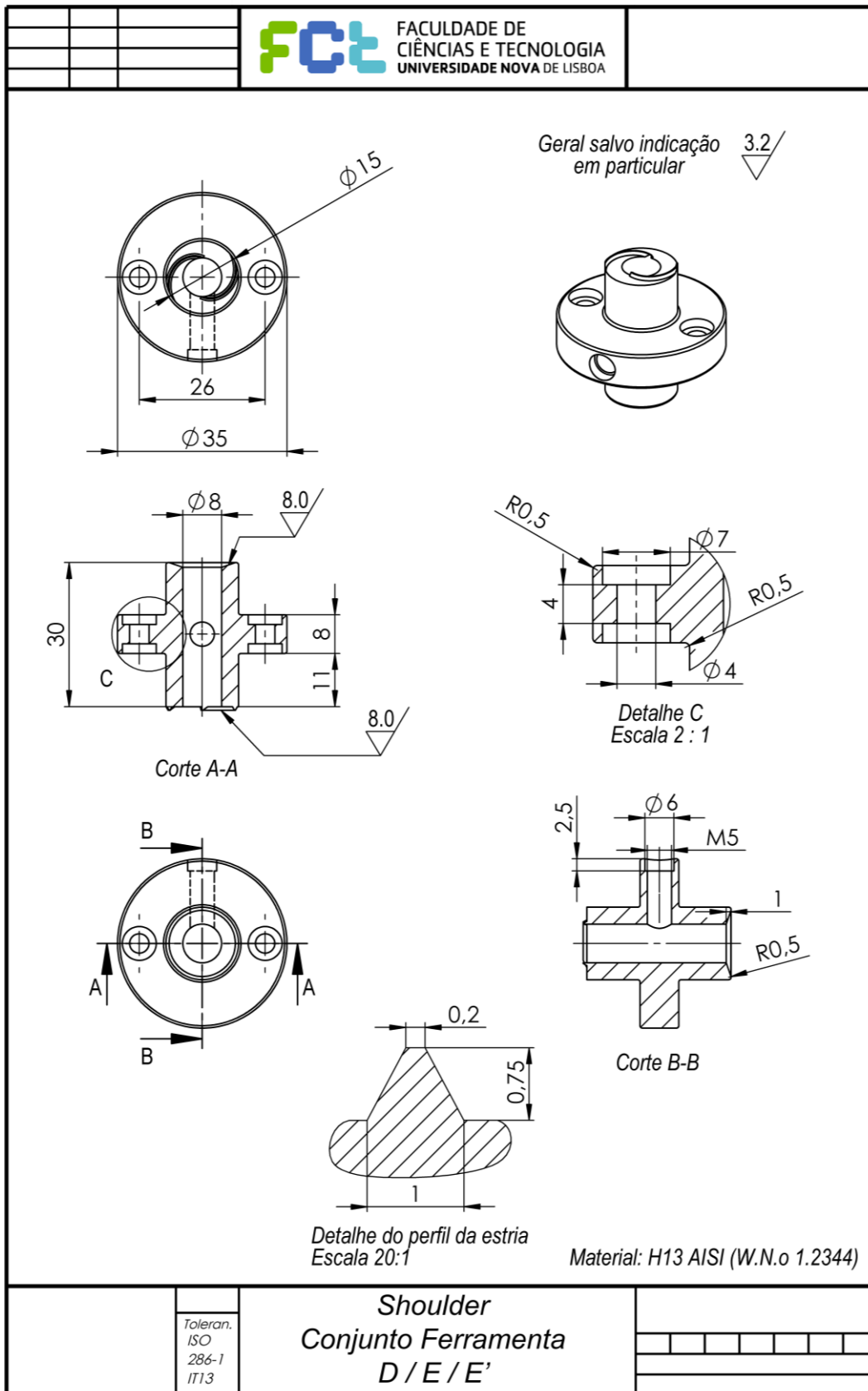
A5

Apêndice 5.1 - Pino do Conjunto Ferramenta C.



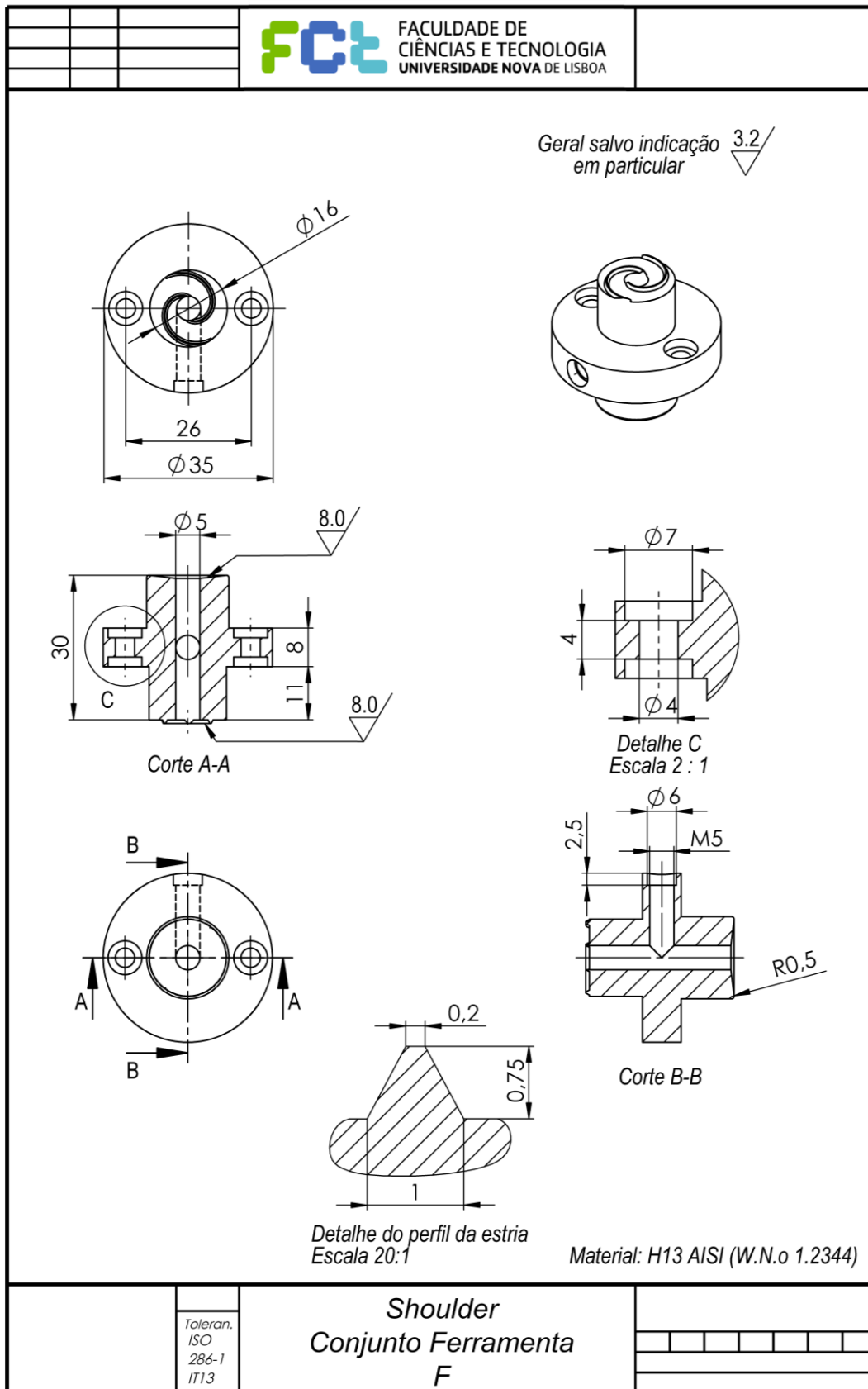
A6

Apêndice 6.1- *Shoulder* do Conjunto Ferramenta D, E e E'.



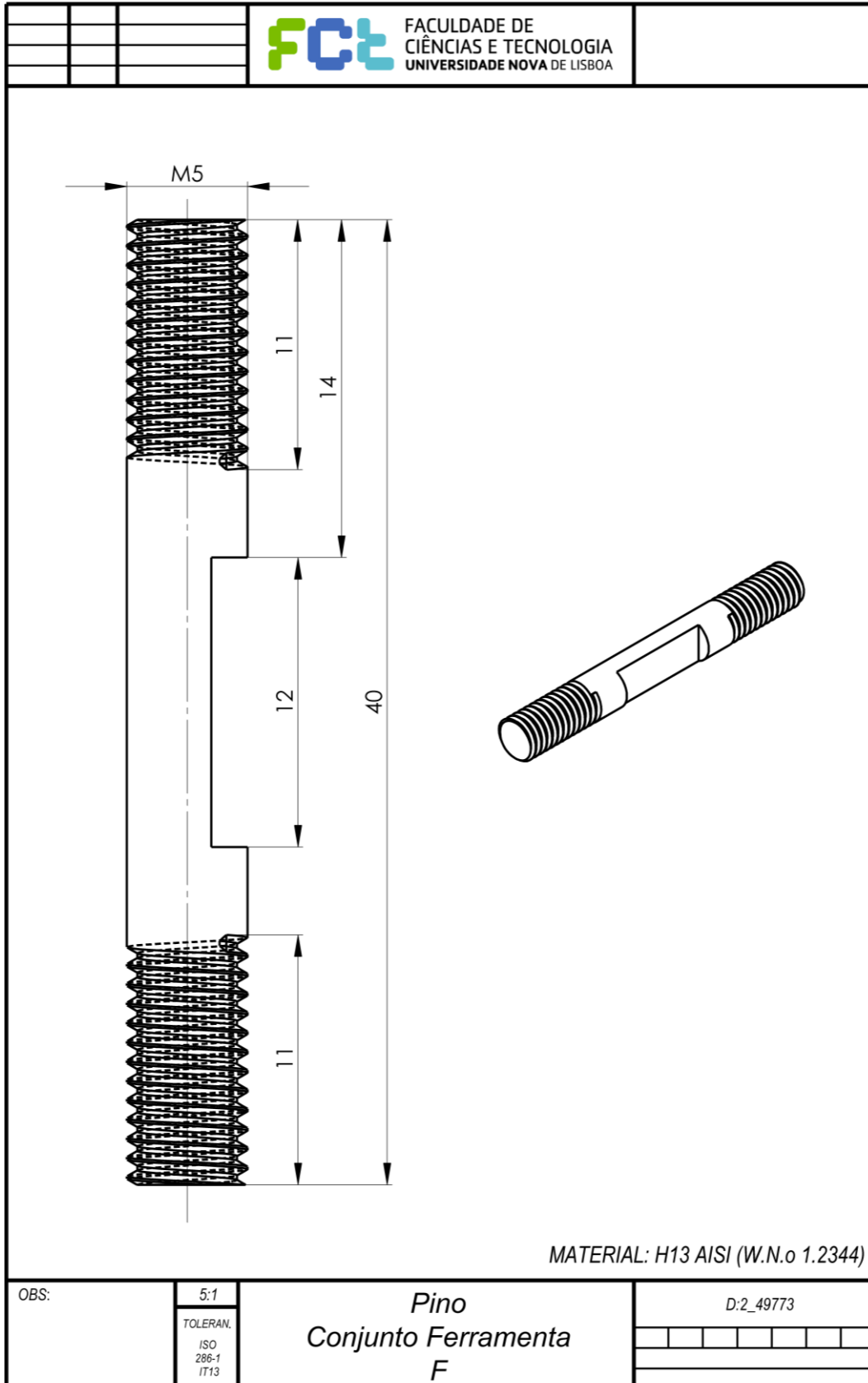
A7

Apêndice 7.1 - *Shoulder* do Conjunto Ferramenta F.



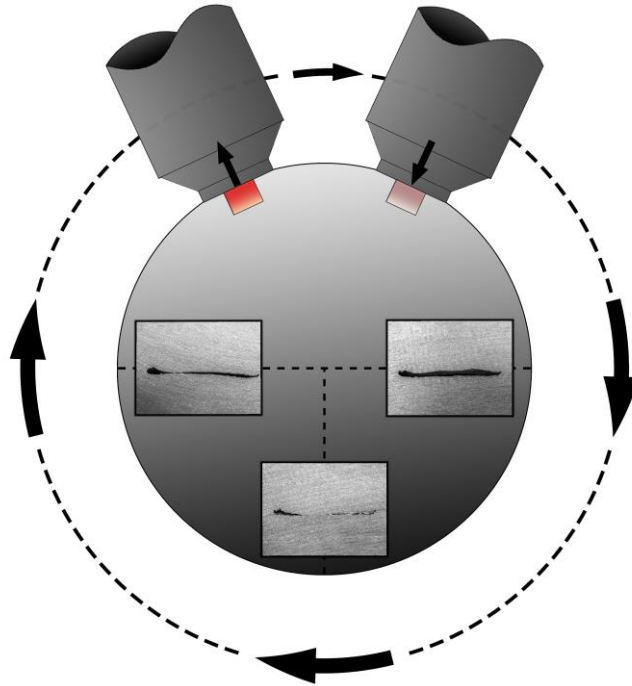
A8

Apêndice 8.1 - Pino do Conjunto Ferramenta F.



A9

Apêndice 9.1 - Secções transversais dos canais em 3 zonas do ensaio 5.1, efetuado com o conjunto ferramenta E e com $\omega_F = 560 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$.



Apêndice 9.2 - Secções transversais dos canais em 3 zonas do ensaio 5.3, efetuado com o conjunto ferramenta E e com $\omega_F = 710 \text{ rev}\cdot\text{min}^{-1}$.

