

DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO *FRICITION STIR CHANNELING* À MICROESCALA

WAGNER DE CAMPOS SABOR
Mestre em Engenharia Mecânica

DOUTORAMENTO EM ENGENHARIA MECÂNICA
Universidade NOVA de Lisboa
setembro, 2025

DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO FRICTION STIR CHANNELING À MICROESCALA

WAGNER DE CAMPOS SABOR

Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadora: Catarina Isabel Silva Vidal,
Professora Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa

Coorientador: Miguel Araújo Machado,
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Virgílio António Cruz Machado,
Professor Catedrático, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa

Arguentes: Virgínia Isabel Monteiro Nabais Infante,
Professora Catedrática, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

Sérgio Manuel Oliveira Tavares,
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

Orientadora: Catarina Isabel Silva Vidal,
Professora Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Membros: Eduardo Guy Perpétuo Bock,
Professor Associado, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Brasil
Telmo Jorge Gomes dos Santos,
Professor Catedrático, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa

DOUTORAMENTO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
setembro, 2025

Desenvolvimento do Processo *Friction Stir Channeling* à Microescala

Copyright © Wagner de Campos Sabor, 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

Agradeço a Deus por me proporcionar o discernimento e as condições necessárias e suficientes para a consecução deste trabalho.

Agradeço à Prof^a. Doutora Catarina Isabel Silva Vidal que me orientou e acompanhou neste trabalho com dedicação, sempre incentivando, participando e contribuindo com seus conhecimentos, ao Prof. Doutor Miguel Araújo Machado, coorientador desta pesquisa, que igualmente, contribuiu muito para a consecução dos objetivos e ao Prof. Doutor Telmo G. Santos, coordenador do Programa de Doutorado, pelas contribuições, orientações, confiança e presteza na disseminação de seus conhecimentos.

Agradeço a NOVA FCT que tornou possível esta pesquisa, a todos os professores do programa de Doutorado em Engenharia Mecânica da NOVA FCT por sua colaboração, ao Sr. António Campos e Sr. Paulo Magalhães, pela grande ajuda prestada e troca de conhecimentos e a todos os alunos do Programa de Doutorado pela colaboração e ajuda, em especial, ao Mestre Eng^o Daniel Filipe Baltazar e Mestre Eng^o Rúben Sérgio Tasnicenco, pela parceria e troca de conhecimentos.

Agradeço ao IFSP - Instituto Federal de São Paulo pela sessão de máquinas e equipamentos, o que tornou possível a confecção das ferramentas utilizadas nesta pesquisa e ainda, agradeço a todos os professores do IFSP pela colaboração e apoio, em especial, ao Prof. Mestre Marcos de Aguiar Guimarães, ao Prof. Mestre Flavio Henrique Manarelli e ao Prof. Doutor Giuliano Gozzi que, com suas colaborações e conhecimentos, dedicação e profissionalismo, me possibilitaram o aprendizado de novos conhecimentos e conceitos utilizados neste trabalho e que serão muito úteis na vida profissional.

Agradeço ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) de São Paulo, Brasil, e seus pesquisadores: Prof. Dr. Marco A. Stanojev Pereira, Prof. Dr. José Antonio Batista de Souza e à Profa. Dra. Stela M. C. Fernandes, pela presteza, ajuda e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Especialmente, agradeço aos amigos: Sr. Silvio Massuia, Sr. Marcos Wesley, Sr. José dos Santos Garcia Neto, Sr. Eriki Masahiro Takara.

Agradeço ainda, às empresas: Contato Eletroerosão Indústria Metalúrgica Ltda, Technocut MRS Ind. Com. de Dispositivos Ltda, Quality Tool Mark Eireli, Lasertools Tecnologia Ltda, FACIL Ferr. Diam. Abrasivas Com Ind Ltda que, sem o fundamental apoio destas, este trabalho de pesquisa não teria sido possível.

À minha esposa Zenaide, meus filhos Wagner Jr., Tiago e Diego pelo constante incentivo, compreensão, paciência e força em todos os momentos durante a realização deste trabalho.

Agradeço ainda todas as pessoas que, direta ou indiretamente, me incentivaram e apoiaram para a consecução deste trabalho.

"Não haverá sequer um dia na vida em que, antes de dormir, não se tenha aprendido algo novo" (Francisco Sabor Prol - meu Pai, "in memoriam")

"Ninguém caminha sem aprender a caminhar; sem aprender a fazer o caminho, caminhando; sem aprender a refazer, a retocar o sonho por causa do qual a gente se pôs a caminhar."
(Paulo Freire)

RESUMO

A literatura existente revela uma lacuna na pesquisa abrangente sobre os limites de processamento do processo *Friction Stir Channeling* (FSC), especialmente na criação dos menores canais contínuos e integrais usando ferramentas com pinos roscados de 2 mm de diâmetro ou menos. Este estudo está na vanguarda da investigação dos limites extremos do processo FSC em microescala, que representa promessas significativas para o desenvolvimento de trocadores de calor ultracompactos visando melhorar sua eficiência e sustentabilidade. Para atingir isso, ferramentas personalizadas com dimensões e geometrias específicas foram desenvolvidas para definir parâmetros que produzem microcanais contínuos de forma confiável, otimizando o diâmetro hidráulico dentro dos limites do projeto e da geometria de cada ferramenta. Avaliações rigorosas, incluindo testes de continuidade, estanqueidade, micro tomografia computadorizada, tomografia computadorizada de nêutrons, microdureza e desempenho térmico, foram realizadas para verificar a integridade estrutural e a aplicabilidade dos canais para sistemas de aquecimento e resfriamento supercompactos. Ensaios experimentais foram realizados utilizando ferramentas com diâmetros de pino de 0,2, 0,3, 0,5, 1,0 e 2,0 mm. A fabricação bem-sucedida de canais internos foi obtida com pinos de 0,5, 1,0 e 2,0 mm de diâmetro, combinados com diâmetros de *shoulder* correspondentes de 3,5, 4,0 e 5,0 mm, respectivamente. Os experimentos foram conduzidos em placas da liga de alumínio AW1050-H111 com espessura de 5 mm. Notavelmente, o menor canal atingiu um diâmetro hidráulico de 191 μm com um pino roscado de 0,5 mm de diâmetro, classificando-o como um microcanal. Além disso, a eficiência térmica de um modelo compacto de trocador de calor foi avaliada, indicando que, apesar dos altos custos associados à produção das ferramentas especializadas, o processo FSC é um método viável, confiável e repetível para a fabricação de mini e microcanais.

Palavras-chave: Micro *Friction Stir Channeling* (μFSC), microcanais internos, canais contínuos, limites do processo, diâmetro hidráulico.

ABSTRACT

Existing literature reveals a gap in comprehensive research on the processing limits of the Friction Stir Channeling (*FSC*) process, especially in the creation of the smallest continuous and integral channels using tools with threaded probes of 2 mm diameter or smaller. This study is at the forefront of investigating the extreme boundaries of the microscale *FSC* process, which holds significant promises for the development of ultra-compact heat exchangers aimed at improving their efficiency and sustainability. To achieve this, customized tools with specific dimensions and geometries were developed to set parameters that reliably yield continuous microchannels, optimizing the hydraulic diameter within the limits of each tool's design and geometry. Rigorous assessments, including tests for continuity, watertightness, micro-computed tomography, neutron computed tomography, microhardness, and thermal performance, were carried out to verify the structural integrity and applicability of the channels for super compact heating and cooling systems. Experimental trials were conducted using tools with probe diameters of 0.2, 0.3, 0.5, 1.0, and 2.0 mm. Successful fabrication of internal channels was achieved with the probes of 0.5, 1.0, and 2.0 mm in diameter, combined with corresponding shoulder diameters of 3.5, 4.0, and 5.0 mm, respectively. The experiments were carried out on AW1050-H111 aluminum alloy plates with a thickness of 5 mm. Notably, the smallest channel achieved a hydraulic diameter of 191 μm with a 0.5 mm diameter threaded probe, classifying it as a microchannel. Furthermore, the thermal efficiency of a compact heat exchanger model was evaluated, indicating that despite the high costs associated with the production of the specialized tools, the *FSC* process is a feasible, dependable, and repeatable method for manufacturing mini-and microchannels.

Keywords: Micro *Friction Stir Channeling* (μFSC), Internal Microchannels, continuous channels, process limits, hydraulic diameter.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contexto e motivação	1
1.2 Objetivo Principal e secundários.....	2
1.3 Organização do documento.....	4
1.4 Publicações.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Contextualização da tecnologia <i>Friction Stir Channeling</i>	7
2.2 Variantes do processo <i>Friction Stir Channeling</i>	9
2.2.1 Friction Stir Channeling with Shoulder Workpiece Clearance	9
2.2.2 Friction Stir Channeling without Shoulder Workpiece Clearance.	10
2.2.3 Modified Friction Stir Channeling.....	12
2.2.4 <i>Hybrid Friction Stir Channeling</i>	13
2.2.5 Stationary Shoulder Friction Stir Channeling	16
2.3 Variáveis do processo <i>FSC à macroescala</i>	17
2.3.1 Geometria da ferramenta do processo <i>Friction Stir Channeling</i>	18
2.3.2 Estudos termográficos do processo <i>Friction Stir Channeling</i>	19
3 PROJETO E DESENVOLVIMENTO DAS FERRAMENTAS.....	21
3.1 Ferramentas I - para os ensaios preliminares	22
3.2 Ferramentas II - para execução de Mini Canais.....	23
3.2.1 Corpo da ferramenta	24
3.2.2 Pinças de fixação.....	25
3.2.3 Pinos roscados.....	25
3.2.4 Parafusos de fixação.....	28
3.2.5 Parafusos de localização.....	29

3.3 Ferramentas III - para execução de Microcanais.....	30
3.3.1 Corpo da ferramenta	31
3.3.2 Pinças de fixação.....	32
3.3.3 Pinos roscados.....	32
3.3.4 Parafusos de fixação.....	33
3.3.5 Parafusos de localização	34
4 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E APARATOS	35
4.1 Propriedades do material a processar	35
4.2 Equipamentos utilizados.....	37
4.3 Aparatos desenvolvidos	42
5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL, CARACTERIZAÇÕES E RESULTADOS	47
5.1 Procedimento experimental	47
5.1.1 Ensaios preliminares	48
5.1.2 Ensaios de minicanais	51
5.1.3 Ensaios de microcanais - μFSC	56
5.2 Métodos de Caracterização	59
5.2.1 Preparação das amostras.....	62
5.2.2 Critérios adotados para a caracterização dos canais	63
5.2.3 Ensaios de medição de carga.....	64
5.2.4 Ensaios de rugosidade superficial interna dos canais.....	68
5.2.5 Caracterização das amostras	70
5.2.6 Caracterização metalográfica por microscopia ótica	80
5.2.7 Ensaios de microdureza.....	83
5.2.8 Ensaios termográficos.....	86
5.2.9 Ensaios de correntes induzidas	91
5.2.10 Ensaios de continuidade e estanqueidade	94
5.2.11 Ensaios de tomografia computadorizada de nêutrons NCT.....	97

5.2.12 Ensaio de micro tomografia computadorizada Micro CT	100
5.2.13 Medição de gradientes térmicos em regime transiente de um trocador de calor	105
6 CONCLUSÕES	109
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 — Defeito detectado no <i>Friction Stir Welding</i> , <i>wormhole</i> adaptado de [15]	7
Figura 2.2 — Representação do <i>Friction Stir Channeling</i> , nomenclatura e funcionamento adaptado de [18].	8
Figura 2.3 — Esquema do <i>Friction Stir Channeling with shoulder workpiece clearance</i> , adaptado de [18].	10
Figura 2.4 — Representação esquemática do <i>FSC without shoulder clearance</i> (esquerda) e do <i>FSC with shoulder clearance</i> (direita), adaptado de [18].	11
Figura 2.5 — Detalhe da ferramenta do FSC <i>without shoulder clearance</i> (vista superior à esquerda) e (vista em perspectiva à direita) [17]	11
Figura 2.6 — Representação do MFSC - <i>Modified Friction Stir Channeling</i> com Pino cilíndrica sem rosca, adaptado de [23].	12
Figura 2.7 — Representação do MFSC - <i>Modified Friction Stir Channeling</i> com Pino cilíndrica sem rosca, adaptado de [23].	12
Figura 2.8 — Representação do MFSC - <i>Modified Friction Stir Channeling</i> com pino cônico, adaptado de [25].	13
Figura 2.9 — Representação do HFSC - <i>Hybrid Friction Stir Channeling</i> (A), possibilidades de combinações do HFSC (B), adaptado de [12], [27].	14
Figura 2.10 Esquema de utilização da Ferramenta HFSC: (1) pino da Ferramenta; (2) <i>shoulder</i> com estrias; (3) seção de soldagem; (4) seção de abertura de canais; (5) estria do <i>shoulder</i> em contato com a placa de processamento e (6) região onde o fluxo de material é extraído como rebarba destacável, adaptado de [27].	15
Figura 2.11 Macrografia do canal e soldagem de dois componentes processados por HFSC - <i>Hybrid Friction Stir Channeling</i> , adaptado de [28].	15
Figura 2.12 Ilustração esquemática do SSFSC - <i>Stationary Shoulder Friction Stir Channeling</i> - (1) Pino rotativa; (2) <i>shoulder</i> estacionário; (3) peça de trabalho; (4) material processado; (5)	

direção do fluxo de material; (6) material em estado viscoplástico e (7) material viscoplástico em extrusão, adaptado de [22].	16
Figura 2.13 - Representação esquemática dos pinos utilizados, a) pino cilíndrico sem rosca, b) pino com rosca à esquerda, c) pino com rosca à direita, d) pino com rosca bidirecional e) pino cônico com rosca à direita, f) pino com rosca bidirecional em formato de diamante, g) pino com rosca à direita de duas entradas e h) pino com rosca à direita de três entradas, adaptado de [30].	18
Figura 3.1 — a) Ferramenta preliminar montada ($\varnothing$ do pino roscado = 2,0 mm); b) esquema de montagem.	25
Figura 3.2 — a) Ferramenta II - em sequência de montagem: A - pino roscado; B- corpo da ferramenta; C – pinça de centralização e fixação do pino roscado e D – parafuso de fixação, b) esquema de montagem da ferramenta	26
Figura 3.3 — Corpo da ferramenta: a) ferramenta, b) desenho esquemático para ferramentas de 0,5 mm a 1,0 mm.	27
Figura 3.4 — a) Desenho esquemático da pinça da ferramenta; b) Pinça da ferramenta.	28
Figura 3.5 – Pino roscado 2 mm - detalhe do perfil da rosca.	29
Figura 3.6 – Broca "Trado" para perfurar solo - a) com uma entrada, b) com 2 entradas.	29
Figura 3.7 - a) Pinos roscados de 0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8 - 0,9 - 1,0 - 1,2 - 1,4 - 1,6 e 2,0 mm, (da esquerda para a direita) respetivamente; b) pinos roscados de 2,0 com 1, 2 e 3 entradas e, c) pinos roscados de 1,0 mm com 1, 2 e 3 entradas.	30
Figura 3.8 - Pino roscado MC 1,0 3E - $\varnothing$ 1 mm - 3 entradas.	31
Figura 3.9 — a) Parafusos de fixação, b) desenho esquemático.	32
Figura 3.10 — a) Parafuso de localização, b) desenho esquemático.	32
Figura 3.11 - Ferramentas montadas sem os pinos roscados (da esquerda para a direita), com diâmetros nas medidas de 0,20 - 0,25 - 0,30 - 0,35 - 0,40 e 0,45 mm.	33
Figura 3.12 - Ferramenta para microcanaís (0,20 mm) em sequência de montagem: A – pino roscado; B – corpo da ferramenta; C – pinça da ferramenta; D – parafuso de fixação; E – parafuso de localização.	33
Figura 3.13 — Corpo da ferramenta para microcanaís.	34
Figura 3.14 — a) Pinça da ferramenta para microcanaís, b) desenho esquemático.	35
Figura 3.15 — a) Exemplo de pino roscado, b) Detalhe da rosca do pino $\varnothing$ 0,35 mm - rosca à direita.	36
Figura 3.16 — a) Parafusos de fixação das ferramentas para microcanaís, b) Desenho	

esquemático.	37
Figura 3.17 — a) Parafusos de localização das ferramentas para microcanaís, b) desenho esquemático.....	37
Figura 4.1 — Fresadora utilizada para os ensaios preliminares para minicanaís.	41
Figura 4.2 — Caixa de velocidades de avanço da fresadora utilizada para os ensaios preliminares para minicanaís.	42
Figura 4.3 — Processamento dos minicanaís na fresadora ferramenteira convencional (A - início e B - final do percurso).	42
Figura 4.4 — Dispositivo para fixação da chapa para dissipação de calor.....	43
Figura 4.5 — Centro de usinagem utilizado inicialmente para os ensaios para minicanaís.	43
Figura 4.6 — Detalhe da fixação das chapas no dispositivo para os ensaios para minicanaís.	44
Figura 4.7 — Detalhe da fixação do dispositivo no centro de usinagem com alguns minicanaís.	44
Figura 4.8 — Centro de usinagem utilizado posteriormente para os ensaios para minicanaís e microcanaís.	45
Figura 4.9 — Fixação do material a processar no centro de usinagem CNC.....	45
Figura 4.10 — Dispositivo desenvolvido para medir o comprimento dos pinos.	46
Figura 4.11 — Adaptação de multiplicador de velocidades no eixo árvore.	47
Figura 4.12 — Vista inferior do dispositivo de fixação da peça de trabalho, mostrando o alojamento da resistência elétrica e termopar (esquerda) e isolamento parcial (direita).	47
Figura 4.13 — Dispositivo de controle da temperatura de aquecimento do material a processar.	48
Figura 4.14 — Dispositivo de fixação e aquecimento do material a processar com isolamento térmico.....	49
Figura 5.1 — Ensaio inicial realizado com Ferramenta I na fresadora convencional.	53
Figura 5.2 — Ensaios preliminares realizados com Ferramenta I na fresadora convencional... ..	54
Figura 5.3 — Fotografias dos ensaios preliminares - esquerda lado "A" e direita lado "B".	54
Figura 5.4 — Detalhe da saída da ferramenta na peça de trabalho.	58
Figura 5.5 — Canais em forma de serpentina com ferramenta: (A) MC 2,0; (B) MC 1,0 e (C) MC 0,5.....	58
Figura 5.6 — Canais de 2,0 mm em forma de serpentina cruzados em diferentes profundidades.	59
Figura 5.7 — Perfil dos canais produzidos com pinos de 1,0 mm: a) com 1 entrada; b) com 2	

entradas e c) com 3 entradas.....	60
Figura 5.8 — Execução de microcanal com ferramenta de pino de 0,3 mm.	62
Figura 5.9 — Procedimento adotado para seccionar amostras.....	67
Figura 5.10 — Medição de força na direção de avanço da ferramenta.....	69
Figura 5.11 Montagem utilizada para medição de forças no eixo "X".	70
Figura 5.12 Amostras preparadas para o ensaio de rugosidade superficial interna dos canais: a) canal com ferramenta MC 1.0 e b) canal com ferramenta MC 2.0.	73
Figura 5.13 Representação 3D do acabamento superficial interno dos canais: a) canal com ferramenta MC 1.0 e b) canal com ferramenta MC 2.0.	73
Figura 5.14 – Figura esquemática da caracterização geométrica dos canais – adaptado de [18].	74
Figura 5.15 – Caracterização geométrica de canal produzido com MC 0,5.	75
Figura 5.16 - Dimensões do microcanal K4 com $D_h = 0,191 \mu\text{m}$ produzido com MC 0,5, com $v = 80 \text{ mm/min}$ e $\omega = 7000 \text{ rev/min}$	80
Figura 5.17 - Variação da área da secção transversal em função da velocidade de avanço para $\omega=2100 \text{ rev/min}$ - adaptado de [18].....	82
Figura 5.18 - Variação da área da secção transversal do canal em função da velocidade de rotação, para $v = 145 \text{ mm/min}$ - adaptado de [18].....	82
Figura 5.19 - Avaliação dos ensaios com MC 1,0 (a esquerda); MC 1,0 2E (ao centro) e MC 1,0 3E (a direita) em função de v (mm/min) e ω (rev/min).....	83
Figura 5.20 Variação da área da secção transversal do canal em função do número de entradas de rosca para 2440 rev/min, - adaptado de [18].....	83
Figura 5.21 - Comparação dos canais produzidos com $v = 145 \text{ mm/min}$ e $\omega = 2440 \text{ rev/min}$ - adaptado de [18].	84
Figura 5.22 - Canal E 10, produzido com MC 2,0 - $v = 180 \text{ mm/min}$ e $\omega = 1800 \text{ rev/min}$	85
Figura 5.23 - Canal M 24, produzido com MC 1,0 - $v = 100 \text{ mm/min}$ e $\omega = 2800 \text{ rev/min}$	85
Figura 5.24 - Canal J 5, produzido com MC 0,5 - $v = 100 \text{ mm/min}$ e $\omega = 5500 \text{ rev/min}$	86
Figura 5.25 - Canal J5 produzido com MC 0,5 - $v = 100 \text{ mm/min}$ e $\omega = 5500 \text{ rev/min}$; a) indicação das regiões ampliadas; b) ampliação da região do canal.....	86
Figura 5.26 - Regiões ampliadas do canal produzido com MC 0,5.....	87
Figura 5.27 Ensaio de microdureza realizado em amostra com canal produzido com MC 2,0 (<i>shoulder</i> $\varnothing 5 \text{ mm}$ e pino $\varnothing 2 \text{ mm}$) adaptado de [18].....	89
Figura 5.28 Ensaio de microdureza realizado em amostra com canal produzido com MC 1,0	

(<i>shoulder</i> Ø 4 mm e pino Ø 1 mm). adaptado de [18].	89
Figura 5.29 Ensaio de microdureza realizado em amostra com canal produzido com MC 0,5 (<i>shoulder</i> Ø 3,5 mm e pino Ø 0,5 mm) adaptado de [18].	90
Figura 5.30 – Montagem para medição de temperaturas máximas com termopares e com a câmera termográfica: a) montagem e distanciamento dos termopares; b) montagem da câmera termográfica e c) focalização do ponto de medição da temperatura na câmera termográfica.	91
Figura 5.31 – Montagem dos ensaios para medição da dissipação de temperatura nos lados de avanço e retrocesso do processo.	93
Figura 5.32 - Aparato experimental do ensaio de Correntes Induzidas [41].	96
Figura 5.33 - a) Teste de IC em 20 kHz (Ø 2 mm); b) C-Scan da serpentina produzido com o pino Ø 2 mm a 20 kHz [41].	97
Figura 5.34 - a) Teste de IC em 20 kHz (Ø 1 mm); b) C-Scan da serpentina produzido com o pino Ø 1 mm a 20 kHz [41].	97
Figura 5.35 - a) Teste de IC em 20 kHz (Ø 0,5 mm); b) C-Scan da serpentina produzido com o pino Ø 0,5 mm a 20 kHz [41].	97
Figura 5.36 - Teste com líquido penetrante; a) acessório para injeção de líquido; b) superfície após aplicação do líquido penetrante e limpeza; c) superfície do corpo de prova após aplicação do revelador: sem defeitos. Adaptado de Clique ou toque aqui para inserir o texto. [41].	98
Figura 5.37 Teste de continuidade utilizando injeção de ar em canal de 0,5 mm.	99
Figura 5.38 - Protótipos de trocadores de calor com canais em formato de serpentina com adaptação de conectores: a) produzido com ferramenta MC 2.0, b) produzido com ferramenta MC 1.0 em teste de continuidade com circulação de água e c) produzido com ferramenta MC 0.5 em teste de continuidade com circulação de água.	99
Figura 5.39 - Teste de estanqueidade em amostras pressurizadas, submersas em água – a) com canal de 2,0 mm de largura e b) com canal de 1,0 mm de largura.	100
Figura 5.40 - NCT – Água no canal (vermelho); alumínio ao redor da água (cinza) - a) canal linear produzido com MC 0,5; b) canal em forma de serpentina com MC 1.0; c) canal em forma de serpentina com MC 2.0.	101
Figura 5.41 Tomografia Computadorizada de Nêutrons com injeção de H ₂ O, apresentando a continuidade total do canal.	101
Figura. 5.42 Diagrama do equipamento para tomografia com nêutrons do IPEN-CNEN/SP.	102
Figura 5.43 – Amostra na posição de irradiação: a) feixe de nêutrons; b) mesa rotatória; c) tela	

cintiladora.....	103
Figura 5.44 Imagens de micro TC, canal linear de 0,5 mm - a) visualização 3D; b) perfil; c) Superior; d) Frente.....	104
Figura 5.45 - Imagens de Micro CT ao longo do tempo - canal linear de 1,0 mm - a) início t = 1 s; b) t = 20 s; c) t = 40s e, d) final t = 60 s.....	105
Figura 5.46 Imagens de Micro CT ao longo do tempo - canal linear de 2,0 mm - a) início t = 1 s; b) t = 20 s; c) t = 40s e, d) final t = 60 s.	105
Figura 5.47 - Sessão longitudinal da amostra D6. Canal produzido com μC 0,3 mm, ω = 12.000 rev/min, v =25 mm/min.	106
Figura 5.48 - Sessão longitudinal da amostra F8. Canal produzido com μC 0,3 mm, ω = 12.000 rev/min, v =25 mm/min.	107
Figura 5.49- Sessão longitudinal da amostra J3. Canal produzido com μC 0,2 mm, ω = 20.000 rev/min, v =15 mm/min.	107
Figura 5.50 - Vista superior da amostra D6 com profundidade de 0,19 mm. Canal produzido com μC 0,3 mm, ω = 12.000 rev/min, v =25 mm/min.....	108
Figura 5.51 - Vista superior da amostra F8 com profundidade de 0,30 mm. Canal produzido com μC 0,3 mm, ω = 12.000 rev/min, v =25 mm/min.....	108
Figura 5.52 - Vista superior da amostra J3 com profundidade de 0,20 mm. Canal produzido com μC 0,2 mm, ω = 20.000 rev/min, v =15 mm/min.....	108
Figura 5.53 Protótipo para ensaios térmicos a) macrografia do canal E11; b) protótipo pintado com tinta fosca.	110
Figura 5.54 Resfriamento ativo com fluido refrigerante circulando no canal: Temperatura inicial (a), intermediária (b, c, d, e) e temperatura final (f); Teste com resfriamento passivo com convecção natural: (g) temperatura inicial, (h) intermediária e (i) temperatura final.	111
Figura 5.55 Taxa de resfriamento – comparação entre resfriamento ativo e passivo.....	112

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação dos canais, segundo o D_h - adaptado de [4].....	23
Tabela 3.2 - Tabela de especificações das roscas para minicanais.....	30
Tabela 3.3 — Especificações das roscas e dados para a execução das roscas para microcanais - μ FSC.....	36
Tabela 4.1 — Composição química (% peso).....	40
Tabela 4.2 — Propriedades mecânicas (EN 485 - 2).	40
Tabela 4.3 — Propriedades físicas.....	40
Tabela 5.1 — Matriz de ensaios.	51
Tabela 5.2 - Parâmetros utilizados nos canais preliminares.....	55
Tabela 5.3 - Parâmetros fixados para as ferramentas.....	57
Tabela 5.4 Parâmetros utilizados para a produção de canais com padrão de serpentina.	59
Tabela 5.5 Parâmetros utilizados para a produção de μ canais.....	63
Tabela 5.6 - Parâmetros e forças no eixo "X".....	71
Tabela 5.7. Valores da rugosidade superficial interna dos canais.....	73
Tabela 5.8 - Caracterização geométrica de canais produzidos com MC 2,0 em função de ω/v [v (mm/min) e ω (rev/min)]. adaptado de [18].....	76
Tabela 5.9 - Caracterização geométrica de canais produzidos com MC 1,0 em função de ω/v [v (mm/min) e ω (rev/min)]. adaptado de [18].....	76
Tabela 5.10 - Caracterização geométrica de canais produzidos com MC 0,5 em função de ω/v [v (mm/min) e ω (rev/min)]. adaptado de [18].....	77
Tabela 5.11 - Avaliação dos ensaios com MC 2,0 em função de ω/v [v (mm/min) e ω (rev/min)].	77
Tabela 5.12 - Avaliação dos ensaios com MC 1,0 em função de v (mm/min) e ω (rev/min).....	78
Tabela 5.13 - Avaliação dos ensaios com MC 0,5 em função de n (mm/min) e ω (rev/min). ...	79

Tabela 5.14 - Parâmetros e suas influências.....	79
Tabela 5.15 - Diâmetro hidráulico (μm) dos canais com MC 0,5 em função de ω/v [v (mm/min) e ω (rev/min)].	80
Tabela 5.16 – Área (mm^2) em função de ω/v [v (mm/min) e ω (rev/min)].....	81
Tabela 5.17 – Área (mm^2) em função de ω/v [v (mm/min) e ω (rev/min)].....	81
Tabela 5.18 - Valores das temperaturas envolvidas no processo.	91
Tabela 5.19 - Temperatura $t = 54$ segundos.....	92
Tabela 5.20 - Valores das temperaturas envolvidas no processo.	94
Tabela 5.21 – Parâmetros que resultaram no maior D_h para cada ferramenta.	100

SIGLAS

μ C	Ferramenta para <i>microchanneling</i>
μ FSC	<i>Micro Friction Stir Channeling.</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DIN	Deutsches Institut für Normung - Norma alemã para normatização.
EN	Norma Europeia
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>
HRC	<i>Rockwell hardness "C"</i>
LA	Lado em avanço
LR	Lado em retrocesso
MC	Ferramenta para minicanais
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
MFSC	<i>Modified Friction Stir Channeling</i>
NCT	Tomografia computadorizada de neutrons
Pc	Profundidade do canal
SAE	<i>Society of Automotive Engineers International</i>
SSFSC	<i>Stationary Shoulder Friction Stir Channeling</i>
SSFSC	<i>Stationary Shoulder Friction Stir Channeling</i>
TWI	<i>The Welding Institute</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZTMA	Zona Termomecanicamente Afetada
μ CT	Micro tomografia computadorizada

SÍMBOLOS

ϕ	Diâmetro
s	Segundo(s)
p	Passo
mm	Milímetro
μm	Micrometro
ω ou rev/min	Revoluções por minuto
v	Velocidade de avanço
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
D_h	Diâmetro hidráulico
A	Área
P	Perímetro
$^{\circ}$	Grau – unidade de ângulos
A	Área do canal
H	Altura do canal
h	Espessura do teto do canal
P	Perímetro do canal
W	Largura do canal
S	Área da secção transversal

INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e motivação

Com o desenvolvimento tecnológico em avanço contínuo, no que diz respeito ao seguimento da indústria aeroespacial, eletrônica, automobilística, de comunicações, biomédicas, entre outras, há a necessidade de desenvolver sistemas periféricos para dar suporte às inovações que surgem.

A busca crescente pela miniaturização de equipamentos e componentes em todos os segmentos industriais e também pela redução de custos, rapidez e confiabilidade, torna urgente o desenvolvimento de sistemas de troca de calor mais eficientes e de menores dimensões capazes de atender às demandas, sobretudo dos circuitos eletrônicos que requerem componentes pequenos e leves com alta precisão e confiabilidade, está aumentando e que utilizam microprocessadores e microchips cada vez mais potentes que aquecem e necessitam de arrefecimento para ter seu máximo desempenho [1].

Friction Stir Channeling (FSC) é um processo de fabricação de estado sólido introduzido em 2003 por Mishra [2] e está intimamente relacionado à soldagem por fricção e agitação (FSW) e ao processamento por fricção e agitação (FSP), todos são processos de estado sólido [3], [4], [5].

Friction Stir Channeling (FSC) é uma técnica relativamente nova que surgiu como uma alternativa promissora aos métodos tradicionais para a criação de canais em componentes monolíticos de diferentes materiais [6]. e modificar materiais [7], [8], [9].

Este processo combina os benefícios do processamento e abertura de canais por fricção e agitação, resultando em maior eficiência em comparação com os métodos convencionais, tais como furação, fresamento e usinagem por eletroerosão, permitindo maior capacidade de transferência de calor, trajetórias lineares e/ou curvilíneas de comprimento e dimensões variadas com qualidade e propriedades mecânicas aprimoradas.

Para atender à necessidade das indústrias em relação à miniaturização de equipamentos, o desenvolvimento de canais com dimensões cada vez menores vem se aprimorando como uma solução de projeto onde o gerenciamento térmico é de grande relevância [10].

Fica evidente a necessidade de investigar os princípios fundamentais do μFSC (FSC a microescala), sua aplicação em vários segmentos e seu potencial para contribuir com a indústria de transformação, abrindo caminho para métodos de produção mais eficientes e sustentáveis e de desenvolvimento e otimização.

O Micro *Friction Stir Channeling* (μFSC) é uma derivação da técnica FSC que envolve a criação de canais em componentes e estruturas de pequena escala e pode ser usado para criar microcanais, canais microfluídicos em materiais como metais e polímeros [6], [11].

Essas estruturas podem ser usadas em trocadores de calor, micro reatores, sistemas microeletromecânicos (MEMS), dispositivos microfluídicos e outras aplicações em microescala que envolve uma versão em miniatura da ferramenta tradicional do FSC , projetada para trabalhar em materiais e estruturas em microescala [12].

O processo μFSC envolve vários parâmetros chave que influenciam a qualidade e eficiência do processo, incluindo a geometria da ferramenta, velocidade de rotação, velocidade de avanço da ferramenta e força axial. A otimização desses parâmetros é fundamental para alcançar resultados de boa qualidade no μFSC [13].

1.2 Objetivo Principal e secundários

A fabricação por processamento FSC à microescala, pelo que foi revisto na literatura, ainda não foi estudada; nem tampouco em relação às ferramentas necessárias, aos parâmetros de processamento para μFSC , caracterização dos canais e testes que garantam sua qualidade.

Diante da lacuna existente, surgiram questões de pesquisa que precisam ser respondidas, dentre as quais se destaca o objetivo desta pesquisa:

Qual é o limite tecnológico do FSC em relação ao menor canal contínuo e regular capaz de ser produzido?

Quais as dimensões e geometrias de ferramentas são possíveis de se fabricar e que sejam capazes de produzir minicanais ou microcanais?

Os materiais M2 e O1, utilizados para a fabricação das ferramentas, atendem às necessidades do processo ?

Para responder a essas perguntas, surgem outras não menos importantes que devem ser feitas e torna-se necessário investigar:

Quais os meios que devem ser utilizados para produzir minicanais ou microcanais?

O material escolhido para as peças de trabalho atenderá as condições necessárias?

Quais os parâmetros do processo que devem ser utilizados para que se consiga produzir minicanais ou microcanais?

Tendo em vista que se trata de ferramentas com dimensões muito reduzidas, a dificuldade de fabricação no que tange às tolerâncias geométricas de forma, orientação, posição requeridas, são bastante precisas, como também a resistência mecânica para o processamento fica muito diminuída.

A definição do material das ferramentas e possíveis tratamentos térmicos necessários para garantir a integridade estrutural é um fator decisivo para a construção delas.

Ainda, a geometria do perfil da rosca do pino, em relação ao número de entradas, passo e ângulo do filete de rosca, é um fator importante em relação a geometria do canal obtido.

Outro fator extremamente importante é a definição da sequência de fabricação e meios necessários para a fabricação das ferramentas para conseguir ferramentas confiáveis e que, tenham a durabilidade requerida para o processo.

Também, há de se estabelecer uma janela de parâmetros de processamento para a consecução de minicanais ou microcanais contínuos e com geometrias uniformes e satisfatórias por meio da realização de ensaios predefinidos e, a partir disso, definir qual a menor dimensão de minicanal ou microcanal é possível de ser produzida. Para isso, foram estabelecidos critérios de avaliação.

A influência dos parâmetros de processo na geometria do canal obtido também foi objeto de estudo.

Finalmente, foram estudadas as propriedades mecânicas no entorno do microcanal obtido.

A produção de um trocador de calor, utilizando os melhores parâmetros de processamento, se fez necessária para apresentar conceitos e provar que a produção de canais à microescala por *FSC* pode ter aplicação na indústria de transformação.

Portanto, foram estudados canais à microescala com o objetivo de se chegar ao limite de processo, quer seja na fabricação das ferramentas necessárias ou pelo limite de resistência mecânica dessas ferramentas, como também pelo menor canal com diâmetro hidráulico D_h contínuo e com qualidade suficiente e aceitável é possível de ser produzido pelo processo μFSC .

1.3 Organização do documento

A estruturação deste documento apresenta-se em seis capítulos.

No capítulo 2 apresenta-se um resumo do estado da arte da tecnologia *Friction Stir Channeling* desde a sua origem; as variantes já desenvolvidas até o momento; as ferramentas utilizadas em cada variante do processo.

No capítulo 3 descreve-se o projeto e desenvolvimento das ferramentas utilizadas, bem como os materiais utilizados para sua fabricação e os processos de produção necessários para garantir sua qualidade.

No capítulo 4 descreve-se o material escolhido para o processamento, os equipamentos utilizados, dispositivos e aparatos desenvolvidos para o processamento dos canais.

O capítulo 5 trata do procedimento experimental em cada fase da pesquisa com as ferramentas utilizadas, onde foram analisadas as influências dos parâmetros de processamento na morfologia dos canais obtidos, método avaliativo dos canais, testes de continuidade realizados, caracterizações por meio de vários métodos e discussões.

No capítulo 6 são apresentadas conclusões a que se chegou até o momento para responder às questões de pesquisa e sugestões de pesquisas futuras.

1.4 Publicações

Wagner C. Sabor, Daniel F.B. Damásio, Rúben S. Tasnicenco, Gonçalo Sorger, Telmo G. Santos, Miguel A. Machado, Catarina I.S. Vidal. "*Microscale channels produced by micro friction stir channeling (μ FSC)*". JMR&T. Volume 32, Sept.-Oct. 2024, Pages 3537-3547, doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.08.139.

Artigo sendo desenvolvido

Wagner C. Sabor, Telmo G. Santos, Miguel A. Machado, Catarina I.S. Vidal. "*FSC process limit at the microscale using micro tools*".

Em fase de preparação para submissão.

Artigo apresentado em conferência

Miguel A. Machado, Wagner C. Sabor, Ruben Tasnicenco, Daniel Damásio, Telmo G. Santos, Catarina Vidal, "*Characterization of Microchannels Produced by Friction Stir Channeling: An Experimental Study*", 13th ECNDT, July 2023, Lisbon, <https://doi.org/10.58286/28176>.

Teses de mestrado (Acompanhamento)

"*Microchanneling* - Desenvolvimento de parâmetros tecnológicos e caracterização de microcanais", Damásio, D., Universidade Nova de Lisboa, Tese de mestrado (2022).

"Caracterização não destrutiva de microcanais produzidos por *Friction Stir Channeling*", Tasnicenco, R. S. Universidade Nova de Lisboa, Tese de mestrado (2022).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se um resumo do estado da arte, no contexto atual, da tecnologia *Friction Stir Channeling* que é caracterizada como processamento no estado sólido, em que foram abordadas as variantes do processo já estudadas, os parâmetros de processo utilizados e a comparação entre essas variantes, como também as ferramentas utilizadas em cada variante, as possíveis aplicações industriais e os resultados obtidos até a presente data.

2.1 Contextualização da tecnologia *Friction Stir Channeling*

The Welding Institute - TWI, sob a autoria de Wayne Thomas, desenvolveu e patenteou o *Friction Stir Welding* (FSW) em 1991. Trata-se de uma tecnologia de união no estado sólido, inicialmente aplicada em ligas de alumínio [14].

Durante o processo de *FSW*, podem ocorrer defeitos relacionados ao fluxo do material, sendo um deles a formação de vazios internos, conhecidos como *wormholes*, conforme ilustrado na Figura 2.1 [15].

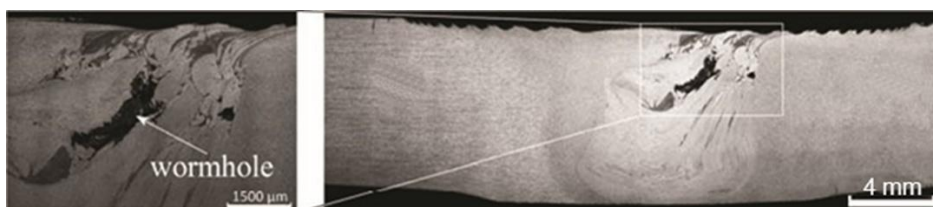


Figura 2.1 — Defeito detectado no *Friction Stir Welding*, wormhole adaptado de [15]

Esses defeitos surgem quando os parâmetros do processo ou o contato entre a ferramenta e o material não estão adequados, comprometendo a integridade da solda [13].

Utilizando esse problema do *FSW* em um novo processo na metalurgia do estado sólido, foi desenvolvido, o método *Friction Stir Channeling*, cuja finalidade é converter esses defeitos internos presentes nos cordões de solda em uma tecnologia de fabricação mais estável e controlada.

Mishra demonstrou em 2005, que é possível obter um canal contínuo em um componente monolítico invertendo o fluxo de material e ajustando adequadamente as condições do processo de *FSW* (*Friction Stir Welding*) [16].

O processo *FSC* fundamenta-se nos princípios físicos do *FSW*, sendo predominantemente governado pela introdução de energia mecânica. Essa energia resulta não apenas do calor gerado pelo atrito entre a ferramenta e o material, mas também, de forma preponderante, da dissipação de energia durante a deformação plástica e da dissipação viscosa interna que ocorre durante o fluxo do material. Como o calor de atrito tende a diminuir à medida que a temperatura do material se aproxima da sua temperatura de fusão, a temperatura máxima atingida na zona afetada pelo processo é limitada pela temperatura de fusão do material. Consequentemente, toda a deformação ocorre sob condições de estado sólido, garantindo a integridade estrutural do material durante o processo [17].

O processo de *FSC* utiliza uma ferramenta rotativa não consumível para a criação de canais contínuos fechados em componentes monolíticos, realizando-se em uma única etapa de fabricação [2]. A formação do canal exige a indução de um fluxo ascendente de material em estado viscoplástico, de modo a promover o deslocamento do material desde a base do pino até a região do *shoulder*, garantindo a continuidade do canal [12].

A Figura 2.2 ilustra de forma esquemática a configuração e o funcionamento do processo de *FSC*.

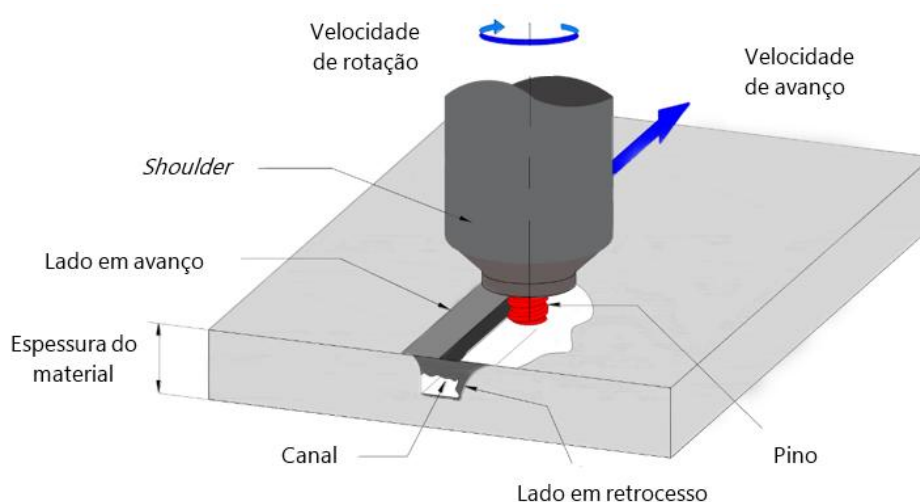


Figura 2.2 — Representação do *Friction Stir Channeling*, nomenclatura e funcionamento adaptado de [18]

2.2 Variantes do processo *Friction Stir Channeling*

O *FSC - Friction Stir Channeling* é classificado como uma tecnologia de estado sólido, capaz de produzir canais internos contínuos em um componente monolítico, por meio de uma única passagem da ferramenta [2].

Neste processo, os canais obtidos podem ter trajetórias lineares e/ou curvilíneas e sob superfícies planas ou cilíndricas externas.

2.2.1 Friction Stir Channeling with Shoulder Workpiece Clearance

Mishra [2] demonstrou em 2005 que é possível obter um canal contínuo, num componente monolítico com a inversão do fluxo de material e utilizando as condições de processo corretas, convertendo um defeito decorrente do *FSW* em uma aplicação com grande potencial.

Assim, surgiu o *Friction Stir Channeling with shoulder workpiece clearance*, apresentado na Figura 2.3, que consiste em utilizar uma ferramenta semelhante à utilizada no *FSW*, porém, com um espaçamento entre o *shoulder* e o componente a processar e com a rotação da ferramenta sendo no mesmo sentido da rosca do pino (direita ou esquerda).

Este processo pode ser definido como a utilização de uma ferramenta composta de um *shoulder* e um pino roscado e com a introdução do pino roscado com rotação pré-definida em uma peça de trabalho gera atrito e consequentemente gera calor e modifica a estrutura cristalina do material levando-o ao estado viscoplástico e, após esta fase, promove-se o deslocamento da ferramenta.

Deste modo, permite-se que o fluxo de material em regime viscoplástico seja direcionado no sentido ascendente, ou seja, em direção à superfície do componente a processar e este fluxo de material é comprimido pelo *shoulder* que está realizando simultaneamente com o pino a deformação termomecânica no processo e este fluxo de material vai se depositando e sendo pressionado na superfície da chapa, ocupando o espaçamento existente entre o *shoulder* e a superfície, ocasionando o fechamento do canal e este é criado [13], [19].

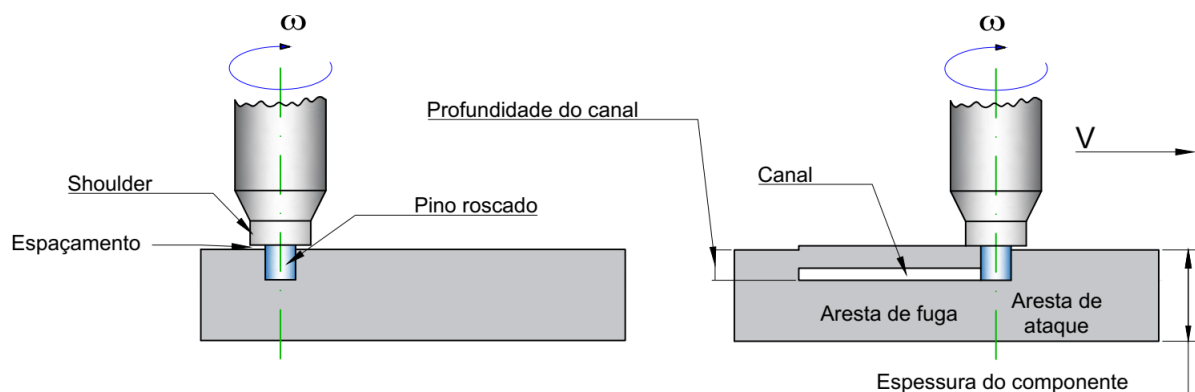


Figura 2.3 — Esquema do *Friction Stir Channeling* with *shoulder* workpiece clearance, adaptado de [18].

Além da tecnologia *Friction Stir Channeling* with *shoulder clearance*, no decorrer do tempo, até os dias atuais, surgiram outras tecnologias onde foram estudadas a formação do canal em materiais metálicos e a influência dos parâmetros de processo na produção dos mesmos, a saber: o *FSC* without *shoulder clearance* [17], *Modified Friction Stir Channeling* [20], *Hybrid Friction Stir Channeling* [21] e *Stationary Shoulder Friction Stir Channeling* [22].

2.2.2 Friction Stir Channeling without Shoulder Workpiece Clearance.

Esta tecnologia foi patenteada por [20] em 2011. Também consiste na realização de canais internos contínuos em componente metálicos maciços, utilizando a fricção linear por meio de uma ferramenta especialmente desenvolvida para este fim.

Este processo é governado por controle das forças, principalmente pelo controle da força axial e não somente por controle de posição como o processo descrito anteriormente.

A ferramenta inovadora funciona de forma semelhante às demais já estudadas, ou seja, o material em processamento é extraído da zona de processamento para a superfície do componente, no entanto a diferença está no posicionamento da ferramenta, apresentada na Figura 2.4, onde o *shoulder*, que fica na mesma cota da superfície (não há espaçamento entre o *shoulder* e a peça de trabalho), faz o processamento do material extraído comprimindo-o e fechando o canal. Por meio de estrias na superfície do *shoulder*, o material em excesso é removido sob a forma de rebarbas. Pode também, este material em excesso, ser removido simultaneamente pela ação de corte das rebarbas por meio de sistema de corte adaptado na

ferramenta, com a possibilidade das aparas resultantes virem a ser utilizadas em outros processos [17].

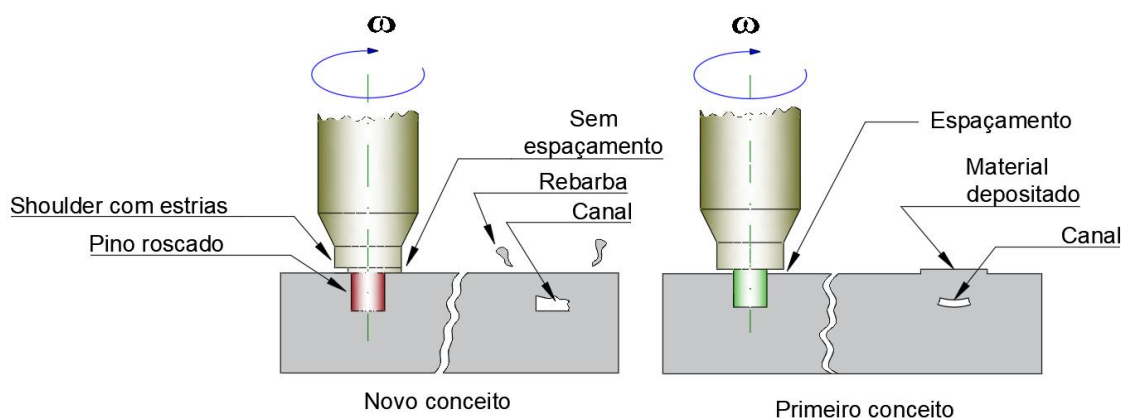


Figura 2.4 — Representação esquemática do *FSC without shoulder clearance* (esquerda) e do *FSC with shoulder clearance* (direita), adaptado de [18]

Também há de se destacar que a geometria dos canais foi melhorada em relação à altura dos canais com a confecção de estrias na superfície do *shoulder*, como apresentado na figura 2.5, pois a força de compactação exercida se mantém constante e é ligeiramente menor quando comparada ao processo *Friction Stir Channeling with shoulder workpiece clearance*.

Diminui devido ao fato de que as estrias diminuem também a área de contato com o material a processar e promovem a retirada do material em excesso extraído pelo pino em forma de rebarbas auto destacáveis e não existindo material em excesso entre a base do *shoulder* e a placa de trabalho, exige forças menores de compactação para fechar os canais e com isso, aumenta a altura do canal, diferente do processo anterior [17], como apresentado na figura 2.5.

Com isso, o componente processado não requer operações posteriores em sua superfície, diminuindo custos com retrabalho.



Figura 2.5 — Detalhe da ferramenta do *FSC without shoulder clearance* (vista superior à esquerda) e (vista em perspectiva à direita) [17]

2.2.3 Modified Friction Stir Channeling

Um método chamado *Modified Friction Stir Channeling (MFSC)* foi desenvolvido e testado em 2013 por Rashidi et al. [23]; onde foi usado um pino cilíndrico liso e foi aplicado um ângulo de inclinação à ferramenta.

A aplicação de um ângulo de inclinação na ferramenta, apresentado na Figura 2.6, permitiu que uma quantidade maior de material fluísse para fora da zona processada e, com isso, houve formação de rebarbas maiores, porém devido ao uso de um pino liso (sem rosca) o fluxo de material viscoplástico foi reduzido e foi necessário utilizar velocidades de rotações maiores e avanços menores, comparado com o método *FSC* original.

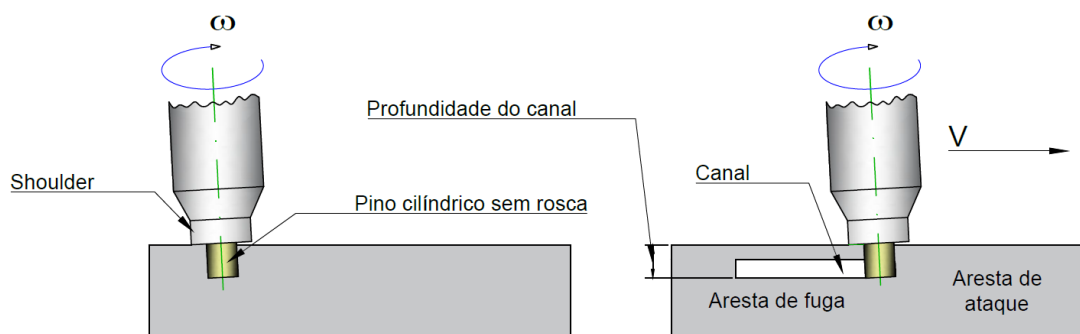


Figura 2.6 — Representação do MFSC - *Modified Friction Stir Channeling* com pino cilíndrico sem rosca, adaptado de [23].

Uma desvantagem deste método é que somente é possível realizar canais lineares no mesmo sentido do ângulo de inclinação e observa-se que, devido à utilização de um ângulo de inclinação, o *shoulder* gera uma superfície côncava no ressalto originado pelo material em excesso, Figura 2.7. Esse efeito pode ser benéfico ou não, pois se houver necessidade de remover esse defeito, a espessura do componente processado diminuirá.

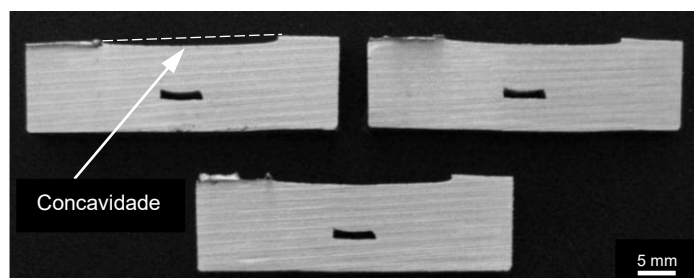


Figura 2.7 — Representação do MFSC - *Modified Friction Stir Channeling* com pino cilíndrico sem rosca, adaptado de [23]

Em outro estudo, de Rashidi e Mostapafour [24], compararam os efeitos da geometria dos pinos com 2 formatos de Pino não roscados na produção de canais entre uma ferramenta

com perfil cônico ascendente, sem ângulo de inclinação em relação ao componente a processar e o conceito *MFSC*, com Pino cilíndrico inclinado de 3° em relação ao componente metálico, pois já havia sido observado que esta inclinação proporcionou canais estáveis e com formato e geometrias ótimas, figura 2.8.

Os *shoulders* foram confeccionados com concavidade de 5° para acomodar sob o *shoulder* o material excedente do fluxo ascendente de material quando da compactação.

Uma folga de mesma medida entre os *shoulders* e o componente metálico foi estabelecida para permitir o fluxo de material para fora. O material extraído é depositado na zona processada entre o *shoulder* e a peça de trabalho.

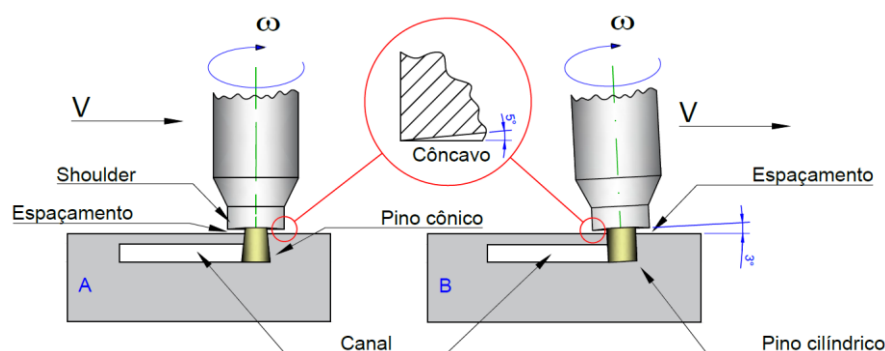


Figura 2.8 — Representação do *MFSC - Modified Friction Stir Channeling* com pino cônico, adaptado de [25].

Os resultados mostraram que a utilização de um pino cônico aumentou a estabilidade do canal em relação ao *MFSC*.

2.2.4 Hybrid Friction Stir Channeling

Em um processo inovador, patenteado por Karvinen, Vilaça e Nordal [26], foi criado um processo de estado sólido que reúne os já consagrados *FSW* e *FSC* em um único processo estável, capaz de realizar a abertura de canais e soldagem de dois ou mais componentes em um só processamento.

Este novo processo utiliza uma ferramenta especialmente projetada que consiste em realizar a soldagem de dois ou mais componentes e produzir canais internos fechados em componentes que podem ou não ser dissimilares e/ou conjugados em diferentes combinações como juntas de topo, juntas sobrepostas, como também uma combinação entre ambas, apresentada na Figura 2.9.

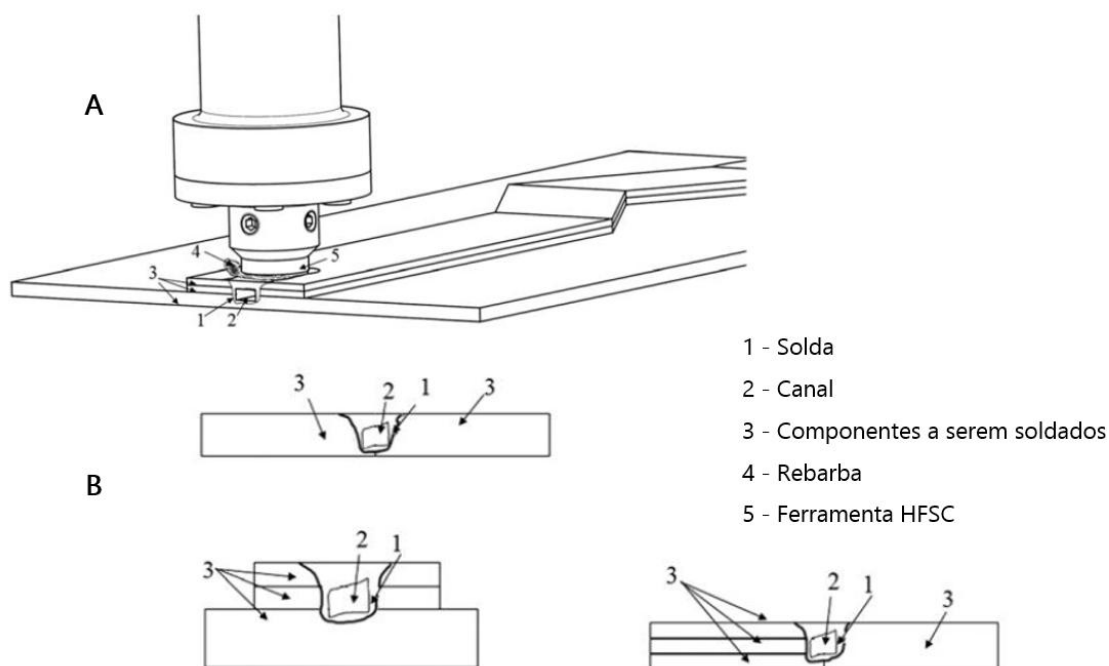


Figura 2.9 — Representação do *HFSC - Hybrid Friction Stir Channeling* (A), possibilidades de combinações do *HFSC* (B), adaptado de [12], [27].

Para o projeto da ferramenta, foram utilizados os melhores conceitos de *FSW* e *FSC* já estudados. Os detalhes da ferramenta não consumível pode ser visto na Figura 2.10, que é composta de um *shoulder* com estrias na superfície da ferramenta, desenvolvida por Vidal [20], que tem a função de extrair o material excedente, um pino roscado que tem a função de fazer o fluxo de material ser extraído para fora do componente processado gerar o canal, combinado com uma ponta onde a rosca é produzida no sentido inverso da rosca que gera o canal e que tem a função de unir os componentes processados, estando em contato com ambos os materiais, trabalhando como no processo *FSW*.

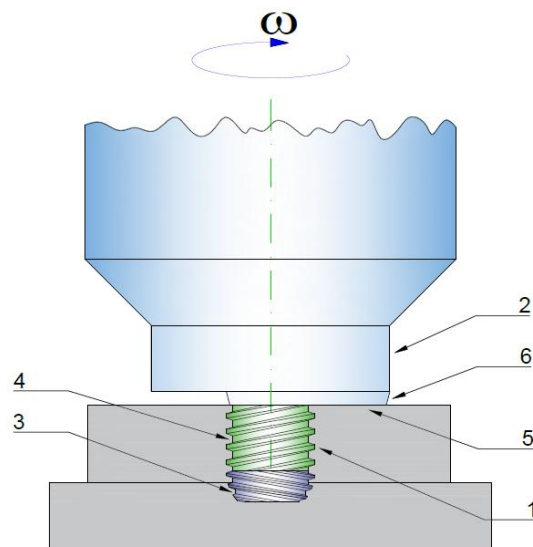


Figura 2.10 Esquema de utilização da Ferramenta *HFSC*: (1) pino da Ferramenta; (2) *shoulder com estrias*; (3) seção de soldagem; (4) seção de abertura de canais; (5) estria do *shoulder* em contato com a placa de processamento e (6) região onde o fluxo de material é extraído como rebarba destacável, adaptado de [27].

O projeto adequado da ferramenta e a utilização de parâmetros corretos de processamento fazem dele um processo controlável e reproduzível e a faixa de dimensões de canal possíveis pelo *HFSC* é bastante ampla [26]. A figura 2.11 demonstra um exemplo do processo.

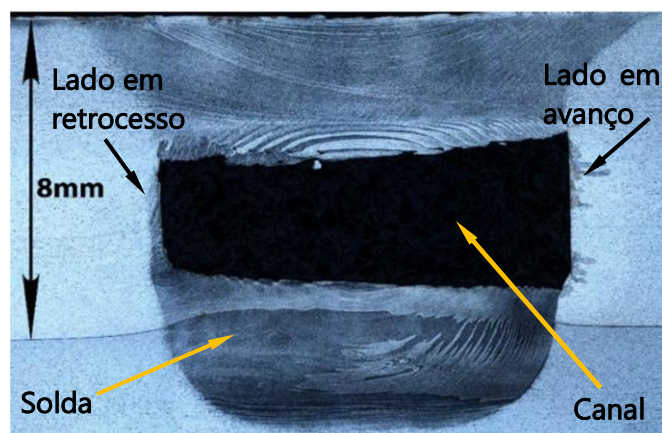


Figura 2.11 Macrografia do canal e soldagem de dois componentes processados por *HFSC - Hybrid Friction Stir Channeling*, adaptado de [28]

Na produção de trocadores de calor para o gerenciamento térmico, o *HFSC* se torna muito promissor, devido à combinação do fluxo turbulento e maior área de superfície em relação a outros processos de fabricação, o que melhora a transferência de calor para o líquido de resfriamento [12].

2.2.5 Stationary Shoulder Friction Stir Channeling

Uma nova variante da tecnologia *FSC* foi patenteada por João Gandra, em 2017 [22], o *Stationary Shoulder Friction Stir Channeling - SSFSC*.

Esta nova variante tem como principais atributos inovadores, um *shoulder* estacionário e a extração do material em excesso através do *shoulder*.

O processo se dá da seguinte forma: conforme o processo se inicia, aprofunda-se o pino na direção do material até que seja atingida a profundidade onde o *shoulder* toca a superfície da peça de trabalho, eliminando qualquer espaçamento entre eles. Ao se promover o deslocamento da ferramenta, a rotação do pino, que é no mesmo sentido da rosca, cria uma força ascendente e extrai o material em excesso em estado viscoplástico em direção à superfície da peça. Este material penetra e preenche uma cavidade existente entre o final da rosca do pino com o diâmetro correspondente a medida do diâmetro externo da rosca da rosca do pino [29] e ao furo existente no *shoulder* onde ocorre o deslizamento rotacional do pino, com folga mínima, conforme mostra a Figura 2.12.

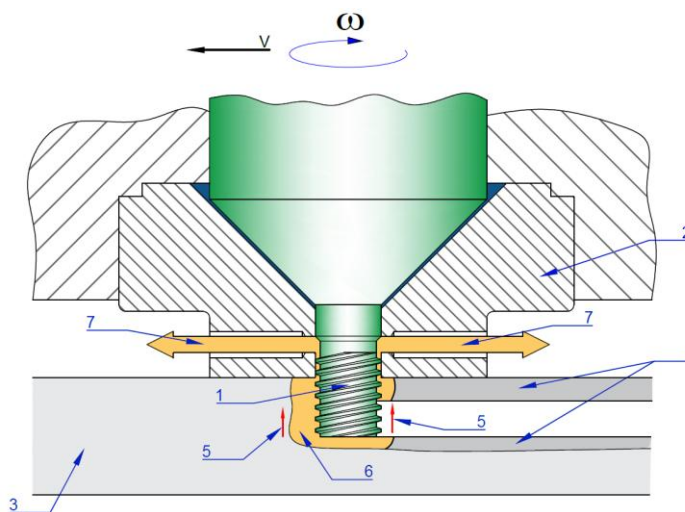


Figura 2.12 Ilustração esquemática do *SSFSC - Stationary Shoulder Friction Stir Channeling* - (1) Pino rotativa; (2) *shoulder* estacionário; (3) peça de trabalho; (4) material processado; (5) direção do fluxo de material; (6) material em estado viscoplástico e (7) material viscoplástico em extrusão, adaptado de [22].

Segundo o que foi observado, devido a poucas informações existentes sobre o design da ferramenta em publicações e que também não foram explicitadas no pedido de patente, diferentes recursos nos pinos roscados podem ser projetados para variar as características de formação de canal e, a configuração do número de furos onde o material excedente é extrudado é preferencialmente múltiplo e distribuído de forma simétrica, conforme sua aplicação.

A força ascendente de extração faz com que o material viscoplástico penetre na cavidade do *shoulder* e no(s) furo(s) especialmente projetado(s) que se intercomunica(m) para dar vazão a esse material, conduzindo-o ao lado exterior do *shoulder*.

O material extrudado sai em forma de "arame", com uma configuração "cilíndrica" ao invés de formar ressaltos ou rebarbas na superfície do material, já relatadas em processos anteriores, o que não requer, supostamente, operações posteriores para a superfície da peça.

Desta forma, presume-se que o acabamento superficial da peça de trabalho seja bom e elimine a necessidade de operações subsequentes, tais como remoção de rebarbas ou ressaltos na superfície da peça de trabalho.

Por meio desse processo, pode-se realizar abertura de canais em qualquer trajetória e, segundo o autor, pode-se ainda ser utilizada em configurações cilíndricas externas, pois o *shoulder* estacionário pode ter uma superfície de contato em forma de segmento de circunferência (côncava) para superfícies cilíndricas externas, de forma a ter contato similar ao que é desenvolvido em superfícies planas. (fazendo canais em espirais)

2.3 Variáveis do processo *FSC à macroescala*

Vários autores investigaram as variáveis do processo *FSC* à macroescala, e pode-se constatar que todas essas variáveis exercem alguma influência em relação ao processo.

Segundo os testes preliminares descritos em 3.1, foi dada ênfase às variáveis que incidem no processo *Friction Stir Channeling with Shoulder Workpiece Clearance*, ou seja:

- Geometria da ferramenta: comprimento e geometria do pino, diâmetro do *shoulder*;
- Velocidade de avanço da ferramenta, v [mm/min];
- Velocidade de rotação da ferramenta, ω [rev/min];
- Espaçamento entre o *shoulder* e a superfície do material [mm];
- Profundidade do canal [mm];
- Temperatura de processamento [°C]

2.3.1 Geometria da ferramenta do processo *Friction Stir Channeling*

Nas pesquisas realizadas à macroescala, foram utilizados pinos com roscas trapezoidais com ângulo de flanco de 30°, com variados passos de roscas e profundidades de filetes de rosca também variados.

Salimi et al. [30] realizaram comparações entre diversas ferramentas apresentando diferentes configurações de pinos conforme apresentado na Figura 2.13. O diâmetro do shoulder e o comprimento dos pinos foi o mesmo em todos os ensaios. As condições operacionais também foram as mesmas em todos os ensaios.

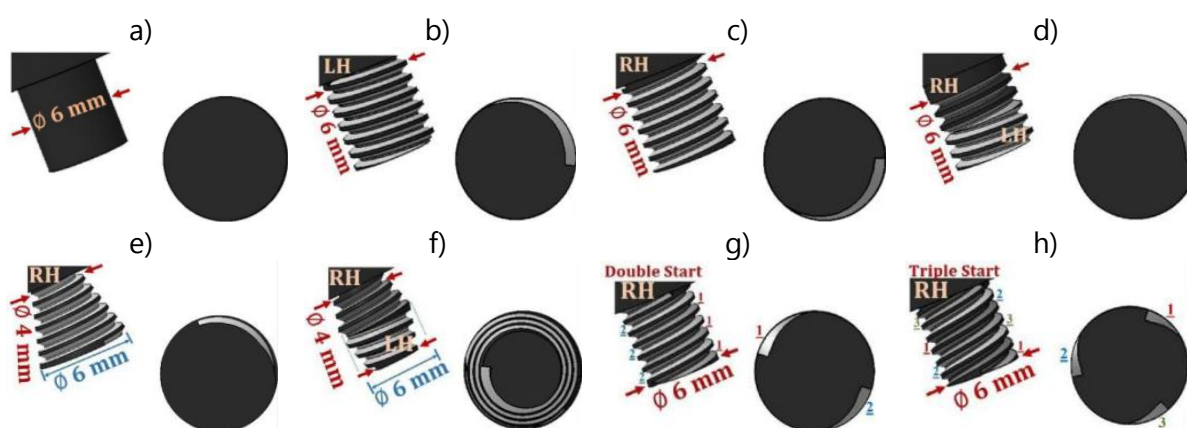


Figura 2.13 - Representação esquemática dos pinos utilizados, a) pino cilíndrico sem rosca, b) pino com rosca à esquerda, c) pino com rosca à direita, d) pino com rosca bidirecional e) pino cônico com rosca à direita, f) pino com rosca bidirecional em formato de diamante, g) pino com rosca à direita de duas entradas e h) pino com rosca à direita de três entradas, adaptado de [30].

Nesta pesquisa, a investigação da morfologia dos canais demonstrou que a geometria da ferramenta atua como um fator de modulação primário, influenciando tanto a topografia das superfícies internas quanto os padrões de fluxo de material.

Constatou-se uma significativa heterogeneidade na rugosidade, com valores mínimos nas paredes laterais e fundo dos canais e máximos no teto do canal, cuja magnitude é diretamente impactada pelo desenho da ferramenta.

Referente ao fluxo de material extraído, as ferramentas com 2 e 3 entradas de rosas, obtiveram melhor resultado, sendo que, com a ferramenta com 3 entradas de rosca, a perda de carga de fluxo foi menor. A ferramenta com rosca bidirecional, em relação à taxa de transferência de calor, obteve o melhor desempenho.

Segundo os autores, a ferramenta em formato de diamante com rosca bidirecional obteve os melhores resultados em comparação com as demais no quesito de fluxo e resistência térmica.

Na avaliação dos perfis de rugosidade interna dos canais, realizadas por Vidal et al [31], inferiu-se uma correlação entre a geometria da rosca do pino da ferramenta e a topografia das superfícies internas. Observou-se que a rugosidade dos lados de avanço e de retrocesso é modulada pelo perfil da rosca, com indicativos de que um aumento no passo desta resulta em uma superfície mais lisa. Dentre as superfícies analisadas, verificou-se que o teto do canal consistentemente representa a região de maior rugosidade.

Observou-se, que a variação dos parâmetros de velocidade de rotação (ω) e velocidade de avanço (v) ocorre em todos os trabalhos pesquisados e que exerce influência direta sobre o canal obtido. Dessa forma, a combinação adequada de ω e v representa não apenas o primeiro passo, mas também o fator mais determinante para o sucesso de qualquer pesquisa na área, uma vez que controla a obtenção de canais contínuos e regulares, define sua geometria, regula o aporte térmico induzido no processo e condiciona a rugosidade interna das paredes [2], [6], [12], [13], [16], [17], [19], [21], [23], [24], entre outros.

2.3.2 Estudos termográficos do processo *Friction Stir Channeling*

O estudo da termografia no processo *FSC* já é estudado por vários autores.

Mzad, H. em 2015 [32] propôs uma forma de determinação simples e precisa do fluxo de calor variável ao longo do tempo na interface peça-ferramenta de três metais diferentes sob condições de corte conhecidas por meio de modelos matemáticos para validar dados de aquisição durante o processo.

A determinação do fluxo térmico instantâneo é realizada a partir dos registros de temperatura superficial, mediante a aplicação da solução da equação de condução de calor para um meio sólido semi infinito. O fluxo de calor na superfície é, então, quantificado pela utilização da solução analítica unidimensional para uma variação de temperatura em degrau, em conjunto com a aplicação da integral de superposição de Duhamel.

Uma investigação sobre a dinâmica temporal do fluxo térmico em ferramentas de corte foi conduzida por Kryzhanivskyy, V. (2018), por meio de uma abordagem baseada em problemas inversos de condução de calor. O autor desenvolveu um método de regularização em duas etapas que transforma o problema matematicamente não tão bem definido em um sistema estável de estimação de parâmetros. Com base em dados experimentais obtidos em

ensaios de usinagem a seco e na subsequente análise comparativa de modelos, o estudo estabeleceu que a evolução temporal do fluxo de calor é representada com maior acurácia por uma função de potência decrescente [33].

Em 2019, Karvinen et al [34], investigaram a eficiência térmica e propriedades físicas do *FSC* aplicada à liga AA5083, constatando melhoria da transferência de calor em cerca de 45% em comparação com canais fresados mais lisos, evidenciando que o *FSC* promove a obtenção de um acabamento superficial com rugosidade significativamente mais elevada..

No domínio da análise termo fluidodinâmica, a topografia superficial mais acentuada dos canais fabricados por *FSC* demonstrou ser responsável por uma potencialização de 45% na capacidade de dissipação de potência térmica sob regime de escoamento turbulento de ar. Contudo, tal característica implicou um ônus no desempenho hidráulico, manifestado por um aumento de aproximadamente 36% na perda de carga do sistema.

Sarkar et al, em 2023 [35], investigaram experimentalmente a morfologia e topografia superficial de canais produzidos por canalização por fricção e mistura (*FSC*), em função da folga ferramenta-peça (0,8 e 1,2 mm) em distintos regimes de aporte térmico.

Os resultados revelaram uma forte interdependência entre os parâmetros de processo, de modo que a integridade morfológica do canal é condicionada pela sua interação sinérgica.

Notavelmente, a maior folga (1,2 mm), que conduziu a uma formação defeituosa sob baixo aporte térmico, mostrou-se um parâmetro ótimo para a formação de canais com maiores dimensões geométricas sob condições de alta energia.

Significando portanto, que o ajuste sinérgico da folga e do aporte energético é um requisito fundamental para a engenharia de canais com características otimizadas, visando aplicações em sistemas de gerenciamento térmico.

Segundo a pesquisa realizada por Afzal et al (2022), constata-se a consolidada versatilidade dos microcanais, com aplicações de maior relevância e potencial nos campos de gerenciamento térmico, detecção de radiação e integração de sistemas biomédicos. A contínua demanda por dissipação térmica otimizada impulsiona sua implementação em larga escala no presente e futuro próximo. Prospectivamente, a transição para matrizes energéticas limpas, como a nuclear (fissão e fusão), posiciona os microcanais como tecnologia central para a detecção de radiação em escala industrial. Adicionalmente, no setor biomédico, desempenham papel fundamental no desenvolvimento de sistemas avançados de liberação de fármacos e nanodispositivos para terapias direcionadas a doenças complexas [11].

Portanto, os microcanais serão significativamente importantes em diferentes aspectos desses subcampos de pesquisa.

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DAS FERRAMENTAS

Segundo o que foi proposto por Kandlikar e Grande [36], a classificação dos canais foi feita com base no diâmetro hidráulico (D_h), apresentado na equação 3.1, que corresponde ao diâmetro equivalente de uma geometria não circular. A Tabela 3.1 apresenta as definições propostas, onde, supostamente, 1; 2; e 3 são possíveis de ser produzidas por *FSC*:

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad \text{equação 3.1}$$

Onde: " D_h " é o diâmetro hidráulico; " A " é a área da seção transversal e " P " é o perímetro.

Tabela 3.1 - Classificação dos canais, segundo o D_h - adaptado de [4].

1 - Canais convencionais	$D_h > 3 \text{ mm}$
2 - Minicanais	$3 \text{ mm} \geq D_h > 200 \text{ }\mu\text{m}$
3 - Microcanais	$200 \text{ }\mu\text{m} \geq D_h > 10 \text{ }\mu\text{m}$
4 - Canais de transição	$10 \text{ }\mu\text{m} \geq D_h > 0,1 \text{ }\mu\text{m}$
5 - Microcanais de transição	$10 \text{ }\mu\text{m} \geq D_h > 1 \text{ }\mu\text{m}$
6 - Nanocanais de transição	$1 \text{ }\mu\text{m} \geq D_h > 0,1 \text{ }\mu\text{m}$
7 - Nanocanais moleculares	$0,1 \text{ }\mu\text{m} \geq D_h$

Em estudos realizados em macro escala, a menor ferramenta utilizada na bibliografia pesquisada foi de 5 mm de diâmetro. Analogamente ao processo de furação, em que para furos de menor diâmetro são utilizadas ferramentas menores, também no processo de *FSC*, para canais de menor dimensão deve ser utilizadas ferramentas menores.

Como o objetivo desta pesquisa é determinar o limite tecnológico do *FSC* em relação ao menor canal contínuo e regular capaz de ser produzido, para a realização dos ensaios, foram projetadas e construídas ferramentas especiais exclusivas para o processo, com pinos de diâmetros de 2 mm e/ou menores, pois assim como para outras dimensões, não há nenhuma ferramenta disponível para aquisição.

As ferramentas desenvolvidas foram muito importantes pois sua utilização se deu tanto para a fabricação dos pinos roscados, como também para a execução do processo *FSC*.

Estas ferramentas estão nominadas como "Ferramentas I", utilizadas nos ensaios onde foram feitos os ensaios preliminares; "Ferramentas II", utilizadas nos ensaios dos minicanais em equipamentos a CNC, com diâmetros de pinos de 0,5 mm a 2,0 mm e "Ferramentas III", utilizadas nos ensaios dos microcanais, também utilizadas em equipamentos a CNC, com diâmetros de pinos de 0,20 mm a 0,45 mm.

3.1 Ferramentas I - para os ensaios preliminares

Para o corpo das ferramentas utilizadas nos ensaios preliminares, foram projetadas ferramentas construídas em aço AISI O1[37], devido as suas características de resistência ao desgaste, boa maquinabilidade e temperabilidade.

O corpo da ferramenta foi projetado com diâmetro externo de 15 mm, com um rebaixo na ponta que funciona como "*shoulder*", tendo 5 mm de comprimento e diâmetro 3 mm maior que o diâmetro do pino roscado.

Internamente, têm um furo roscado na medida do pino e outro furo roscado com rosca M5 que funciona como contraforte para a localização e fixação do pino roscado e ainda um furo de alívio com diâmetro de 6 mm para facilitar a execução da rosca M5 e possibilitar a regulagem da altura do pino.

Após a usinagem, a ponta da ferramenta foi temperada e revenida com dureza de 56 a 58 HRC.

Para os pinos roscados, foram utilizados parafusos M2 e M1,6 DIN 912, classe 12.9 e parafuso M1 inox, classe C2 DIN 912. A opção de utilizar parafusos como pinos para as ferramentas, se deu pela facilidade de encontrá-los facilmente em lojas especializadas, pois são utilizados no dia a dia das indústrias. A Figura 3.1 apresenta a ferramenta preliminar montada.

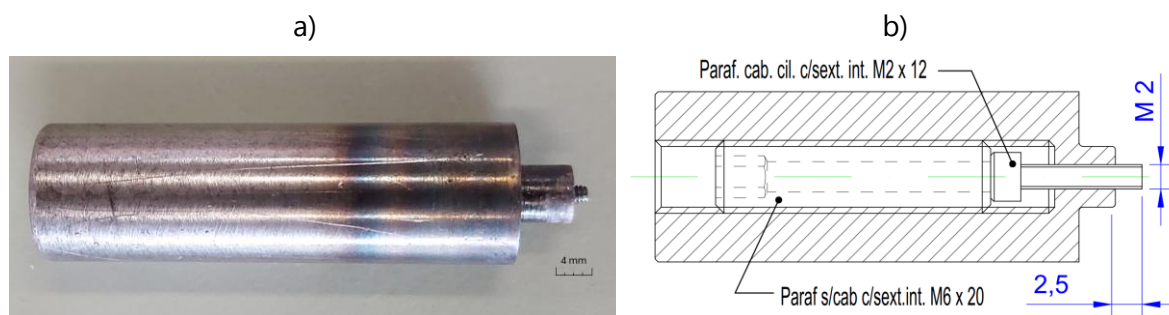


Figura 3.1 — a) Ferramenta preliminar montada (ϕ do pino roscado = 2,0 mm); b) esquema de montagem.

3.2 Ferramentas II - para execução de Mini Canais.

Não são fabricados e, tampouco comercializados parafusos com resistência mecânica classe 12.9 suficiente para a realização dos ensaios de *FSC* com rosca M1 ou menores e devido a esta dificuldade e, para dar prosseguimento aos ensaios, foi necessário desenvolver e fabricar novas ferramentas para atender os requisitos de resistência mecânica dos pinos roscados nos minicanais.

Optou-se por fazer ferramentas com pinos nos diâmetros de 2,0 mm; 1,6 mm; 1,4 mm; 1,2 mm; 1,0 mm devido a serem diâmetros de roscas normalizadas; e outras com diâmetro de 0,9 mm; 0,8 mm; 0,7 mm; 0,6 mm e 0,5 mm, que não são roscas normalizadas para testar o funcionamento de abertura de canais com essas dimensões.

As ferramentas são compostas por um corpo cilíndrico, pinça para fixação, Pino roscado, parafuso de fixação e parafuso de localização e funcionam como pinças invertidas, onde a fixação se dá por força de compressão entre a pinça e o furo de alojamento da pinça com terminação cônica. Devido a força de compressão realizada pelo parafuso de fixação, a pinça se fecha na ponta, fixando o pino roscado na posição e centralização desejados, Figura 3.2.

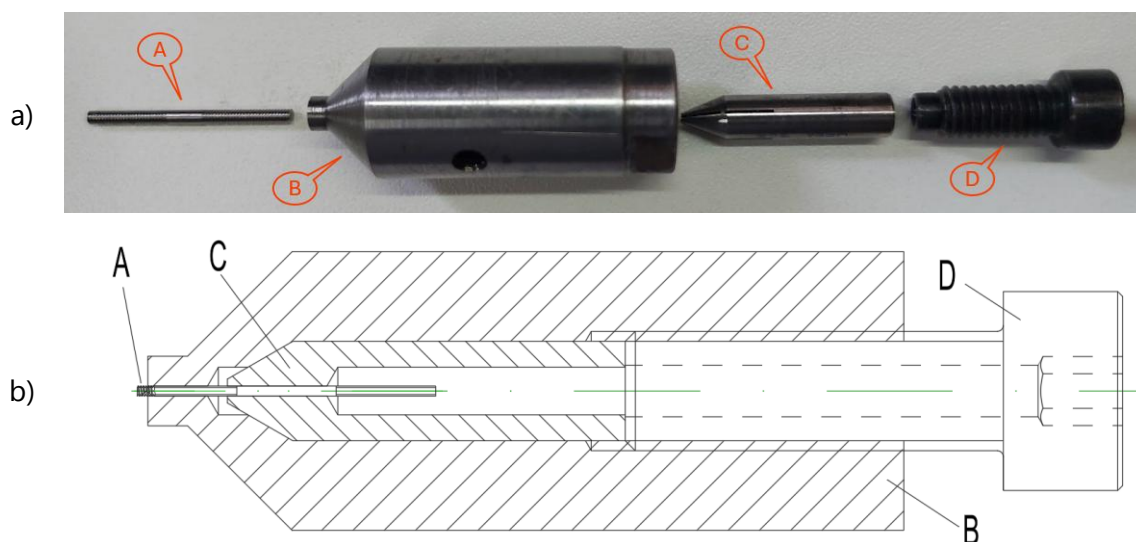


Figura 3.2 — a) Ferramenta II - em sequência de montagem: A - pino roscado; B- corpo da ferramenta; C – pinça de centralização e fixação do pino roscado e D – parafuso de fixação, b) esquema de montagem da ferramenta.

3.2.1 Corpo da ferramenta

Os corpos das novas ferramentas foram fabricados com aço EN 102 Cr6 (SAE 52100) , temperados com dureza de 56 a 58 HRC e retificados com diâmetro externo de 14 g6, com ponta cônica de 45° (para facilitar a visualização durante o ensaio), terminando com rebaixo de 2 mm de comprimento e diâmetro externo 3 mm maior que o diâmetro do pino roscado (*shoulder*).

Os diâmetros dos furos para alojar os pinos roscados foram executados com tolerância de concentricidade em relação ao eixo de simetria de 0,01 mm e com tolerância geométrica H6 e foram feitos nos diâmetros de 2,0 mm; 1,6 mm; 1,4 mm; 1,2 mm; 1,0 mm; 0,9 mm; 0,8 mm; 0,7 mm; 0,6 mm e 0,5 mm.

Os furos para alojamento das pinças foram fabricados com tolerância H7 com diâmetros de 6 mm para pinças de 1,0 mm até 2,0 mm e, furos de 5 mm para os diâmetros menores que 1 mm e, no final do furo em ambas as medidas, um furo cônico com 22,5° de inclinação.

As roscas de fixação foram fabricadas com a medida M8 x 1mm para os corpos com pinças de diâmetro 6 H7 e M6 x 1 mm para os corpos com pinças de 5 H7.

Ainda têm um furo roscado M3 passante, transversal ao eixo de simetria para o alojamento de parafuso M3 x 4 mm (DIN 913) para o posicionamento correto da pinça em relação ao corpo da ferramenta, conforme apresentado na Figura 3.3.

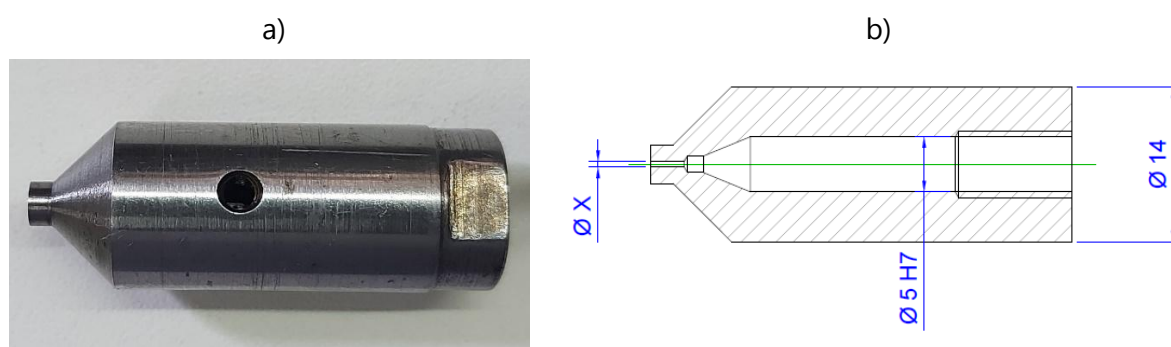


Figura 3.3 — Corpo da ferramenta: a) ferramenta, b) desenho esquemático para ferramentas de 0,5 mm a 1,0 mm

3.2.2 Pinças de fixação.

As pinças foram fabricadas em aço M2 , temperadas e retificadas, com tolerância geométrica dos furos H6 e diâmetros externos com tolerância g6 e obedeceram às mesmas medidas dos pinos, ou seja: para o diâmetro externo de 6 g6, foram feitos os furos de 2,0 mm; 1,6 mm; 1,4 mm; 1,2 mm e para os diâmetros externos de 5 g6, furos de 1,0 mm; 0,9 mm; 0,8 mm; 0,7 mm; 0,6 mm e 0,5 mm.

Nas pontas das pinças, os ângulos foram retificados com 22,5° de inclinação para dar centralização e fazer a fixação dos pinos.

Além do furo para alojamento e fixação dos pinos, as pinças tiveram furos com diâmetro de 2,5 mm para alívio e facilitar a localização e fixação dos pinos.

Também foram feitos cortes transversais, no sentido do eixo de simetria para a fixação dos pinos, como apresentado nas figuras 3.4.

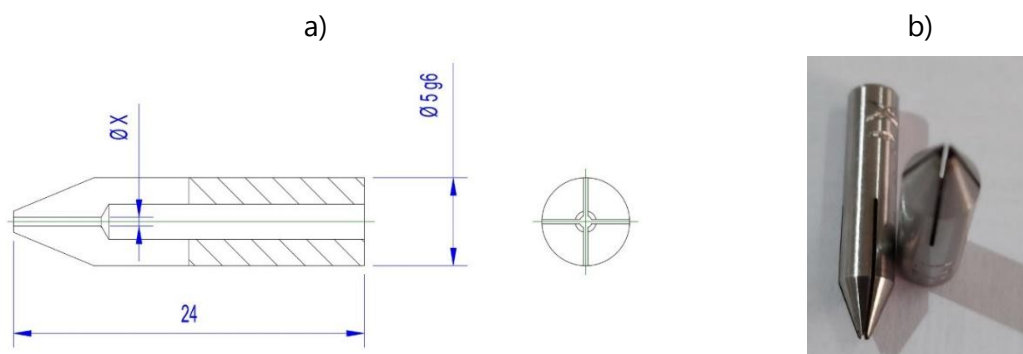


Figura 3.4 — a) desenho esquemático da pinça da ferramenta; b) pinça da ferramenta.

3.2.3 Pinos roscados.

Os pinos roscados foram fabricados com aço M2 [39], temperados e retificados e as roscas dos pinos foram realizadas por processo de retificação.

A escolha do material dos pinos roscados se deu em função de que a liga de aço M2, após tratamento térmico de tempera, tem excelente resistência ao desgaste, boa resistência ao trabalho a quente e boa resistência mecânica.

O material da liga de aço M2, utilizado na fabricação dos pinos roscados, foi retirado de brocas helicoidais DIN 338, fabricadas em aço M2, devido a já estarem tratados termicamente, estarem retificados e terem dimensões precisas em relação ao diâmetro. Retirou-se e descartou-se a parte helicoidal das brocas, utilizando somente a haste, que ficou com comprimento

suficiente para a fabricação dos pinos roscados. A utilização de brocas DIN 338 economizou muito tempo e etapas de processamento que seriam necessários para a fabricação dos pinos e com isso, diminuiu o custo de produção dos pinos roscados.

As medidas externas dos pinos roscados obedeceram às mesmas medidas do corpo e das pinças, ou seja: 2,0 mm; 1,6 mm; 1,4 mm; 1,2 mm; 1,0 mm; 0,9 mm; 0,8 mm; 0,7 mm; 0,6 mm e 0,5 mm, conforme apresentado na Figura 3.5.

As roscas dos pinos foram projetadas com perfil dente de serra especial, com rosca à direita, tendo uma inclinação de 10° em relação à perpendicular do eixo de simetria e com ângulo de flanco de 45° para que o diâmetro do núcleo da rosca tivesse o mesmo diâmetro da rosca métrica normalizada e com comprimento de pelo menos 5 vezes o diâmetro das roscas para que, se quebrassem durante o processo, pudessem ser reaproveitadas normalizando a ponta do pino roscado e regulando novamente sua altura, apresentados na Figura 3.5.

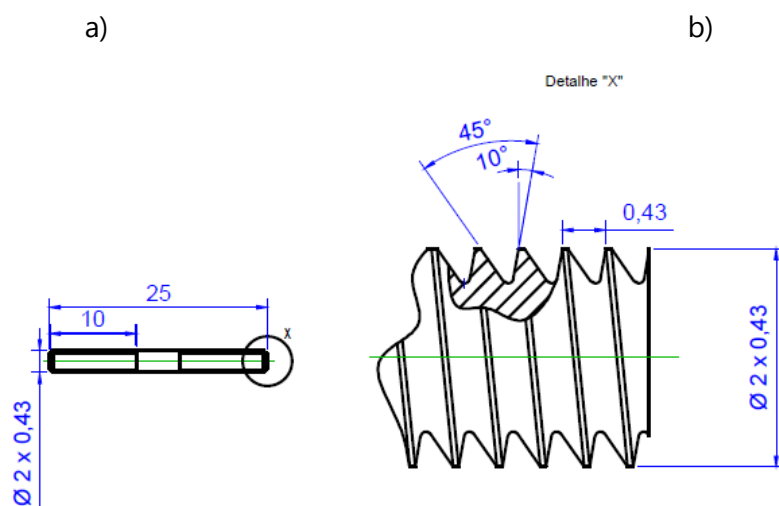


Figura 3.5 – a) Pino roscado 2 mm; b) detalhe do perfil da rosca.

Esta configuração do perfil de rosca teve como objetivo extrair o máximo possível de material à superfície da peça de trabalho e foi inspirada no design das brocas "Trado" para perfuração de solo, conforme apresentado na Figura 3.6.

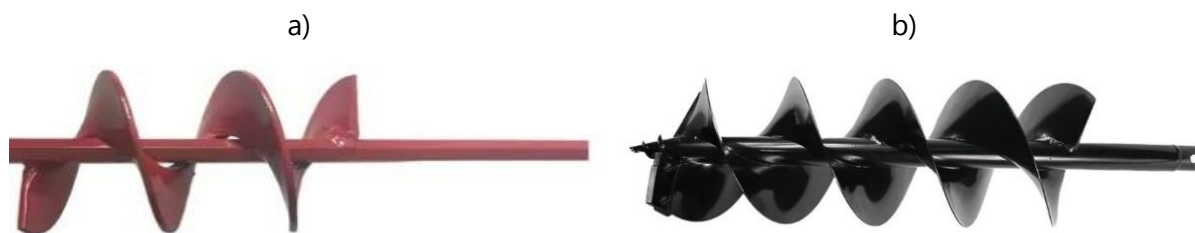


Figura 3.6 – Broca "Trado" para perfurar solo - a) com uma entrada, b) com 2 entradas.

Na maioria dos estudos anteriores, foram utilizados pinos roscados com perfil de rosca do tipo trapezoidal, que tem ângulo de flanco da rosca com 30°.

Nesta pesquisa, foram utilizados parafusos com rosca métrica nos ensaios preliminares e foi realizada uma comparação dos resultados obtidos entre o perfil da rosca métrica (triangular com 60°) e da rosca com perfil dente de serra, sendo que, com a utilização dos mesmos parâmetros, o perfil de dente de serra obteve canais com maior área e consequentemente, maior diâmetro hidráulico.

Não foram construídas ferramentas com perfil de dente de serra com ângulos diferentes (por exemplo 60°) devido ao alto custo de produção destes pinos.

Foram fabricados também pinos de 1 mm e 2 mm com 2 entradas e 3 entradas conforme apresentado na Figura 3.7 e Tabela 3.1 com as especificações das roscas.

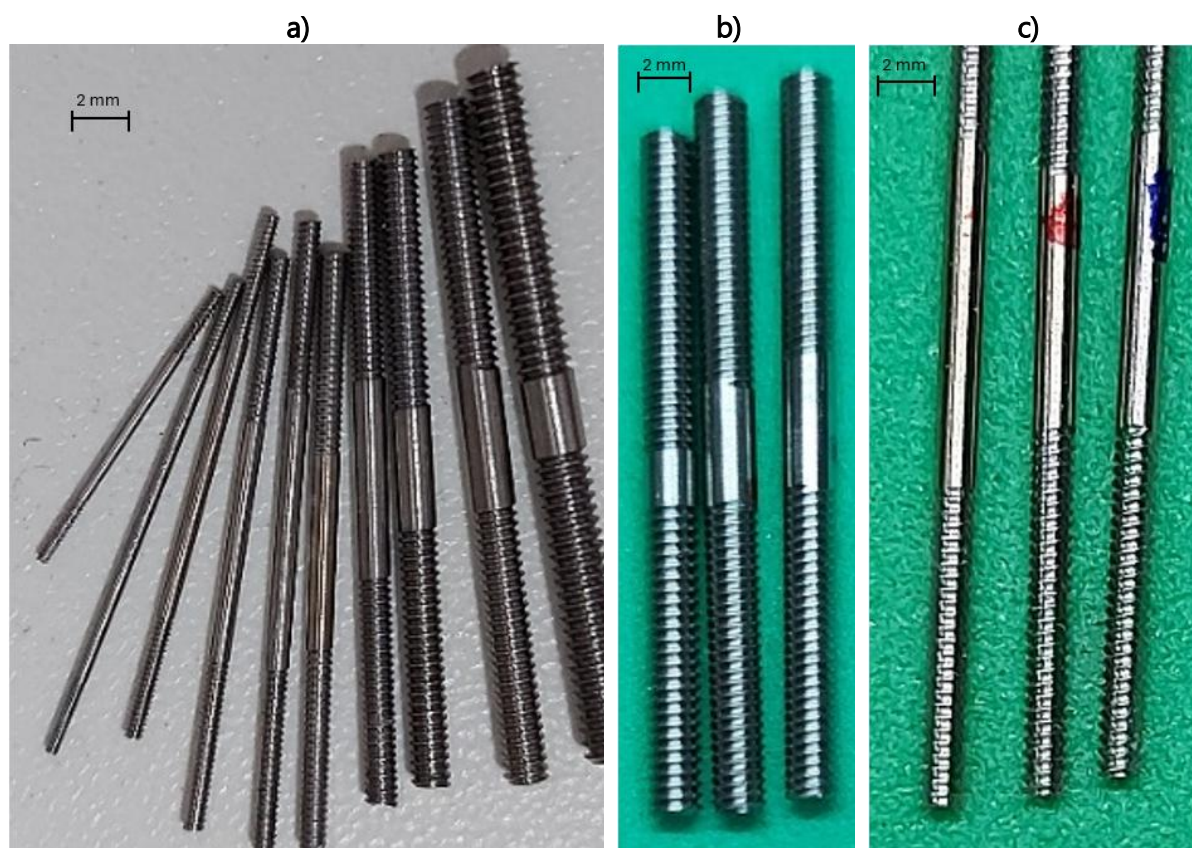


Figura 3.7 - a) Pinos roscados de 0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8 - 0,9 - 1,0 - 1,2 - 1,4 - 1,6 e 2,0 mm, (da esquerda para a direita) respectivamente; b) pinos roscados de 2,0 com 1, 2 e 3 entradas e, c) pinos roscados de 1,0 mm com 1, 2 e 3 entradas.

As dimensões dos pinos roscados, tais como diâmetro, passo da rosca e diâmetro do núcleo, podem ser vistas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Tabela de especificações das roscas para minicanais.

ID	Nº de entradas	ϕ do pino (mm)	Passo da rosca (mm)	Altura do filete (mm)	ϕ do <i>shoulder</i> (mm)	Compr. roscado (mm)
MC 0,5	1	0,50	0,13	0,075	3,50	3,5
MC 0,6		0,60	0,15	0,080	3,60	
MC 0,7		0,70	0,17	0,085	3,70	
MC 0,8		0,80	0,20	0,100	3,80	5
MC 0,9		0,90	0,23	0,115	3,90	
MC 1,0		1,00	0,25			
MC 1,0-2E	2	1,00	0,50	0,125	4,00	7
MC 1,0-3E	3	1,00	0,75			
MC 1,2	1	1,20	0,25	0,130	4,20	8
MC 1,4		1,40	0,30	0,150	4,40	8
MC 1,6		1,60	0,35	0,180	4,60	10
MC 2,0		2,00	0,43	0,220		
MC 2,0-2E	2	2,00	0,80	0,250	5,00	12
MC 2,0-3E	3	2,00	1,20			

No processo de fabricação dos pinos roscados foi necessário utilizar o corpo da ferramenta com o pino montado, de forma a possibilitar o rosqueamento dentro de critérios rígidos de geometria de forma e posição para minimizar possíveis esforços desnecessários e garantir o bom funcionamento quando do processamento dos minicanais, conforme apresentado na Figura 3.8.

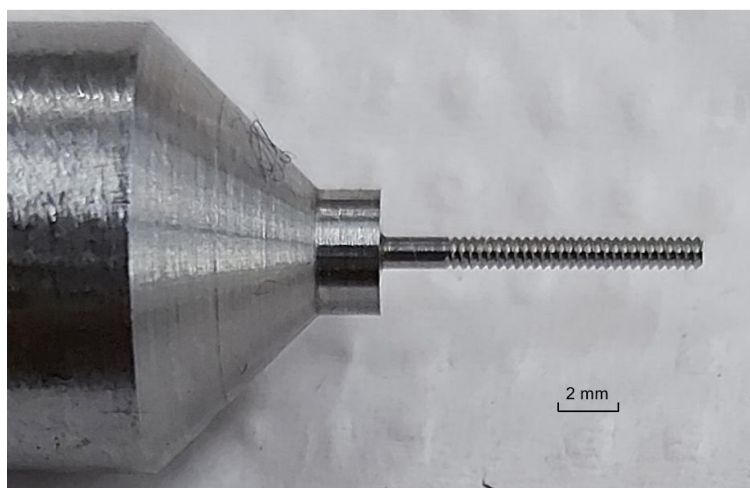


Figura 3.8 - Pino roscado MC 1,0 3E - ϕ 1 mm - 3 entradas.

3.2.4 Parafusos de fixação.

Os parafusos de fixação (DIN 912) foram furados com furos passantes em direção ao eixo de simetria com diâmetro de 2,5 mm para facilitar a remoção ou posicionamento e

regulagem da altura dos pinos e tiveram suas pontas rebaixadas com diâmetro 0,5 mm menor que o diâmetro do fundo da rosca e com 1,5 mm de comprimento. As faces das pontas foram retificadas para garantir a perpendicularidade em relação ao eixo de simetria do parafuso, Figura 3.9.

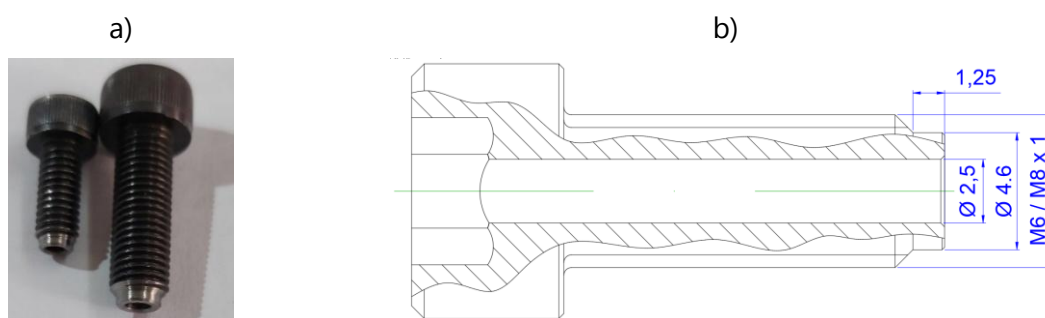


Figura 3.9 — a) Parafusos de fixação, b) desenho esquemático.

3.2.5 Parafusos de localização.

Os parafusos de localização foram projetados para garantir a correta localização da pinça em relação ao corpo, devido ao fato de que a usinagem final dos furos do corpo e da pinça deve ser realizada com o conjunto montado (corpo + pinça + parafuso de fixação) para garantir a concentricidade entre as peças.

Estes parafusos do tipo sem cabeça com sextavado interno (DIN 913), Figura 3.10, têm a rosca M3 x 4 mm e são rebaixados na ponta com 1,5 mm de diâmetro e 1,5 mm de comprimento. Esta ponta se aloja em furo não passante na pinça, confeccionado depois da usinagem do furo com o conjunto montado.

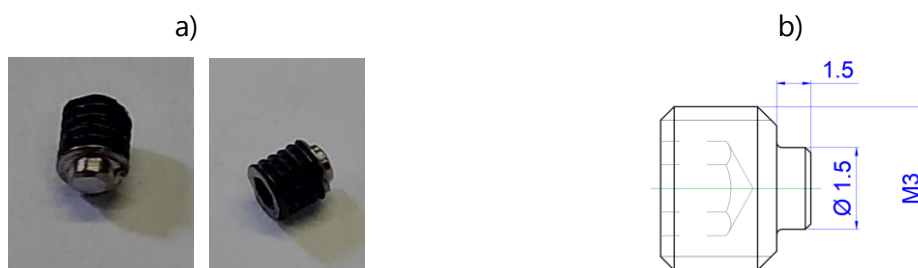


Figura 3.10 — a) Parafuso de localização, b) desenho esquemático.

3.3 Ferramentas III - para execução de Microcanaís

Houve necessidade de se projetar e produzir ferramentas com diâmetros menores para tentar chegar ao limite de processo e, para tanto, foram projetadas e desenvolvidas ferramentas para trabalhar com pinos menores que 0,5 mm.

Desta forma, as novas ferramentas têm o diâmetro do pino roscado nas medidas de 0,45 mm; 0,40 mm; 0,35 mm; 0,30 mm; 0,25 mm e 0,20 mm. Estas ferramentas têm o mesmo conceito de funcionamento das ferramentas anteriores, com um corpo cilíndrico, pinça para fixação, pino roscado, parafuso de fixação e parafuso de localização e funcionam como pinças invertidas, conforme apresentadas nas figuras 3.11 e 3.12.



Figura 3.11 - Ferramentas montadas sem os pinos roscados (da esquerda para a direita), com diâmetros nas medidas de 0,20 - 0,25 - 0,30 - 0,35 - 0,40 e 0,45 mm.

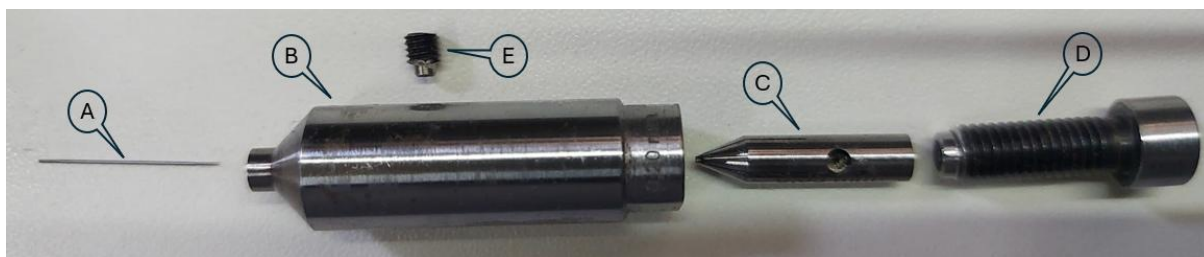


Figura 3.12 - Ferramenta para microcanais (0,20 mm) em sequência de montagem: A – pino roscado; B – corpo da ferramenta; C – pinça da ferramenta; D – parafuso de fixação; E – parafuso de localização.

3.3.1 Corpo da ferramenta.

Os corpos das novas ferramentas também foram fabricados com EN 102 Cr6 (SAE 52100) [40], temperados com dureza de 56 a 58 HRC e retificados com diâmetro externo de 10 g6, com ponta cônica de 45° (para facilitar a visualização durante o ensaio), terminando com rebaixo de 2 mm de comprimento e diâmetro externo 3 mm maior que o diâmetro do pino roscado.

Da mesma forma, os diâmetros dos furos para alojar os pinos roscados foram executados com tolerância de concentricidade em relação ao eixo de simetria de 0,01 mm e com tolerância geométrica H6 e foram feitos nas medidas de 0,45 mm; 0,40 mm; 0,35 mm; 0,30 mm; 0,25 mm e 0,20 mm.

Os furos para alojamento das pinças foram fabricados com tolerância H7 com diâmetros de 4 mm para todas as pinças e no final do furo, um furo cônico com 22,5° de inclinação.

As roscas de fixação foram fabricadas com a medida M5 x 0,8mm para todos os corpos.

Também têm um furo roscado M3 passante, transversal ao eixo de simetria para o alojamento de parafuso M3 x 4 mm (DIN 913) para o posicionamento correto da pinça em relação ao corpo da ferramenta, conforme Figura 3.13.

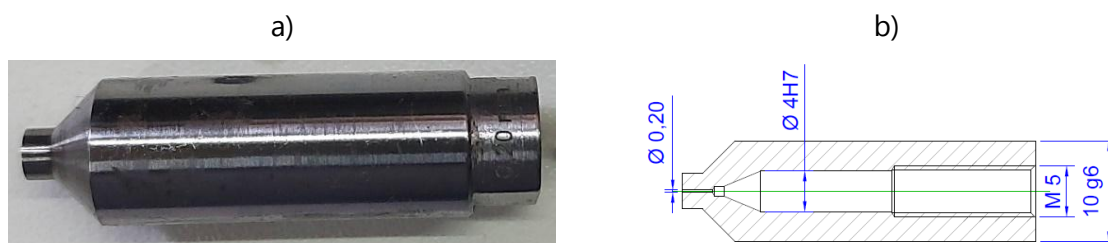


Figura 3.13 — a) Corpo da ferramenta para microcanais; b) desenho esquemático.

3.3.2 Pinças de fixação.

As novas pinças também foram fabricadas em aço M2 [39], temperadas e retificadas, com diâmetros externos 4 g6 e tolerância geométrica H6 nos furos para alojamento dos pinos roscados e obedeceram às mesmas medidas dos pinos, ou seja: nas medidas de 0,45 mm; 0,40 mm; 0,35 mm; 0,30 mm; 0,25 mm e 0,20 mm, conforme Figura 3.14.

Nas pontas das pinças, foram retificados os ângulos para a centralização e fixação dos pinos, com 22,5° de inclinação.

Além do furo para alojamento e fixação dos pinos, foram executados furos com diâmetro de 1,0 mm para alívio e facilitar a localização e fixação dos pinos.

Também foram feitos cortes transversais, no sentido do eixo de simetria para a fixação dos pinos e têm um furo de 2 mm de diâmetro e 1 mm de profundidade para o posicionamento correto da pinça em relação ao corpo da ferramenta.

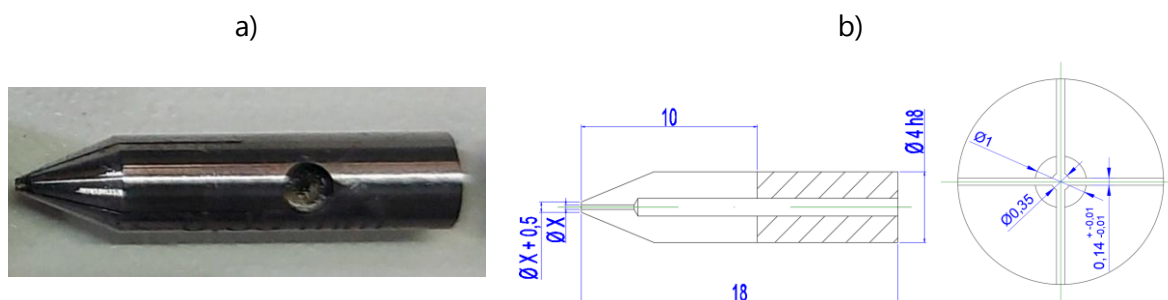


Figura 3.14 — a) Pinça da ferramenta para microcanaís, b) desenho esquemático.

3.3.3 Pinos roscados.

Os pinos roscados foram fabricados com aço M2 [39], temperados e retificados e as roscas dos pinos foram realizadas por processo de retificação.

As medidas externas dos pinos roscados obedeceram às mesmas medidas das pinças e corpo, ou seja: nas medidas de 0,45 mm; 0,40 mm; 0,35 mm; 0,30 mm; 0,25 mm e 0,20 mm, conforme Tabela 3.3.

As roscas dos pinos foram projetadas com comprimento de, pelo menos, 5 vezes o diâmetro das roscas, com perfil dente de serra especial, com inclinação de 10° em relação à perpendicular ao eixo de simetria e com ângulo de flanco de 60° e devem obedecer a tolerância de concentricidade em relação ao eixo de simetria do conjunto montado dentro de 0,01 mm, Figura 3.15.

O ângulo de flanco com 60° foi uma modificação em relação às ferramentas para minicanais, devido ao fato de que se observou um aumento na área da seção transversal dos canais.

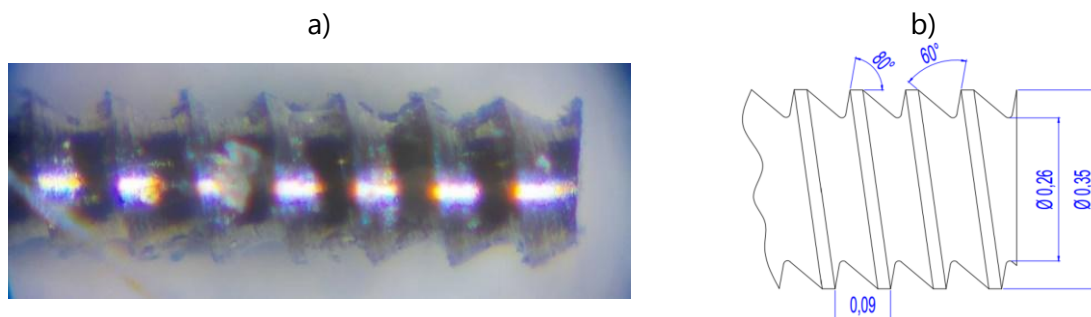


Figura 3.15 — a) Exemplo de pino roscado, b) Detalhe da rosca do pino ϕ 0,35 mm - rosca à direita.

Tabela 3.3 — Especificações das roscas e dados para a execução das roscas para microcanais - μFSC .

Identificação	Diâmetro da rosca Dente de serra 60° (mm)	Passo (mm)	Diâm. Núcleo (mm)	Altura do filete (mm)	Diâmetro do <i>shoulder</i> (mm)	Comprimento de rosca (mm)
μC 0,20	0,20	0,06	0,14	0,030	2,7	1,5
μC 0,25	0,25	0,07	0,18	0,035	2,8	2
μC 0,30	0,30	0,08	0,22	0,040	2,8	2,5
μC 0,35	0,35	0,09	0,26	0,045	2,9	2,5
μC 0,40	0,40	0,10	0,30	0,050	2,9	3
μC 0,45	0,45	0,12	0,33	0,060	3,0	4

3.3.4 Parafusos de fixação.

Os parafusos de fixação M5 x 0,8 (DIN 912) foram furados passantes em direção ao eixo de simetria com diâmetro de 1,5 mm para facilitar a remoção ou posicionamento dos pinos e tiveram suas pontas rebaixadas com diâmetro 0,5 mm menor que o diâmetro do fundo da rosca e com 1,5 mm de comprimento. As faces das pontas foram retificadas para garantir a perpendicularidade em relação ao eixo de simetria do parafuso, conforme Figura 3.16.

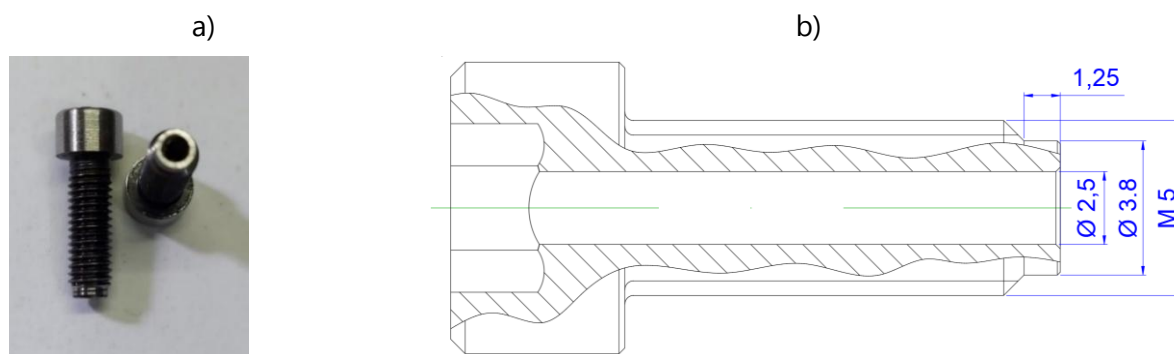


Figura 3.16 — a) Parafusos de fixação das ferramentas para microcanais, b) desenho esquemático.

3.3.5 Parafusos de localização

Os parafusos de localização foram projetados para garantir a correta localização da pinça em relação ao corpo, devido ao fato de que a usinagem final dos furos do corpo e da pinça deve ser realizada com o conjunto montado (corpo + pinça + parafuso de fixação) para garantir a concentricidade entre as peças.

Estes parafusos do tipo sem cabeça com sextavado interno (DIN 913) têm a rosca M3 x 4 mm e são rebaixados na ponta com 1,5 mm de diâmetro externo e 1,5 mm de comprimento. Esta ponta se aloja em furo não passante na pinça, confeccionado depois da usinagem do furo com o conjunto montado, conforme a Figura 3.17.

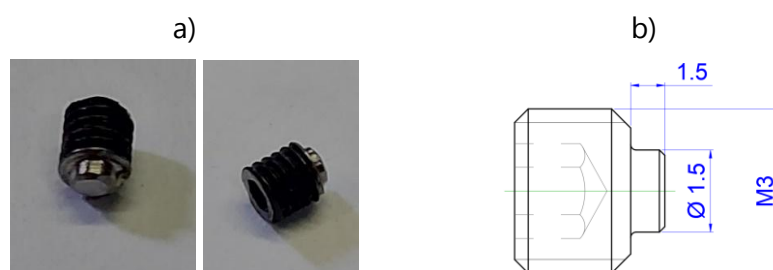


Figura 3.17 — a) Parafusos de localização das ferramentas para microcanais, b) desenho esquemático.

MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E APARATOS

Neste capítulo, são apresentados o material selecionado para a realização dos ensaios experimentais e a justificativa para sua escolha, como também os equipamentos, dispositivos e aparatos utilizados em cada equipamento, conforme as dificuldades foram verificadas e as situações de contorno adotadas.

Como referido anteriormente, os canais produzidos estão referenciados como: canais preliminares, minicanais e microcanais. Os canais preliminares são os que foram feitos com as primeiras ferramentas em fresadora convencional. Os minicanais são os em que foram utilizadas as Ferramentas II, com pinos roscados de 0,5 mm a 2,0 mm produzidos em centro de usinagem CNC e por fim, os microcanais são os produzidos com as Ferramentas III, com pinos roscados de 0,20 mm a 0,45 mm, também produzidos em centro de usinagem CNC.

4.1 Propriedades do material a processar

Foram levados em consideração para a escolha do material a ser processado, as características físicas, mecânicas e químicas, entender como poderiam afetar o desenvolvimento do processo e na posterior aplicabilidade dos canais desenvolvidos.

Em razão de que o processo *FSC* à microescala ainda não tinha sido estudado, segundo pesquisas em publicações científicas, foi necessário encontrar as melhores características entre as propriedades físicas e mecânicas, como também em relação a maquinabilidade do material a processar para garantir a integridade estrutural das ferramentas, haja vista que não poderíamos prever qual seria o comportamento dos pinos roscados em relação à resistência mecânica devido as suas pequenas dimensões.

Em relação à aplicabilidade do processo de fabricação de canais a microescala, uma das aplicações mais prováveis seria em trocadores de calor e por essa razão, a condutividade térmica foi um dos fatores que determinaram a escolha.

Também, optou-se por uma liga de alumínio comercial devido ao menor custo e sua a facilidade de aquisição.

Dentre as ligas existentes no mercado, a liga de alumínio escolhida foi a AW1050 - H111 pela sua boa ductilidade e maleabilidade, o que facilita o trabalho no estado sólido. Também, por ter a maior condutividade térmica entre as ligas de alumínio comerciais pesquisadas, favorece sua utilização em trocadores de calor, o que pode garantir maior eficiência térmica.

Após caracterização por fluorescência de raios X da liga AW1050 - H111, constatou-se que houve desvio na quantidade de Mg, pois o material continha 0,25% de Mg, conforme apresentado na tabela 4.1.

As tabelas 4.2 e 4.3 exibem as propriedades mecânicas* e físicas**, respectivamente.

Tabela 4.1 — Liga AW1050 - H111 - Composição química (% peso)

Elementos	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Min	-	-	-	-	-	-	-	-	99.3
Max	0.17 $\pm$ 0.01	0.26 $\pm$ 0.01	<0.004	<0.01	0.25 $\pm$ 0.02	<0.02	0.001	0.008	Resto

Tabela 4.2 — Liga AW1050 - H111 - Propriedades mecânicas* (EN 485 - 2)

Estado	Rm (MPa)		Rp 0.2 (mín) (MPa)	A50 (%)	HB – Dureza Brinell
	Mín.	Máx.			
H111 e H24	105	145	75	3 - 8	33

Onde:

Rm = resistência à tração;

Rp 0,2 = limite de elasticidade com 0,2% de deformação plástica;

A50 = Alongamento medido em um comprimento de 50 mm

Tabela 4.3 — Liga AW1050 - H111 - Propriedades físicas**

Propriedades físicas	Valores nominais
Densidade	2.70 g/cm ³
Módulo de Elasticidade	69000 MPa
Coeficiente de Dilatação Linear	23.5 10 ⁻⁶ /K
Condutividade Térmica	229 W/mK
Condutividade Elétrica	29 nΩ.m

* ; ** www.polylanema.pt/client/files/0000000001/aw1050fichatecnica_2193.pdf

4.2 Equipamentos utilizados

Para a realização dos experimentos, foram utilizados três equipamentos, a saber: Uma fresadora ferramenta convencional da marca Enrique Holke, um centro de usinagem da marca ROMI D 800 de fabricação brasileira e outro centro de usinagem da marca HAAS Super Mini Mill 2.

Fresadora convencional

Para a realização dos ensaios preliminares dos minicanais, foi utilizada uma fresadora ferramenta convencional de três eixos da marca Enrique Holke, Figura 4.1, com as Ferramentas I.

Este equipamento encontra-se disponível no Laboratório de Processamentos Mecânico de Materiais, do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Campus Caparica.



Figura 4.1 — Fresadora utilizada para os ensaios preliminares para minicanais.

O equipamento fornece uma gama limitada de rotações do eixo árvore, sendo: 450, 780, 1330 e 2440 rev/min.

Devido a ter o avanço controlado somente no eixo "X", movido por um redutor de velocidades, garante movimento automático com velocidades de avanço pré-definidas de 20, 30, 50, 75, 145, 220, 365 e 550 mm/min, detalhado na Figura 4.2.

A utilização deste equipamento ficou limitada a produzir canais em uma única trajetória.

Também possibilita a execução de canais pelo processo *MFSC*, pois o equipamento permite inclinação do cabeçote porta ferramentas em dois sentidos.

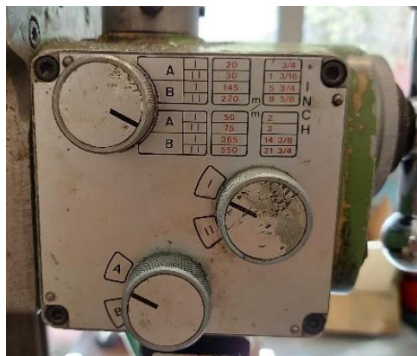


Figura 4.2 — Caixa de velocidades de avanço da fresadora utilizada para os ensaios preliminares para minicanais.

O processo de abertura de canais acima descrito está apresentado na Figura 4.3

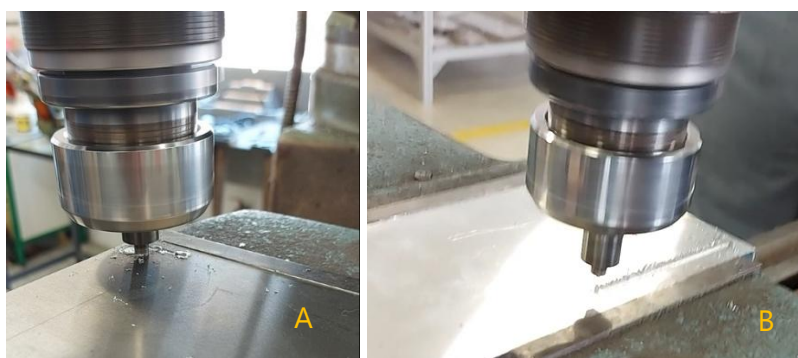


Figura 4.3 — Processamento dos minicanais na fresadora ferramenteira convencional (A - início e B - final do percurso).

Na produção dos canais preliminares, realizados em fresadora ferramenteira convencional, observou-se que houve um aquecimento excessivo do componente ao realizar o procedimento e também grande dificuldade de realizar o alinhamento do material a processar com o tipo de fixação inicialmente utilizado e, para resolver o problema, a chapa foi fixada em uma placa de aço fixada diretamente na mesa da máquina, com o objetivo de dissipar o calor gerado no processo e ficar alinhada com o eixo "Z" da máquina, conforme apresentado na Figura 4.4.

Com isso, visto a olho nu, o aspecto do canal produzido ficou muito melhor e foi possível realizar vários canais sucessivos sem a interferência do aquecimento excessivo da peça de trabalho e a ferramenta suportou bem todo o processamento.



Figura 4.4 — Dispositivo para fixação da chapa para dissipação de calor.

Centro de usinagem ROMI D800

Para os ensaios de mini canais com as Ferramentas II, foi utilizado, inicialmente no Brasil, um centro de usinagem CNC da marca Romi D 800, Figura 4.5. Este equipamento está alocado no IFSP - Instituto Federal de São Paulo, campus São Paulo, Brasil.

A utilização da máquina CNC, em comparação a uma fresadora convencional, permite controlar a rotação, posição e velocidade de avanço da ferramenta com bastante precisão, bem como realizar trajetórias lineares e/ou curvilíneas em um plano, além de permitir utilizar velocidades de avanço programável de qualquer valor até 20 m/min e rotações de qualquer valor entre 10 rev/min até o máximo de 10 000 rev/min.



Figura 4.5 — Centro de usinagem utilizado inicialmente para os ensaios para minicanais.

Como observado anteriormente no processamento dos canais preliminares, adotou-se a mesma solução para a dissipação de calor.

As chapas de alumínio para o processamento dos minicanais foram fixadas em um bloco de aço de 35 x 105 x 180 mm, para garantir a dissipação de calor durante o processamento, conforme Figura 4.6.



Figura 4.6 — Detalhe da fixação das chapas no dispositivo para os ensaios para minicanais.

A Figura 4.7 apresenta a placa de aço que foi fixada em uma morsa e foi feito o alinhamento com tolerância de 0,01 mm nos três eixos para garantir o maior paralelismo possível da chapa em relação ao eixo "Z" do equipamento.



Figura 4.7 — Detalhe da fixação do dispositivo no centro de usinagem com alguns minicanais.

Centro de usinagem HAAS Super mini Mill 2

Também foi utilizado um centro de usinagem CNC, Super Mini Mill 2, do fabricante Haas, de três eixos para os ensaios de minicanais (Ferramentas II e Ferramentas III) e microcanais, disponível na Figura 4.8.

Este equipamento também está alocado na UNL, campus Caparica, e permite utilizar velocidades de avanço programáveis de qualquer valor até 21,2 m/min e rotações de qualquer valor até o máximo de 10 000 rev/min[42].



Figura 4.8 — Centro de usinagem utilizado posteriormente para os ensaios para minicanais e microcanais.

Como observado anteriormente no processamento dos minicanais realizados no equipamento ROMI, adotou-se a mesma solução.

Foi utilizado, para fixação das chapas de alumínio, um bloco de aço retificado com dimensões de 35 mm x 180 mm x 220 mm com a finalidade de dissipar o calor gerado no processo e este bloco, foi fixado diretamente na mesa do equipamento, garantindo assim o paralelismo da peça de trabalho em relação ao eixo "Z" do equipamento, apresentado na Figura 4.9.

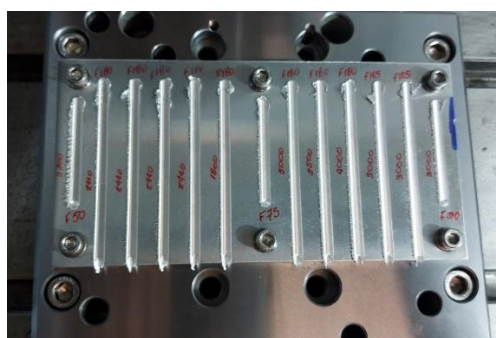


Figura 4.9 — Fixação do material a processar no centro de usinagem CNC.

4.3 Aparatos desenvolvidos

O comprimento dos pinos roscados foi controlado por meio de um dispositivo de medição que utiliza um relógio comparador com resolução de 0,01 mm, apresentado na Figura 4.10



Figura 4.10 — Dispositivo desenvolvido para medir o comprimento dos pinos

Para que as velocidades angulares fossem mantidas nas ferramentas III (execução de microcanais), adaptou-se um multiplicador de velocidades a razão de 5x que, com rotações no eixo árvore da máquina a CNC de 4.000 rev/mim, convertia em 20.000 rev/mim na ferramenta (máxima rotação permitida pelo multiplicador), conforme Figura 4.11.

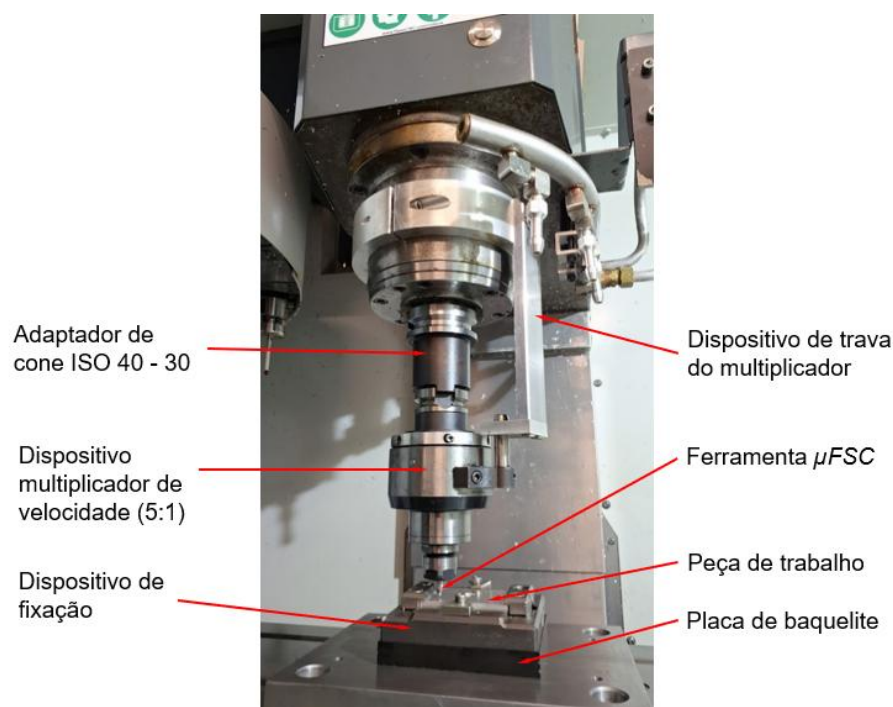


Figura 4.11 — Adaptação de multiplicador de velocidades no eixo árvore.

Para a utilização das Ferramentas III (microcanais), construiu-se um dispositivo de fixação e aquecimento da peça de trabalho, confeccionado em aço inox 304, com alojamento para uma resistência elétrica no formato placa de mica *Heating Pad*, com dimensões de 60 x 60 mm, potência de 100 W e com alojamento para um termopar tipo "K", cuja função era de controlar a temperatura do conjunto. Neste alojamento, com o termopar e a resistência montada, foi introduzido um isolamento parcial para acelerar o aquecimento do conjunto dispositivo de fixação e peça de trabalho, conforme a Figura 4.12.

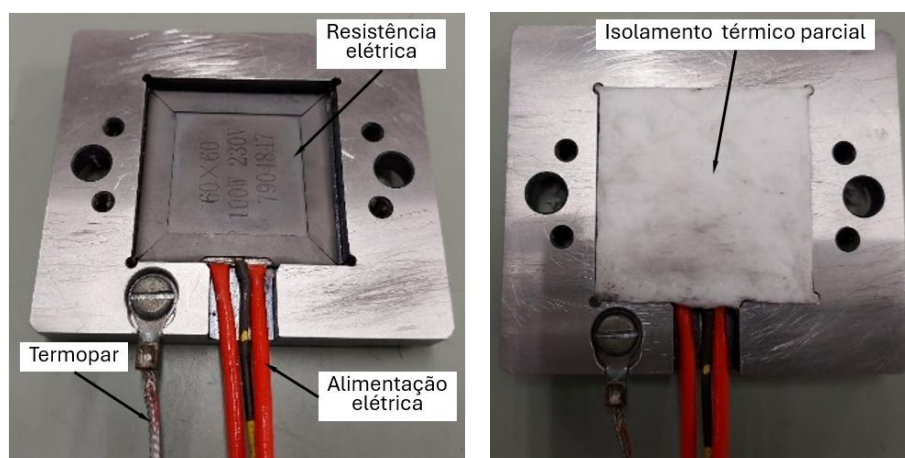


Figura 4.12 — Vista inferior do dispositivo de fixação da peça de trabalho, mostrando o alojamento da resistência elétrica e termopar (esquerda) e isolamento parcial (direita).

Sob o dispositivo de fixação da peça de trabalho, colocou-se uma placa de baquelite (fig. 4.11) para fazer o isolamento térmico do dispositivo com a placa de aço que faz a fixação na mesa da máquina, e sob esta última, colocou-se uma placa de mica para o isolamento com a mesa da máquina, conforme apresentado na fig. 4.14.

Tal isolamento se justifica na agilização do aquecimento do conjunto de fixação da peça de trabalho, o que diminui a dissipação de calor através do contato com o sistema de fixação diminuindo inclusive o demorado tempo necessário para se estabilizar a temperatura do conjunto, de modo a permitir a realização dos ensaios.

O dispositivo de fixação da peça de trabalho sofreu uma pré usinagem, deixando sobre metal somente na medida da espessura e rebaixo para alojamento da peça de trabalho e foi submetido a tratamentos térmicos sucessivos de recozimento e normalização, com o objetivo de que sua estrutura cristalina se estabilizasse e que, com as temperaturas de trabalho, ficasse "indeformável", supostamente. Após estes tratamentos térmicos, o dispositivo foi devidamente retificado na sua espessura para eliminar os empenamentos advindos do tratamento térmico, montado na máquina CNC.

Com o objetivo de se testar a temperatura de aquecimento mais apropriada da peça de trabalho durante o processamento na tentativa de se obter canais regulares e contínuos, utilizou-se um controlador da temperatura, mostrado na Figura 4.13

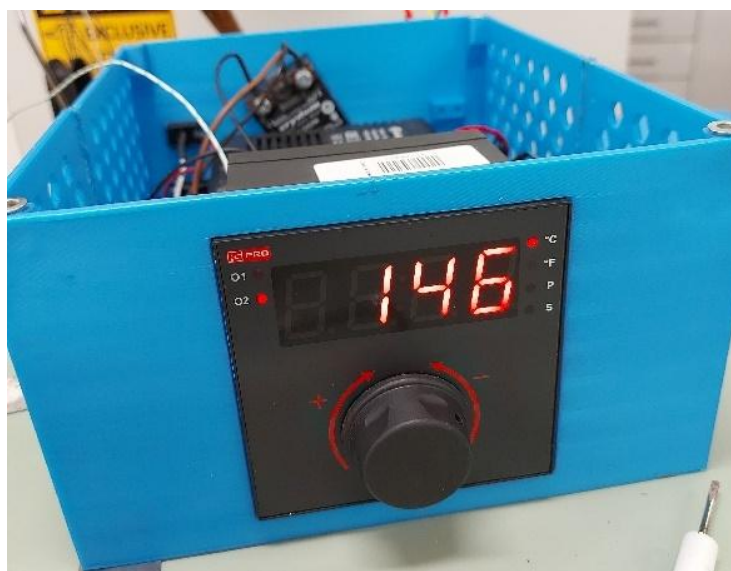


Figura 4.13 — Dispositivo de controle da temperatura de aquecimento do material a processar.

Depois de que o dispositivo de fixação foi montado na máquina CNC, foi submetido ao aquecimento até a estabilização da temperatura em 240 °C e deixado arrefecer por 3 vezes

consecutivas, sendo que após o 4º aquecimento estabilizar em 240 °C e mantida essa temperatura, foi feita a usinagem do rebaixo do alojamento da peça de trabalho por meio de uma ferramenta de faceamento para garantir o paralelismo perfeito entre a superfície da peça de trabalho e o eixo "Z" da máquina.

Neste dispositivo, a peça de trabalho ficou rigidamente fixada por meio de garras nas laterais e parafuso central. O objetivo deste tipo de fixação foi de restringir possíveis movimentações, deformações ou empenamentos durante o processamento, conforme mostra a Figura 4.14 e nota-se que a placa de baquelite foi substituída por uma placa de cerâmica, pois a placa de baquelite tem um coeficiente de expansão térmica muito maior que a cerâmica o que dificulta muito o estabelecimento da distância entre o *shoulder* e a peça de trabalho, haja vista que são distâncias muito pequenas.

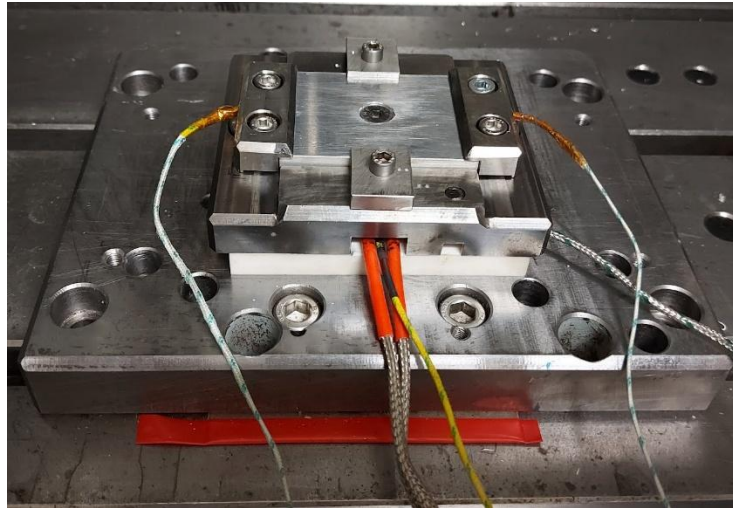


Figura 4.14 — Dispositivo de fixação e aquecimento do material a processar com isolamento térmico.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL, CARACTERIZAÇÕES E RESULTADOS

5.1 Procedimento experimental

Aqui serão descritos os procedimentos experimentais para a produção de canais na sequência em que foram realizados, conforme os equipamentos utilizados, denominando-os como: ensaios preliminares; ensaios de minicanais e por último, ensaios de microcanais, conforme Tabela 5.1.

Para a realização desta pesquisa, optou-se pela variante do *FSC with Shoulder Clearance* em todos os ensaios experimentais pois, pelo fato de que as ferramentas têm dimensões reduzidas, decidiu-se utilizar *shoulders* com base lisa e um espaçamento entre o *shoulder* e a superfície do material a processar, de forma a garantir o escoamento de material da região processada para a superfície da peça de trabalho.

Tabela 5.1 — Matriz de ensaios

	Objetivo	Parâmetros testados	Procedimento	Recursos	Testes de validação	Critérios de aceitação
Ensaios preliminares	Obter canais com o maior diâmetro hidráulico possível	• Velocidade de rotação [ω] • Velocidade de avanço [v] • Distância shoulder/peça de trabalho.	Variando apenas um dos parâmetros de cada vez, fazer a inserção do pino da ferramenta, deixando espaçamento entre o shoulder/peça, aguardar tempo de espera para amolecimento do material e prosseguir com avanço longitudinal.	• Chapa da liga AW1050 - H111, • Fresadora ferramenta convencional, • Ferramenta para canais preliminares, • Aparelho para medir comprimento dos pinos.	• Teste de continuidade, • Teste de estanqueidade,	Canais contínuos e regulares com o maior diâmetro hidráulico.

Ensaio de minicanais	Obter minicanais com o maior diâmetro hidráulico possível	• Velocidade de rotação ω • Velocidade de avanço v • Distância shoulder/peça de trabalho.	Variando apenas um dos parâmetros de cada vez, fazer a inserção do pino da ferramenta, deixando espaçamento entre o shoulder/peça, aguardar tempo de espera para amolecimento do material e prosseguir com avanço e trajetória programados.	• Chapa da liga AW1050 - H111, • Centro de usinagem a CNC, • Ferramenta para minicanais, • Aparelho para medir comprimento dos pinos.	• Teste de continuidade, • Teste de estanqueidade, • Microtomografia computadorizada de raios X, • Microtomografia computadorizada de neutrons, • Caracterização metalográfica por microscopia ótica.	Canais contínuos e regulares com o maior diâmetro hidráulico.
Ensaio de microcanais	Obter microcanais com o maior diâmetro hidráulico possível	• Velocidade de rotação ω • Velocidade de avanço v • Distância shoulder/peça de trabalho • Variar a temperatura da peça de trabalho.	Variando apenas um dos parâmetros de cada vez, fazer a inserção do pino da ferramenta, deixando espaçamento entre o shoulder/peça, aguardar tempo de espera para amolecimento do material e prosseguir com avanço e trajetória programados.	• Chapa da liga AW1050 - H111, • Centro de usinagem a CNC, • Ferramenta para microcanais, • Aparelho para medir comprimento dos pinos, • Aparelho para aquecimento da peça de trabalho.	• Microtomografia computadorizada de raios X, - Se detectado canais contínuos, realizar: • Caracterização metalográfica por microscopia ótica. • Teste de continuidade, • Teste de estanqueidade,	Canais contínuos e regulares com o maior diâmetro hidráulico.

5.1.1 Ensaio preliminares

Para os ensaios preliminares, realizados em fresadora ferramenteira convencional, foram executados canais com as Ferramentas I (Figura 3.1) com parafuso (DIN 912) de 2 mm somente em trajetórias retilíneas.

Uma possibilidade que este equipamento tem é a de que podemos controlar o distanciamento do *shoulder* em relação à superfície enquanto deslocamos a ferramenta, por meio do deslocamento no eixo "Z" e com isso, controlar visualmente por meio da observação do resalto e da rebarba, a força axial exercida no processo.

A peça de trabalho foi fixada em uma morsa e sua superfície foi alinhada no eixo "Z", tanto na direção do eixo "X", quanto do eixo "Y", de forma a manter paralelismo da superfície com o eixo "Z" da máquina.

A seguir, foi executado o processo de abertura de canais, posicionando a ferramenta de forma a ficar 5 mm da aresta. Iniciou-se o deslocamento da ferramenta em direção ao eixo "Z" de forma que o pino foi penetrando na chapa até o *shoulder* tocar a superfície da mesma. Em seguida, afastou-se o *shoulder* da superfície em 0,03 mm, deixou-se na mesma posição por 3 segundos a fim de se chegar ao estado viscoplástico e logo após iniciou-se o movimento de deslocamento em relação ao eixo "X" com avanço de 20 mm/min e, ao concluir o percurso pré-definido (50 mm), deslocou-se o eixo "Z" de forma a retirá-la do canal, conforme Figura 5.1.



Figura 5.1 — Ensaio preliminar realizado com Ferramenta I na fresadora convencional.

Devido ao fato de se observar aquecimento excessivo na peça de trabalho, os canais seguintes foram executados utilizando a placa de aço (Figura 4.9) com a ferramenta de Pino roscado de 2 mm em trajetórias retilíneas. Foram utilizados para os ensaios rotação de 2440, 1330 e 780 rev/min, com avanços de 20, 30, 50, 75, 145 e 220 mm/min, descritos em detalhes na Tabela 5.2. Os canais foram feitos sequencialmente de forma aleatória para garantir a repetibilidade, ou seja: 20 mm, 30 mm; 20 mm, 30 mm, 50 mm, 75mm; 50 mm, 75 mm, conforme mostra a Figura 5.2 e os dados dos respectivos parâmetros são vistos na Tabela 5.2.

A figura 5.3 apresenta as macrografias das amostras, conforme descrito em 5.2.1, onde são observados os dois lados do seccionamento, que foram nomeados de "A" e "B".

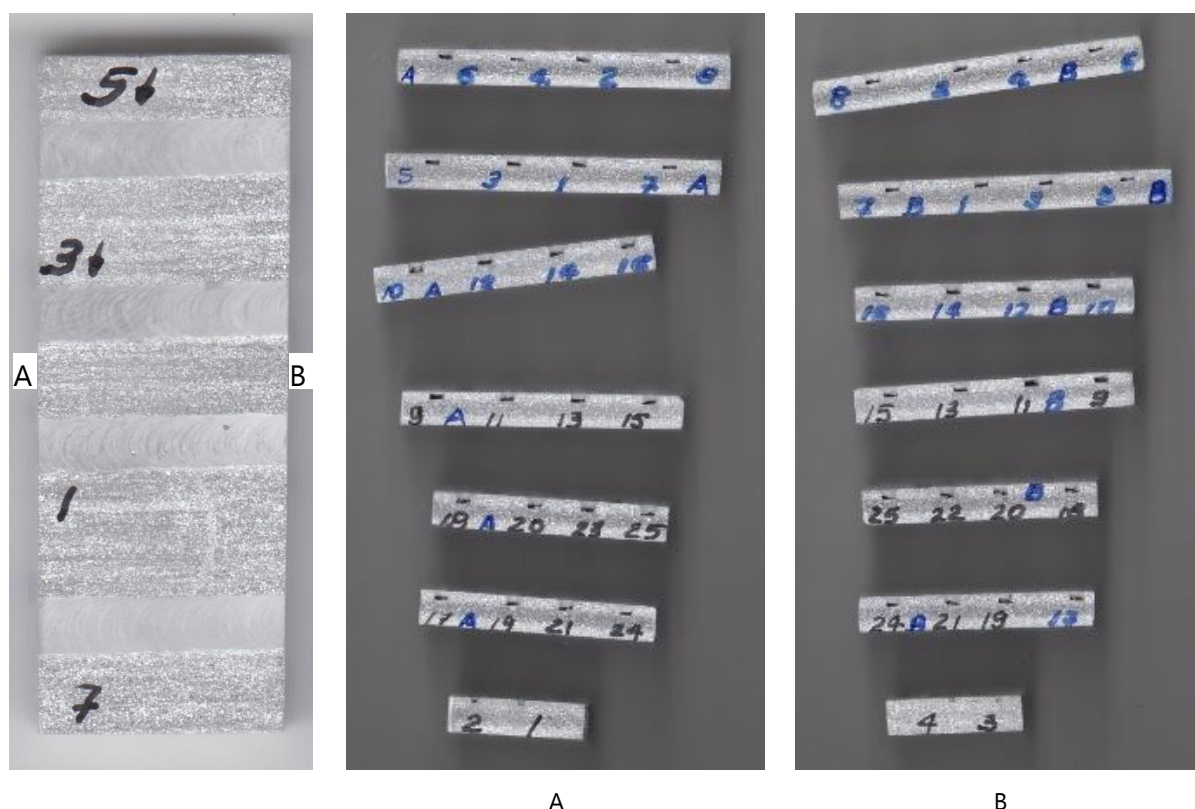
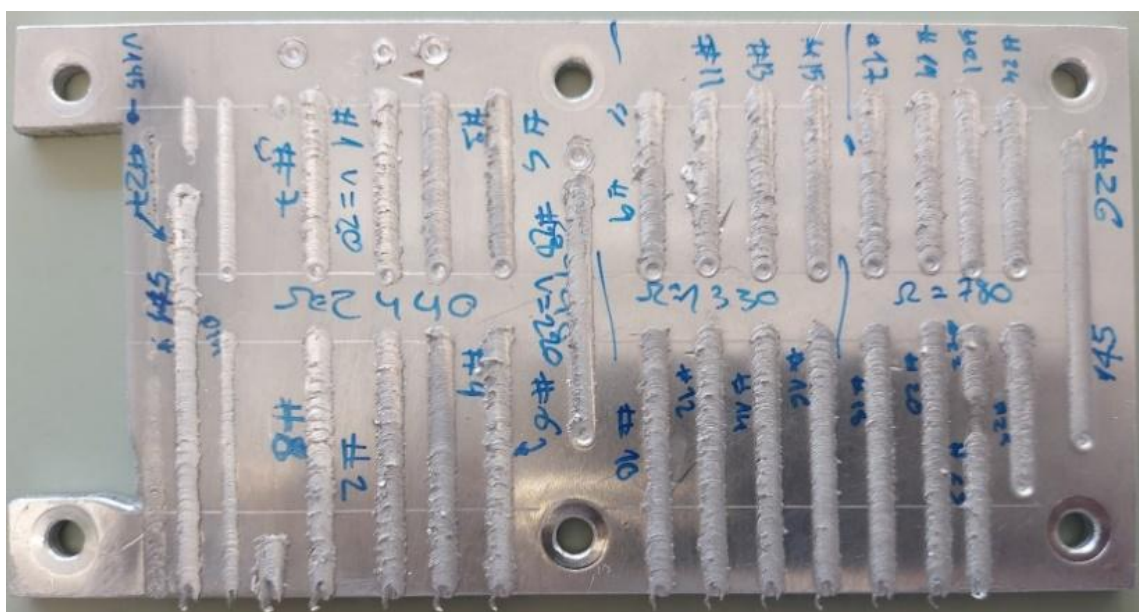


Tabela 5.2 - Parâmetros utilizados nos canais preliminares.

Ensaio	ω (rev/min)	Velocidade angular (m/min)	v (mm/min)	v / ω (mm/rev)	Tempo de aquecimento (s)
1	2440	15,33	20	0,0082	3
2			30	0,0123	3
3			20	0,0082	3
4			30	0,0123	3
5			50	0,0205	3
6			75	0,0307	3
7			50	0,0205	3
8			75	0,0307	3
9	1330	8,35	20	0,0150	3
10			30	0,0226	0
11			20	0,0150	4
12			30	0,0226	3
13			50	0,0376	3
14			75	0,0564	3
15			50	0,0376	3
16			75	0,0564	4
17	780	4,90	20	0,0256	3
18			30	0,0385	3
19			20	0,0256	3
20			30	0,0385	3
21			50	0,0641	4
22			75	0,0962	4
23			Fratura do pino com 12 mm de canal		
24			50	0,0641	5
25			75	0,0962	5
26	2440	15,33	145	0,0594	5
27			145	0,0594	5
28			220	0,0902	6

5.1.2 Ensaios de minicanais

Os ensaios de minicanais foram executados em centro de usinagem CNC e utilizou-se as Ferramentas II, descritas no capítulo 3.2. Inicialmente foram testados os mesmos parâmetros utilizados nos ensaios dos canais preliminares com a intenção de verificar a repetibilidade.

Foram divididos, de acordo com os parâmetros adotados em "séries" nomeadas por letras e cada série, teve um número de canais produzidos e foram numerados sequencialmente.

Uma importante adição ao processo foi o uso de rampas de aceleração na velocidade de avanço com o intuito de, ao plastificar o material, a ferramenta fosse exposta a esforços graduativos, partindo de velocidades menores até chegar a velocidade programada, objetivando a

integridade física dos pinos. Com isso, as falhas catastróficas (quebra dos pinos) ocorreram com pouquíssima frequência.

Canais lineares

Nesta etapa da pesquisa, foram realizados 240 ensaios utilizando vários parâmetros no processamento dos canais, utilizando as ferramentas MC 2,0; MC 1,0 e MC 0,5 (Tabela 3.2).

Embora as ferramentas tenham sido construídas com diâmetros entre 1,0 mm a 2,0 mm optou-se por utilizar as ferramentas com 2,0 mm e 1,0 mm, devido ao fato de que, nos ensaios preliminares, foram utilizados parafusos normalizados e se obteve sucesso na produção dos canais.

A opção de utilizar a ferramenta de 0,5 mm (também já tinham sido produzidas ferramentas entre 0,5 mm e 0,9 mm), foi para testar o limite de processo em relação ao menor diâmetro de ferramenta que já estava disponível no que tange à resistência mecânica do pino e para verificar se era possível obter um canal contínuo e sem aberturas à superfície.

A analogia utilizada na escolha dos parâmetros de rotações foi a de que se deveria manter as velocidades tangenciais adotadas em trabalhos anteriores [43], [13], ou seja, a rotação da ferramenta seria proporcional ao diâmetro do pino. Então, por se tratar de diâmetros com dimensões reduzidas, as rotações deveriam ser aumentadas proporcionalmente.

Também, as velocidades de avanço foram adotadas de modo a preservar a integridade física dos pinos e obedecer ao critério de mínimo e máximo avanço por rotação (Tabela 5.2) a fim de observar a geometria resultante do canal obtido, conforme a equação 5.1.

$$p = \frac{v}{\omega} \text{ (mm)} \quad \text{equação 5.1}$$

Onde: " p " = passo do processo (mm); v = velocidade de avanço (mm/min) e ω = velocidade de rotação (rev/min).

Com base nos parâmetros utilizados, tentou-se verificar quais seriam os melhores parâmetros na produção de minicanais, estabelecendo as melhores relações entre velocidade de avanço e rotação da ferramenta, ou seja, o passo do processo (avanços por rotação da ferramenta) com a consecução de minicanais com boa geometria e que tivessem continuidade para a possível aplicabilidade da tecnologia na produção destes em escala industrial [44].

O critério adotado para avaliar a geometria dos minicanais foi: que tivessem formato trapezoidal ou elíptico e que o D_h (equação 1.1) fosse o maior possível sem que apresentassem aberturas à superfície ou descontinuidade.

Partindo desse pressuposto, foram selecionados os melhores resultados entre todos os canais produzidos que estivessem de acordo e foram submetidos aos ensaios de continuidade e suas réplicas foram caracterizadas metalograficamente, submetidas também a ensaios de rugosidade superficial, microdureza Vickers.

Trataremos inicialmente os parâmetros utilizados com as ferramentas com pinos de rosca de 1 entrada e depois será feita a comparação entre as ferramentas MC 1,0; MC 1,0 2E e MC 1,0 3E, com roscas de 1, 2 e 3 entradas, respectivamente.

Para os ensaios com todas as ferramentas, foram fixados o comprimento do pino (1 a 1,15 x diâmetro do pino) para se ter profundidade razoável do canal e o espaçamento do *shoulder* foi determinado em consonância com os espaçamentos já realizados nos ensaios preliminares, de forma a garantir a maior área da seção transversal, conforme Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Parâmetros fixados para as ferramentas.

Ferramenta	Comprimento do pino (mm)	Distância <i>shoulder</i> /superfície (mm)
MC 2,0	2,25	0,05 - 0,06
MC 1,0	1,05	0,03 - 0,04
MC 1,0 - 2	1,05	0,03 - 0,04
MC 1,0 - 3	1,05	0,03 - 0,04
MC 0,5	0,53	0,01 - 0,02

Foram realizados ensaios lineares em que se variou a velocidade de avanço (v) fixando a velocidade de rotação (ω) e outros ensaios variando a velocidade de rotação (ω), com velocidade de avanço fixa, para compreender qual a influência destes parâmetros, tanto na geometria do canal e sua dimensão, como na sua localização em relação à superfície e no acabamento superficial obtido.

Em vários ensaios, com o objetivo de analisar a geometria do canal a olho nu, mesmo que de forma grosseira e facilitar a escolha dos parâmetros, a entrada do pino se deu sobre a peça a 10 mm da aresta e a saída se deu fora da peça de trabalho, conforme Figura 5.4.

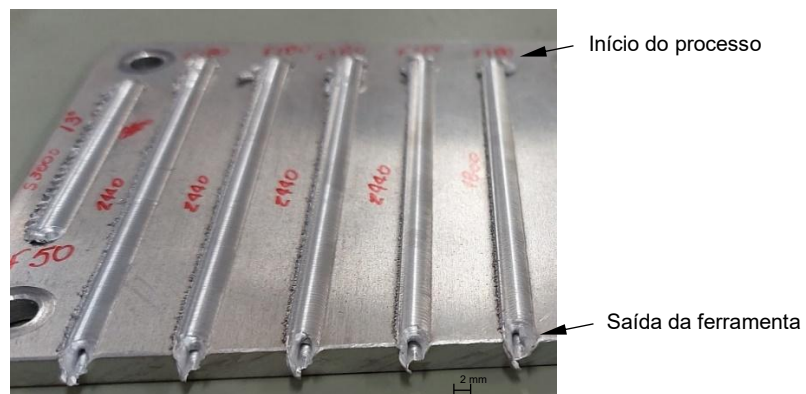


Figura 5.4 — Detalhe da saída da ferramenta na peça de trabalho.

Canais em forma de serpentina

Foram realizados vários ensaios com trajetória mista, ou seja, trajetórias retilíneas conjugadas com trajetórias semicirculares, originando trajetória em forma de serpentina, com o objetivo de realizar um trocador de calor compacto.

Para estes ensaios foram utilizadas ferramentas MC 2,0; MC 1,0 e MC 0,5 com os melhores parâmetros obtidos nos canais com trajetória retilínea. A Figura 5.5 mostra os canais em forma de serpentina.

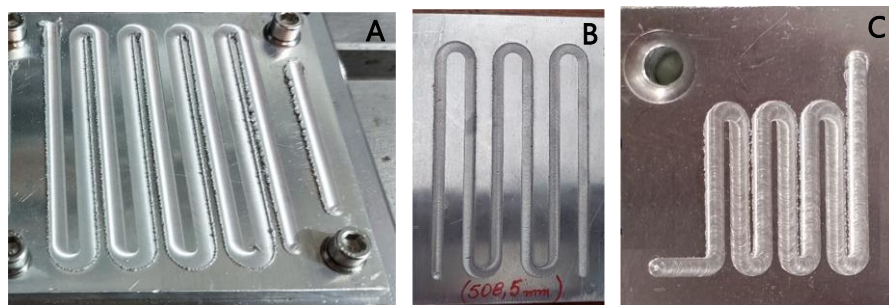


Figura 5.5 — Canais em forma de serpentina com ferramenta: (A) MC 2,0; (B) MC 1,0 e (C) MC 0,5.

Tabela 5.4 Parâmetros utilizados para a produção de canais com padrão de serpentina.

Ferramenta	Série	Ensaio	Velocidade de rotação (rev/min)	Velocidade de avanço (mm)	Rampa de aceleração (mm/min)	Avanço/etapa da rampa (mm)	Comprimento do canal (mm)
MC 2,0	B	8	2440	145	25-60-90-120-145	1,0	625
	E	11	1800	180	25-60-110-150-180		
		12	2100	160	25-60-90-120-140-160		
MC 1,0	N	1	3200	75	19-38-60-75	0,5	508
		2	3200	160	25-60-90-120-140-160		
		3	2000	145	25-60-90-120-145		
		4	2800	180	25-60-90-130-160-180		
MC 0,5	L	1	4000	40	5-10-20-30-40	0,5	212
		2	7000	145	5-15-30-60-120-145		
		3	4000	145	5-15-30-60-120-145		
		4	7000	80	5-10-25-40-60-80		
		5	5500	100	5-15-30-55-80-100		
		6	5500	120	5-15-30-50-70-90-120		
		7	7000	120	5-15-30-50-70-90-120		
		8	8500	20	5-10-15-20		

Canais em forma de serpentina cruzados em diferentes profundidades

Uma possibilidade desta tecnologia em trocadores de calor é a produção de canais em forma de serpentina cruzados em diferentes profundidades, que possibilita realizar trocas de calor entre a chapa de alumínio e dois fluxos contínuos de fluídos circulando por minicanais isolados entre si. Para tal, devido ao fato de ter maior resistência mecânica, foi utilizada a ferramenta MC2.0 e variando o comprimento do pino, foram produzidos dois canais de 2,0 mm cruzados com diferentes profundidades, conforme Figura 5.6.



Figura 5.6 — Canais de 2,0 mm em forma de serpentina cruzados em diferentes profundidades.

Canais produzidos por pinos com rosca de 2 e 3 entradas

Os canais produzidos utilizando ferramentas com pinos com 2 e 3 entradas foram realizados com as ferramentas MC 1,0 - 2E e MC 1,0 - 3E (Tabela 3.2), de 2 e 3 entradas respectivamente. Para tal, os ensaios tiveram trajetórias lineares e repetiram os mesmos parâmetros (comprimento do pino roscado; espaçamento do *shoulder*; velocidade de avanço e velocidade de rotação) dos melhores resultados obtidos pela ferramenta MC 1,0 de 1 entrada e comparados com ela, conforme mostra a Figura 5.7.

O objetivo foi comparar a geometria e os diâmetros hidráulicos dos canais obtidos em relação ao número de entradas das roscas dos pinos que os produziram.

Foi observado que o diâmetro hidráulico obtido por MC 1,0 2E teve um aumento em relação à MC 1,0 e que seu diâmetro hidráulico foi menor que com MC 1,0 3E.

Observou-se, portanto, que um número de entradas maior proporciona diâmetros hidráulicos maiores.



a) MC 1,0 (498 μm - M24)

b) MC 1,0 2E (511 μm - O1)

c) MC 1,0 3E (568 μm - P26)

Figura 5.7 — Perfil dos canais produzidos com pinos de 1,0 mm: a) com 1 entrada; b) com 2 entradas e c) com 3 entradas, seus respectivos diâmetros hidráulicos e amostras observadas.

5.1.3 Ensaios de microcanais - μFSC

Obteve-se com os ensaios anteriores, utilizando Pino roscado de 0,5 mm, canais contínuos e funcionais e atingiu-se um canal com $D_h = 0,191$ mm, que o caracteriza como microcanal, segundo [45]. Porém, não se atingiu o objetivo da pesquisa que é de se chegar ao limite de processo que é o de se obter o menor canal contínuo e funcional possível de ser produzido.

Assim sendo, optou-se por construir ferramentas com dimensões menores e foram fabricadas as Ferramentas III, cujos diâmetros dos pinos roscados vão de 0,20 mm a 0,45 mm,

descritas na seção 3.3.3, e os ensaios de microcanaís foram executados em centro de usinagem CNC.

Para o estabelecimento dos parâmetros, utilizou-se o mesmo conceito anteriormente adotado que foi o de utilizar rotações proporcionais ao diâmetro do pino para que a velocidade angular se mantivesse próxima dos valores utilizados anteriormente.

Os ensaios foram divididos, de acordo com os parâmetros adotados, em "séries" nomeadas por letras e cada série, teve um número de canais produzidos e foram numerados sequencialmente.

Também, em relação à velocidade de avanço, manteve-se o critério de rampas de aceleração, entretanto, utilizou-se valores menores para que a integridade do pino fosse mantida, para evitar falhas catastróficas.

Iniciaram-se os ensaios com a ferramenta μC 0,3 mm (Tabela 3.2), pois fazendo uma analogia com o D_h obtido com MC 0,5, se tornou óbvia a utilização de uma ferramenta que tivesse o pino com o diâmetro próximo do menor diâmetro dos pinos fabricados e, com isso, se obteria, em teoria, um D_h que estivesse dentro das medidas dos microcanaís, proposto por [45].

Adotaram-se as mesmas condições de fixação da peça de trabalho utilizadas nos minicanaís e os parâmetros descritos na Tabela 5.2.

Antes de iniciar os ensaios foi feita a usinagem da superfície da peça de trabalho de modo a garantir o paralelismo com o eixo "Z" da máquina, pois não poderia haver diferenças de paralelismo entre o *shoulder* e a superfície de trabalho devido ao fato de se trabalhar com espaçamentos mínimos entre (0,01 e 0,02mm) pois já havia sido constatado que a variação de espessura da peça de trabalho atingiu 0,1 mm.

Nos primeiros ensaios com a ferramenta μC 0,3, ao se realizar o setup, ocorreu algumas vezes a falha catastrófica do pino roscado com a utilização de parâmetros conservadores, ou seja, rampa de aceleração de 5 etapas, iniciando com avanço de 3 mm/min até atingir 15 mm/min de velocidade de avanço final e rotações que variaram de 12.000 a 20.000 rev/min.

A constatação a que se chegou foi de que a dissipação de calor foi excessiva, levando em conta que, devido ao diâmetro da ferramenta ser muito pequeno, não se atingiu o estado viscoplástico desejado, provocando falhas catastróficas.

Na Figura 5.8, apresenta-se o processo μFSC em execução e todo o aparato para fixação da peça de trabalho.



Figura 5.8 — Execução de microcanal com ferramenta de Pino de 0,3 mm.

Para se conhecer o processo μFSC com a utilização das ferramentas μC , foram realizados 138 ensaios em 11 amostras, sendo 130 ensaios para μC 0,3 mm e 8 ensaios para μC 0,2 mm.

Foram variados os parâmetros de temperatura de aquecimento da placa de fixação da peça de trabalho (de 40 °C a 185 °C), rotação (de 7.000 rev/min a 20.000 rev/min), avanço e espaçamento entre *shoulder* e peça de trabalho, sempre com a variação de um único parâmetro por ensaio e manutenção dos demais a cada ensaio para verificar posteriormente, por meio de ensaios de μCT , se os canais se formaram e se eram contínuos.

Com comprimento do pino roscado de 0,34 mm, utilizando a ferramenta μC 0,3, foram realizados 113 ensaios, sendo 63 canais com 19 mm; 38 com 20 mm; 5 com 22 mm; 5 com 24 mm; 1 com 14 mm e 1 com 12 mm, totalizando 2232 mm até a ruptura do pino.

Alguns dos parâmetros utilizados foram comuns à todas as amostras:

- o tempo de parada após penetração do pino foi de 3 s;
- o passo para cada velocidade da rampa foi de 0.5 mm;
- a rampa de aceleração utilizada nas amostras "&", "A", "B", "C", "D", "E", "F", "G", "H" e "I" foi de: 3 - 8 - 14 - 20 - 25 [mm/min] e na amostra "J" foi de: 2 - 4 - 8 - 12 - 15.

A Tabela 5.5 apresenta os melhores resultados obtidos.

Tabela 5.5 Parâmetros utilizados para a produção de μ canais

Ferramenta	Série / ID do ensaio	Temperatura da placa [°C]	Comprimento do pino [mm]	Velocidade de avanço [mm/min]	Velocidade de rotação [min -1]	Espaçamento [mm]	Comprimento do canal [mm]	Análise µCT	Comprimento do canal [mm]			
µC 0,3	"8" 8	25	0.27	15	12000	0.075	20	Canais não contínuos	± 1.5 mm			
	A3	121	0.34	25		0.02						
	B5	175				0.09			± 1.5 mm			
	B6	185				0.05	24					
	C1	105							± 2 mm			
	D6	112				0.04						
	E4	108			9000	0.03	19					
	E14	108			20000		14		± 1.5 mm			
	E15	108					12					
	F7	100			12000	0.02	20		± 2 mm			
	F8	100				0.02	19		± 4 mm			
	G18	80			18000							
	H16	60							± 5,5mm			
	I14	40										
					16000				0.02			
µC 0.2	J3	117	0.24	15	20000	0.02		± 3 mm				
	J7							± 5.5 mm				

5.2 Métodos de Caracterização

Medições de carga: como o centro de usinagem CNC controla apenas a posição, as medições de carga foram realizadas para determinar a carga máxima, na direção do deslocamento da ferramenta, durante o processo *FSC*. Foi utilizada apenas a ferramenta MC 2.0, pois presumiu-se que, por possuir o maior diâmetro, sofreria forças maiores que as demais ferramentas.

As medições de carga, exclusivamente no eixo X (sentido de deslocamento da ferramenta), foram realizadas durante os canais lineares preliminares, em fresadora ferramenteira, utilizando dinamômetro Kern HCB 100K 200, Kern e Sohn GmbH.

Também, somente no eixo "X", foram realizadas medições de carga utilizando célula de carga e sistema de aquisição de dados da marca Digilent Analog Discover 2 em centro de usinagem CNC.

Testes de continuidade: os testes de injeção de ar foram realizados utilizando uma seringa hipodérmica com capacidade de 20 ml em uma amostra com canal de 0,5 mm completamente submersa em água. O objetivo foi verificar se havia continuidade ou algum bloqueio interno no canal. Testes adicionais também foram realizados por meio de tomografia computadorizada de nêutrons [46] para comprovar a continuidade dos canais.

Testes com Líquidos Penetrantes: o objetivo desses testes foi detectar possíveis defeitos como fissuras trincas ou fendas, que poderiam ocorrer na região do teto do canal e áreas adjacentes para que atinjam a superfície da amostra e revelem falhas. Para estes testes, o líquido penetrante foi injetado no canal em sua entrada até chegar à saída do canal, verificando se o líquido penetrante fluíu facilmente e alcançou a saída do canal. Após a correta limpeza da superfície da amostra, o líquido revelador foi aplicado para detectar possíveis defeitos de ruptura superficial no teto do canal [47].

Testes de estanqueidade: um compressor de ar de pistão Schuls Max MSV 20/300 foi usado para testes de estanqueidade. Amostras com canais de 2,0 mm e 1,0 mm foram totalmente submersas em água, inclusive a entrada e a saída (vedadas) do circuito. O fluxo de ar foi estabelecido no canal com pressão de 980 kPa, mantido por 24 horas em pressão superior à utilizada por Pietro [29].

Rugosidade superficial: Foram feitas medições da rugosidade interna dos canais para realizar uma análise topográfica da superfície interna dos canais, verificando a rugosidade da superfície interna, parâmetro crítico que afeta significativamente a queda de pressão no escoamento do fluido. A microscopia com variação de foco foi utilizada em equipamento com tecnologia Focus-Variation 3D, do Instituto Pedro Nunes (IPN) – Portugal. Para expor as superfícies internas dos canais para teste, foram preparadas amostras retirando material através da espessura da placa até atingir a altura média dos canais.

Caracterização metalográfica por microscopia ótica: as seções transversais das amostras μFSC foram polidas e posteriormente atacadas com reagente composto por ácido fluorídrico a 3% diluído em H_2O . As amostras foram imersas na solução por 5 minutos a 15 minutos até que fosse obtido o contraste necessário para observar a geometria do canal, detalhes da seção transversal, regiões ao redor do canal, tamanhos de grãos e seus contornos.

Após lavagem em água corrente e secagem com álcool etílico PA, as amostras foram analisadas em microscópio óptico Leica DMLM acoplado a câmera Leica EC3 controlada pelo software LAS ES.

Caracterização metalográfica por MEV: A caracterização das amostras por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada com o objetivo de analisar a morfologia, a microestrutura e a topografia da superfície em microscópio eletrônico de varredura com canhão de emissão de campo (SEM-FEG), modelo JSM-6701F, marca JEOL, com detector de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) acoplado.

Testes de microdureza: foi utilizado um medidor de microdureza Mitutoyo HM - 112 Micro Vickers para medir a microdureza, seguindo as normas ISO 6507-1:2018. As indentações foram feitas com carga de 0,05 kgf e tempo de indentação de 10 segundos, com espaçamento de 200 μm entre elas.

Correntes induzidas: O objetivo deste ensaio foi verificar se por meio de correntes induzidas seria possível identificar variações de impedância que indicassem a presença do canal. Os ensaios foram realizados por meio de c-scans. Os parâmetros controlados foram a área a inspecionar, a frequência e o ganho.

Micro tomografia computadorizada de raios X: as imagens de micro tomografia computadorizada de raios X (μCT) foram obtidas usando um tomógrafo Phoenix V |tome|X M e os testes foram realizados em amostras com minicanais feitos por MC 2.0, MC 1.0 e MC 0.5 e amostras com microcanais feitos com ferramentas μC 0.2 e μC 0,3.

Tomografia Computadorizada de Nêutrons (NCT): foi realizada no IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, utilizando equipamento instalado no *bean-hole* (BH)-14 do reator de pesquisa nuclear tipo pool de 5 MW IEA-R1. A tomografia pode ser obtida em 400 segundos e a resolução espacial da imagem é de $205 \pm 24 \mu\text{m}$ [49]. Nesse tipo de teste, houve a necessidade de injetar substâncias que contenham hidrogênio em sua composição, pois os metais ficam “transparentes” quando observados. A inclusão de uma substância hidrogenada no interior do canal foi essencial para a obtenção do contraste.

Ensaio térmico e termográficos: As medições de temperatura foram feitas usando uma câmera termográfica Fluke Ti400 IR Fusion Technology, em conjunto aquisitor de dados National Instruments DAQ e assistido por um programa de software LabView para processamento de dados de sinal, utilizando 4 termopares do tipo "K". Foram realizados ensaios para medição das temperaturas máximas e ensaios de dissipação térmica.

Medição de gradientes térmicos em regime transitório em um trocador de calor compacto: O desempenho de resfriamento e aplicabilidade de um protótipo de trocador de calor

com microcanal produzido pela *FSC* foi testado medindo a evolução da temperatura de uma maquete aquecida com resfriamento ativo, ou seja, com fluido de resfriamento circulando no canal em forma de serpentina, versus desempenho de resfriamento passivo, ou seja, convecção natural ao ar. As amostras foram primeiro submersas em banho quente até serem aquecidas uniformemente a 60 °C, por meio de câmera termográfica Fluke Ti400 IR Fusion Technology. Foram então retiradas do banho quente e expostas à temperatura ambiente com ou sem fluido refrigerante circulando pelos canais, para comparar a taxa de mudança de temperatura entre o resfriamento natural e o resfriamento forçado através dos canais. A temperatura do fluido refrigerante era de -10 °C. Os testes foram realizados apenas nos canais de 2,0 e 1,0 mm. Este teste não foi realizado no canal de 0,5 mm pois não foi possível fixar corretamente os conectores disponíveis na entrada e saída do canal.

Devido à grande quantidade de ensaios realizados, foram selecionados os minicanais que ficaram melhor classificados, segundo o critério de avaliação adotado e foram caracterizados em função disso.

5.2.1 Preparação das amostras.

Para analisar os canais produzidos, foram cortadas duas amostras do canal em sentido transversal ao eixo de orientação do canal e, para a escolha da região a cortar, levou-se em conta evitar a entrada do pino roscado e a região da rampa de aceleração e acrescentou-se pelo menos 5 mm a mais devido a se tratar de uma zona de transição, razão pela qual o corte sempre se distancia a 10 mm do início da zona processada, no mínimo.

Para facilitar as operações posteriores de polimento, foram executados cortes para diminuir o comprimento das amostras, com comprimento aproximado de 35 mm, conforme Figura 5.9.

Desta forma, com cada amostra é possível observar duas faces da secção transversal do canal que têm 15 mm de comprimento e com isso, foi possível comparar as duas faces da secção cortada do canal, com o objetivo de avaliar a uniformidade da sua secção transversal.

Presumidamente, a geometria do canal deveria ser a mesma em toda a trajetória percorrida pela ferramenta, já que os parâmetros adotados se mantiveram os mesmos.

Ainda, caso elas não tivessem geometrias parecidas, comparou-se com uma terceira e/ou quarta face proveniente de uma segunda amostra.

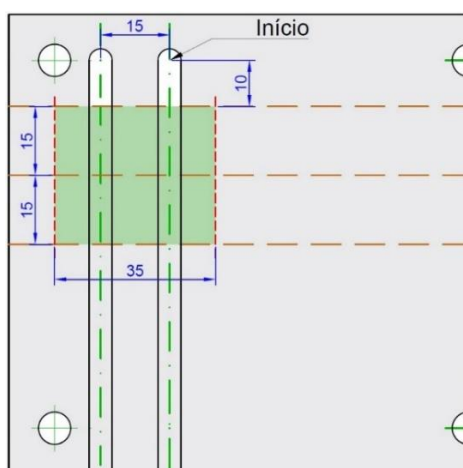


Figura 5.9 — Procedimento adotado para sectionar amostras.

Antes de realizar o polimento das faces das amostras para a caracterização, houve a necessidade de realizar usinagem prévia, devido ao acabamento superficial muito irregular produzido pela serra de fita horizontal utilizada, além do fato de que as rebarbas do corte fechavam os canais na superfície da face de corte.

Para resolver o problema de obstrução do canal e conseguir visualizar se o canal estava regular, foi realizada em fresadora ferramenta convencional a usinagem da superfície cortada utilizando uma ferramenta com corte extremamente positivo, afiada com geometria específica para alumínio de alta ductilidade, trabalhando com $\omega = 1330 \text{ rev/min}$ e avanço de 50 mm/min.

O resultado obtido após a usinagem foi de uma superfície com excelente rugosidade superficial e isenta de rebarbas na borda do canal (ou com rebarbas insignificantes), possibilitando a verificação da regularidade do canal.

5.2.2 Critérios adotados para a caracterização dos canais

Com a seleção dos parâmetros de processo que obtiveram os melhores canais e a comparação dos resultados obtidos nos diferentes ensaios, foi possível definir os critérios de caracterização:

- Minimização da alteração da superfície do material processado, ou seja, menores indentações ou menores ressaltos possíveis na superfície da peça de trabalho.
- Uniformidade da secção transversal do canal ao longo da trajetória, comparada entre faces distintas;

- Canais contínuos e sem formação de defeitos;
- Canais com geometria assemelhada a um retângulo, trapézio ou elipse;

Preferencialmente, os canais com geometria assemelhada a um retângulo, trapézio ou elipse são os mais recomendados, quando se considera a perda de carga que é associada a geometria irregular e rugosidade superficial do canal, e, portanto, se torna necessário maximizar a altura do canal [30].

A estanqueidade também é um critério muito importante, pois determina como bons resultados os canais que não tenham defeitos ou vazios à superfície do material ou que provoquem perdas de pressão ou estanqueidades. Este fator é que determina o funcionamento de sistemas de troca de calor.

Para uma boa produtividade, no que tange a evitar retrabalhos posteriores e minimizar as operações necessárias, a produção de minicanais deve apresentar bom acabamento superficial e minimizar o ressalto oriundo do processamento escolhido para os ensaios, ou seja, *Friction Stir Channeling With Clearance*, e as rebarbas decorrentes do processamento também devem ser mínimas ou inexistentes.

5.2.3 Ensaios de medição de carga

Na pesquisa bibliográfica, alguns autores realizaram ensaios de medições de carga para o *FSC* à macroescala. Consideraram as forças nos três eixos (X, Y e Z) por exemplo [50] e [51].

Nesta pesquisa, como o objetivo é entender o processo e, por meio dos melhores parâmetros adotados, atingir o limite inferior do processo *FSC* à microescala, não se aprofundou muito nestes ensaios, pois demandaria elevados tempo e custos com a construção de dispositivos.

Preliminarmente, para avaliar a viabilidade de implementação do μFSC utilizando equipamento CNC, foram realizadas medições de carga em uma fresadora convencional produzindo canais lineares, somente no eixo "X", utilizando os parâmetros que geraram canais com maior D_h , e foi utilizada a ferramenta MC 2.0, que exerce os maiores esforços entre as ferramentas utilizadas.

No dispositivo apresentado na Figura 5.10, o ponto de ancoragem do dinamômetro foi fixado na mesa da fresadora e acoplado à base do dispositivo por meio de um parafuso, onde a peça de trabalho é fixada em uma placa que está fixada em guia linear (rolamento linear), que também está fixada na base do dispositivo, minimizando as forças de atrito. O

deslocamento realizado pelo conjunto é livre (atrito desprezível) e uma mola helicoidal realiza a pré-carga que, neste experimento foi de 3 kgf. A atuação da força localizada na parte central da placa de fixação, se dá por meio de uma esfera (para garantir somente um ponto de contato), coincidindo também com o ponto central da célula de carga.

A força foi medida ao longo do teste com $v = 180 \text{ mm/min}$ e $\omega = 1800 \text{ rev/min}$, e atingiu um valor máximo de 17,8 kg, conforme mostrado na Figura 5.42.

Devido ao valor obtido, todos os testes μFSC seguintes foram realizados no Haas Super Mini Mill 2 equipamento CNC, que admite força máxima nos eixos "X", "Y" e "Z" de 8896 N.



Figura 5.10 Medição de força na direção de avanço da ferramenta.

Concluiu-se que os testes μFSC podem ser facilmente realizados em equipamentos com potências inferiores aos equipamentos utilizados.

A seguir, apresenta-se outros ensaios para a medição de carga, somente no eixo "X", realizados no centro de usinagem, com a utilização de célula de carga.

A célula de carga com capacidade para 20 kgf, foi calibrada externamente com várias cargas, por meio de um sistema de aquisição de dados da marca Digilent Analog Discover 2 e foi obtida uma curva de calibração, tanto antes do início dos ensaios, como também ao final destes com as mesmas cargas, sendo observada a manutenção da mesma calibração.

Foram realizados ensaios para verificar as forças máximas, utilizando parâmetros com a maior velocidade de avanço e menor rotação que obtiveram canais contínuos e regulares, já testados em 5.1.2, com as ferramentas MC 1,0 e MC 2,0.

No dispositivo apresentado na Figura 5.11, a célula de carga foi fixada na base do dispositivo, onde a peça de trabalho é fixada em uma placa que está fixada em guia linear (rolamento linear), que também está fixada na base do dispositivo, minimizando as forças de atrito.

O deslocamento realizado pelo conjunto é livre (atrito desprezível) e uma mola helicoidal realiza a pré-carga que, neste experimento foi de 3 kgf. A atuação da força localizada na parte central da placa de fixação, se dá por meio de uma esfera (para garantir somente um ponto de contato), coincidindo também com o ponto central da célula de carga.

A peça de trabalho foi pintada de azul, logo abaixo da ferramenta, para poder referenciar a altura da ferramenta.

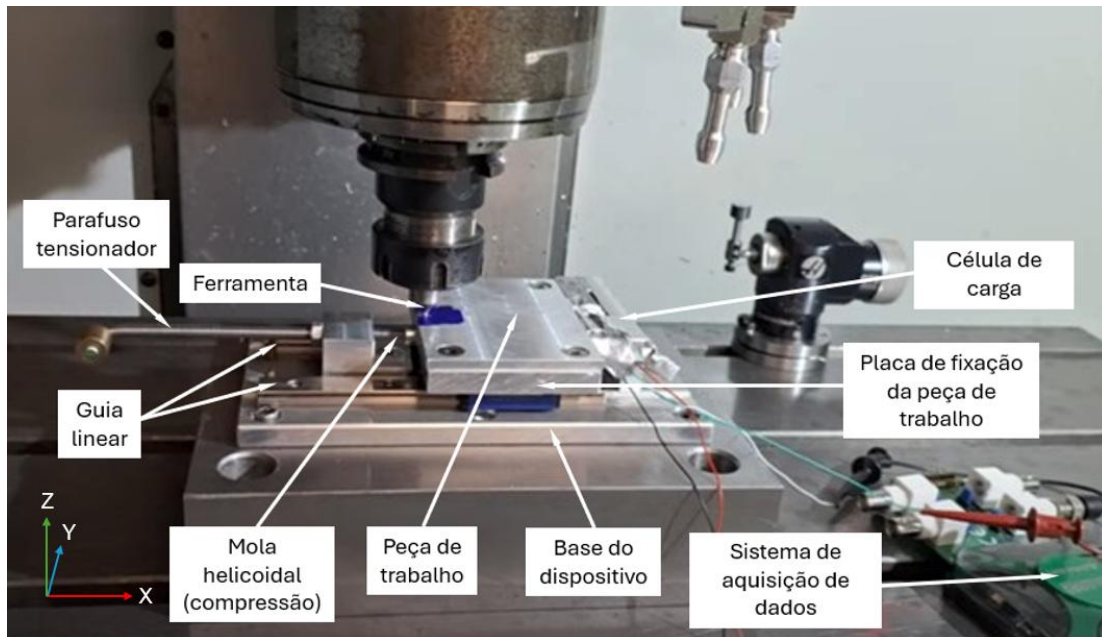
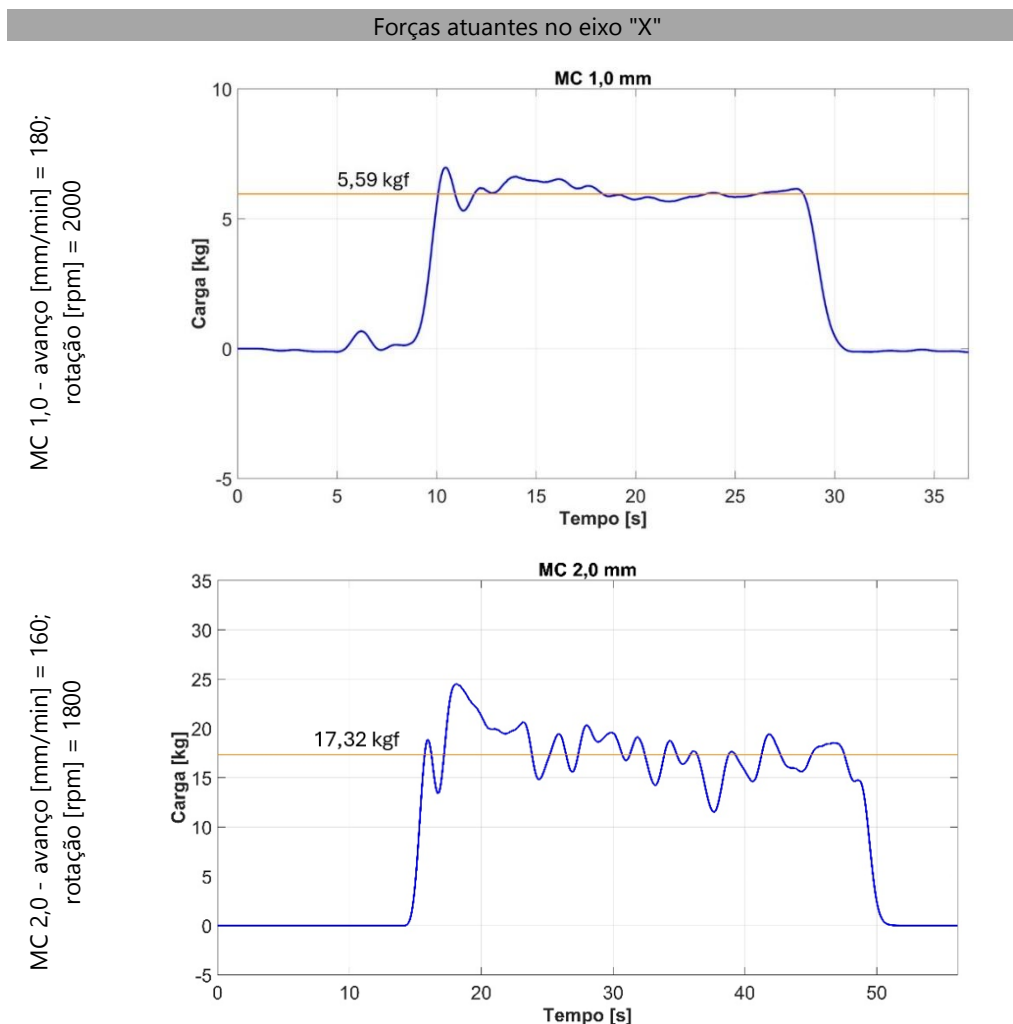


Figura 5.11 Montagem utilizada para medição de forças no eixo "X". (Link para "[vídeo](#)").

A Tabela 5.6 apresenta os parâmetros utilizados e somente as forças que atuaram no eixo "X".

Tabela 5.6 - Parâmetros e forças no eixo "X"



Observa-se no gráfico (para a ferramenta MC 1,0) a média das forças atuantes é de 5,59 kg, com um pico de força máxima de ~ 7 kg e, (para a ferramenta MC 2,0) a média das forças atuantes é de 17,32 kg, com um pico de força máxima de ~ 24 kg.

Ainda, foi possível verificar que, devido aos espaçamentos entre o *shoulder* e a peça de trabalho serem muito pequenos, entre 0,02 mm e 0,03 mm, variações de temperatura para cima causam dilatação no material, diminuindo essas cotas, o que pode aumentar a força de processamento, haja vista que o material extraído da peça de trabalho ficaria com mais restrição à saída e isso provoca ainda mais a diminuição do espaçamento entre o *shoulder* e a peça de trabalho e, em vários ensaios, levou a uma indentação na peça de trabalho, o que aumenta a força de processamento. Se houver diminuição de temperatura, ocorrerá o contrário do supracitado [13].

5.2.4 Ensaios de rugosidade superficial interna dos canais

A rugosidade superficial interna constitui um fator determinante no desempenho de sistemas de transferência de calor, sendo essencial seu controle em aplicações que demandam eficiência térmica.

No processo de *Friction Stir Channeling (FSC)*, a dinâmica da operação resulta na formação de irregularidades nas paredes internas do canal, provocadas pela extração de material em direção à superfície e subsequente deposição por plastificação, impulsionada pela ação mecânica do *shoulder* da ferramenta.

Considerando que níveis elevados de rugosidade superficial podem ocasionar perdas de carga significativas, é imperativo selecionar os parâmetros operacionais de modo a minimizar tais irregularidades, garantindo-se a geometria adequada do canal [50].

O controle da rugosidade está diretamente relacionado a variáveis do processo, como velocidade de rotação (ω), taxa de avanço (v) e espaçamento do *shoulder*, que afetam o aporte térmico do processo [35].

Sarkar (2023) pesquisou a influência da variação desses parâmetros em relação à morfologia dos canais e a rugosidade superficial interna dos canais, constatando que a rugosidade superficial interna dos canais melhora quando se aplica um aporte térmico e espaçamento adequados, gerando uma maior área do canal e consequentemente, maior diâmetro hidráulico.

Um dos critérios adotados para os melhores parâmetros desta pesquisa foi justamente obter o maior diâmetro hidráulico nos ensaios e as amostras submetidas ao ensaio de rugosidade superficial interna, foram as que tiveram o maior diâmetro hidráulico.

A superfície interna do teto dos canais lineares foi analisada por Análise topográfica superficial por microscopia com variação de focagem, realizados no Instituto Pedro Nunes - Coimbra, Portugal. Foram analisadas as amostras criadas com as ferramentas MC 1.0 e MC 2.0, conforme Figura 5.12. As resoluções vertical e horizontal são de 300nm e 2,94 μ m, respectivamente, para todas as amostras. A amostra criada usando MC 0,5 foi danificada durante a preparação e não pôde ser testada. A Figura 5.13 apresenta uma representação 3D dos perfis de rugosidade e a Tabela 5.7 apresenta os respectivos valores de rugosidade com diferentes parâmetros. Observa-se que a média aritmética da rugosidade, R_a , dos canais é elevada (15,6 e 16,4 μ m, para MC 1,0 e MC 2,0, respectivamente) em comparação com canais feitos através de usinagem convencional (ex. fresamento, com R_a entre 0,8 e 6,4 μ m), o que pode ser benéfico

para aplicações de trocadores de calor, pois facilita a transferência de calor e aumenta a eficiência térmica, embora às custas de possíveis quedas de pressão de fluido ao longo do canal [31].

Ainda assim, a rugosidade se manteve dentro dos limites esperados pelos resultados já referenciados por [17].

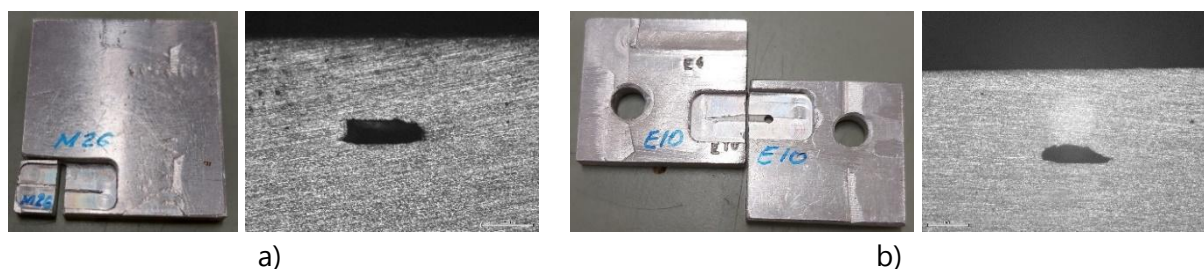


Figura 5.12 Amostras preparadas para o ensaio de rugosidade superficial interna dos canais: a) canal com ferramenta MC 1.0 e b) canal com ferramenta MC 2.0.

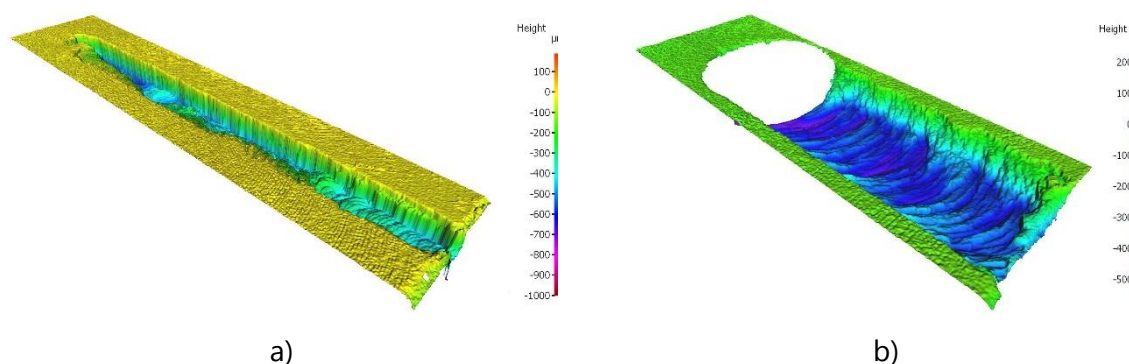


Figura 5.13 Representação 3D do acabamento superficial interno dos canais: a) canal com ferramenta MC 1.0 e b) canal com ferramenta MC 2.0.

Tabela 5.7. Valores da rugosidade superficial interna dos canais.

Amostra	Região inferior do canal		Parâmetros de rugosidade (μm)
MC 1.0			Ra: 15,6 Rp: 33,4 VR: 44,5 TR: 77,8 Rz: 70,2
MC 2.0			Ra: 16,4 Rp: 78,4 VR: 43,9 TR: 122,3 Rz: 98,7

5.2.5 Caracterização das amostras

A caracterização das amostras seguiu os mesmos preceitos e atributos utilizados e já consagrados pela ciência dos materiais.

As amostras foram lixadas até chegar à granulação 4.000. O acabamento superficial ficou com boa rugosidade, de forma a não ser necessário realizar o polimento para realizar as macrografias para a caracterização geométrica.

Para caracterizar geometricamente os canais, foi utilizado um microscópio ótico para captar as imagens e depois processá-las em software ImageJ.

Primeiramente, foi realizada a medição das características geométricas dos canais, ou seja, a largura "W", a altura do canal "H", a espessura do teto do canal "h", e a área da secção transversal "S", sendo: "LA" – lado em avanço e "LR" – lado em retrocesso, como representada na Figura 5.14.

Depois, utilizou-se a equação 1.1 para determinação do D_h , como no exemplo a seguir:

Exemplo:

Área = 0,9799 mm²;

Perímetro = 5,6545 mm

$$D_h = \frac{4A}{P} \rightarrow D_h = \frac{4 \cdot 0,9799}{5,6545} \rightarrow D_h = 0,693 \text{ mm}$$

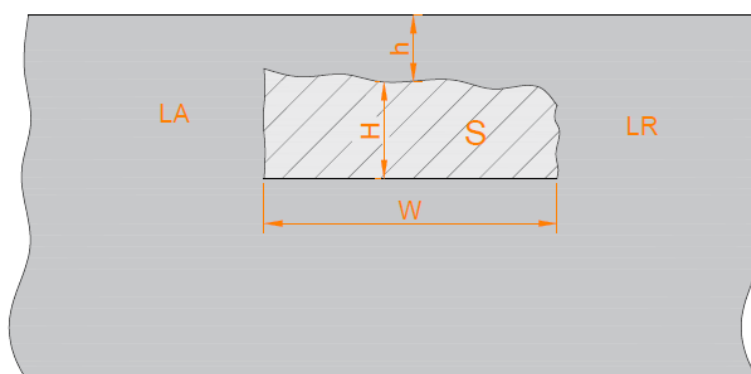


Figura 5.14 – Figura esquemática da caracterização geométrica dos canais – adaptado de [18].

Deste modo, foram selecionadas as amostras que, segundo os critérios adotados, obtiveram os canais mais relevantes para o estudo e, assim, realizou-se posteriormente o polimento das amostras em politriz, segundo critérios já estabelecidos.

As seções transversais das amostras μFSC foram polidas e posteriormente atacadas com reagente composto por ácido fluorídrico a 3% diluído em H_2O . As amostras foram imersas na solução por 5 minutos a 15 minutos até que fosse obtido o contraste necessário para observar a geometria do canal, detalhes da seção transversal, regiões ao redor do canal, tamanhos de grãos e seus contornos.

Após lavagem em água corrente e secagem com álcool etílico PA, as amostras foram analisadas em microscópio óptico Leica DMLM acoplado a câmera Leica EC3 controlada pelo software LAS ES.

5.2.5.1 Caracterização geométrica

Na caracterização geométrica dos canais selecionados, observou-se que a altura do fundo do canal até a superfície da peça de trabalho " P_c " (profundidade do canal) é muito próxima a do comprimento do pino, o que nos leva a ter boa precisão dimensional em relação à profundidade do canal.

A distância do teto do canal à superfície da peça de trabalho " h " e a altura do canal " H ", ambas dependem do volume de material extraído para a superfície e, portanto, se a altura do canal aumenta, a altura do teto diminui proporcionalmente e vice-versa em função dos parâmetros adotados.

Para exemplificar, a Figura 5.15 apresenta um canal produzido com a ferramenta MC 0,5 onde se utilizou como parâmetros, $v = 145 \text{ mm/min}$ e $\omega = 7000 \text{ rev/min}$:

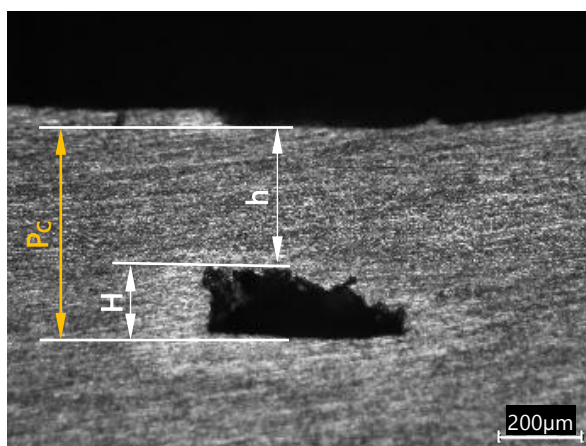
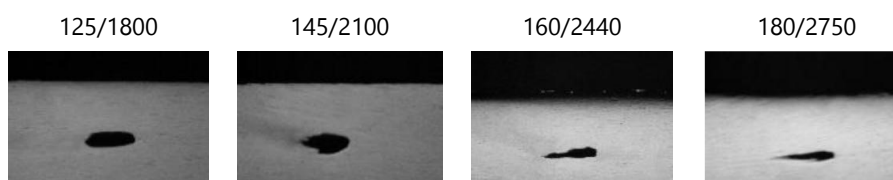


Figura 5.15 – Caracterização geométrica de canal produzido com MC 0,5.

Em função da variação das velocidades de avanço e de rotação, a variação da geometria dos canais produzidos com a ferramenta MC 2,0, nota-se que ocorre um aumento da altura do canal quando se utiliza velocidades de avanço maiores e rotações menores, devido ao fato de que a remoção de material nestas condições tende a ser maior.

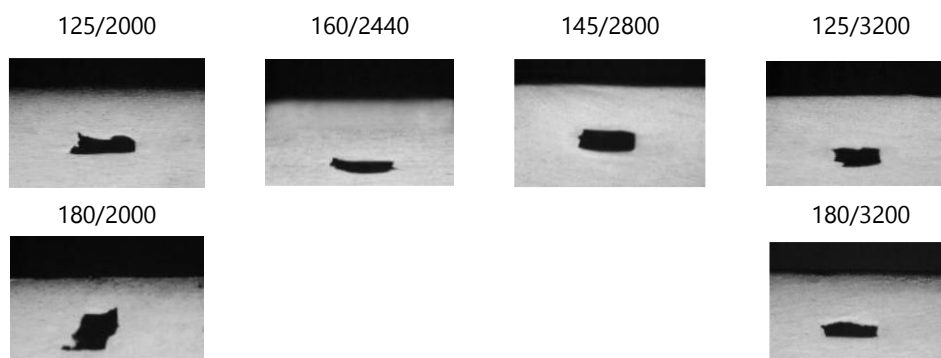
Em função disto, a forma do canal tende a se aproximar ao formato de elipse, o que favorece à diminuição da perda de carga do fluido em circulação e se torna muito interessante para a produção de minicanais, conforme apresenta a Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Caracterização geométrica de canais produzidos com MC 2,0 em função de ω/v [v (mm/min) e ω (rev/min)]. adaptado de [18].



As geometrias dos canais produzidos com a ferramenta MC 1,0, ainda que bastante irregulares, ficam mais próximas a formas trapezoidais, conforme apresentado na Tabela 5.9

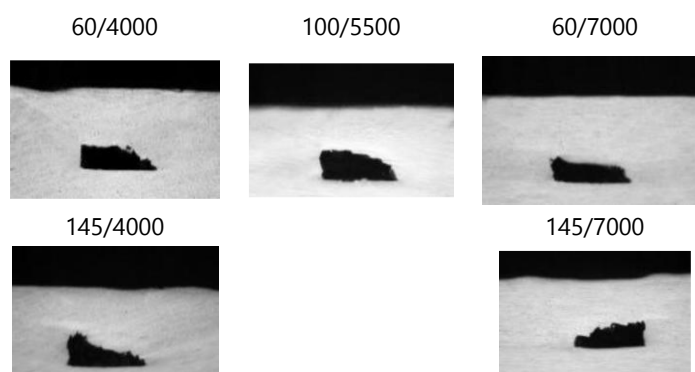
Tabela 5.9 - Caracterização geométrica de canais produzidos com MC 1,0 em função de ω/v [v (mm/min) e ω (rev/min)]. adaptado de [18].



A geometria dos canais com formato aproximadamente trapezoidais foi observada com a utilização das ferramentas MC 0,5, com o lado de avanço maior, relativamente reto e o lado em retrocesso com aresta menor, com configuração não linear que foram abordados por [17] e [53], de acordo com o regime de fluxo de material extraído.

A Tabela 5.10 apresenta as geometrias obtidas no processamento:

Tabela 5.10 - Caracterização geométrica de canais produzidos com MC 0,5 em função de ω/v [v (mm/min) e ω (rev/min)]. adaptado de [18].



5.2.5.2 Influência da variação dos parâmetros utilizados nos canais produzidos.

Com o propósito de investigar a influência dos parâmetros na geometria dos canais e selecionar os melhores resultados para serem caracterizados geometricamente e metalograficamente, apresentam-se as várias combinações testadas, onde se fixou um dos parâmetros " v " ou " ω " e foram colocados na forma de tabelas para melhor identificação e comparação.

Os resultados são apresentados mediante cores para identificação, a saber:

- Verde - bons resultados; 
- Amarelo - canais que se formaram, mas não tem uma geometria ideal ou apresentam pequenos defeitos superficiais; 
- Vermelho - não se formaram canais contínuos ou o pino fraturou, e 
- Branco - parâmetros não foram testados. 

As diferentes combinações de parâmetros realizadas com a ferramenta MC 2,0 são apresentadas na Tabela 5.11

Tabela 5.11 - Avaliação dos ensaios com MC 2,0 em função de ω/v [v (mm/min) e ω (rev/min)].

v/ω	1800	2100	2440	2750	3000
50					
75					
100					
125					
145					
160					
180					
220					

Para a ferramenta MC 1,0 adotou-se os mesmos conceitos que se utilizou com a ferramenta MC 2,0.

Os parâmetros preliminares foram: $v = 50$ mm/min e $\omega = 2440$ rev/min, os mesmos utilizados nos ensaios preliminares e, na sequência, foram feitos ensaios com avanços diferentes para cada rotação adotada. Procurou-se inicialmente, manter a velocidade angular a mais uniforme possível para garantir a integridade do pino da ferramenta, pois conforme diminuísimos o diâmetro do pino, também sua resistência mecânica fica menor e, a seguir, os parâmetros foram modificados.

As comparações de resultados dos ensaios com os parâmetros utilizados estão apresentadas na Tabela 5.12 a seguir:

Tabela 5.12 - Avaliação dos ensaios com MC 1,0 em função de v (mm/min) e ω (rev/min).

v/ω	2000	2440	2800	3200	3800
50					
75					
100					
125					
145					
160					
180					

Ao verificar os resultados dos ensaios, observa-se que, com os parâmetros de $v = 160$ mm/min e $\omega = 2000$ rev/min, eles não seguem a mesma tendência observada nos demais ensaios com velocidades de avanço cada vez maiores observadas nos ensaios anteriores, utilizando o mesmo ω .

Com a ferramenta MC 0,5, adotou-se os parâmetros de $v = 50$ mm/min e $\omega = 2440$ rev/min, porém, o pino da ferramenta fraturou e então, adotou-se velocidades de rotação maiores para que a velocidade angular aumentasse e com isso, diminuir as forças incidentes sobre o pino da ferramenta.

Na Tabela 5.13 são apresentadas as combinações de parâmetros de " v " e " ω " utilizadas em vários ensaios com a avaliação dos resultados obtidos.

Ao analisar os resultados obtidos, nota-se que, com a utilização de velocidades de avanço maiores e velocidades de rotações menores obtiveram-se melhores resultados, da mesma forma como aconteceu nos ensaios anteriores com a utilização de ferramentas de pinos com diâmetro maiores.

Tabela 5.13 - Avaliação dos ensaios com MC 0,5 em função de v (mm/min) e ω (rev/min).

v/ω	4000	5500	7000	8500
24				
40				
60				
80				
100				
120				
145				

Podemos concluir que o processo μFSC é muito sensível a pequenas variações, sendo que além de v e ω , há outros parâmetros que interferem no processo. São eles: distância entre o *shoulder* e a superfície da amostra, temperatura de processamento, empenamento da amostra e variações da espessura da amostra, mostrados na Tabela 5.14.

Por se tratar de processamento por controle de posição, a distância entre o *shoulder* e a amostra é muito importante no processo. Ela é estipulada no início do canal e é responsável por permitir a saída de parte do material removido pelo pino e pelo fechamento do canal, interferindo na temperatura do processo.

Se houver empenamentos e/ou variações de espessura na amostra, a distância entre o *shoulder* e a amostra pode variar, pois essa distância se situa entre 0,01 mm e 0,06 mm e com isso, a temperatura do processo também pode variar, dificultando ou mesmo impedindo a formação do canal.

Nestas condições, se a distância for aumentada, poderá ocorrer a abertura do canal à superfície ou, se diminuir, tendendo a zero, poderá ocorrer que o material que seria removido pelo pino não seja removido e com isso, não teríamos a formação do canal.

Isso pode explicar o fato de que em alguns dos ensaios (em vermelho nas Tabelas 5.8 e 5.9), não se formaram canais.

Tabela 5.14 - Parâmetros e suas influências.

Parâmetros	Influência no processo		
	Pouca	Média	Elevada
Velocidade de avanço	✓	✓	
Revoluções por minuto	✓	✓	
Espaçamento <i>shoulder</i> /amostra		✓	✓
Temperatura do processo		✓	✓
Variação na espessura da chapa		✓	✓
Empenamento da chapa		✓	✓

De acordo com a classificação proposta por Kandlikar e Grande [45]e, segundo relatado por [18], os menores canais em relação ao diâmetro hidráulico foram produzidos pela ferramenta MC 0,5 e com os parâmetros de $v = 100$ mm/min e $\omega = 8500$ rev/min, gerando o canal estável de menor diâmetro hidráulico: $D_h = 216$ μm . A velocidade angular nestas condições foi de 0,223 m/s e o passo da ferramenta foi de aproximadamente 0,012 mm/rev.

Este D_h obtido está ligeiramente acima da classificação proposta por [45]para os microcanais, que seria de 10 a 200 μm .

Porém, ao analisar e testar o canal do ensaio K4, conforme Figura 5.16, verificou-se que era contínuo e regular, apresentando pequenos defeitos na superfície que não comprometiam sua integridade e obteve-se um $D_h = 191$ μm , caracterizando-o como **microcanal**, podendo ser observado na Tabela 5.15. Na obtenção deste canal, utilizou-se os parâmetros de $v = 80$ mm/min e $\omega = 7000$ rev/min. A velocidade angular nestas condições foi de 0,183 m/s e o passo da ferramenta foi de aproximadamente 0,011 mm/rev.

Tabela 5.15 - Diâmetro hidráulico (μm) dos canais com MC 0,5 em função de ω/v [v (mm/min) e ω (rev/min)].

v	ω			
	4,000	5,500	7,000	8,500
20	0.263	0.264	0.225	0.255
40	0.290	0.281	0.279	0.253
60	0.258	0.294	0.254	0.272
80	0.274	0.285	0.191	
100	0.245	0.305	0.242	0.216
120	0.246	0.287	0.231	
145	0.268	0.269	0.279	0.259
	0.191		0.305	

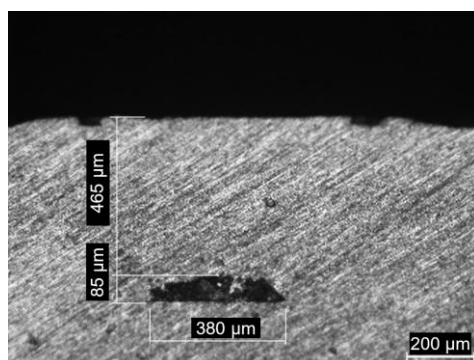


Figura 5.16 - Dimensões do microcanal K4 com $D_h = 0,191$ μm produzido com MC 0,5, com $v = 80$ mm/min e $\omega = 7000$ rev/min

5.2.4.3 Influência dos parâmetros na área da secção transversal dos canais produzidos.

Para estabelecer uma comparação entre os parâmetros utilizados com a ferramenta MC 1,0 e MC 2,0 nos ensaios já ilustrados anteriormente, em relação D_h dos resultados obtidos, observa-se que, com velocidades de avanço maiores e velocidades de rotação menores, até determinados limites, as áreas das secções transversais são maiores, como apresentados na Tabela 5.16 e 5.17, sendo verificados anteriormente por [17], na produção de canais em macroescala.

Tabela 5.16 – Área (mm^2) em função de ω/v [v (mm/min) e ω (rev/min)].

v (mm/min)	ω (rev/min)			
	2000	2440	2800	3200
50	0,457	0,406	0,318	0,511
75	0,472	0,350	0,374	0,462
100	0,460	0,392	0,390	0,480
125	0,476	0,348	0,377	0,471
145	0,485	0,388	0,397	0,448
160	0,394	0,403	0,369	0,487
180	0,387	0,384	0,387	0,480
0.318			0.511	

Tabela 5.17 – Área (mm^2) em função de ω/v [v (mm/min) e ω (rev/min)].

v/ω	1800	2100	2440	2750	3000
50			0,359	0,093	0,158
75	0,335	0,391	0,564	0,091	0,134
100	0,316	0,437	0,221	0,13	0,153
125			0,249	0,2	0,147
145	0,532	0,561	0,326	0,151	0,266
160	0,777	0,525		0,146	0,162
180	0,546	0,528	0,402	0,204	0,387
220			0,426	0,309	
0,091 mm²			0,777 mm²		

A influência da " v " na área da secção transversal para um " ω " fixado em 2100 rev/min pode ser verificado na Figura 5.17, onde se observa que, com o aumento de " v ", também aumenta a altura do canal e consequentemente, sua área da secção transversal.

Ao se trabalhar com velocidades tangenciais constantes e velocidades de avanço maiores, até um determinado limite, o passo do processo (v/ω) aumenta e a tendência é termos temperaturas de processo menores, porém com maior fluxo ascendente de material.

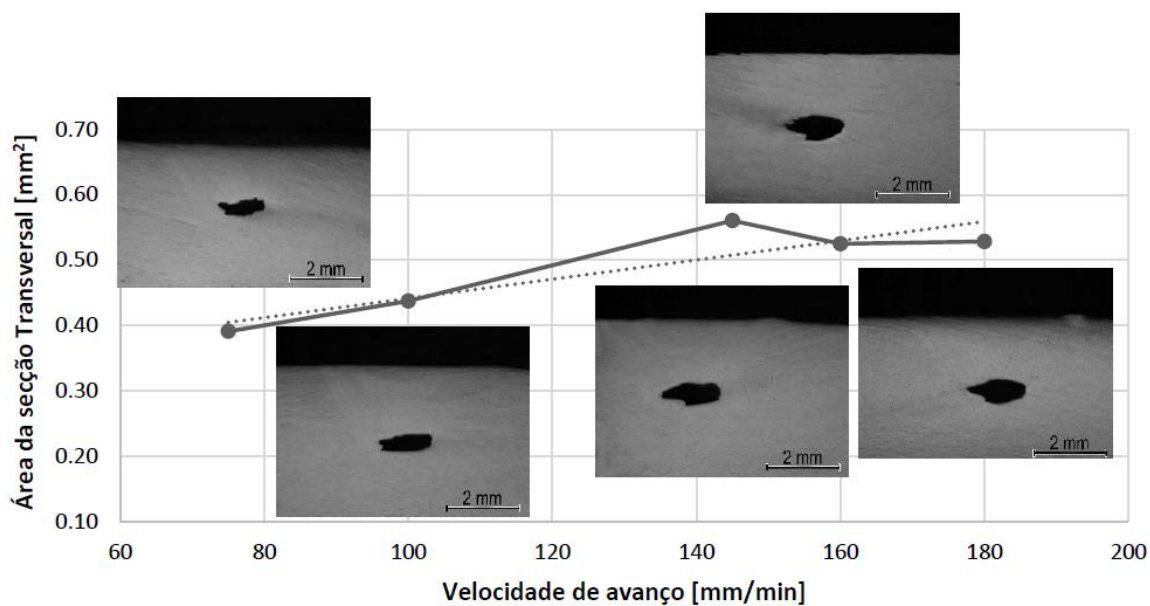


Figura 5.17 - Variação da área da secção transversal em função da velocidade de avanço para $\omega=2100$ rev/min - adaptado de [18].

O mesmo pode ser observado quando fixamos a velocidade de avanço "v", como no exemplo da Figura 5.18, em 145 mm/min e variamos " ω ". Pode-se verificar que conforme aumentamos ω , a secção transversal diminui.

Isto se deve ao fato de que ao aumentarmos " ω ", o passo do processo diminui e consequentemente, o fluxo de material ascendente também diminui, o que ocasiona diminuição da sua secção transversal inclusive, provocando aumento da temperatura de processamento.

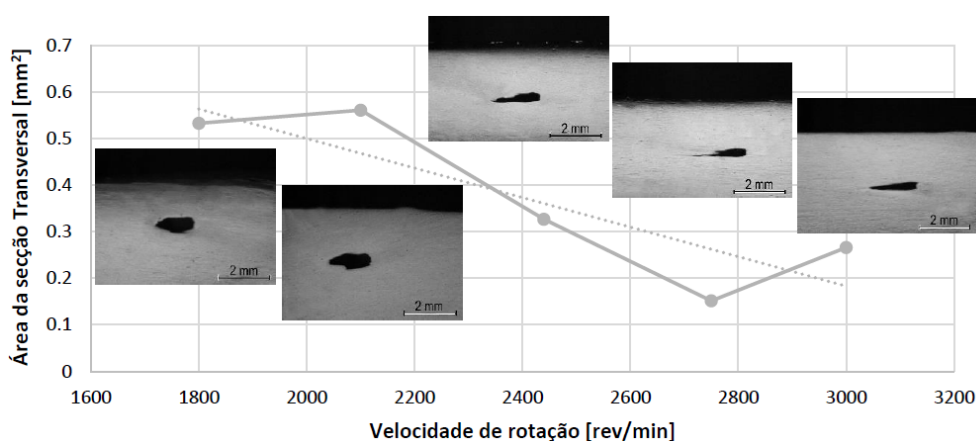


Figura 5.18 - Variação da área da secção transversal do canal em função da velocidade de rotação, para $v=145$ mm/min - adaptado de [18].

5.2.4.4 Influência do número de entradas nas roscas dos pinos

Com o objetivo de analisar o efeito que poderiam causar na geometria dos canais, foram produzidos e utilizados pinos roscados com uma, duas e três entradas de rosca.

Foram selecionados canais que permitiram analisar a influência do número de entradas da rosca na geometria dos canais entre os ensaios realizados com as ferramentas MC 1,0; MC 1,0-2E e MC 1,0-3E.

Verificou-se que a área da secção transversal aumenta quando o número de entradas da rosca também aumenta, como já havia sido verificado por Salimi et al. [30], com a conclusão de que a taxa do fluxo de material ascendente é proporcional ao número de entradas e são comparados entre si por meio de tabelas comparativas referentes aos critérios adotados, conforme apresentado na Figura 5.19 e Figura 5.20

Observa-se que o número de entradas nas roscas interfere nos resultados obtidos, sendo que, com maior número de entradas nas roscas melhoram os resultados obtidos.

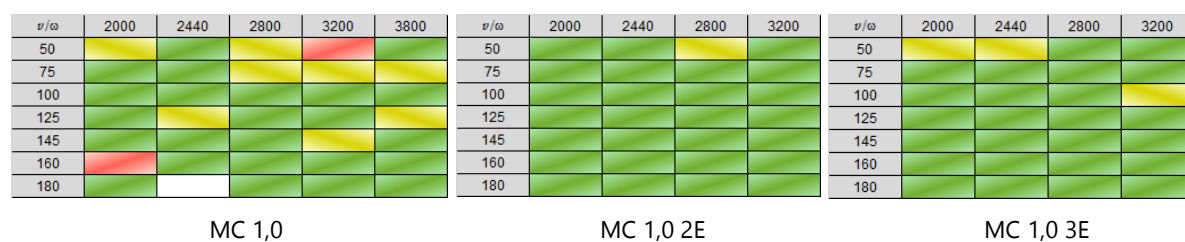


Figura 5.19 - Avaliação dos ensaios com MC 1,0 (a esquerda); MC 1,0 2E (ao centro) e MC 1,0 3E (a direita) em função de v (mm/min) e ω (rev/min).

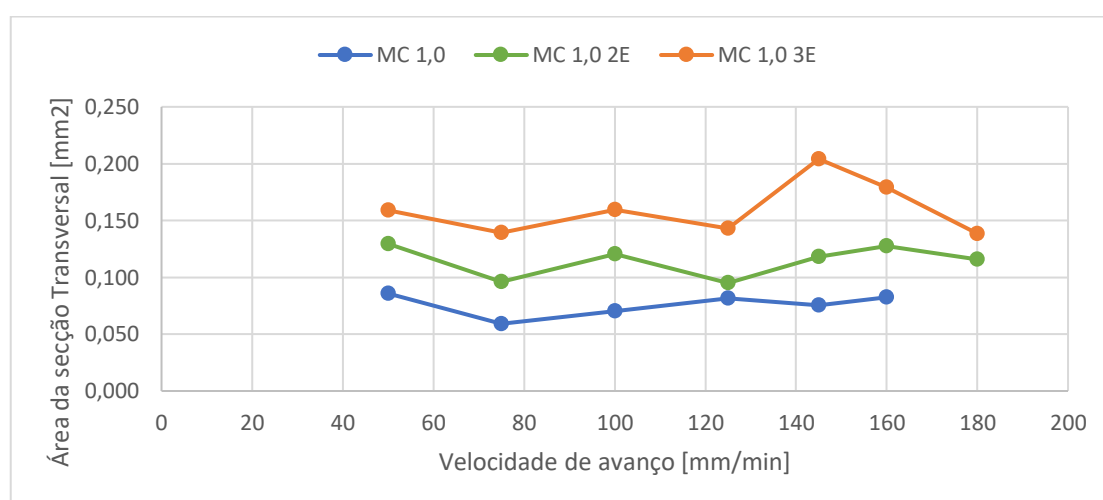


Figura 5.20 Variação da área da secção transversal do canal em função do número de entradas de rosca para 2440 rev/min, - adaptado de [18].

Os canais produzidos pelas três ferramentas com $v = 145 \text{ mm/min}$ e $\omega = 2440 \text{ rev/min}$ são apresentados na Figura 5.21, onde observa-se que a altura do canal aumenta em função do número de entradas na rosca. Isto se deve ao maior fluxo de material ascendente.

Também foi observado um aumento da área da secção transversal da ordem de 74,4% do canal produzido com MC 1,0 3E em relação ao canal produzido com MC 1,0 e 50,5% em relação ao canal produzido com MC 1,0 2E.



Figura 5.21 - Comparação dos canais produzidos com $v = 145 \text{ mm/min}$ e $\omega = 2440 \text{ rev/min}$ - adaptado de [18].

5.2.6 Caracterização metalográfica por microscopia ótica

A caracterização metalográfica por microscopia ótica foi realizada para verificar o comportamento metalográfico da área processada e áreas adjacentes. Seções transversais das amostras μFSC foram polidas e posteriormente atacadas com um reagente de ácido fluorídrico a 3% diluído em H_2O . As amostras foram imersas na solução por 5 a 15 minutos até que fosse obtido o contraste necessário para observar a geometria do canal, detalhes da seção transversal, regiões ao redor do canal, tamanhos de grãos e seus contornos. Após lavagem em água corrente e secagem com álcool etílico PA, as amostras foram analisadas em Microscópio Óptico DMLS, Leica Microsystems acoplado a uma câmera Leica EC3 controlada pelo software LAS ES.

A largura dos canais corresponde aproximadamente ao diâmetro da respectiva ferramenta, ou seja, MC 2,0, MC 1,0 e MC 0,5 geram canais com larguras de $\approx 2,0 \text{ mm}$, $1,0 \text{ mm}$ e $0,5 \text{ mm}$, respectivamente.

A Figura 5.22, Figura 5.23 e Figura 5.24 apresentam, respectivamente, amostras contrastadas, produzidas com as ferramentas MC 2,0, MC 1,0 e MC 0,5. Identificam-se regiões microestruturais relevantes, sendo ZP a zona processada (nugget) e a ZTMA (zona termomecanicamente afetada), onde são observados LA = lado em avanço e LR = lado em recuo. As

dimensões relevantes do canal são apresentadas. A linha tracejada amarela marca o local das medições de microdureza.

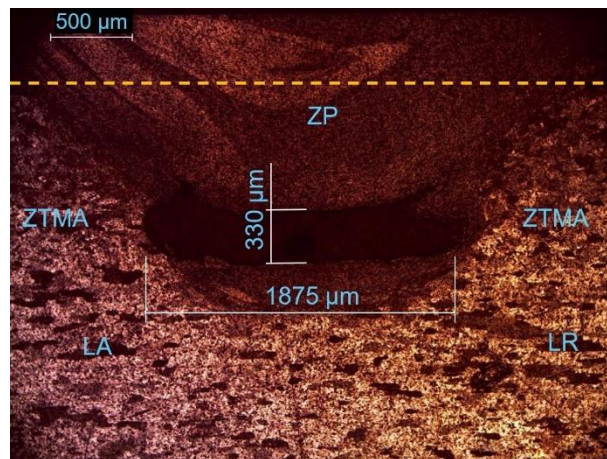


Figura 5.22 - Canal E 10, produzido com MC 2,0 - $v = 180$ mm/min e $\omega = 1800$ rev/min

A diferença de tamanho de grão diferencia estas duas regiões. O nugget possui uma região com grão mais refinado, consequência da recristalização dinâmica provocada pela deformação termoplástica sofrida durante o processamento, semelhante ao que pode ser observado para canais maiores [20], [53], [54].

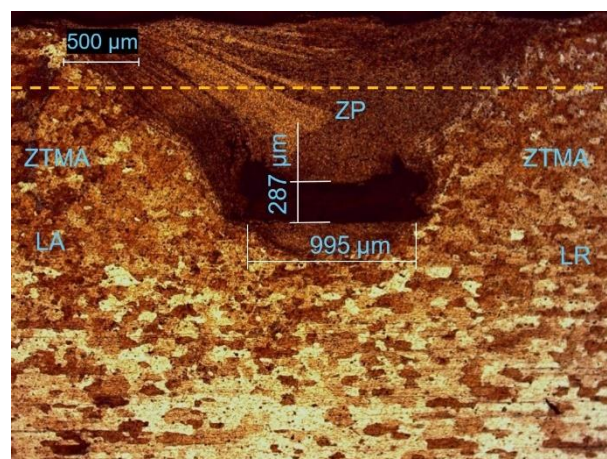


Figura 5.23 - Canal M 24, produzido com MC 1,0 - $v = 100$ mm/min e $\omega = 2800$ rev/min

O material que flui para cima é depositado na superfície e compactado pelo *shoulder*, fechando assim o teto do canal [31] que já tinha sido observado para a macroescala por [17].

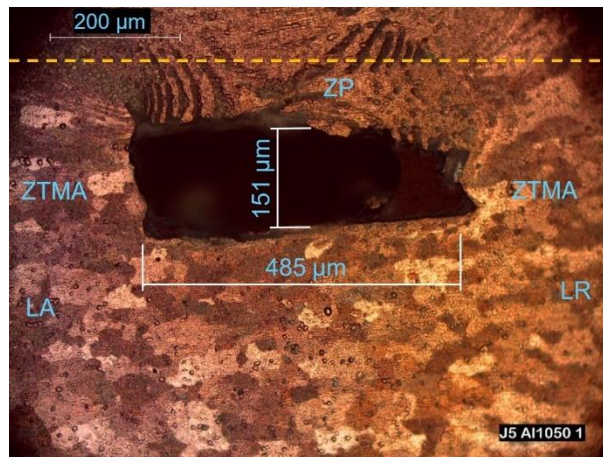


Figura 5.24 - Canal J 5, produzido com MC 0,5 - $v = 100$ mm/min e $\omega = 5500$ rev/min.

Identifica-se na região do nugget, o fluxo de material ascendente, principalmente no lado em retrocesso, que se deposita deste lado sob a forma de rebarba na superfície. O nugget perto da superfície é consideravelmente mais largo.

Na Figura 5.25 observa-se o canal J5 produzido com MC 0,5 após o polimento eletroquímico realizado em solução de 10 mL ácido fluorbórico para 200 mL água deionizada com potencial de 10 V durante 35 min. As imagens foram obtidas em microscópio com luz polarizada e são indicadas algumas regiões de interesse que serão apresentadas na Figura 5.31.

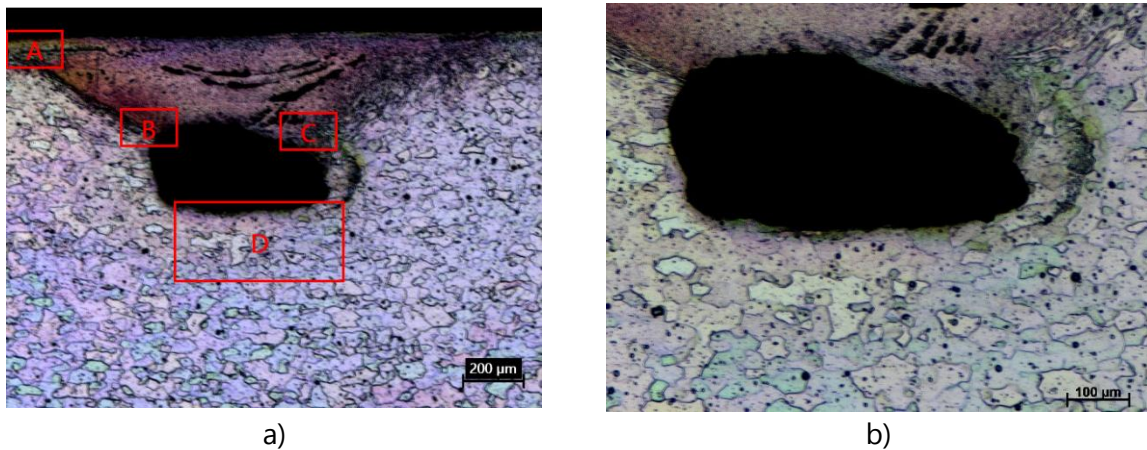


Figura 5.25 - Canal J5 produzido com MC 0,5 - $v = 100$ mm/min e $\omega = 5500$ rev/min; a) indicação das regiões ampliadas; b) ampliação da região do canal.

Observa-se que há uma diferença do tamanho de grão entre a ZTMA e o nugget (Figura 5.26 A e 5.26 B) e, entre o material base e a ZTMA. Devido a recristalização na zona processada o tamanho de grão é muito pequeno. Também, devido a essa diferença de tamanho de grão, forma-se uma "linha" divisória entre as regiões.

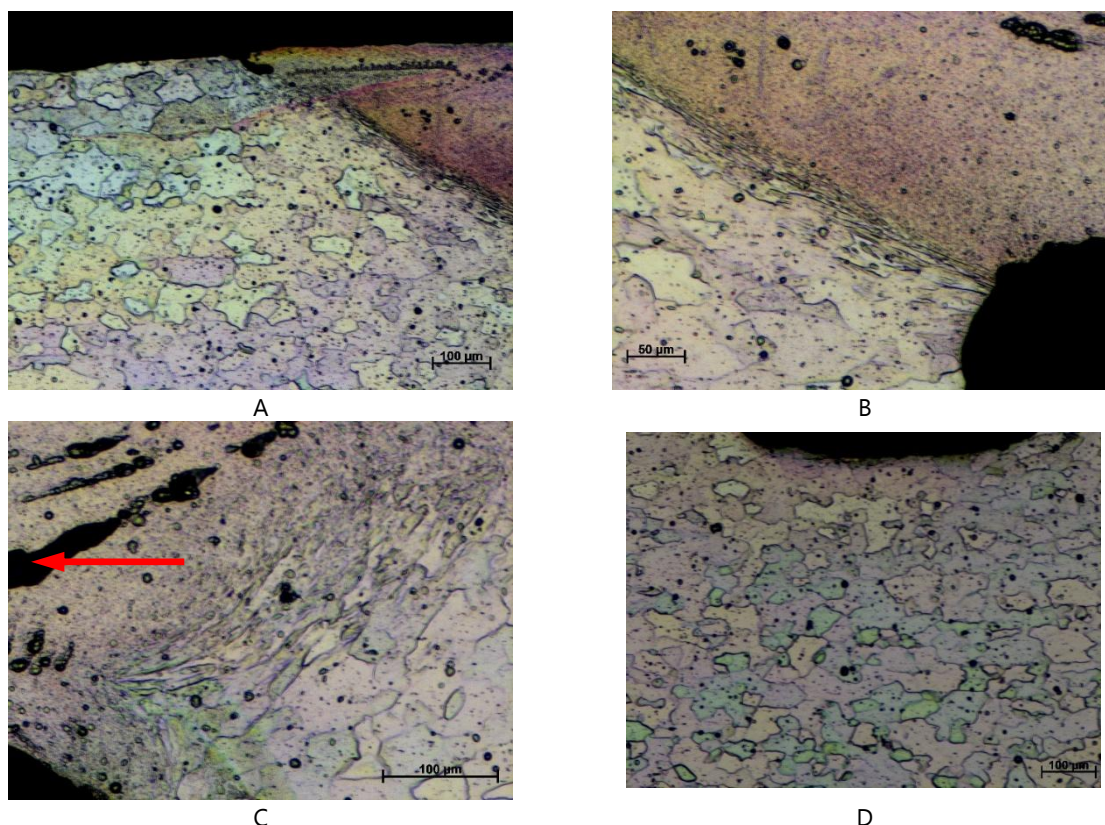


Figura 5.26 - Regiões ampliadas do canal produzido com MC 0,5.

Na Figura 5.26 "C", observam-se regiões escuras. Estas regiões são "vazios" que se formaram durante o processamento, mas que não atingem a superfície, ou se atingem, não se comunicam com o interior do canal. Foram feitos testes de continuidade e estanqueidade e não foram observados defeitos de estanqueidades. Na Figura 5.26 "D", observa-se que há uma diminuição do tamanho de grão na região do fundo do canal, em comparação ao metal base.

5.2.7 Ensaio de microdureza

A Figura 5.27, 5.28 e 5.29 mostram os resultados das medições de microdureza feitas na metade da espessura do teto do canal ao longo de uma linha paralela à superfície da placa (conforme marcado pelas linhas tracejadas amarelas na Figura 5.22, Figura 5.23 e Figura 5.24).

Foi adotado um espaçamento de 200 µm entre as indentações para amostras produzidas pelas ferramentas MC2.0 e MC 1.0, e de 150 µm para amostras produzidas pela ferramenta MC0.5.

A microdureza dos tetos dos canais produzidos com as ferramentas MC 2.0 (Figura 5.33), MC 1.0 (Figura 5.34) e MC 0.5 (Figura 5.35) revelam as diferenças correspondentes na largura

de cada zona processada. O perfil de microdureza observado nos três casos é semelhante ao já documentado por Sun Y., et al. [55], para uma liga de alumínio da série 1050, sem tratamento térmico e processada por *FSW*. A dureza na região processada é superior à dureza média do material não processado.

Grãos de tamanho nano ou micron podem formar-se, dependendo se for aplicado ao material processado um resfriamento rápido forçado [56].

Esse aumento de dureza é atribuído à deformação viscoplástica severa e à maior dissipação de calor, que provocam a recristalização dinâmica, resultando em refinamento de grão que aumenta a dureza do material, conforme observado anteriormente [6][57].

Além disso, pode-se observar que a magnitude do aumento da dureza varia inversamente com o diâmetro da ferramenta (ou seja, dureza máxima com MC 2,0 < dureza máxima com MC 1,0 < dureza máxima com MC 0,5). Isto pode ser atribuído ao tempo de permanência menor em temperaturas elevadas e/ou resfriamento mais rápido ao usar ferramentas menores que têm uma zona processada menor, o que resulta em grãos mais finos.

Em outras palavras, a zona processada possui um significativo refinamento de grão, ou seja, de acordo com a relação de Hall-Petch, era esperado esse aumento da dureza nesta região. Contudo, é verificado que estes aumentos são diferentes em relação ao diâmetro da ferramenta adotada. Assim, pode-se dizer que além do refinamento de grão, o mecanismo de endurecimento por deformação (work hardening) devido ao aumento na quantidade de discordâncias (Bailey-Hirsh's relation) também foi significativo para o aumento de dureza verificado.

O conceito de densidade de energia térmica pode ser expresso como sendo a quantidade de energia térmica armazenada por unidade de volume (J/m^3) ou por unidade de massa (J/kg). Também é possível admitir que a quantidade de energia térmica para se chegar ao estado viscoplástico é igual para todos os diâmetros de ferramentas, haja vista que para todos os diâmetros de ferramentas, procurou-se manter a velocidade angular ou tangencial.

Neste contexto, considerando que a redução do diâmetro da ferramenta causa um aumento na densidade de energia do processo e consequentemente uma redução do tempo de permanência em temperaturas elevadas, pode-se concluir que o aumento de dureza com a redução do diâmetro da ferramenta está diretamente relacionado ao nível de recuperação que ocorre durante o resfriamento.

Ainda, deve-se considerar que durante o processamento há a recristalização dinâmica e a continuidade da deformação, ou seja, os grãos são simultaneamente refinados e deformados.

Durante o arrefecimento (após a passagem da ferramenta), o tempo de permanência em temperaturas mais elevadas (maiores diâmetros) ditará o nível de recuperação que esta região sofrerá. Portanto, uma menor densidade de energia (maior tempo em elevadas temperaturas e maior diâmetro da ferramenta) tenderá a gerar um material mais mole. Similar relação é tipicamente observada na soldagem de ligas de Al endurecidas por deformação, onde em função do aporte térmico é observado um maior ou menor grau de amolecimento na região da ZTA [58].

Nas três amostras, a dureza é maior na região processada diretamente pelo pino e, ao se distanciar dessa região, diminui gradativamente na região processada no *shoulder* até atingir a dureza do material base não processado.

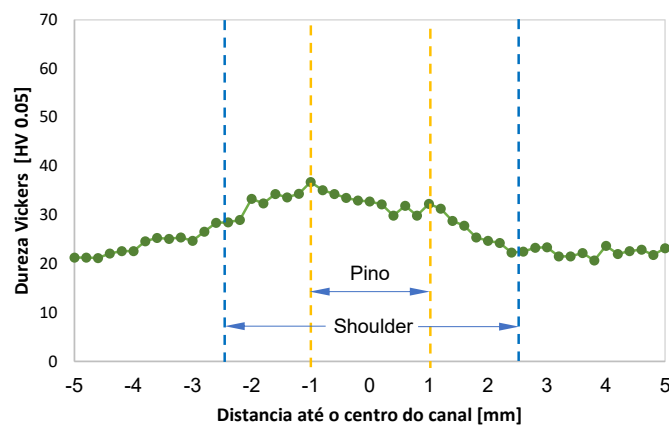


Figura 5.27 Ensaio de microdureza realizado em amostra com canal produzido com MC 2,0 (shoulder Ø 5 mm e pino Ø 2 mm) adaptado de [18].

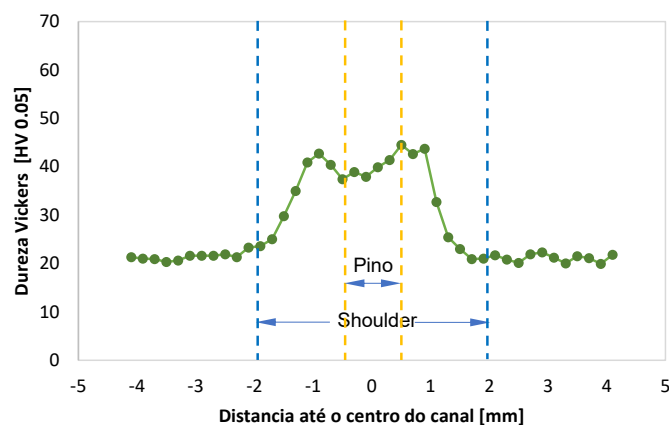


Figura 5.28 Ensaio de microdureza realizado em amostra com canal produzido com MC 1,0 (shoulder Ø 4 mm e pino Ø 1 mm). adaptado de [18].

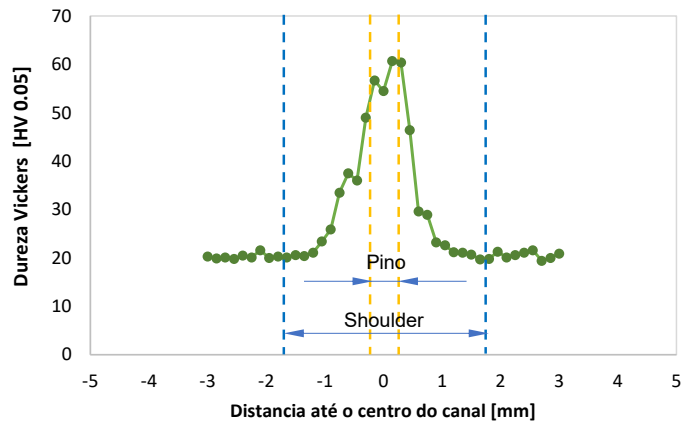


Figura 5.29 Ensaio de microdureza realizado em amostra com canal produzido com MC 0,5 (shoulder $\varnothing$ 3,5 mm e pino $\varnothing$ 0,5 mm) adaptado de [18].

5.2.8 Ensaios termográficos

Com o objetivo de verificar as temperaturas máximas em tempo real durante os ensaios, foram realizadas medições de temperatura usando um aquisitor de dados National Instruments DAQ e assistido por um programa de software LabView para processamento de dados de sinal, utilizando termopares do tipo "K" em conjunto com câmera termográfica Fluke Ti 400 IR Fusion Technology.

Para esse fim, foram medidas as temperaturas máximas por meio de quatro termopares, alinhados um de cada lado do canal, em dois pontos distintos localizados na superfície da peça ao longo da trajetória do ensaio e localizados o mais próximo possível do *shoulder*, como mostra a Figura 5.30.

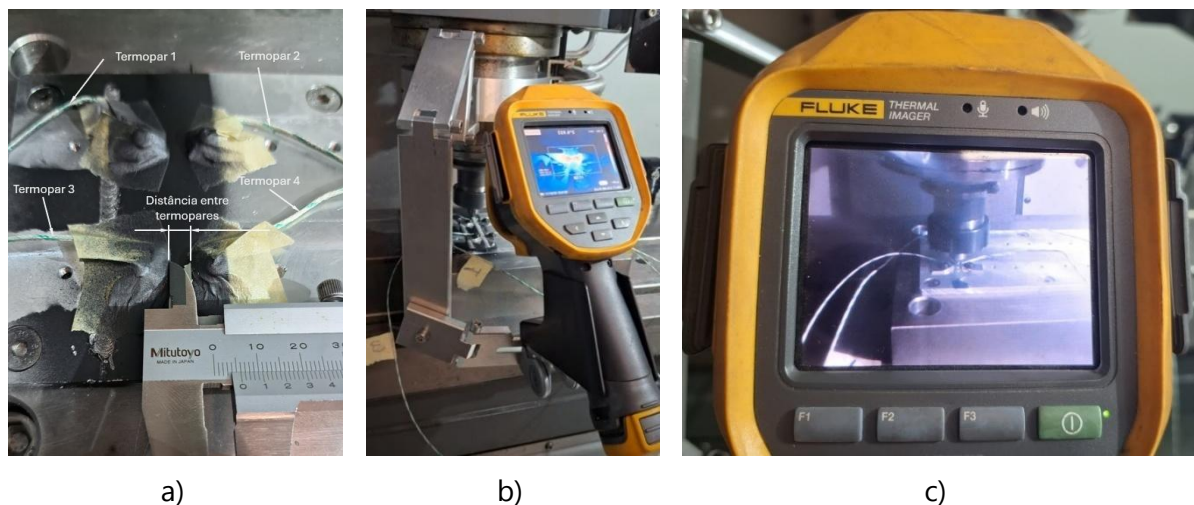
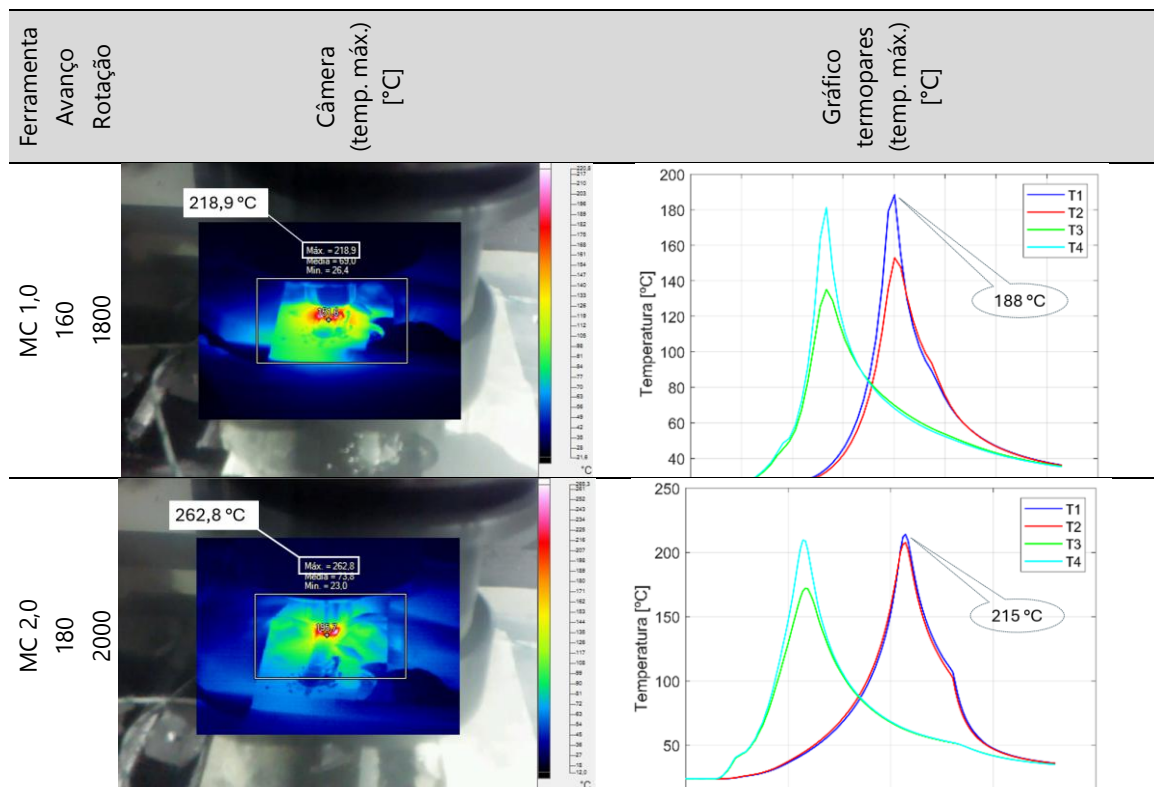


Figura 5.30 – Montagem para medição de temperaturas máximas com termopares e com a câmera termográfica: a) montagem e distanciamento dos termopares; b) montagem da câmera termográfica e c) focalização do ponto de medição da temperatura na câmera termográfica.

Para este ensaio, foram utilizadas as ferramentas MC 1,0 e MC 2,0. Utilizou-se os parâmetros de avanço e rotação já descritos em 5.1.2, que tiveram canais contínuos e uniformes, onde se presumiu que teriam os maiores gradientes de temperatura no processo, conforme apresentado na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 - Valores das temperaturas envolvidas no processo.

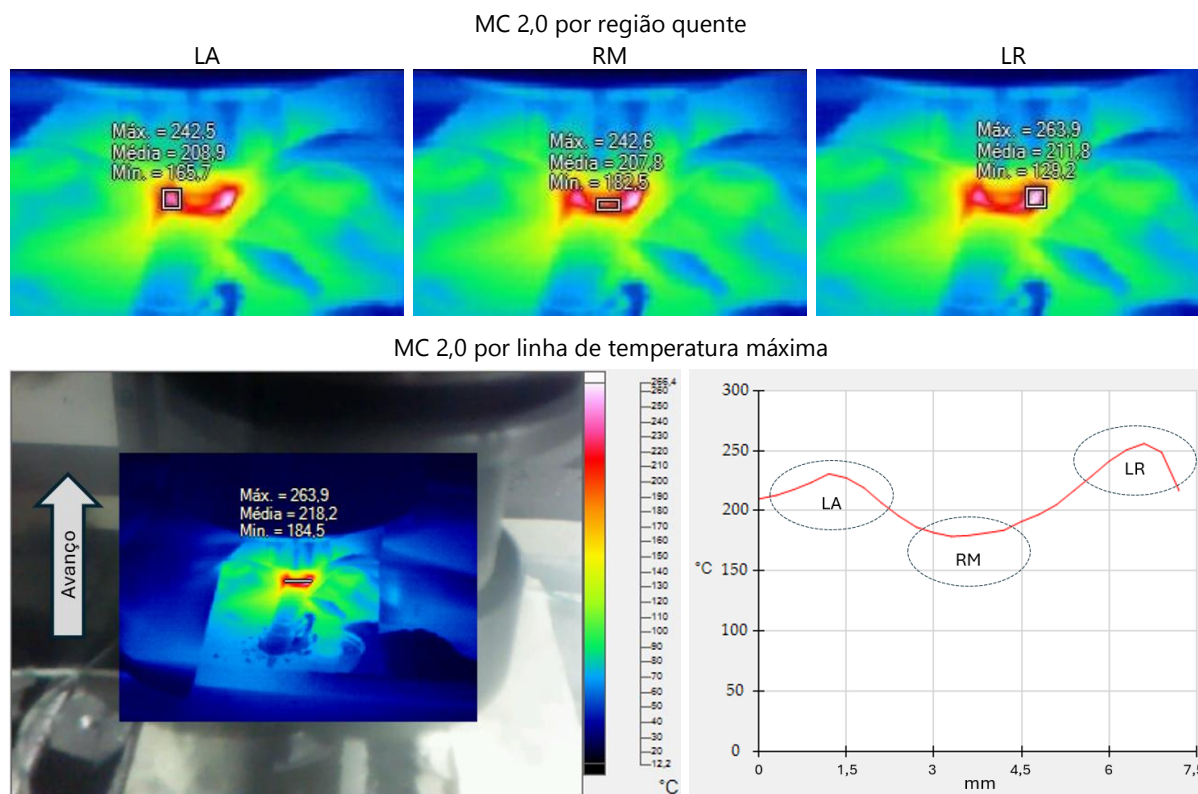


As temperaturas máximas observadas foram de: para MC 1,0 ~ 190 °C nos termopares e de ~ 220 °C na câmera termográfica e; para MC 2,0 ~ 215 °C nos termopares e de ~ 263°C na câmera termográfica, conforme apresentado na Tabela 5.18.

Na Tabela 5.19 é apresentada uma região média (RM) que corresponde à temperatura na região média imediatamente posterior ao *shoulder*, que é cilíndrico e, portanto, está mais afastada e com isso, já participa da dissipação de calor em comparação com o LR, porém é quase idêntica à temperatura do LA.

As regiões são representadas por retângulos posicionados nas regiões de interesse e, a linha foi posicionada no ponto onde se registrou a maior temperatura.

Tabela 5.19 - Temperatura $t = 54$ segundos.



As diferenças de temperaturas indicadas pelos termopares e câmera termográfica para cada ferramenta, se deve ao fato de que a câmera está focada no ponto central, onde está ocorrendo o processo e os termopares ficam o mais próximos possível do ponto onde está ocorrendo o processo, distanciados com a menor medida possível do *shoulder* (quase tocando-o).

No gráfico de temperaturas da Tabela 5.19, observa-se um declínio na temperatura. Isso se deve ao fato de que, quando se utiliza uma linha no software da câmera termográfica, a região média está imediatamente atrás do *shoulder*, na área onde já está ocorrendo a dissipação de calor, indicando a temperatura mínima, que registra 184,5 °C.

Com o objetivo de investigar como ocorre a dissipação de calor durante o processo, foram realizados vários ensaios utilizando 4 termopares alinhados com relativa precisão no comprimento (variação de, no máximo, 0,3 mm) e com excelente precisão no distanciamento entre termopares, distanciados em 2; 4; 6 e 8 mm, por meio de estrias/sulcos na peça de trabalho, em pontos distintos e com distância de 2 mm entre o 1º termopar e o *shoulder*. Para tal, foram respeitadas as condições de arrefecimento total (temperatura ambiente) entre os ensaios.

A fixação dos termopares foi feita com presilhas de posicionamento e fixação que tiveram respeitados o isolamento entre termopares.

Para cada ferramenta utilizada, ou seja, MC 0,5; MC 1,0 e MC 2,0, foram realizados 3 ensaios no lado de avanço das ferramentas (LA) e, 3 ensaios no lado de retrocesso (LR), utilizando os melhores parâmetros já descritos em 5.1.2, sendo conforme apresentado na Figura 5.31.

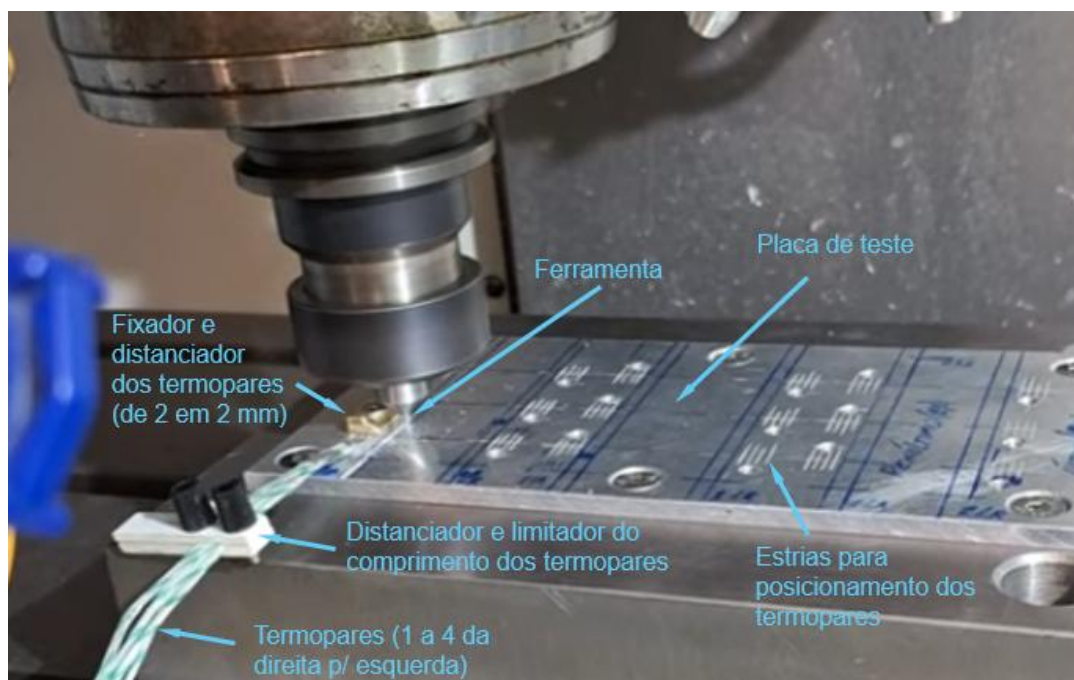
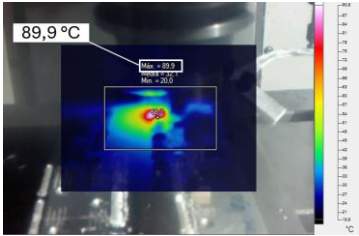
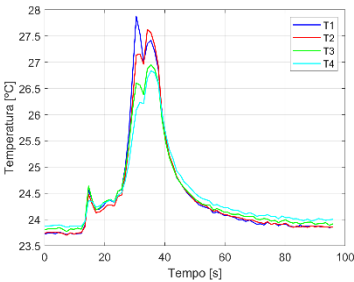
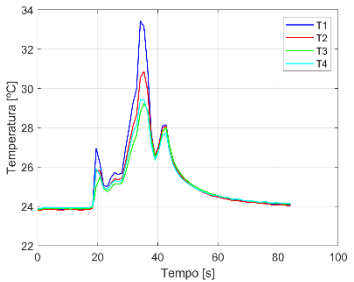
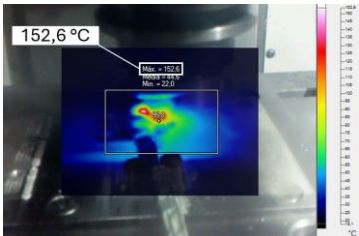
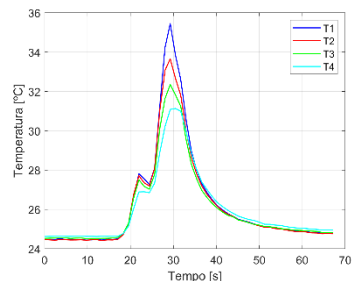
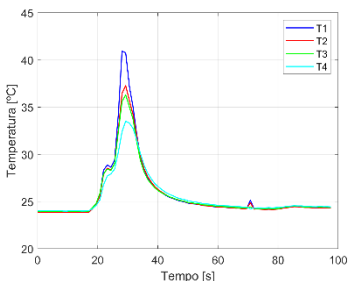
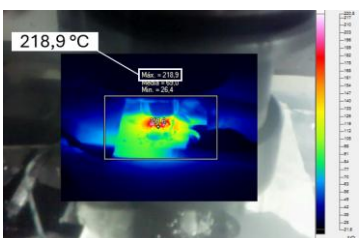
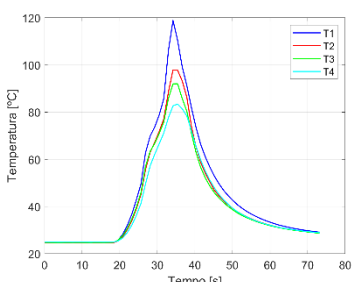
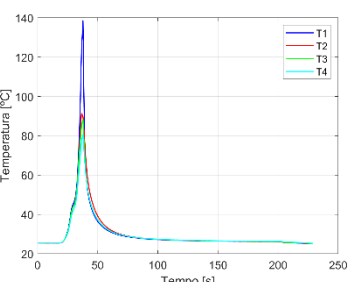


Figura 5.31 – Montagem dos ensaios para medição da dissipação de temperatura nos lados de avanço e retrocesso do processo. (Link para "[vídeo](#)")

A seguir, na Tabela 5.20, podem ser observadas as variações de temperatura nos ensaios de dissipação de calor.

Tabela 5.20 - Valores das temperaturas envolvidas no processo.

Ferramenta	Câmera termográfica	LA - Lado em avanço	LR - Lado em retrocesso
MC 0,5			
MC 1,0			
MC 2,0			

Verifica-se variação de temperatura entre os lados de avanço (LA) e de retrocesso (LR) porém, se observou que, no lado em retrocesso a temperatura foi sempre maior do que no lado em avanço (LA), como já havia sido observado por [51] e [35].

Segundo [52], essa diferença de temperatura pode ter ocorrido devido ao fato de que, em todos os ensaios em que foram feitos testes de macrografia, foi verificado que no lado em avanço sua altura é maior do que no lado em retrocesso e praticamente não há material processado no lado em avanço. Já o lado em retrocesso fica com mais material processado e altura menor (gerando no canal um formato assimétrico), o que significa que há um fluxo maior de material viscoplástico no lado em retrocesso, aumentando a temperatura neste lado.

Também, verifica-se que existe diferença de temperatura entre o que foi medido pela câmera termográfica e os termopares. Isto se deve ao fato de que a câmera termográfica está

focada no ponto de máxima temperatura do processo (no ponto central onde o pino roscado e o *shoulder* estão processando o material) e os termopares estão distanciados a 2, 4, 6 e 8 mm do *shoulder*. Nestes pontos, a temperatura registrada pelos termopares foi bem menor do que a registrada na câmera termográfica, o que indica que a dissipação de calor ocorre de forma intensa.

5.2.9 Ensaios de correntes induzidas

O objetivo deste ensaio foi verificar se através de correntes induzidas seria possível identificar variações de impedância que indicassem a presença do canal. Foram realizados ensaios lineares e ensaios nas serpentinas por meio de c-scans. Os parâmetros controlados foram a área a inspecionar, a frequência e o ganho. Para conhecer quais as frequências a serem utilizadas para as amostras com diferentes canais, esta foi calculada com base nas diferentes profundidades dos canais, na permeabilidade magnética e na condutividade elétrica do material, conforme apresentado na Figura 5.32.

Instrumentação: Os ensaios de inspeção por correntes parasitas foram conduzidos utilizando duas sondas de superfície com eixo reto, fornecidas pela empresa Olympus, ambas com diâmetro de 3,17 mm. As sondas operam em distintas faixas de frequência — 50 a 100 kHz e 100 a 500 kHz — permitindo a adaptação da sensibilidade do método à profundidade e às características do material inspecionado.

Como unidade de leitura, utilizou-se o dispositivo Nortec 600D (Olympus), amplamente empregado em Ensaios Não Destrutivos (END) por corrente parasita. Este equipamento suporta operação em uma faixa de frequência extensa, de 10 Hz a 12 MHz, possibilitando o acoplamento com diversos tipos de sondas. O ajuste de ganho pode ser realizado entre 0 e 100 dB, com incrementos de 0,1 dB ou 1 dB, e o controle do ângulo de fase do sinal é igualmente personalizável, com valores entre 0° e 359,9°, e incrementos finos de 0,1° ou 1°.

Procedimento experimental: A etapa experimental foi realizada com corpos de prova preparados conforme os requisitos de planicidade e acabamento superficial exigidos pela técnica de inspeção eletromagnética. Para garantir a uniformidade e repetibilidade das medições, foi empregada uma mesa de movimentação automatizada do tipo XY, desenvolvida pelo laboratório NOVA NDT Lab, com curso útil de 50 × 50 mm.

O sistema de deslocamento é programado via linguagem G-code, permitindo a varredura sistemática da superfície da amostra. A sonda permanece fixa durante todo o procedimento, enquanto o corpo de prova se desloca linearmente sob ela, assegurando a constância do posicionamento relativo e a estabilidade das condições de medição.

Aquisição de dados: interface de controle e aquisição de dados foi desenvolvida em ambiente LabVIEW, permitindo a integração plena entre os comandos de movimentação da mesa XY e o sistema de aquisição de sinais. O software realiza a leitura, registro e armazenamento dos dados de impedância fornecidos pelo Nortec 600D em tempo real, sincronizando cada ponto de leitura com sua respectiva posição espacial. Essa abordagem garante alta precisão na localização de eventuais descontinuidades ou variações estruturais no interior do material inspecionado, aumentando a confiabilidade dos resultados obtidos.

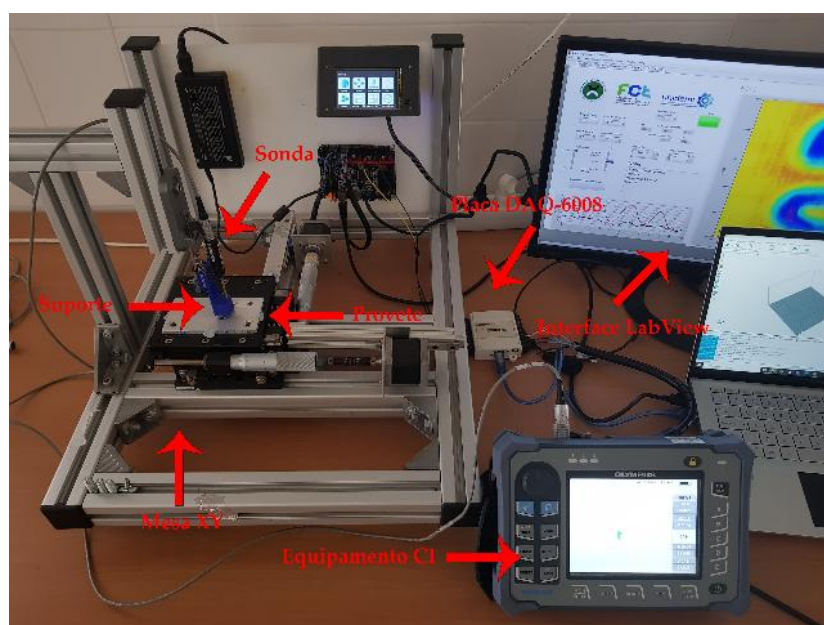
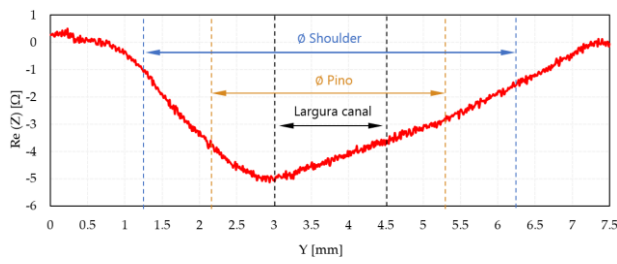
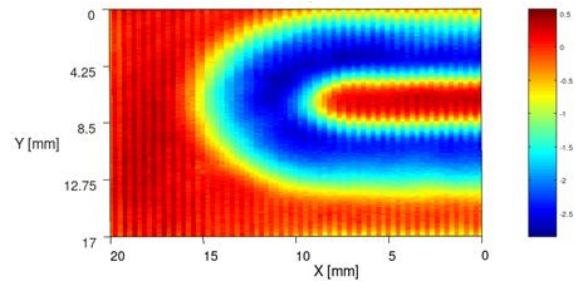


Figura 5.32 - Aparato experimental do ensaio de Correntes Induzidas [41].

As correntes induzidas permitiram detectar variações significativas de impedância nas três dimensões dos canais, com as frequências estudadas variando de 1 kHz a 500 kHz, sendo a frequência que produziu os melhores resultados a de 20 kHz, com maior variação de impedância em uma região mais definida que as frequências anteriores, conforme mostram as figuras 5.33, 5.34 e 5.35.

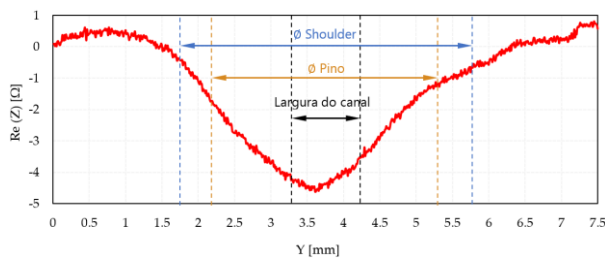


a)

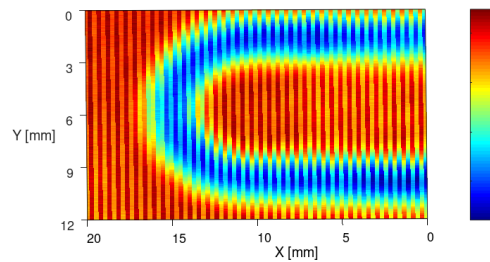


b)

Figura 5.33 - a) Teste de IC em 20 kHz ($\varnothing$ 2 mm); b) C-Scan da serpentina produzido com o pino $\varnothing$ 2 mm a 20 kHz [41]

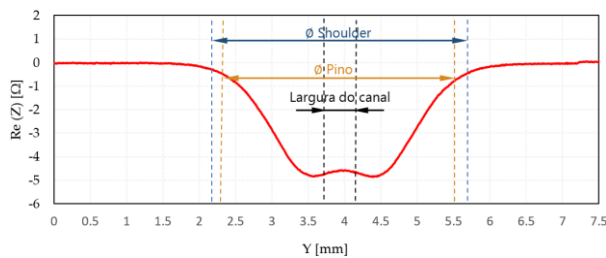


a)

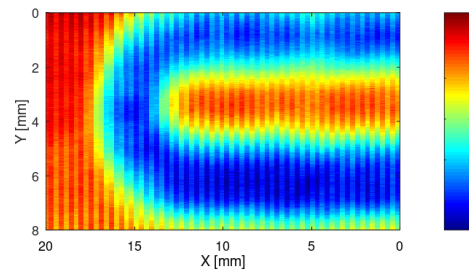


b)

Figura 5.34 - a) Teste de IC em 20 kHz ($\varnothing$ 1 mm); b) C-Scan da serpentina produzido com o pino $\varnothing$ 1 mm a 20 kHz [41]



a)



b)

Figura 5.35 - a) Teste de IC em 20 kHz ($\varnothing$ 0,5 mm); b) C-Scan da serpentina produzido com o pino $\varnothing$ 0,5 mm a 20 kHz [41].

Nos ensaios com os canais produzidos com o pino de 2 mm apesar de existir variações de impedância, a região dessa variação não era bem definida. Os canais produzidos com os pinos de 1 mm e 0,5 mm apresentaram o mesmo comportamento, mas com a região um pouco mais bem definida, não podendo afirmar em nenhum caso a presença exclusiva do canal. Para tentar garantir a presença do canal, foram realizados ensaios com maus canais, onde se verificou uma diminuição da variação da impedância nesses mesmos canais. No caso das serpentinas, nas três dimensões foi possível verificar uma região com variações de impedância indicando a trajetória dos canais.

No caso das bobinas, nas três dimensões, foi possível verificar uma região com variações de impedância indicando a trajetória dos canais [47].

Estes ensaios corroboram com os ensaios de microdureza, pois a parte de cima do canal fica sempre com uma microestrutura mais refinada, ou seja, vai baixar a condutividade e por sua vez isso reflete-se nas correntes induzidas e como essa zona é deformada plasticamente a dureza é também alterada, geralmente inversamente com a condutividade.

5.2.10 Ensaios de continuidade e estanqueidade

Foram realizados diversos testes de continuidade e estanqueidade para verificar se havia continuidade ou algum bloqueio interno nos canais e/ou defeitos de ruptura superficial. Isso inclui testes de continuidade e estanqueidades usando corantes líquidos penetrantes e testes injetando água ou ar nos canais. Além destes ensaios, análises de micro tomografia computadorizada de raios X (μ CT) e tomografia computadorizada de nêutrons (NCT) [49] foram realizadas para fornecer uma análise mais detalhada da uniformidade e continuidade dos canais.

Testes com líquidos penetrantes foram realizados para investigar a existência de defeitos de ruptura superficial, como fissuras, trincas ou fendas, que poderiam ocorrer na região do teto do canal e áreas adjacentes.

Para estes testes, o líquido penetrante foi injetado no canal em sua entrada até chegar à saída do canal, verificando se o líquido penetrante escoou com facilidade e alcançou a saída do canal. Após a correta limpeza da superfície da amostra, o revelador foi aplicado para detectar possíveis defeitos de ruptura superficial no teto do canal [47]. Como se observa na Figura 5.36, não foram constatados defeitos na superfície da amostra.

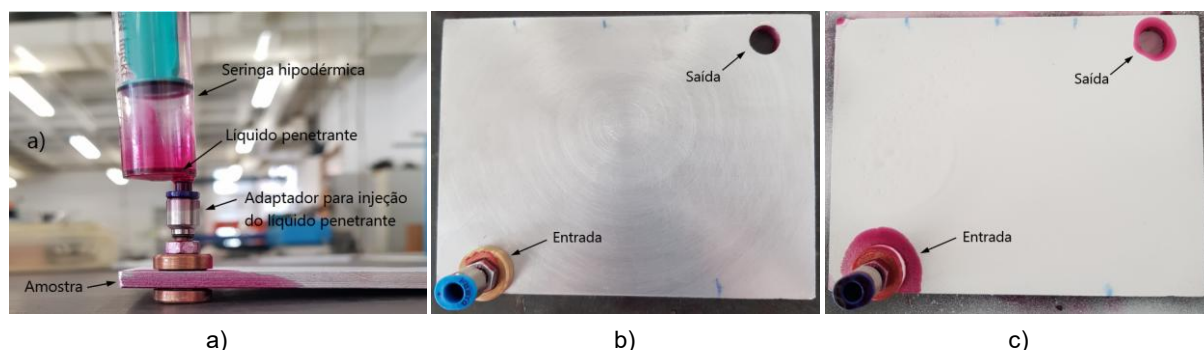


Figura 5.36 - Teste com líquido penetrante; a) acessório para injeção de líquido; b) superfície após aplicação do líquido penetrante e limpeza; c) superfície do corpo de prova após aplicação do revelador: sem defeitos. Adaptado de [41].

Testes de continuidade foram realizados utilizando uma seringa hipodérmica de 20 ml para injetar ar em uma amostra com canal linear de 0,5 mm, enquanto a amostra estava completamente submersa em água, investigando a presença de bolhas de ar e sua localização, conforme Figura 5.37, não houve a presença de bolhas ao longo do canal e o ar fluíu corretamente em direção à saída do canal.

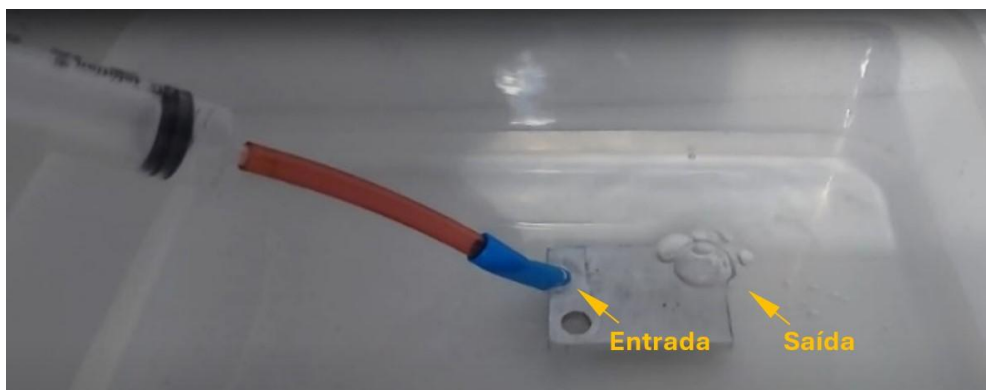


Figura 5.37 Teste de continuidade utilizando injeção de ar em canal de 0,5 mm. (Link para [vídeo](#)).

Também foram realizados testes de continuidade injetando água no interior dos canais, conforme a Figura 5.38, onde, apesar da perda de carga provocada pela rugosidade interna e pela geometria curvilínea dos canais, a água fluíu corretamente para a saída dos canais. (os links para os respectivos vídeos estão na legenda da figura).

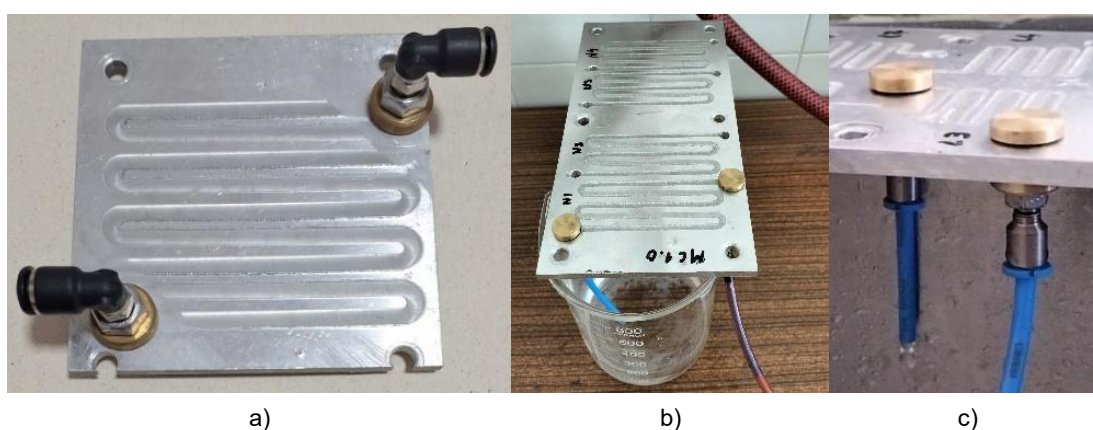


Figura 5.38 - Protótipos de trocadores de calor com canais em formato de serpentina com adaptação de conectores: a) produzido com ferramenta [MC 2.0](#), b) produzido com ferramenta [MC 1.0](#) em teste de continuidade com circulação de [água](#) e c) produzido com ferramenta [MC 0.5](#) em teste de continuidade com circulação de água.

Os testes de estanqueidade são mostrados na Figura 5.39, onde as amostras foram totalmente submersas em água, com a saída do circuito vedada e uma pressão interna de ar de

980 kPa foi estabelecida e mantida por 24 horas para avaliar a integridade do canal e a presença de defeitos de ruptura superficial sob pressão. A ausência ou presença de bolhas, e sua respectiva posição ao longo dos canais, foi utilizada para avaliar a integridade dos canais e revelar quaisquer defeitos de ruptura superficial [29].

As amostras testadas foram os protótipos com canais em forma de serpentina, criadas utilizando os parâmetros listados na Tabela 5.21.

Tabela 5.21 – Parâmetros que resultaram no maior Dh para cada ferramenta.

ID da ferramenta	Velocidade de deslocamento [mm/min]	Velocidade de rotação [rev/min]	Espaçamento [mm]	Tempo[s]	Dh μm	Comprimento do canal [mm]
MC 2,0	160	1800	0,06	3	995	95
MC 1,0	160	3200	0,03	3	487	45

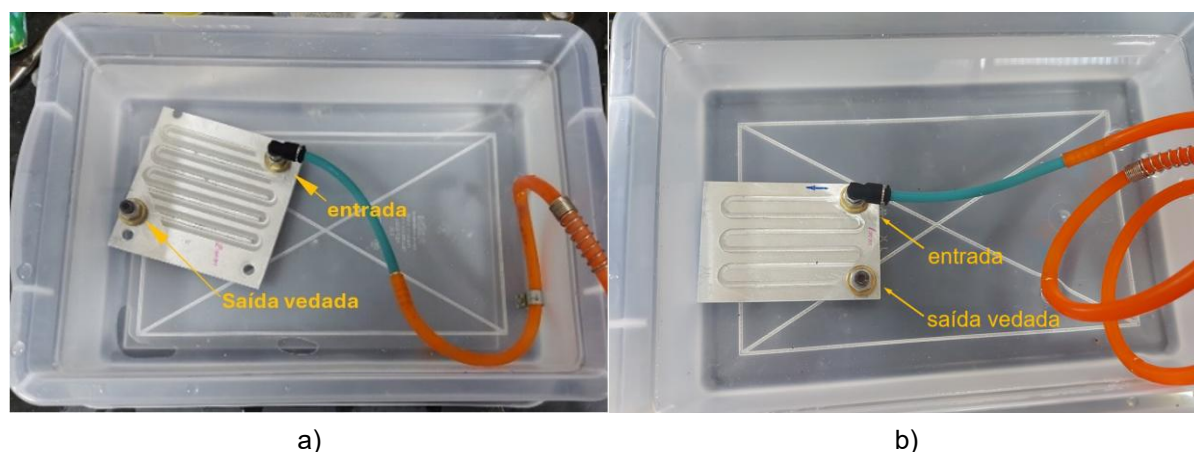


Figura 5.39 - Teste de estanqueidade em amostras pressurizadas, submersas em água – a) com canal de 2,0 mm de largura e b) com canal de 1,0 mm de largura.

As amostras de 2,0 mm e 1 mm resistiram às condições impostas e apresentaram boa resistência à pressão aplicada, não sendo detectadas bolhas. Para as amostras com canais de 0,5 mm, os testes de estanqueidade não foram realizados.

Considerando os resultados das caracterizações dos canais produzidos, podemos afirmar que, com as ferramentas utilizadas, foram obtidos canais contínuos, isentos de defeitos e uniformes, com Dh suficiente para estabelecer um fluxo contínuo no teste de continuidade e estanqueidade.

5.2.11 Ensaios de tomografia computadorizada de nêutrons NCT

Além dos recursos compartilhados com μ CT, o NCT oferece a capacidade única de determinar os coeficientes de atenuação linear de nêutrons em qualquer região da amostra. Os distintos processos de interação entre os raios X e os nêutrons com a matéria contribuem para a complementaridade dessas técnicas e permitem a visualização em tempo real da água enquanto ela flui dentro dos canais [60] [61]. Os testes confirmaram que os canais têm continuidade ininterrupta em toda a sua extensão e permanecem completamente desobstruídos. A água (em vermelho na Figura 5.40), flui sem esforço por toda a extensão do canal e não foram identificadas aberturas na superfície, conforme mostra a Figura 5.40 e figura 5.41.

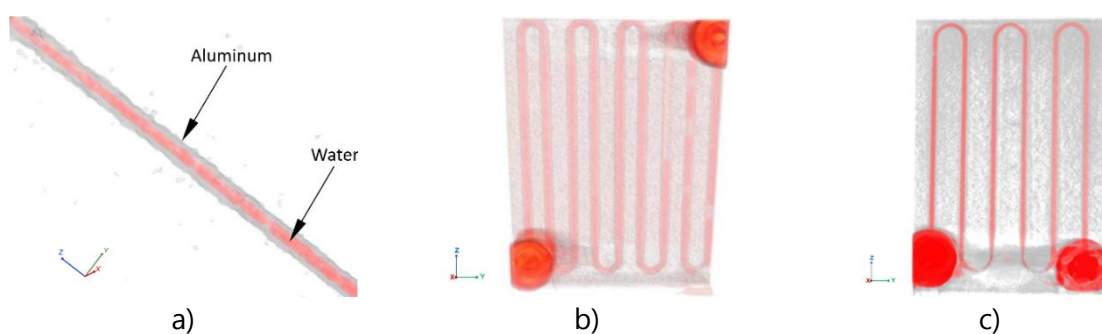


Figura 5.40 - NCT – Água no canal (vermelho); alumínio ao redor da água (cinza) - a) canal linear produzido com MC 0,5; b) canal em forma de serpentina com MC 1.0; c) canal em forma de serpentina com MC 2.0.

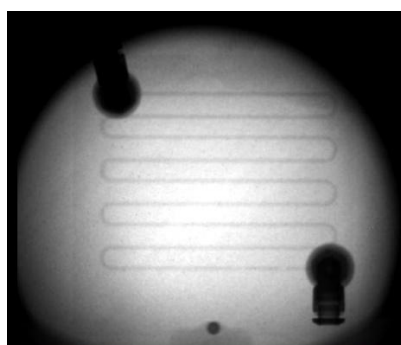


Figura 5.41 Tomografia Computadorizada de Nêutrons com injeção de H₂O, apresentando a continuidade total do canal. (Link para [vídeo](#)).

Técnicas de obtenção de imagens não destrutivas e não invasivas, que permitam analisar a estrutura interna de objetos, são ferramentas importantes em estudos de materiais de

engenharia. Dentre estas estão as de radiografia e de tomografia com raios-X, e mais recentemente e especificamente, as que empregam nêutrons como radiação penetrante [62]. Por meio desta técnica é possível visualizar a estrutura interna, não homogeneidades, não uniformidades, trincas, bolhas, mensurar espessuras, massas, volumes e densidades das amostras em estudo. Além disto, é também possível determinar, em qualquer região da amostra, seja nas radiografias (2D) ou nas tomografias (3D), os coeficientes de atenuação linear dos nêutrons dos materiais que a compõe e assim ter uma concepção de sua composição [63] [47] [66].

As diferenças entre os processos de interação destas radiações com a matéria, atribuem à cada uma destas técnicas características únicas, de modo que as informações obtidas em cada uma delas podem ser utilizadas de forma complementares, de maneira que os campos de estudos e os objetos investigados se ampliam. Por exemplo, diferentemente dos raios X, os nêutrons são capazes de penetrar vários centímetros em materiais como chumbo, ferro, cobre, alumínio, bronze, dentre outros, mas são facilmente atenuados por camadas extremamente finas de materiais ricos em hidrogênio como adesivos, água, produtos de corrosão, materiais orgânicos em geral, ou seja, as informações contidas nas imagens obtidas em cada uma das técnicas se complementam entre si [61][67][68].

O equipamento para Tomografia com Nêutrons do IPEN-CNEN/SP

A Figura 5.42 apresenta um diagrama esquemático do equipamento para tomografia com nêutrons (NCT) utilizado neste estudo e a Figura 5.43 mostra a amostra na posição de irradiação com canal em forma de serpentina, com adaptadores para a injeção de H₂O, durante o ensaio.

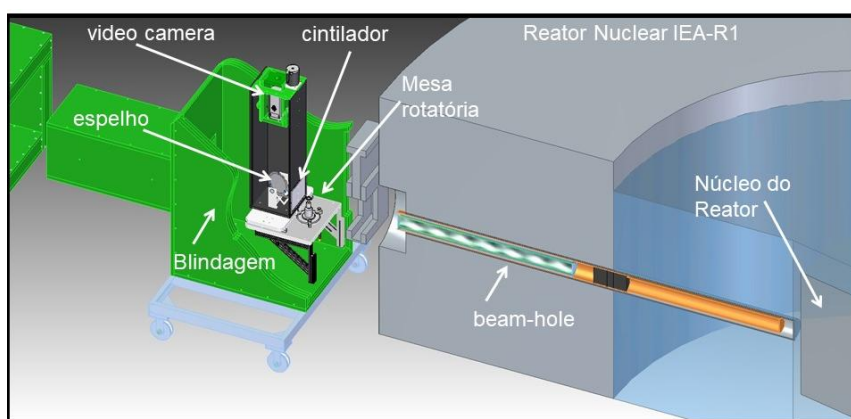


Figura. 5.42 Diagrama do equipamento para tomografia com nêutrons do IPEN-CNEN/SP.

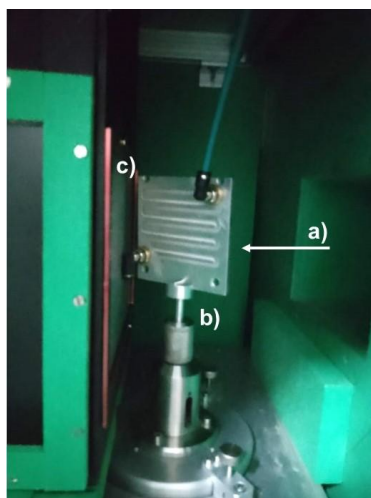


Figura 5.43 – Amostra na posição de irradiação: a) feixe de nêutrons; b) mesa rotatória; c) tela cintiladora.

O conjunto do equipamento, destacado em verde, está instalado no canal de irradiação #14 do Reator Nuclear de Pesquisas IEA-R1, e seus principais componentes são os seguintes: mesa rotatória, onde a amostra a ser estudada, é fixada para ser irradiada pelo feixe de nêutrons; tela cintiladora (Li6F/ZNS - NE426), onde imagens bidimensionais (2D - radiografias) da estrutura interna da amostra são formadas; espelho plano, que reflete estas imagens em direção à uma câmera digital de vídeo (ANDOR Ikon - M), que as captura e as converte na forma de imagens digitais, as quais cada elemento que as compõe é chamado de pixel (Picture Element). Estas imagens são armazenadas em um computador (workstation - DELL Precision 5500) e digitalizadas em 16 bits, de forma que ao pixel mais escuro é atribuído o valor NC = 0 e ao mais claro o valor NC = 65.536; uma interface eletromecânica conecta a mesa e a câmera de vídeo de forma que, após uma imagem ser capturada, a mesa gira a amostra 0,9°, e outra imagem é capturada até completar 360°. Dessa forma, 400 imagens bidimensionais são capturadas e armazenadas. Além disso, são empregados dois softwares, instalados neste mesmo computador: Octopus 8.7, o qual, a partir das imagens capturadas, gera as tomografias nos três planos de visualização (XY, XZ, YZ), e VG Studio Max 2.2, que faz uso dos arquivos das tomografias para gerar imagens tridimensionais (3D) da estrutura interna da amostra investigada. Descrições detalhadas tanto do equipamento quanto do procedimento para obtenção da tomografia podem ser encontradas em [46]. Na posição de irradiação o feixe de nêutrons possui fluxo de $8,0 \times 10^6 \text{ n.s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ e diâmetro máximo de 160 mm. O tempo necessário para a obtenção da tomografia é de aproximadamente 400 s, e a resolução espacial máxima na imagem é $205 \pm 24 \text{ } \mu\text{m}$.

5.2.12 Ensaios de micro tomografia computadorizada Micro CT

Técnicas de imagem não destrutivas e não invasivas são ferramentas cruciais para estudar a estrutura interna de materiais de engenharia. Dentre essas técnicas, μ CT e NCT, permitem visualizar a estrutura interna, identificar heterogeneidades, não uniformidades, trincas e bolhas, além de medir diversas propriedades como espessuras, massas, volumes e densidades em amostras.

As imagens μ CT, realizadas na empresa Micron Sense, conforme descritas no capítulo 5.2, foram feitas, em uma primeira etapa, nas amostras com canais lineares, com resolução de 35 μ m na amostra com canal de 0,5 mm, enquanto as amostras com canais de 1,0 mm e 2,0 mm foram visualizadas com resolução de 27 μ m. Na Figura 5.44 pode-se observar a continuidade do canal de 0,5 mm, bem como seu perfil, profundidade superficial e largura máxima.

Os resultados da imagem μ CT mostram que os canais produzidos são ininterruptos, corroborando os resultados dos testes de continuidade com ar e líquidos penetrantes. Além disso, os resultados revelam que a geometria da seção transversal do canal é constante em todo o comprimento, apresentando a estabilidade do processo de abertura de canais *FSC* para ferramentas com pinos menores que 2 mm, conforme mostra a Figura 5.45 e 5.46. Os resultados da imagem μ CT para as outras amostras são semelhantes.

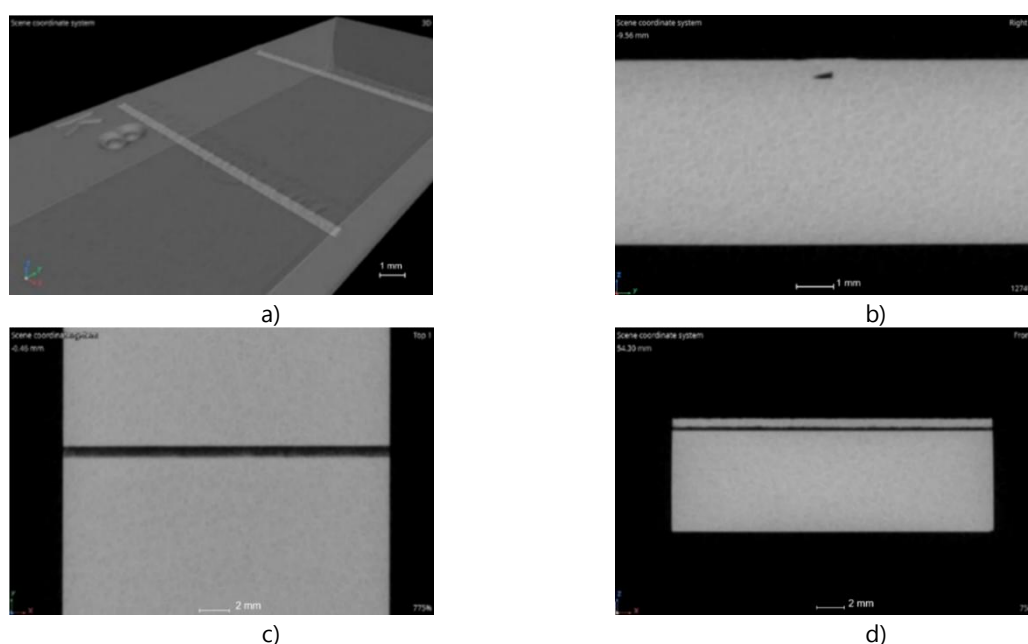


Figura 5.44 Imagens de micro TC, canal linear de 0,5 mm - a) visualização 3D; b) perfil; c) Superior; d) Frente. (Link para [vídeo](#)).

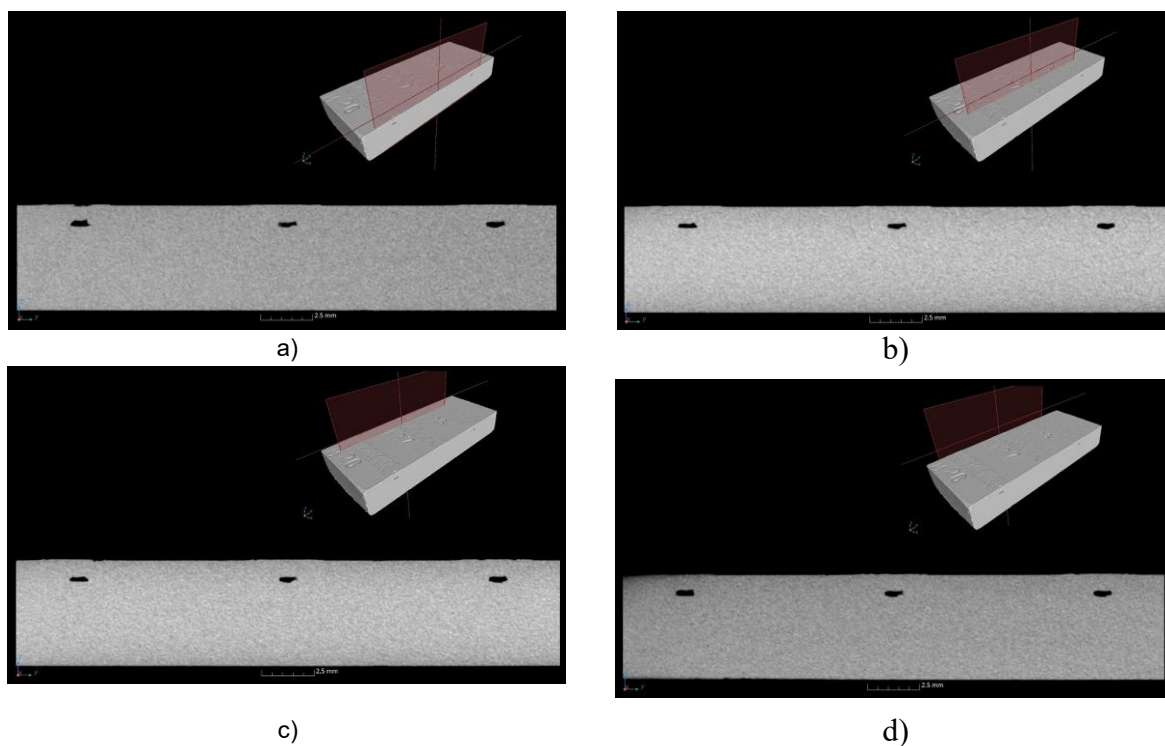


Figura 5.45 - Imagens de Micro CT ao longo do tempo - canal linear de 1,0 mm - a) início $t = 1$ s; b) $t = 20$ s; c) $t = 40$ s e, d) final $t = 60$ s. (Link para [vídeo](#)).

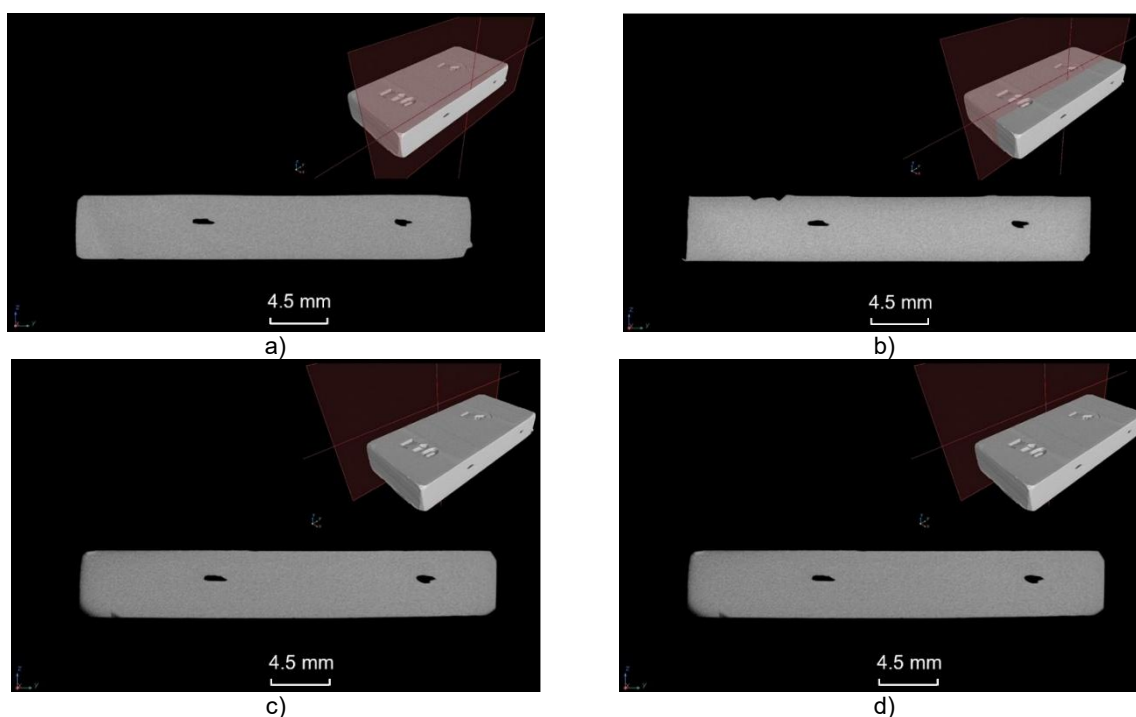


Figura 5.46 Imagens de Micro CT ao longo do tempo - canal linear de 2,0 mm - a) início $t = 1$ s; b) $t = 20$ s; c) $t = 40$ s e, d) final $t = 60$ s. (Link para [vídeo](#)).

Ainda, foram realizados vídeos com enfoque na profundidade dos canais, iniciando na superfície da peça de trabalho em direção ao fundo do canal.

Seus links estão na designação das amostras a seguir: [Amostra 6 - M26 a M28 - Top 1 .avi](#); [Amostra K8 - Top 1 .avi](#); [Amostra 5 - E4 - Front 1.avi](#); [Amostra 5 - E10 - Front 1.avi](#).

Também foram realizados vídeos com canais em forma de serpentina e seus respectivos vídeos estão na designação das amostras: [Serpentinas L3 e L4 - 0,5 mm](#); [Serpentina E11 - 2,0 mm](#) e [Serpentina N1 e N2 - 1,0 mm](#).

Em uma segunda etapa, foram analisadas amostras feitas com as ferramentas μC 0,20 mm e μC 0,30 mm *descritas em 5.1.3*, com resolução de máxima do tomógrafo.

Em todas as amostras analisadas não foram obtidos canais internos contínuos regulares ao longo da trajetória do ensaio e em algumas amostras só foram obtidos trechos de canal, quer por estarem abertos à superfície ou porque estavam obstruídos.

Nas amostras que apresentaram trechos de canal, ainda que com comprimentos reduzidos, não foi observada continuidade dos canais ao longo do comprimento destes.

As figuras 5.47 e 5.48, apresentam os resultados onde foi utilizada a ferramenta μC 0,3 mm e na Figura 5.49, à ferramenta μC 0,20 mm respectivamente.

Nota-se os trechos onde foram observados canais que se formaram, com comprimentos pequenos em relação ao comprimento total e estão em paralelo com a trajetória percorrida durante o ensaio, no ponto central da largura do canal.

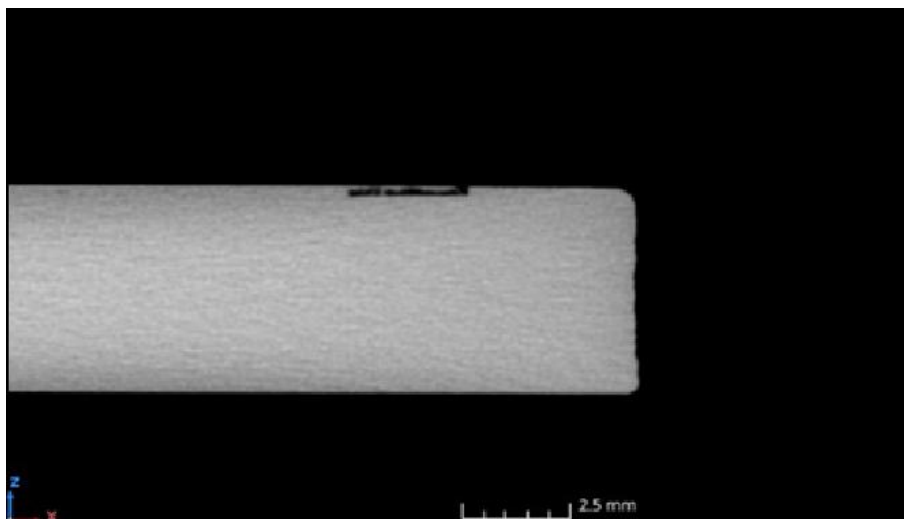


Figura 5.47 - Sessão longitudinal da amostra D6. Canal produzido com μC 0,3 mm, $\omega = 12.000$ rev/min, $v = 25$ mm/min.

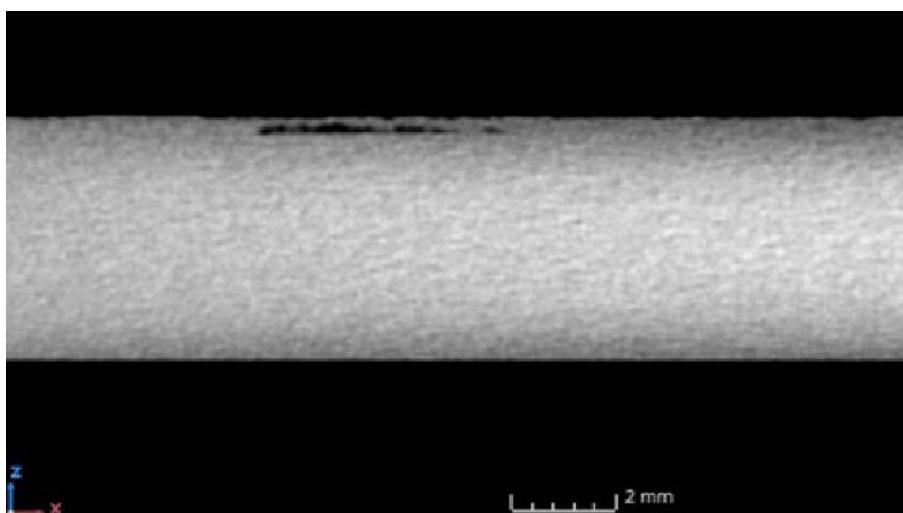


Figura 5.48 - Sessão longitudinal da amostra F8. Canal produzido com μC 0,3 mm, $\omega = 12.000$ rev/min, $v = 25$ mm/min.

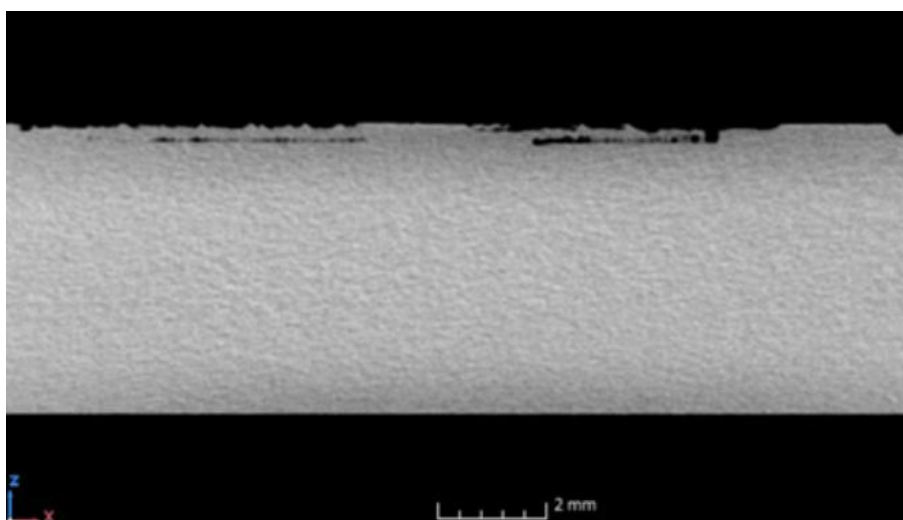


Figura 5.49- Sessão longitudinal da amostra J3. Canal produzido com μC 0,2 mm, $\omega = 20.000$ rev/min, $v = 15$ mm/min.

As figuras 5.50, 5.51 , apresentam os resultados onde foi utilizada a ferramenta μC 0,3 mm e na Figura e 5.52 à ferramenta μC 0,20 mm, respectivamente.

Observa-se trechos de canais no sentido da superfície da peça de trabalho em direção ao fundo do canal, com a maior largura dos canais formados e suas profundidades.



Figura 5.50 - Vista superior da amostra D6 com profundidade de 0,19 mm. Canal produzido com μC 0,3 mm, $\omega = 12.000$ rev/min, $V = 25$ mm/min. (Link para [vídeo](#)).



Figura 5.51 - Vista superior da amostra F8 com profundidade de 0,30 mm. Canal produzido com μC 0,3 mm, $\omega = 12.000$ rev/min, $V = 25$ mm/min. (Link para [vídeo](#)).

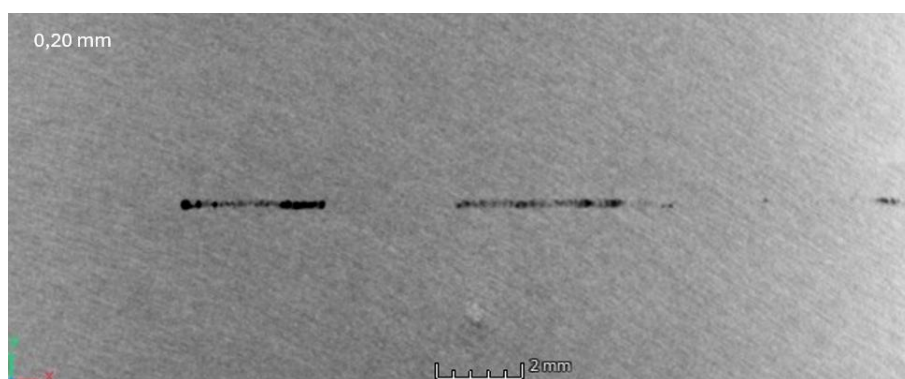


Figura 5.52 - Vista superior da amostra J3 com profundidade de 0,20 mm. Canal produzido com μC 0,2 mm, $\omega = 20.000$ rev/min, $V = 15$ mm/min. (Link para [vídeo](#)).

As imagens revelam a não continuidade dos canais ao longo da trajetória da ferramenta. Também se observa que nos trechos onde "presumidamente" existe um canal curto, há

material dentro do canal e que talvez houvesse alguma fluidez, mas não é possível garantir isso.

Em relação às imagens obtidas, uma hipótese que talvez explique a não formação de canais contínuos seja que, devido ao diâmetro da ferramenta ser muito pequeno (no caso da ferramenta μC 0,20 mm, o diâmetro do núcleo da rosca mede 0,13 a 0,14 mm), o pino roscado "transporta" material do lado em avanço para o lado em recuo no desenvolvimento da trajetória, diminuindo a seção transversal do canal ou obstruindo-o em alguns trechos.

O aquecimento da peça de trabalho foi realizado para evitar a fratura da ferramenta e com isso, outra hipótese seria de que, devido ao fato de se trabalhar com aquecimento da peça de trabalho, talvez o material tenha atingido um estado viscoplástico maior do que o necessário e com o *shoulder* a comprimir o material extraído, talvez o pino tenha transportado para trás parte do material que deveria ser extraído, obstruindo o canal.

Ao se observar as imagens de μCT , nota-se que a espessura do teto do canal está consideravelmente grande em relação à profundidade do canal e, com isso, pode-se presumir que não houve a extração adequada do material à superfície para garantir a continuidade do canal.

O espaçamento do *shoulder* em relação à peça de trabalho é muito pequeno (0,01 a 0,02 mm) e qualquer variação deste, quer seja pela dilatação da peça de trabalho ou setup da ferramenta, influi no aporte térmico resultante e com isso, a força de compressão do material extraído será afetada.

5.2.13 Medição de gradientes térmicos em regime transiente de um trocador de calor

Nesta pesquisa, não foi realizada uma comparação em relação ao desempenho térmico com os métodos convencionais de fabricação de canais, tal como fresagem, furação, EDM, entre outros.

A aplicabilidade de componentes fabricados pela μFSC como trocadores de calor foi explorada avaliando o desempenho de dissipação de calor de um trocador de calor, ou seja, o desempenho de resfriamento ativo, ou seja, com um fluido de resfriamento circulando no canal em forma de serpentina, em comparação com o desempenho de resfriamento passivo, ou seja, convecção natural no ar, do mesmo componente [69].

Para a realização do ensaio de medição de gradientes térmicos em regime transiente, selecionou-se o canal com maior vazão de saída, que correspondeu ao canal com padrão de

serpentina E11, com $D_h = 833 \mu\text{m}$, produzido com a ferramenta MC 2,0, conforme Figura 5.58 (a). Na Figura 5.53 (b); apresenta-se a amostra com canal com padrão de serpentina selecionado, pintado com tinta preta, apropriada para altas temperaturas.

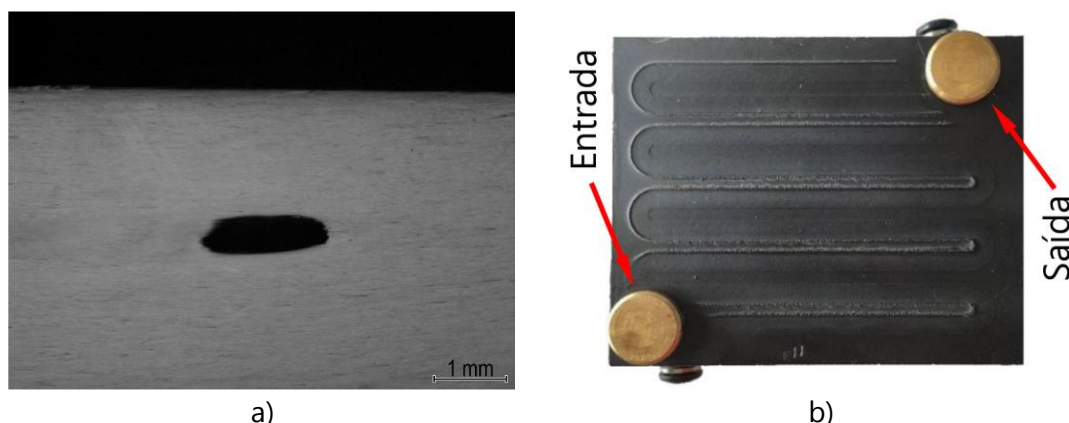


Figura 5.53 Protótipo para ensaios térmicos a) macrografia do canal E11; b) protótipo pintado com tinta fosca.

A Figura 5.54 ilustra a evolução da temperatura em diferentes estágios ao longo da medição da evolução da temperatura tanto para resfriamento ativo (Figura 5.54 a-f), com líquido de resfriamento fluindo através de um canal, quanto para resfriamento passivo (Figura 5.59 g-i). No teste de resfriamento ativo foi utilizada uma mistura de água e glicol a -10°C .

A etapa inicial, ou seja, quando a placa é aquecida uniformemente, imediatamente antes do início da circulação do fluido refrigerante no canal, é mostrada na Figura 5.54(a), com temperatura de $57,9^\circ\text{C}$. A Figura 5.54(b) à Figura 5.54(e) mostra quatro temperaturas intermediárias durante o processo de resfriamento, respectivamente, 43s, 56s, 1' 12s e 1' 23s após o início. Esses estágios fornecem informações sobre as fases de resfriamento progressivo. O teste terminou quando a temperatura máxima do componente atingiu $26,2^\circ\text{C}$, demorando 1' 34"s para atingir este valor, conforme mostra a Figura 5.54(f).

No resfriamento passivo, a placa foi aquecida a uma temperatura de aproximadamente 60°C e resfriada ao ar, iniciando a contagem do tempo quando atingiu $57,9^\circ\text{C}$ - Figura 5.54(g) e finalizando quando atingiu o estado estacionário, ou seja, a temperatura ambiente que era $26,2^\circ\text{C}$ - Figura 5.54(i), com tempo de 10 min 49 s.

A comparação das taxas de resfriamento tanto no resfriamento ativo com canal quanto no resfriamento passivo sem canal é mostrada na Figura 5.55.

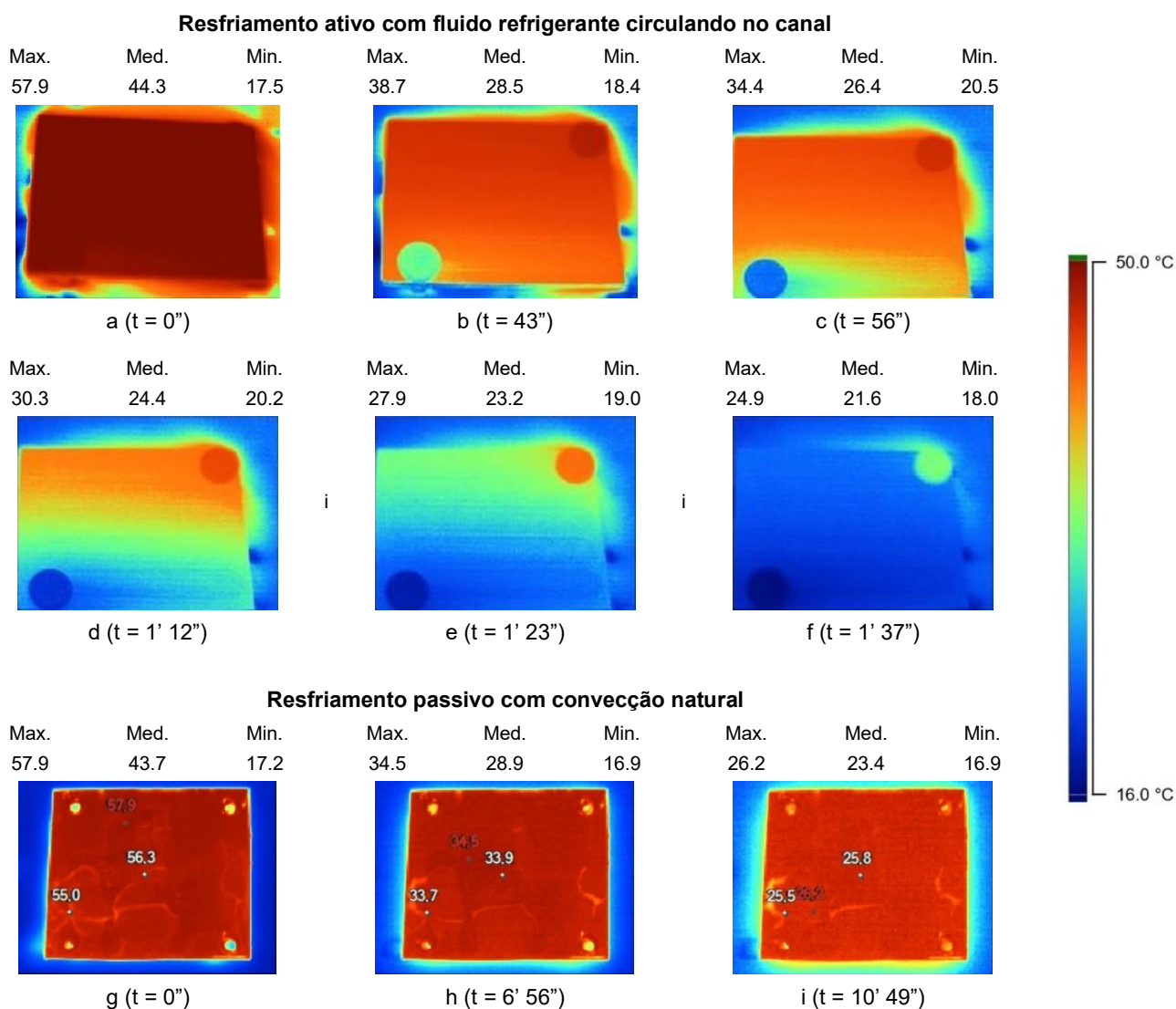


Figura 5.54 Resfriamento ativo com fluido refrigerante circulando no canal: Temperatura inicial (a), intermediária (b, c, d, e) e temperatura final (f); Teste com resfriamento passivo com convecção natural: (g) temperatura inicial, (h) intermediária e (i) temperatura final. Links para vídeos: [Gradientes térmicos - resfriamento ativo.mp4](#). [Gradientes térmicos - resfriamento passivo.mp4](#)

Os resultados dos testes foram realizados considerando as temperaturas máximas de 57,9 °C e mínima de 26,2° C.

Comparando os tempos necessários para cada um dos testes com as temperaturas máximas e mínimas iguais nos dois ensaios, observa-se que o resfriamento ativo atinge aproximadamente 15 % do tempo necessário para que o resfriamento passivo seja concluído, ou seja, é 6,9 vezes mais rápido.

Também, se compararmos a taxa de resfriamento em $^{\circ}\text{C/s}$, teremos que no resfriamento ativo essa taxa foi de $0,34\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ e no resfriamento passivo, foi de aproximadamente $0,05\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, apresentando a eficiência térmica do resfriamento ativo.

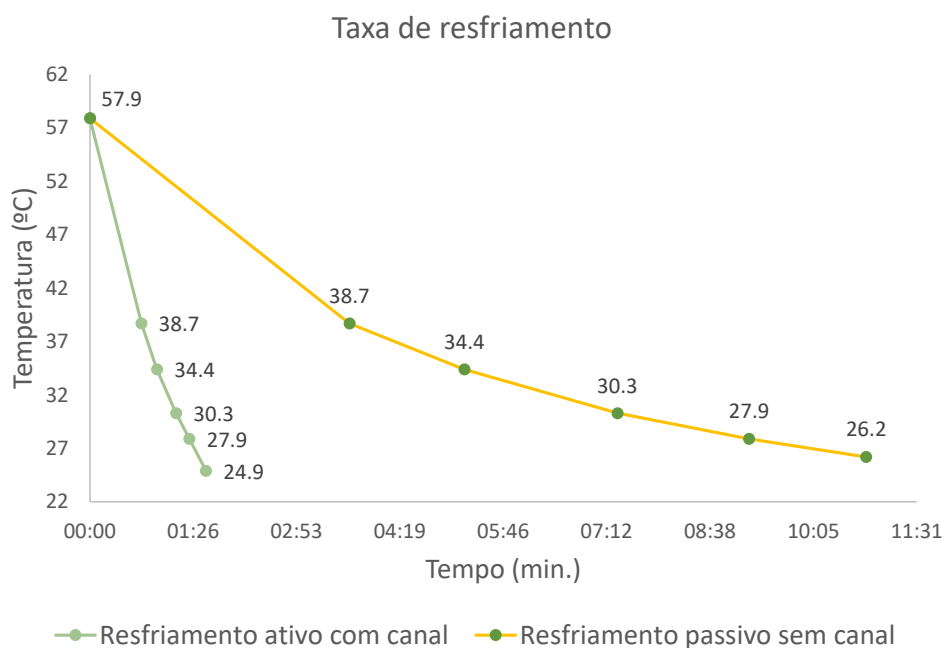


Figura 5.55 Taxa de resfriamento – comparação entre resfriamento ativo e passivo.

CONCLUSÕES

6.1 Conclusões

Nesta pesquisa, o objetivo inicial foi estabelecer uma janela de melhores parâmetros explorando os limites dimensionais mínimos de ferramentas com pinos roscados até um diâmetro de pino de 0,5 mm, investigando a viabilidade de produzir canais com o maior Dh possível e, obtendo com sucesso, canais contínuos e regulares com todas as ferramentas, conforme demonstrado nas tabelas 5.11 (MC 2,0); 5.12 (MC 1,0) e 5.13 (MC 0,5).

No tocante às ferramentas projetadas e desenvolvidas para esta pesquisa, pode-se afirmar que atenderam o propósito esperado, pois produziram canais funcionais, livres de defeitos e com geometria estável utilizando melhores parâmetros.

Com a ferramenta MC 2.0 foram obtidos canais com Dh entre 0,340 e 0,995 mm; com MC 1,0, Dh ficou entre 0,318 e 0,511 mm, e com MC 0,5, Dh ficou entre 0,191 e 0,305 mm, conforme Tabelas 5.15; 5.16 e 5.17. Também sua durabilidade e resistência ao desgaste satisfizeram todas as necessidades da produção de canais, pois a liga AW 1050 H111 foi adequada às exigências do processo.

As ferramentas, conforme esperado, tiveram durabilidade aos esforços do *FSC* e produziram canais de comprimentos relevantes sem falhas, ou seja, as ferramentas usando comprimentos de Pino de 1 a 1,15x o diâmetro do pino, tiveram resistência mecânica suficiente para suportar distâncias de 6,4 metros para a ferramenta MC 2.0; 6,1 metros para a ferramenta MC 1.0 e 3,3 metros para a ferramenta MC 0,5 antes de sofrerem falhas catastróficas.

O perfil em forma de dente de serra das roscas dos pinos obteve melhor extração de material, se comparado com o perfil da rosca métrica, sendo observado um aumento do diâmetro hidráulico.

Nas somatórias das distâncias percorridas por cada uma das ferramentas, as condições impostas durante os testes foram muito variadas, tanto em relação aos esforços aplicados, quanto às temperaturas de trabalho.

Com o pino roscado de 0,5 mm foi possível criar canais com D_h de 0,191 mm, o que o caracteriza como um microcanal, segundo a classificação de [36].

No equipamento a CNC, a utilização de rampas de aceleração na velocidade de avanço com o intuito de diminuir as forças envolvidas ao se plastificar o material, possibilitou que a ferramenta tivesse melhor funcionamento e aumentou de forma satisfatória sua durabilidade e, com isso, as falhas catastróficas (quebra dos pinos) ocorreram com baixíssima frequência.

Ainda, podemos ressaltar que o bom desempenho das ferramentas também se deve ao material selecionado para os ensaios, pois devido a sua excelente ductilidade e baixa resistência mecânica, aliado ao fato de ter excelente condutividade térmica, possibilitou esse desempenho.

Contudo, devido a terem dimensões muito pequenas, a precisão dimensional e tolerâncias geométricas exigidas na sua fabricação para bom desempenho e funcionamento, aumentam muito, o que provoca custos de produção elevados.

O controle da temperatura de processamento ($\sim 240^\circ\text{C}$) também é um fator crítico para a realização de canais em microescala, pois o fato de se executar vários ensaios consecutivos em um único componente (peça de trabalho) sem que seja corretamente observado o *warmup*, pode levar a um aquecimento excessivo do componente e provocar variações indesejáveis ou imprevisíveis nos canais produzidos quando se trabalha em microescala.

Alguns parâmetros, como espaçamento do *shoulder*, podem ter suas medidas alteradas durante o processamento devido a possíveis deformações provocadas pela deformação termomecânica e a própria temperatura de processamento originada em cada ensaio, ocasionando dilatação na espessura da peça de teste. Daí, advém uma das maiores dificuldades no controle do processo.

Os canais produzidos com as ferramentas I (sessão 3.1) e ferramentas II (sessão 3.2), necessitaram de dissipação do calor gerado no processo para que produzissem canais estáveis e contínuos.

Os testes μCT e NCT (que foi uma inovação em termos de NDT) também confirmaram que os canais produzidos têm continuidade ininterrupta ao longo de todo o seu comprimento e permanecem completamente desobstruídos e que mantêm a sua geometria ao longo de todo o seu comprimento.

Testes de continuidade e vazamento foram realizados para validar a aplicabilidade e desempenho dos canais processados e foram conclusivos para apresentar que os canais produzidos não apresentam falhas ou defeitos.

O material selecionado para processamento apresentou bom desempenho na obtenção de canais contínuos, sem defeitos, suportando pressão interna de 980 kPa, e com excelente dissipação térmica.

Os ensaios de microdureza, corroborados com a caracterização metalográfica e correntes induzidas, apresentam que as alterações microestruturais com o uso de ferramentas menores são semelhantes às que ocorrem com o uso de ferramentas *FSC* maiores estudadas anteriormente por outros autores, porém a microdureza aumentou mediante a diminuição do diâmetro dos pinos. O refinamento do grão na região processada contribui para a resistência mecânica do canal, que é superior à do material base.

Os elevados valores de rugosidade superficial interna contribuem para uma maior eficiência térmica, pois aumentam a área de contato do fluido com as superfícies internas do canal e causam um fluxo turbulento ao longo da trajetória do canal, o que gera maior transferência de calor por condução e convecção porém, também causam a redução do fluxo de fluido devido a oferecerem maior resistência à passagem desse fluido [70].

Nos ensaios de termografia do processo utilizando câmera termográfica e termopares localizados o mais próximo possível da zona de processamento (do ponto onde o pino está a desenvolver sua trajetória), verificou-se que as temperaturas máximas observadas nos termopares foram de $\sim 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ e de $\sim 220\text{ }^{\circ}\text{C}$ na câmera termográfica para MC 1,0 ; nos termopares $\sim 215\text{ }^{\circ}\text{C}$ e na câmera termográfica de $\sim 263\text{ }^{\circ}\text{C}$ para MC 2,0.

Verificou-se variação de temperatura entre os lados de avanço (LA) e de retrocesso (LR) sendo que, no lado em retrocesso a temperatura foi sempre maior do que no lado em avanço (LA). Essa diferença de temperatura possivelmente ocorreu devido ao fato de que foi verificado que no lado em avanço (pouco material processado) sua altura é maior do que no lado em retrocesso (com mais material processado) sua altura é menor (gerando no canal um formato assimétrico), o que significa que há um fluxo maior de material viscoplástico no lado em retrocesso, aumentando a temperatura neste lado.

Foi avaliado o desempenho térmico de um protótipo de trocador de calor compacto produzido pela *FSC*, com resfriamento ativo, que apresentou taxa média de resfriamento de $0,34\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ e pode ser considerado satisfatório quando comparado com o resfriamento passivo da amostra que teve taxa média de resfriamento de $0,05\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, ou seja, o resfriamento ativo foi 6,9 vezes mais rápido para se chegar à temperatura ambiente que o resfriamento passivo. Este resultado poderia ser melhorado usando uma bomba mais potente para fornecer maior fluxo ou testando refrigerantes alternativos, como refrigerantes a gás.

As forças máximas medidas durante o processamento com o dinamômetro (17,8 kgf) foram muito semelhantes com as medições realizadas com célula de carga, que registraram carga média de ~17,3 kgf, com pico de ~24 kgf máximo.

Mediante a isso, pode-se entender que as forças máximas medidas durante o processamento apresentam total viabilidade técnica para a aplicação do *FSC*, em máquinas CNC e/ou por robôs industriais comuns para integração numa linha de produção, utilizando ferramentas com pinos com diâmetro igual ou inferior a 2,0 mm, .

É apresentado que é possível realizar μFSC , conforme evidenciado pelo microcanal de 0,191 mm.

Em alguns ensaios de microcanais, verificou-se que o pino deveria ter, no máximo, comprimento igual a medida do seu diâmetro para que tivessem bom desempenho, mas se trabalharem com comprimentos de pino entre 80% e 95% da medida do diâmetro, seu desempenho melhora em termos de resistência mecânica.

Verificou-se que, com temperaturas menores, da ordem de 45°C de aquecimento da peça de trabalho, os pinos nas medidas de 0,30 mm e 0,20 mm fraturaram, o que nos leva a inferir que a temperatura mínima de aquecimento no processo deve ser igual ou superior a 60°C.

Nos canais produzidos com as ferramentas III, não houve a formação de canais contínuos e regulares como se esperava, mas sim, trechos com formação de canais irregulares, com comprimento de 10% a 30% do comprimento da trajetória do ensaio, como apresentado em 5.2.3.

Para completar a pesquisa, foram realizadas micro CT's em amostras que foram utilizadas as ferramentas III, onde foram analisadas as imagens.

Com os parâmetros e condições utilizados nos ensaios, utilizando micro tomografia computadorizada de raios X, não foram detectados canais contínuos e regulares. Apenas em alguns trechos curtos ao longo da trajetória do ensaio foi possível detectar canais e, mesmo assim, tinham alguma obstrução em alguns pontos.

Conclui-se que o objetivo inicial foi atingido, utilizando os melhores parâmetros e nas condições descritas neste trabalho e verificou-se que foi atingido o limite inferior do processo, referente ao menor canal contínuo e regular possível de ser produzido pelo processo *FSC*, com a ferramenta de minicanais MC 0,5.

6.2 Trabalhos futuros

Poderiam ser elencadas muitas sugestões para trabalhos futuros. Aqui, serão dadas algumas sugestões.

Propõem-se que sejam realizadas pesquisas para diminuir a rugosidade interna dos canais, buscando parâmetros adequados para minimizá-la.

Para esse fim, possivelmente a utilização de um fluido a alta pressão ou, semelhante ao que ocorre nos cortes com jato d'água, com abrasivos incorporados ao fluido para reduzir a rugosidade interna dos canais e, desta forma, aumentar a vazão dos microcanais.

Os ensaios de microcanais com ferramentas III, de 0,20 mm e 0,30 mm não apresentaram canais contínuos ou regulares. Sugere-se que sejam realizados ensaios com as ferramentas de 0,35 mm, 0,40 mm e 0,45 mm para encontrar os melhores parâmetros para a consecução de canais contínuos e regulares que se enquadrem como microcanais.

Uma outra linha de pesquisa poderia ser a utilização de perfis de rosca com ângulos maiores que 60°, aumentando o espaço no vão dos filetes de rosca para que possivelmente o material possa ser extraído em maior quantidade e com isso, poderiam ser obtidos diâmetros hidráulicos maiores e obter microcanais contínuos e regulares.

A avaliação de desgaste das ferramentas também merece um estudo completo e pormenorizado, pois o desgaste das ferramentas interfere diretamente no ciclo produtivo.

A utilização de outra liga de alumínio comercial ou estrutural, seria de grande valia para o desenvolvimento do μFSC .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Ohadi, K. Choo, S. Dessiatoun, and E. Cetegen, *Next Generation Microchannel Heat Exchangers*. New York, NY: Springer New York, 2013. doi: 10.1007/978-1-4614-0779-9.
- [2] R. S. Mishra, "Scholars' Mine Scholars' Mine Integral Channels in Metal Components and Fabrication Thereof Integral Channels in Metal Components and Fabrication Thereof," 2005. [Online]. Available: https://scholarsmine.mst.edu/matsci_eng_facwork
- [3] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 50, no. 1–2, pp. 1–78, Aug. 2005, doi: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
- [4] D. A. P. Prabhakar *et al.*, "A Review of Optimization and Measurement Techniques of the Friction Stir Welding (FSW) Process," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 7, no. 5, p. 181, Oct. 2023, doi: 10.3390/jmmp7050181.
- [5] M. M. Patel and V. J. Badheka, "A review on friction stir welding (FSW) process for dissimilar aluminium to steel metal systems," *Welding International*, vol. 38, no. 2, pp. 91–115, Feb. 2024, doi: 10.1080/09507116.2023.2291064.
- [6] P. Vishwakarma, V. Upadhyay, C. Sharma, and M. Z. K. Yusufzai, "Friction stir channeling in AA6082 and AA2024 dissimilar alloys," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 9469–9473. doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.237.
- [7] P. M. Ferreira, M. A. Machado, M. S. Carvalho, and C. Vidal, "Granting Sensorial Properties to Metal Parts through Friction Stir Processing," *Measurement*, vol. 207, p. 112405, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.measurement.2022.112405.
- [8] P. M. Ferreira, A. Meireles, C. Vidal, M. S. Carvalho, and M. A. Machado, "Evaluation of self-sensing material behaviour: Insights from cyclic and pulse load testing," *Measurement*, vol. 234, p. 114878, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.measurement.2024.114878.
- [9] P. M. Ferreira *et al.*, "Enabling electrical response through piezoelectric particle integration in AA2017-T451 aluminium parts using FSP technology," *Smart Mater Struct*, vol. 33, no. 6, p. 065037, Jun. 2024, doi: 10.1088/1361-665X/ad4d45.
- [10] S. L. H. P. A. Kakaç, *Heat Exchangers - Selection, Rating, and Thermal Design*, Fourth edition. 2020.

- [11] M. J. Afzal *et al*, "A Review on Microchannel Fabrication Methods and Applications in Large-Scale and Prospective Industries," Sep. 01, 2022, *Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences and Green Asia Strategy*. doi: 10.5109/4843111.
- [12] K. P. Mehta and P. Vilaça, "A review on friction stir-based channeling," 2022, *Taylor and Francis Ltd*. doi: 10.1080/10408436.2021.1886042.
- [13] N. Balasubramanian, R. S. Mishra, and K. Krishnamurthy, "Friction stir channeling: Characterization of the channels," *J Mater Process Technol*, vol. 209, no. 8, pp. 3696–3704, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.08.036.
- [14] W. M. , et al. Thomas, "Friction Stir Butt Welding," N° 5,460.317, 1991
- [15] S. Yu. Tarasov, V. E. Rubtsov, A. A. Eliseev, E. A. Kolubaev, A. V. Filippov, and A. N. Ivanov, "Effect of friction stir welding parameters on defect formation," 2015, p. 020230. doi: 10.1063/1.4932920.
- [16] R. S. Misha, "Integral Channels in Metal Components and Fabrication Thereof," U.S. Patents, Aug 2005., Aug. 12, 2005
- [17] C. I. S. Vidal, "Development and Mechanical Characterization of a New Manufacturing Technology: Friction Stir Channeling," UNIVERSITY OF LISBON - INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, Lisboa, 2014.
- [18] D. Damásio, "Microchanneling - Development of technological parameters and characterization of microchannels," Faculty of Science and Technology, NOVA University of Lisbon, Almada, Portugal, 2022.
- [19] S. Pandya, R. S. Mishra, and A. Arora, "Channel formation during friction stir channeling process — A material flow study using X-Ray micro-computed tomography and optical microscopy," *J Manuf Process*, vol. 41, pp. 48–55, May 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.03.021.
- [20] C. I. S. Vidal, "Process of opening continuous internal channels in solid components without changing the processed surface dimension and respective adjustable modular tool," PT 105628, Apr. 15, 2011
- [21] H. ; V. P. N. D. KARVINEN, "A non-consumable tool and a process for slid-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," Dec. 28, 2017
- [22] J. GANDRA, "Methods and apparatus for creating channels in workpieces," US11020817B2, Jun. 01, 2021
- [23] 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, Feb. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.302.365.
- [24] 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," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 80, no. 5–8, pp. 1087–1096, Sep. 2015, doi: 10.1007/s00170-015-7049-7.
- [25] 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, Sep. 2015, doi: 10.1007/s00170-015-7049-7.
- [26] P. ; K. H. Vilaça, "One-action simultaneous production of welding between multiple components and internal closed channels within the processed zone: Hybrid Friction Stir Channeling.," FI 20160165, 2016
- [27] 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, May 2018, doi: 10.1007/s40194-018-0576-8.
- [28] D. Nordal, "Design, Development and Analysis of Tools for Hybrid Friction Stir Channeling," Aalto University, Espoo, Finland, 2017. Accessed: May 17, 2023. [Online]. Available: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/27092>
- [29] Pietro. V., "Thermal management of power electronics by friction stir channeling," <https://www.power-and-beyond.com/thermal-management-of-power-electronics-by-friction-stir-channeling-a-b97c135cbbd0d52e7b92db7a60efa0f5/?print>.
- [30] S. Salimi, M. Haghpanahi, and P. Bahemmat, "Fabrication of cooling channels employing worm voids caused by friction stir based process: Considering cooling and fluid parameters," *J Manuf Process*, vol. 35, pp. 61–70, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.07.016.
- [31] C. Vidal, V. Infante, and P. Vilaça, "Metallographic and morphological characterization of sub-surface friction stirred channels produced on AA5083-H111," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, no. 5–6, pp. 2215–2235, Dec. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04459-7.
- [32] H. Mzad, "A simple mathematical procedure to estimate heat flux in machining using measured surface temperature with infrared laser," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 6, pp. 128–135, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.csite.2015.09.001.

- [33] V. Kryzhanivskyy, V. Bushlya, O. Gutnichenko, R. M'Saoubi, and J.-E. Ståhl, "Heat flux in metal cutting: Experiment, model, and comparative analysis," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 134, pp. 81–97, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2018.07.002.
- [34] H. Karvinen, A. H. Aleni, P. Salminen, T. Minav, and P. Vilaça, "Thermal efficiency and material properties of friction stir channeling applied to aluminium alloy AA5083," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 8, Apr. 2019, doi: 10.3390/en12081549.
- [35] P. Sarkar, S. K. Pal, A. Bhattacharya, and B. Shollock, "The influence of shoulder-workpiece clearance on channel formation during friction stir channeling at low and high heat inputs," *J Manuf Process*, vol. 101, pp. 701–713, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.06.014.
- [36] S. G. Kandlikar and W. J. Grande, "Evolution of microchannel flow passages-thermohydraulic performance and fabrication technology," *Heat Transfer Engineering*, vol. 24, no. 1, pp. 3–17, Jan. 2003, doi: 10.1080/01457630304040.
- [37] N. Balasubramanian, R. S. Mishra, and K. Krishnamurthy, "Process forces during friction stir channeling in an aluminum alloy," *J Mater Process Technol*, vol. 211, no. 2, pp. 305–311, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.10.005.
- [38] M. J. Afzal *et al.*, "A Review on Microchannel Fabrication Methods and Applications in Large-Scale and Prospective Industries," Sep. 01, 2022, *Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences and Green Asia Strategy*. doi: 10.5109/4843111.
- [39] S. G. Kandlikar and W. J. Grande, "Evolution of microchannel flow passages-thermohydraulic performance and fabrication technology," *Heat Transfer Engineering*, vol. 24, no. 1, pp. 3–17, Jan. 2003, doi: 10.1080/01457630304040.
- [40] R. M. Schoueri, C. Domienikan, F. de Toledo, M. L. G. Andrade, M. A. Stanojev Pereira, and R. Pugliesi, "The new facility for neutron tomography of IPEN-CNEN/SP and its potential to investigate hydrogenous substances," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 84, pp. 22–26, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.apradiso.2013.10.019.
- [41] R. S. Tasnicensco, "Non-destructive characterization of microchannels produced by Friction Stir Channeling," Faculty of Science and Technology, NOVA University of Lisbon, Lisbon, 2022.
- [42] R. M. Schoueri, C. Domienikan, F. de Toledo, M. L. G. Andrade, M. A. Stanojev Pereira, and R. Pugliesi, "The new facility for neutron tomography of IPEN-CNEN/SP and its potential to investigate hydrogenous substances," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 84, pp. 22–26, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.apradiso.2013.10.019.

- [43] N. Balasubramanian, R. S. Mishra, and K. Krishnamurthy, "Process forces during friction stir channeling in an aluminum alloy," *J Mater Process Technol*, vol. 211, no. 2, pp. 305–311, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.10.005.
- [44] C. Vidal, V. Infante, and P. Vilaça, "Monitoring of the mechanical load and thermal history during friction stir channeling under constant position and constant force control modes," *J Manuf Process*, vol. 49, pp. 323–334, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.jma-pro.2019.11.016.
- [45] M. Buinho, "Development of Friction Stir Channeling technology - study of the influence of the base on the processing of aluminum alloys," Faculty of Science and Technology, NOVA University of Lisbon, Almada, 2020.
- [46] C. Vidal, P. M. Ferreira, F. B. Ferreira, M. Buinho, T. T. Silva, and T. G. Santos, "Improving the stability of the friction stir channeling technology via a cooled copper backing plate," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 129, no. 1–2, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-12211-5.
- [47] F. H. , T. Y. , T. N. , N. K. , N. K. SUN Y., "Microstructure and Hardness Distribution of Friction Stir Welded 1050 Al and IF Steel with Different Original Grain Sizes," *Transactions of JWRI, Vol.38 (2009), No. 2*, vol. 38, 2009.
- [48] A. Heidarzadeh *et al.*, "Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution," *Prog Mater Sci*, vol. 117, p. 100752, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.pmatsci.2020.100752.
- [49] H. Karvinen, K. P. Mehta, and P. Vilaça, "Novel manufacturing of multi-material component by hybrid friction stir channeling," *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 45, pp. 271–284, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.cirpj.2023.07.001.
- [50] S. Kou, *WELDING METALLURGY*, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [51] M. A. Machado, W. Sabor, R. Tasnicenco, D. Damásio, T. G. Santos, and C. Vidal, "Characterization of Microchannels Produced by Friction Stir Channeling: An Experimental Study," *Research and Review Journal of Nondestructive Testing*, vol. 1, no. 1, Aug. 2023, doi: 10.58286/28176.
- [52] E. Abraham *et al.*, "Terahertz, X-ray and neutron computed tomography of an Eighteenth Dynasty Egyptian sealed pottery," *Appl Phys A Mater Sci Process*, vol. 117, no. 3, pp. 963–972, Oct. 2014, doi: 10.1007/s00339-014-8779-3.
- [53] F. C. De Beer, "Neutron- and X-ray radiography/tomography: Non-destructive analytical tools for the characterization of nuclear materials," *J South Afr Inst Min Metall*, vol. 115, no. 10, pp. 913–924, Oct. 2015, doi: 10.17159/2411-9717/2015/v115n10a3.

- [54] M. Griesser, R. Traum, K. Vondrovec, P. Vontobel, and E. H. Lehmann, "Application of X-ray and neutron tomography to study antique Greek bronze coins with a high lead content," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2012. doi: 10.1088/1757-899X/37/1/012011.
- [55] V. F. Sears, "Neutron scattering lengths and cross sections," *Neutron News*, vol. 3, no. 3, pp. 26–37, Jan. 1992, doi: 10.1080/10448639208218770.
- [56] V. Szilágyi, Zoltán Kis, and; László Szentmiklósi, "NEUTRON IMAGING FOR ARCHAEOOMETRY A NEUTRONOS KÉPALKOTÁS ARCHEOMETRIAI ALKALMAZÁSA Introduction: Potential of neutron imaging."
- [57] M. A. P. et A. STANOJEV, "Neutron imaging techniques applied to studies in the archaeological and cultural heritage fields.," *Mediterranean Archaeology and Archaeometry (MAA)*, vol. 13, no. N° 3, pp. 137–143, Aug. 2013.
- [58] Marco Antonio Stanojev Pereira, *Imageamento com Nêutrons: 30 anos de atividades no IPEN-CNEN/SP*, 1st ed., vol. 1. São Paulo - Brasil: ISBN: 978-85-923404-1-4, 2017.
- [59] A. KAESTNER *et al.*, "Mapping the 3D water dynamics in heterogeneous sands using thermal neutrons☆," *Chemical Engineering Journal*, vol. 130, no. 2–3, pp. 79–85, Jun. 2007, doi: 10.1016/j.cej.2006.06.013.
- [60] D. Mannes, L. Josic, E. Lehmann, and P. Niemz, "Neutron attenuation coefficients for non-invasive quantification of wood properties," *hfs-g*, vol. 63, no. 4, pp. 472–478, Jul. 2009, doi: 10.1515/HF.2009.081.
- [61] N. , K. K. , & M. R. S. Balasubramanian, "Preliminary study of pressure drop and heat transfer through a friction stir channel.," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Seattle - Washington: ASME Digital Collection, Nov. 2007, pp. 933–939.
- [62] H. Karvinen, A. H. Aleni, P. Salminen, T. Minav, and P. Vilaça, "Thermal efficiency and material properties of friction stir channeling applied to aluminium alloy AA5083," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 8, Apr. 2019, doi: 10.3390/en12081549.



2025

WAGNER DE CAMPOS SABOR

DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO *FRICTION*
STIR CHANNELING À MICROESCALA

