

Ricardo Carreira da Silva

# Otimização do Processamento por Fricção Linear (FSP) na Liga AA5083

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica  
na Especialidade de Produção e Projeto

Setembro de 2014



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Otimização do processamento por fricção linear (FSP) na liga AA5083**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade Produção e Projeto

**Autor**

**Ricardo Carreira da Silva**

**Orientadores:**

**Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa**

**Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor José António Martins Ferreira  
Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Orientador** Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa  
Professor Associado com Agregação da Universidade de  
Coimbra

**Coimbra, Setembro, 2014**

“Lute com determinação, abrace a vida com paixão, perca com classe e vença com ousadia porque o mundo pertence a quem se atreve e a vida é muito bela para ser insignificante.”

Charlie Chaplin.

Aos meus pais e irmãos.

## Agradecimentos

A realização desta dissertação só foi possível graças ao apoio de algumas pessoas às quais não posso deixar de agradecer.

A dissertação de mestrado é sem dúvida o culminar de uma das etapas mais importantes da minha formação académica, e apesar de ser em alguns momentos um processo solitário, muitos foram aqueles que de forma direta ou indireta me acarinham, incentivaram e apoiaram nesta fase.

Em primeiro lugar tenho de agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa e Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro, pela disponibilidade, incentivo e conhecimento transmitido. A sua ajuda foi imprescindível. Um profundo agradecimento.

O meu agradecimento ao Mestre Joel Alexandre da Silva de Jesus, pela sua contínua ajuda no desenvolvimento da dissertação.

O meu agradecimento a todos os professores do DEM pela disponibilidade ao longo da minha vida académica.

Um agradecimento aos meus amigos, João Vitorino, Norberto Ramos, Ricardo Domingos, Tomé Silva e Emanuel Silva que me ajudaram na revisão de alguns pontos da dissertação.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas que me ajudaram e apoiaram ao longo desta caminhada por Coimbra.

Um agradecimento à Mariana Pais pela paciência, compreensão, apoio e por acreditar sempre em mim, mesmo quando eu não acreditava.

Por fim, e porque sem o carinho, a energia e o amor, nada disto seria possível, agradeço aos meus pais, António e Rosalina, pela sua confiança, apoio e dedicação, que tiveram ao longo de todo o meu percurso académico.

A todos um profundo e sincero agradecimento.

## Resumo

Com a evolução das técnicas e processos tecnológicos de ligação, surgiu em 1991 a soldadura por fricção linear (FSW) como uma das soluções mais promissoras com vista ao desenvolvimento sustentável, pelo facto de ser um processo simples, sem grandes custos energéticos e reciclável. As alterações macroestruturais e o ganho de propriedades mecânicas das soldaduras por FSW conduziram à sua adaptação para ser utilizada no melhoramento das propriedades mecânicas de materiais, aparecendo portanto o *Friction Stir Processing* (FSP).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da geometria da ferramenta, em particular do pino, e das suas velocidades de rotação e de avanço nas propriedades microestruturais e mecânicas da zona processada (ZP) por FSP. Foi feita a caracterização da morfologia, microestrutura e dureza nas zonas obtidas por FSP na liga AA5083-H111.

Foram utilizadas ferramentas com a mesma base (*shoulder*) e pinos diferentes, com formas cónica roscada, cilíndrica roscada com rasgo, prismática de base quadrada, piramidal quadrangular e cilíndrica roscada. As velocidades de rotação usadas foram 1000 e 1500 rpm enquanto as velocidades de avanço foram 40, 80 e 120 mm/min.

Os resultados obtidos revelam que a zona processada com geometria mais adequada e maior dureza foi obtida com a ferramenta de pino em forma de pirâmide quadrangular, e velocidade de rotação mais baixa. Esta ferramenta com velocidade de rotação de 1000 rpm e velocidade de avanço 80 mm/min proporcionou uma zona processada com uma largura de 9,1 mm, ângulo 31,7°, dureza média de 89 Vickers e tamanho de grão compreendido entre 2,5 e 5  $\mu\text{m}$ .

**Palavras-chave:** Processamento por FSP, Alumínio 5083-H111, geometria da ferramenta.

## Abstract

Along with the evolution of the techniques and technological processes of material joining, appeared friction stir welding (FSW), in 1991, as one of the most promising solutions that would allow for sustainable development, being a simple, energetically economic and a recyclable process. The macro-structural changes and the gain of mechanical properties in the processed area of materials welded by FSW led to an adaptation of the technique for use in improving the mechanical properties of the material surface, thus appearing the Friction Stir Processing (FSP).

The aim of this study was to evaluate the influence of the geometry of the tool and its pin in particular, as well as its rotation and traverse speeds, in the mechanical properties of the processed zone (PZ) by FSP. The morphology, microstructure and hardness of the processed zone obtained by FSP in the alloy AA5083-H111 were characterized.

Tools with the same shoulder but with different pins were used, their shapes being conical threaded, cylindrical threaded with and without tearing, prismatic with square base and square pyramidal. The rotational speeds used were 1000 and 1500 rpm while the traverse speeds were 40, 80 and 120 mm/min.

The results showed that the processed zone with the most adequate geometry and highest hardness was obtained using the tool with the quadrangular pyramid pin and the lowest rotation speed. This tool, with a rotation speed of 1000 rpm and a traverse speed of 80 mm/min, produced a processed zone with a width of 9,1 mm, a 31,7° angle, an average hardness of 89 Vickers, and a grain size ranging from 2,5 to 5 microns.

**Keywords** Friction Stir Processing, Aluminium alloy AA5083-111, Tool geometry.

## Índice

Índice de Figuras .....	vi
Índice de Tabelas .....	viii
Simbologia e Siglas .....	ix
Simbologia.....	ix
Siglas .....	ix
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Estrutura da tese.....	3
2. Revisão bibliográfica.....	4
2.1. Introdução .....	4
2.2. Ligas de Alumínio e Propriedades.....	4
2.2.1. Ligas da Série 5XXX.....	5
2.2.2. Aplicações da Liga de AA5083-H111 .....	6
2.3. Soldadura do Alumínio.....	6
2.4. Processamento por Fricção Linear (FSP) .....	7
2.4.1. Descrição do Processo de FSP.....	8
2.4.2. Vantagens, Inconvenientes e aplicações do processamento por FSP.....	9
2.4.3. Fluxo de Calor e de material.....	10
2.4.4. Ferramentas para FSW e FSP .....	10
2.4.5. Zona Processada .....	14
3. Procedimento experimental.....	18
3.1. Introdução .....	18
3.2. Preparação das Placas a processar .....	18
3.3. Processamento por FSP nas placas .....	19
3.3.1. Equipamento Usado.....	19
3.3.1. Procedimento Experimental do FSP.....	21
3.4. Polimento e Contrastação .....	23
3.5. Morfologia do FSP.....	23
3.6. Análise de Durezas .....	24
3.7. Análise do Tamanho de Grão .....	25
4. Resultados e discussão .....	27
4.1. Morfologia do FSP.....	27
4.1.1. Forma da Zona Processada.....	27
4.1.2. Largura de processamento D e Ângulo $\alpha$ .....	28
4.2. Microestrutura do FSP .....	32
4.2.1. Análise do tamanho de grão no <i>Nugget</i> .....	35
4.3. Microdureza .....	36
4.3.1. Microdureza obtida nas zonas processadas .....	36
4.3.2. Microdureza no <i>Nugget</i> .....	38

---

5.	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	40
5.1.	Conclusões.....	40
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros.....	41
6.	Revisão bibliográfica.....	42
A.	ANEXO A.....	A.1
Ap. A	Apêndice A.....	Ap.1
Ap. B	Apêndice B.....	Ap.2
Ap. C	Apêndice C.....	Ap.7
Ap. D	Apêndice D.....	Ap.8



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema do processamento por FSP [6].....	8
Figura 2.2. Diferentes pinos para a ferramenta de SFL. Legenda: a) Cônico estriado roscado; b) Trifacetado roscado; c) Cilíndrico roscado; d) Cônico liso; e) Cônico roscado f) Cônico estriado invertido [12] [13] [14]. .....	12
Figura 2.3. Diferentes tipos de <i>shoulders</i> de ferramentas de SFL. Legenda: a) <i>Shoulder</i> com estrias em espiral; b) <i>Shoulder</i> com estrias concêntricas; c) <i>Shoulder</i> plano d) <i>Shoulder</i> côncavo [4] [17]. .....	13
Figura 2.4. Representação da zona Processada [2]. MB - material base; ZAC - Zona afetada pelo calor; ZATM – Zona afetada termomecanicamente; <i>Nugget</i> – Zona do <i>nugget</i> ; Lado do Retrocesso - Lado do retrocesso; Lado Avanço - Lado do avanço [18]. .....	14
Figura 2.5. (a) Zona <i>nugget</i> com forma de bacia [22]; (b) Zona do <i>nugget</i> com forma elíptica [22]. .....	15
Figura 2.6. Micrografia do <i>Nugget</i> , AA50083-H111. ....	16
Figura 2.7. Micrografia da ZATM/ <i>Nugget</i> , AA-5083. ....	17
Figura 3.1. Representação esquemática do processamento por fricção linear. ....	19
Figura 3.2. Sistema de fixação da placa na mesa. ....	20
Figura 3.3. Geometria das ferramentas: (a) T1, (b) T2, (c) T3, (d) T4 e (e) T5. ....	21
Figura 3.4. Máquina <i>Buenler</i> de polimento. ....	23
Figura 3.5. (a) Parâmetros geométricos que caracterizam a secção de soldadura; (b) Modo de determinação da largura D. ....	24
Figura 3.6. (a) Esquema da localização das indentações para obtenção dos perfis de dureza; (b) Máquina de microdureza. ....	25
Figura 3.7. Microscópio <i>Zeiss Axiotech 100HD</i> . ....	26
Figura 4.1. (a) Macrografia obtida com a ferramenta T1_W15_V4; (b) Macrografia obtida com a ferramenta T2_W15_V8; (c) Macrografia obtida com a ferramenta T3_W10_V4; (d) Macrografia obtida com a ferramenta T4_W10_V80; (e) Macrografia obtida com a ferramenta T5_W15_V12. ....	28
Figura 4.2. Macrografia obtida com a ferramenta T4_W10_V8, com a largura de processamento D e o ângulo $\alpha$ assinalados. ....	29
Figura 4.3. Gráfico representativo da relação de velocidades com a largura de processamento D. ....	30
Figura 4.4. Gráfico representativo da relação do quociente de velocidades com ângulo $\alpha$ . ....	31

Figura 4.5. Gráfico representativo da relação das velocidades de rotação e avanço com o ângulo $\alpha$ .	32
Figura 4.6. Análise morfológica e microestrutura do FSP: (a) Macrografia da ferramenta T4_W10_V8, (b) Lado do retrocesso; (c) <i>Nugget</i> ; (d) Lado do avanço e (e) Zona do Pé.	33
Figura 4.7. Gráficos do tamanho de grão sob a forma de intervalo.	35
Figura 4.8. Perfil de durezas da ferramenta pirâmide quadrangular (T4).	36
Figura 4.9. Gráficos das durezas médias.	38
Figura 4.10. (a) Dureza média para W15; (b) Dureza média para W10.	39
Figura A.1. Ferramenta T1, com pino cônico roscado e respetiva cotagem.	A.1
Figura A.2. Ferramenta T2, com pino cilíndrico roscado com rasgo e respetiva cotagem.	A.2
Figura A.3. Ferramenta T3, com pino prismático base quadrada e respetiva cotagem.	A.2
Figura A.4. Ferramenta T4, com pino pirâmide quadrangular e respetiva cotagem.	A.3
Figura A.5. Ferramenta T5, com pino cilíndrico roscado e respetiva cotagem.	A.3
Figura Ap. A.1. Macrografia da ferramenta: (a) T1_W15_V4, com o comprimento D e o ângulo $\alpha$ assinalados; (b) T2_W15_V8, com o comprimento D e o ângulo $\alpha$ assinalados; (c) T3_W10_V4, com o comprimento D e o ângulo $\alpha$ assinalados; (d) T5_W15_V12, com o comprimento D e o ângulo $\alpha$ assinalados.	Ap.1
Figura Ap. B.1. Análise morfológica e microestrutura do FSP: (a) Macrografia da ferramenta T1_W15_V4, (b) Lado do retrocesso; (c) <i>Nugget</i> ; (d) Lado do avanço; (e) Zona do Pé.	Ap.3
Figura Ap. B.2 Análise morfológica e microestrutura do FSP: (a) Macrografia da ferramenta T2_W15_V8, (b) Lado do retrocesso; (c) <i>Nugget</i> ; (d) Lado do avanço; (e) Zona do Pé.	Ap.4
Figura Ap. B.3. Análise morfológica e microestrutura do FSP: (a) Macrografia da ferramenta T3_W10_V4, (b) Lado do retrocesso; (c) <i>Nugget</i> ; (d) Lado do avanço; (e) Zona do Pé.	Ap.5
Figura Ap. B.4. Análise morfológica e microestrutura do FSP: (a) Macrografia da ferramenta T5_W15_V12, (b) Lado do retrocesso; (c) <i>Nugget</i> ; (d) Lado do avanço; (e) Zona do Pé.	Ap.6
Figura Ap. D.1. Perfil de durezas da ferramenta cônica roscada (T1).	Ap.8
Figura Ap. D.2. Perfil de durezas da ferramenta cilíndrica roscada com rasgo (T2).	Ap.8
Figura Ap. D.3. Perfil de durezas da ferramenta prismática base quadrada (T3).	Ap.9
Figura Ap. D.4. Perfil de durezas da ferramenta cilíndrica roscada (T5).	Ap.9

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Classificação das ligas de alumínio [3]. .....	5
Tabela 2.2. Composição química nominal da liga AA5083-H111 [4]. .....	6
Tabela 2.3. Propriedades mecânicas e físicas nominais da liga AA5083-H111. ....	6
Tabela 2.4. Configuração de ferramentas de Soldadura por Fricção Linear desenvolvidas pelo “ <i>The Welding Institute</i> ” [9]. .....	11
Tabela 3.1. Ferramentas e parâmetros de processamento utilizados. ....	22
Tabela 4.1. Valores medidos da largura de processamento D e do ângulo $\alpha$ . ....	29
Tabela C.1. Tamanho de grão [ $\mu\text{m}$ ] sob a forma de intervalo. ....	Ap.7

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$\sigma_y$  – Tensão de cedência

$\sigma_0$  – Tensão para iniciar o movimento de deslocações

$k_y$  – Velocidade de endurecimento de trabalho

$d$  – Diâmetro médio do tamanho de grão

### Siglas

AA – Aluminium Alloy

ASTM – American Society for Testing and Materials

DEM – Departamento Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências da Universidade de Coimbra

FSP – Friction Stir Processing

FSW – Friction Stir Welding

NG – Nugget

MB – Material base

MIG – Metal Inert Gás

TWI – The Welding Institute

ZAC – Zona afetada pelo calor

ZATM – Zona afetada termomecanicamente

ZF – Zona fundida

## 1. INTRODUÇÃO

Hoje em dia a soldadura está presente em inúmeras aplicações nos vários sectores da indústria como meio de ligação de duas ou mais peças, garantindo a continuidade das propriedades físicas, químicas e mecânicas. Estas estão presentes em áreas como a indústria automóvel aeronáutica e metalomecânica, entre outras.

O processamento por FSP (*Friction Stir Processing*) é uma técnica desenvolvida com base nos mesmos princípios da soldadura FSW (*Friction Stir Welding*). Estas duas tecnologias recorrem à utilização de uma ferramenta rotativa constituída por um pino e uma base (*shoulder*) concêntricos, ambos não consumíveis. O pino da ferramenta em rotação penetra na peça de trabalho até a base entrar em contacto com a superfície, iniciando então o movimento de avanço na direcção desejada, gerando uma grande quantidade de calor e deformação plástica. A soldadura por fricção linear (*Friction Stir Welding* - FSW), foi inventada e patenteada pelo *The Welding Institute* (TWI), sediado em Cambridge, Inglaterra [1]. Esta inovação constitui um dos maiores avanços a nível na ligação de materiais permitindo de ligar materiais no estado sólido, evitando a utilização de fontes de calor usadas pelos métodos convencionais para promover a fusão das juntas. Esta técnica foi desenvolvida numa primeira fase para soldar alumínio e mais tarde utilizada para outros materiais macios como o cobre, níquel, entre outras ligas.

A grande diferença entre o processamento (FSP) e a soldadura (FSW), reside no facto de a soldadura ser usada para unir componentes mecânicos e o processamento ser utilizado essencialmente com o fim de homogeneizar e refinar a microestrutura dos materiais processados, eliminando por exemplo defeitos de fabrico e alterando localmente as propriedades mecânicas do material. Embora esta técnica seja relativamente recente, o seu número de aplicações tem vindo a multiplicar-se devido às diversas vantagens que apresenta.

Como foi referido no parágrafo anterior, com o processamento por FSP consegue-se homogeneizar e refinar a microestrutura dos materiais. Na zona processada pela ferramenta este refinamento de grão pode aumentar a resistência à fadiga, corrosão e condutividade eléctrica, conduzindo também a melhores características de formabilidade. Um estudo realizado em Portugal por Miranda *et al.* [2], que trata o efeito do processamento de

superfícies em multipassagens em ligas de alumínio AA 5083-H111, conclui que esta é uma técnica efetiva para incrementar localmente propriedades mecânicas, tais como a dureza e a resistência à flexão.

Além disso, esta técnica também altera o estado de tensões na zona processada, o que pode ser vantajoso para componentes solicitados, por exemplo à fadiga. Deste modo, esta técnica pode ser alternativa a outras, como o afagamento do pé do cordão, a refusão TIG, a granalhagem ou os ultra-sons, para reduzir as tensões residuais em zonas processadas. A geometria, as propriedades estruturais e mecânicas das zonas processadas por fricção linear dependem de parâmetros de processo, como a geometria da ferramenta e as suas velocidades de rotação e avanço, pelo que estes efeitos necessitam de ser investigados. A otimização destas características requer contudo a realização de estudos experimentais.

## **1.1. Objetivos**

Os principais objetivos a atingir com este trabalho podem ser resumidos como se segue:

- Avaliar a influência da geometria da ferramenta, das velocidades de rotação e de avanço na geometria e das propriedades da zona processada por FSP na liga AA5083;
- Caracterizar a microestrutura da zona processada, para todas as ferramentas;
- Medir e comparar os diferentes perfis de dureza nas zonas obtidas por FSP;
- Otimizar a geometria da zona processada, em função da geometria da ferramenta e dos parâmetros FSP.

## 1.2. Estrutura da tese

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre ligas de alumínio e métodos utilizados na sua soldadura e processamento, com especial ênfase na liga AA5083 e no processamento por fricção linear.

No capítulo 3 descreve-se todo o procedimento experimental utilizado no trabalho.

No capítulo 4 apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos.

No capítulo 5 são estabelecidas as conclusões mais relevantes coligadas ao longo do trabalho. De acordo com o trabalho realizado, é ainda apresentado um grupo de propostas para trabalho futuro com vista a esclarecer aspetos não abordados nesta tese.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar uma breve revisão bibliográfica, de forma a enquadrar o leitor em relação aos temas discutidos no decorrer do trabalho.

Numa primeira parte será feito um enquadramento das ligas de alumínio em geral, destacando a liga AA5083, referindo as suas propriedades químicas e físicas e dados exemplos de aplicações nos sectores da indústria.

Na segunda parte apresenta-se o processamento por fricção linear, mencionando a influência dos principais parâmetros, em particular a geometria de ferramentas, vantagens, desvantagens e por fim as características da zona processada.

### 2.2. Ligas de Alumínio e Propriedades

O alumínio (Al) é o elemento metálico mais abundante na crosta da Terra. É um metal muito leve, com um massa específico de  $2,7 \text{ kg dm}^{-3}$ , cerca de um terço do aço. Por exemplo, o uso de alumínio em veículos reduz o peso próprio e o consumo de energia e aumenta a capacidade de carga. A sua resistência pode ser adaptada para a aplicação desejada por modificação da composição das suas ligas e por vários tratamentos térmicos e mecânicos. Os principais elementos de adição são o cobre (Cu), o silício (Si), o manganês (Mn), o magnésio (Mg) e o zinco (Zn). As propriedades da liga variam em função da concentração e do tipo de elementos adicionados. Na Tabela 2.1 são referidas as diferentes famílias de ligas de alumínio que existem.

O alumínio gera naturalmente um revestimento de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que é altamente resistente à corrosão. Diferentes tipos de tratamentos de superfície, como a anodização, a pintura ou a lacagem podem melhorar ainda mais essa propriedade. É particularmente útil para aplicações que exigem proteção e conservação.



O alumínio é um excelente condutor de calor e eletricidade, sendo quase duas vezes melhor condutor que o cobre. Isso fez com que o alumínio fosse o material mais usado em grandes linhas de transmissão de energia.

O alumínio é maleável e tem um ponto de fusão baixo, sendo facilmente processado por diversas tecnologias.

**Tabela 2.1.** Classificação das ligas de alumínio [3].

Série	Composição	Tratável termicamente
1xxx	Al > 99,00%	Não
2xxx	Al+Cu	Sim
3xxx	Al+Mn	Não
4xxx	Al+Si	Não
5xxx	Al+Mg	Não
6xxx	Al+Mg+Si	Sim
7xxx	Al+Zn+Mg	Sim
8xxx	Al + outros elementos	Normalmente sim

### 2.2.1. Ligas da Série 5XXX

As ligas da série 5xxx têm como principal elemento de liga o magnésio, que pode ser adicionado até 5%, de modo a promover o endurecimento por solução sólida do material.

A liga utilizada no presente trabalho é a AA5083-H111, que não é tratável termicamente e tem um endurecimento por deformação plástica. Estas ligas têm como principais propriedades a excelente resistência à corrosão e soldabilidade e alta resistência mecânica, tratando-se de ligas destinadas a estruturas soldadas muito solicitadas. Possui alta resistência a ambientes tanto de água do mar como de produtos químicos industriais, devido ao teor relativamente elevado de magnésio.

Na Tabela 2.2. está indicada a composição química nominal desta liga.

**Tabela 2.2.** Composição química nominal da liga AA5083-H111 [4].

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
%Mínima Presente	-	-	-	0,40	4,00	0,05	-	-	-
%Máxima Presente	0,40	0,40	0,10	1,00	4,90	0,25	0,25	0,15	Restante

Na Tabela 2.3 estão representadas as propriedades mecânicas e físicas nominais da liga AA5083-H111.

**Tabela 2.3.** Propriedades mecânicas e físicas nominais da liga AA5083-H111.

<b>Tensão Limite de Elasticidade a 0,2% (MPa)</b>	145
<b>Tensão Limite de Rotura (MPa)</b>	300
<b>Tensão Limite de Corte (MPa)</b>	175
<b>Alongamento (%)</b>	23
<b>Dureza Vickers (HV)</b>	75
<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2700
<b>Temperatura de fusão (°C)</b>	660
<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	69
<b>Resistência Elétrica (Ω.m)</b>	0,058×10 <sup>-6</sup>
<b>Condutividade Térmica (W/m.K)</b>	121

### 2.2.2. Aplicações da Liga de AA5083-H111

A liga 5083-H111 é encontrada nas mais diversas aplicações industriais como por exemplo na construção automóvel e naval, no fabrico de estruturas, tanques e reservatórios industriais, vasos de pressão não sujeitos a chama, veículos militares e plataformas petrolíferas.

## 2.3. Soldadura do Alumínio

A maioria das ligas de alumínio é compatível com os processos de soldadura de arco elétrico com proteção gasosa (árgon, hélio), como por exemplo a soldadura MIG (*Metal Inert Gas*), TIG (*Tungsten Inert Gas*) e resistência elétrica. É importante salientar que a

soldadura das ligas de alumínio requer observação de procedimentos específicos, tais como o armazenamento adequado do material antes de ser soldado e a limpeza das juntas antes de soldar, de maneira a obter juntas soldadas com qualidade.

A soldadura do alumínio e suas ligas apresenta algumas peculiaridades em relação à soldadura de aços, sendo esta última uma prática já consideravelmente dominada. A principal dificuldade associada à soldadura do alumínio e suas ligas está relacionada com o facto de existir uma camada de óxido refratário, cuja temperatura de fusão é muito superior à do alumínio. A alta condutibilidade térmica e eléctrica do alumínio, bem como o seu alto coeficiente de expansão, também influenciam significativamente os requisitos de soldadura.

O alumínio é muito susceptível à formação de porosidade durante a soldadura, sendo o hidrogénio o principal responsável, normalmente proveniente da decomposição de hidrocarbonetos e água (humidade) [4] [5] . A condensação na superfície do material é a principal origem dessa humidade. Algumas ligas de alumínio das séries 2000 e 7000 são também sensíveis à fissuração a quente, quando soldadas com processos de soldadura por fusão. Além disso as ligas mais resistentes apresentam perdas substanciais de resistência na zona da soldadura.

## **2.4. Processamento por Fricção Linear (FSP)**

O processamento por fricção linear baseia-se nos princípios da soldadura por fricção linear. Nesta técnica, a fonte de energia utilizada para gerar o calor necessário ao desenvolvimento do processo é a fricção entre as peças a unir e uma ferramenta rotativa, que se desloca linearmente ao longo da linha de soldadura. Parte do calor é também gerado por deformação plástica do material. A energia calorífica resultante conduz ao amaciamento dos materiais a processar, que sofrem deformação plástica através da ferramenta rotativa, o que leva a um fluxo de material da frente para trás do pino, dando origem à zona processada após arrefecimento.

No processamento por FSP na liga AA5083-H1111 é preciso ter em conta dois aspetos: o endurecimento por deformação plástica e a alteração do tamanho de grão,

motivada pela recristalização; a variação do tamanho de grão influencia a resistência mecânica do material, conforme estabelece a lei de Pecht e Hall .

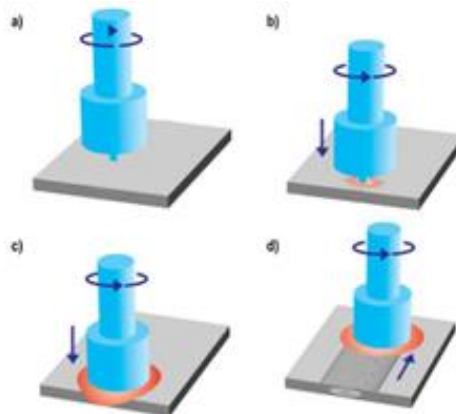
A lei de Pecht e Hall é expressa pela equação (2.1)

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y \cdot d^{-0.5}. \quad (2.1)$$

onde  $\sigma_y$  é a tensão de cedência,  $\sigma_0$ , é a tensão para iniciar o movimento de deslocações,  $k_y$  é a velocidade de endurecimento de trabalho e  $d$  é o diâmetro médio do grão. Da equação anterior conclui-se que quanto maior for o diâmetro médio do grão, menor será a tensão de cedência.

### 2.4.1. Descrição do Processo de FSP

A técnica de processamento por FSP é uma tecnologia com o mesmo princípio da soldadura por fricção linear (FSW). A principal diferença entre ambas reside no facto de FSW soldar componentes, enquanto FSP melhora as microestruturas locais. Para controlar o FSP é necessário manipular as velocidades de rotação e de avanço, a pressão axial exercida e o ângulo de ataque da ferramenta. Na Figura 2.1, está esquematizado o funcionamento do processo.



**Figura 2.1.** Esquema do processamento por FSP [6].

- Ferramenta rotativa sem estar em contacto com a placa a processar;
- Pino da ferramenta entra em contacto com a placa, gerando calor;
- Base faz o contacto e gera pressão e calor na superfície;
- Placa move-se relativamente à ferramenta rotativa, gerando grande deformação plástica.

### 2.4.2. Vantagens. Inconvenientes e aplicações do processamento por FSP

O FSP apresenta as seguintes vantagens em relação a outros métodos de processamento:

- Possibilidade de produzir refinamento, homogeneização e densificação microestrutural numa só passagem;
- Controlo da microestrutura e propriedades mecânicas dos materiais processados através da otimização dos parâmetros;
- Alívio de tensões residuais no pé de soldaduras por fusão;
- Ajustamento da dimensão e geometria através do controlo das dimensões da ferramenta;
- A exatidão dimensional obtida é maior do que em qualquer outro processo equiparado;
- Extensível a diversas posições de trabalho e diversos tipos de juntas;
- Versatilidade e economia do processo, tendo em vista uma utilização na fabricação, processamento e síntese de materiais;
- Possibilidade de ser robotizada;
- Técnica energeticamente eficiente, sem emissão de gases e radiações;
- Não altera a forma nem as dimensões do componente processado.

Esta tecnologia apresenta também algumas desvantagens, que são resumidas a seguir:

- Dificuldade em ser aplicada em componentes complexos;
- Velocidades de processamento não muito elevadas;
- Dificuldade na utilização do processo em materiais duros tais como aços e ligas de titânio.

A técnica FSP é muito versátil, podendo ser aplicada nas mais diversas áreas como por exemplo nas indústrias de construção naval, automóvel, ferroviária, aeroespacial, de construção e elétrica.

### 2.4.3. Fluxo de Calor e de material

Conforme já referido a geração de calor deve-se à fricção entre a ferramenta em rotação e o material, e pela deformação plástica dos materiais, imposta pelo pino e base da ferramenta em rotação. O calor gerado está dependente da forma da base e do pino da ferramenta, aumentando com o aumento da velocidade de rotação da ferramenta. O calor gerado plastifica o material, facilitando o fluxo imposto pela rotação da ferramenta.

O fluxo de material durante o processo é bastante complexo, pelo facto de depender de diversos fatores, mas principalmente da geometria da ferramenta, particularmente da base e do pino. Genericamente o pino à medida que avança cria uma cavidade no material e a base arrasta o material da parte da frente da ferramenta para a parte de trás, tapando a cavidade criada. É usual considerar dois tipos de fluxo de material, o que é comandado pela base e o que é comandado pelo pino [7]. O pino contribui para deslocar o material para baixo, em direção à raiz, prevenindo a formação de cavidades na zona processada. A interação entre os dois tipos de fluxo de material é considerada condição para prevenir a formação de defeitos [8].

### 2.4.4. Ferramentas para FSW e FSP





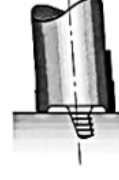

Como já se referiu anteriormente a geometria das ferramentas é uma variável importante na FSW e FSP. A otimização da geometria da ferramenta para produzir mais calor ou alcançar mais eficiência durante a ação do pino traduz-se em dois benefícios principais: a melhoria da quebra e da mistura da camada de óxidos existente nas chapas e a produção mais eficiente de calor, alcançando-se maiores velocidades de soldadura e, evidentemente, maior qualidade. As ferramentas influenciam deste modo a quantidade de calor gerado, o fluxo de material, a energia consumida e a uniformidade da zona soldada ou processada. A base gera a maior parte do calor e o pino, por sua vez, afeta o fluxo de material [9] [8].

Os materiais para ferramentas devem apresentar dureza relativamente elevada, e devem manter essa dureza a temperaturas elevadas por um período prolongado. Devem também ser resistentes à oxidação e possuir baixa condutividade térmica para minimizar as

perdas de calor e danos térmicos no equipamento. O uso da ferramenta ideal minimiza os defeitos da soldadura, induz melhor mistura do material e permite atingir velocidades de processo elevadas [10] [8].

De maneira a cumprir estes requisitos foram desenvolvidas várias ferramentas com características distintas. A Tabela 2.4 apresenta ferramentas-padrão registadas pelo TWI. As diferenças no tamanho, forma e geometria são adequadas para aplicações específicas, considerando o material e tipo de junta.

**Tabela 2.4.** Configuração de ferramentas de Soldadura por Fricção Linear desenvolvidas pelo “The Welding Institute” [9].

Ferramenta	Cylindrical	Whorl™	MX triflute™	Flared triflute™	A-skew™	Re-stir™
Esquema						
Forma do pino	Cilíndrico com roscas	Cônico com roscas	Roscado cônico com três estrias	Tri-estriado com estrias alargadas para fora	Cilíndrico inclinado com roscas	Cônico roscado
Rotação invertida	Não	Não	Não	Não	Não	Sim
Aplicação	Soldadura topo-a-topo; falha em soldadura sobreposta	Soldadura topo-a-topo com menor esforço de torção	Soldadura topo-a-topo com muito menor esforço de torção	Soldadura sobreposta com menor desgaste de placa superior	Igual ao anterior	Quando é desejada a mínima assimetria nas propriedades da soldadura

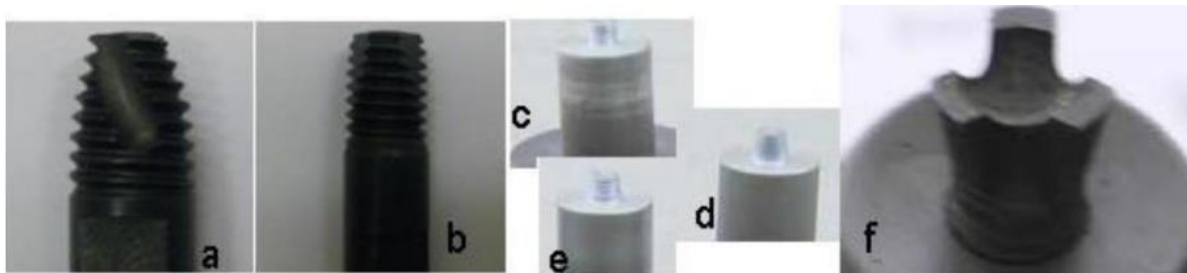
As estrias na *MX-triflute* aumentam a área entre a ferramenta e as peças de trabalho, levando ao aumento do calor gerado, do amaciamento e fluxo de material. As ferramentas *Whorl* e *MX triflute* têm pinos com volume inferior às ferramentas com pinos cilíndricos. As roscas cónicas das ferramentas *Whorl* induzem uma componente de velocidade vertical que facilita o fluxo de material [9].

Os designs cilíndricos *Whorl* e *MX triflute* são adequados para soldaduras topo a topo, não sendo úteis para juntas sobrepostas, onde o desgaste excessivo da placa superior pode ocorrer em conjunto com o aprovisionamento de óxido aderente entre as superfícies sobrepostas. As ferramentas *Flared triflute* e *A-skew* foram desenvolvidas para assegurar a

fragmentação da camada interfacial de óxido e uma maior ligação do que o usual em juntas de topo. A ferramenta *Flared triflute* é semelhante à *MX triflute* com uma estriagem expandida, enquanto a ferramenta *A-skew* é cônica roscada, com o seu eixo inclinado relativamente ao eixo da máquina. Ambas as ferramentas aumentam o volume varrido relativo ao pino, expandindo assim a região de agitação, resultando numa maior união e no sucesso de soldaduras sobrepostas [9].

Devido ao movimento de rotação e translação da ferramenta é induzida assimetria no fluxo de material e aquecimento através do pino. Durante o processo de soldadura por fricção linear o material flui principalmente no lado do retrocesso. Para superar este problema, o TWI, desenvolveu uma nova ferramenta, *Re-stir*, que aplica inversão periódica de rotação da ferramenta. Esta inversão da rotação elimina a maioria dos problemas associados à assimetria inerente ao processo tradicional. Esta pode ser usada na união de materiais dissimilares, porque as voltas alternadas nas diferentes direções compensam as diferenças de fluxo de material [9] [11].

As diferenças no tamanho, forma e geometria são adequadas para uma aplicação específica, considerando o material e tipo de junta e na Figura 2.2 podemos ver vários tipos de pinos.



**Figura 2.2.** Diferentes pinos para a ferramenta de SFL. Legenda: a) Cônico estriado roscado; b) Trifacetado roscado; c) Cilíndrico roscado; d) Cônico liso; e) Cônico roscado f) Cônico estriado invertido [12] [13] [14].

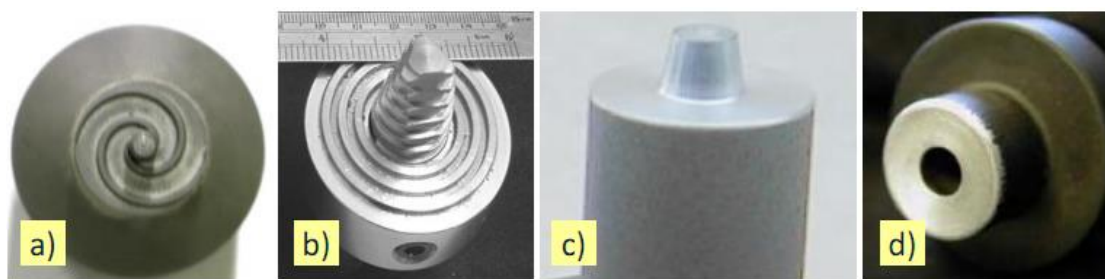
Nos pinos lisos ou roscados, a rosca possibilita aumentar o transporte de material na vertical, aumentando a capacidade de uniformizar a pressão ao longo da espessura dos componentes a soldar e promovendo uma maior mistura dos materiais. As vantagens do pino ser cônico em relação ao cilíndrico são: aumentar o efeito de forjamento vertical uniformizando o nível de compressão ao longo da espessura de componentes a soldar e a resistência da junta, diminuindo a suscetibilidade à formação de cavidades no material, resultantes de pontos de baixa pressão na zona do *nugget*. A abertura de canais em espiral



tem a mesma função do facetamento a direito, mas permite induzir um efeito adicional de forjamento vertical do material contra a placa de suporte.

K.Elangovan, V. Balasubramanian [15] [16], estudaram a influência de diferentes perfis do pino, entre os quais o cilíndrico liso, o cilíndrico roscado, o cônico liso, o quadrado e o triangular, sobre o fluxo de material. Foram testadas diferentes velocidades de rotação e diâmetros de base, verificando-se que o pino quadrado obteve sempre melhores resultados, apresentando menos defeitos que os restantes pinos.

Na Figura 2.3 [15,16] mostram-se exemplos de diferentes tipos de bases (*shoulders*) de ferramentas, que como foi referido anteriormente tem a função de conter o fluxo de material que é extrudido e forjado pelo pino, impedindo que este suba e seja expelido.

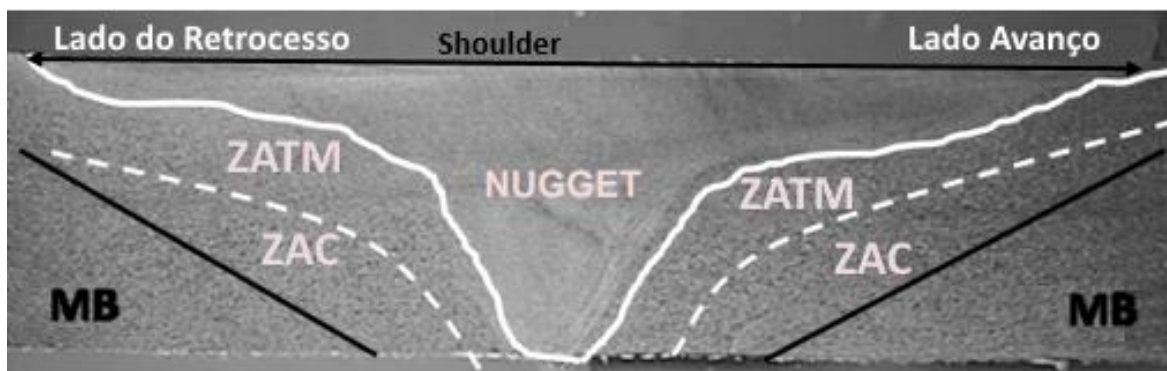


**Figura 2.3.** Diferentes tipos de *shoulders* de ferramentas de SFL. Legenda: a) *Shoulder* com estrias em espiral; b) *Shoulder* com estrias concêntricas; c) *Shoulder* plano d) *Shoulder* côncavo [4] [17].

As estrias em espiral e as concêntricas têm um melhor efeito no escoamento do material para o centro do *shoulder*. Comparando o *shoulder* plano em relação ao côncavo, este último apresenta a vantagem de dirigir melhor o material que escoar na base da ferramenta para o centro, na direção do pino, diminuindo o material que escapa e assim a formação de rebarba. Comparando os lisos com os estriados, os primeiros precisam de um ângulo de ataque para gerar condições adequadas ao fluxo de material. O mesmo não acontece com *shoulders* estriados, pois não necessitam deste ângulo permitindo soldar perpendicularmente à chapa, pois o efeito das estrias é suficiente para dirigir o material para o interior do *shoulder* em direção do pino, reduzindo a formação de rebarba.

### 2.4.5. Zona Processada

No processamento utiliza-se uma ferramenta com um pino não consumível, tal como acontece na soldadura por fricção linear, que através da rotação da ferramenta, da pressão axial que é exercida, e do avanço linear da ferramenta, origina uma zona processada que é fortemente deformada plasticamente. Esta é caracterizada por três zonas microestruturais diferentes, como exemplifica a Figura 2.4.



**Figura 2.4.** Representação da zona Processada [2]. MB - material base; ZAC - Zona afetada pelo calor; ZATM - Zona afetada termo mecanicamente; *Nugget* - Zona do *nugget*; Lado do Retrocesso - Lado do retrocesso; Lado Avanço - Lado do avanço [18].

Nesta imagem é visível o material base (MB), o lado do retrocesso, o lado do avanço e o diâmetro do *shoulder* da ferramenta. Destacam-se também três zonas diferentes morfológicamente: a zona afetada pelo calor (ZAC), a zona afetada termomecanicamente (ZATM) e o *nugget* (NG).

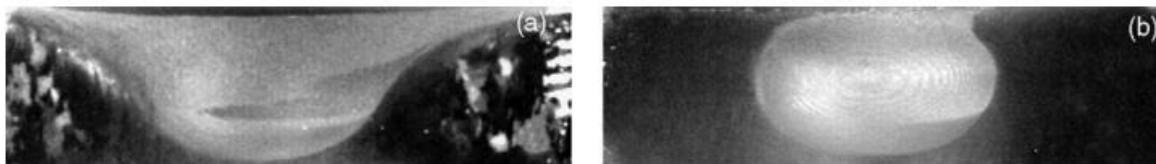
#### 2.4.5.1. *Nugget*

Estudos realizados recentemente sobre a microestrutura existente no *nugget* (zona recristalizada dinamicamente), mostraram que esta zona apresenta uma elevada recristalização dos grãos (C. G. Rhodes et al, [17]; L. E. Murr et al, [19]), onde acontece a maior taxa de deformação plástica. Através de estudos efetuados, a recristalização nas ligas de

alumínio, AA1100 (L. E. Murr et al, [19]), AA6061 (G . Liu et al, [19]) e AA7075 (C.G. Rhodes et al, [17]), conduziu à obtenção de tamanhos de grão na ordem dos 2 até 10  $\mu\text{m}$  (N. Saito et al, [20]). Estes tamanhos de grão em relação ao material base são sensivelmente 10 a 100 vezes inferiores.

Os parâmetros usados no processo de fricção linear e as propriedades do material soldado produzem diferentes formas geométricas do *nugget*. Este pode ser classificado em dois tipos: forma de uma bacia ou forma elíptica, Sato et al, [20], verificaram experimentalmente que o *nugget* na liga AA6063-T5, soldada por fricção linear, apresentava a forma de uma bacia (Figura 2.5 (a)). Por outro lado, Rhodes et al, [17] e Mahoney et al, [17], averiguaram a existência de uma zona de *nugget* com forma elíptica (Figura 2.5 (b)) numa liga AA7075-T651 soldada.

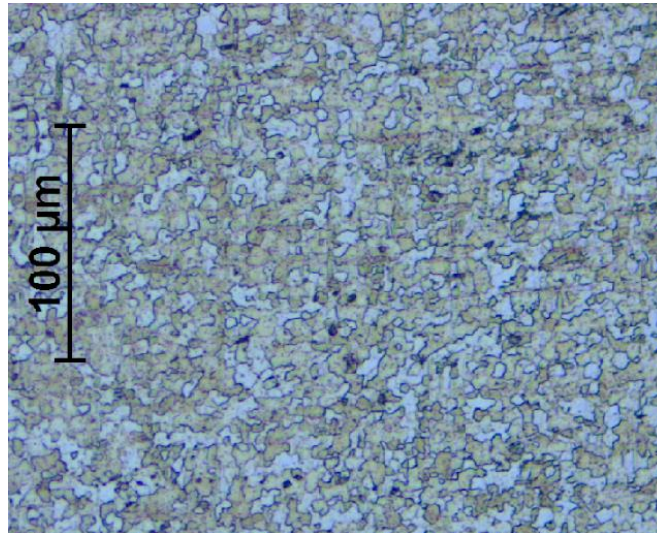
Foi realizada uma investigação por A. Steuwer et al, [21], sobre este tipo de processamento de união em placas com 3 mm de espessura nas ligas AA5083 e AA6082, concluindo que a velocidade de rotação do pino tem maior influência na geração de calor, durante a soldadura em relação à velocidade de avanço.



**Figura 2.5.** (a) Zona *nugget* com forma de bacia [22]; (b) Zona do *nugget* com forma elíptica [22].

O *nugget* é a zona onde o pino promove uma intensa deformação plástica e aquecimento, levando a recristalização dinâmica do grão. Devido a este efeito verifica-se a formação de grãos mais finos e equiaxiais. Os parâmetros usados no processo, a geometria da ferramenta, a composição da peça processada e a pressão aplicada exercem grande influência no tamanho dos grãos recristalizados. Na Figura 2.6 apresenta-se a micrografia

do *nugget* de uma soldadura na liga de alumínio AA5083-H111, obtida no decorrer deste trabalho.



**Figura 2.6.** Micrografia do *Nugget*, AA5083-H111.

#### **2.4.5.2. Zona Termomecanicamente Afetada**

A zona afetada termomecanicamente (ZATM) encontra-se na transição entre o *nugget* e o material base. Esta zona caracteriza-se por ter uma estrutura de grãos alongados na direção do fluxo de material em torno do *nugget*. Apesar da deformação plástica que esta zona sofre, não se verifica recristalização do grão porque não há uma extensão de deformação suficientemente grande ou temperatura suficiente para induzir a recristalização. Também é possível verificar uma dissolução dos precipitados nesta zona devido à temperatura à qual é exposta, no caso de soldaduras em ligas de alumínio suscetíveis a tratamento térmico. A extensão da dissolução está dependente do ciclo térmico à qual esta

zona é submetida. Na Figura 2.7 pode-se observar com mais detalhe a diferença entre o *nugget* e a zona afetada termomecanicamente, obtida após processamento por FSP.



**Figura 2.7.** Micrografia da ZATM/Nugget, AA-5083.

#### **2.4.5.3. Zona Afetada Pelo Calor**

A zona afetada pelo calor (ZAC), apesar de sujeita a um ciclo térmico, não é sujeita à deformação plástica como a ZATM. O ciclo térmico pode contudo exercer um grande impacto sobre a microestrutura, produzindo por exemplo alterações substanciais na diminuição e distribuição de precipitados, em ligas tratáveis termicamente.

O processamento por fricção linear tem sido investigado nos últimos anos no DEM com o objetivo de melhorar a resistência à fadiga de juntas de canto em ligas de alumínio soldadas pelo processo MIG. Os resultados já obtidos mostraram um incremento sensível da resistência quando algumas condições de processamento são utilizadas [23] [24] [25]. Interessava portanto investigar a influência desses parâmetros nas propriedades das zonas processadas.

## **3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

### **3.1. Introdução**

Neste capítulo é apresentado o material utilizado e todo o procedimento experimental realizado ao longo da preparação da tese. Em primeiro lugar é feita a apresentação das placas de material base, seguindo-se o procedimento de processamento por fricção linear e da preparação dos provetes para as análises a realizar; em particular os procedimentos de polimento e contrastação, análise morfológica e medição de dureza. Todos os ensaios são essenciais para selecionar qual a melhor combinação ferramenta/parâmetros nas placas processadas por fricção linear.

### **3.2. Preparação das Placas a processar**

O processamento foi realizado em placas de alumínio AA5083-H111, com dimensão original de 1000x80x6 mm, das quais foram extraídas placas com 333x80x6 mm. A composição química e propriedades mecânicas nominais das placas já foram indicadas no ponto 2.2.1.

Na Figura 3.1. está esquematizado como foi efetuado o processamento por fricção linear. Cada linha de processamento inicia-se com uma velocidade de rotação de 1000 rpm e uma velocidade de avanço de 40 mm/min, aumentando esta para 80 mm/min e posteriormente para 120 mm/min. Depois mudou-se para uma velocidade de rotação de 1500 rpm, repetindo as velocidades de avanço. Cada combinação foi realizada com uma distância

de 50 mm e um pequeno intervalo entre cada um. Este procedimento repetiu-se para todas as ferramentas.

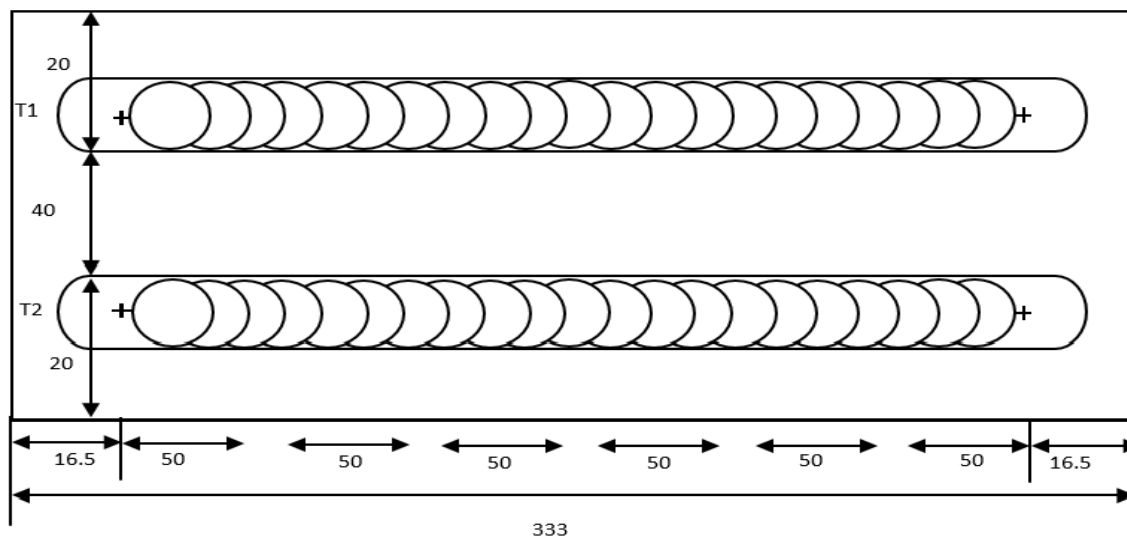


Figura 3.1. Representação esquemática do processamento por fricção linear.

### 3.3. Processamento por FSP nas placas

#### 3.3.1. Equipamento Usado

Para a realização do processamento por fricção linear recorreu-se a um centro de maquinagem vertical MORI SEIKI MC640 que, embora tenha controlo da velocidade de avanço da mesa de trabalho, da velocidade de rotação da ferramenta e da posição vertical da mesa, não tem controlo da carga que é feita ao longo do ensaio.

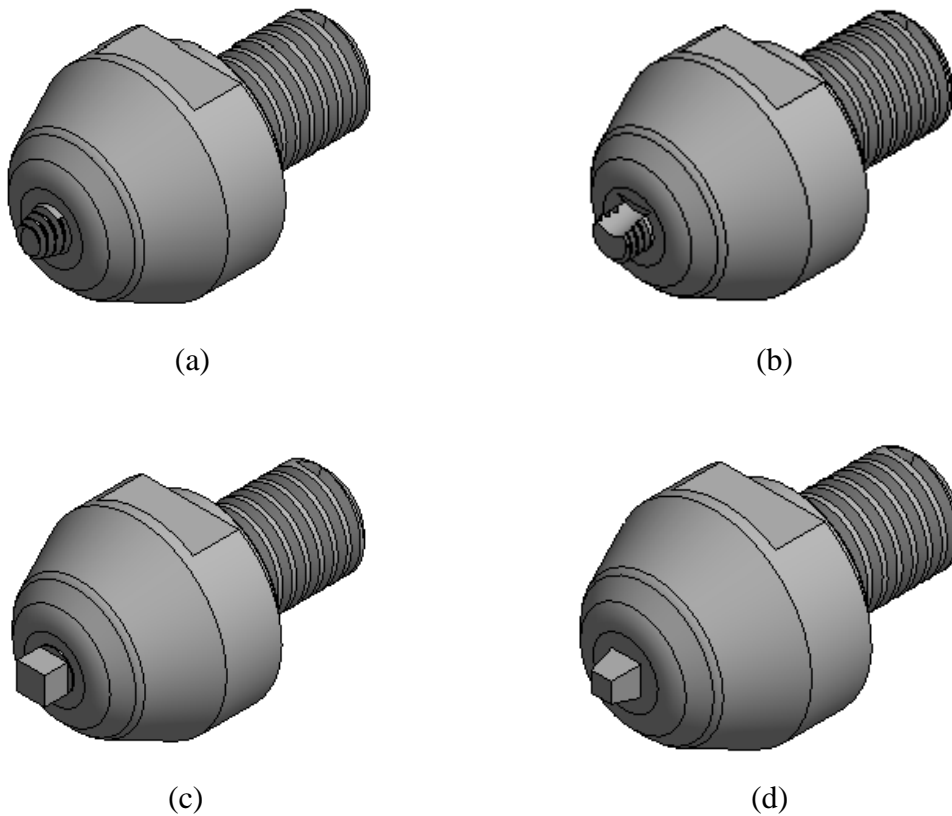
As placas de alumínio AA5083-H111 foram fixadas numa mesa de trabalho apropriada para o processamento, para que a placa não sofresse qualquer tipo de movimento

durante o processamento. O esquema da montagem das placas na mesa de trabalho está representado na Figura 3.2.

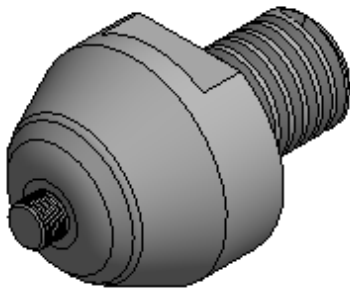


**Figura 3.2.** Sistema de fixação da placa na mesa.

Na Figura 3.3 são apresentadas as ferramentas estudadas na dissertação. Estas ferramentas têm base idêntica mas pino com geometria diversa. No anexo A são detalhadas as geometrias dessas ferramentas.







(e)

**Figura 3.3.** Geometria das ferramentas: (a) T1, (b) T2, (c) T3, (d) T4 e (e) T5.

A ferramenta T1 tem um pino com a forma cónica roscada, a ferramenta T2 possui um pino com uma geometria cilíndrica roscada com rasgo; em relação à ferramenta T3 o pino é prismático de base quadrada, já a ferramenta T4 apresenta um pino piramidal quadrangular e por fim a ferramenta T5 tem um pino cilíndrico roscado.

### 3.3.1. Procedimento Experimental do FSP

Como referido anteriormente, as ferramentas utilizadas no processamento por FSP foram cinco. A Tabela 3.1 exhibe todas as combinações que foram utilizadas para a realização do processamento por fricção linear, incluindo a geometria da ferramenta, as velocidades de rotação e de avanço e a designação dos ensaios.

Foram usadas estas ferramentas e estes parâmetros com base nos estudos desenvolvidos na FCTUC, no DEM por Verde [23], Quintino [24], Rangel [25] e Rodrigues [26].

Para todos os ensaios de processamento FSP foi usado um ângulo de inclinação da ferramenta de 2,5° e uma penetração de 2,5 mm na peça.

**Tabela 3.1.** Ferramentas e parâmetros de processamento utilizados.

<b>Ferramenta</b>	<b>Velocidade rotação [rpm]</b>	<b>Velocidade avanço [mm/min]</b>	<b>Designação</b>
<b>T1</b>	1500	40	T1_W15_V4
		80	T1_W15_V8
		120	T1_W15_V12
	1000	40	T1_W10_V4
		80	T1_W10_V8
		120	T1_W10_V12
<b>T2</b>	1500	40	T2_W15_V4
		80	T2_W15_V8
		120	T2_W15_V12
	1000	40	T2_W10_V4
		80	T2_W10_V8
		120	T2_W10_V12
<b>T3</b>	1500	40	T3_W15_V4
		80	T3_W15_V8
		120	T3_W15_V12
	1000	40	T3_W10_V4
		80	T3_W10_V8
		120	T3_W10_V12
<b>T4</b>	1500	40	T4_W15_V4
		80	T4_W15_V8
		120	T4_W15_V12
	1000	40	T4_W10_V4
		80	T4_W10_V8
		120	T4_W10_V12

<b>T5</b>	1500	40	T5_W15_V4
		80	T5_W15_V8
		120	T5_W15_V12
	1000	40	T5_W10_V4
		80	T5_W10_V8
		120	T5_W10_V12

### 3.4. Polimento e Contrastação

Os provetes foram cortados transversalmente ao eixo de processamento e colocados em resina *Demotec 30* para melhor manuseamento. Depois, cada provete foi passado em lixas de granulometria 320, 600, 1000 e 2500, e por fim polidos numa solução base de partículas de diamante de 3  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$  numa máquina *Buenler* (Figura 3.4). Finalmente, os provetes foram sujeitos a um ataque químico, em que foi usado o reagente “*poulton*” (12 ml de ácido clorídrico, 6 ml de ácido nítrico, 1 ml de ácido fluorídrico e 1 ml de água destilada) [27].

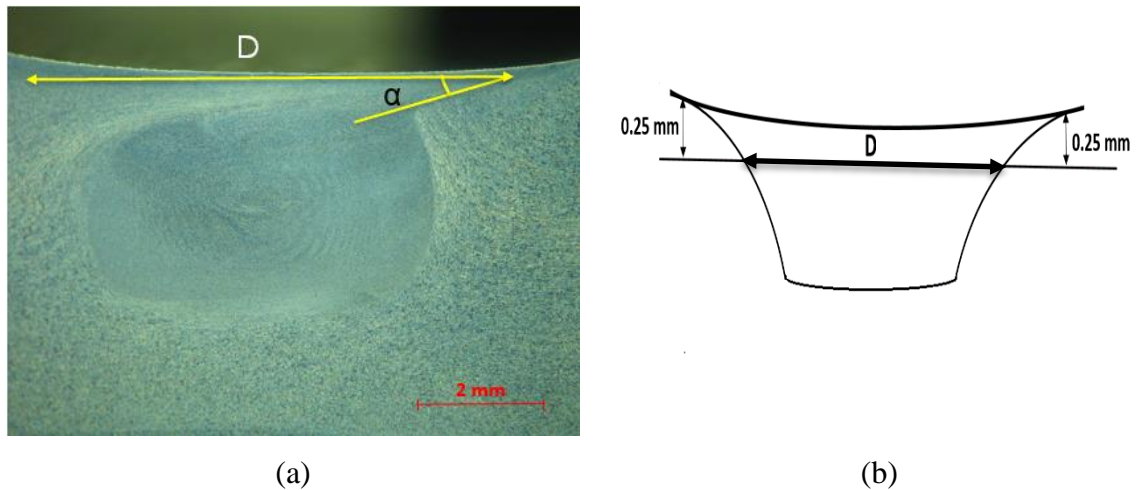


Figura 3.4. Máquina *Buenler* de polimento.

### 3.5. Morfologia do FSP

A morfologia da zona processada por FSP é difícil de caracterizar, devido à geometria complexa. Os parâmetros de caracterização dependem dos objetivos precedentes.

Neste caso como se pretende estudar futuramente o efeito da zona processada no comportamento à fadiga, a parte superior da zona processada é a mais importante. Por isso os parâmetros seleccionados foram: o formato, a largura de processamento  $D$  e o ângulo  $\alpha$ , conforme se ilustra na Figura 3.5.



**Figura 3.5.** (a) Parâmetros geométricos que caracterizam a secção de soldadura; (b) Modo de determinação da largura  $D$ .

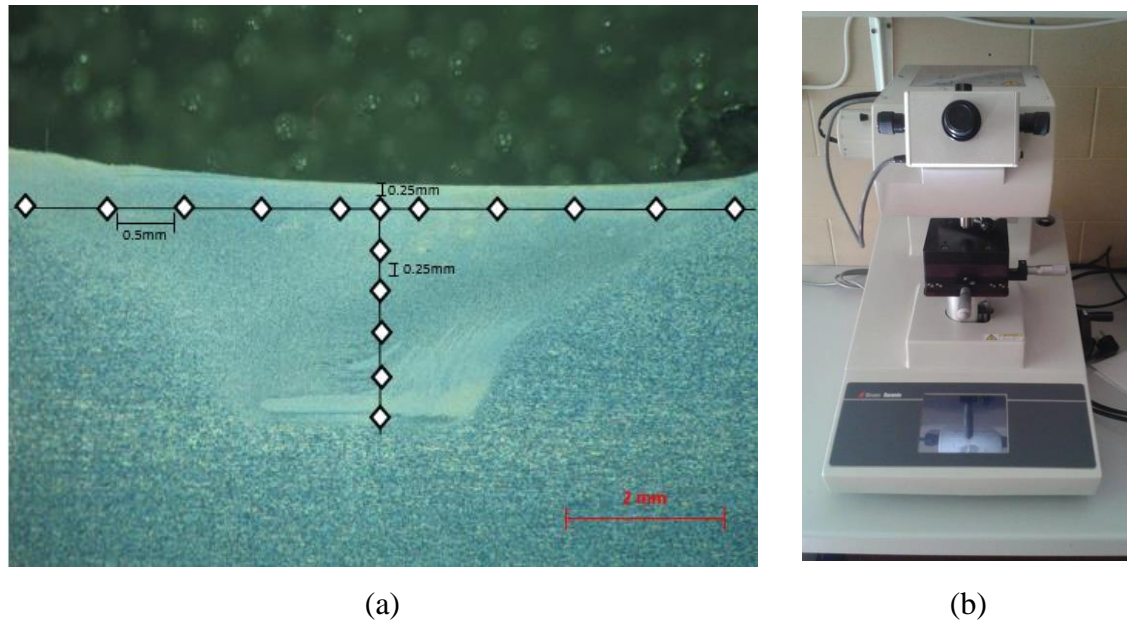
A largura de processamento  $D$  foi medida a 0,25 mm da superfície como mostra a Figura 3.5 (b), de forma a proporcionar a correta medição de dureza.

### 3.6. Análise de Durezas

Para realizar a medição de durezas (Vickers) utilizou-se a máquina de microdureza *Struers Duramin 1*, (Figura 3.6 (b)) com uma carga de 0,2 kgf, durante 15 s.

Nesta análise as indentações foram realizadas segundo duas linhas, uma linha paralela à superfície da chapa, a 0,25 mm da superfície, e a segunda perpendicular à linha

horizontal no centro da zona processada, conforme se ilustra na Figura 3.6 (a) As indentações foram feitas com espaçamento entre si de 0,5 mm na horizontal e 0,25 mm na vertical.

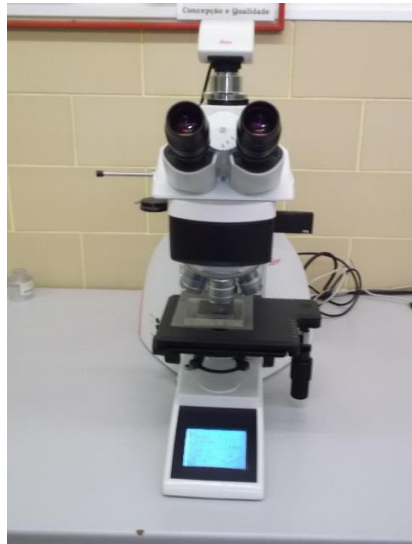


**Figura 3.6.** (a) Esquema da localização das indentações para obtenção dos perfis de dureza; (b) Máquina de microdureza.

### 3.7. Análise do Tamanho de Grão

A análise do tamanho de grão foi feita com base em micrografias com uma ampliação de 200x, obtidas com recurso a uma máquina fotográfica *Canon PowerShot G5* agrupada a um microscópio *Zeiss Axiotech 100HD*, que possui lentes com ampliação de 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x (Figura 3.7). Posteriormente, o tamanho de grão foi medido recorrendo aos *softwares AxionVision, ImageJ e OriginPro*. O primeiro utilizou-se para definir a escala utilizada na imagem. O segundo permitiu realizar um tratamento de imagem de modo a obter as fronteiras de grão e seguidamente calcular a área de cada um deles. Por

fim, o terceiro usou-se para o tratamento estatístico do diâmetro de cada grão, em que se obteve a frequência relativa para cada intervalo e as respectivas percentagens.



**Figura 3.7.** Microscópio Zeiss Axiotech 100HD.

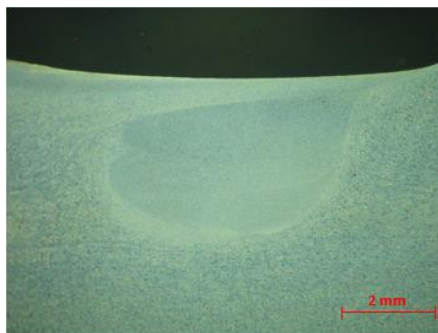
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Morfologia do FSP

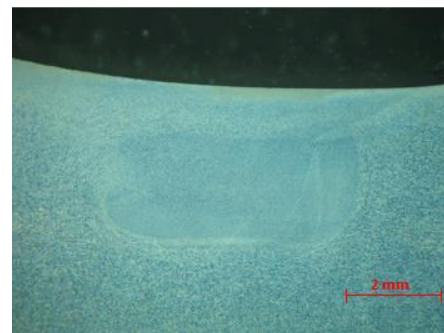
Nesta secção são descritos e analisados os parâmetros que caracterizam a zona processada por FSP. Como foi referido no ponto 3.5, o formato, a largura de processamento  $D$  e o ângulo  $\alpha$  são os parâmetros a ter conta, pois eles vão ter uma influência fulcral na otimização da ferramenta.

#### 4.1.1. Forma da Zona Processada

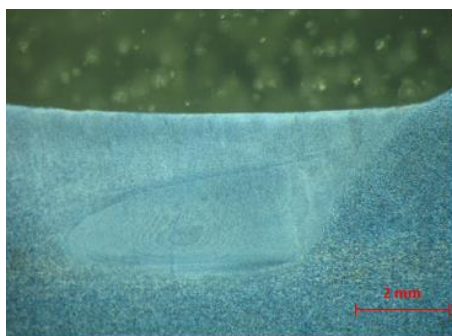
A geometria da zona processada varia com a ferramenta e os parâmetros de processo. A Figura 4.1 ilustra geometrias de processamento obtidas com as diversas ferramentas.



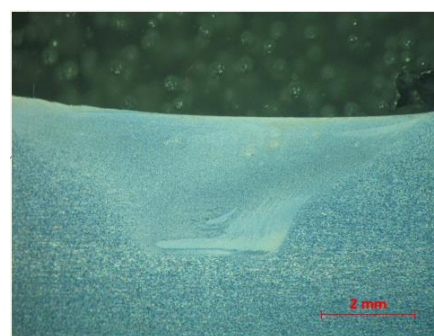
(a)



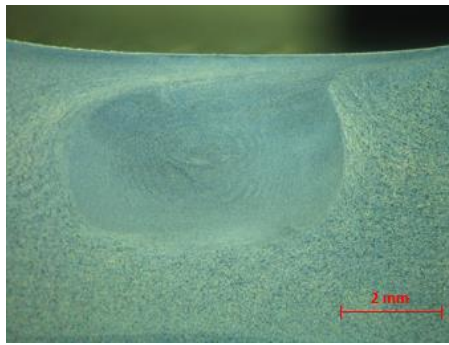
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 4.1.** (a) Macrografia obtida com a ferramenta T1\_W15\_V4; (b) Macrografia obtida com a ferramenta T2\_W15\_V8; (c) Macrografia obtida com a ferramenta T3\_W10\_V4; (d) Macrografia obtida com a ferramenta T4\_W10\_V80; (e) Macrografia obtida com a ferramenta T5\_W15\_V12.

Todas as placas processadas pelas ferramentas, independentemente das velocidades de rotação e de avanço utilizada, apresentam diferentes geometrias na zona processada.

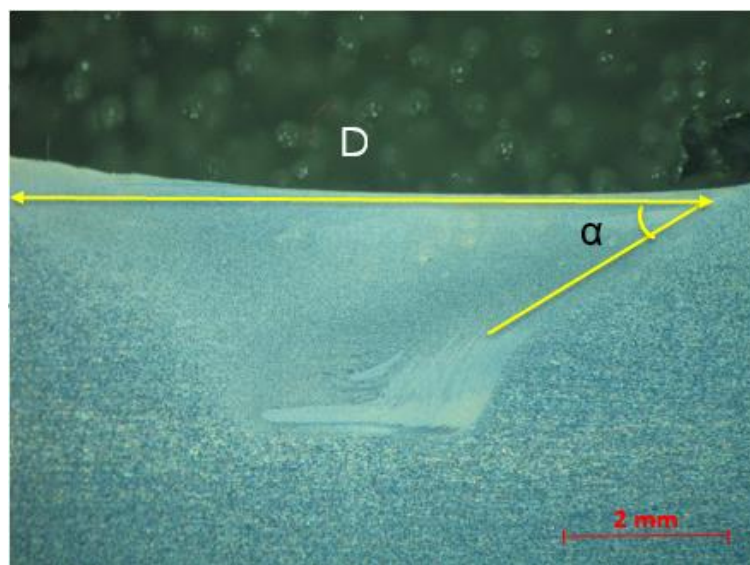
Cada geometria de ferramenta produz um formato típico: a macrografia obtida com a ferramenta T1 tem uma forma arredondada, enquanto a macrografia obtida com a ferramenta T2 uma forma mais trapezoidal. As macrografias obtidas com as ferramentas T3, T4, enquanto a T5 têm uma forma também arredondada mas muito diferente das outras. Como foi referido no capítulo 2.4.3 existem dois fluxos material, o induzido pela base e pelo pino da ferramenta. O que é induzido pela base encontra-se na parte superior, enquanto o induzido pelo pino fica na parte inferior. Estes dois fluxos são ligeiramente diferentes, o que influencia de certa forma a geometria da zona processada.

Este fenómeno é explicado pela geometria distinta apresentada por cada ferramenta. O comprimento do pino influencia a profundidade de processamento, enquanto o diâmetro do pino afeta o diâmetro da zona processada. Este diâmetro pode variar com a profundidade no caso particular dos pinos de formato cónico.

#### 4.1.2. Largura de processamento $D$ e Ângulo $\alpha$

Os dois parâmetros geométricos (a largura de processamento  $D$  e o ângulo  $\alpha$ ) foram medidos com base nas macrografias como foi referido no capítulo 3.5; como se exemplifica na Figura 4.2. No Apêndice A encontram-se as restantes macrografias bem como a determinação destes parâmetros para cada zona processada.





**Figura 4.2.** Macrografia obtida com a ferramenta T4\_W10\_V8, com a largura de processamento D e o ângulo  $\alpha$  assinalados.

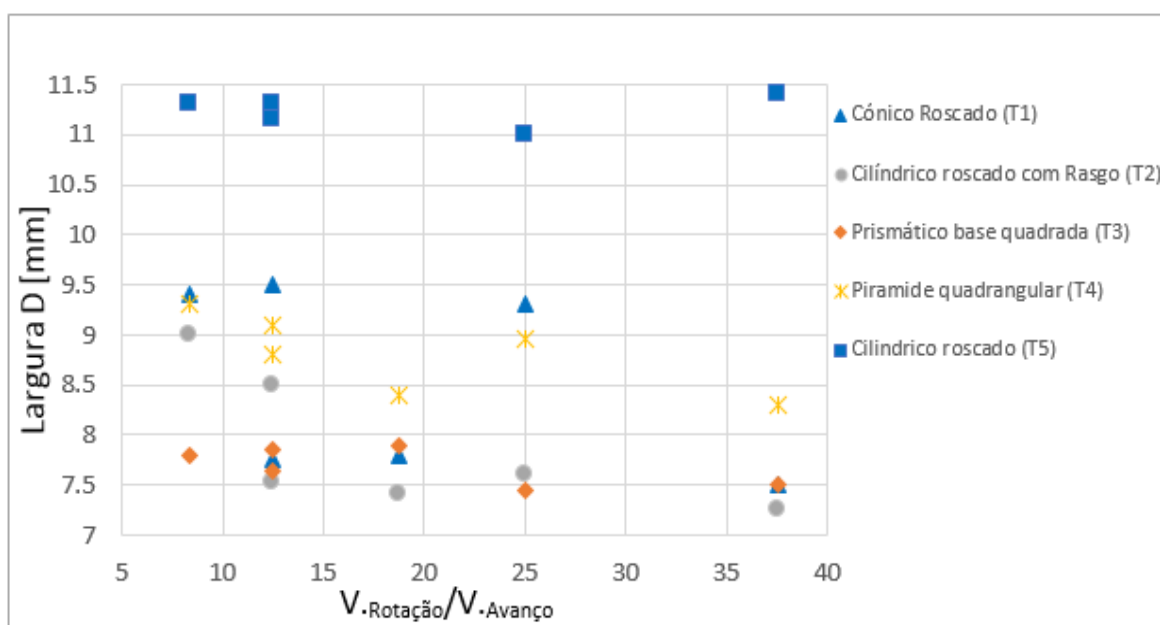
Na Tabela 4.1 apresentam-se os valores medidos para cada uma das condições de processamento.

**Tabela 4.1.** Valores medidos da largura de processamento D e do ângulo  $\alpha$ .

.Referência do processamento	D [mm]	$\alpha$ [°]	Referência do processamento	D [mm]	$\alpha$ [°]
T1_W15_V4	7,5	20,2	T3_W10_V4	7,45	29,2
T1_W15_V8	7,8	21,9	T3_W10_V8	7,65	31,0
T1_W15_V12	7,75	18,6	T3_W10_V12	7,8	31,1
T1_W10_V4	9,3	27,8	T4_W15_V4	8,3	31,1
T1_W10_V8	9,5	26,5	T4_W15_V8	8,4	28,5
T1_W10_V12	9,4	24,7	T4_W15_V12	8,8	28,0
T2_W15_V4	7,25	25,8	T4_W10_V4	8,95	31,1
T2_W15_V8	7,4	24,6	T4_W10_V8	9,1	31,7
T2_W15_V12	7,52	22,2	T4_W10_V12	9,3	29,7
T2_W10_V4	7,6	23,7	T5_W15_V4	11,4	20,5
T2_W10_V8	8,5	25,2	T5_W15_V8	11,7	17,4
T2_W10_V12	9,0	30,2	T5_W15_V12	11,3	18,4
T3_W15_V4	7,5	21,5	T5_W10_V4	11,0	27,6
T3_W15_V8	7,9	23,0	T5_W10_V8	11,15	22,9
T3_W15_V12	7,85	25,5	T5_W10_V12	11,3	18,5

De acordo com a tabela anterior, verifica-se que a largura de processamento  $D$  não varia significativamente, porque o que faz variar este parâmetro geométrico é, principalmente, o diâmetro da base que é sempre igual em todas as ferramentas, sendo o seu valor de 9 mm. No ANEXO A encontra-se especificado com maior detalhe a geometria das ferramentas. No caso das ferramentas T1, T2 e T4 a velocidade angular tem uma forte influência em  $D$ , o que não se averigua nas ferramentas T3 e T5.

Na Figura 4.3 é apresentado um gráfico que mostra a relação entre  $D$  e o quociente das velocidades de rotação e avanço, porque este é de algum modo proporcional ao calor específico adicionado.



**Figura 4.3.** Gráfico representativo da relação de velocidades com a largura de processamento  $D$ .

No gráfico apresentado concluímos que, à medida que aumentamos a relação de velocidades, a largura diminui. O aumento da relação entre as velocidades de rotação e avanço está relacionado com a quantidade de calor adicionado por unidade de comprimento, o que sugere que o aumento de calor adicionado reduz a largura da soldadura. Isto pode estar relacionado com a menor capacidade do metal mais aquecido arrastar o material circundante mais frio. As ferramentas com que se obtiveram maiores valores da largura  $D$ , correspondem às T1, T4 e T5.

No que diz respeito ao ângulo  $\alpha$ , a morfologia que apresenta maior valor foi obtida com o processamento T4\_W10\_V8 (Figura 4.4), devido à geometria do pino ser piramidal quadrangular, o que promoveu a uma melhor ligação entre o fluxo de material induzido pela base com o induzido pelo pino. Como a velocidade de rotação é mais baixa e a velocidade de avanço é intermédia, isto permite que a placa aqueça gradualmente à medida que é feito o processamento e consequentemente um melhor processamento.

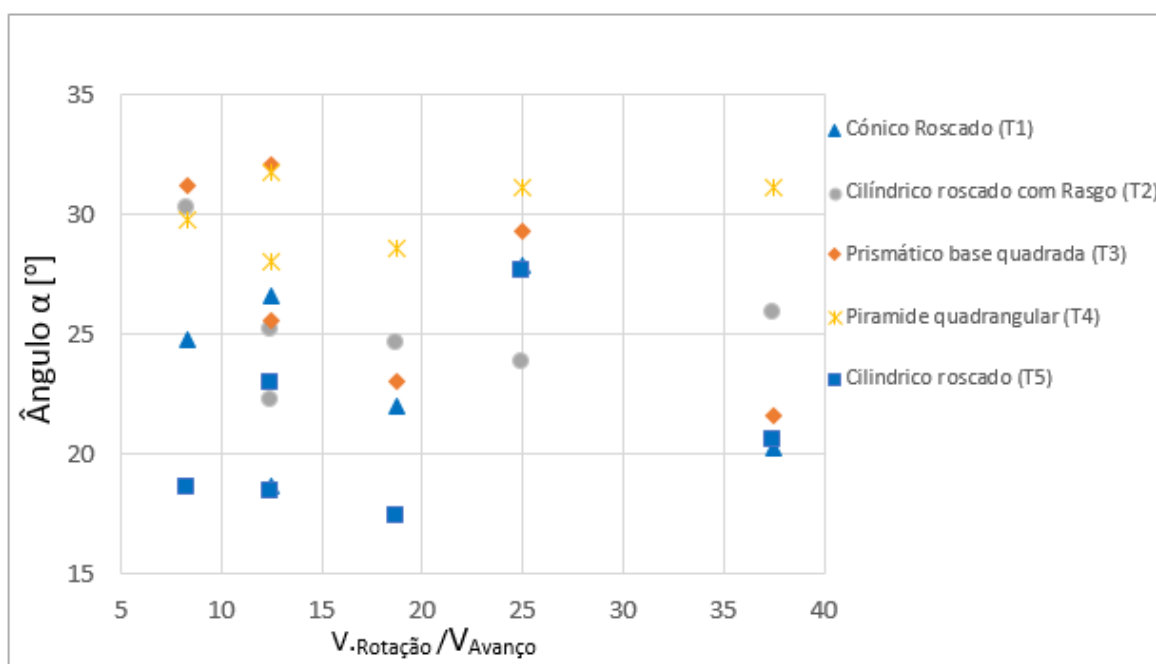


Figura 4.4. Gráfico representativo da relação do quociente de velocidades com ângulo  $\alpha$ .

No gráfico Figura 4.4 verifica-se que, à medida que as relações de velocidades são mais baixas encontram-se valores de  $\alpha$  mais elevados e em maior quantidade. Este comportamento deve estar relacionado com o menor calor adicionado no processo e a menor plastificação do material. O ângulo  $\alpha$  é muito importante na otimização do processamento, porque quanto maior for o seu valor, maior vai ser a área da zona processada próxima da superfície.

A Figura 4.5 apresenta o gráfico que relaciona as velocidades de rotação e avanço com o ângulo  $\alpha$ .

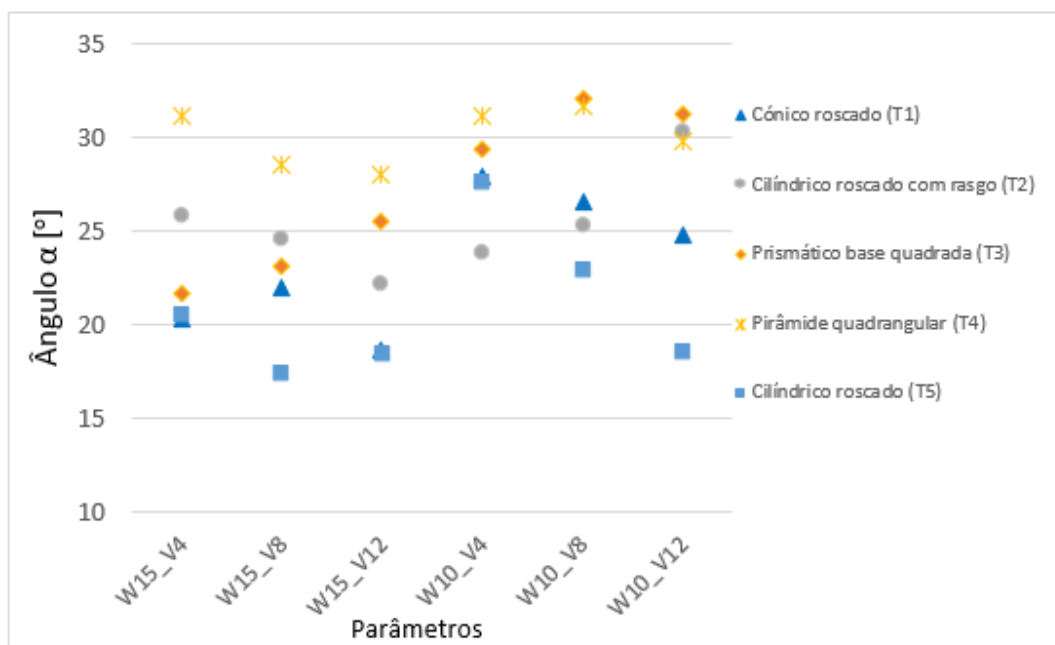
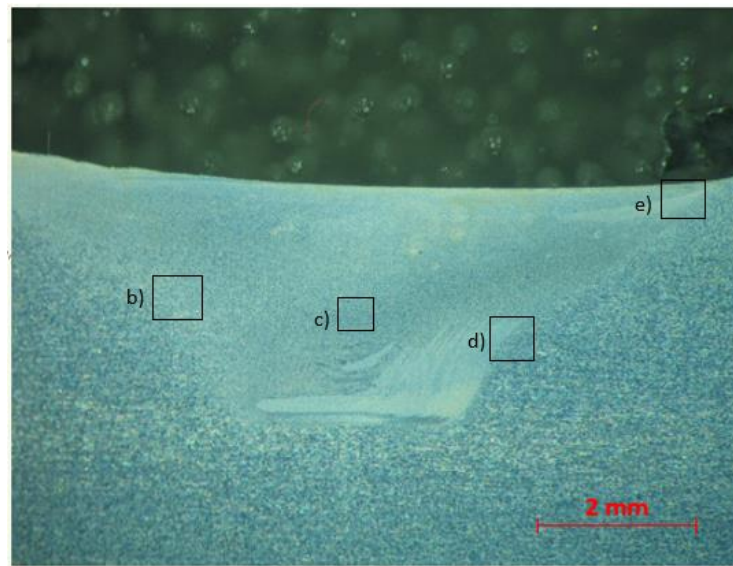


Figura 4.5. Gráfico representativo da relação das velocidades de rotação e avanço com o ângulo  $\alpha$ .

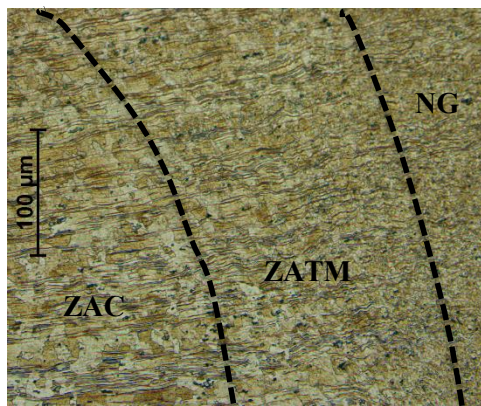
No gráfico Figura 4.5, verifica-se que o ângulo  $\alpha$  depende bastante da velocidade angular para as ferramentas T1, T3 e T5.

## 4.2. Microestrutura do FSP

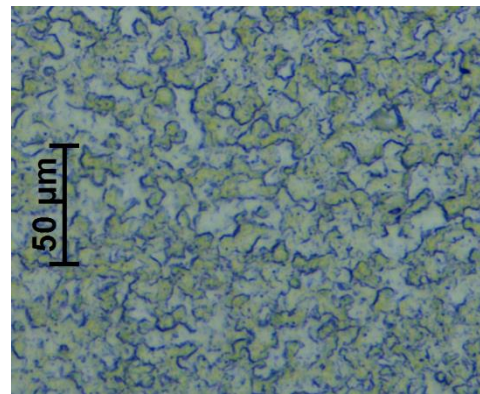
As zonas e microestruturas são similares em todos os processamentos, pelo que se apresenta apenas a análise de um caso, enquanto as restantes zonas microestruturais conseguidas por FSP obtidas para cada uma das ferramentas, encontram-se no Apêndice B. De seguida apresenta-se uma macrografia e as respetivas micrografias referentes a cada zona assinalada na Figura 4.6 (a), respeitante à ferramenta pirâmide quadrangular, velocidade angular de 1000 rpm e velocidade de avanço de 80 mm/min (T4\_W10\_V8). Analisou-se este caso em particular porque foi a microestrutura resultante da melhor combinação de geometria de ferramenta e parâmetros de processamento.



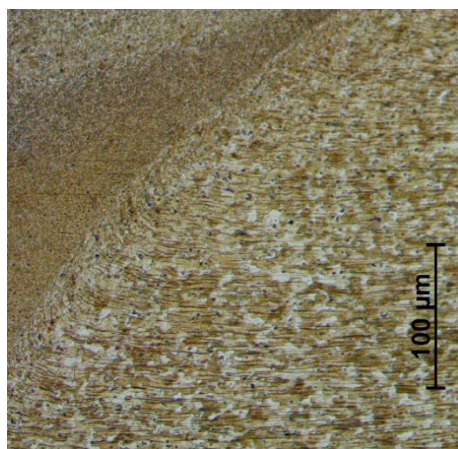
(a)



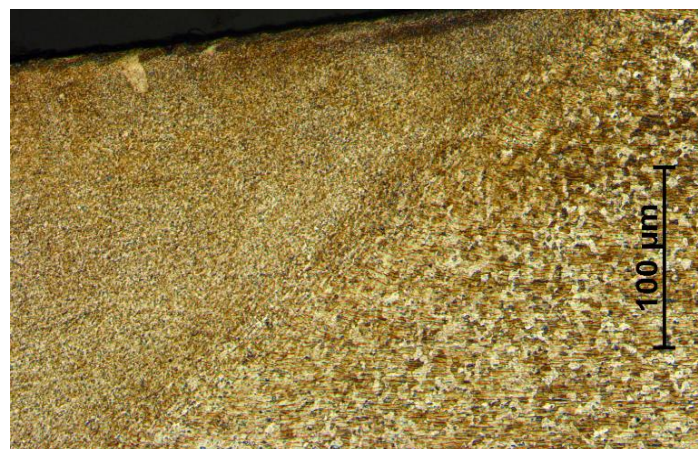
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 4.6.** Análise morfológica e microestrutura do FSP: (a) Macrografia da ferramenta T4\_W10\_V8, (b) Lado do retrocesso; (c) Nugget; (d) Lado do avanço e (e) Zona do Pé.

Na micrografia **b)** está representado o lado do retrocesso, em que se distinguem três zonas características do processamento por FSP: a ZAC, onde se verifica um tamanho de grão inferior ao do material base (25 a 30  $\mu\text{m}$ ), a ZATM é a zona onde se visualiza grãos que sofreram deformação plástica provocada pela ferramenta e calor e o *nugget*, onde está presente uma pequena porção de grãos refinados.

Na micrografia **c)** é visível o *nugget*; nesta zona o grão apresenta um tamanho entre 2  $\mu\text{m}$  e 4  $\mu\text{m}$ , mostrando assim que nesta zona é onde existe maior deformação plástica e recristalização do material, provocando um refinamento do grão.

Na micrografia **d)**, está representado o lado do avanço, onde se visualiza uma linha de transição muito clara entre duas zonas, o *nugget*, visivelmente com um grão refinado, e a ZATM, com um grão deformado plasticamente e mais grosseiro. Nesta zona estão bem presentes as linhas de fluxo de material.

Por fim, na micrografia **e)**, é visível o pé do cordão da soldadura. Nesta micrografia estão representadas três zonas: a ZATM, o *nugget* e a ZAC

### 4.2.1. Análise do tamanho de grão no *Nugget*

Em termos médios de tamanho de grão, os valores medidos são apresentados na Figura 4.7 e na tabela no Apêndice C.

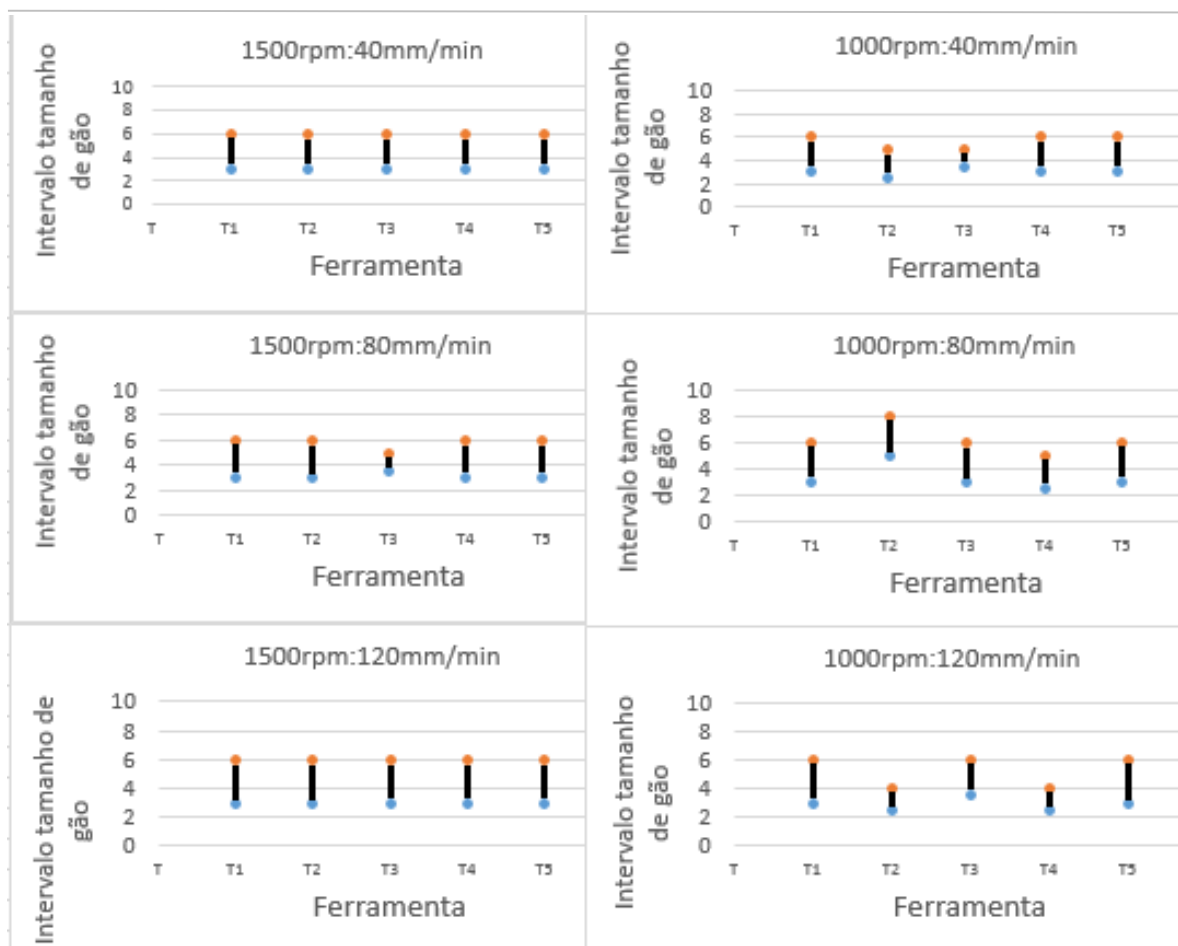


Figura 4.7. Gráficos do tamanho de grão sob a forma de intervalo.

De acordo com o gráfico anterior, verifica-se que o tamanho médio de grão no núcleo situa-se no intervalo de 2,5 a 6  $\mu\text{m}$ , o que indica que houve uma grande deformação plástica e um refinamento de grão. De salientar que para uma velocidade de rotação 1500 rpm e uma velocidade de avanço 120 mm/min não se verificou nenhuma alteração no tamanho médio de grão para cada ferramenta.

## 4.3. Microdureza

### 4.3.1. Microdureza obtida nas zonas processadas

Através de ensaios de dureza consegue-se avaliar aproximadamente a resistência do material em cada zona. As medições de dureza foram realizadas a 0,25 mm abaixo da superfície do provete, com as indentações distanciadas 0,5mm entre si. A dureza é um bom indicador da resistência mecânica da zona onde é medida, se a dureza for baixa a resistência mecânica também será baixa e vice-versa.

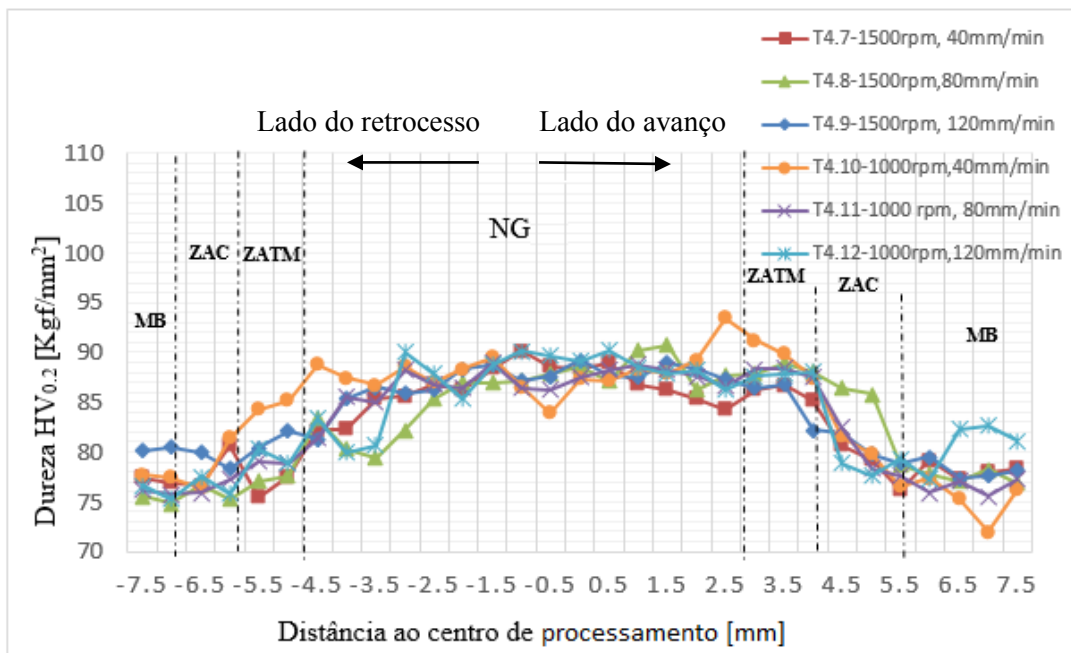


Figura 4.8. Perfil de durezas da ferramenta pirâmide quadrangular (T4).

Como os perfis de dureza obtidos pelas várias ferramentas são similares apresenta-se a título de exemplo o estudo da microdureza obtida por processamentos FSP realizado com a ferramenta T4, que foi aquela que proporcionou os valores mais elevados de dureza. No Apêndice C encontram-se perfis de dureza dos restantes processamentos. Na Figura 4.8 estão ilustrados os perfis de dureza dos processamentos realizados com a ferramenta T4 e diferentes velocidades de rotação e de avanço da ferramenta. De modo a facilitar a interpretação dos perfis de dureza, são delimitadas de forma aproximada as diferentes zonas microestruturais, NG, ZATM, ZAC e MB.



---

O MB apresenta durezas de 73 HV<sub>0,2</sub> a 79 HV<sub>0,2</sub> que estão dentro dos valores normais para a liga AA5083-H111.

Na ZATM a dureza varia entre 81 HV<sub>0,2</sub> e 85 HV<sub>0,2</sub> observando-se algum aumento de dureza em relação ao material base, devido à deformação plástica induzida pela ferramenta. No *nugget* ocorre o maior aumento de dureza, visto que esta zona é afetada diretamente pela base e pino da ferramenta. Nesta zona ocorre deformação plástica, recristalização e refinamento de grão, que contribuem para esse aumento.

Na ZAC observa-se uma ligeira diminuição de dureza relativamente ao material base, para 80 HV<sub>0,2</sub>, por causa do fenómeno de recozido induzido pelo ciclo térmico sofrido.

No processamento T4\_W10\_V4 a dureza no *nugget* é ligeiramente maior, porque houve uma maior deformação plástica ou maior refinamento de grão. Como se verificou anteriormente o tamanho de grão é quase sempre igual, portanto, provavelmente é o endurecimento do material resultante da deformação plástica.

### 4.3.2. Microdureza no *Nugget*

Foi também feito um estudo da dureza obtida por FSP na zona do *nugget* para todas as ferramentas e condições de processamento. Para cada condição de processamento fez-se a média das durezas medidas no *nugget* e com isso construíram-se os gráficos apresentados na Figura 4.9.

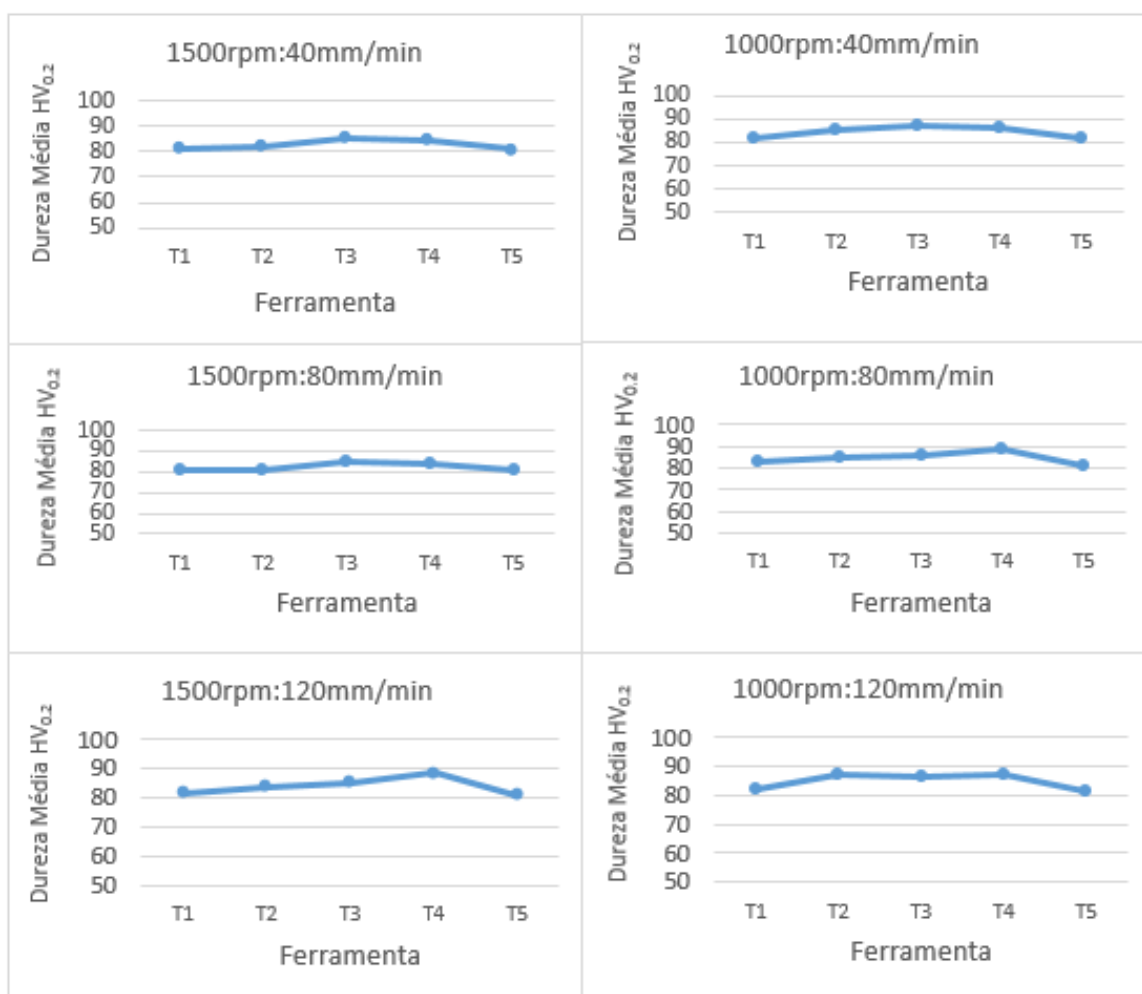


Figura 4.9. Gráficos das durezas médias.

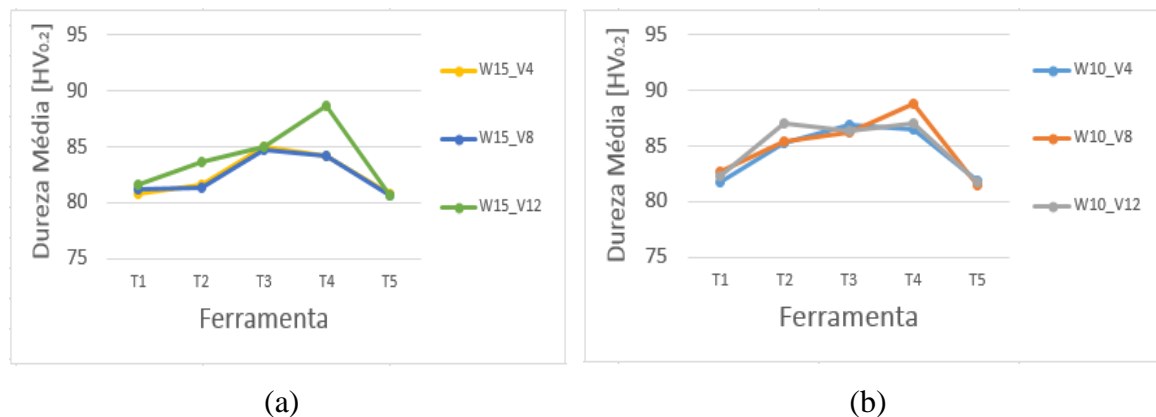


Figura 4.10. Dureza média para a condição: (a) W15; (b) W10.

A análise dos gráficos da Figura 4.9 e Figura 4.10 permitiu retirar as seguintes conclusões:

- A dureza média no *nugget* é pouco dependente da geometria do pino e dos parâmetros de processamento, dentro da gama estudada;
- Os processamentos com maior dureza média são os proporcionados pelas ferramentas T2, T3 e T4;
- O processamento que apresenta o melhor resultado é o T4\_W10\_V8, com um valor médio 89 Vickers.

O processamento feito pela ferramenta (T4) apresenta maior dureza em relação aos outros, devido ao tamanho de grão ser pequeno ou então porque houve maior deformação plástica que ficou residual.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões do trabalho realizado. Nesta secção serão ainda indicadas algumas sugestões para trabalhos a realizar no futuro.

### 5.1. Conclusões

1. A geometria da ferramenta altera a morfologia da zona processada: neste contexto foram consideradas morfologias mais adequadas aquelas que apresentavam maior largura ( $D$ ) e maior ângulo  $\alpha$ ;
2. A ferramenta com pino piramidal de base quadrangular (T4) foi o que proporcionou zonas processadas com morfologia mais adequada;
3. A eficácia do Processamento por Fricção Linear para induzir refinamento e recristalização das microestruturas depende da geometria da ferramenta e das suas velocidades de rotação e avanço;
4. A ferramenta T4 foi uma das que apresentaram maior largura  $D$  e o maior ângulo  $\alpha$  na zona processada;
5. O maior refinamento de grão foi conseguido para a ferramenta de pino piramidal, com velocidade de rotação 1000 rpm e velocidade de avanço 80 mm/min.;
6. Finalmente, o processamento por FSP é uma técnica versátil capaz de produzir um aumento das propriedades mecânicas locais, tal como a dureza na zona processada, para esta liga.

## 5.2. Sugestões para trabalhos futuros

O trabalho realizado colocou em evidência alguns aspetos que seria importante estudar no futuro:

- Estudar a influência da geometria da base da ferramenta (*shoulder*) na zona processada, dado que foram testados 5 tipos de pinos de diferente geometria, sendo a base sempre a mesma;
- Estudar a influência das propriedades das zonas processadas com as diferentes ferramentas e parâmetros de processamento na resistência à fadiga de componentes.

## 6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- [1] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Much, C. J. Templesmith e G. B. Dawes. Patente 9125978.8, Dezembro 1991.
- [2] P. Vilaça, J. Gandra e R. M. Miranda, “Effect of overlapping in multipass friction stir processing,” *Materials Science and Engineering*, vol. 528, nº 16-17, 25, pp. 5592-5599, 2011.
- [3] S. Barra, “Aspectos de Metalurgia da Soldagem do Alumínio e suas Ligas,” Florianópolis, 2003.
- [4] Lincoln Electric, Aluminium GMAW Welding Guide, C 8.100, 2006.
- [5] C. Moura Branco, *Mecânica dos Materiais*, 4ª ed., Fundação Calouste Gulbenkian, 2006.
- [6] A. Loureiro, *Tecnologia da Soldadura - Sebenta de apoio à cadeira de Tecnologia Mecânica II*, 2010.
- [7] A. Shafieizarghani et al, “Ultranine Grained 6082 Aluminium Alloy Fabricated By Friction Stir Processing,” *International journal of Modern Physics B*, vol. 22, pp. 2874-2878, 2008.
- [8] Friction Stir Welding - Technical Handbook, ESAB AB Welding Automation.
- [9] R. Nadam, T. DebRoy e H. Bhadeshia, “Recent advances in friction-stir welding process, weldment structure and properties,” *Progress in Materials Science*, vol. 53, nº 6, pp. 980-1023, 2008.
- [10] N. G. D. a. K. B. Kumbhar, “Friction Stir Welding of Aluminium Alloys,” nº 321, pp. 11-17, 2011.
- [11] W. M. Thomas, K. Johnson e C. S. Wiesner, “Friction stir welding - recent developments in tool and process technologies,” *Advanced Engineering Materials*, vol. 5, nº 7, pp. 485-490, 2003.
- [12] N. Sun, Y. H. Yin, A. P. Gerlich e T. H. North, “Tool design and stir zone grain size in AZ31 friction stir spot welds,” *Sci. Technol. Weld. Join*, vol. 14, nº 8, pp. 747-752, 2009.
- [13] P. A. Colegrove e H. R. Shercliff, “Development of Trivex friction stir welding tool Part 1 - two dimensional flow modeling and experimental validation,” *Sci. Technol. Weld. Join.*, nº 9, pp. 345-351, 2009.
- [14] C. E. D. Rowe e W. M. Thomas, “Advances in tooling materials for friction stir welding,” TWI, Cambridge, UK, 2005.
- [15] K. Elangovan e V. Balasubramanian, “Influences of tool pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 459, pp. 7-18, 2007.
- [16] K. Elangovan e V. Balasubramanian, “Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy,” *Materials and Design*, 2007.

- 
- [17] C. G. Rhodes, M. W. Mahoney, W. H. Bingel, R. A. Spurling e C. C. Bampton, *Scripta Mater*, vol. 36, p. 69, 1997.
- [18] S. K. Chinopoulos, C. I. Sarafoglou, D. I. Pantelis e V. J. Papazoglou, “Effect of tool pin and welding parameters on friction stir welding (FSW) marine aluminium alloys,” em *3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN)*, Chalkidiki, Grécia, 2008.
- [19] G. Liu, L. E. Murr, C. S. Niou, J. C. McClure e F. R. Vega, *Scripta Mater*, vol. 37, p. 355, 1997.
- [20] Y. S. Sato, H. Kokawa, M. Enmoto e S. Jogan, *Metall. Mater. Trans.*, vol. 30, p. 2429, 1999.
- [21] A. Steuwer, M. J. Peel e P. J. Withers, “Dissimilar friction stir welds in AA5083-AA6082: the effect of process parameters on residual stress,” *Mater Sci Eng A*, nº 441, pp. 187-196, 2006.
- [22] Z. M. R.S Mishra, “Friction stir welding and processing,” 2005.
- [23] D. G. B. Verde, “Aplicação do processo de fricção linear (FSP) na melhoria da resistência à fadiga de juntas soldadas por MIG,” Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, DEM, FCTUC, Coimbra, 2011.
- [24] B. M. D. Quintino, “Aplicação do processo de fricção linear (FSP) na melhoria da resistência à fadiga de juntas de topo soldadas por MIG na liga AA5083-H111,” Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, DEM, FCTUC, Coimbra, 2012.
- [25] J. P. V. Rangel, “Aplicação do processo de fricção linear (FSP) na melhoria da resistência à fadiga de juntas T soldadas por MIG na liga AA6082,” Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, DEM, FCTUC, Coimbra, 2012.
- [26] R. Rodrigues, “Aplicação do processo de fricção linear (FSP) na melhoria da resistência à fadiga de juntas de canto soldadas por MIG na liga AA5083,” Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, DEM, FCTUC, Coimbra, 2013.
- [27] R. L. e. A. Loureiro, “Soldadura de ligas de alumínio com laser de díodos,” *Iberoamerica de Ingenieria mecânica*, vol. 8, pp. 91-102, 2004.

## A. ANEXO A

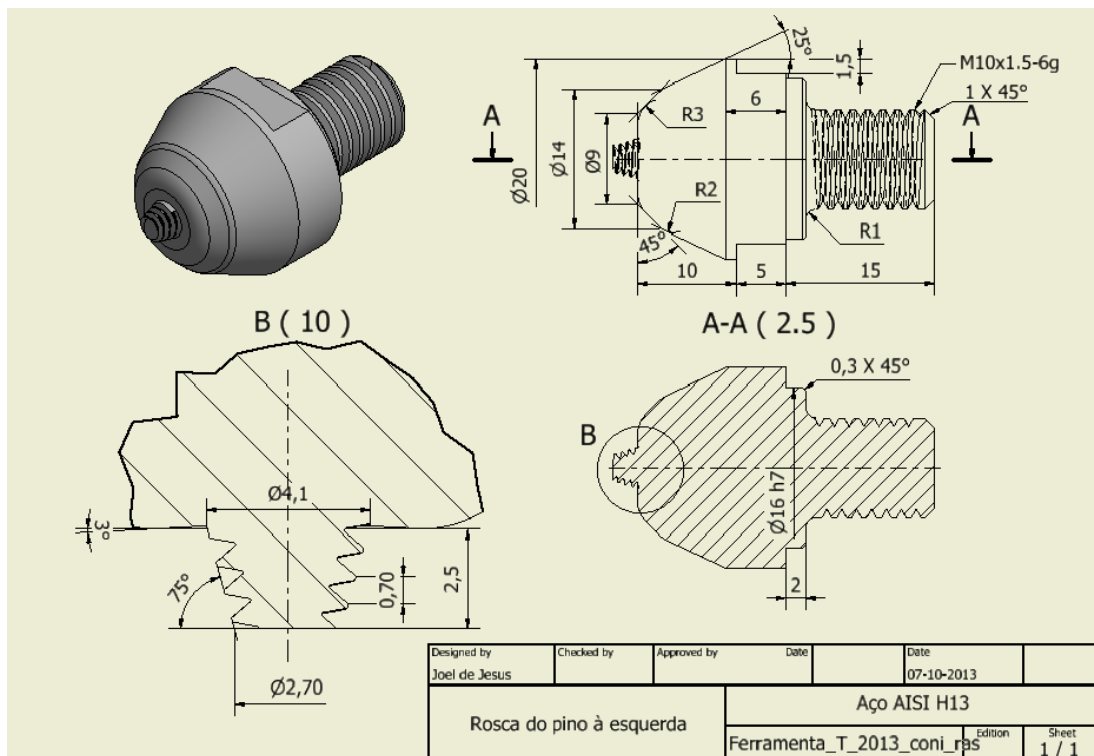


Figura A.1. Ferramenta T1, com pino cónico roscado e respetiva cotagem.



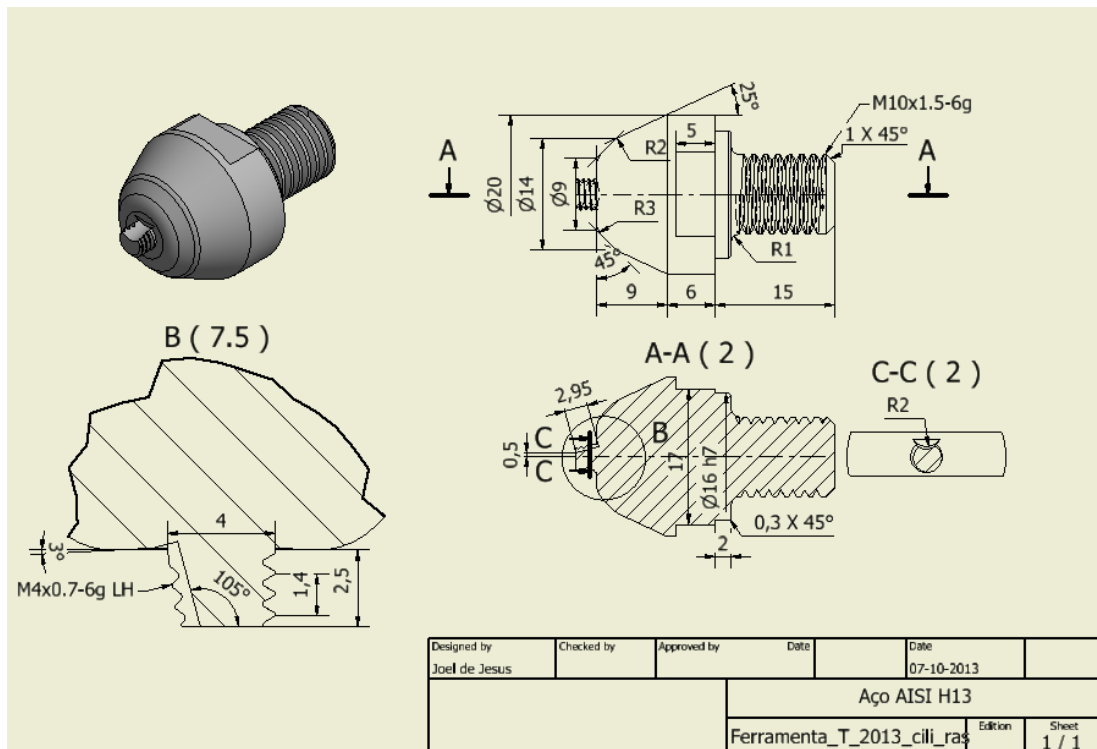


Figura A.2. Ferramenta T2, com pino cilíndrico roscado com rasgo e respetiva cotagem.

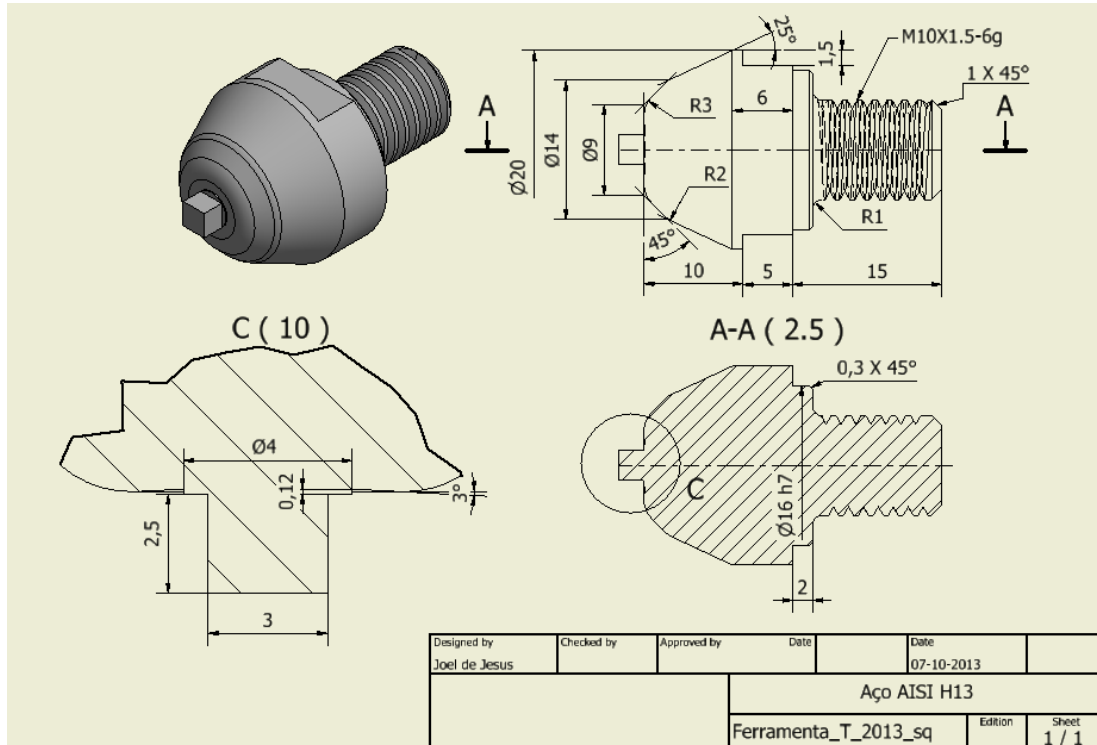


Figura A.3. Ferramenta T3, com pino prismático base quadrada e respetiva cotagem.

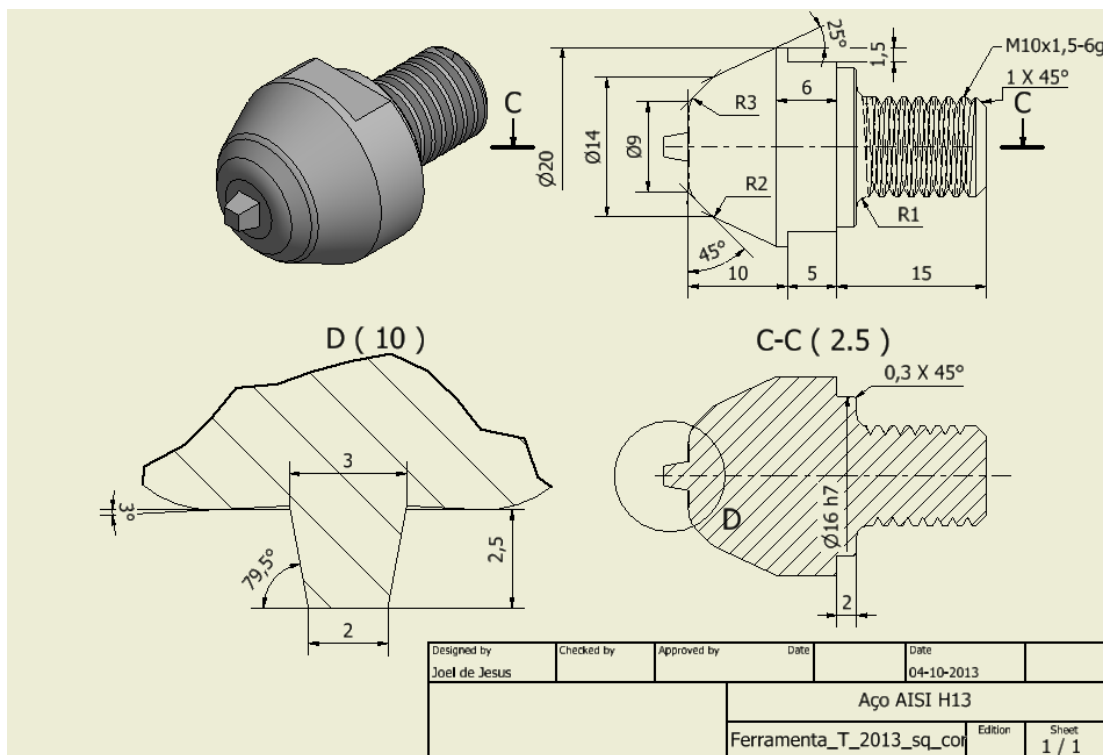


Figura A.4. Ferramenta T4, com pino pirâmide quadrangular e respetiva cotagem.

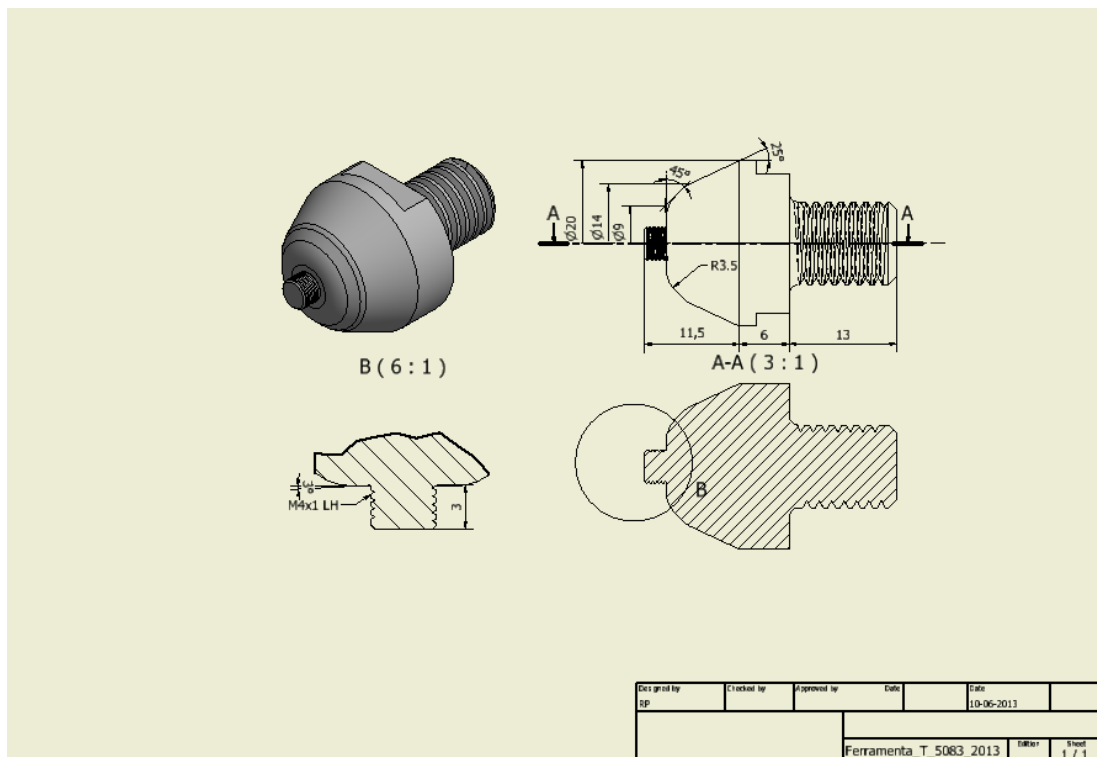
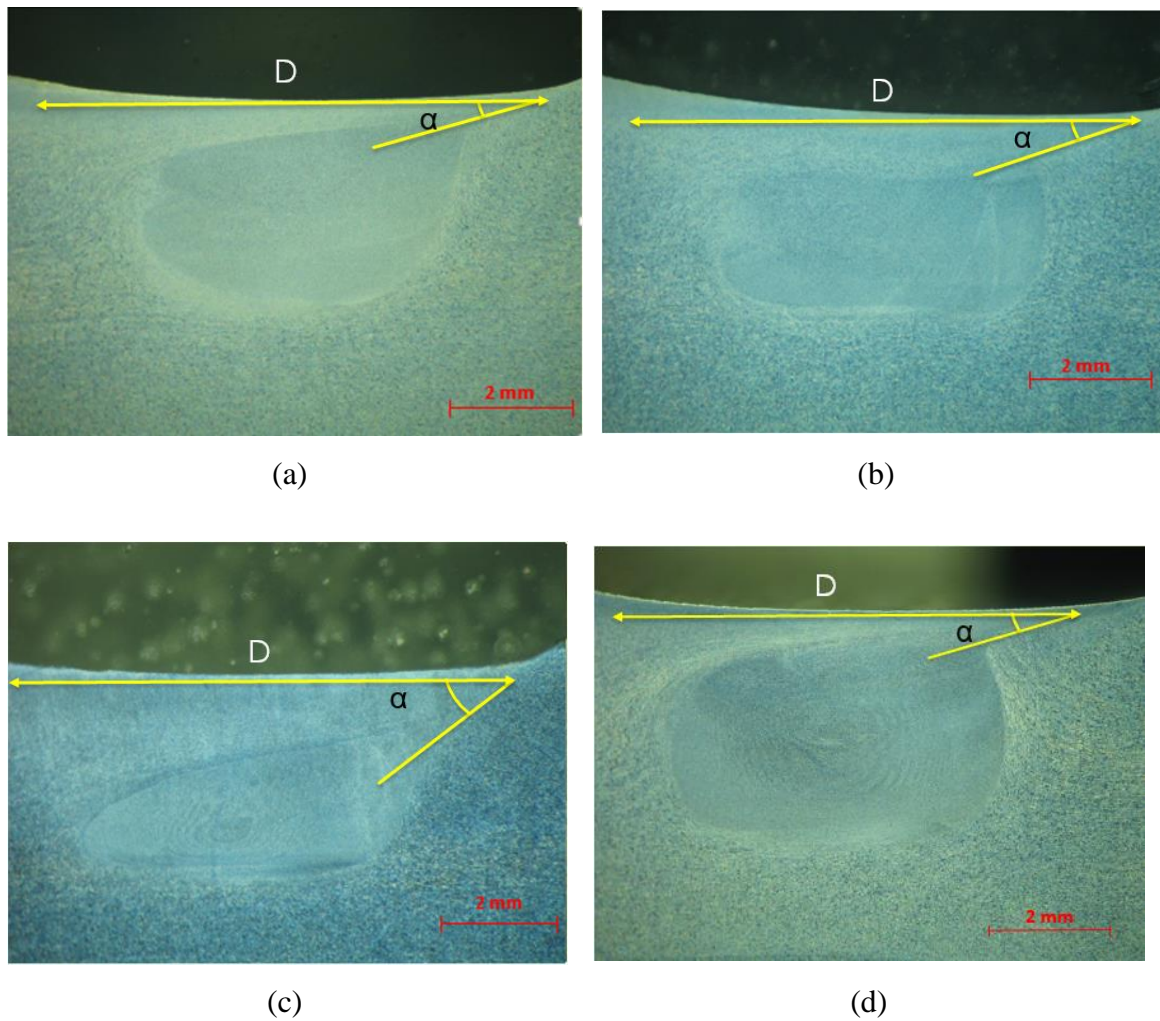
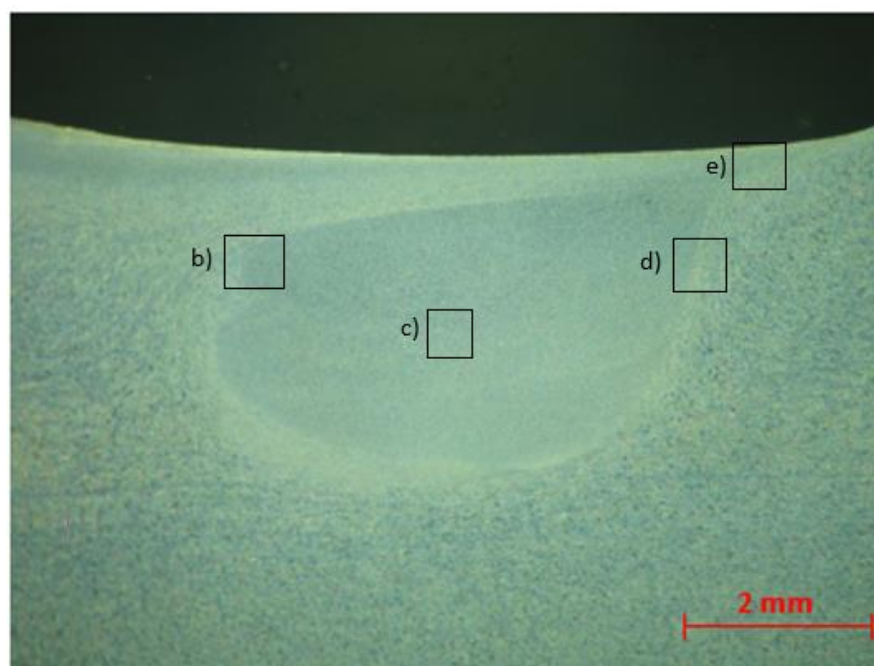


Figura A.5. Ferramenta T5, com pino cilíndrico roscado e respetiva cotagem.

**Ap. A APÊNDICE A**

**Figura Ap. A.1.** Macrografia da ferramenta: (a) T1\_W15\_V4, com o comprimento D e o ângulo  $\alpha$  assinalados; (b) T2\_W15\_V8, com o comprimento D e o ângulo  $\alpha$  assinalados; (c) T3\_W10\_V4, com o comprimento D e o ângulo  $\alpha$  assinalados; (d) T5\_W15\_V12, com o comprimento D e o ângulo  $\alpha$  assinalados.

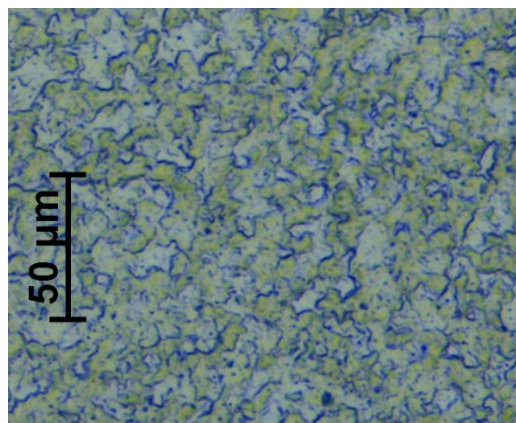
## Ap. B APÊNDICE B



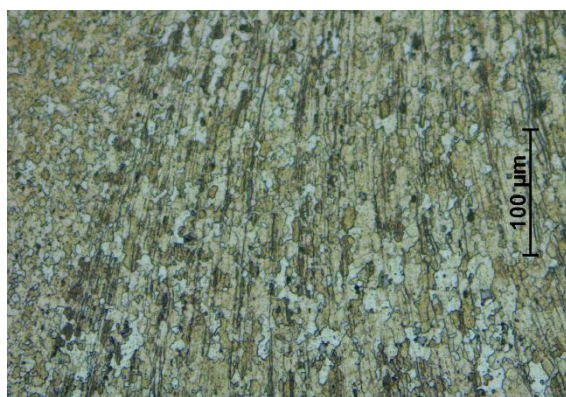
(a)



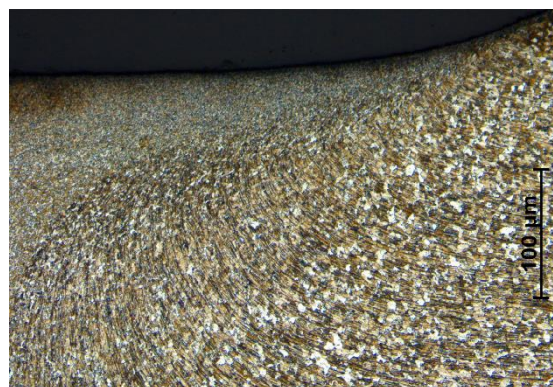
(b)



(c)

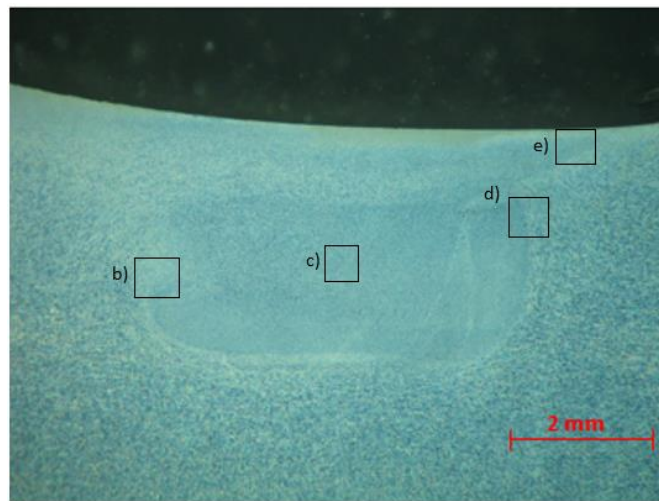


(d)



(e)

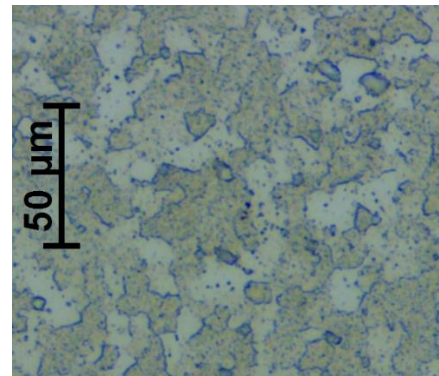
**Figura Ap. B.1.** Análise morfológica e microestrutura do FSP: (a) Macrografia da ferramenta T1\_W15\_V4, (b) Lado do retrocesso; (c) Nugget; (d) Lado do avanço; (e) Zona do Pé.



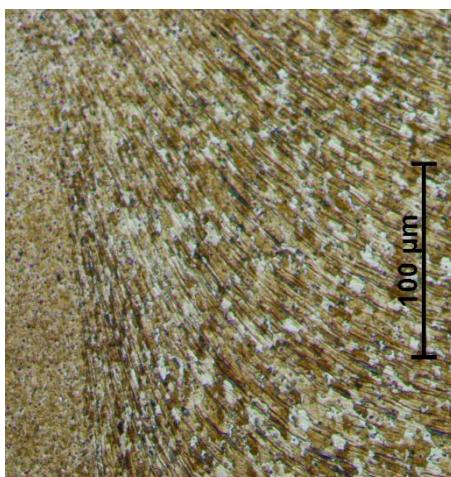
(a)



(b)



(c)

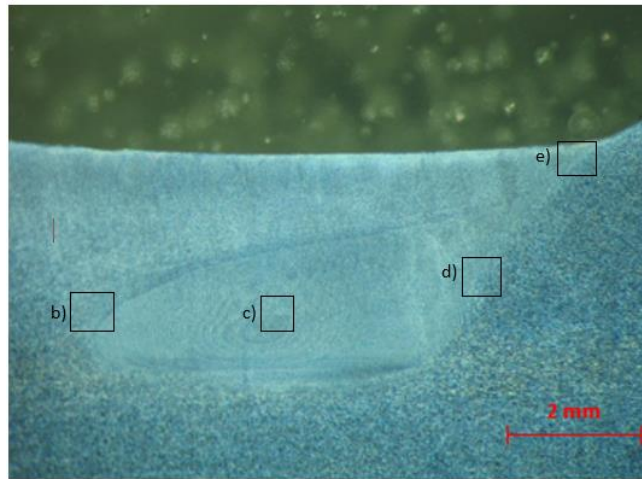


(d)

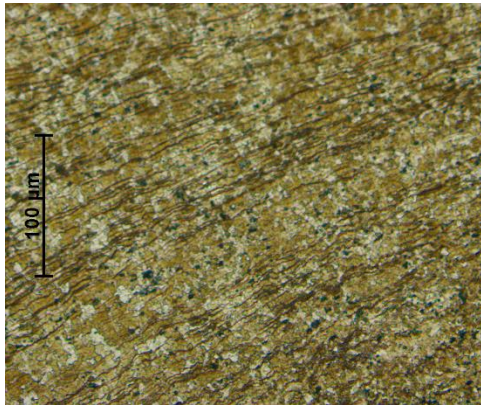


(e)

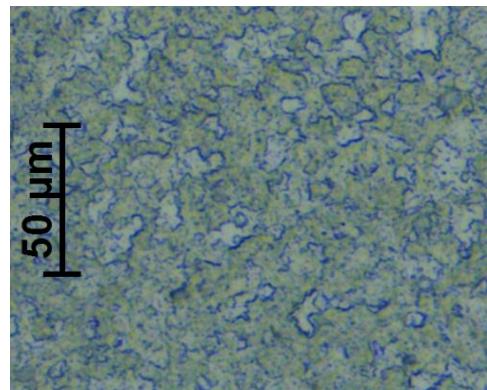
**Figura Ap. B.2** Análise morfológica e microestrutura do FSP: (a) Macrografia da ferramenta T2\_W15\_V8, (b) Lado do retrocesso; (c) *Nugget*; (d) Lado do avanço; (e) Zona do Pé.



(a)



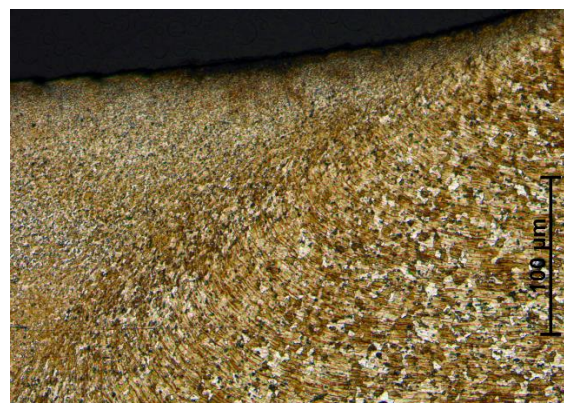
(b)



(c)

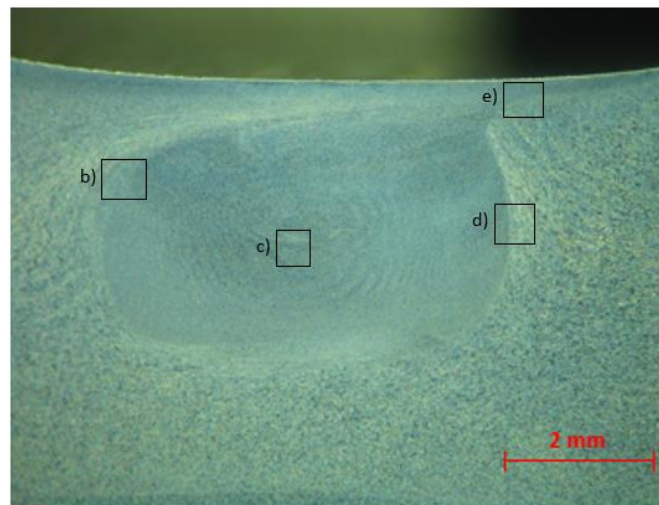


(d)



(e)

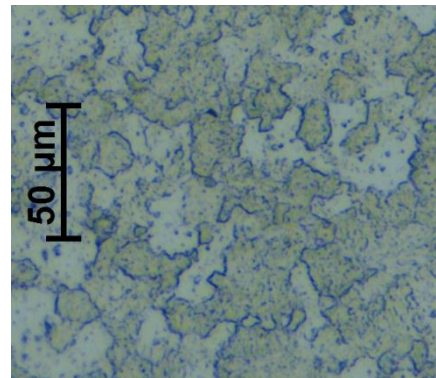
**Figura Ap. B.3.** Análise morfológica e microestrutura do FSP: (a) Macrografia da ferramenta T3\_W10\_V4, (b) Lado do retrocesso; (c) *Nugget*; (d) Lado do avanço; (e) Zona do Pé.



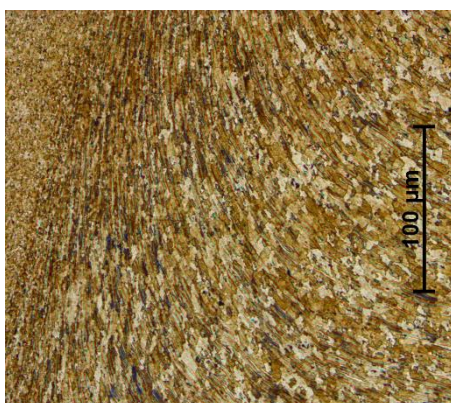
(a)



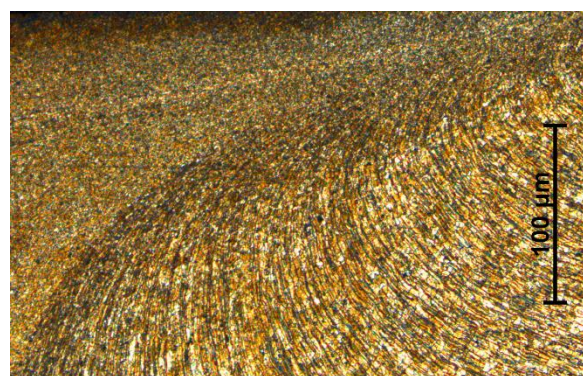
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura Ap. B.4.** Análise morfológica e microestrutura do FSP: (a) Macrografia da ferramenta T5\_W15\_V12, (b) Lado do retrocesso; (c) *Nugget*; (d) Lado do avanço; (e) Zona do Pé.



## Ap. C APÊNDICE C

**Tabela C.1.** Tamanho de grão [ $\mu\text{m}$ ] sob a forma de intervalo.

Ferramenta	Parâmetros					
	W15 V4	W15 V8	W15 V12	W10 V4	W10 V8	W10 V12
<b>T1</b>	[3;6]	[3;6]	[3;6]	[3;6]	[3;6]	[3;6]
<b>T2</b>	[3;6]	[3;6]	[3;6]	[2,5;5]	[5;8]	[2,5;4]
<b>T3</b>	[3;6]	[3,5;5]	[3;6]	[3,5;5]	[3;6]	[3,5;5]
<b>T4</b>	[3;6]	[3;6]	[3;6]	[3;6]	[2,5;5]	[2,5;4]
<b>T5</b>	[3;6]	[3;6]	[3;6]	[3;6]	[3;6]	[3;6]

## Ap. D APÊNDICE D

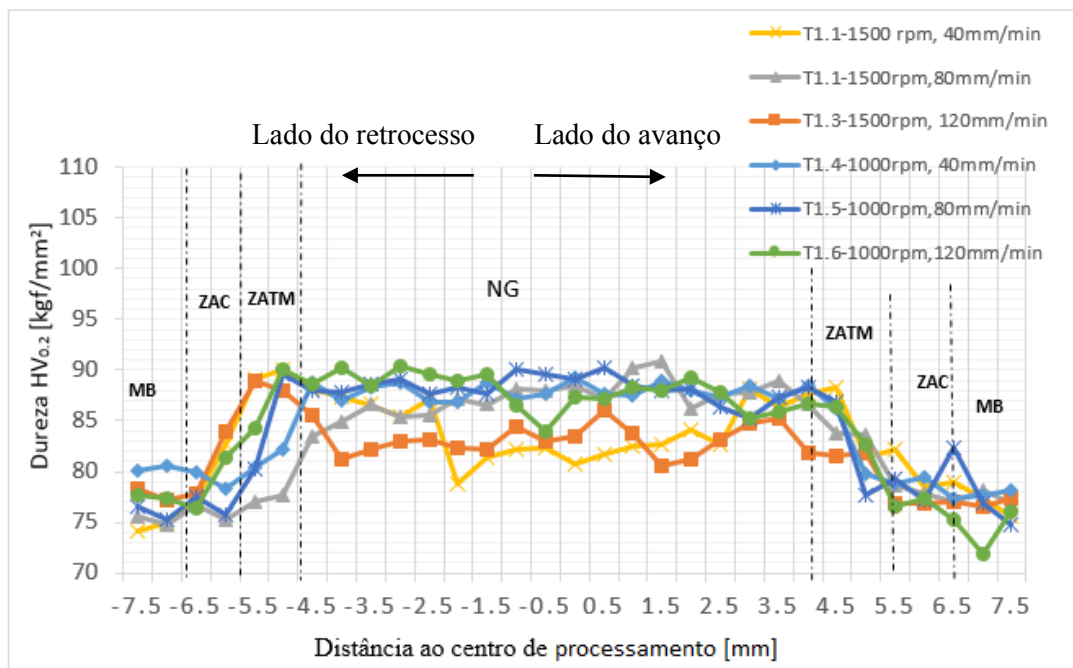


Figura Ap. D.1. Perfil de durezas da ferramenta cônica roscada (T1).

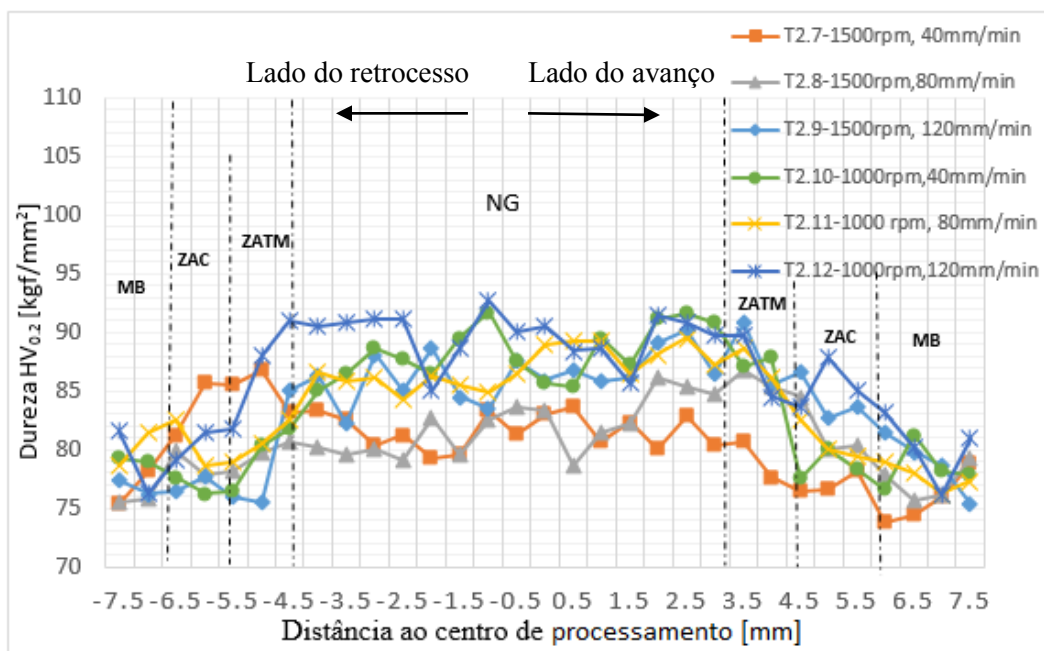


Figura Ap. D.2. Perfil de durezas da ferramenta cilíndrica roscada com rasgo (T2).

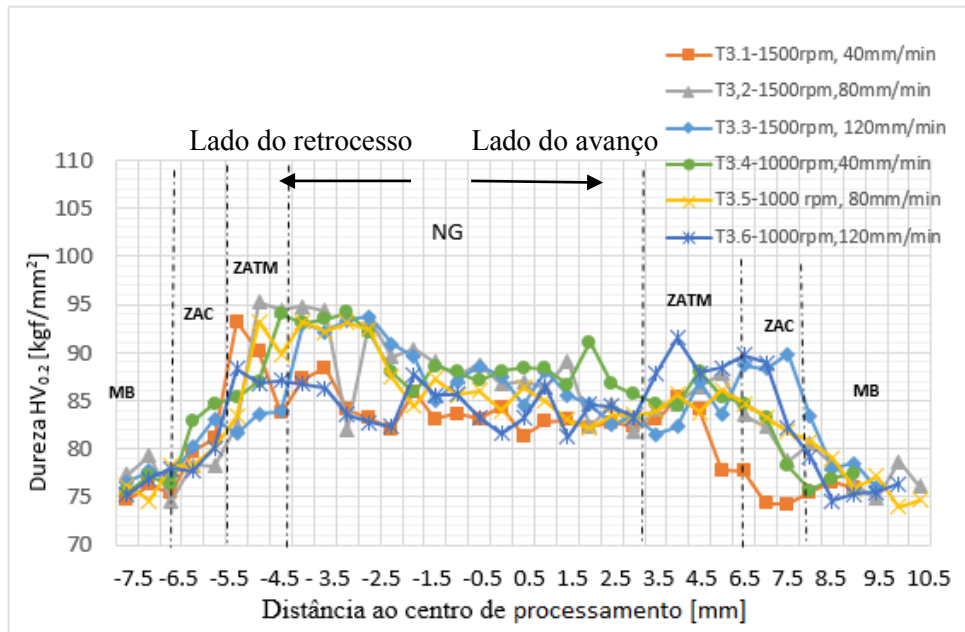


Figura Ap. D.3. Perfil de durezas da ferramenta prismática base quadrada (T3).

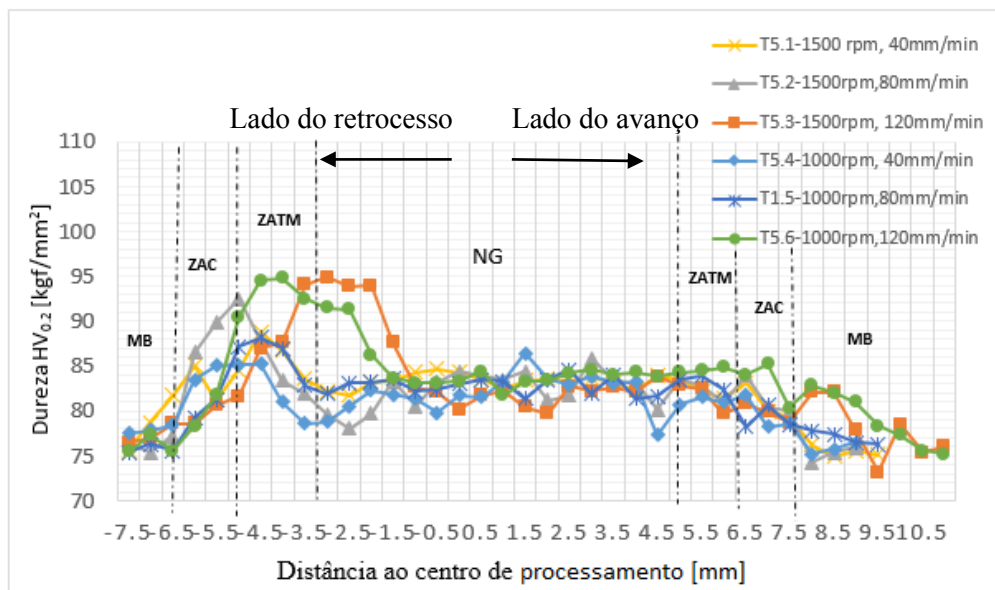


Figura Ap. D.4. Perfil de durezas da ferramenta cilíndrica roscada (T5).