



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Melhoria da resistência mecânica de juntas coladas sobrepostas simples com recurso à soldadura por fricção linear

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

Improvement of the mechanical strength of single lap bonded joints using friction stir welding

Autor

Hélder Manuel Domingues Rumor

Orientadores

Ana Paula Bettencourt Martins Amaro

Altino de Jesus Roque Loureiro

Júri

Presidente Professora Doutora Cristina Maria Gonçalves dos Santos
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis
Professor Auxiliar da Universidade da Beira Interior

Orientador Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins
Amaro
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, setembro, 2017

Agradecimentos

A realização deste trabalho dependeu da ajuda de algumas pessoas, às quais gostaria de deixar uma palavra de agradecimento.

Aos orientadores Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro e Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro, pela disponibilidade e conhecimento transmitido.

Aos meus pais por todo o apoio que me deram a todos os níveis, permitindo-me terminar os estudos

À minha namorada, Nádía Costa, por ter estado sempre presente em todos os momentos, apoiando-me sempre que necessário.

Resumo

O objetivo deste trabalho é alcançar a melhoria da resistência mecânica de juntas coladas sobrepostas com recurso a soldadura por fricção linear. Os adesivos, apesar de proporcionarem ligações com excelentes características, apresentam tipicamente, menores resistências mecânicas comparativamente às ligações soldadas, como tal, a ideia deste estudo consiste na associação de ambas as ligações na criação de uma junta híbrida com o intuito de melhorar a resistência mecânica das ligações simplesmente adesivas. Para tal, foi efetuado o estudo de 3 tipos de ligações em juntas sobrepostas: as coladas, as soldadas por fricção por pontos, as e híbridas (soldadas por fricção por pontos e simultaneamente coladas). As juntas coladas e soldadas serviram como referência.

Na realização das juntas coladas e juntas híbridas foi utilizado o adesivo Araldite AW 106 Resin Hardener HV 953U BD e os aderentes foram placas da liga de alumínio AA2017-T4.

Foram utilizados diferentes parâmetros de soldadura (tipo de ferramenta utilizada e velocidade de rotação) na realização das ligações soldadas e híbridas, pretendendo-se relacionar estes parâmetros com a qualidade das ligações criadas.

A análise das ligações consistiu na análise da microestrutura, na realização de ensaios de microdureza, na realização de ensaios de tração/corte e na análise das deformações locais.

Conclui-se que, para as condições em que as ligações híbridas foram efetuadas, não existiu melhoria da resistência mecânica destas relativamente aos outros 2 tipos de ligação em estudo pelo contrário houve redução de resistência. A ligação que maior resistência mecânica apresentou foi a ligação colada. Retirou-se ainda, que praticamente não existiu soldadura entre as placas superior e inferior da junta sobreposta híbrida, tendo-se o adesivo comportando como uma barreira à soldadura. A temperatura gerada no processo de soldadura levou à degradação do adesivo. O parâmetro com maior influência na resistência mecânica das ligações soldadas e híbrida foi a ferramenta utilizada.

Palavras-chave: Soldadura por fricção por pontos, juntas coladas, juntas soldadas, juntas híbridas, liga de alumínio, tração/corte.

Abstract

The main goal of this work is to achieve the improvement of the mechanical strength of lap bonded joints using friction stir spot welding. The adhesives, although providing bonds with excellent properties, typically have lower mechanical strength when compared to welded joints, so, the idea of this study consists in the association of both methods in the creation of a hybrid joint with the purpose of improving the mechanical strength of simply adhesive bonds. For this, the study of 3 types of connections in lap joints were done: bonded joints, friction stir spot welded joints, and hybrid (both bonded and friction stir spot welded). Bonded and welded lap joints served as reference.

For the bonded and hybrid joints the Araldite AW 106 Resin Hardener HV 953U BD adhesive and adherends of AA2017-T4 (3 mm thick) were used.

Different welding parameters (tool used and speed of rotation) were used in the accomplishment of the welded and hybrid joints, aiming to relate these parameters to the strength of these joints.

Microstructure, microhardness tests tensile / shear tests and the analysis of local strains were used to characterize the joints.

It concluded that, there was no improvement in the mechanical strength of these joints compared to the bonded and welded joints, at least for the conditions used in the production of hybrid joints. The adhesive joints presented the best mechanical strength results. The adhesive behaved as a barrier to welding and there was almost no welding between top and bottom plates of hybrid joints. The temperature generated in the welding process led to degradation of the adhesive. The tool was the parameter with the greatest influence on the mechanical strength of welded and hybrid joints.

Keywords Friction stir spot welding, bonded joints, weld joints, hybrid joints, aluminium alloy, Tensile/Shear.

Índice

Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas	xii
Siglas	xiii
Siglas	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Introdução	3
2.2. Ligações adesivas	3
2.2.1. Tipos de esforços	5
2.2.2. Modos de rutura de ligações adesivas	9
2.2.3. Preparação de junta	10
2.3. Ligações soldadas	10
2.3.1. Friction Stir Welding - FSW	10
2.3.2. Friction Stir Spot Welding - FSSW	12
2.4. Ligações híbridas	18
2.4.1. Descrição do processo e parâmetros a ter em conta na realização das juntas híbridas	19
2.4.2. Tensões de corte verificadas pelas ligações híbridas numa junta sobreposta	22
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	23
3.1. Materiais	23
3.1.1. Liga de alumínio 2017-T4	23
3.1.2. Adesivo Araldite Aw 106/ Hardner HV 963 U BD	24
3.1.3. Ferramentas	24
3.2. Preparação dos provetes colados	25
3.3. Preparação dos provetes soldados	26
3.4. Preparação dos provetes híbridos	28
3.5. Metalografia	31
3.6. Ensaio de microdureza	31
3.7. Ensaio de tração/corte	32
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	33
4.1. Morfologia dos provetes	33
4.1.1. Macrografias das secções de soldadura	35
4.2. Análise metalográfica	38
4.2.1. Microestrutura do material base	38
4.2.2. Microestrutura da série soldada	39
4.2.3. Microestrutura da série híbrida	41
4.3. Análise da Microdureza	43
4.4. Análise à resistência estática das ligações	48

4.4.1.	Ensaio de tração/corte na ligação colada	48
4.4.2.	Ensaio de tração/corte nas ligações soldadas	49
4.4.3.	Ensaio de tração/corte nas ligações híbridas	51
4.4.4.	Forças máximas de todos os tipos de ligações	53
4.5.	Análise das deformações locais	55
4.5.1.	Ligação Colada	58
4.5.2.	Ligação Soldada	59
4.5.3.	Ligação Híbrida	63
4.6.	Rotura dos provetes	65
4.6.1.	Superfície de rotura da ligação colada	66
4.6.2.	Superfície de rotura da ligação soldada	67
4.6.3.	Superfície de rotura da ligação híbrida	68
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
5.1.	Conclusões	71
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	ANEXO A	76
	APÊNDICE A	82
	APÊNDICE B	83
	APÊNDICE C	84
	APÊNDICE D	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Tipos de esforços existentes em juntas adesivas (Täljsten B, 2006).....	5
Figura 2.2. Representação de uma junta sobreposta (Täljsten B, 2006)	5
Figura 2.3. Distribuição da tensão de corte ao longo do comprimento da junta sobreposta (Pinto, A. M. G. 2007).....	6
Figura 2.4. Efeito da sobreposição e da largura na resistência ao corte (Pinto, A. M. G. 2007).....	7
Figura 2.5. Tensão na extremidade da ligação adesiva em esforços de clivagem e arrancamento (Pinto, A. M. G. 2007).....	8
Figura 2.6. Flexão dos elementos solicitados ao corte provocando arrancamento (Loureiro A. J. R., 2014).....	9
Figura 2.7. Modos de ruína de uma ligação adesiva (Pinto, A. M. G. 2007).....	9
Figura 2.8. Esquema de funcionamento do processo de FSW (dos Santos., et al., 2007)...	11
Figura 2.9. Esquema do processo de FSSW- a) fase de penetração; b) fase de soldadura; c) Saída da ferramenta (Zhang, Z., et al., 2011).....	13
Figura 2.10. Zonas de soldadura (Campanelli, L. C., et al., 2012).....	14
Figura 2.11. Algumas geometrias do pino (Elangovan, K., & Balasubramanian, V. 2008).	16
Figura 2.12. Geometria do shoulder (Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. 2005).	16
Figura 2.13. Representação do hooking numa soldadura por FSSW (Li, W., et al., 2014) ..	17
Figura 2.14. Esquemática da realização de juntas híbridas soldadas-coladas pelos métodos: a) Flow in; b) weld-through (Darwish, S. M. H., & Ghanya, A. 2000).	20
Figura 2.15. Tensões de corte ao longo da junta sobreposta das ligações coladas, soldadas e híbridas. (da Silva, L. F. et al., 2011).....	22
Figura 3.1. (a) Ferramenta A; (b) Ferramenta B.....	25
Figura 3.2. Provetes posicionados no “Gabarit”, de forma a garantirem a dimensão de sobreposição de 25mm.	26
Figura 3.3. Realização da soldadura das placas de AA2017 com as dimensões 150x100x3 [mm].	28
Figura 4.1. Série híbrida concebida pela primeira metodologia, após a rotura.	34
Figura 4.2. Provette colado C1	34
Figura 4.3. Provette soldado S500B-1	35
Figura 4.4. Provette híbrido H500B-1	35

Figura 4.5. Macrografia do perfil de soldadura do provete S870A-1, realizado com recurso à ferramenta A com pino de 3 mm e velocidade de rotação de 870 rpm.	36
Figura 4.6. Macrografia do perfil de soldadura do provete S870B-1, realizado com recurso à ferramenta B com pino de 5 mm e velocidade de rotação de 870 rpm.	36
Figura 4.7. Macrografia do perfil de soldadura do provete S500B-1, realizado com recurso à ferramenta B com pino de 5 mm e velocidade de rotação de 500 rpm.	36
Figura 4.8. Macrografia do perfil de soldadura do provete H500B-3, realizado com recurso à ferramenta B com pino de 5 mm e velocidade de rotação de 500 rpm.	36
Figura 4.9. Macrografia do perfil de soldadura do provete H870B-1, realizado com recurso à ferramenta B com pino de 5 mm e velocidade de rotação de 870 rpm.	37
Figura 4.10. Macrografia do perfil de soldadura do provete H870A-1, realizado com recurso à ferramenta A com pino de 3 mm e velocidade de rotação de 870 rpm.	37
Figura 4.11. Microestrutura do material base.	39
Figura 4.12. Macrografia do perfil de soldadura do provete S870B-1.	39
Figura 4.13. micrografias das zonas assinaladas- (a) zona da soldadura; (b) zona nugget; (c) zona termo-mecânicamente afetada; (d) Zona termicamente afetada.	40
Figura 4.14. Macrografia do perfil de soldadura do provete S500B-3.	41
Figura 4.15. micrografias das zonas assinaladas.	42
Figura 4.16. Perfil de dureza do material base.	43
Figura 4.17. Esquemática da dissipação de calor na placa superior da junta sobreposta.	44
Figura 4.18. Perfil de dureza do provete S870A-1.	46
Figura 4.19. Perfil de dureza do provete S870B-1.	46
Figura 4.20. Perfil de dureza do provete S500B-1.	47
Figura 4.21. Perfil de dureza do provete H500B-3.	47
Figura 4.22. Perfil de dureza do provete H870B-1.	47
Figura 4.23. Perfil de dureza do provete H870A-1.	48
Figura 4.24. Resultados obtidos nos ensaios de tração/corte da série Colada C.	49
Figura 4.25. Resultados obtidos nos ensaios de tração/corte das séries soldadas S870A, S870B e S500B.	50
Figura 4.26. Resultados obtidos nos ensaios de tração/corte das séries híbridas H500B, H870B e H870A.	51
Figura 4.27. Forças máximas de cada ensaio tração/corte realizado.	53
Figura 4.28. Comparação dos valores de deformação global e local do provete C-4.	56
Figura 4.29. Representação do ponto onde foram estudadas as deformações locais do provete C-4.	56

Figura 4.30. Comparação dos valores de deformação global e local do provete S870A-4..	56
Figura 4.31. Representação do ponto onde foram estudadas as deformações locais do provete S870A-4.....	57
Figura 4.32. Comparação dos valores de deformação global e local do provete H500B-4 .	57
Figura 4.33. Representação do ponto onde foram estudadas as deformações locais do provete H500B-4	57
Figura 4.34. Provete C-4-(a) Estágio 36 (2096 N); (b) Estágio 45 (5723N); (c) Estágio 46 (5901 N); (d) Estágio 47 (0 N).	58
Figura 4.35. Provete S500B-4- (a) Estágio 4 (1063 N); (b) Estágio 8 (3301 N); (c) Estágio 20 (6485 N) ; (d) Estágio 22 (0 N)	60
Figura 4.36. Provete S870B-4- (a) Estágio 12 (3014 N); (b) Estágio 18 (4260 N); (c) Estágio 31 (6004 N); (d) Estágio 34 (0 N).	62
Figura 4.37. Provete H500B-5- (a) Estágio 4 (1605 N); (b) Estágio 20 (4182 N); (c) Estágio 31 (5189 N); (d) Estágio 60 (6069 N).	64
Figura 4.38. Superfície de rotura do provete C-2 relativo à série colada	66
Figura 4.39. Superfície de rotura do provete C500-2 relativo à série soldada	67
Figura 4.40. Superfície de rotura do provete H870B-4 relativo à série híbrida	68
Figura AN 0.1. Folha número 1 da especificação do adesivo Araldite AW 106 Hardner HV 953U	76
Figura AN 0.2. Folha número 2 da especificação do adesivo Araldite AW 106 Hardner HV 953U	77
Figura AN 0.3. Folha número 3 da especificação do adesivo Araldite AW 106 Hardner HV 953U	78
Figura AN 0.4. Folha número 4 da especificação do adesivo Araldite AW 106 Hardner HV 953U	79
Figura AN 0.5. Folha número 5 da especificação do adesivo Araldite AW 106 Hardner HV 953U	80
Figura AN 0.6. Folha número 6 da especificação do adesivo Araldite AW 106 Hardner HV 953U	81
Figura AA 0.1. Dimensões e geometria da ferramenta A	82
Figura AB 0.1. Dimensões e geometria da ferramenta B.....	83
Figura AC 0.1. Representação dos ensaios de microdureza realizados.....	84
Figura AD 0.1. Provete S870A-2- (a) Estágio 10 (220 N) ; (b) Estágio 17 (424 N); (c) Estágio 21 (1358 N); (d) Estágio 22 (0 N).	85
Figura AD 0.2. H870B-2- (a) Estágio 4 (1277 N); (b) Estágio 7 (3436 N); (c) Estágio 11 (5809 N); (d) Estágio 12 (0 N).	86
Figura AD 0.3. H870A-3- (a) Estágio 4 (692 N); (b) Estágio 6 (1267 N); (c) Estágio 7 (1465 N); (d) Estágio 8 (0 N).	87

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química da liga de alumínio 2017-T4 (http://www.broncesval.com/pt/aluminio-3/192-liga-de-aluminio-cobre-2017) ..	24
Tabela 3.2. Parâmetros de soldadura utilizados na realização dos provetes soldados da série S870A.....	27
Tabela 3.3. Parâmetros de soldadura utilizados na realização dos provetes soldados da série S870B.....	27
Tabela 3.4. Parâmetros de soldadura utilizados na realização dos provetes soldados da S500B.....	27
Tabela 3.5. Parâmetros de soldadura utilizados na realização dos provetes híbridos da série H500B.....	29
Tabela 3.6. Parâmetros de soldadura utilizados na realização dos provetes híbridos da série H870B.....	30
Tabela 3.7. Parâmetros de soldadura utilizados na realização dos provetes híbridos da série H500A.....	30
Tabela 4.1. Média e desvio padrão das forças máximas suportadas por cada série.....	54

SIGLAS

Siglas

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DIC – *Digital Image Correlation*

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FSSW – *Friction Stir Spot Welding*

FSW – *Friction Stir Welding*

MB – Material Base

TWI – *The Welding Institute*

ZN – Zona do *Nugget*

ZTA – Zona Termicamente Afetada

ZTMA – Zona Termo-Mecanicamente Afetada

1. INTRODUÇÃO

A redução de peso tem vindo a tornar-se, ao longo dos tempos, num dos principais desafios na construção de produtos de engenharia. Em indústrias como a aeronáutica, naval, automóvel e aeroespacial, a redução de peso assume uma grande importância por estar diretamente ligada à diminuição de consumo de combustíveis fósseis. O recurso a materiais menos densos, como por exemplo o alumínio, na construção de componentes de engenharia, e a utilização de métodos de ligação não convencionais, como a ligação colada e a ligação soldada por *Friction Stir Spot Welding (FSSW)*, são algumas das estratégias mais utilizadas na tarefa da redução de peso.

A utilização de adesivos aumentou em aplicações de engenharia, por se tratar de um método de ligação que proporciona juntas mais leves, relativamente aos métodos de soldadura convencionais, garantindo grande ductilidade, absorção de choques, e uma boa distribuição de tensões. Em contrapartida, apresenta algumas desvantagens como é o caso da necessidade de preparação de junta, fraca capacidade de resistir a esforços, nomeadamente, aqueles que não sejam de corte, baixa resistência mecânica relativamente aos métodos de soldadura, de aparafusamento e de rebiteagem. O tipo de junta mais adequado para a utilização de adesivos como método de ligação é a junta sobreposta, que consiste na união de duas chapas uma sobre a outra, acontecendo a união na interface entre as duas, neste tipo de configuração de junta os esforços típicos existentes são os esforços cortantes.

A soldadura por fricção linear por pontos (*FSSW- Friction Stir Spot Welding*) é um processo de soldadura onde não é atingida a temperatura de fusão dos materiais a soldar pelo facto da temperatura existente neste processo ser gerada pela fricção entre a ferramenta e o material, e com o aumento da temperatura o material se tornar mais macio, diminuindo o atrito, mantendo, portanto, as temperaturas sempre abaixo do ponto de fusão do material. Por esta razão a soldadura criada consegue menos defeitos do que as soldaduras criadas pelos métodos convencionais. É um método bastante utilizado na ligação de metais menos densos, como o alumínio e o magnésio. Este processo tornou possível a soldadura de algumas ligas

difíceis, de soldar pelos métodos convencionais de soldadura por fusão. Neste processo não existe adição de material na soldadura, o que torna a mesma mais leve comparativamente com aquelas criadas pelos métodos de soldadura convencionais.

O objetivo do estudo consiste na associação dos dois tipos de união anteriormente enunciados na criação de uma junta híbrida (junta colada e soldada simultaneamente) aspirando o aumento das características que cada uma das uniões apresenta individualmente.

Esta dissertação apresenta, para além da introdução, mais 4 capítulos, sendo eles: a revisão bibliográfica, procedimentos experimentais, apresentação e discussão de resultados, e conclusões e sugestões para trabalhos futuros. Na revisão bibliográfica serão apresentadas todas as temáticas relevantes para o estudo, dando ao leitor uma visão geral do assunto. Nos procedimentos referem-se os materiais e equipamentos utilizados. No capítulo referente à apresentação de resultados são expostos, analisados e discutidos todos os resultados com base na revisão bibliográfica. No último capítulo são descritas as conclusões retiradas do estudo, e apresentadas sugestões para futuros trabalhos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo fazer uma breve introdução aos assuntos de maior relevância no âmbito deste estudo, de forma a inserir o leitor na temática do mesmo.

Inicialmente vai ser feita a análise das juntas coladas, abordando neste subcapítulo tópicos referentes aos modos de rotura das juntas adesivas, aos tipos de esforços existentes numa junta adesiva e à preparação da junta.

A revisão bibliográfica vai também passar por fazer uma breve análise bibliográfica da soldadura por fricção linear (*FSW-Friction Stir Welding*), sendo que o maior foco será concedido à sua derivação, a soldadura por fricção linear por ponto (*FSSW-Friction Stir Spot Welding*), uma vez que este é o tipo de soldadura utilizado no estudo. Vão ser abordados os parâmetros de soldadura que maior influência têm na resistência da junta soldada e a microestrutura da soldadura.

Por último, será feita a revisão bibliográfica das juntas híbridas, explicando como estas podem ser produzidas, quais as suas principais características e a forma de como se distribuem as tensões de corte neste tipo de ligação, comparativamente com as outras duas ligações em análise.

2.2. Ligações adesivas

A utilização de adesivos por parte do homem já acontece há milhares de anos, sendo que os primeiros vestígios da sua utilização por parte do ser humano datam de 4000 a.C., no Egipto (Täljsten B, 2006; da Silva, L. F., *et al.*, 2011). Atualmente, os adesivos representam um papel fundamental ao nível industrial, tendo-se tornado numa alternativa

viável para as ligações estruturais convencionais, como o aparafusamento, rebiteamento e mesmo a soldadura (Pizzi A. e Mital K. L., 2003; Pinto, A. M. G. 2007).

As principais vantagens da utilização de adesivos são (Täljsten B, 2006; Neto J.A.B.P, 2012):

- Boa distribuição de tensões na zona da junta;
- Elevada resistência à fadiga;
- Capacidade de unir diferentes tipos de materiais;
- Capacidade de unir elementos de espessura reduzida;
- Capacidade de proteger os aderentes da corrosão;
- Capacidade de compensar as expansões sofridas pelos aderentes devido a variações térmicas;
- Capacidade de funcionamento a temperaturas superiores às temperaturas de cura;
- Aumento da velocidade de produção, em especial em indústrias como a automóvel e a aeroespacial;
- Redução de peso;
- Capacidade de isolamento acústico.

As principais desvantagens da utilização de juntas adesivas são (Loureiro A. J. R., 2014):

- No geral não apresentam boa resistência ao corte para temperaturas superiores a 100°C;
- Necessidade de redesenhar a junta;
- Necessidade de desoxidação e grande limpeza de junta;
- Necessidade de manter os objetos colados na mesma posição durante o tempo de cura;
- Baixa resistência ao arrancamento;
- Podem ser mais caras que as ligações mecânicas;
- Processo irreversível.

2.2.1. Tipos de esforços

As ligações adesivas podem estar sujeitas a vários tipos de esforços, entre os quais o esforço de tração/compressão, a clivagem, o arrancamento e o esforço de corte. Na Figura 2.1 encontram-se esquematizados os tipos de esforços que podem existir numa junta adesiva.

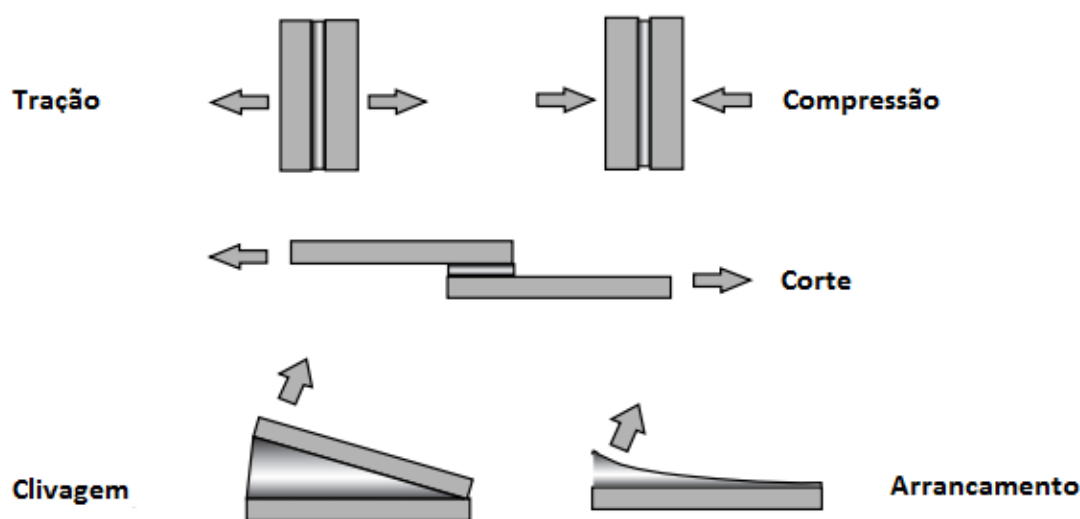


Figura 2.1. Tipos de esforços existentes em juntas adesivas (Täljsten B, 2006).

Tipicamente, os esforços que melhor são suportados pelas ligações adesivas são os esforços de corte (Täljsten B, 2006). Como tal, o tipo de junta que é mais utilizado na realização de ligações coladas é a junta sobreposta, por ter nela a atuarem, predominantemente, esforços de corte. Na Figura 2.2, encontra-se esquematizada uma junta sobreposta. Este tipo de junta consiste na união de duas chapas uma sobre a outra, com uma determinada distância de sobreposição, os esforços que este tipo de junta melhor suporta são os esforços de corte, estes serão explicados no ponto seguinte.



Figura 2.2. Representação de uma junta sobreposta (Täljsten B, 2006)

2.2.1.1. Esforço de corte

As tensões de corte surgem quando é aplicada uma força no mesmo plano que o plano de adesão, provocando o escorregamento dos aderentes, um relativamente ao outro (Pinto, A. M. G. 2007).

De acordo com Pinto (Pinto, A. M. G. 2007), as tensões de corte não se distribuem uniformemente na junta colada. Na Figura 2.3. encontra-se representada a distribuição de tensões de corte ao longo do comprimento de uma junta adesiva.

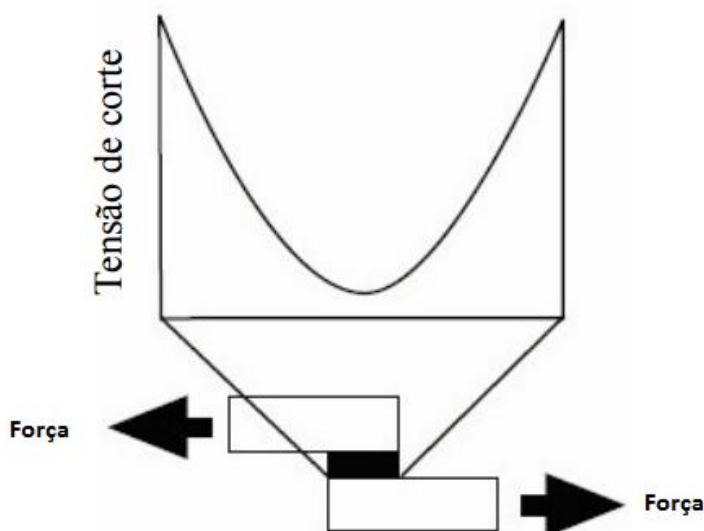


Figura 2.3. Distribuição da tensão de corte ao longo do comprimento da junta sobreposta (Pinto, A. M. G. 2007).

É possível observar, na Figura 2.3, que as tensões de corte são superiores nas extremidades das juntas e vão diminuindo conforme o aumento da distância às extremidades da junta. O valor de tensão mínimo encontra-se no meio do plano de junta.

A largura da junta é um fator de maior relevo na resistência ao corte da junta sobreposta colada quando comparado com o comprimento de sobreposição (Pinto, A. M. G. 2007). Na Figura 2.4 é apresentado o efeito do aumento de comprimento e largura de sobreposição na resistência ao corte da junta sobreposta colada.

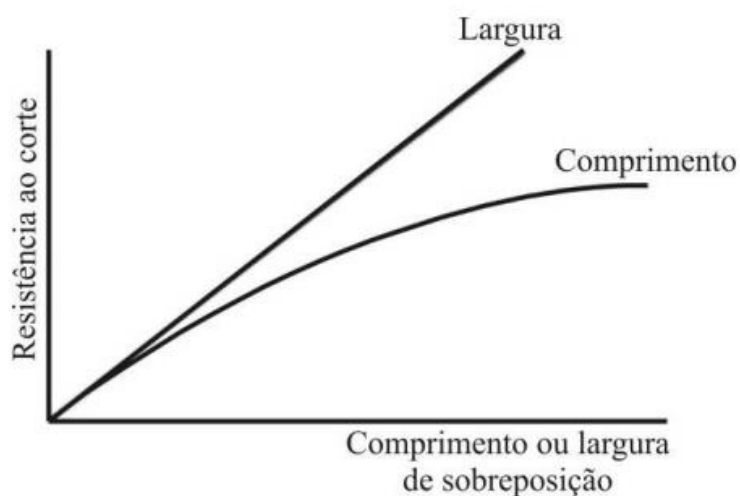


Figura 2.4. Efeito da sobreposição e da largura na resistência ao corte (Pinto, A. M. G. 2007).

2.2.1.2. Arrancamento e clivagem

Os esforços de arrancamento e clivagem são esforços de tração que se dão na extremidade da ligação. O aumento da tensão, provocado por estes esforços, pode levar à rotura prematura da ligação adesiva (Pinto, A. M. G. 2007).

A diferença entre a clivagem e o arrancamento reside na rigidez dos aderentes, sendo que, em aderentes mais rígidos existem esforços de clivagem e em aderentes mais flexíveis existe o arrancamento (Pinto, A. M. G. 2007). Na Figura 2.5 encontra-se demonstrada a tensão na extremidade da ligação adesiva em esforços de arrancamento e clivagem.

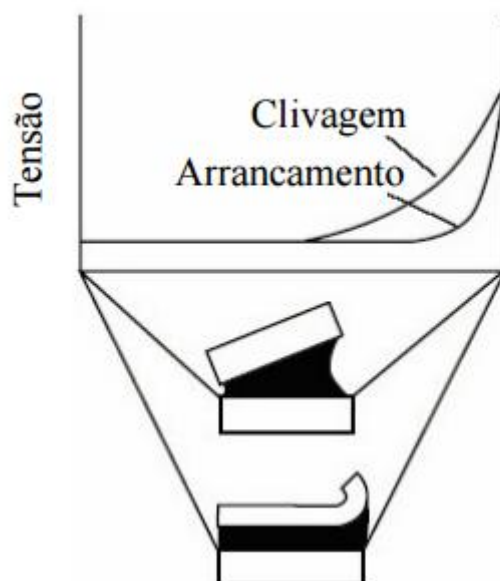


Figura 2.5. Tensão na extremidade da ligação adesiva em esforços de clivagem e arrancamento (Pinto, A. M. G. 2007).

Estes tipos de esforços devem de ser evitados em ligações adesivas sempre que possível, pelo facto de provocarem a uma concentração de tensões nas extremidades da ligação, diminuindo a resistência mecânica da junta.

No caso de juntas sobrepostas simples, sujeitas ao esforço de corte, presencia-se a flexão dos aderentes, levando a que sejam criados esforços de arrancamento e/ou esforços de clivagem, proporcionando uma diminuição drástica da resistência da junta colada. Consequentemente, a rigidez dos aderentes tem grande influência na resistência mecânica de uma junta sobreposta sujeita ao esforço cortante (Pinto, A. M. G. 2007). Na Figura 2.6 encontram-se esquematizadas as flexões dos elementos solicitados ao corte, provocando arrancamento.

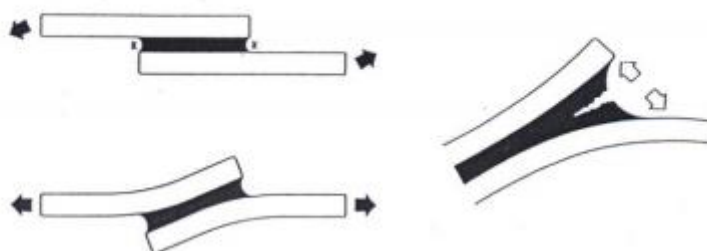


Figura 2.6. Flexão dos elementos solicitados ao corte provocando arrancamento (Loureiro A. J. R., 2014).

2.2.2. Modos de rutura de ligações adesivas

Existem quatro modos de rutura numa ligação adesiva: a rutura adesiva, a rutura coesiva, a rutura mista e a rutura de um dos aderentes. A Figura 2.7 representa esses modos de ruína.

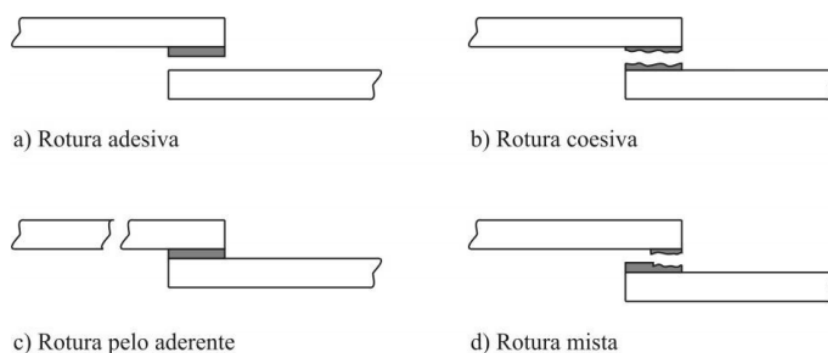


Figura 2.7. Modos de ruína de uma ligação adesiva (Pinto, A. M. G. 2007).

A rutura adesiva ocorre quando o adesivo e um dos aderentes se separam totalmente, não restando, na superfície desse aderente, nenhum vestígio de adesivo (Pinto, A. M. G. 2007).

A rutura coesiva surge quando há a falha do adesivo, isto é, quando a ligação entre o adesivo e o aderente é mais forte que a própria coesão do adesivo. Neste caso, ambas as superfícies dos aderentes ficam cobertas pelo adesivo após a rutura (Pinto, A. M. G. 2007).

A rotura mista acontece quando os modos de falha coesiva e adesiva se observam simultaneamente. Este modo de falha pode indicar que ocorreu uma limpeza ineficiente da superfície do aderente (Pinto, A. M. G. 2007).

A rotura de um dos aderentes verifica-se quando a resistência mecânica do aderente é inferior à resistência da ligação adesiva. Uma junta bem projetada é uma junta onde a falha acontece no aderente e não na junta adesiva (Pinto, A. M. G. 2007).

2.2.3. Preparação de junta

Uma junta adesiva deve de ser concebida tendo em atenção os seguintes aspetos (Pinto, A. M. G. 2007):

- Minimizar a concentração de tensões;
- Projetar a junta de forma a que a carga aplicada seja preferencialmente de corte;
- As forças de arrancamento e clivagem devem de ser evitadas;
- Distribuir as tensões de forma uniforme;
- A resistência de ligação deve ser proporcional à largura de sobreposição. O aumento do comprimento de sobreposição pode não contribuir para o aumento da resistência da junta;
- A rigidez dos aderentes influencia a resistência da junta;
- Uma camada uniforme de adesivo e junta isenta de vazios são os principais aspetos da resistência da ligação.

2.3. Ligações soldadas

2.3.1. Friction Stir Welding - FSW

O processo de Friction Stir Welding (*FSW*) foi inventado no ano de 1991 no The Welding Institute (TWI), situado no Reino Unido (Chowdhury, S. H., *et al.*, 2013). Trata-se de um processo de soldadura no estado sólido, que apresenta uma melhor soldadura relativamente àquelas por fusão convencionais, pois evita defeitos tais como a porosidade,

fendas na zona de soldadura, perda de elementos, originando uma soldadura com baixa distorção (Tozaki, Y. *et al.*, 2007; Yue, Y. M. *et al.*, 2017;).

É um processo vastamente utilizado na soldadura de ligas leves e juntas de materiais dissimilares, devido ao facto de este tipo de materiais ser difícil, ou até mesmo impossível, de soldar pelas técnicas convencionais de soldadura por fusão (Micari, F., *et al.*, 2014).

O processo de *FSW* é relativamente simples consistindo numa ferramenta rotativa não consumível, constituída por um pino e um *shoulder* (base da ferramenta), que é inserida na zona das chapas a soldar se desloca ao longo da junta, soldando os elementos (Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. 2005). Na Figura 2.8 encontra-se esquematizado o funcionamento do processo de *FSW*

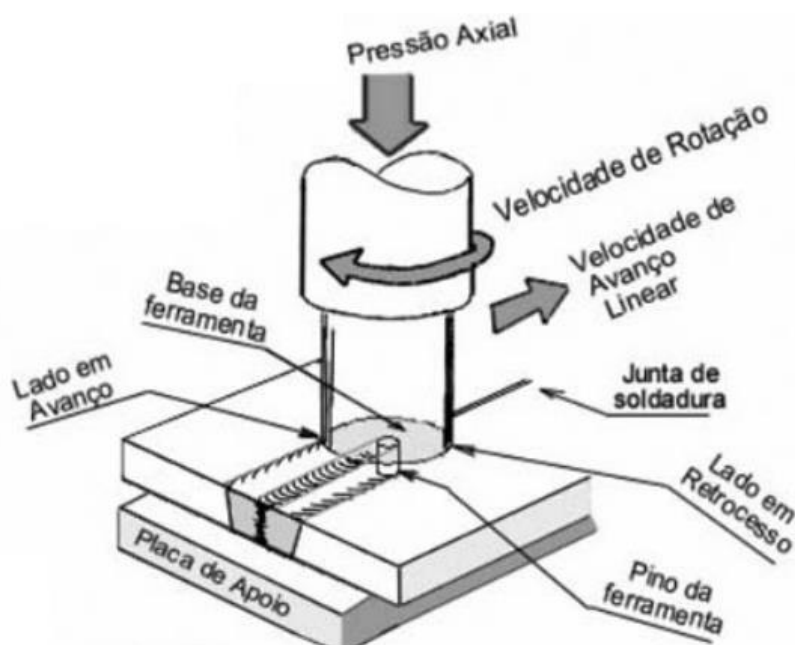


Figura 2.8. Esquema de funcionamento do processo de FSW (dos Santos., *et al.*, 2007).

A ferramenta promove a soldadura de duas maneiras: a primeira pelo aquecimento do material base, a segunda, pela mistura do material na zona de junta. O aquecimento do material base acontece pela fricção existente entre o material base e a

ferramenta e, ainda, pela deformação plástica do material. Assim, o aumento da temperatura leva a uma suavização do material base, e a rotação do pino faz com que o material seja transportado da frente da soldadura para a parte de trás da mesma (Mishra, R. S. & Ma, Z. Y., 2005).

2.3.2. Friction Stir Spot Welding - FSSW

O processo de *Friction Stir Spot Welding (FSSW)* é uma derivação do processo de *Friction Stir Welding (FSW)* (Chowdhury, S. H. *et al.*, 2013).

Em 1993, a Mazda Corporation propôs que fosse utilizada a *FSW* fixa num ponto. Esta soldadura teve sucesso e foi usada no fabrico de portas de automóveis do modelo Mazda RX-8 (Zhang, Z. *et al.*, 2011; Piccini, J. M., & Svoboda, H. G., 2015). A empresa concluiu que o processo de *FSSW* levou a uma redução de 99% da energia utilizada para a produção deste tipo de soldadura, relativamente à energia empregada na execução da mesma tarefa pelos métodos convencionais de ligação. (Piccini, J. M., & Svoboda, H. G., 2015).

O princípio de funcionamento do processo de *FSSW* é praticamente igual ao funcionamento do processo *FSW*, consubstanciando enquanto única diferença o facto de, neste processo, a ferramenta rotativa não se deslocar lateralmente, mantendo-se, portanto, no mesmo sítio durante a soldadura.

Na Figura 2.9 encontra-se esquematizado o processo de *FSSW*

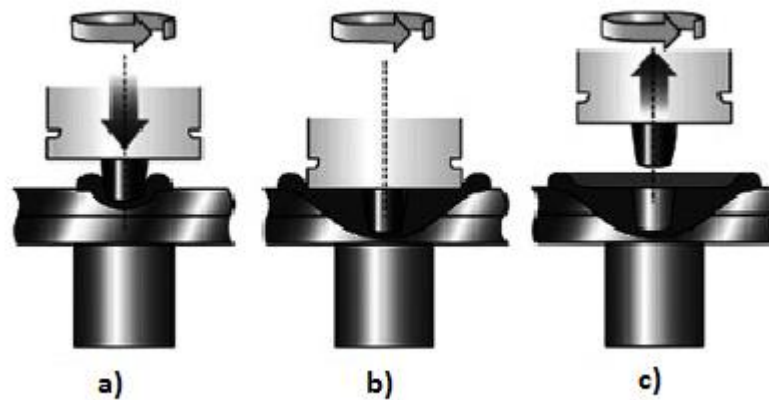


Figura 2.9.Esquema do processo de *FSSW*- a) fase de penetração; b) fase de soldadura; c) Saída da ferramenta (Zhang, Z., *et al.*, 2011).

O processo *FSSW* pode ser descrito como tendo, essencialmente, três etapas:

- A primeira encontra-se ilustrada na Figura 2.9-a) e corresponde à fase de penetração. Nesta etapa, a ferramenta encontra-se em rotação com uma certa velocidade angular, penetrando no material base até uma certa profundidade de penetração;

- A segunda, representada na Figura 2.9-b), corresponde ao período de soldadura. Aqui a ferramenta encontra-se em rotação no mesmo sítio, proporcionando geração de calor e remistura do material base;

- A terceira, mostrada na Figura 2.9-c), consiste na saída da ferramenta da zona de soldadura.

2.3.2.1. Microestrutura de soldaduras realizadas por *FSSW*

As soldaduras criadas pelo processo de *FSSW* apresentam tipicamente três zonas para além da zona do material base (MB). A zona termicamente afetada (ZTA), a zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA) e a Zona do *nugget* (ZN). Na Figura 2.10, encontram-se representadas as zonas de soldadura que se acabaram de referir.

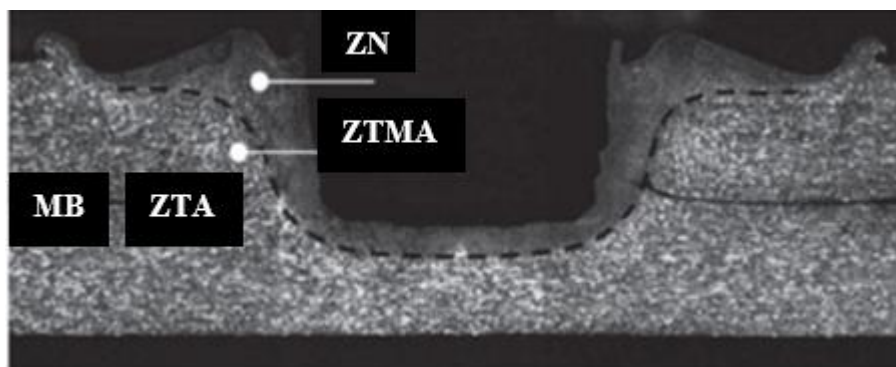


Figura 2.10. Zonas de soldadura (Campanelli, L. C., *et al.*, 2012).

A zona do MB corresponde à zona das chapas que não é afetada pela soldadura, as características da microestrutura desta região devem-se, exclusivamente, ao processamento e tratamento térmico aplicados no fabrico das chapas.

Na ZTA, as temperaturas existentes durante o processo de soldadura são muito elevadas, no entanto, não ocorrem deformações mecânicas. As condições de temperatura existentes nesta zona levam à dissolução e coalescência de precipitados, o que se traduz numa perda de propriedades mecânicas em ligas tratáveis termicamente, em que o principal mecanismo de endurecimento são os precipitados. O grão desta zona é normalmente caracterizado por apresentar um ligeiro aumento de tamanho relativamente àquele verificado no material base (Leitão, *et al.*, 2009; Campanelli, L. C. *et al.*, 2012).

A ZTMA, corresponde à zona onde ocorrem, para além de elevadas temperaturas, elevadas deformações mecânicas. Esta zona é constituída por grão com um elevado grau de deformação, apresentando estes uma forma alongada. Tal como na ZTA, as elevadas temperaturas verificadas na ZTMA levam à ocorrência de dissolução e coalescência de precipitados, diminuindo assim nestas zonas, as propriedades mecânicas relativamente ao material base (Leitão, *et al.*, 2009; Campanelli, L. C. *et al.*, 2012).

Doutro modo, a ZM é a área onde ocorre uma severa deformação mecânica e onde existem elevadas temperaturas, permitindo a recristalização dinâmica e, por conseguinte, nesta zona ocorre dissolução e subsequente reprecipitação. Esta zona é, caracterizada pela existência de um grão muito fino e equiaxial (Leitão, *et al.*, 2009; Campanelli, L. C. *et al.*, 2012).

2.3.2.2. Parâmetros de soldadura no processo de -FSSW

Os parâmetros sob os quais a soldadura é efetuada têm um grande impacto na resistência mecânica daquela. Como tal, existe um grande interesse na otimização destes parâmetros, por forma a maximizar a resistência mecânica da soldadura.

Os parâmetros que maior influência têm na FSSW são (Mishra, R. S., & Ma, Z. Y., 2005; Zhang, Z. *et al.*, 2011; Campanelli, L. C. *et al.*, 2012):

- A penetração da ferramenta;
- A velocidade de rotação da ferramenta;
- O *dwell* time (tempo que a ferramenta permanece na etapa de soldadura);
- Geometria da ferramenta.

A penetração da ferramenta consiste na medição da distância que a ferramenta penetra no material base. O aumento da penetração da ferramenta leva, geralmente, ao aumento da resistência da junta soldada. Porém, uma excessiva penetração pode baixar a resistência da junta, em razão da diminuição da espessura da placa de material base (Badarinarayan, H., *et al.*, 2009).

A rotação da ferramenta provoca a mistura do material base em torno do pino da ferramenta e está diretamente relacionada com a geração de calor na zona de soldadura. O aumento da velocidade de rotação leva a um aumento do calor gerado. Normalmente a resistência mecânica da ligação soldada aumenta com a diminuição da velocidade de rotação. (Badarinarayan, H. *et al.*, 2009; Zhang, Z. *et al.*, 2011).

Já no que concerne ao *dwell* time, este representa o tempo em que a ferramenta se encontra em rotação na posição de soldadura, ou seja, corresponde ao período de tempo entre a etapa da penetração e a etapa da saída da ferramenta. Este parâmetro está ligado à quantidade de calor gerado na soldadura. Este parâmetro não tem influência na resistência da soldadura para tempos superiores a 5 seg (Zhang, Z. *et al.*, 2011).

A geometria da ferramenta é o aspeto que maior influência tem na resistência da soldadura (Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. 2005). Está diretamente relacionada com o calor gerado e com o fluxo de material durante o processo de soldadura. A ferramenta é composta por dois elementos, o pino e o *shoulder* (base da ferramenta). Este último é o maior responsável pela geração de calor na soldadura, e tem o papel de confinar o material base na

zona de soldadura. Por outro lado, o pino está incumbido de realizar a mistura do material na soldadura e é, também, responsável por uma pequena parte do calor gerado durante este processo. Estes dois elementos, pino e *shoulder*, podem apresentar várias dimensões e geometrias, tendo influência direta na resistência da soldadura. Nas Figuras 2.11 e 2.12 estão ilustradas algumas geometrias que estes elementos podem apresentar.

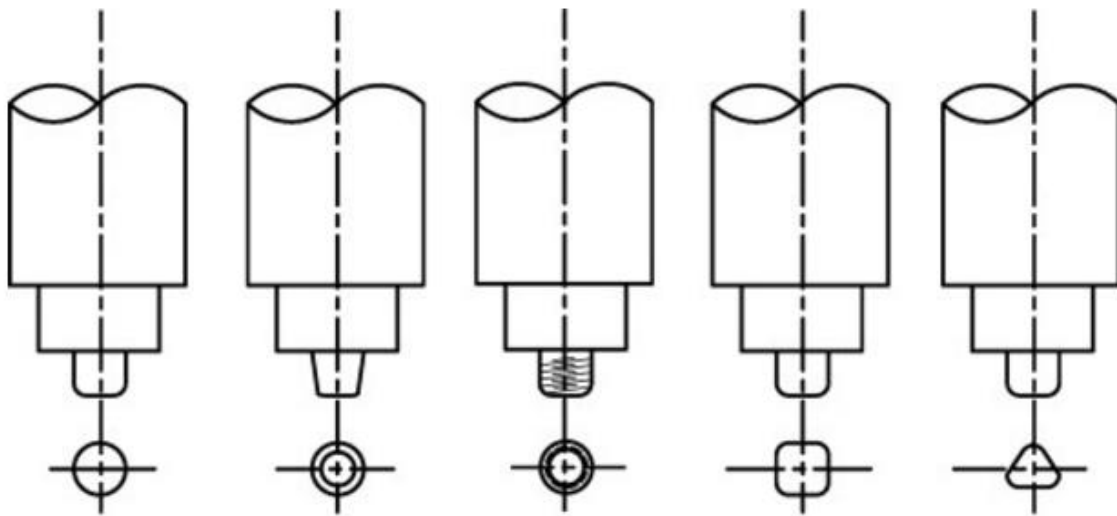


Figura 2.11. Algumas geometrias do pino (Elangovan, K., & Balasubramanian, V. 2008).

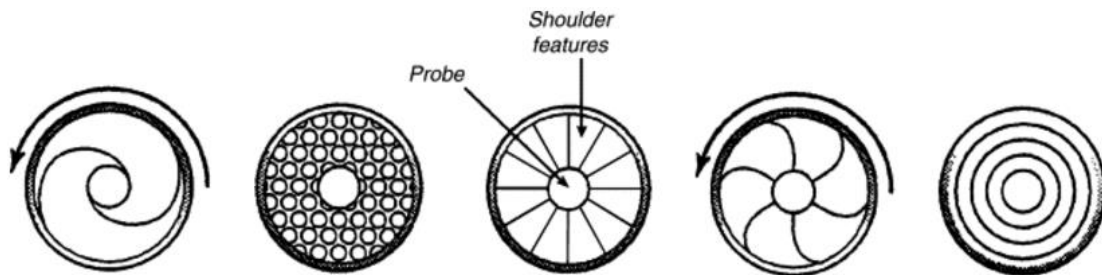


Figura 2.12. Geometria do shoulder (Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. 2005).

2.3.2.3. Defeito de *hooking* na soldadura por *FSSW*

A soldadura por *FSSW*, quando realizada em juntas sobrepostas, cria, tipicamente, um defeito chamado *hooking*. Este defeito consiste na região deformada entre as duas chapas que não está ligada, ou está apenas parcialmente ligada, na zona de soldadura. Na Figura 2.13 encontra-se exemplificado o defeito do *hooking*. (Li, W., et al., 2014)

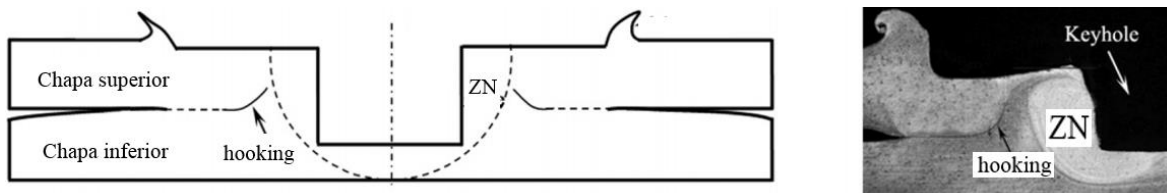


Figura 2.13. Representação do *hooking* numa soldadura por *FSSW* (Li, W., et al., 2014)

O *hooking* tem uma elevada influência na soldadura, baixando drasticamente a resistência mecânica da mesma. A geometria do *hooking* é maioritariamente definida pela ferramenta utilizada no processo de soldadura. O defeito é provocado pela entrada do pino da ferramenta na zona de soldadura, causando deformações que por sua vez levam à criação do *hooking* (Li, W., et al., 2014).

2.4. Ligações híbridas

A constante evolução da indústria trás a si associada necessidades que para serem superadas requerem a utilização de novos métodos. A busca pela diminuição de peso e aumento da resistência mecânica em produtos de engenharia são algumas dessas necessidades. Para a resolução deste tipo de problema foi pensada a associação de dois métodos de união na criação de uma ligação híbrida com o intuito de associar as qualidades de cada uma das ligações singulares e permitir a resolução de problemas para os quais as ligações separadas não tinham capacidade de resolver. As ligações híbridas consistem na associação de 2 métodos diferentes de união, correspondendo um dos métodos a uma ligação adesiva e o outro a uma ligação mecânica. Este tipo de união foi desenvolvido e utilizado, inicialmente pela antiga União Soviética, no fabrico de aviões do modelo NA-24. Os tipos de ligações híbridas mais comuns são as ligações: soldadas-coladas, aparafusadas-coladas e rebitadas-coladas. (Darwish, S. M. H., & Ghanya, A. 2000). O presente estudo foca-se nas ligações soldadas-coladas.

2.4.1. Descrição do processo e parâmetros a ter em conta na realização das juntas híbridas

De acordo com o referido, neste estudo vai ser concebida e avaliada uma ligação híbrida do tipo soldada-colada. Assim, a revisão bibliográfica vai-se debruçar mais sobre este tipo de ligação.

As ligações híbridas soldadas-coladas podem ser realizadas segundo duas metodologias. A primeira, denominada de *Flow in*, consiste na realização da soldadura e posterior adição de adesivo na junta, fazendo com que este se escoe por capilaridade e preencha espaços de junta. Este método é limitativo, pois, para a sua realização é estritamente necessária a utilização de um adesivo com baixa viscosidade. O outro método é mais evoluído e compreende a colagem da junta em primeiro e, posteriormente, a realização da soldadura. Este segundo método é denominado de *weld-through*, e é o método mais utilizado atualmente, permitindo a utilização de um adesivo com maiores viscosidades do que o método anterior (Darwish, S. M. H., & Ghanya, A. 2000). O primeiro método enumerado, *Flow in*, apresenta vantagens relativamente ao método *weld-through*, essas vantagens são a criação de uma melhor soldadura e o facto de ser muito mais fácil e barato de realizar comparativamente ao segundo. (Darwish, S. M. H., & Ghanya, A. 2000). No entanto, a limitação que o método *Flow in* impõe relativamente ao tipo de adesivo que pode ser utilizado na sua realização, torna este método menos interessante do ponto de vista industrial do que o *weld-through*, portanto, neste estudo foi escolhido o método *weld-through* para a realização da ligação híbrida.

Na Figura 2.14, encontram-se esquematizados os dois métodos anteriormente descritos.

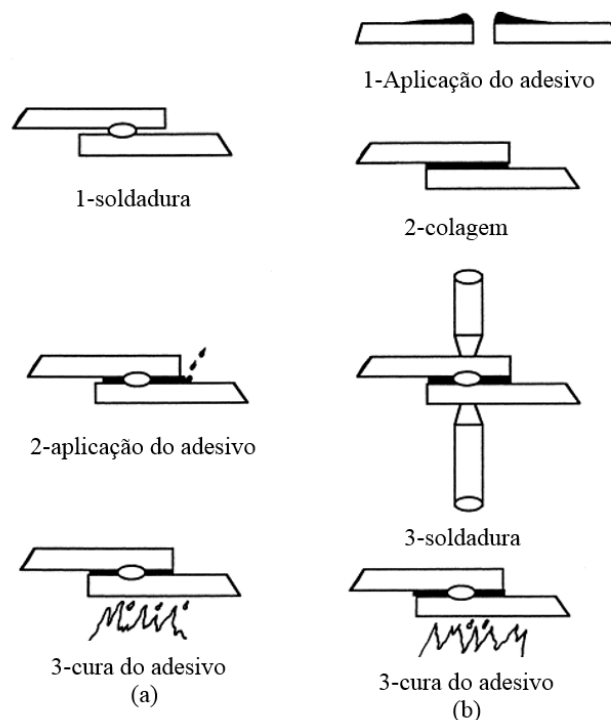


Figura 2.14. Esquemática da realização de juntas híbridas soldadas-coladas pelos métodos: a) *Flow in*; b) *weld-through* (Darwish, S. M. H., & Ghanya, A. 2000).

O método *weld-through* pode ser realizado de duas maneiras distintas. A diferença entre as duas maneiras de realização consiste no momento em que a cura do adesivo é efetuada. Numa das alternativas, a cura do adesivo é efetuada antes de realizada a soldadura (Chowdhury, S. H. *et al.*, 2013). Na outra, a cura é efetuada depois de realizada a soldadura (Braga, D. F., *et al.*, 2016; de Almeida, F. J. S., *et al.*, 2016). Ambas as metodologias demonstraram melhorias da resistência a esforços estáticos e a esforços de fadiga, comparativamente às juntas simplesmente soldadas e coladas (para a soldadura realizada por *FSSW*) (Chowdhury, S. H. *et al.*, 2013; Braga, D. F., *et al.*, 2016). Na realização de uma ligação híbrida com a soldadura realizada por resistência por pontos, a soldadura tem de ser efetuada antes da cura do adesivo estar completa, durante o seu tempo de trabalho, isto porque, o adesivo de pois de curar apresenta uma elevada resistividade elétrica, dificultando a realização da soldadura (Santos, I. O., *et al.*, 2004). A segunda metodologia, torna o processo de criação de juntas híbridas mais fácil e rentável, uma vez que não é necessário fixar os elementos que se pretendem unir durante a cura do adesivo, visto que a

soldadura realiza esse trabalho (Campilho, R. D. S. G., *et al.*, 2012). Para este caso, em que a soldadura é efetuada antes a cura do adesivo, a viscosidade do adesivo utilizado tem grande influência na qualidade da junta híbrida realizada. Um adesivo com elevada viscosidade não permite aos vapores do adesivo, criados pelas elevadas temperaturas da soldadura, escaparem, o que demonstra ser prejudicial para a ligação (Tao, W., *et al.*, 2014). Outro parâmetro com influência na resistência mecânica da junta híbrida é a ductilidade do adesivo utilizado na realização da ligação. As maiores ductilidades do adesivo estão associados os maiores valores de resistência mecânica (de Almeida, F. J. S., *et al.*, 2016).

As principais vantagens apresentadas pelas ligações híbridas relativamente aos outros tipos de ligações são (S. M. H., & Ghanya, A., 2000; Chang, B. *et al.*, 2001; Braga, D. F. *et al.*, 2016; Darwish,):

- Maior resistência à fadiga;
- Maior resistência a esforços estáticos;
- Maior capacidade de absorção de choques;
- Maior rigidez;
- Melhor resistência à corrosão.

2.4.2. Tensões de corte verificadas pelas ligações híbridas numa junta sobreposta

A associação das ligações soldada e colada faz com que as tensões se distribuam de forma mais uniforme ao longo da junta, relativamente à união soldada e colada. A união soldada apresenta concentrações de tensão na zona de soldadura, já a ligação adesiva apresenta concentração de tensões nas extremidades da junta sobreposta. (da Silva, L. F. *et al.*, 2011). Na Figura 2.15, encontram-se representadas as distribuições de tensões de corte sofridas pelas ligações numa configuração de junta sobreposta. Percebe-se que as tensões de corte apresentadas pela ligação híbrida são significativamente inferiores àquelas sentidas pela ligação soldada. Esta distribuição uniforme das tensões ao longo da junta, teoricamente, leva ao aumento da resistência mecânica da ligação.

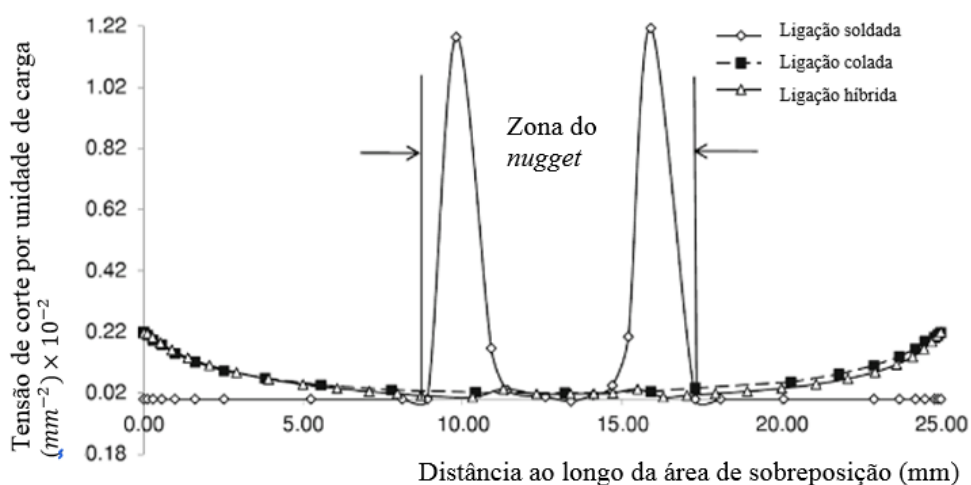


Figura 2.15. Tensões de corte ao longo da junta sobreposta das ligações coladas, soldadas e híbridas. (da Silva, L. F. *et al.*, 2011).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo tem o objetivo de apresentar detalhadamente todo o procedimento experimental utilizado ao longo deste trabalho.

Este estudo baseou-se na conceção, fabrico e posterior análise de três tipos de juntas sobrepostas: coladas; soldadas por *FSSW* e híbridas (coladas e soldadas).

Para se proceder à análise das juntas avaliou-se a microestrutura, microdureza, deformações locais e realizaram-se ensaios de tração/corte.

3.1. Materiais

Os materiais utilizados foram placas de liga de alumínio 2017 com tratamento térmico T4. Como adesivo foi utilizada uma resina epóxi constituída por Araldite Aw 106 e catalisador *Hardner* HV 963 U BD. Para a realização das soldaduras por *FSSW* foram utilizadas duas ferramentas distintas, as quais serão descritas no ponto 3.1.3.

3.1.1. Liga de alumínio 2017-T4

A liga de alumínio, AA2017-T4, pertence à série 2xxx. As ligas desta série têm como principal elemento de adição o cobre. O tratamento T4 corresponde a um tratamento térmico seguido de envelhecimento natural até uma condição estável.

Foram utilizadas placas de liga de alumínio 2017-T4 com as dimensões de 150x100x3 [mm] para criar os provetes.

O alumínio é um metal vastamente utilizado em aplicações de engenharia devido às suas propriedades que o distingue dos outros materiais. As suas principais características são a baixa densidade, elevada resistência à corrosão, elevada capacidade de enformação, elevada condutividade térmica e boa resistência mecânica em função do peso.

A liga de alumínio 2017 é uma liga tratável termicamente, cuja composição química está indicada na tabela 3.1.

Tabela 3.1. Composição química da liga de alumínio 2017-T4 (<http://www.broncesval.com/pt/aluminio-3/192-liga-de-aluminio-cobre-2017>)

Elemento	% em peso
Al	91,4 – 95,5
Si	0,20 – 0,80
Fe	Max 0,70
Cu	3,50 – 4,50
Mn	0,40 – 1,00
Mg	0,40 – 1,00
Cr	Max 0,10
Zn	Max 0,25
Ti	Max 0,25
Outras	Max 0,15

3.1.2 Adesivo Araldite Aw 106/ Hardner HV 963 U BD

As propriedades do adesivo utilizado no processo de colagem encontram-se especificadas no ANEXO A.

Tal como se pode constatar nas especificações do adesivo disponibilizadas no ANEXO A, cura do adesivo pode ser efetuada à temperatura ambiente ou recorrendo a uma estufa. Neste estudo, foram utilizados os dois métodos no processo de cura do adesivo. Num dos casos a cura foi executada numa estufa a uma temperatura de 150°C por um período de 20 min, já no outro, a cura ocorreu à temperatura ambiente por um período de 2 semanas, aproximadamente.

3.1.3 Ferramentas

Foram utilizadas duas ferramentas distintas, conforme a Figura 3.1, feitas de aço rápido, temperado e revenido, com dureza na ordem de 50 HRC. As suas dimensões e geometria encontram-se nos Apêndices A e B, correspondendo o primeiro à ferramenta A e o segundo à ferramenta B, respetivamente. A principal diferença entre as duas ferramentas

consiste na dimensão do pino de soldadura, 3 mm de comprimento na ferramenta A e 5 mm na B, tendo-se por isso optado pela utilização de ambas as ferramentas.

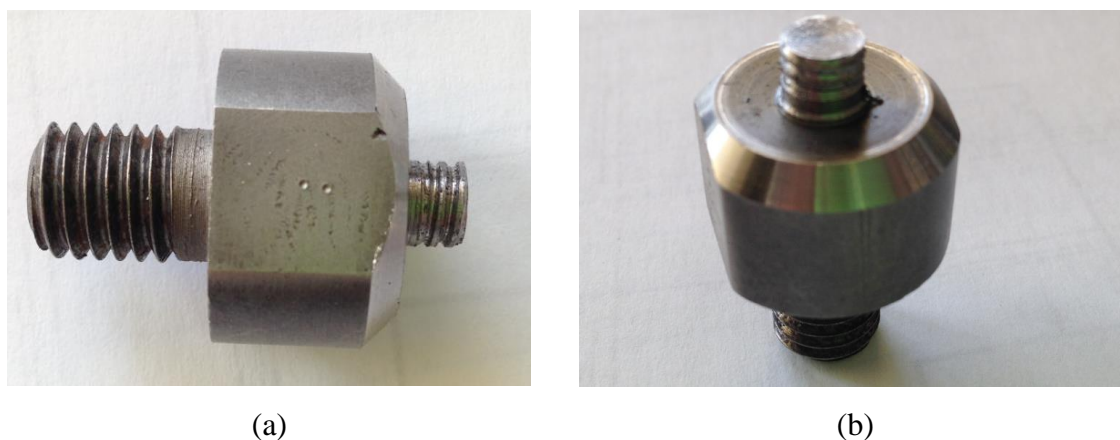


Figura 3.1. (a) Ferramenta A; (b) Ferramenta B.

3.2. Preparação dos provetes colados

Para a realização do estudo foram analisadas 7 séries de provetes, 1 série de ligação colada, 3 unidas por soldadura e as restantes 3 ligadas por uma ligação híbrida.

Para a realização da série simplesmente colada usaram-se placas de AA2017-T4, previamente maquinadas às dimensões de 100x25x3 [mm], retiradas transversalmente à direção de laminagem.

A preparação dos aderentes para o processo de colagem foi efetuada procedendo-se à desoxidação da superfície das placas, através da limpeza da mesma com uma lixa de água de 320 mesh. Posteriormente, a superfície foi limpa com uma solução de álcool etílico por forma a retirar qualquer sujidade ou gordura que ainda pudesse conter.

A preparação do adesivo consistiu em juntar Araldite Aw 106 e Hardner HV 963 U BD numa proporção de 10/8 em peso dos dois constituintes, respetivamente, e fazer a sua mistura por cerca de 10 min. O adesivo foi de seguida aplicado sobre a superfície dos aderentes e alisado de forma a evitar a existência de bolhas de ar na interface adesivo/aderente, as quais poderiam induzir uma diminuição da resistência mecânica da ligação. A dimensão de sobreposição de junta de 25 mm foi garantida recorrendo a um “gabarit” onde foram colocados os provetes durante o tempo de cura. O aparato utilizado para a colagem dos provetes encontra-se representado na Figura 3.2. A cura dos provetes foi feita numa estufa *Digitheat* do fabricante *PJ selecta*, à temperatura de 150°, por um período de 20

min. A série colada vai ao longo do estudo, ser designada de “C-“, seguindo-se o numero referente a cada provete desta série.

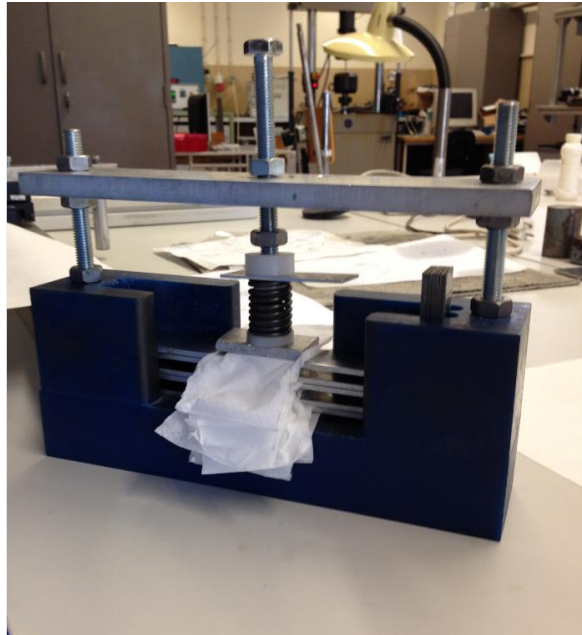


Figura 3.2. Provetes posicionados no “Gabarit”, de forma a garantirem a dimensão de sobreposição de 25mm.

3.3. Preparação dos provetes soldados

Como foi referido no ponto anterior, foram realizadas 3 séries de provetes ligadas apenas por *FSSW*. As soldaduras foram efetuadas na máquina *Cincinnati Milacron 207MK*. Para a obtenção destes provetes fizeram-se variar alguns dos parâmetros de soldadura, com intuito de verificar para quais as propriedades mecânicas da ligação apresentam melhores propriedades e, concomitantemente, para identificar quais os parâmetros a serem usados na junta soldada na realização dos provetes híbridos. Os parâmetros que se fizeram variar foram: a ferramenta utilizada, a velocidade de rotação e a penetração da ferramenta. As tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 apresentam os parâmetros de soldadura utilizados. De modo a facilitar a identificação das séries e dos provetes, foi atribuída a letra S às séries soldadas, seguindo-se a velocidade de rotação e ferramenta utilizada no fabrico de cada série e por último o numero que especifica o provete.

Tabela 3.2. Parâmetros de soldadura utilizados na realização dos provetes soldados da série S870A.

	Velocidade de rotação [rpm]	Tempo de soldadura [s]	Ferramenta	Penetração [mm]
S870A-1	870	5	A	3,1
S870A-2	870	5	A	3,2
S870A-3	870	5	A	3,3
S870A-4	870	5	A	3,4
S870A-5	870	5	A	3,5

Tabela 3.3. Parâmetros de soldadura utilizados na realização dos provetes soldados da série S870B.

	Velocidade de rotação [rpm]	Tempo de soldadura [s]	Ferramenta	Penetração [mm]
S870B-1 S870B-2	870	5	B	5,2
S870B-3 S870B-4 S870B-5	870	5	B	5,1

Tabela 3.4. Parâmetros de soldadura utilizados na realização dos provetes soldados da S500B.

	Velocidade de rotação [rpm]	Tempo de soldadura [s]	Ferramenta	Penetração [mm]
S500B-1	500	5	B	5,1
S500B-2 S500B-3 S500B-4 S500B-5	500	5	B	5,0

Para a realização dos provetes soldados por *FSSW* usaram-se placas com as dimensões de 100x150x3 [mm], retiradas transversalmente à direção de laminagem. A seguir foram removidos os óxidos com lixa e limpas com álcool. Foram depois colocadas em posição de soldadura, com uma dimensão de 25 mm de sobreposição, pretendendo assim conceber a junta sobreposta. Estas placas foram soldadas com os parâmetros anteriormente indicados. Na Figura 3.3 encontra-se representado o processo de soldadura das placas de AA2017. Após soldadura, procedeu-se ao corte das placas de 150 mm de largura em provetes com cerca de 30 mm de largura, recorrendo a uma serra de corte por fita, sendo que, mais tarde, estes provetes foram maquinados para a sua dimensão final, de 25 mm de largura.



Figura 3.3. Realização da soldadura das placas de AA2017 com as dimensões 150x100x3 [mm].

3.4. Preparação dos provetes híbridos

Na realização deste tipo de ligação foram utilizadas duas metodologias distintas; realizaram-se 3 séries seguindo o procedimento de cada uma das metodologias, perfazendo, esta ligação, um total de 6 séries. Uma das metodologias utilizadas consistiu na realização da ligação mediante a soldadura somente depois de realizada a cura do adesivo (Chowdhury, S. H., *et al.*, 2013). Já na segunda metodologia, a realização da soldadura por *FSSW* ocorreu antes de realizada a cura do adesivo. (Braga, D. F. *et al.*, 2016)

O adesivo e o procedimento utilizados para a elaboração destes provetes foram os mesmos usados na conceção dos provetes colados. Depois das juntas coladas adotaram-se duas metodologias diferentes para a ligação soldada, de acordo com o anteriormente referido. Na primeira, as placas foram levadas à estufa Digitheat por 20 mins, a 150°C, para curar o adesivo e, posteriormente, foi realizada a soldadura. Esta metodologia não se manifestou como sendo a mais adequada, pois, no processo de corte das placas de 150 mm de largura em provetes com cerca de 30 mm de largura, ocorreu a rotura recorrente da ligação.

Na segunda metodologia utilizada, as placas, depois de serem coladas, com uma dimensão de sobreposição de 25 mm, foram logo (no espaço de 10 min) soldadas, e só depois de soldadas é que foram curadas. A cura foi feita à temperatura ambiente por um tempo que rondou as 2 semanas.

Os parâmetros de soldadura utilizados na conceção das séries híbridas realizadas com sucesso encontram-se indicados nas Tabelas 3.5, 3.6 e 3.7. A identificação das séries correspondentes às séries híbridas foi efetuada atribuindo-se a estas a letra H, seguindo-se a velocidade de rotação e a ferramenta utilizada no fabrico das séries, e por último o número do provete de cada série.

Tabela 3.5. Parâmetros de soldadura utilizados na realização dos provetes híbridos da série H500B.

	Velocidade de rotação [rpm]	Tempo de soldadura [s]	Ferramenta	Penetração [mm]
H500B-1 H500B-2 H500B-3 H500B-4 H500B-5	500	5	B	5,2

Tabela 3.6. Parâmetros de soldadura utilizados na realização dos provetes híbridos da série H870B.

	Velocidade de rotação [rpm]	Tempo de soldadura [s]	Ferramenta	Penetração [mm]
H870B-1 H870B-2 H870B-3 H870B-4 H870B-5	870	5	B	5,2

Tabela 3.7. Parâmetros de soldadura utilizados na realização dos provetes híbridos da série H500A.

	Velocidade de rotação [rpm]	Tempo de soldadura [s]	Ferramenta	Penetração [mm]
H500A-1 H500A-2 H500A-3 H500A-4 H500A-5	500	5	A	3,2

Depois da cura estar completa cortaram-se as placas em provetes com largura de aproximadamente 30 mm, na serra de fita e, mais tarde, maquinaram-se para a sua dimensão final de 25 mm de largura.

3.5. Metalografia

Antes de realizar a análise metalográfica das soldaduras foi necessário preparar as amostras. Para a sua preparação começou por se retirar um provete de cada uma das séries e seccionar a sua soldadura numa serra de fita. Os segmentos resultantes do seccionamento das soldaduras foram, então, colocados em moldes poliméricos, com o plano de soldadura voltado para baixo. De seguida foi adicionada uma resina epóxi dentro do molde com o intuito de imobilizar os segmentos; envolvendo-os em resina, facilitando, assim, o manuseamento e análise dos mesmos depois de esta endurecer. Depois da resina epóxi curar, as amostras foram retiradas dos moldes e lixadas com lixas de água gradualmente mais finas, partindo de uma lixa com granulometria P600 até P2500. Posteriormente procedeu-se ao polimento das amostras com pasta de diamante, com granulometria de 3 μm , por forma a deixar a superfície lisa e isenta de riscos. Finalmente, fez-se um ataque químico às amostras com reagente *Keller's* (50 mL H_2O , 1 mL HNO_3 , 2 mL HCl , 2 mL HF) durante 10 seg.

Após efetuado o ataque químico, e realçada a microestrutura das amostras, foi realizada a análise da micrografia com recurso a um microscópio ótico *Leica DM 4000 M LED*, tendo a ele acoplado uma máquina fotográfica *Canon Powershot G5*, que fez a captura das micrografias com várias ampliações.

3.6. Ensaios de microdureza

Os ensaios de microdureza foram realizados no equipamento *Struers Duramin 1*. As amostras que foram utilizadas na análise metalográfica foram as mesmas para a realização dos ensaios de dureza. Foram utilizados dois tipos de intervalos entre indentações. Na zona mais próxima da soldadura, o intervalo entre indentações foi de 500 μm , já na zona mais afastada, foi utilizado um intervalo de 1 mm. A carga utilizada em cada uma das indentações foi de 1,961 N, por um período de 15 seg. Em cada amostra foram realizadas, aproximadamente, 80 leituras de microdureza.

3.7. Ensaios de tração/corte

Os ensaios de tração/corte foram executados em todos os provetes, tendo como principal objetivo avaliar a resistência mecânica dos vários tipos de ligação e verificar se existiu alguma vantagem, a nível mecânico, na realização da ligação híbrida quando comparada com os outros dois tipos de ligação em estudo.

A realização dos ensaios de tração/corte foi efetuada no equipamento universal de tração *Instron 4206*. A preparação dos provetes passou por unir às extremidades destes, placas de alumínio com as dimensões de 25x25x3 [mm], denominadas de *tabs*, tendo como objetivo fazer com que o esforço de tração se encontrasse no plano da junta sobreposta, minimizando, portanto, a probabilidade de aparecimento de qualquer tipo de momento fletor. De seguida, selecionou-se um dos provetes em análise e amarraram-se as extremidades do mesmo à máquina de tração. Posteriormente colocou-se no provete um extensómetro mecânico, de 50 mm de comprimento, com o propósito de medir as deformações globais sofridas pela junta ao longo do ensaio.

As deformações locais foram calculadas recorrendo a um equipamento denominado ARAMIS do fabricante GOM. Este equipamento faz uma recolha de imagens ao longo do ensaio de tração/corte e, com recurso ao método de correlação de imagem digital (DIC), compara as posições iniciais e finais de pontos na superfície dos provetes, avaliando desta forma os deslocamentos locais sofridos pelos provetes ao longo do ensaio. De forma a analisar as deformações locais sofridas pelos provetes ao longo do ensaio de tração/corte, foi necessário pintar de branco a superfície dos provetes e, depois de seca a tinta branca, pulverizou-se a mesma com um spray negro, criando, assim, pontos na superfície passíveis de serem reconhecidos pelo equipamento ARAMIS. A análise das imagens capturadas ao longo do ensaio de tração/corte, pelo ARAMIS foi efetuada recorrendo ao software *GOM Correlate V8 SRI*.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No presente capítulo faz-se a apresentação dos resultados, sendo os mesmos discutidos com base em artigos presentes na literatura.

4.1. Morfologia dos provetes

Neste subcapítulo apresentam-se imagens dos provetes utilizados ao longo do estudo e faz-se a sua análise. O aspeto visual das ligações mecânicas efetuadas é relevante, na medida em que permite, de um modo geral, avaliar a qualidade das ligações.

Ao longo deste trabalho foram, em conformidade com o anteriormente referido, realizados três tipos de ligação, a colada, a soldada e a híbrida. Tendo em conta o descrito no capítulo anterior, a ligação híbrida foi aquela que maior problema durante a sua conceção levantou, chegando mesmo a ocorrer a rotura de alguns dos provetes ligados por este modo de união. Foram necessárias 2 tentativas para criar, com sucesso, os provetes unidos pela ligação híbrida. Na primeira tentativa, onde a cura do adesivo foi efetuada antes da realização da soldadura, o resultado obtido foi negativo, correspondendo as séries realizadas por este método àquelas onde ocorreu a rotura da ligação. Apenas na segunda tentativa, onde a cura do adesivo foi efetuada após a realização da soldadura, a ligação foi executada com sucesso. Na Figura 4.1 encontra-se representada uma das séries híbridas correspondente à primeira tentativa de conceção deste tipo de união. Esta figura representa o que se passou, não só com a série apresentada, mas com todas as séries realizadas pelo primeiro método de produção das juntas sobrepostas híbridas.

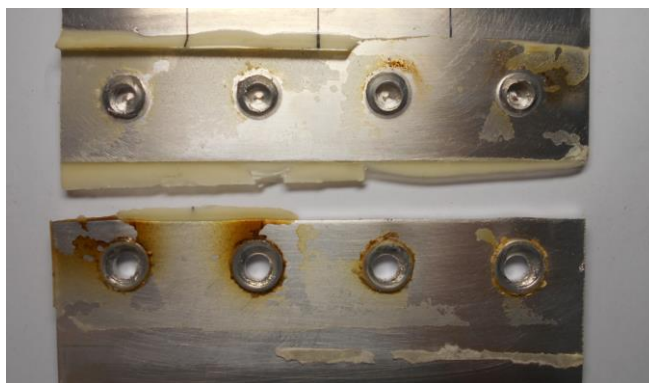


Figura 4.1. Série híbrida concebida pela primeira metodologia, após a rotura.

Verifica-se, através da observação da Figura 4.1, que as temperaturas geradas durante o processo de soldadura por *FSSW* foram demasiado elevadas para o adesivo, apresentando este, claros sinais de estar queimado nas zonas mais próximas das soldaduras. Outro problema levantado pela realização da soldadura nas séries correspondentes à primeira tentativa de conceção foram os esforços criados, que originaram deformações das chapas e consequentemente criação de tensões no adesivo já curado, que levaram à rotura de parte da ligação adesiva durante o processo de soldadura, tendo-se verificado a falha total da ligação no processo de corte das placas em provetes.

Os provetes correspondentes à ligação híbrida efetuada pela segunda metodologia, assim como os provetes soldados e colados apresentaram, a nível visual, bons resultados. Nas seguintes Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 encontram-se as imagens relativas a alguns desses provetes.

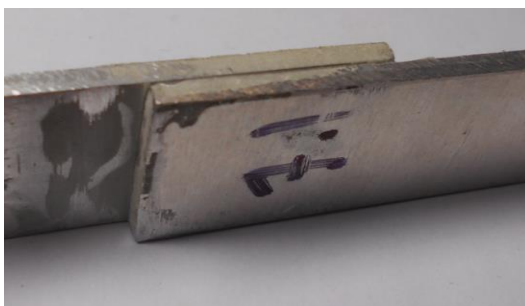


Figura 4.2. Provede colado C1

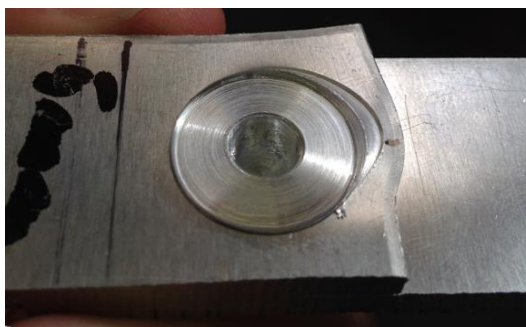


Figura 4.3. Provete soldado S500B-1

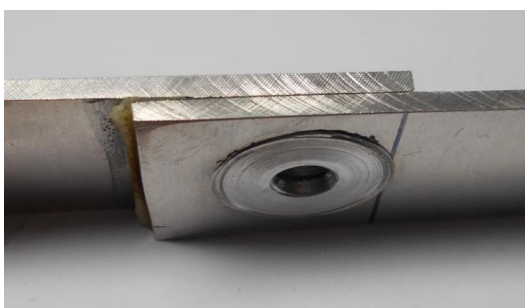


Figura 4.4. Provete híbrido H500B-1

4.1.1. Macrografias das secções de soldadura

Pretende-se, nesta secção, apresentar as macrografias do perfil de soldadura de cada uma das séries analisadas, tendo como objetivo compará-las e relacionar os parâmetros de soldadura utilizados e a soldadura resultante.

Encontram-se apresentadas, nas Figuras 4.5 a 4.10, as macrografias referentes às uniões soldadas e híbridas realizadas no estudo. Não foram retiradas macrografias das ligações coladas, uma vez que estas não sofreram nenhuma deformações mecânicas durante a sua produção que tornassem a sua análise relevante para o estudo.

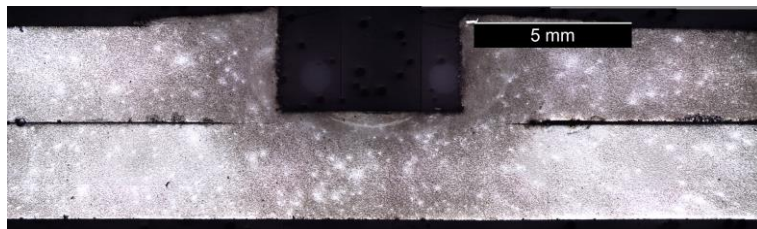


Figura 4.5. Macrografia do perfil de soldadura do provete S870A-1, realizado com recurso à ferramenta A com pino de 3 mm e velocidade de rotação de 870 rpm.



Figura 4.6. Macrografia do perfil de soldadura do provete S870B-1, realizado com recurso à ferramenta B com pino de 5 mm e velocidade de rotação de 870 rpm.

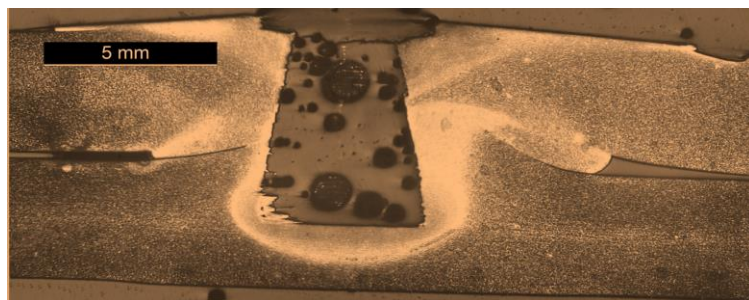


Figura 4.7. Macrografia do perfil de soldadura do provete S500B-1, realizado com recurso à ferramenta B com pino de 5 mm e velocidade de rotação de 500 rpm



Figura 4.8. Macrografia do perfil de soldadura do provete H500B-3, realizado com recurso à ferramenta B com pino de 5 mm e velocidade de rotação de 500 rpm



Figura 4.9. Macrografia do perfil de soldadura do provete H870B-1, realizado com recurso à ferramenta B com pino de 5 mm e velocidade de rotação de 870 rpm



Figura 4.10. Macrografia do perfil de soldadura do provete H870A-1, realizado com recurso à ferramenta A com pino de 3 mm e velocidade de rotação de 870 rpm

Verifica-se, desde logo, que as várias soldaduras são diferentes umas das outras, isto deve-se sobretudo ao facto de se ter feito variar os parâmetros de soldadura na realização das várias séries.

Observa-se que existe uma diferença entre as amostras simplesmente soldadas (Figuras 4.5, 4.6 e 4.7) e as amostras híbridas (Figura 4.8, 4.9 e 4.10). Essa diferença assenta no facto de, nas amostras híbridas, não existir união das chapas superior e inferior da junta sobreposta, verificando-se uma camada de adesivo a separar as duas. A inexistência de soldadura entre as chapas indica que a presença de adesivo, aquando o processo de soldadura por *FSSW*, criou uma barreira à mistura entre o material da chapa inferior e superior, traduzindo-se a falta de soldadura entre ambas as chapas numa diminuição da resistência mecânica da junta sobreposta, como se verá posteriormente no ponto 4.4.

A ferramenta utilizada na realização da soldadura demonstrou ser o parâmetro com maior influência na geometria do perfil de soldadura. As amostras soldadas com recurso à ferramenta B, Figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9, foram as que maior soldadura entre as chapas superior e inferior apresentaram, excetuando as séries híbridas, onde não houve ligação das duas chapas. Verifica-se, também, que esta, a ferramenta B, foi a que provocou as maiores

deformações mecânicas na junta, chegando o pino à chapa inferior e remexendo o seu material juntamente com o material da chapa superior. Denota-se a presença de *hooking*, nas soldaduras efetuadas com recurso à ferramenta B, tanto nas amostras soldadas como nas híbridas. Apesar de nas amostras híbridas não existir a ligação entre as chapas superior e inferior, a interface destas deforma, havendo, portanto, *hooking*. Já nas amostras fabricadas com recurso à ferramenta A, Figuras 4.5 e 4.10, é possível observar que não existiu deformação da interface das duas chapas, não se verificando *hooking* nestas.

A velocidade de rotação utilizada para a realização das soldaduras não demonstrou ter grande impacto na geometria do perfil de soldadura. Ainda assim, verifica-se que as amostras S870B-1 e H870B-1, Figuras 4.6 e 4.9, soldadas com uma velocidade de rotação de 870 rpm, apresentam maior deformação na zona de soldadura do que as amostras S500B-1 e H500B-3, Figuras 4.7 e 4.8, soldadas com uma velocidade de rotação de 500 rpm. Já no caso das amostras S870A-1 e H500A-1, Figuras 4.5 e 4.10, realizadas com velocidades de rotação de 870 rpm e 500 rpm respetivamente, não se identificam nenhuma diferença entre os perfis de soldadura, assumindo-se, portanto, que nestas séries a velocidade de rotação não teve nenhuma influência ao nível da geometria de soldadura.

4.2. Análise metalográfica

Ir-se-ão expor, neste subcapítulo, as micrografias referentes às diferentes zonas de soldadura das séries soldadas e híbridas.

4.2.1. Microestrutura do material base

Na Figura 4.11 apresenta-se a microestrutura relativa ao material base, AA2017-T4.

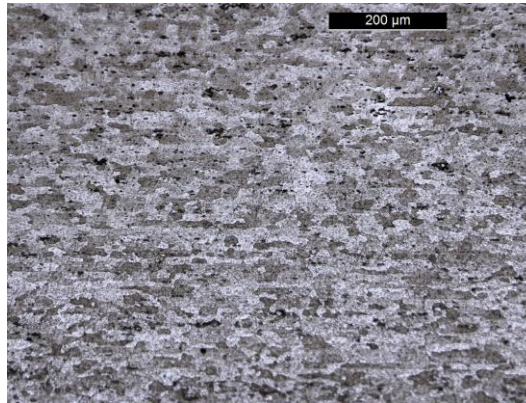


Figura 4.11. Microestrutura do material base.

A microestrutura do material base é consequência do processo de laminagem e tratamento térmico aos quais o material foi sujeito durante o fabrico das chapas.

4.2.2. Microestrutura da série soldada

A Figura 4.12 ilustra a macrografia do perfil de soldadura da amostra S870B.1 referente à série soldada. As micrografias das zonas assinaladas na Figura 4.12, estão expostas na Figura 4.13.

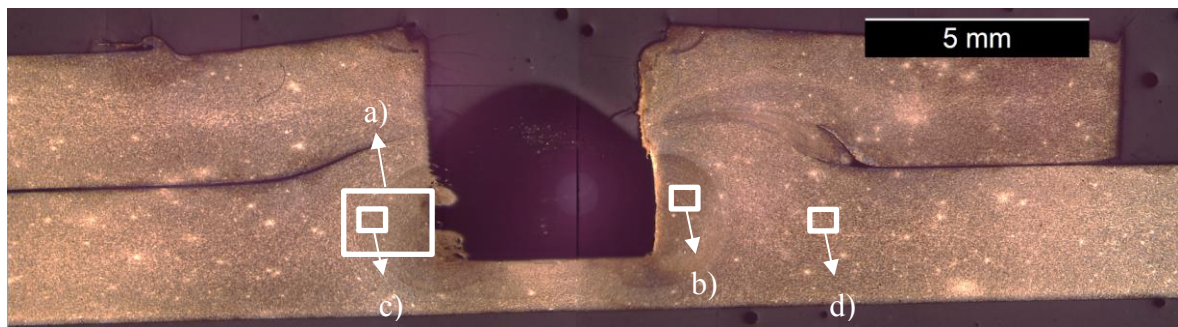


Figura 4.12. Macrografia do perfil de soldadura do provete S870B-1.

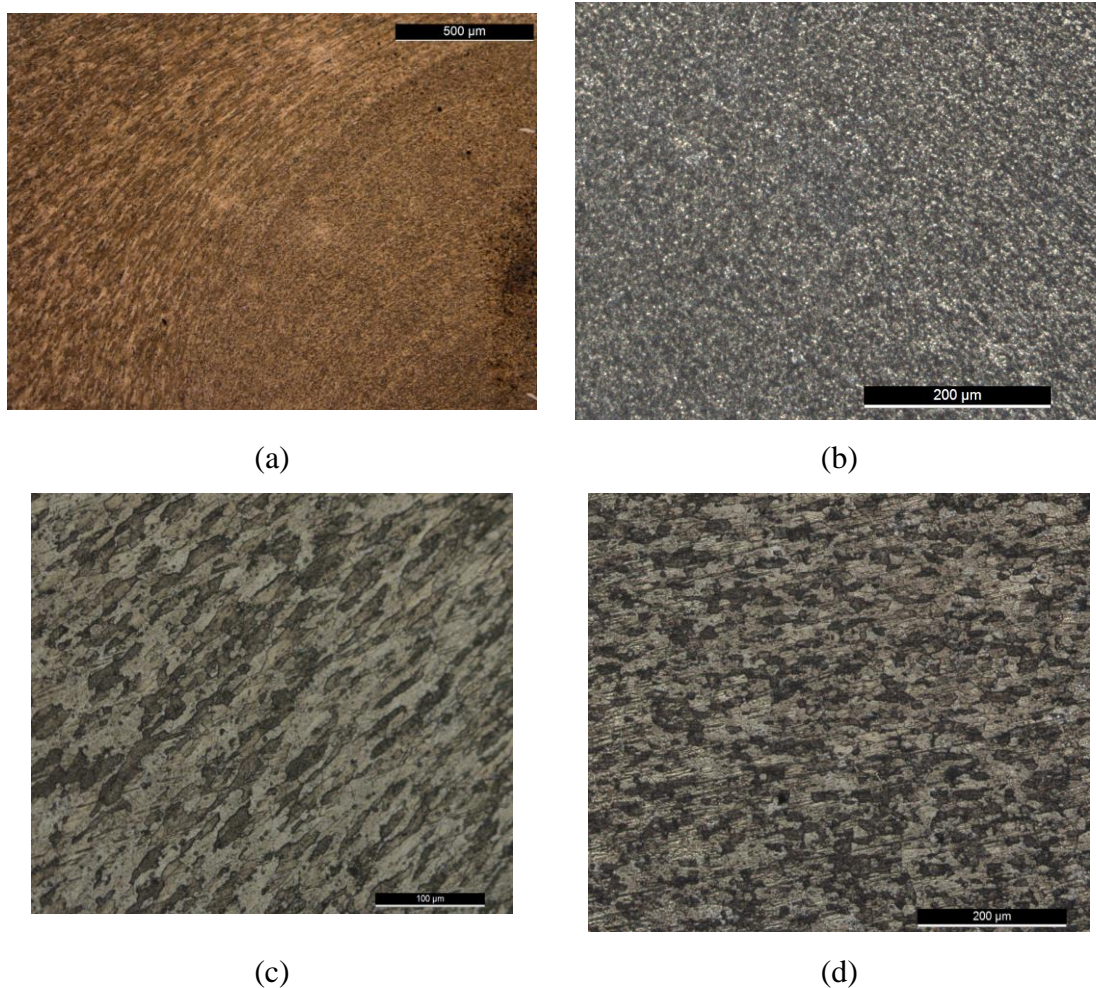


Figura 4.13. micrografias das zonas assinaladas- (a) zona da soldadura; (b) zona *nugget*; (c) zona termo-mecanicamente afetada; (d) Zona termicamente afetada

Verifica-se, na Figura 4.13 a), que o grão não é uniforme na região demonstrada, sendo mesmo possível observar três zona distintas da soldadura; a ZTA, a ZTMA e a ZN, aparecendo estas zonas na imagem, da esquerda para a direita, respetivamente. Percebe-se que o grão da ZTA apresenta maiores dimensões comparativamente ao das outras duas zonas. O grão desta zona é caracterizado pela influência, apenas, da temperatura, originando esta, um ligeiro crescimento de grão. Já as outras duas zonas, anteriormente referidas, ZTMA e ZN, são influenciadas pela temperatura e deformações mecânicas geradas durante o processo de soldadura. O que difere estas duas zonas, reside no facto de, na ZTMA, as deformações mecânicas não serem suficientemente elevadas ao ponto de originar a recristalização dinâmica, sendo, portanto, esta zona caracterizada pela existência de um grão

com um formato alongado, como se pode ver na Figura 4.13 c). Na ZN as condições de deformação e temperatura criadas pelo processo de soldadura são de tal maneira elevadas que originam recristalização dinâmica, levando à existência, nesta região, de um grão muito refinado e equiaxial, grão esse que pode ser observado na Figura 4.13 a), na parte à direita da imagem.

Na Figura 4.13 b), encontra-se representada a ZN com maior pormenor. É possível verificar, que o grão desta zona é bastante reduzido, comparativamente ao grão das outras zonas.

A ZTMA, encontra-se, em maior detalhe, na Figura 4.13 c). Atesta-se nesta zona, um grão bastante alongado, indicando a severa deformação sofrida por estes.

A Figura 4.13 d), apresenta a micrografia referente à ZTA. Percebe-se, pela imagem, que o grão desta zona não sofreu deformações mecânicas, mas teve influência da temperatura como se vai verificar nos resultados relativos à microdureza, apresentados no ponto 4.3.

4.2.3. Microestrutura da série híbrida

A Figura 4.14 apresenta a macrografia do perfil de soldadura do provete S500-3 referente à série híbrida. As zonas assinadas, encontram-se representadas em maior detalhe na Figura 4.15.

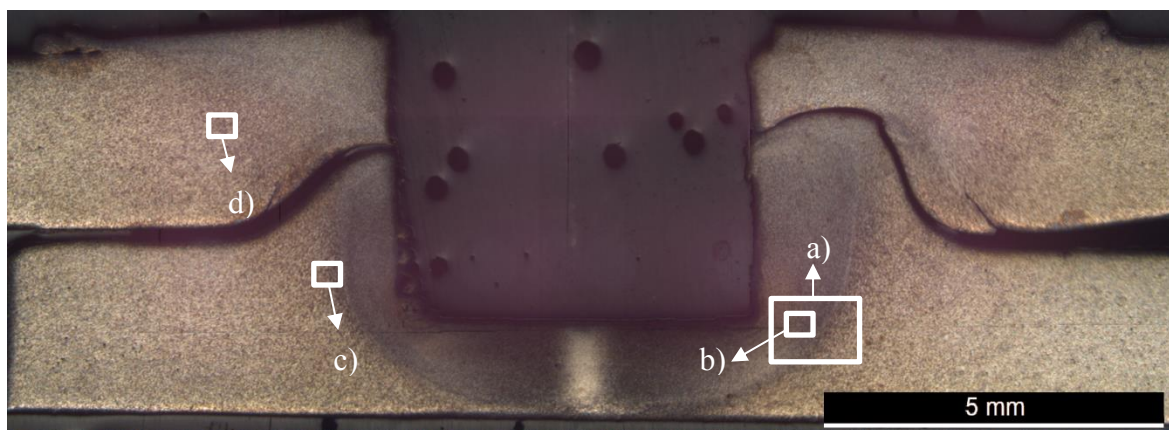


Figura 4.14. Macrografia do perfil de soldadura do provete S500B-3.

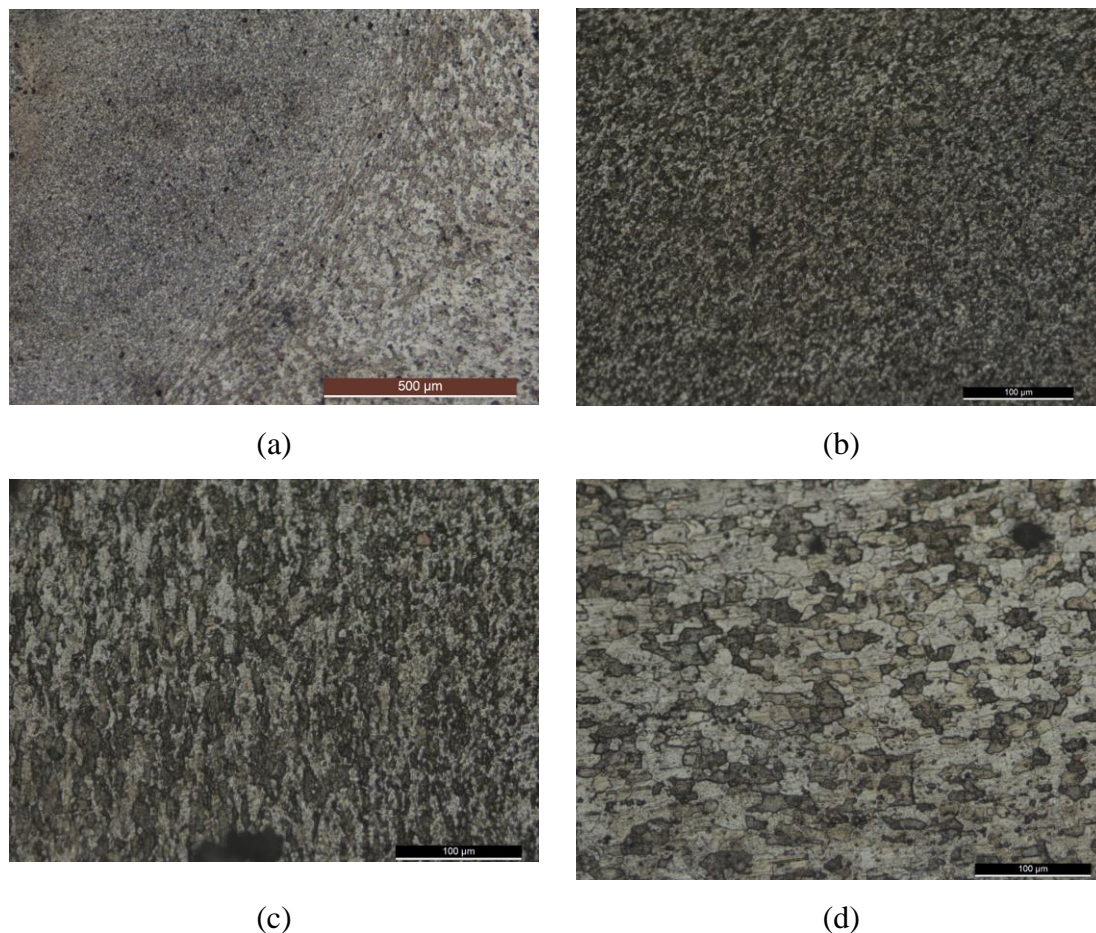


Figura 4.15. micrografias das zonas assinaladas

Percebe-se, desde logo, pela observação das macrografias de ambas as séries, que as deformações sofridas na série híbrida H500B, são menores, comparativamente à série soldada S870B. Pode-se confirmar isso através da observação da micrografia referente à Figura 4.15 a), onde é visível que a ZTMA desta série é muito inferior, em termos de área, à mesma zona correspondente à série soldada.

As micrografias b), c) e d) da Figura 4.15, apresentam com maior detalhe as ZN, ZTMA e ZTA, respetivamente. É possível observar nestas figuras que a microestrutura de cada uma delas é bastante semelhante às mesmas zonas da amostra S870B.1 da série soldada, apresentando a ZN um grão muito refinado, a ZTMA um grão alongado e a ZTA uma microestrutura idêntica à do material base.

4.3. Análise da Microdureza

Nesta secção serão apresentados os resultados obtidos na realização dos ensaios de microdureza relativos aos provetes soldados e híbridos. É importante referir que os provetes simplesmente colados não foram analisados ao nível da dureza, pois estes não sofreram nenhuma alteração substancial a nível térmico nem mecânico que pudesse provocar uma variação da dureza relativamente ao material base.

Os resultados obtidos encontram-se apresentados nas Figuras 4.16 a 4.23. Cada amostra foi analisada em duas zonas distintas, uma das zonas analisadas foi a placa superior e a outra foi a placa inferior da junta sobreposta. Encontra-se no APÊNDICE C a esquematização das zonas analisadas. Os resultados obtidos são a dureza em função da distância ao centro de soldadura.

A dureza típica da liga de alumínio 2017 com tratamento térmico T4, é de 118 $HV_{0,2}$, tal como se ilustra na Figura 4.16. Em todas as figuras de dureza subsequentes encontra-se marcada uma linha horizontal com esse valor, de modo a permitir comparar as durezas obtidas nos ensaios realizados com a dureza do material base.

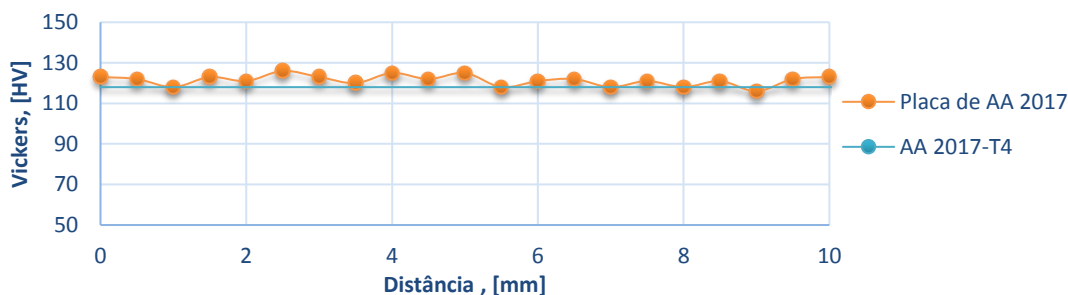


Figura 4.16. Perfil de dureza do material base.

Da observação de todas as figuras apresentadas, Figura 4.18 a 4.23, é possível, verificar que os valores de dureza variam em função da distância ao centro de soldadura, e que a variação não é simétrica para os dois lados do gráfico. Esta assimetria dos valores de dureza é visível, principalmente, nas placas superiores da junta sobreposta. Verifica-se que as durezas das placas superiores, à direita do centro de soldadura, partem de baixos valores

de dureza, cerca de $100 HV_{0,2}$, e apresentam a tendência de ir aumentando consoante se aproximam do centro de soldadura, enquanto que os valores à esquerda do centro de soldadura, partem de valores de dureza semelhantes aos valores do material base ($118 HV_{0,2}$), e tendem a descer, até que a certa altura, voltam a subir, novamente, para valores com a mesma ordem de grandeza do material base, na ZN. O facto de a junta ser uma junta sobreposta pode estar relacionado com a dissemelhança de valores enunciados anteriormente, isto porque, a placa superior da junta sobreposta foi soldada próximo da sua extremidade, ficando a mesma à direita da soldadura. O calor gerado durante o processo de soldadura foi dissipado mais facilmente pelo lado esquerdo da soldadura, pois a continuidade da placa deste lado permitiu a condução do calor. Do lado direito, não havendo placa para conduzir o calor produzido, este foi-se dissipando, de forma mais lenta, por convecção, havendo, portanto, uma acumulação de calor nesta região que, conseqüentemente, levou à dissolução e coalescência de precipitados, o que se traduziu numa queda de dureza. Na Figura 4.17 encontra-se esquematizada a dissipação de calor na placa superior da junta sobreposta durante o processo de soldadura por *FSSW*.

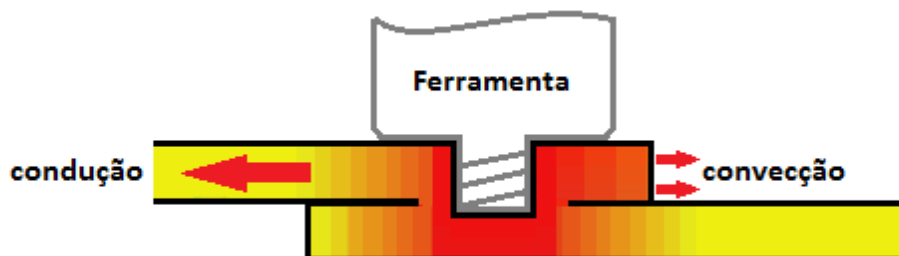


Figura 4.17. Esquematização da dissipação de calor na placa superior da junta sobreposta.

A ZTA apresenta baixos valores de dureza comparativamente com os valores de dureza do MB. Esta diminuição verifica-se em praticamente todos os resultados obtidos, à exceção das placas superiores da junta sobreposta à direita do centro de soldadura, pelas razões suprarreferidas, tal como se pode verificar nas Figuras 4.18 a 4.23. A temperatura, que nesta zona se faz sentir durante o processo de soldadura, faz com haja dissolução e

coalescência de precipitados, originando uma queda de dureza nesta região. A queda de durezas não é muito acentuada, pois, a liga de AA2017-T4 é uma liga tratável termicamente, e este tipo de liga não sofre grandes variações de dureza com o aumento da temperatura.

Nas Figuras 4.18 a 4.23 verifica-se que existe um aumento de durezas com o aproximar da zona de soldadura, ou seja, quando se passa da ZTA para a ZTMA, existe um ligeiro crescimento dos valores de dureza. Este aumento deve-se, sobretudo, às condições de deformação nesta zona existentes, que embora não sejam suficientemente elevadas para gerar a recristalização dinâmica, levam, ainda assim, a uma subida gradual dos valores de dureza, indicando que nesta zona começa a existir, em menores quantidades que na ZN, reprecipitação dos precipitados existentes na liga de AA2017-T4

As condições de deformação e temperatura, existentes na ZN, levam à existência de recristalização dinâmica, originando, não só um grão muito refinado e equiaxial, como também, a dissolução de precipitados e subsequente reprecipitação, sendo este último, o principal mecanismo no aumento da dureza neste tipo de liga. É possível observar que, em praticamente todas as figuras apresentadas, este aumento de dureza na ZN se fez sentir, sendo a única exceção, as durezas das placas inferiores dos provetes S870A-1 e H870A-1, correspondendo às figuras 4.18 e 4.23, respetivamente. Tal aconteceu, pois, nas chapas inferiores destes provetes a ferramenta utilizada na soldadura não promoveu deformações suficientes para gerar recristalização dinâmica.

Os valores de dureza das placas inferiores e superiores da junta não apresentam valores iguais. Consegue-se observar, nas Figuras 4.18 a 4.23, que às placas superiores estão associados os menores valores de dureza, sendo estas as que apresentam os valores mínimos de dureza em todos os resultados obtidos à exceção do provete S500B-1 referente à Figura 4.20. Verifica-se, também, que a placa inferior mantém valores de dureza semelhantes aos valores do MB até zonas mais próximas do centro de soldadura, demonstrando-se então, ser a zona menos afetada pela soldadura. Isto acontece, pois, a placa superior é a que está sujeita a maiores deformações e, sobretudo, a maiores temperaturas, já que o maior responsável pela geração de calor na soldadura é o *shoulder*, e a maior parte do calor gerado é consequência da fricção entre o *shoulder* e a placa superior. A temperatura na placa inferior é menor, e

como tal, a dissolução e coalescência de precipitados é menor, logo a dureza não varia tanto quanto a dureza da placa de cima onde se fazem sentir maiores temperaturas.

A velocidade de rotação demonstrou, ser um parâmetro com influência na dureza das amostras. Na realização dos provetes S870A-1, S870B-1, H870B-1 e H870A-1, foram utilizadas as maiores velocidades de rotação (870 rpm). Nos resultados de dureza referentes aos provetes S870B-1 e H870B-1, ilustrados nas Figuras 4.19 e 4.22, as durezas máximas na ZN são de 126 $HV_{0,2}$ e 133 $HV_{0,2}$, respetivamente, e as durezas registadas nos provetes S500B-1 e H500B-3, Figuras 4.20 e 4.21, realizadas com a mesma ferramenta, mas a uma velocidade de rotação de 500 rpm, em pontos identicamente afastados do centro de soldadura, apresentam os valores de 115 $HV_{0,2}$ e 122 $HV_{0,2}$. Dos resultados retira-se que o aumento da velocidade de rotação leva ao aumento da dureza nas zonas mais próximas da soldadura (*nugget*), indicando que existem para estas velocidades de rotação maiores índices de dissolução e subsequente reprecipitação.

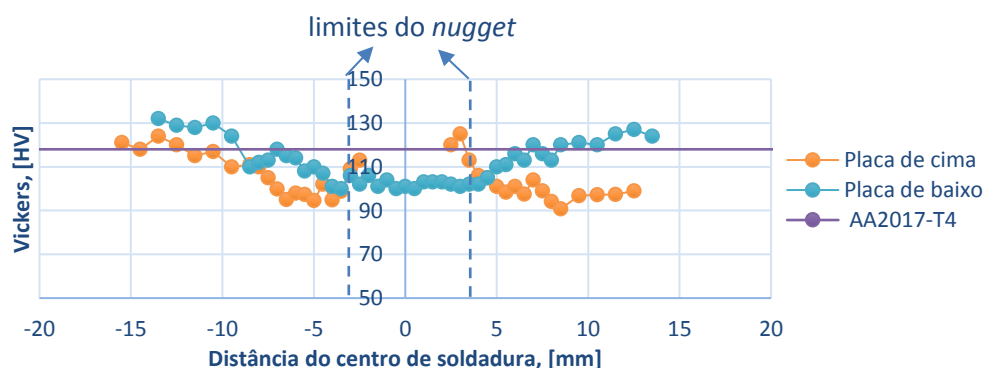


Figura 4.18. Perfil de dureza do provete S870A-1

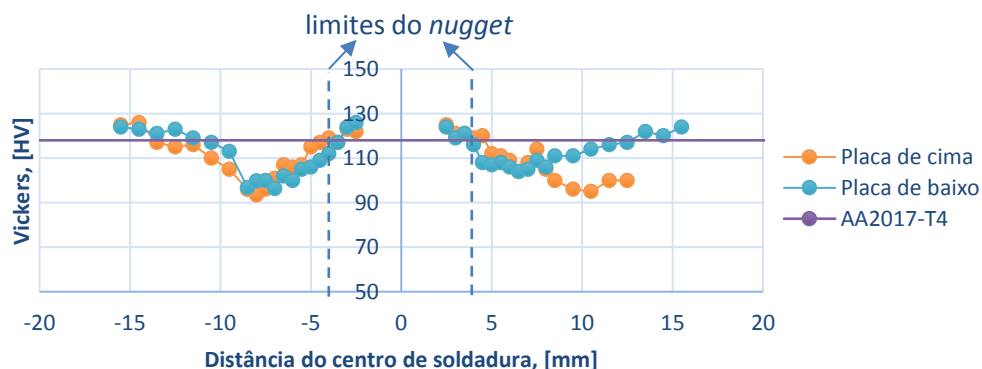


Figura 4.19. Perfil de dureza do provete S870B-1

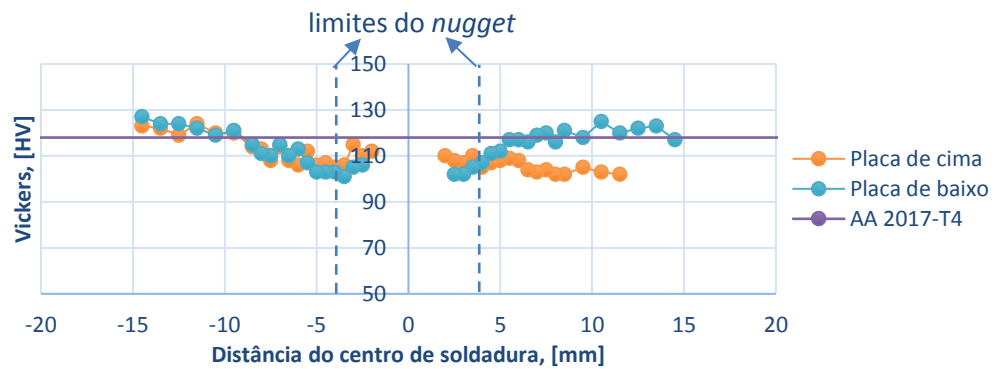


Figura 4.20. Perfil de dureza do provete S500B-1

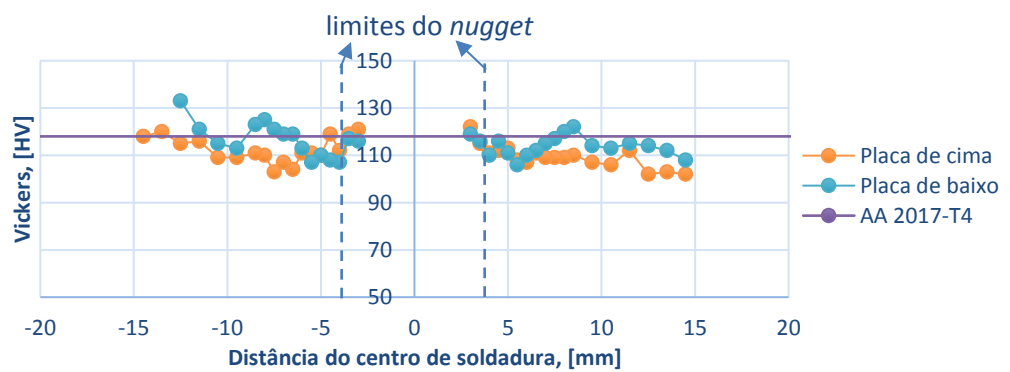


Figura 4.21. Perfil de dureza do provete H500B-3

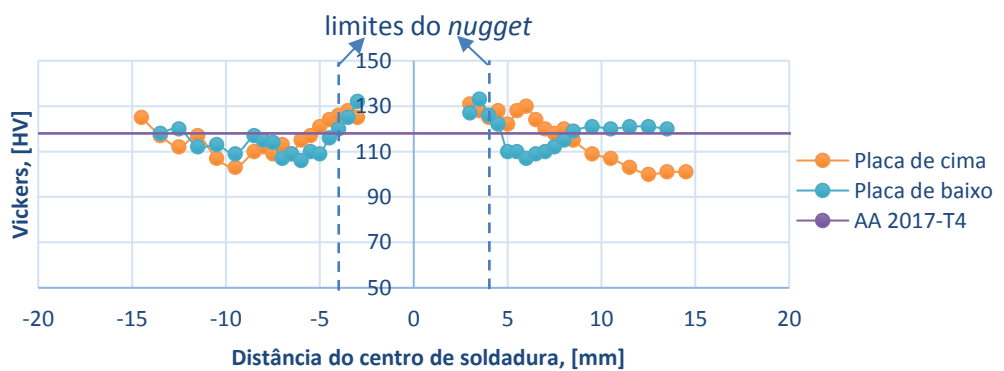


Figura 4.22. Perfil de dureza do provete H870B-1

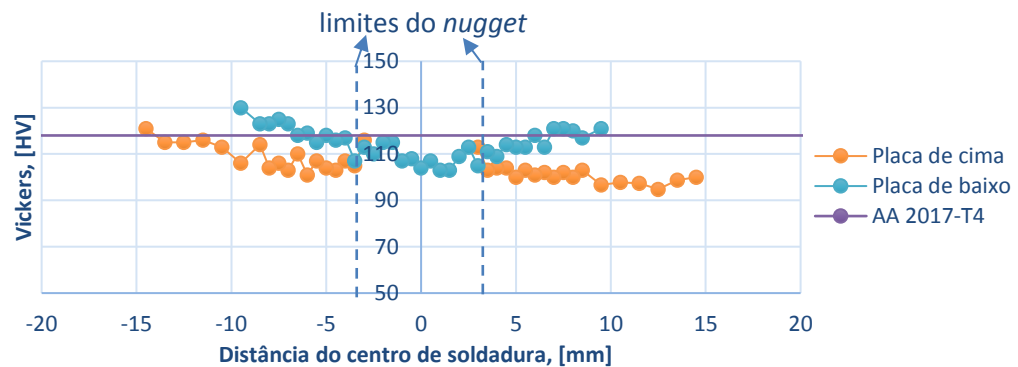


Figura 4.23. Perfil de dureza do provete H870A-1

4.4. Análise à resistência estática das ligações

Nesta secção são apresentados e analisados os dados obtidos na realização dos ensaios de tração. Como referido no capítulo 3, os ensaios foram realizados na máquina *Cincinnati Milacron 207MK*, com uma velocidade de avanço de travessão de 1 mm/min. Os resultados apresentados referem-se aos resultados da força suportada pelos provetes em função da extensão sofrida pelos mesmos.

4.4.1. Ensaios de tração/corte na ligação colada

A Figura 4.24 mostra as curvas resultantes dos ensaios de tração/corte para os provetes simplesmente colados.

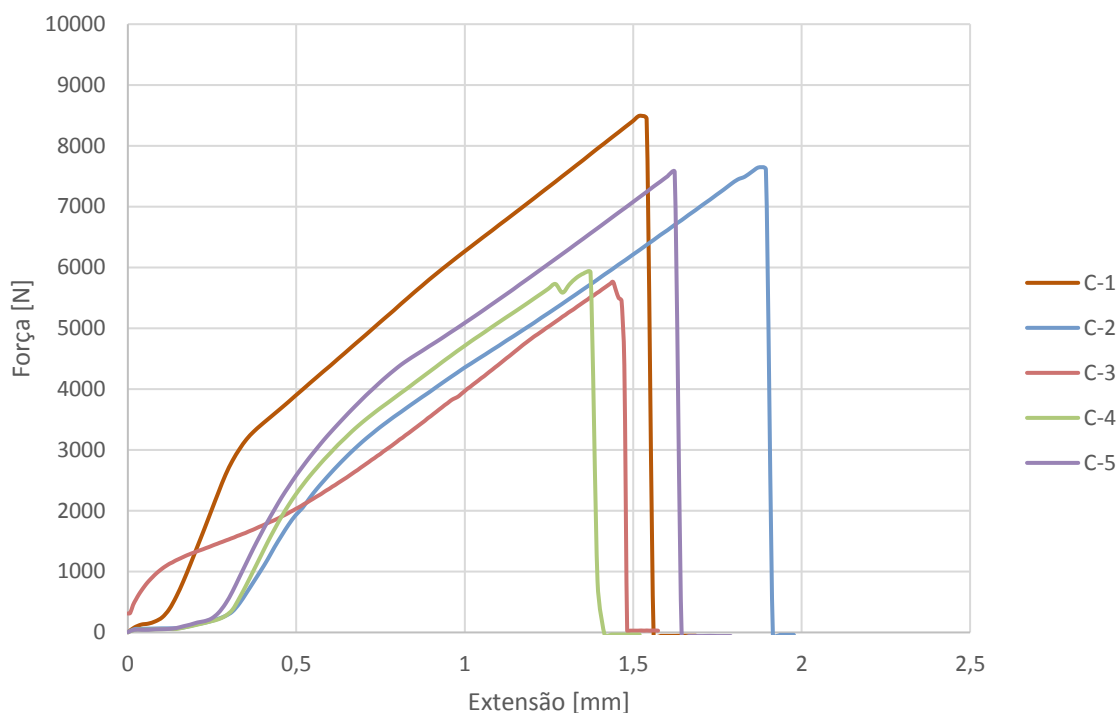


Figura 4.24. Resultados obtidos nos ensaios de tração/corte da série Colada C.

Observa-se, na Figura 4.24, que os valores máximos de força suportados pela série colada, apresentam uma grande discrepância entre si. O provete C-1, foi aquele que suportou as maiores cargas, sendo o valor máximo de 8493N, já o provete C-4, apresenta o valor máximo de 5761 N. A diferença entre estes valores é de 2732 N, o que significa que o provete C-4 apresenta uma resistência mecânica cerca de 32,16 % inferior à do provete C-1. Todos os provetes desta série foram realizados sob as mesmas condições, e apresentam mesmas áreas de sobreposição, o que indica que esta diferença de valores poderá estar relacionada com problemas na conceção da ligação.

4.4.2. Ensaios de tração/corte nas ligações soldadas

Os resultados obtidos nos ensaios de tração/corte realizados às séries de provetes simplesmente soldadas encontram-se expostos na Figura 4.25.

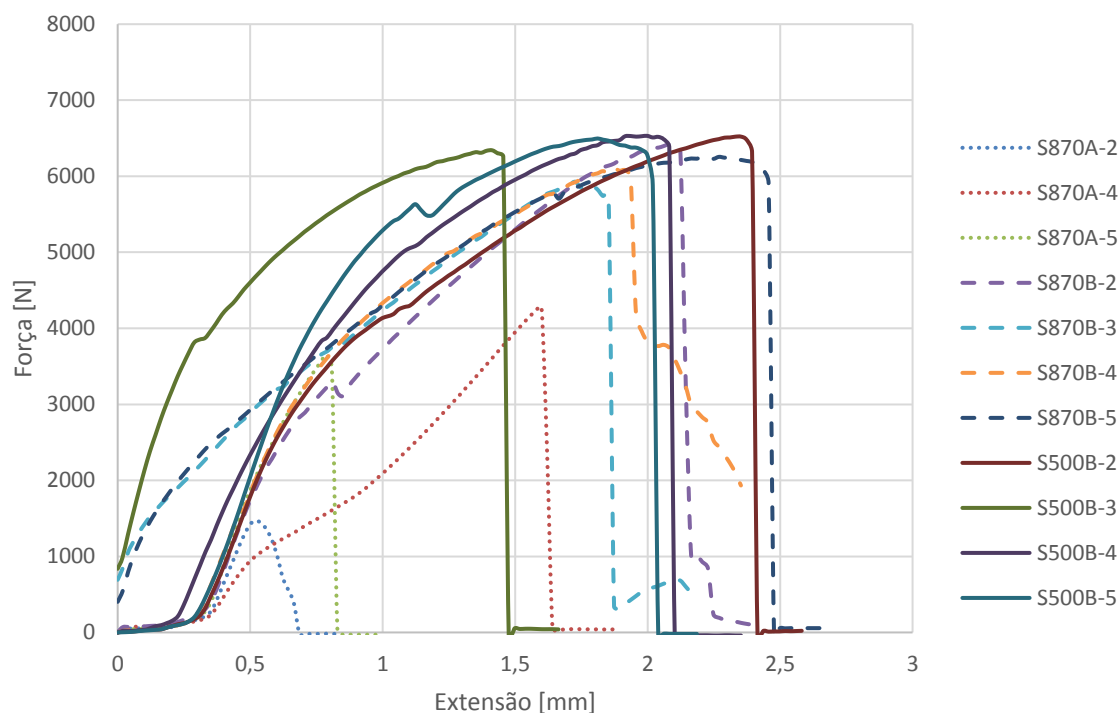


Figura 4.25. Resultados obtidos nos ensaios de tração/corte das séries soldadas S870A, S870B e S500B.

Nota-se que existe uma grande diferença entre as curvas da série S870A e as curvas das séries S870B e S500B. As curvas da série S870A apresentam os menores valores de força máxima, enquanto que as outras duas séries mostram curvas com maiores valores de força máxima. A causa para os valores de força máxima da série S870A serem mais baixos que as outras duas reside na ferramenta utilizada na realização dos provetes desta série. Os provetes da série S870A foram efetuados com recurso à ferramenta A, enquanto que as outras duas foram fabricados utilizando a ferramenta B. Foi possível verificar nas macrografias apresentadas no ponto 4.1.1, referentes às séries soldadas, que a ferramenta B, correspondente ao pino de 5 mm, promoveu uma maior soldadura entre as chapas superior e inferior da junta sobreposta, sendo, portanto, espetável que as séries realizadas com recurso à ferramenta B suportassem uma maior carga que a série realizada com a ferramenta A, tal como se verifica na Figura 4.25.

Os valores de força máxima da série S870B e série S500B, embora sejam semelhantes, apresentam uma pequena diferença, sendo a série S500B a que maiores valores obteve. A velocidade de rotação da ferramenta foi o parâmetro que se fez variar na realização destas duas séries; a rotação de 500 rpm foi utilizada no fabrico da série S500B, enquanto

que, na série S870B, o valor de rotação foi de 870 rpm. A velocidade de rotação está diretamente ligada à quantidade de calor gerado durante a soldadura. Quanto maior a velocidade de rotação, maior a temperatura. Na série S870B foi onde existiram as maiores temperaturas, o que demonstrou não ser benéfico para a resistência mecânica da ligação.

Conclui-se, portanto, que a ferramenta utilizada, foi o fator que maior peso teve na resistência mecânica da ligação soldada e que, a velocidade de rotação apresenta um papel secundário na resistência da junta.

4.4.3. Ensaios de tração/corte nas ligações híbridas

Apresentam-se, na Figura 4.26, os resultados obtidos nos ensaios de tração/corte efetuados aos provetes referentes às séries híbridas.

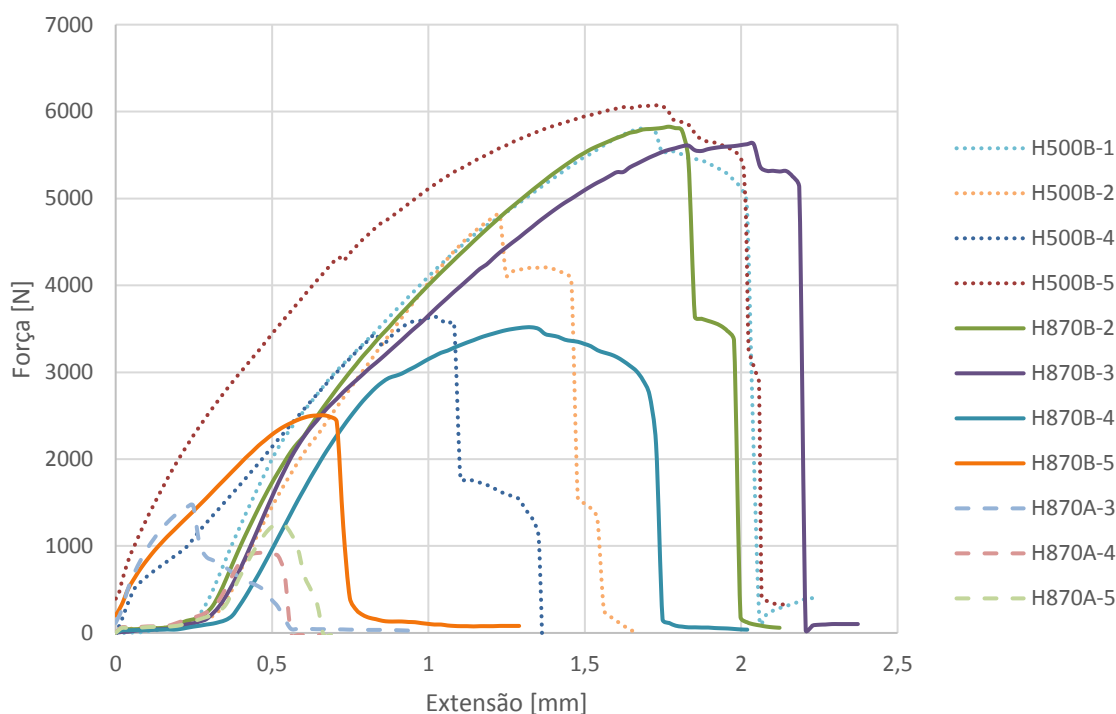


Figura 4.26. Resultados obtidos nos ensaios de tração/corte das séries híbridas H500B, H870B e H870A.

Percebe-se que as curvas obtidas na realização dos ensaios de tração/corte, das ligações híbridas, apresentam uma geometria idêntica às curvas obtidas nos mesmos ensaios realizados aos provetes ligados somente por *FSSW*. Esta semelhança entre curvas dos diferentes tipos de ligação, indica, que na ligação híbrida, a soldadura é o tipo de ligação que maior influência tem no comportamento da junta, quando sujeita ao ensaio de tração/corte.

Observa-se, na Figura 4.26, que existe uma grande disparidade de valores de força máxima para provetes da mesma série. Esta diferença indica que a ligação híbrida apresenta uma resistência mecânica muito inconsistente, mesmo para juntas realizadas sob as mesmas condições de colagem e soldadura, o que, em conformidade com o referido anteriormente, pode também ser justificado por alguma dificuldade na realização da colagem dos aderentes

É evidente que, a série H870A, é aquela que apresentou menores valores de força máxima. Nas ligações híbridas, à semelhança do que se verificou nas ligações soldadas, a série que menores valores de força máxima apresentou foi produzida pela ferramenta A. Observou-se, no ponto 4.1.1, nas macrografias dos provetes produzidos pela ferramenta A (S870A e H870A), que as chapas superior e inferior destas séries apresentaram uma fraca união, demonstrando-se o pino de 3 mm da ferramenta A, incapaz de penetrar as duas chapas e promover a mistura do material de ambas, desta feita, seria previsível que as uniões realizadas por esta ferramenta apresentassem baixa resistência mecânica.

4.4.4. Forças máximas de todos os tipos de ligações

Compararam-se todos os valores máximos de força obtidos nos ensaios de tração/corte realizados a todas as séries de provetes, Figura 4.27.

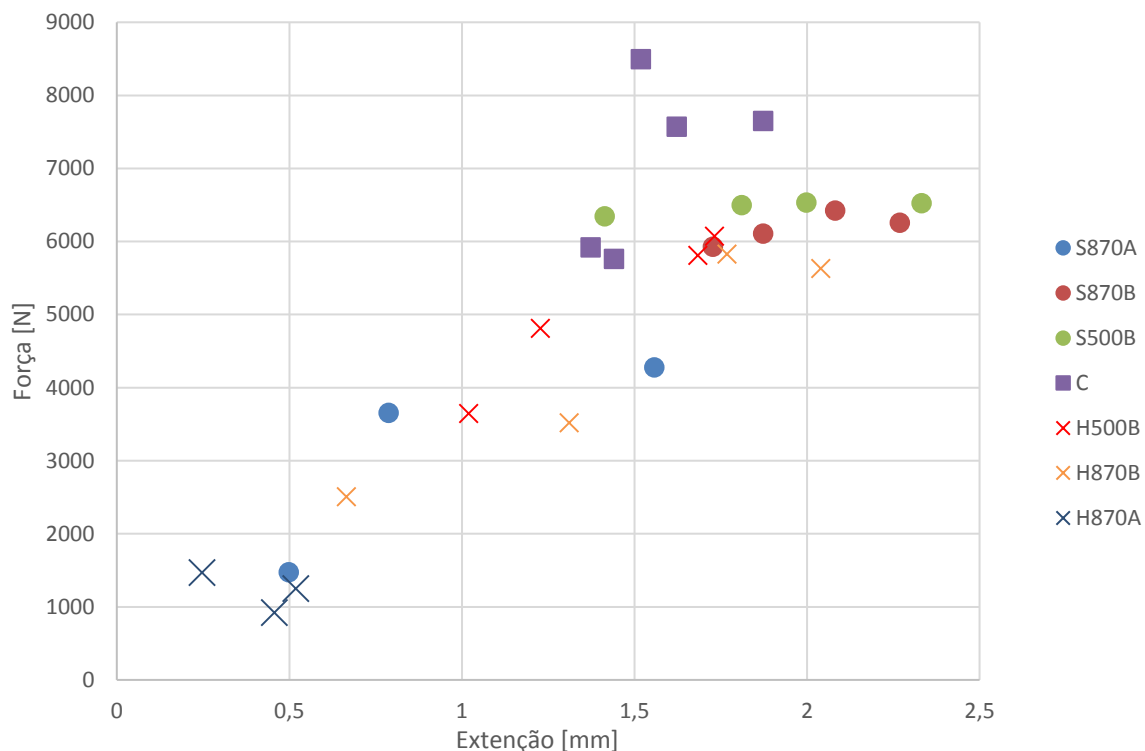


Figura 4.27. Forças máximas de cada ensaio tração/corte realizado.

Os dados do gráfico representado na Figura 4.27 permitiram a realização de uma tabela com os valores médios de força máxima suportada por cada série. Na tabela 4.1 encontram-se os valores médios da força máxima de cada série de provetes, e o desvio padrão associado a cada uma das médias. É necessário referir que, com o intuito de fazer uma análise de valores mais assertiva, os valores mais baixos das séries S870A, C, H500B e H870B não foram tidos em conta no cálculo da média e desvio padrão, uma vez que fugiam muito dos restantes valores obtidos por essas séries.

Tabela 4.1. Média e desvio padrão das forças máximas suportadas por cada série.

	Média [N]	Desvio padrão [N]
S870A	3964	313
S870B	6171	175
S500B	6472	77
C	7407	932
H500B	5563	543
H870B	4990	1045
H870A	1212	224

A Tabela 4.1 indica que a série que maiores esforços suportou, foi a série C, com uma força média de 7407 N, sendo esta série correspondente aos provetes unidos pela ligação colada. As séries que maiores valores de força sustentaram, depois da colada, foram as séries soldadas, S500B e S870B, com valores de 6472 N e 6171 N, respetivamente. As séries híbridas H500B e H870B, realizadas com a mesma ferramenta que as séries soldadas S500B e S870B, apresentaram valores mais baixos que estas últimas. Por fim, as séries que menores valores suportaram, foram as séries S870A e H870A, a primeira soldada e a segunda híbrida, tendo em comum, o facto de terem sido realizadas com recurso à mesma ferramenta, a ferramenta A.

As macrografias referentes às séries híbridas, apresentadas no ponto 4.1.1, demonstram que o adesivo se comportou como uma barreira durante o processo de soldadura, impedindo a união das chapas superior e inferior da junta sobreposta. Outra razão que esteve na origem da baixa resistência mecânica deste tipo de ligação foram as elevadas temperaturas geradas durante a soldadura, que levaram à degradação do adesivo, e consequentemente, a perder as suas características mecânicas, como se verá mais à frente no ponto 4.5.3. Esta degradação do adesivo devido à temperatura foi também verificada noutro estudo (Campilho, R. D. S. G., *et al.*, 2012)

Os elevados valores de desvios padrão obtidos nas séries C e H870B, revelam uma grande disparidade de valores de força máxima obtidos nos ensaios de tração/corte realizados aos provetes destas séries.

Resumindo, verifica-se, portanto, que as ligações coladas foram as que melhores resultados de resistência mecânica apresentaram. E ainda, que não existiu vantagem a nível mecânico nas juntas sobrepostas híbridas relativamente às restantes, apresentando estas, os piores resultados dos três tipos de ligações acima analisados.

Conclui-se então, que a utilização dos dois métodos (soldadura e colagem), em simultâneo, sob as condições utilizadas neste estudo, demonstraram ser prejudiciais para a resistência mecânica da junta sobreposta. As macrografias expostas no ponto 4.1.1, relativas às ligações híbridas, faziam prever estes resultados, uma vez que é possível observar nas mesmas, que não existiu união das chapas superior e inferior da junta sobreposta.

4.5. Análise das deformações locais

O equipamento ARAMIS utilizado nos ensaios de tração/corte, permitiu a recolha de imagens dos provetes, enquanto estes sofriam deformações. Essas imagens foram mais tarde analisadas e relacionadas entre si pelo método (DIC) correlação de imagem digital. A correlação de imagens consiste na análise das várias imagens retiradas (com um intervalo de 1 seg entre cada uma), ao longo do ensaio, e identificação dos pontos localizados na superfície dos provetes nas várias imagens. Assim, é possível calcular os deslocamentos e, conseqüentemente, as deformações e tensões sofridas pelo provete.

Apesar de todos os três gráficos representados nas Figuras 4.28, 4.30 e 4.32 serem distintos entre si, é possível verificar que em todos os casos as deformações locais são muito superiores às deformações globais. É necessário realçar que a curva referente à deformação local foi truncada, de forma a ser possível observar bem a curva relativa à deformação global. De forma a simplificar a análise dos gráficos foram apenas apresentados os gráficos de uma das amostras de cada um dos três tipos de ligação em estudo, o primeiro referente à ligação colada, o segundo à ligação soldada e por último a ligação híbrida. No entanto, estes são representativos de todos os ensaios realizados.

As Figuras 4.29, 4.31 e 4.33 identificam os pontos onde foi efetuada a análise da deformação local em cada um dos casos.

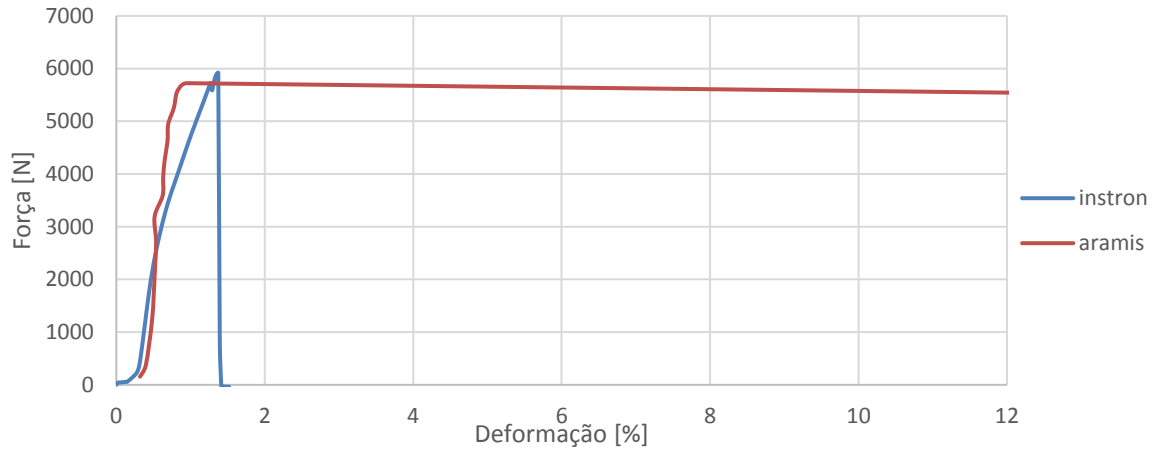


Figura 4.28.Comparação dos valores de deformação global e local do provete C-4

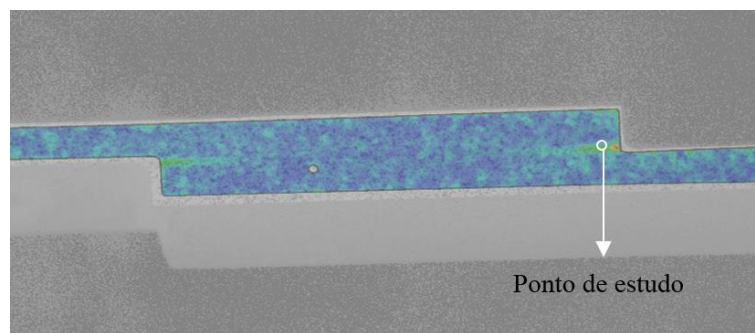


Figura 4.29.Representação do ponto onde foram estudadas as deformações locais do provete C-4

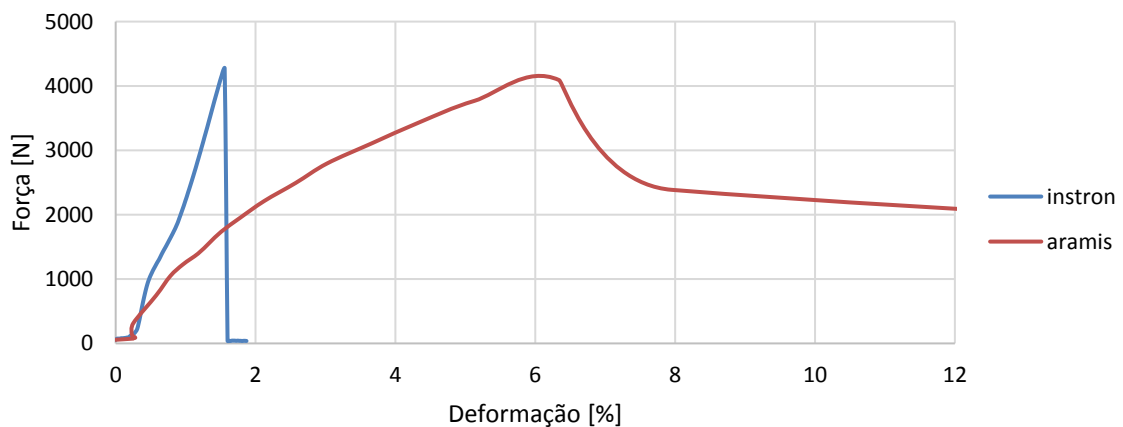


Figura 4.30.Comparação dos valores de deformação global e local do provete S870A-4

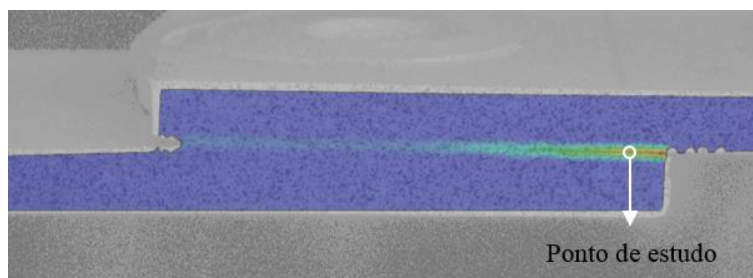


Figura 4.31. Representação do ponto onde foram estudadas as deformações locais do provete S870A-4

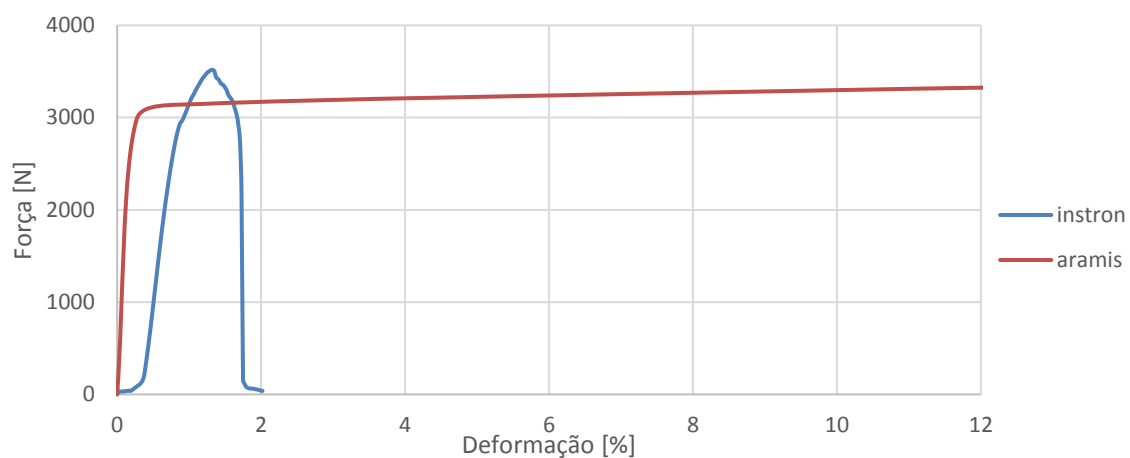


Figura 4.32. Comparação dos valores de deformação global e local do provete H500B-4

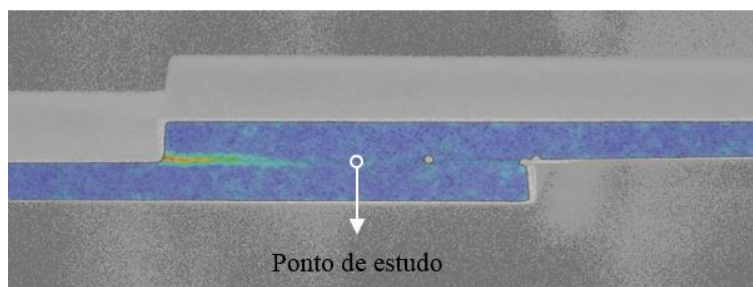


Figura 4.33. Representação do ponto onde foram estudadas as deformações locais do provete H500B-4

4.5.1. Ligação Colada

Na Figura 4.34, encontram-se representadas algumas das imagens capturadas pelo equipamento ARAMIS durante o ensaio de tração/corte. Estas imagens são referentes à ligação colada. Pretende-se, com esta análise, estudar a evolução da rotura sofrida pelos provetes colados, tendo-se usado para isso o provete C-4.

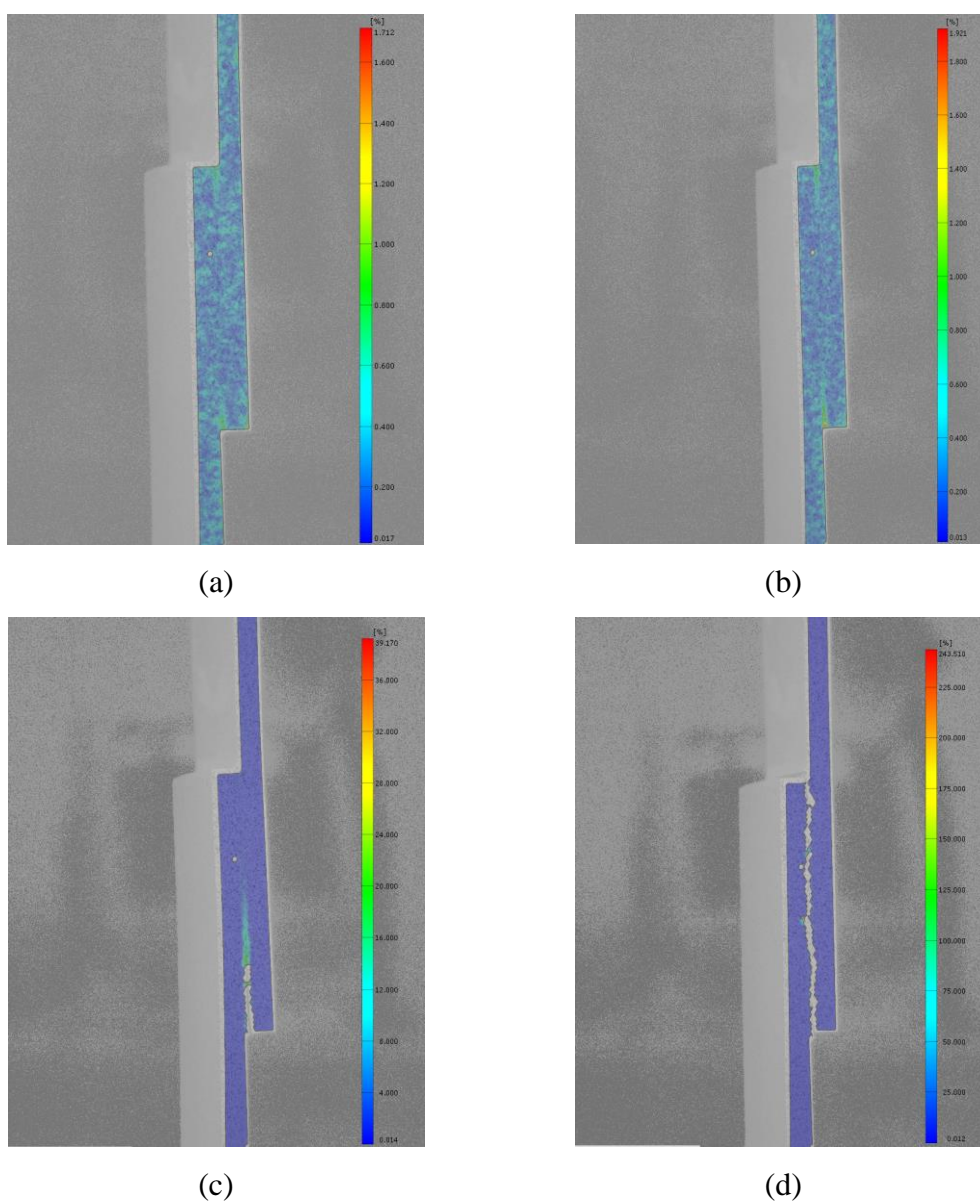


Figura 4.34. Proвете C-4-(a) Estágio 36 (2096 N); (b) Estágio 45 (5723N); (c) Estágio 46 (5901 N); (d) Estágio 47 (0 N).

Percebe-se, pela análise das imagens correspondentes à ligação simplesmente colada, que a evolução de rotura desta ligação se deu de forma muito rápida. No estágio 45 correspondente à carga de 5723N, Figura 4.34 b), as deformações locais verificadas na cola são quase negligenciáveis, no entanto, no estágio 46, figura c), correspondente à carga de 5901 N, começam a aparecer os primeiros sinais claros de rotura da ligação, junto à extremidade de junta e, no estágio 47, a junta rompe totalmente. Neste tipo de ligação, a evolução da rotura demonstrou ser de difícil perceção.

Percebe-se que as chapas do provete C-4 não fletiram de maneira tão evidente como as chapas do provete S500B-4 (Figura 4.35, analisada no ponto seguinte), correspondente às ligações soldadas. Todavia, verifica-se uma pequena flexão, flexão essa que levou à criação de esforços de arrancamento e clivagem nas extremidades da ligação sobreposta. Esse tipo de esforços, conduzem a uma diminuição da resistência da junta, criando tensões nas extremidades da junta sobreposta, e foi justamente nessas zonas que se iniciou a rotura, como se pode observar na Figura 4.34 b) e c).

4.5.2. Ligação Soldada

Nas Figuras 4.35 e 4.36, encontram-se representadas as imagens obtidas pelo ARAMIS, em diferentes estágios, da sequência de rotura dos provetes S500B-4 e S870B-4, respetivamente, correspondentes à ligação soldada. A análise destas imagens, permite verificar a evolução da rotura ocorrida nos provetes durante o ensaio de tração/corte. São, apenas, apresentadas as imagens do provete da série S500B e da série S870B. A série S870A, deste tipo de ligação, exibiu uma sequência de rotura semelhante à verificada na série S500B. As imagens referentes à série S870A encontram-se apresentadas no APÊNDICE D

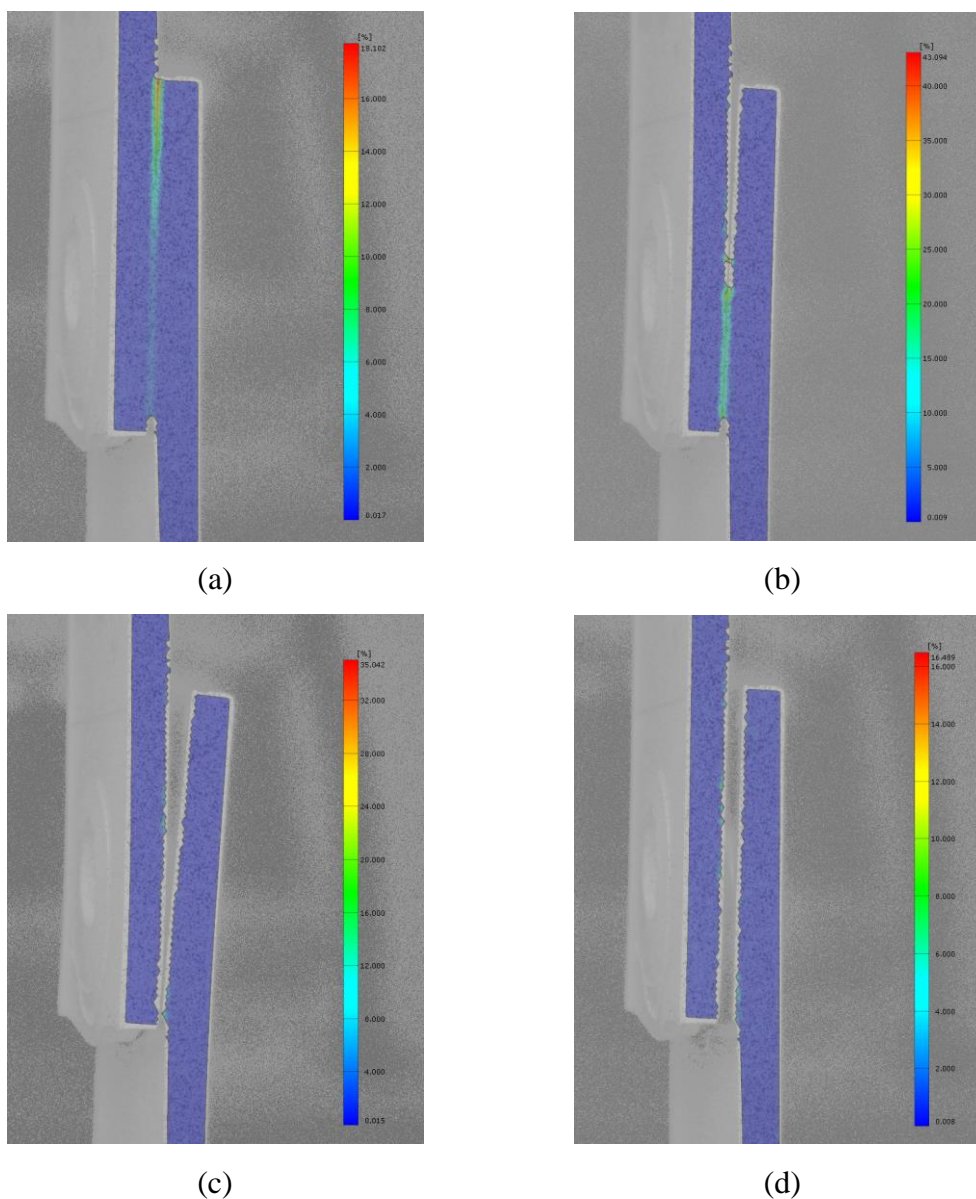


Figura 4.35. Provete S500B-4- (a) Estágio 4 (1063 N); (b) Estágio 8 (3301 N); (c) Estágio 20 (6485 N) ; (d) Estágio 22 (0 N)

Antes de mais, percebe-se, nas imagens apresentadas na Figura 4.35, que as deformações verificadas correspondem ao movimento relativo entre as chapas da junta, e não a deformações da própria liga de alumínio. A análise destas imagens, permite, desde logo, concluir que as duas chapas da junta se começam a separar numa fase muito inicial do ensaio. A Figura 4.35 a), correspondente ao estágio 4, evidencia uma elevada deformação local, cerca de 18,1 %, numa das extremidades da junta. Verifica-se também, pelas Figuras

4.35 b) e c), que os esforços são, maioritariamente, suportados pela zona da soldadura, pois é visível, na Figura 4.35 c), que não existe contacto entre as duas chapas na zona lateral da junta. No entanto, nesta fase está a ser suportada a força máxima que este provete conseguiu sustentar (6485 N). Percebe-se que as chapas de alumínio, no estágio 20, principalmente, se encontram sujeitas a esforços de flexão, o que indica que mesmo com a aplicação de *tabs*, este tipo de esforço não conseguiu ser totalmente evitado. No estágio 22, correspondente à Figura 4.35 d), observa-se que a ligação já cedeu, não estando a suportar nenhum esforço nesta altura.

A Figura 4.36 representa a sequência de rotura da S870B. Nesta série foi feita uma análise, não ao perfil da junta sobreposta, como em todas as outras séries, mas sim uma análise frontal da junta. Os resultados obtidos desta análise são as deformações sofridas ao longo do ensaio de tração/corte, mas, neste caso, as deformações evidenciadas são relativas às deformações sofridas pela liga de alumínio.

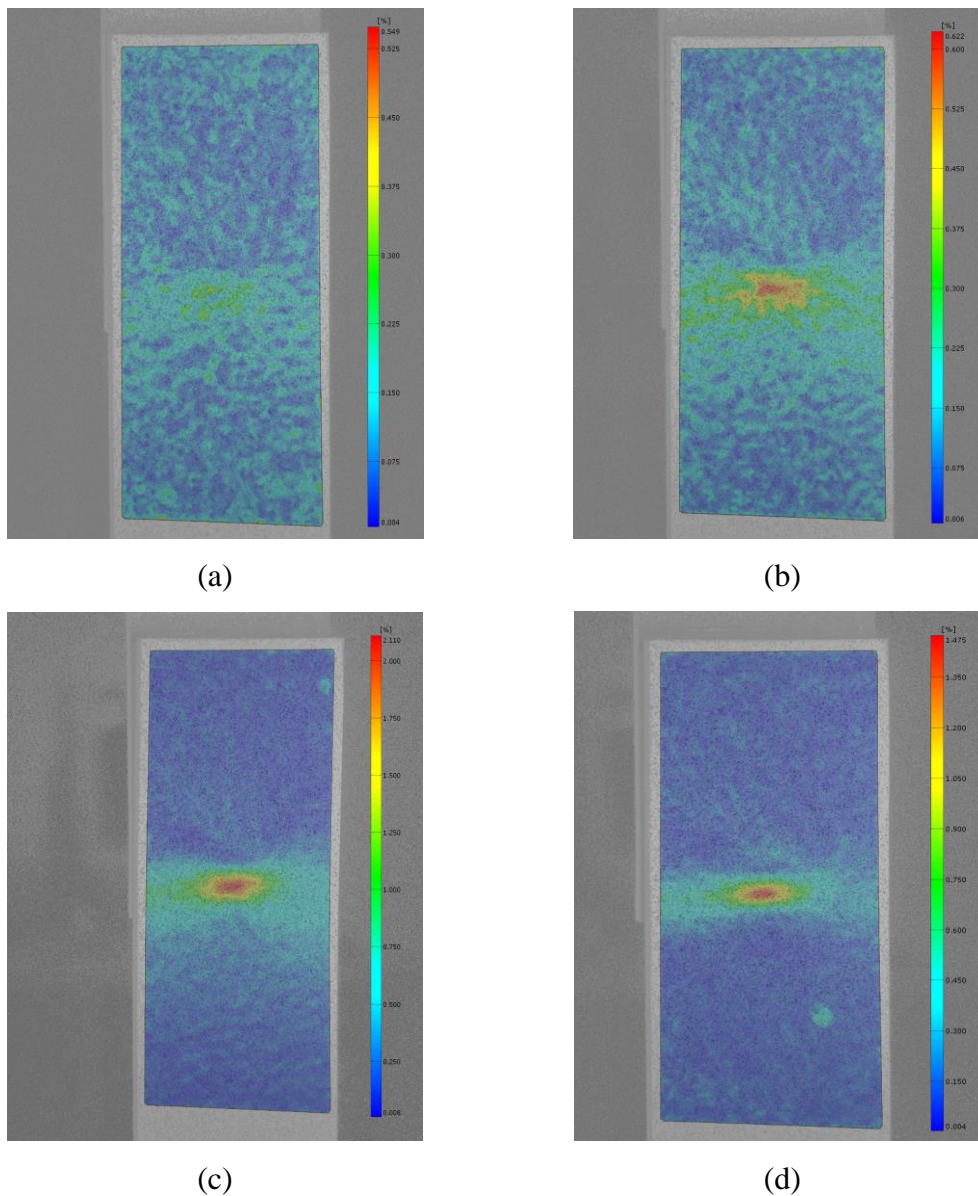


Figura 4.36. Provete S870B-4- (a) Estágio 12 (3014 N); (b) Estágio 18 (4260 N); (c) Estágio 31 (6004 N); (d) Estágio 34 (0 N).

O exame destas imagens permite concluir que as principais deformações locais se encontram num pequeno ponto, equidistante das extremidades laterais do provete e junto à extremidade de sobreposição, indicando que é nessa região que são transmitidos os carregamentos aos quais o provete foi submetido. Através das imagens pode-se aferir que os valores máximos de deformação sofridos pela liga de alumínio são de 2,11 %, ou seja, são muito inferiores aos valores de deformação obtidos nos provetes S870A-2 e S500B-4. Estes

valores de deformação locais são menores pois, no provete S870B-4, as imagens capturadas pelo ARAMIS calculam as deformações da própria liga de alumínio, devido à análise neste provete ter sido realizada frontalmente e não ao perfil da junta como nos outros casos. referentes aos provetes S870A-2 e S500B-4.

Observa-se ainda, na Figura 4.36 d), que mesmo depois de a ligação não estar a suportar esforços, as deformações locais se mantiveram, indicando que nestas áreas o provete deformou plasticamente.

Os resultados obtidos nos ensaios do provete S870A-2, apresentados no APÊNDICE D, demonstraram que não houve uma separação das duas chapas tão severa quanto a registada provete S500B-4, Figura 3.35. Isto deve-se, sobretudo, ao facto de a força suportada por esta amostra ter sido significativamente inferior aos valores suportados pelo provete S500B-4, não havendo, portanto, a criação de momentos suficientemente grandes ao ponto de serem capazes de fletir as chapas e as separar.

4.5.3. Ligação Híbrida

Os resultados apresentados nesta secção, são referentes à amostra H500B-5. Os resultados relativos às amostras H870B-2 e H870A-3 encontram-se no APÊNDICE D.

Na Figura 4.37 são apresentadas as imagens referentes à sequência de rotura do provete H500B-5.

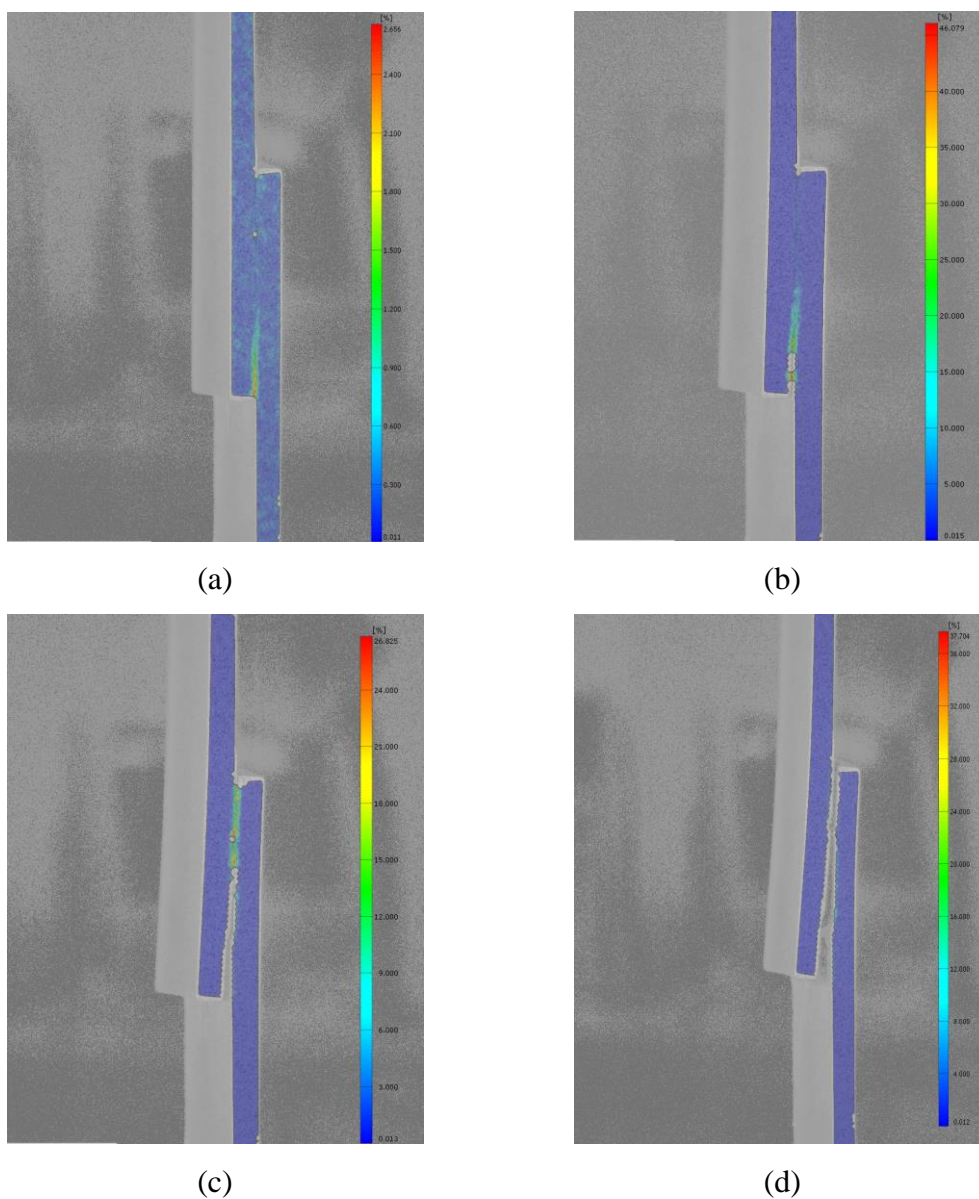


Figura 4.37. Provete H500B-5- (a) Estágio 4 (1605 N); (b) Estágio 20 (4182 N); (c) Estágio 31 (5189 N); (d) Estágio 60 (6069 N).

A Figura 4.37 ilustra a sequência de rotura do provete da série H500B. É claro, que o provete da ligação híbrida mostra um comportamento semelhante ao comportamento verificado pelos provetes da ligação soldada, durante o decorrer do ensaio de tração/corte. Verifica-se que, tal como na ligação soldada, as duas placas de aderente se começam a separar numa fase prematura do ensaio. É também evidente que a força da ligação é

suportada, maioritariamente, pelo centro da junta sobreposta, área correspondente à zona de soldadura. Na Figura 4.37 d) verifica-se que as zonas laterais da ligação se encontram totalmente separadas, mesmo correspondendo esta imagem à altura em que a ligação está a suportar os maiores esforços (6069 N).

As imagens relativas à série H870B, apresentadas no APÊNDICE D, apresentam uma evolução de rotura muito parecida com a série H500B. Já as imagens da série H870A, também elas expostas no APÊNDICE D, apresentam uma evolução de rotura bastante semelhante à evolução de rotura da série S870A. O que estas séries, S870A e H870A, têm em comum é a ferramenta utilizada na realização da soldadura.

Apresentando as séries, H500B e H870B, uma evolução de rotura idêntica à série S500B, e a série H870A, à S870A, permite concluir que a ferramenta utilizada na realização da soldadura teve a maior importância na resistência mecânica da junta híbrida.

4.6. Rotura dos provetes

Pretende-se, neste subcapítulo, fazer a apresentação de imagens relativas aos provetes após a realização dos ensaios de tração/corte, ou seja, depois de ocorrida a rotura dos mesmos. A análise destas imagens é importante pois que permite verificar se existiu alguma anomalia na superfície de rotura dos provetes, possibilitando a relação com os resultados obtidos nos outros pontos acima analisados.

4.6.1. Superfície de rotura da ligação colada

Na Figura 4.38, encontra-se representada a superfície de rotura do provete C-2 relativo à série colada.



Figura 4.38. Superfície de rotura do provete C-2 relativo à série colada

Percebe-se, pela observação da Figura 4.38, que o modo de rotura típico desta ligação foi a rotura adesiva. Verifica-se que as zonas desprovidas de adesivo na superfície da esquerda, correspondem, de modo geral, às zonas onde se encontra o adesivo na superfície da direita. Ainda assim existe uma zona no centro das superfícies dos aderentes que apresentam adesivo em ambas as chapas, indicando que existiu também rotura coesiva. Pode-se, então, dizer que neste tipo de ligação se observa o tipo de rotura mista.

4.6.2. Superfície de rotura da ligação soldada

Na figura 4.39, apresenta-se a imagem referente à série soldada S500B.



Figura 4.39. Superfície de rotura do provete C500-2 relativo à série soldada

A análise da Figura 4.39 permite verificar que as cargas a que o provete foi sujeito durante ensaio de tração/corte foram suportadas, não por toda a zona de soldadura, mas sim por um pequeno ponto desta.

Comparando esta figura com os resultados obtidos no ponto 4.4.2, Figura 4.36, percebe-se porque é que as deformações locais foram verificadas numa pequena área do provete, correspondendo essa zona ao ponto que suportou todas as cargas, sofrendo, conseqüentemente, as deformações.

4.6.3. Superfície de rotura da ligação híbrida

Na figura 4.40, apresentam-se as imagens referentes à série híbrida H870B.



Figura 4.40. Superfície de rotura do provete H870B-4 relativo à série híbrida

A Figura 4.40 demonstra que o adesivo apresenta claros sinais de estar queimado. Esta queimadura do adesivo indica que as temperaturas geradas no processo de soldadura foram demasiado elevadas, fazendo com que este perdesse as suas propriedades mecânicas. O facto de o adesivo ter perdido as suas propriedades mecânicas explica os baixos valores registados no ponto 4.4.3, relativos aos esforços mecânicos suportados pelas séries híbridas comparativamente às outras duas séries.

Observa-se que o principal tipo de rotura por parte do adesivo, observado na ligação apresentada, é a rotura adesiva. Praticamente toda a superfície à esquerda da imagem encontra-se coberta por adesivo, correspondendo esta à superfície da placa de baixo da junta sobreposta, e a superfície à direita, referente à chapa superior, apresenta apenas uns pontos cobertos por adesivo, estando o resto da superfície “limpa”. Os resultados relativos às microdurezas, registados no subcapítulo 4.3, indicaram que as maiores temperaturas geradas na soldadura existiram na placa superior da junta, comparando esses resultados com a Figura

4.40, percebe-se que essas temperaturas levaram a uma separação do adesivo e do aderente na interface da placa superior.

É possível observar que, contrariamente ao verificado no ponto 4.1, referente às macrografias, esta série híbrida apresentou uma área onde existiu soldadura das chapas superior e inferior. No entanto, tendo em conta os resultados do ponto 4.4.2, compreende-se que a soldadura não foi suficientemente forte para que esta série suportasse esforços idênticos às séries soldadas.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

A realização deste estudo permitiu retirar as seguintes conclusões:

- Nas juntas sobrepostas híbridas, a soldadura das chapas superior e inferior praticamente não existiu, havendo uma camada de adesivo a separá-las;
- Não existiu melhoria de resistência mecânica da junta sobreposta colada simples recorrendo à *FSSW*;
- Os provetes simplesmente colados foram os que apresentaram resistência mais elevada;
- Os provetes híbridos foram aqueles que a menores esforços de tração/corte resistiram;
- A associação da ligação colada e soldada, na realização de uma ligação híbrida, demonstrou ser difícil de realizar;
- A ferramenta utilizada na realização da soldadura apresentou-se como o parâmetro de maior relevo na resistência mecânica das ligações soldadas e híbridas;
- A velocidade de rotação utilizada na soldadura demonstrou ter um papel secundário na resistência mecânica da soldadura;
- A rotura nas ligações soldadas e híbridas ocorreu de forma gradual, enquanto que, na ligação colada, a rotura ocorreu de forma drástica e imprevisível;
- As temperaturas geradas durante a soldadura levaram à degradação do adesivo.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Num futuro trabalho, seria interessante estudar diferentes tipos de ligações híbridas, associando a ligação colada a outro método de soldadura, por exemplo, a soldadura

por resistência por pontos. A utilização de um tipo de adesivo, resistente a maiores temperaturas do que aquelas suportadas pelo adesivo utilizado neste estudo, na criação da ligação híbrida ou a segregação das zonas soldadas e coladas, seria aconselhável.

A comparação do comportamento em serviço, em diversos ambientes, de ligações coladas e híbridas tem interesse industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Badarinarayan, H., Yang, Q., & Zhu, S. (2009). Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(2), 142-148.
- Braga, D. F., De Sousa, L. M. C., Infante, V., Da Silva, L. F., & Moreira, P. M. G. P. (2016). Aluminium friction-stir weld-bonded joints. *The Journal of Adhesion*, 92(7-9), 665-678.
- Campanelli, L. C., Suhuddin, U. F. H., Santos, J. F. D., & Alcântara, N. G. D. (2012). Parameters optimization for friction spot welding of AZ31 magnesium alloy by Taguchi method. *Soldagem & Inspeção*, 17(1), 26-31.
- Campilho, R. D. S. G., Pinto, A. M. G., Banea, M. D., & da Silva, L. F. (2012). Optimization study of hybrid spot-welded/bonded single-lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 37, 86-95.
- Chang, B., Shi, Y., & Lu, L. (2001). Studies on the stress distribution and fatigue behavior of weld-bonded lap shear joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 108(3), 307-313.
- Chowdhury, S. H., Chen, D. L., Bhole, S. D., Cao, X., & Wanjara, P. (2013). "Lap shear strength and fatigue behavior of friction stir spot welded dissimilar magnesium-to-aluminum joints with adhesive". *Materials Science and Engineering: A*, 562, 53-60.
- da Silva, L. F., Öchsner, A., & Adams, R. D. (Eds.). (2011). "Handbook of adhesion technology". Springer Science & Business Media
- da Silva, L. F., Pirondi, A., & Ochsner, A. (Eds.). (2011). Hybrid adhesive joints (Vol. 6). Springer Science & Business Media.

-
- Darwish, S. M. H., & Ghanya, A. (2000). Critical assessment of weld-bonded technologies. *Journal of Materials Processing Technology*, 105(3), 221-229.
- de Almeida, F. J. S., Campilho, R. D. S. G., & Silva, F. J. G. (2016). Strength prediction of T-peel joints by a hybrid spot-welding/adhesive bonding technique. *The Journal of Adhesion*, 1-18.
- dos Santos, T. G., Silva, B. S., dos Santos Vilaça, P., Sousa, J. M., & Quintino, L. (2007). “Fusão de dados em ensaios não destrutivos utilizando decisão fuzzy para a avaliação de soldas obtidas pelo processo de fricção linear”.
- Leitao, C., Leal, R. M., Rodrigues, D. M., Loureiro, A., & Vilaça, P. (2009). Mechanical behaviour of similar and dissimilar AA5182-H111 and AA6016-T4 thin friction stir welds. *Materials & Design*, 30(1), 101-108.
- Li, W., Li, J., Zhang, Z., Gao, D., Wang, W., & Dong, C. (2014). Improving mechanical properties of pinless friction stir spot welded joints by eliminating hook defect. *Materials & Design (1980-2015)*, 62, 247-254.
- Loureiro A. J. R., (2014), “Ligações Adesivas”, Universidade de Coimbra
- Micari, F., Buffa, G., Pellegrino, S., & Fratini, L. (2014). “Friction Stir Welding as an Effective Alternative Technique for Light Structural Alloys Mixed Joints”. *Procedia Engineering*, 81, 74-83.
- Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50(1), 1-78.
- Neto J.A.B.P., Campilho R.D.S.G., da Silva L.F.M., (2012), “Parametric study of adhesive joints with composites” em “International Journal of Adhesion & Adhesives”, Elsevier, 37, 96–101
- Piccini, J. M., & Svoboda, H. G. (2015). Effect of the tool penetration depth in Friction Stir Spot Welding (FSSW) of dissimilar aluminum alloys. *Procedia Materials Science*, 8, 868-877.

- Pinto, A. M. G. (2007), “Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos”, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial.
- Pizzi A. e Mital K. L. (2003), “Handbook of adhesive technology, revised and expanded”, Marcel Dekker, New York
- Santos, I. O., Zhang, W., Goncalves, V. M., Bay, N., & Martins, P. A. F. (2004). Weld bonding of stainless steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(14), 1431-1439.
- Täljsten B. (2006), “The Important of bonding – a historic overview and future possibilities”, *Advances in Structural Engineering*, Vol. 9, No. 6, pp. 721–736
- Tao, W., Ma, Y., Chen, Y., Li, L., & Wang, M. (2014). The influence of adhesive viscosity and elastic modulus on laser spot weld bonding process. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 51, 111-116.
- Tozaki, Y., Uematsu, Y., & Tokaji, K. (2007). Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(15), 2230-2236.
- Yue, Y. M., Zhou, Z. L., Ji, S. D., Zhang, L. G., & Li, Z. W. (2017). “Improving joint features and tensile shear properties of friction stir lap welded joint by an optimized bottom-half-threaded pin tool”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(9-12), 2597-2603.
- Zhang, Z., Yang, X., Zhang, J., Zhou, G., Xu, X., & Zou, B. (2011). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. *Materials & Design*, 32(8), 4461-4470.

ANEXO A

Huntsman Advanced Materials Americas Inc.
5121 San Fernando Road West
Los Angeles, CA 90039
818.247.6210

Customer Service Hotline: 800.367.8793
Customer Service Faxline: 517.351.6256
Technical Inquiries: 800.817.8260

website: www.araldite.com
e-mail: adhesives_group@huntsman.com



Product Data

ARALDITE[®] AW 106 Resin Hardener HV 953U MULTI-PURPOSE EPOXY ADHESIVE

DESCRIPTION: Araldite AW 106 resin/Hardener HV 953U epoxy adhesive is a multi-purpose, viscous material that is suitable for bonding a variety of materials including metal, ceramic, and wood. The electrically insulating adhesive is easy to apply either manually by spatula and stiff brush or mechanically with meter/mix and coating equipment. Araldite AW 106 resin/Hardener HV 953U epoxy adhesive cures at temperatures from 68°F (20°C) to 356°F (180°C) with no release of volatile constituents.

APPLICATIONS:

- Metal
- Ceramics
- Wood
- Vulcanized Rubber
- Foams
- Plastics

ADVANTAGES:

- Long open time
- High shear and peel strength
- Easy to apply
- Good resistance to static and dynamic loads
- Electrically insulating

Figura AN 0.1. Folha número 1 da especificação do adesivo Araldite AW 106 Hardner HV 953U

TYPICAL PROPERTIES:	Property	Test Method	Test Values ⁽¹⁾	
			Resin	Hardener
	Color/appearance	Visual	Creamy, viscous/liquid	Amber Liquid
	Specific Gravity	ASTM D-792	1.17	0.92
	Viscosity (cP) @ 77°F (25°C)	ASTM D-2393	50,000	35,000

TYPICAL MIXED PROPERTIES:	Property	Test Method	Test Values ⁽¹⁾
	Reaction Ratio (by weight)		100R/80H
	Reaction Ratio (by volume)		100R/100H
	Pot Life, hours @ 77°F (25°C) (4 fl. oz. mass)	ASTM D-2471	2
	Mixed viscosity (cP) @ 77°F (25°C)	ASTM D-2393	45,000

¹Tested @ 77°F (25°C)

RECOMMENDED CURE SCHEDULES:	Temperature	Handling Strength	Minimum Cure Time
	68°F (20°C)	12 hours	15 hours
	77°F (25°C)	7 hours	12 hours
	104°F (40°C)	2 hours	3 hours
	158°F (70°C)	30 minutes	50 minutes
	212°F (100°C)	6 minutes	10 minutes
	302°F (150°C)	4 minutes	5 minutes

TYPICAL CURED PROPERTIES:

Application of Adhesive
The resin/hardener mix is applied with a spatula to the pretreated and dry joint surfaces.

A layer of adhesive 0.002 to 0.004-inches (0.05 to 0.10-mm) thick will normally impart the greatest lap shear strength to a joint.

The joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied. Even contact throughout suffices to ensure proper cure.

Standard Test Specimens
Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made up by lap-jointing 4-inch x 1-inch x 0.06-inch (10-cm x 2.5-cm x 1.5-mm) strips of aluminum. The joint area was 0.5 x 1 inch (12.5 mm x 2.5 cm) in each case.

Figura AN 0.2. Folha número 2 da especificação do adesivo Araldite AW 106 Hardner HV 953U

<u>Property</u>	<u>Test Method</u>	<u>Test Values⁽¹⁾</u>
Lap Shear Strength, psi (MPa)	ASTM D-1002	
<i>Effects of cure time and temperature</i>		
<u>Cure Temperature</u>	<u>Time</u>	
77°F (25°C)	8 hours	710 (4.9)
	15 hours	1990 (13.7)
	24 hours	2130 (14.7)
	72 hours	2280 (15.7)
	5 days	2560 (17.6)
158°F (70°C)	1 hour	3130 (21.5)
	2 hours	3410 (23.5)
	3 hours	3200 (22)
212°F (100°C)	10 minutes	3700 (25.5)
	20 minutes	3980 (27.4)
	30 minutes	4120 (28.4)
302°F (150°C)	5 minutes	4270 (29.4)
	10 minutes	4410 (30.4)
	20 minutes	4410 (30.4)
<u>Property</u>	<u>Test Method</u>	
Lap Shear Strength, psi (MPa)	ASTM D-1002	
<i>Effect of Test Temperature</i>		
(Load applied 10 minutes after specimens reach test temperature.)		
<u>Cure Cycle</u>	<u>Test Temp.</u>	
5 days @ 77°F (25°C)	-76°F (-60°C)	2840 (19.5)
	-4°F (-20°C)	2840 (19.5)
	68°F (20°C)	2560 (17.6)
	104°F (40°C)	1420 (9.8)
	140°F (60°C)	570 (3.9)
20 min @ 212°F (100°C)	-76°F (-60°C)	3560 (24.5)
	-4°F (-20°C)	3410 (23.5)
	68°F (20°C)	3980 (27.4)
	104°F (40°C)	1990 (13.7)
	140°F (60°C)	1000 (6.9)
¹ Tested @ 77°F (25°C)		

Figura AN 0.3. Folha número 3 da especificação do adesivo Araldite AW 106 Hardner HV 953U

Lap Shear Strength, psi (MPa) <i>Effect of Heat Aging</i> (Cured 16 hours @ 104°F (40°C).		Test Method ASTM D-1002
<u>Aging Temperature</u>	<u>Exposure Time</u>	<u>Test Values⁽¹⁾</u>
68°F (20°C)	0 days	2560 (17.6)
	1 years	2560 (17.6)
	2 years	2280 (15.7)
	3 years	1710 (11.8)
	4 years	1990 (13.7)
	5 year	1990 (13.7)
140°F (60°C)	3 days	2560 (17.6)
	10 days	2420 (16.6)
	30 days	2130 (14.7)
176°F (80°C)	3 days	2130 (14.7)
	10 days	2130 (14.7)
	30 days	2130 (14.7)
	60 days	2130 (14.7)
	1 year	1280 (8.8)
	2 years	710 (4.9)
	3 years	710 (4.9)
248°F (120°C)	4 years	430 (2.9)
	5 years	280 (1.9)
	3 days	2130 (14.7)
	10 days	2280 (15.7)
	30 days	2280 (15.7)
	60 days	2130 (14.7)

Property
Lap Shear Strength, psi (MPa)
Tested on Metal Substrates
 (Cured 20 min @ 212°F (100°C)

<u>Metal</u>	<u>Substrate Thickness</u> <u>(in./mm)</u>	<u>Test Values⁽¹⁾</u>
Carbon Steel	0.039/1.0	3840 (26.4)
Stainless Steel	0.039/1.0	3270 (22.5)
Galvanized Steel ²	0.06/1.5	1990 (13.7)
Copper	0.06/ 1.5	3270 (22.5)
Brass	0.06/ 1.5	2990 (20.6)

¹Tested @ 77°F (25°C)

²Surface degreased only, not roughened.

Figura AN 0.4. Folha número 4 da especificação do adesivo Araldite AW 106 Hardner HV 953U

Property

Fatigue Strength

Tested using a load frequency of 90 Hz and a 1 inch (25 mm) joint overlap
(Cured 20 min @ 212°F (100°C))

Fatigue Limit Load

<u>% Static Shear Strength</u>	<u>Cycles to Failure⁽¹⁾</u>
50	10 ³ -10 ⁴
40	10 ⁴ -10 ⁵
30	10 ⁵ -10 ⁶
25	10 ⁵ -10 ⁶
20	10 ⁶ -10 ⁷
15	10 ⁷

<u>Property</u>	<u>Test Method</u>	<u>Test Values⁽¹⁾</u>
Ultimate Tensile Strength, psi (MPa)	ASTM D-638	4800 (33)
Elongation, %	ASTM D-638	9
Tg per DMA, °F (°C)	ASTM D-4065	146 (63)
Hardness, Shore D	ASTM D-2240	80
Coefficient of Thermal Expansion (in/in/°C)	ASTM E-831	8.5 x 10 ⁻⁵
Roller Peel Test, pli (N/mm)	ISO 4578	28 (4.9)

¹Tested @ 77°F (25°C)

Electrical Properties

Thermal Conductivity, W/mK	0.22
Surface Resistivity, ohms	1.2 E+16
Dielectric Strength, volt/mil	400
Volume Resistivity, ohms-cm	7.1 E+14
Dielectric Constant, at 50Hz/1KHz/10KHz	3.4/3.2/3.2
Loss Tangent, % at 50Hz/1KHz/10KHz	1.7/1.8/2.6

**STORAGE/
SHELF LIFE:** Araldite epoxy adhesive components should be stored in their original, sealed containers at room temperature. When stored at temperatures from 59-77°F (15-25°C), the resin and hardener will remain in useable condition for 12 months from date of shipping from Huntsman.

Figura AN 0.5. Folha número 5 da especificação do adesivo Araldite AW 106 Hardner HV 953U

CAUTION:

Huntsman Advanced Materials Americas Inc. maintains up-to-date Material Safety Data Sheets (MSDS) on all of its products. These sheets contain pertinent information that you may need to protect your employees and customers against any known health or safety hazards associated with our products. Users should review the latest MSDS to determine possible health hazards and appropriate precautions to implement prior to using this material. Copies of the latest MSDS may be requested by calling our customer service group at 800-367-8793 or emailing your request to adhesives_group@huntsman.com.

FIRST AID!

Eyes and skin: Flush eyes with water for 15 minutes. Contact a physician if irritation persists. Wash skin thoroughly with soap and water. Remove and wash contaminated clothing before reuse.

Inhalation: Remove subject to fresh air.

Swallowing: Dilute by giving water to drink and contact a physician promptly. Never give anything to drink to an unconscious person.

KEEP OUT OF REACH OF CHILDREN

FOR PROFESSIONAL AND INDUSTRIAL USE ONLY

IMPORTANT LEGAL NOTICE:

Sales of a referenced product ("Product") are subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials Americas Inc. ("Huntsman").

WARRANTY: Huntsman warrants to the Buyer that the Product will conform to the published specifications for that Product at the time of manufacture.

DISCLAIMER AND LIMITATION OF LIABILITY: EXCEPT AS SET FORTH ABOVE, HUNTSMAN MAKES NO WARRANTY OR REPRESENTATION, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Huntsman cannot control Buyer's application and use of the Product and accepts no responsibility therefore. No statement or recommendation contained in any Product literature may be construed as a representation about the suitability of a Product for the particular application of Buyer or user or as an inducement to infringe any relevant patent. Buyer is responsible to ensure that its intended use of the Product does not infringe any third-party's intellectual property rights. Huntsman neither assumes, nor authorizes any representative or other person to assume for it, any obligation or liability other than as is expressly set forth herein. UNDER NO CIRCUMSTANCES SHALL HUNTSMAN BE LIABLE FOR INCIDENTAL, CONSEQUENTIAL, SPECIAL OR OTHER INDIRECT DAMAGES AS A RESULT OF A BREACH OF ANY WARRANTY OR THE FAILURE OF A PRODUCT OR ANY CLAIM THAT IS ESSENTIALLY BASED UPON SUCH BREACH OR FAILURE. Any claim by Buyer, whether arising in contract, tort, negligence, breach of warranty, strict liability, or otherwise, related to a Product shall be limited to, and the sole liability of Huntsman and the sole remedy of Buyer for any claims shall be for, the purchase price of the Product in respect of which such claim is made. The foregoing DISCLAIMER AND LIMITATION OF LIABILITY supersedes Buyer's documents.

WARNING: Technical data and results are based upon tests under controlled laboratory conditions and must be confirmed by Buyer by testing for its intended conditions of use. The Product has not been tested for, and therefore is not recommended or suitable for, uses for which prolonged contact with mucous membranes, abraded skin, or blood is intended or likely, or for uses for which implantation within the human body is intended, and Huntsman assumes no liability for any such uses.

© 2004 Huntsman Advanced Materials Americas Inc.
Araldite is a registered trademark of Huntsman LLC or an affiliate thereof in one or more, but not all, countries.

Figura AN 0.6. Folha número 6 da especificação do adesivo Araldite AW 106 Hardner HV 953U

APÊNDICE A

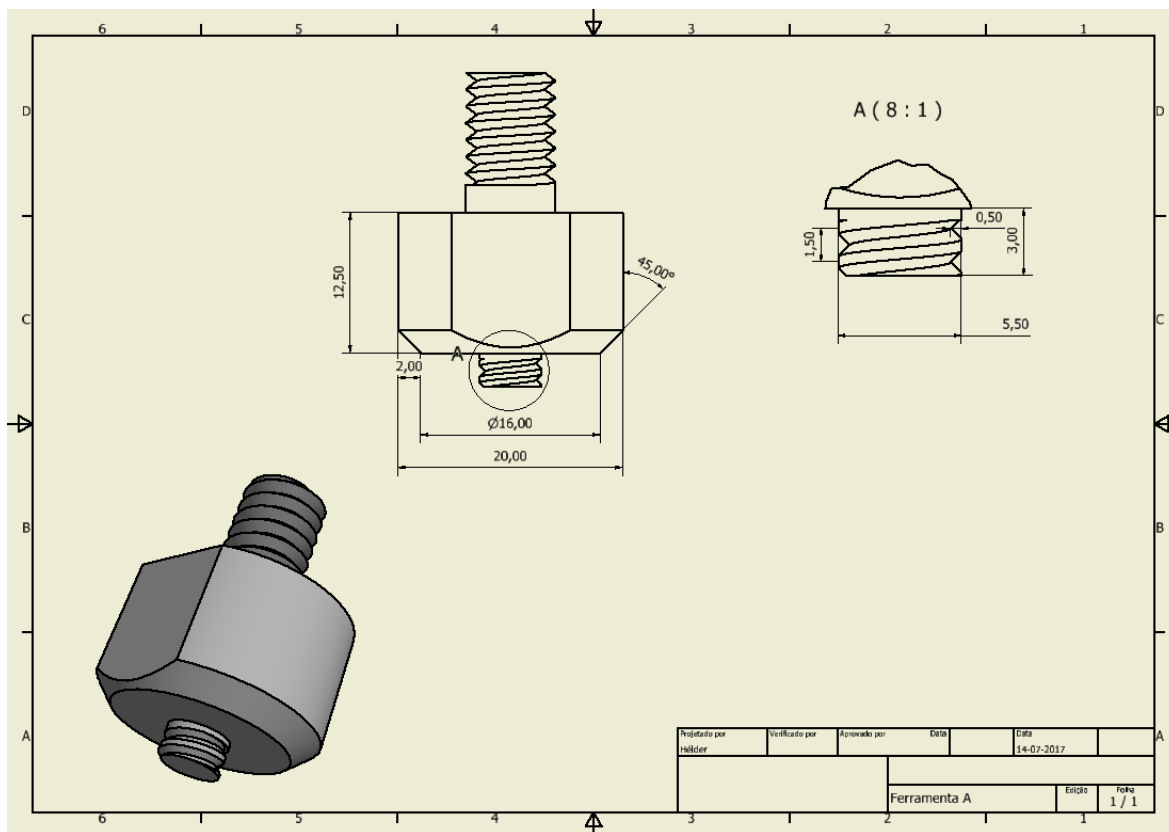


Figura AA 0.1. Dimensões e geometria da ferramenta A

APÊNDICE B

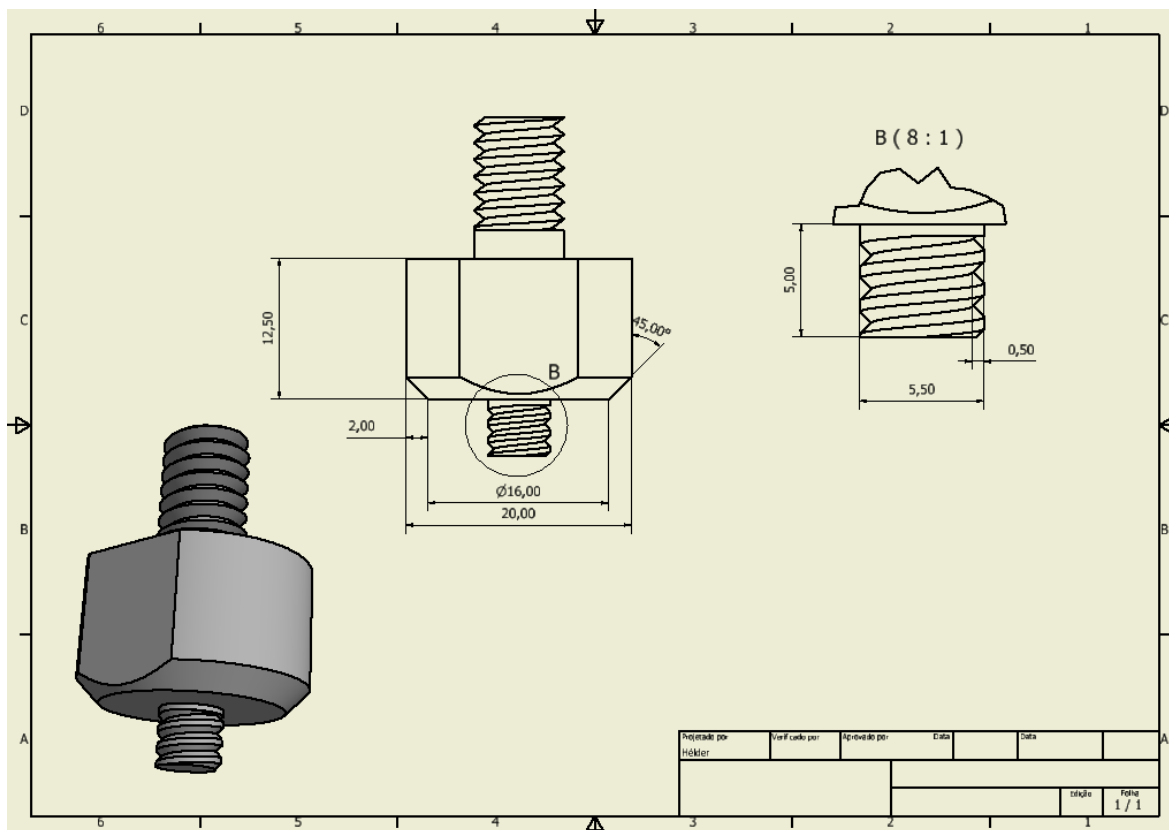


Figura AB 0.1. Dimensões e geometria da ferramenta B

APÊNDICE C

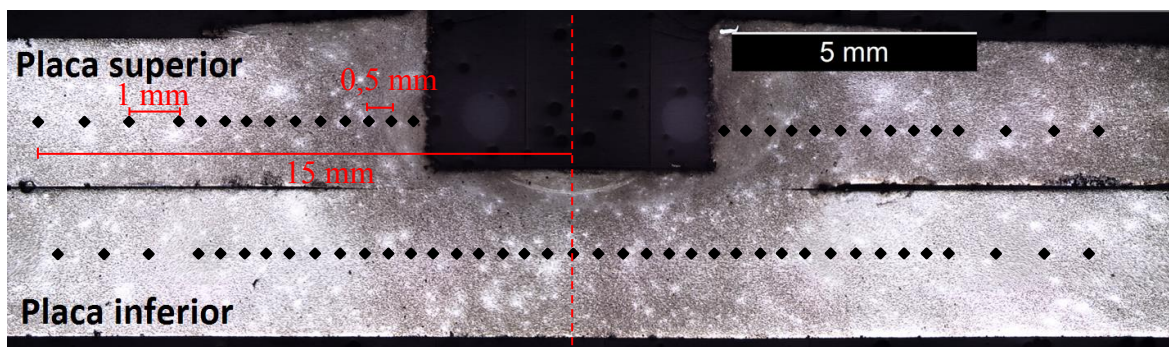


Figura AC 0.1. Representação dos ensaios de microdureza realizados

APÊNDICE D

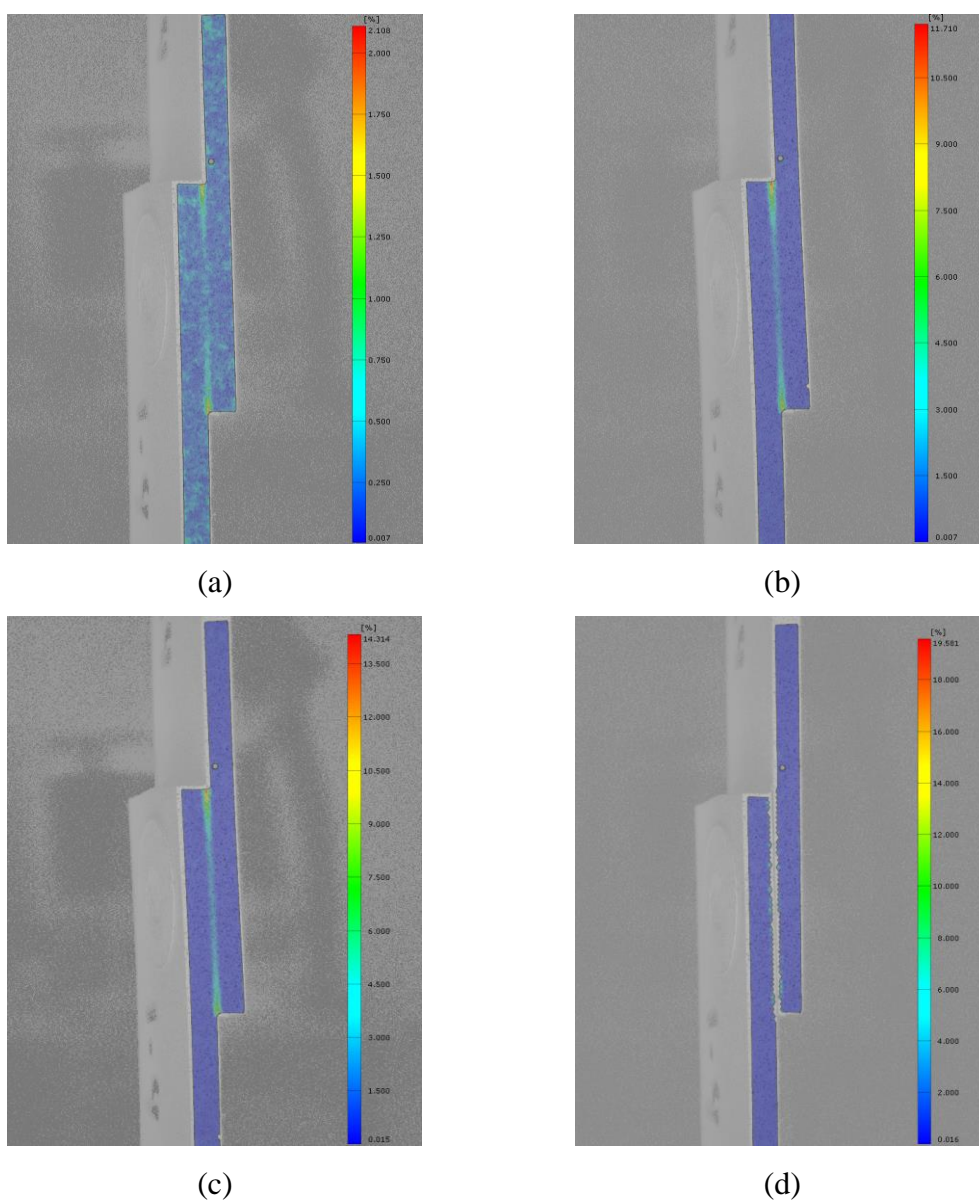


Figura AD 0.1. Provete S870A-2- (a) Estágio 10 (220 N) ; (b) Estágio 17 (424 N); (c) Estágio 21 (1358 N); (d) Estágio 22 (0 N).

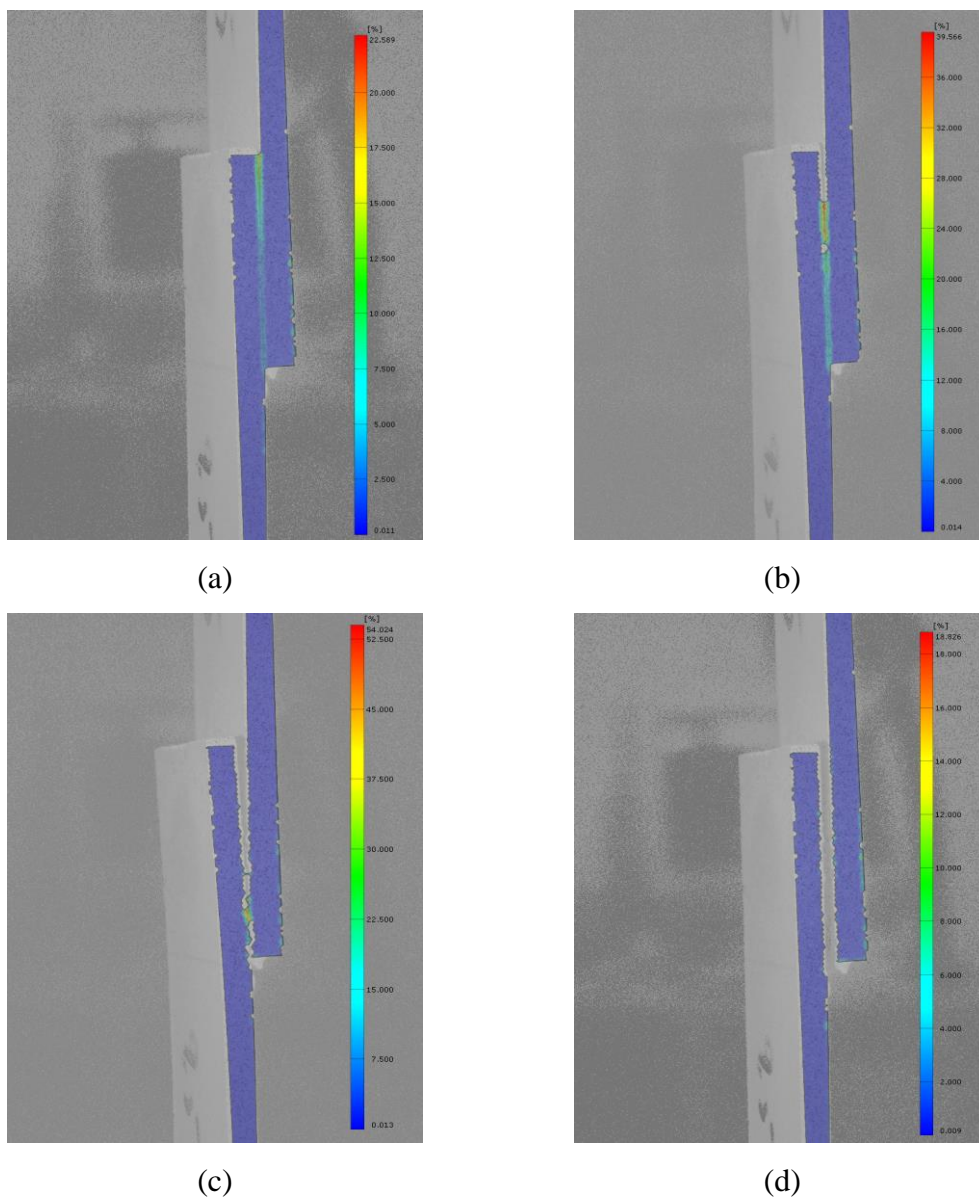


Figura AD 0.2. H870B-2- (a) Estágio 4 (1277 N); (b) Estágio 7 (3436 N); (c) Estágio 11 (5809 N); (d) Estágio 12 (0 N).

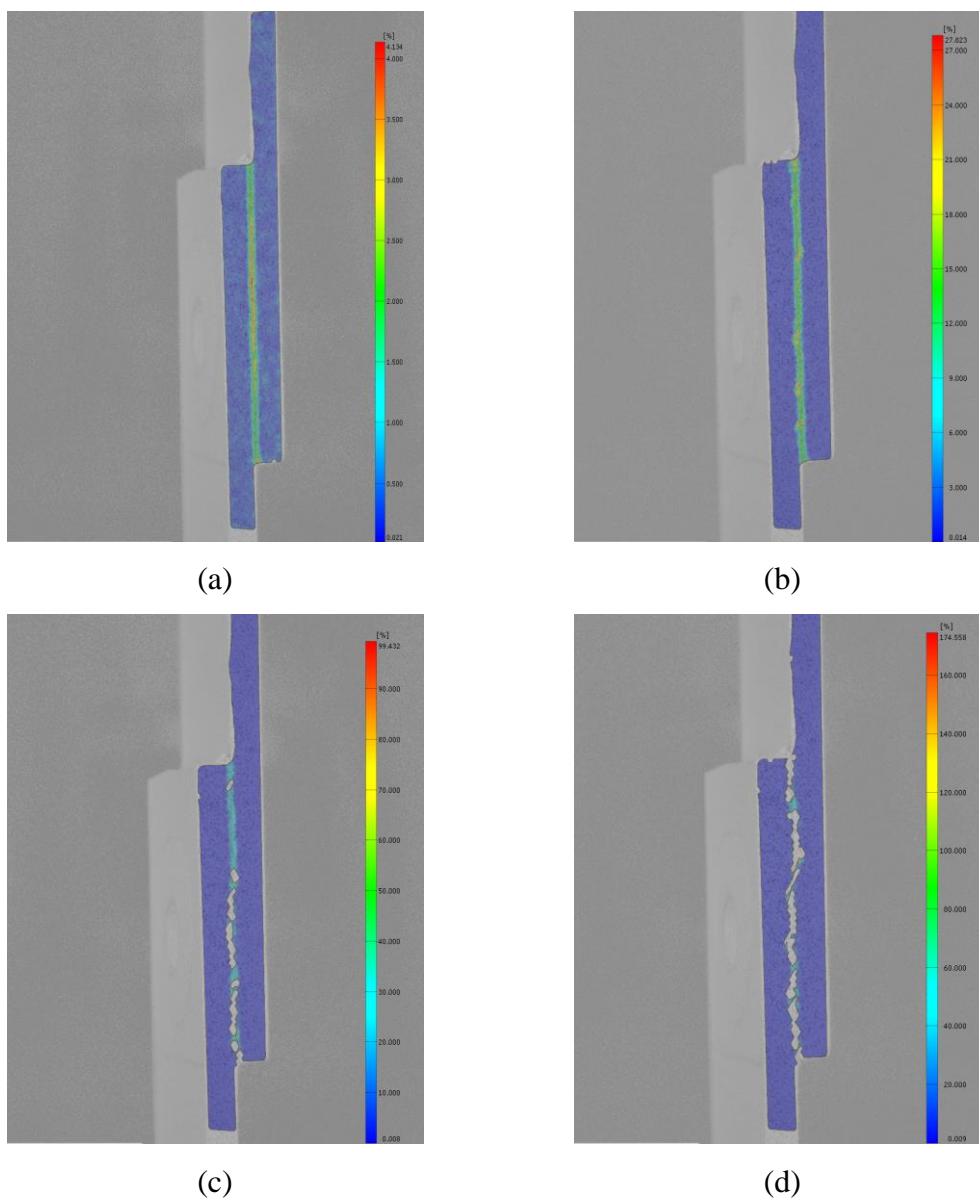


Figura AD 0.3. H870A-3- (a) Estágio 4 (692 N); (b) Estágio 6 (1267 N); (c) Estágio 7 (1465 N); (d) Estágio 8 (0 N).

