

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

APLICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR FRICÇÃO DE UMA
LIGA DE ALUMÍNIO COM E SEM ADESIVO

LUCIANO MEIRELLES SANTANA

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre

2016

Luciano Meirelles Santana

APLICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO DE UMA LIGA DE
ALUMÍNIO COM E SEM ADESIVO

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS e no HZG (*Helmholtz Zentrum Geesthacht* – Alemanha), dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Porto Alegre

Julho de 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS

Coordenador: Carlos Pérez Bergmann

Vice-Coordenador: Afonso Reguly

Santana, Luciano

Aplicação do Processo de Soldagem a Ponto por
Fricção de uma Liga de Alumínio com e sem Adesivo /
Luciano Santana. -- 2016.
162 f.

Orientador: Telmo Roberto Strohaecker.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

1. Alumínio. 2. Soldagem a Ponto por Fricção. 3.
Adesivo. 4. Envelhecimento. 5. Cura. I. Strohaecker,
Telmo Roberto, orient. II. Título.

LUCIANO MEIRELLES SANTANA

APLICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO DE UMA LIGA DE
ALUMÍNIO COM E SEM ADESIVO

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, na área de concentração em Ciências e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Aprovado pela Banca Examinadora em Julho de 2016.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira, COPPE/UFRJ

Dr. Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha, DEMET/UFRGS

Dra. Mariane Chludzinsky, DEMET/UFRGS

Prof. Dr. Carlos P. Bergmann

Coordenador do PPGE3M

Dedico este trabalho “*aos que se arriscam a dançar com a liberdade*”.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Jorge do Santos Santana e Lindalva Meirelles Santana, e aos meus irmãos, Leandro e Sandro, por todo o apoio e incentivo que recebi em toda a minha vida escolar.

Ao meu orientador Prof. Telmo, por me acolher em um momento decisivo de minha vida.

Ao Dr. Jorge dos Santos pela oportunidade de desenvolver esse trabalho e ao Dr. Uceu Suhuddin pela supervisão, amizade e momentos de descontração.

Ao pessoal do LAMEF e, em especial ao Grupo Proeng-CDT, pela amizade e companheirismo.

Aos amigos que fiz no Helmholtz-Zentrum Geesthacht, pelos momentos que sempre levarei na minha memória.

À minha namorada pelo companheirismo e compreensão em diversos momentos de minha vida.

Aos amigos que conservo desde os tempos de colégio, por sempre me incentivarem e acreditarem em mim.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

RESUMO

A indústria automotiva está constantemente pesquisando formas de reduzir o peso dos seus automóveis. As ligas de alumínio possuem baixa densidade e podem ser endurecidas por conformação ou precipitação. Entretanto, apresentam baixa soldabilidade. A Soldagem a Ponto por Fricção é uma técnica de união no estado sólido que supera as dificuldades apresentadas para a soldagem de alumínio. Paralelamente, a união por adesivos estruturais é uma técnica já consolidada na indústria automotiva, apresentando diversas vantagens, tais como distribuição uniforme de tensões, redução de ruídos e vibrações e selamento. Entretanto, juntas adesivadas possuem baixa resistência ao descascamento, quando dois substratos unidos por um adesivo são separados por meio da aplicação de uma solicitação externa na extremidade de um ou nos dois substratos. Além disso, juntas adesivadas necessitam cura para conferir resistência ao material. O emprego simultâneo de solda a ponto por resistência elétrica e união adesiva visa superar essas limitações, pois a solda a ponto aumenta a resistência ao descascamento e mantém os componentes fixados até a cura do adesivo. Além disso, o processo de cura da pintura automotiva é realizado através de um ciclo térmico, o qual tem efeito sobre as ligas de alumínio endurecíveis por precipitação. Os objetivos deste trabalho são encontrar uma faixa de parâmetros para a Soldagem a Ponto por Fricção da liga de alumínio AA6111, com e sem camada adesiva, investigar a interação entre parâmetros de processo, microestrutura e resistência mecânica e estudar o efeito do envelhecimento na junta. As juntas soldadas com e sem adesivo foram produzidas com chapas de 3 mm de espessura e tiveram seus parâmetros analisados visando a sua otimização a fim de obterem os melhores desempenhos sob esforço de cisalhamento e descascamento. Medidas de temperatura, avaliações da microestrutura e dos diferentes modos de falha foram realizados para obter mais conhecimento sobre o processo. Os ensaios de microdureza e o estudo do endurecimento da junta pelo ciclo de cura da pintura foram realizados a fim de estudar o efeito do envelhecimento. Foi possível obter um parâmetro otimizado com resistência ao cisalhamento maior que 8 kN e ao descascamento maior que 2 kN, para juntas soldadas com e sem adesivo. Os resultados mostraram que juntas soldadas com maior velocidade de rotação apresentam maior altura do “gancho” e menor resistência mecânica. O ensaio de microdureza mostrou que, com 6 semanas de envelhecimento natural, o centro da zona de mistura atinge microdureza no mesmo patamar do metal base. O estudo do efeito do ciclo de cura da pintura mostrou que o mesmo aumenta em 16,8% a resistência ao cisalhamento e 6,7% a resistência ao descascamento da junta. Este trabalho mostrou que é possível obter juntas soldadas a ponto por fricção da liga de alumínio AA6111 com propriedades mecânicas que atendem a norma

AWS D17.2 com e sem a utilização de adesivo. Além disso, o endurecimento da junta devido ao envelhecimento mostrou ter efeito benéfico na resistência mecânica.

Palavras-chave: Alumínio. Soldagem a Ponto por Fricção. Adesivo. Envelhecimento. Cura.

ABSTRACT

The automotive industry is constantly making efforts for reducing the weight of their cars. The aluminum alloys have low density and can be hardened by ageing or cold work. However, they have low weldability. The Friction Spot Welding is a joining technique in the solid state, which overcomes the difficulties presented for welding of aluminum. Simultaneously, the joining by structural adhesives is a consolidated technique in the automotive industry, with several advantages. However, adhesive joints have low peel strength, which is when two substrates joined by an adhesive are separated by a load applied in the edge of one of the substrates. Furthermore, adhesive needs cure to achieve strength to the material. The simultaneous use of Resistance Spot Welding and adhesive bonding aims to overcome these limitations because spot welding increases peel strength and maintains the components fixed until the cure of the adhesive. Furthermore, the automotive paint baking is carried out through a thermal cycle, which affects precipitation hardenable aluminum alloys. The objective of this work is to find a parameter range for friction spot welding of aluminum alloy AA6111 with or without adhesive layer and study the effect of aging on the joint. The welded joints with and without adhesive were optimized under shear and peel load. Temperature acquisition, evaluation of microstructure and the different failure modes were performed to achieve more knowledge about the process. The microhardness testing and study of hardening of the joint by paint bake cycle were performed to study the effect of aging. It was possible to obtain an optimized parameter with lap shear strength higher than 8 kN and coach peel strength higher than 2 kN, for welded joints with or without adhesive. The results showed that joints welded with higher rotational speed have a higher "hook" height and lower mechanical strength. The microhardness test showed that, after 6 weeks of natural aging, the center of the stir zone reaches the same microhardness level than the base metal. The study of the paint bake cycle effect showed that it increases by 16.8% the lap shear strength and by 6.7% the coach peel strength of the joint. This work demonstrated that it is possible to obtain friction spot welded joints of AA6111 aluminum alloy with sound mechanical properties with or without the use of adhesive. In addition, the hardening of the joint due aging was found to effect the mechanical strength.

Keywords: Aluminium. Friction Spot Welding. Adhesive. Aging. Paint Bake

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama esquemático do tratamento térmico de solubilização e precipitação das ligas de alumínio.....	7
Figura 2 – Comportamento típico de uma liga de alumínio endurecível por precipitação.	8
Figura 3 – Fenômenos microestruturais que ocorrem durante a soldagem de uma liga de alumínio da série 2XXX.....	10
Figura 4 – Ferramenta de Soldagem a Ponto por Fricção	11
Figura 5 - Variante "Penetração da Camisa" do processo de Soldagem a Ponto por Fricção..	13
Figura 6 - Regiões características de uma junta soldada pelo processo de Soldagem a Ponto por Fricção.....	14
Figura 7 – “Gancho” e zonas de ligação parcial e efetiva de uma junta soldada pelo processo SPF	15
Figura 8 - Ilustração esquemática do ensaio de cisalhamento (a) e representação dos esforços desenvolvidos na região da junção durante o ensaio (b).	16
Figura 9 - Modos de falha típicos (a) Através da Solda, (b) Arrancamento não Circunferencial, (c) Arrancamento Circunferencial. S: Chapa Superior, I: Chapa Inferior.	17
Figura 10 – Caminho típico de propagação da trinca para os diferentes modos de fratura.....	18
Figura 11 – Perfis de Dureza típicos de juntas de ligas de alumínio AA6XXX obtidas pelo processo de SPF.....	19
Figura 12 – Microscopia Eletrônica de Transmissão realizada na zona de mistura de uma junta da liga de alumínio AA 6013 pelo processo <i>FSW</i>	20
Figura 13 - Microscopia Eletrônica de Transmissão realizada zona afetada pelo calor de uma junta da liga de alumínio AA 6013 pelo processo <i>FSW</i>	20
Figura 14 - Ilustração esquemática do modo de falha das uniões adesivas.....	23
Figura 15 – Ilustração de um <i>hem flange</i>	25
Figura 16 - Resultados de ensaio de cisalhamento (a) e fadiga (b) de soldas dissimilares Al/Mg com e sem camada de adesivo.	27
Figura 17 - Fluxograma dos ensaios realizados.	28
Figura 18 – Ilustração da metodologia de aplicação do adesivo.	31
Figura 19 - Corpo de Prova de Teste de Descascamento com adesivo	32
Figura 20 - Máquina de Soldagem a Ponto por Fricção RPS100.....	33
Figura 21 - <i>Box Behnken Design</i>	35

Figura 22 – Configuração dos corpos de prova de Ensaio de Cisalhamento sem e com adesivo. 38

Figura 23 - Configuração do Corpo de Prova de Ensaio de Descascamento sem e com adesivo. 39

Figura 24 - Posição dos termopares..... 40

Figura 25 - Ilustração esquemática das medidas de largura da zona de ligação efetiva (W) e altura do gancho (h)..... 41

Figura 26 - Seções longitudinais das fraturas para análise metalográfica. 41

Figura 27 - Ilustração esquemática das medidas de microdureza. 42

Figura 28 - Análise termogravimétrica do adesivo. 44

Figura 29 – Curva DSC de aquecimento do adesivo..... 45

Figura 30 - Curva DSC de resfriamento do adesivo..... 45

Figura 31 - Curva DSC de aquecimento do adesivo curado..... 46

Figura 32 - Curva DSC do adesivo curado sobreposto à curva TGA..... 47

Figura 33 - Perfis de cura isotérmica do adesivo curado a 140°C, 160°C, 180°C e 200°C. 48

Figura 34 - Curvas de cura isotérmica..... 49

Figura 35 - Tempo para 95% de cura em função da temperatura de cura isotérmica. 49

Figura 36 - Resistência ao cisalhamento do adesivo. 50

Figura 37 – Superfície dos adesivos das amostras de ensaio de cisalhamento rompidas..... 50

Figura 38 - Curva DSC da amostra de adesivo extraído no corpo de prova de ensaio de cisalhamento após teste. 51

Figura 39 - Resistência ao Descascamento do adesivo. 51

Figura 40 – Superfície dos adesivos das amostras de ensaio de descascamento rompidas..... 52

Figura 41 - Contribuição de cada parâmetro na resistência ao cisalhamento sem adesivo. 55

Figura 42 - Gráficos de efeitos principais para a Resistência ao Cisalhamento sem adesivo, a linha pontilhada representa a média dos resultados..... 55

Figura 43 - Gráficos de Interações para a Resistência ao Cisalhamento sem adesivo. 56

Figura 44 – Superfícies de Respostas e Gráficos de Contorno da Resistência ao Cisalhamento sem adesivo em função da Velocidade de Rotação, Profundidade de Penetração e Taxa de Retração. 58

Figura 45 - Gráfico de verificação do modelo de Resistência ao Cisalhamento sem adesivo. 59

Figura 46 - Parâmetro otimizado de acordo com o modelo obtido. 61

Figura 47 - Otimização OFAT para Velocidade de Rotação..... 62

Figura 48- Abordagem OFAT da Taxa de Retração para otimização da Resistência ao Cisalhamento sem adesivo.	63
Figura 49 - Contribuição de cada parâmetro na Resistência ao Cisalhamento com adesivo. ..	67
Figura 50 - Gráficos de efeitos principais para a Resistência ao Cisalhamento com adesivo..	67
Figura 51 - Gráficos de Interações para a Resistência ao Cisalhamento sem adesivo.	68
Figura 52 - Superfície de Resposta e Gráfico de Contorno da Resistência ao Cisalhamento com adesivo em função da Velocidade de Rotação e da Profundidade de Penetração.	69
Figura 53 - Gráfico de verificação do modelo para Resistência ao Cisalhamento das juntas soldas com adesivo.	70
Figura 54 - Parâmetro otimizado de acordo com o modelo obtido.	71
Figura 55 - Abordagem OFAT da Taxa de Retração para a otimização da Resistência ao Cisalhamento sem adesivo.	72
Figura 56 - Abordagem OFAT da Taxa de Penetração para otimização da Resistência ao Cisalhamento com adesivo.	72
Figura 57 - Contribuição de cada parâmetro na Resistência ao Descascamento sem adesivo.	76
Figura 58 - Gráficos de efeitos principais para a Resistência ao Descascamento sem adesivo, a linha pontilhada representa a média dos resultados.....	76
Figura 59 - Gráfico de Contorno da Resistência ao Descascamento sem adesivo em função da Velocidade Rotacional e da Profundidade de Penetração.	77
Figura 60 - Contribuição de cada parâmetro na Resistência ao Descascamento com adesivo	80
Figura 61 - Gráficos de efeitos principais para a Resistência ao Descascamento com adesivo	81
Figura 62 - Gráfico de Contorno da Resistência ao Descascamento com adesivo em função da Velocidade Rotacional e da Profundidade de Penetração.	82
Figura 63 - Gráfico de contorno combinado de Resistência ao Cisalhamento e Resistência ao Descascamento, com valores maiores do que 8 e 2 kN, respectivamente; para ambas as condições (juntas sem e com adesivo).....	83
Figura 64 – Comparação dos valores obtidos de Resistência ao Cisalhamento com a norma AWS D17.2:2013.	85
Figura 65 - Perfil Térmico do processo de soldagem.	86
Figura 66 – Seção transversal de uma junta típica e suas regiões características.	88
Figura 67 - Ilustração Equemática da medição da largura efetiva da junta (W) e da altura do “gancho” (h).	89

Figura 68 - Gráficos da Resistência ao Cisalhamento e Resistência ao Descascamento <i>versus</i> a altura do "gancho" e a largura efetiva da junta.....	95
Figura 69 - Relação entre altura do "gancho" e largura efetiva da junta.....	95
Figura 70 - Gráficos de Efeitos Principais da Velocidade Rotacional, Profundidade de Penetração e Taxa de Retração na Altura do Gancho (acima) e Largura Efetiva da Junta (abaixo).....	96
Figura 71 – Influência da rotação na camada plastificada e formação do “gancho”.....	97
Figura 72 - Resistência ao Cisalhamento e Altura do Gancho <i>versus</i> Velocidade de Rotação	98
Figura 73 - Comparação da microestrutura de uma junta soldada sem adesivo com Baixa Velocidade de Rotação (acima) e alta Velocidade de Rotação (abaixo).....	99
Figura 74 - Detalhe da região do "gancho" de uma junta soldada sem adesivo com baixa Velocidade de Rotação e uma com alta Velocidade de Rotação.....	100
Figura 75 - Comparação entre a microestrutura de uma junta soldada sem adesivo (a) e uma junta soldada com adesivo (b).	101
Figura 76 – Detalhe das impurezas encontradas na interface da junta soldada com adesivo.	102
Figura 77 - Comparação entre a microestrutura de juntas soldadas com adesivo com diferentes velocidades de rotação.....	103
Figura 78 - Relação entre Profundidade de Penetração, Modo de Falha em cisalhamento e altura do "gancho"	105
Figura 79 - Seção longitudinal de uma fratura através da solda.....	106
Figura 80 - Observação via Microscopia Eletrônica de Varredura em uma amostra de fratura Através da Solda.....	107
Figura 81 – Observações em maior magnificação dos pontos indicados na Figura 80.....	108
Figura 82 - Gráfico da Carga <i>versus</i> Deslocamento de uma amostra que falhou Através da Solda.....	109
Figura 83 - Seção longitudinal de uma fratura do tipo Arrancamento não Circunferencial. .	110
Figura 84 - Observações via Microscopia Eletrônica de Varredura em uma fratura do tipo Arrancamento não Circunferencial.....	112
Figura 85 - Observações em maior magnificação dos pontos indicados na Figura 84	Figura 84.
84.	113
Figura 86 – Gráfico da Carga <i>versus</i> Deslocamento de uma amostra que falhou por Arrancamento não Circunferencial.....	114
Figura 87 - Seção longitudinal de uma fratura do tipo Arrancamento Circunferencial	115

Figura 88 - Observações via Microscopia Eletrônica de Varredura no lado direito da chapa superior de uma fratura do tipo Arrancamento Circunferencial.....	116
Figura 89 – Observações em maior magnificação dos pontos indicados na Figura 88.....	117
Figura 90 - Observações via Microscopia Eletrônica de Varredura no lado esquerdo do botão de solda de uma fratura do tipo Arrancamento Circunferencial.....	119
Figura 91 - Gráfico da Carga <i>versus</i> Deslocamento de uma amostra que falhou por Arrancamento Circunferencial.	120
Figura 92 - Perfil de microdureza (como soldado) de uma junta soldada de acordo com a combinação 5.....	121
Figura 93 - Perfil de microdureza ao longo da microestrutura correlacionado com a geometria da ferramenta.	122
Figura 94 - Perfis de Microdureza de várias juntas soldadas de acordo com a combinação de parâmetros 5. Comparação entre a condição "como soldado", 1 semana, 4 semanas, 6 semanas e 10 semanas de envelhecimento natural.....	123
Figura 95 - Comparação entre os perfis de microdureza de dois diferentes parâmetros de soldagem ao longo do tempo.....	124
Figura 96 - Evolução da microdureza da Zona de Mistura durante o tempo de envelhecimento natural.	126
Figura 97 - Comparação entre a Resistência ao Cisalhamento antes e depois do Ciclo de Cura da Pintura.....	128
Figura 98 - Comparação entre a Resistência ao Descascamento antes e depois do Ciclo de Cura da Pintura.	129
Figura 99 - Comparação dos perfis de microdureza antes e depois do Ciclo de Cura da Pintura.....	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistema de designação das ligas de alumínio conformadas.	5
Tabela 2 – Sistema de designação de têmperas para ligas de alumínio.	5
Tabela 3 - Composição química da liga de alumínio.	29
Tabela 4 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio, em temperatura ambiente.	29
Tabela 5 - Parâmetros de processo e níveis.	34
Tabela 6 – Combinações de parâmetros de soldagem.	36
Tabela 7 - Parâmetros selecionados para realizar o estudo de microdureza.	42
Tabela 8 - Parâmetros selecionados para o estudo do ciclo de cura da pintura.	43
Tabela 9 - Valores de Resistência ao cisalhamento para as diferentes combinações do BBD.	53
Tabela 10 - Análise de Variância para Resistência ao Cisalhamento sem adesivo.	54
Tabela 11 - Experimentos de validação para o modelo de resistência ao cisalhamento sem adesivo.	60
Tabela 12 - Resultados de Resistência ao Cisalhamento do parâmetro otimizado de acordo com o modelo obtido.	61
Tabela 13 - Otimização OFAT para Velocidade de Rotação.	61
Tabela 14 - Abordagem OFAT da Taxa de Retração para otimização da Resistência ao Cisalhamento sem adesivo.	62
Tabela 15 - Valores de Resistência ao Cisalhamento com adesivo.	64
Tabela 16 - Análise de Variância do Ensaio de Cisalhamento de juntas soldadas com adesivo.	66
Tabela 17 - Experimentos de validação para o modelo de resistência ao cisalhamento com adesivo.	70
Tabela 18 - Resultado de Resistência ao Cisalhamento do parâmetro otimizado de acordo com a modelo obtido.	71
Tabela 19 - Abordagem OFAT da Profundidade de Penetração para otimização da Resistência ao Cisalhamento com adesivo.	72
Tabela 20 - Abordagem OFAT da Taxa de Retração para otimização da Resistência ao Cisalhamento com adesivo.	72
Tabela 21 - Valores de Resistência ao Descascamento para as diferentes combinações do BBD.	74
Tabela 22 - Análise de Variância do Ensaio de Descascamento de juntas soldadas sem adesivo.	75

Tabela 23 - Valores de Resistência ao Descascamento para as diferentes combinações do BBD.....	78
Tabela 24 - Análise de Variância do Ensaio de Descascamento de juntas soldadas com adesivo.....	79
Tabela 25 – Parâmetro otimizado para Resistência ao Cisalhamento e Resistência ao Descascamento para juntas soldadas sem adesivo e com adesivo.....	84
Tabela 26 - Medidas das características geométricas das juntas.....	94
Tabela 27 - Resultados de RC antes e depois do Ciclo de Cura da Pintura.....	128
Tabela 28 - Resultados de Resistência ao Descascamento antes e depois do Ciclo de Cura da Pintura.....	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	<i>Aluminium Association</i>
AC	Arrancamento Circunferencial
ANC	Arrancamento não Circunferencial
ANOVA	Análise de Variância
AS	Através da Solda
ASM	<i>ASM International</i>
ASTM	<i>ASTM International</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
BBD	<i>Box Behnken Design</i>
CEN	<i>European Comittee for Standardization</i>
CFC	Cúbico de Face Centrada
CPS	<i>Coach Peel Strength</i>
CS	Como Soldado
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
EC	Ensaio de Cisalhamento
FSpW	<i>Friction Spot Welding</i>
FSSW	<i>Friction Stir Spot Welding</i>
FSW	<i>Friction Stir Welding</i>
GP	<i>Guinier-Preston</i>
HV	<i>Hardness Vickers</i>
HZG	<i>Helmholtz Zentrum Geesthacht</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MB	Metal Base
MET	Microscopia Eletrônica de Transmissão
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
OFAT	<i>One Factor at Time</i>
PBC	<i>Paint Bake Cycle</i>
PP	Profundidade de Penetração
RC	Resistência ao Cisalhamento
RD	Resistência ao Descascamento
RPM	Rotações por minuto

RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
RSW	<i>Resistance Spot Welding</i>
SPF	Solda a Ponto por Fricção
TGA	<i>Thermogravimetry Analysis</i>
TR	Taxa de Retração
TS	Tempo de Soldagem
VR	Velocidade de Rotação
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZM	Zona de Mistura
ZTMA	Zona Termomecanicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
MQ_E	Média Quadrática do Erro
$MQ_{Tratamentos}$	Média Quadrática dos Tratamentos
SQ_E	Soma dos Quadrados do Erro
$SQ_{Tratamentos}$	Soma dos Quadrados dos Tratamentos
ΔH_{curado}	Energia de Reação de Cura Residual
$\Delta H_{n\grave{a}o\ curado}$	Energia de Reação de Cura
°C	Graus Celsius
A	Alongamento
Al	Alumínio
cm³	Centímetro cúbico
Cr	Cromo
Cu	Cobre
F	Distribuição F de Snedecor
Fe	Ferro
g	grama
h	altura do “gancho”
Hz	Hertz
J	Joule
k_{NA}	Coefficiente de endurecimento durante o envelhecimento natural
kg	kilograma
kgf	kilograma-força
kN	kiloNewton
log	logaritmo na base decimal
mg	miligrama
Mg	Magnésio
min	minuto
mm	milímetro
Mn	Manganês
MPa	Megapascal
mW	miliWatt
n	Número de Experimentos

N	Newton
R²	Coefficiente de Determinação
R_m	Tensão Máxima
R_{p0,2}	Tensão de Escoamento
Si	Silício
t	tempo
Ti	Titânio
μm	micrômetro
W	Largura Efetiva da Junta
Zn	Zinco
α	Solução Sólida Supersaturada de uma Liga de Alumínio
β	Precipitado Mg ₂ Si
θ	Precipitado CuAl ₂
σ₁	Tensão de escoamento antes do envelhecimento natural
σ_{NA}	Tensão de escoamento após o envelhecimento natural

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	X
LISTA DE TABELAS	XV
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XVII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIX
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 ALUMÍNIO	4
3.1.1 Nomenclatura das ligas e têmperas	5
3.1.2 Endurecimento por precipitação.....	6
3.1.3 Soldagem de ligas de alumínio endurecíveis por precipitação.....	8
3.2 SOLDAGEM A PONTO POR FRICÇÃO (SPF).....	10
3.2.1 Princípios do Processo.....	10
3.2.2 Propriedades Mecânicas e Metalúrgicas.....	13
3.2.2.1 Características Metalúrgicas	13
3.2.2.2 Modos de falha sob esforço cisalhante.....	15
3.2.3 Trabalhos anteriores sobre Soldagem por Fricção de ligas de alumínio AA6XXX	18
3.3 ADESIVO	20
3.3.1 Adesivos para a união de metais.....	21
3.3.2 Princípios e propriedades de juntas obtidas com adesivos estruturais.	22
3.3.3 Solda a ponto com adesivo	25
3.3.4 Trabalhos anteriores sobre soldagem por fricção com adesivo.....	26
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	28

4.1	MATÉRIA PRIMA.....	29
4.1.1	Amostra de alumínio	29
4.1.2	Adesivo.....	29
4.2	APLICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO ADESIVO	29
4.2.1	Análise Termogravimétrica (TGA).....	29
4.2.2	Calorimetria Diferencial de Varredura.....	30
4.2.3	Aplicação do adesivo.....	30
4.2.4	Ensaio de Cisalhamento	31
4.2.5	Ensaio de Descascamento (<i>Coach Peel Strength</i>).....	31
4.3	EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM E FERRAMENTA	32
4.4	PROJETO DE EXPERIMENTOS.....	33
4.4.1	Janela de Processo	33
4.4.2	Box Behnken	34
4.4.3	ANOVA.....	36
4.4.4	Metodologia de Superfície de Resposta, Validação e Otimização.....	37
4.5	ENSAIO DE CISALHAMENTO.....	37
4.6	ENSAIO DE DESCASCAMENTO (<i>COACH PEEL TEST - CPS</i>).....	38
4.7	AQUISIÇÃO DE TEMPERATURA.....	39
4.8	AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	40
4.9	ANÁLISE DA FRATURA.....	41
4.10	ESTUDO DO ENVELHECIMENTO NATURAL	41
4.10.1	Estudo de envelhecimento natural.....	42
4.11	ESTUDO DE ENDURECIMENTO DA JUNTA PELO CICLO TÉRMICO DE CURA DA PINTURA	43
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
5.1	ADESIVO.....	44
5.1.1	Análise Termogravimétrica.....	44

5.1.2	Calorimetria Diferencial de Varredura	44
5.1.2.1	Cura Cinética.....	44
5.1.2.2	Cura Isotérmica	47
5.1.3	Resistência ao Cisalhamento	49
5.1.4	Ensaio de Descascamento.....	51
5.2	ENSAIO DE CISALHAMENTO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM	52
5.2.1	Resistência ao cisalhamento de juntas soldadas sem adesivo	52
5.2.1.1	Análise de Variância	53
5.2.1.2	Metodologia de Superfície de Resposta	57
5.2.1.3	Verificação	59
5.2.1.4	Otimização	60
5.2.2	Resistência ao cisalhamento de juntas soldadas com adesivo.....	63
5.2.2.1	Análise de Variância	65
5.2.2.2	Metodologia de Superfície de Resposta	68
5.2.2.3	Verificação	69
5.2.2.4	Otimização	70
5.3	RESISTÊNCIA AO DESCASCAMENTO	73
5.3.1	Resistência ao Descascamento de juntas soldadas sem adesivo	73
5.3.1.1	Análise de Variância	74
5.3.1.2	Metodologia de Superfície de Resposta	77
5.3.2	Resistência ao Descascamento de juntas soldadas com adesivo.....	78
5.3.2.1	Análise de Variância	79
5.3.2.2	Metodologia de Superfície de Resposta	81
5.4	OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETRO PARA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E RESISTÊNCIA AO DESCASCAMENTO PARA JUNTAS SOLDADAS SEM ADESIVO E COM ADESIVO	82
5.5	PERFIL TÉRMICO DO PROCESSO DE SOLDAGEM.....	85

5.6	AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	86
5.6.1	Juntas soldadas sem adesivo.....	86
5.6.2	Juntas soldadas com camada adesiva.....	101
5.7	ANÁLISE DA FRATURA.....	104
5.7.1	Através da Solda.....	106
5.7.2	Arrancamento Não Circunferencial.....	110
5.7.3	Arrancamento Circunferencial.....	114
5.8	ESTUDO DO ENVELHECIMENTO NATURAL.....	120
5.9	ESTUDO DE ENDURECIMENTO DA JUNTA PELO CICLO TÉRMICO DE CURA DA PINTURA.....	126
5.9.1	Resistência ao Cisalhamento.....	127
5.9.2	Resistência ao Descascamento.....	128
5.9.3	Microdureza.....	129
6.	CONCLUSÕES.....	131
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	134
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135

1. INTRODUÇÃO

Por conta das exigências governamentais a respeito da redução de emissões, impulsionada pela crescente preocupação com o impacto ambiental das atividades humanas, a indústria automotiva está sempre em busca de novas formas de reduzir o peso dos automóveis. A utilização de carros mais leves leva, entre outros benefícios, à redução do consumo de combustível, o que resulta em menor emissão de gases causadores do efeito estufa para a atmosfera e maior economia para o usuário final. (MILLER et al., 2000).

As ligas de alumínio são amplamente empregadas na indústria automotiva. O que a torna tão atrativa é a sua baixa densidade (três vezes menor do que o aço), além da possibilidade de serem endurecidas por trabalho a frio ou tratamento térmico, alcançando uma alta resistência e, portanto, uma boa relação de resistência por peso. (BENEDYK, 2010).

Sendo um metal abundante na crosta terrestre e também reconhecido pela sua alta taxa de reciclabilidade, o alumínio encontrou o seu papel na indústria automotiva. O efeito benéfico da aplicação de alumínio para o meio ambiente pode ser representado pelo estudo que mostrou que o emprego de cada tonelada de alumínio em substituição ao aço reduz em 18 toneladas a emissão de dióxido de carbono para a atmosfera (BENEDYK, 2010). Entretanto, as ligas de alumínio costumam ter baixa soldabilidade, o que afeta o seu emprego em aplicações automotivas. (EFFERTZ et al., 2016)

A Soldagem a Ponto por Fricção (SPF ou Friction Spot Welding – FSpW) é uma técnica de soldagem no estado sólido desenvolvido e patenteada pelo Helmholtz Zentrum Geesthacht sob o número de publicação US6722556 B2 (CHRISTOPH SCHILLING, 2004). Por se tratar de uma técnica de união que ocorre no estado sólido, as dificuldades relacionadas à fusão ou a falta de miscibilidade dos materiais são ausentes. A soldagem de ligas de alumínio através do processo SPF vem sendo estudada há vários anos e tem mostrado bons resultados, sendo essa uma alternativa eficaz para união de componentes. (AMANCIO-FILHO et al., 2011; BRZOSTEK, 2012; EFFERTZ et al., 2016; ROSENDO, 2009)

Em contraste à SPF, a aplicação de adesivos estruturais na união de componentes automotivos já é uma técnica consolidada. A união por adesivagem apresenta diversas vantagens, entre elas a melhor distribuição de tensões, selamento das juntas e boa resistência ao cisalhamento (RC). Além disso, os adesivos podem unir materiais dissimilares em que

seriam impossíveis, ou muito difíceis, de obter uma boa junta por outros meios, tais como metal-polímero, cerâmica-metal ou polímero-cerâmica. (ADAMS, 2005; BARNES; PASHBY, 2000; LUNDER; OLSEN; NISANCIOGLU, 2002; QUINI; MARINUCCI, 2012)

Entretanto, as juntas unidas por adesivos estruturais são conhecidas por terem baixa resistência a solicitações de descascamento. Ainda mais, os adesivos empregados necessitam de um processo térmico de cura para conferir resistência para a união. Por esse motivo, o emprego conjunto da técnica de adesivagem e da Solda a Ponto por Resistência Elétrica (*Resistance Spot Welding - RSW*) é utilizado. Nessa técnica, a soldagem a ponto por resistência é realizada combinada com o adesivo. A junta soldada a ponto tem como função aumentar a resistência da junta sob esforço de descascamento (*peeling*) e manter a estrutura dos componentes automotivos fixos até a realização da cura do adesivo. (HOEHNE, 2013; MENDES, 2005; PEREIRA et al., 2010; ROBERT, 2002; XU et al., 2012)

Outro fator que deve ser considerado na utilização de alumínio na manufatura de automóveis é o ciclo térmico de cura da pintura. As técnicas de pintura utilizadas nos automóveis necessitam que haja a exposição do veículo a um ciclo térmico onde o chassi é aquecido a uma temperatura entre 150-180°C por um tempo entre 20-30 minutos a fim de realizar a cura da pintura. Entretanto, esse ciclo térmico tem efeitos sob as ligas de alumínio endurecíveis por precipitação, tais como as ligas da série 6XXX. É conhecido que essas ligas, quando submetidas a esse tipo de tratamento térmico, podem desenvolver finos precipitados de elementos de ligas dispersos na matriz, o que aumenta a resistência mecânica das mesmas. Apesar dos inúmeros trabalhos já realizados a respeito da aplicação do processo de SPF em ligas de alumínio, poucos estudos foram realizados a respeito da influência do envelhecimento no desempenho mecânica das juntas obtidas por esse processo. (CHEN et al., 2013)

Sendo assim, o estudo da soldabilidade de amostras de 3 mm de espessura da liga de alumínio AA 6111 com ou sem uma camada de adesivo, explora uma nova aplicação da técnica de Soldagem a Ponto por Fricção, aumentando o seu campo de aplicação nos processos envolvidos na indústria automotiva. O estudo do efeito do envelhecimento nas propriedades mecânicas contribuirá para um melhor entendimento do comportamento da junta dentro de um contexto industrial mais amplo, isto é, envolvendo processos posteriores à soldagem.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como escopo estudar a Soldagem a Ponto por Fricção da liga de alumínio AA6111 com ou sem camada adesiva, tendo como objetivos específicos:

- Encontrar uma faixa de parâmetros para a Soldagem a Ponto por Fricção de chapas de 3 mm da liga de alumínio AA 6111-T6 com e sem camada de adesivo que proporcione resistência mecânica satisfatória para aplicação automotiva sob esforços de cisalhamento e descascamento.
- Realizar a soldagem com o menor tempo de processamento possível para o equipamento utilizado, a fim de desenvolver um processo competitivo em âmbito industrial,
- Avaliar a influência dos parâmetros de soldagem sob a microestrutura e comportamento mecânico da junta, buscando compreender as relações entre os parâmetros de soldagem, microestrutura e o desempenho mecânico dos componentes.
- Investigar o efeito do envelhecimento natural e do envelhecimento artificial no desempenho mecânico da junta, através de ensaios de cisalhamento, descascamento e microdureza.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ALUMÍNIO

O alumínio e suas ligas são caracterizados por sua relativamente baixa densidade ($2,7 \text{ g/cm}^3$), alta condutividade elétrica e térmica, e resistência à corrosão em alguns ambientes comuns, incluindo o ambiente atmosférico. As superfícies de alumínio podem ser altamente refletivas, o que torna esse metal muito utilizado em uma variedade de aplicações decorativas e funcionais. Muitas das ligas de alumínio são facilmente conformadas devido a sua alta ductilidade. Como o alumínio tem uma estrutura cristalina do tipo Cúbica de Face Centrada (CFC), sua ductilidade é mantida mesmo em temperaturas muito baixas. A principal limitação do alumínio é sua baixa temperatura de fusão (aproximadamente 660°C), o que limita a temperatura máxima no qual ele pode ser utilizado. (ASM, 1990; CALLISTER, 2007; TOTTEN, 2003)

É conveniente dividir as ligas de alumínio em duas categorias amplas: ligas para fundição e ligas para conformação. A resistência mecânica do alumínio pode ser aumentada por processos de deformação a frio ou por tratamento térmico de precipitação. Entretanto, ambos os processos tendem a diminuir a resistência à corrosão. Os principais elementos de liga incluem cobre, magnésio, silício, manganês e zinco. (ASM, 1990; CALLISTER, 2007)

Ligas não endurecíveis por precipitação consistem de uma fase única, na qual o aumento de resistência mecânica é obtido por encruamento. Há também ligas que podem ser endurecidas por precipitação, as quais são chamadas de tratáveis termicamente. Na maioria dessas ligas, o endurecimento ocorre devido à precipitação de dois elementos diferentes do alumínio que formam um composto intermetálico, tal como o MgZn_2 . (CALLISTER, 2007)

As ligas de alumínio podem ser fundidas ou conformadas por virtualmente todos os processos de fabricação conhecidos. Algumas das aplicações mais comuns das ligas de alumínio incluem componentes estruturais de aeronaves, latas de bebidas, chassis de ônibus e partes automotivas (blocos de motor, pistões e tubos de distribuição). (ASM, 1990; CALLISTER, 2007)

Recentemente, tem sido dada atenção para ligas de alumínio e outros metais de baixa densidade (magnésio e titânio, por exemplo) como materiais de engenharia para transporte, a fim de obter redução no consumo de combustível. (CALLISTER, 2007)

3.1.1 Nomenclatura das ligas e têmperas

Geralmente, as ligas de alumínio são classificadas como fundidas ou conformadas. A composição para ambos os tipos é designada por um número de quatro dígitos. A Tabela 1 descreve brevemente o internacionalmente reconhecido sistema de designação de ligas de alumínio conformadas da *Aluminium Association (AA)*. O primeiro dígito se refere ao principal elemento de liga. O segundo dígito indica a variação da liga principal. O terceiro e o quarto dígito aponta variação individuais na liga. (BENEDYK, 2010)

Tabela 1 - Sistema de designação das ligas de alumínio conformadas.

Designação	Descrição
1XXX	Al puro (99.0% ou mais)
2XXX	Ligas Al-Cu
3XXX	Ligas Al-Mn
4XXX	Ligas Al-Si
5XXX	Ligas Al-Mg
6XXX	Ligas Al-Mg-Si
7XXX	Ligas Al-Zn
8XXX	Al + outros elementos
9XXX	Séries não utilizadas

Fonte: *Aluminium Association*

A Tabela 2 descreve o sistema de designação de têmperas para ligas de alumínio de acordo com a AA e a *European Committee for Standardization (CEN)*.

Tabela 2 – Sistema de designação de têmperas para ligas de alumínio.

Designação	Descrição
F	Como Fabricado
O	Recozido
H	Encruado
W	Solubilizado
T	Tratado Termicamente

Fonte: *Aluminium Association*

Adições de números indicam variações específicas, por exemplo:

- T4 – solubilizado e envelhecido naturalmente
- T6 – solubilizado e envelhecido artificialmente

3.1.2 Endurecimento por precipitação

A resistência das ligas de alumínio da série 6XXX pode ser aumentada através da formação de partículas de segunda fase (β , Mg_2Si) extremamente pequenas e uniformemente distribuídas ao longo da matriz. Este fenômeno pode ser alcançado por meio de transformações de fase que são induzidas por tratamentos térmicos apropriados, recebendo o nome de envelhecimento artificial. Entretanto, a precipitação pode ocorrer naturalmente com o passar do tempo. Nesse caso, chamamos o fenômeno de envelhecimento natural. (CALLISTER, 2007)

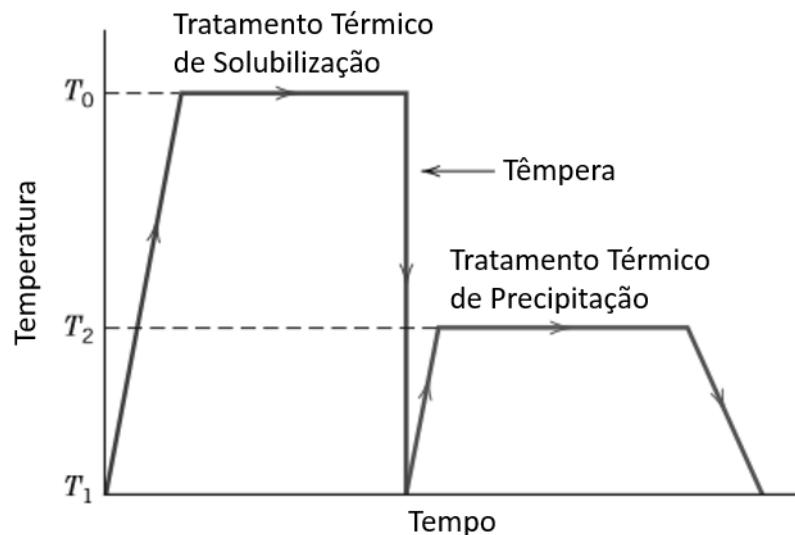
Um gráfico esquemático de temperatura e tempo do tratamento térmico de envelhecimento artificial é mostrado na Figura 1. O endurecimento por precipitação é realizado em duas etapas, a primeira delas é o tratamento térmico de solubilização. Nessa etapa, todos os átomos do soluto são dissolvidos a fim de formar uma solução sólida com uma única fase. A temperatura mínima de solubilização é determinada pela composição da liga. Exceder a temperatura eutética pode causar a fusão incipiente de fases eutéticas, o que é prejudicial para as propriedades mecânicas. (ASM, 1990; CALLISTER, 2007)

A solubilização é seguida por um resfriamento rápido, ou têmpera. Durante a têmpera, a solução sólida supersaturada, bem como as vacâncias, deve ser mantida. Precipitação no contorno de grão e migração de vacâncias para interfaces e contorno de grão não contribuem para o envelhecimento. Em geral, quanto maior a taxa de resfriamento, melhores serão as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão. Entretanto, altas taxas de resfriamento estão associadas com altos níveis de tensões residuais e distorção do produto final. (CALLISTER, 2007; TOTTEN, 2003)

A segunda etapa é o tratamento térmico de precipitação, na qual a solução sólida supersaturada é aquecida para uma temperatura intermediária, na qual as taxas de difusão se tornam apreciáveis. O excesso de vacâncias promove difusão e a formação de zonas de concentração de soluto é substancialmente mais rápida do que em condição de equilíbrio. Durante a precipitação, “clusters” de átomos de solutos são primeiramente formados, seguida

pela formação de precipitados β'' que começam a se formar como partículas finas e dispersas no processo chamado de envelhecimento. Depois de um tempo apropriado na temperatura de envelhecimento, a liga é resfriada até a temperatura ambiente. (CALLISTER, 2007; TOTTEN, 2003)

Figura 1 – Diagrama esquemático do tratamento térmico de solubilização e precipitação das ligas de alumínio

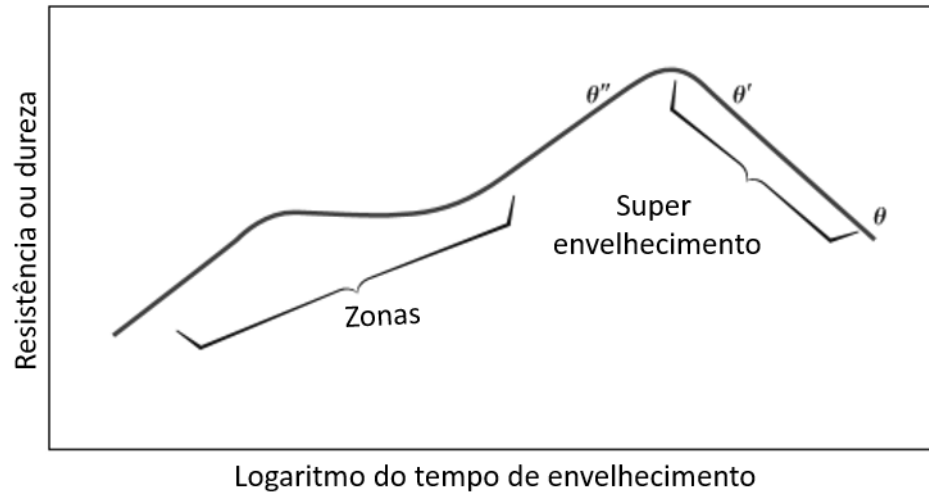


Fonte: Adaptado de CALLISTER (2007)

O comportamento típico de uma liga endurecível por precipitação é representado esquematicamente na Figura 2. O mecanismo de endurecimento é causado por precipitados de átomos do soluto coerentes com a matriz. A diferença de tamanho entre a rede do alumínio e os átomos do soluto causa tensões elásticas na rede cristalina do alumínio. Esses campos de tensões inibem e travam a movimentação de discordâncias, resultando em maiores valores de resistência mecânica. As zonas GP se assemelham mais a uma variação local de concentração de soluto do que com uma fase, sendo totalmente coerentes com a matriz. A estrutura final em uma sequência de precipitação consiste de um precipitado coalescido e em equilíbrio, o que tem um efeito negativo nas propriedades mecânicas. (CALLISTER, 2007; TOTTEN, 2003)

O aumento de dureza durante o envelhecimento natural é contínuo ou se torna estável. Durante o envelhecimento artificial a resistência mecânica e a dureza aumentam, atingindo um máximo, e finalmente diminuindo. A diminuição de resistência devido a elevados tempos de envelhecimento ou altas temperaturas é chamada de superenvelhecimento. (CALLISTER, 2007; TOTTEN, 2003)

Figura 2 – Comportamento típico de uma liga de alumínio endurecível por precipitação.



Fonte: Adaptado de CALLISTER (2007)

Nas ligas de alumínio da série 6XXX (Al-Mg-Si), a decomposição da solução sólida supersaturada resulta na precipitação de β (Mg_2Si) e Si livre (nas ligas com excesso de Si). A fase coerente β'' é um endurecedor eficiente e participa tanto do envelhecimento artificial quanto do natural, a máxima dureza é atingida nas ligas com excesso de Si na fase de precipitação de β'' . Na fase de superenvelhecimento, esta fase dá lugar à fase semicoerente β' . Nas ligas de Al-Mg-Si com adição de cobre, a adição de cobre em concentração menor que 2% acelera a precipitação da fase β'' , refina a partícula a um terço do tamanho e promove a distribuição homogênea dos precipitados (TOTTEN, 2003)

3.1.3 Soldagem de ligas de alumínio endurecíveis por precipitação

As ligas de alumínio podem ser unidas por uma ampla variedade de métodos. Os fatores que afetam a soldagem de alumínio incluem: (ASM, 1990)

- Camada de óxido: A camada de óxido é formada imediatamente em superfícies de alumínio expostas ao ar. Antes de o alumínio poder ser soldado por processos que envolvem fusão, a camada de óxido deve ser removida, caso contrário fragmentos de óxido podem ficar aprisionados no cordão de solda e causar redução na ductilidade, falta de fusão e possivelmente trincas.
- Condutividade térmica: a condutividade térmica do alumínio é cerca de quatro vezes maior do que a condutividade térmica do aço baixo carbono. Isto

significa que para obter a mesma taxa de aquecimento, o calor deve ser fornecido quatro vezes mais rápido para o alumínio do que para o aço.

- Coeficiente de expansão térmica linear: o coeficiente de expansão térmica linear do alumínio é duas vezes maior do que o do aço. Combinado com a alta condutividade térmica, esta propriedade pode causar altas distorções.
- Temperatura de fusão: a quantidade de calor necessário para entrar na faixa de temperatura de soldagem é muito menor para ligas de alumínio.
- Condutividade elétrica: muito importante para Soldagem a *RSW*. O alumínio tem condutividade maior do que o aço, o que significa que são necessárias correntes muito maiores para produzir o mesmo aquecimento. Dessa forma, máquinas utilizadas para *RSW* de alumínio devem ter uma potência maior do que as normalmente utilizadas para aço.

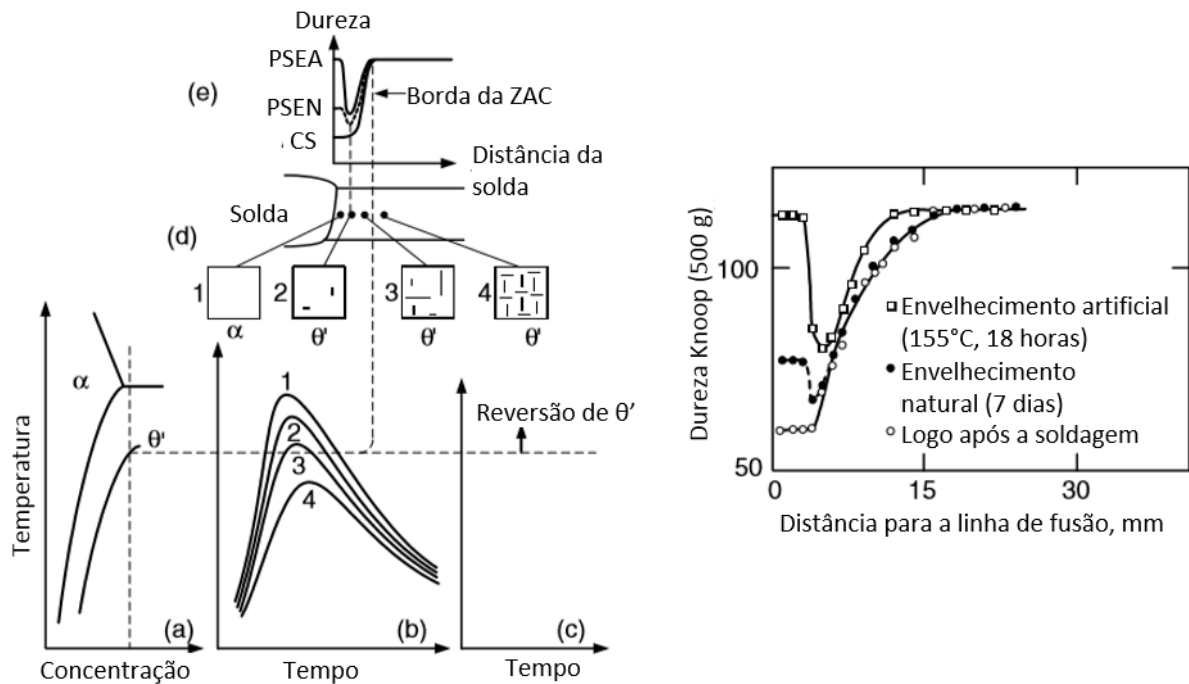
Outra preocupação da soldagem de alumínio por processos que envolvem fusão é a formação de porosidades. Poças de fusão da soldagem de alumínio podem reter quantidades de hidrogênio até 70 vezes maiores do que a solubilidade no ponto de fusão. Durante o rápido resfriamento de uma soldagem típica de alumínio não há tempo suficiente para o hidrogênio ser transportado até a superfície líquida e escapar da poça de fusão. Isto resulta na formação de poros no cordão de solda. A formação de porosidade tem efeito pronunciado na redução do alongamento das juntas soldadas de alumínio (TOTTEN, 2003)

As ligas de alumínio das séries 2XXX e 6XXX são conhecidas por terem a tendência de superenvelhecer durante a soldagem, especialmente quando soldadas na condição T6. (KOU, 2003)

Os fenômenos microestruturais que ocorrem durante a soldagem de uma liga de alumínio endurecível por precipitação da série 2XXX podem ser explicados com o auxílio da Figura 3. O metal base (MB) é tratado termicamente para conter a fase θ' . A posição 4 é aquecida até uma temperatura máxima abaixo da temperatura de solubilização de θ' e, portanto, não é afetada pela soldagem. As posições 2 e 3 são aquecidas até temperaturas acima da temperatura de solubilização de θ' e ocorre reversão parcial. A posição 1 é aquecida a uma temperatura ainda maior e os precipitados θ' são completamente revertidos. A taxa de resfriamento nesse ponto é muito alta para reprecipitação do θ' . A reversão do θ' causa a diminuição de dureza na ZAC, o que fica evidente na condição como soldado (CS). Durante o envelhecimento natural após a soldagem, zonas GP se formam na área solubilizada próxima a

posição 1, causando o aumento da dureza e deixando um mínimo de dureza próximo a posição 2. Durante o envelhecimento artificial, θ'' e θ' precipitam próximo a posição 1 e causam um aumento significativo de dureza. Entretanto, na posição 2, onde ocorreu superenvelhecimento devido ao coalescimento de θ' , a recuperação de dureza não é muito alta. (KOU, 2003)

Figura 3 – Fenômenos microestruturais que ocorrem durante a soldagem de uma liga de alumínio da série 2XXX.



Fonte: Adaptado de KOU (2003)

3.2 SOLDAGEM A PONTO POR FRICÇÃO (SPF)

3.2.1 Princípios do Processo

Soldagem a Ponto por Fricção é um método de união no estado sólido para unir duas ou mais peças por soldagem por fricção, desenvolvido e patenteado pela HZG, Alemanha (CHRISTOPH SCHILLING, 2004). Diferente do processo de Soldagem a Ponto por Fricção e Mistura (*Friction Stir Spot Welding, FSSW*), o processo SPF não deixa um furo no final da operação, proporcionando uma melhor aparência e resistência mecânica da junta, devido ao alívio da concentração de tensões. (ROSENDO et al., 2011; SUHUDDIN et al., 2014)

O processo *SPF* é uma alternativa para substituir outros métodos de união, como rebiteagem e solda a ponto por resistência, uma vez que não há aumento de peso e não há preocupações com a fusão dos componentes. Além disso, a *SPF* pode ser uma alternativa para soldas longas ou, ainda, ser utilizado para reparos como, por exemplo, para preencher o furo remanescente da soldagem por fricção e mistura mecânica (*Friction Stir Welding, FSW*). Ainda, a elevada eficiência energética, o número reduzido de etapas do processo, a alta qualidade superficial, a alta velocidade de soldagem e a reprodutibilidade tornam a *SPF* uma técnica muito competitiva. (ROSENDO et al., 2011; VERÁSTEGUI, 2012)

Sendo um processo de união no estado sólido, o *SPF* pode ser adequado para junção de ligas de baixa soldabilidade ou juntas dissimilares, obtendo propriedades mecânicas satisfatórias quando comparadas com outras técnicas de união a ponto. Por exemplo, estudos anteriores foram realizados em *SPF* dissimilar alumínio-magnésio e alumínio-cobre, obtendo bons resultados. (SHEN et al., 2014a; SUHUDDIN et al., 2014)

O *SPF* é realizado com um conjunto de ferramentas não consumível que consiste em três partes: anel de fixação, camisa e pino, que são acionadas por atuadores independentes, como mostrado na Figura 4. O anel de fixação possui duas funções: (i) garantir o contato entre as chapas a serem soldadas durante o processo e (ii) agir como uma barreira para evitar que o material plastificado seja expelido na forma de rebarba. (ROSENDO et al., 2011)

Figura 4 – Ferramenta de Soldagem a Ponto por Fricção



Fonte: Adaptado de Reimann et al. (2011)

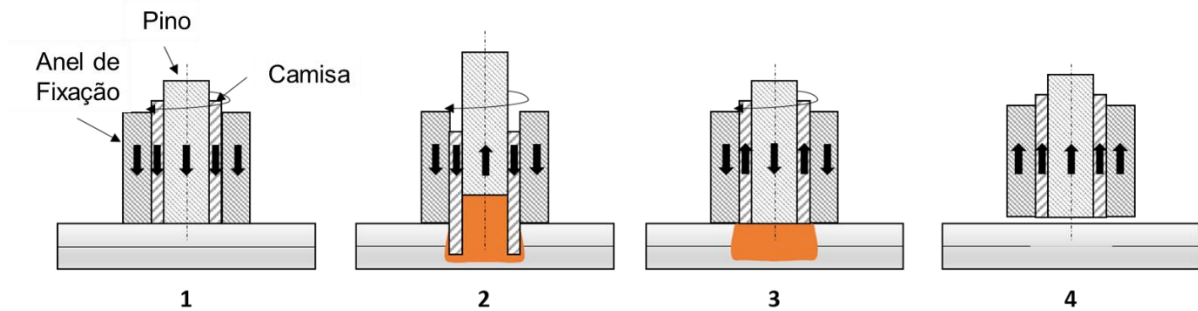
O processo pode ser dividido em duas variações: Penetração do Pino e Penetração da Camisa. Em ambas as variantes, o processo é realizado em quatro etapas. (ROSENDO et al., 2011)

- Etapa 1: as chapas são pressionadas uma contra a outra pelo anel de fixação contra um anteparo. Nesse momento, é iniciada a rotação da camisa e do pino e eles são deslocados até a superfície da chapa superior, produzindo calor.
- Etapa 2: na variante “Penetração da Camisa”, a camisa é penetrada na chapa enquanto o pino se move para cima criando uma cavidade onde o material plastificado é acomodado. Depois de atingir a profundidade de penetração (PP) programada, as ferramentas podem ser mantidas em rotação durante um “tempo de mistura”.
- Etapa 3: o processo é invertido e então pino e camisa retornam para as suas posições iniciais. Este movimento leva o material plastificado de volta para a posição de origem, preenchendo a junta. Um pequeno tempo de permanência das ferramentas rotacionando na superfície da chapa pode ser adicionado nessa etapa do processo a fim de obter melhor acabamento superficial.
- Etapa 4: a força aplicada ao anel de fixação é aliviada e a ferramenta é removida. O resultado final é um botão de solda praticamente plano à superfície da chapa superior.

Na variante “Penetração do Pino”, o pino penetra a chapa e a camisa é movida para cima na segunda etapa. (ROSENDO et al., 2011)

A Figura 5 mostra uma ilustração esquemática da variante “penetração da camisa”. A variante “penetração do pino” é mais fácil de executar por demandar menor intensidade de força e torque, promovendo maior vida útil para as ferramentas. Apesar disso, a variação “penetração da camisa” é mais aplicada, pois proporciona uma junta mais larga e, por consequência, com maior resistência mecânica. (CAMPANELLI et al., 2013; ROSENDO, 2009)

Figura 5 - Variante "Penetração da Camisa" do processo de Soldagem a Ponto por Fricção.



Os parâmetros do processo de soldagem são:

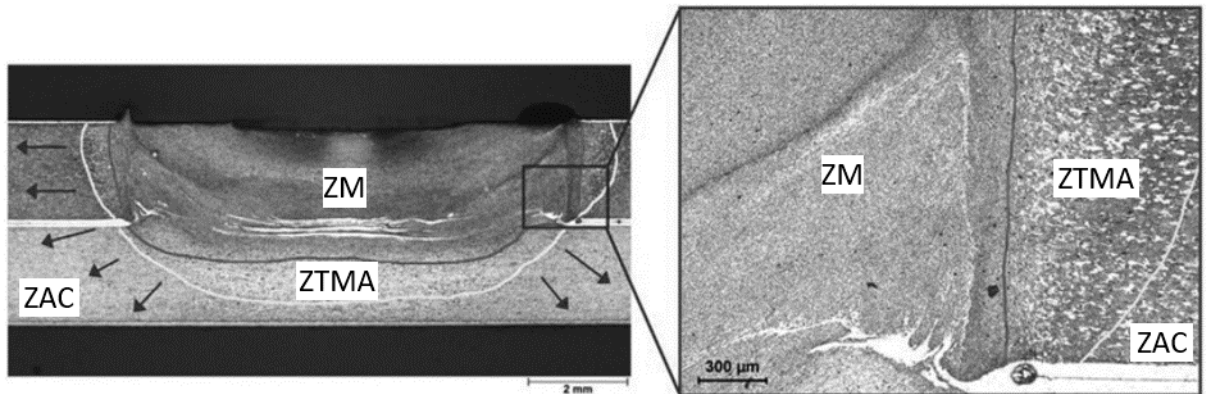
- Velocidade de Rotação (VR): Velocidade rotacional do pino e da camisa durante o processo. Unidade: RPM
- Profundidade de Penetração (PP): Profundidade máxima de penetração atingida pela ferramenta. Unidade: mm
- Taxa de Penetração/Retração (TP, TR) Velocidade com a qual as ferramentas penetram ou retraem. Unidade: mm/s
- Tempo de Mistura (TM): tempo de permanência da ferramenta na penetração máxima. Unidade: (s)
- Tempo de Soldagem (TS): tempo total do processo de soldagem. Unidade: s
- Força de Fixação (FF): Força aplicada pelo equipamento para manter as chapas unidas durante o processo. Unidade: kN.

3.2.2 Propriedades Mecânicas e Metalúrgicas

3.2.2.1 Características Metalúrgicas

Considerando as macrografias obtidas das juntas soldadas pelo processo SPF, é possível perceber a formação de quatro diferentes regiões com tamanho e orientação de grãos característicos. Essas regiões são simétricas em relação ao eixo de rotação das ferramentas e são nomeadas como Zona de Mistura (ZM), Zona Termo-Mecanicamente Afetada (ZTMA), Zona afetada pelo calor (ZAC) e Metal Base (MB). A Figura 6 mostra uma macrografia onde estas regiões estão indicadas. (MAZZAFERRO et al., 2009; SHEN et al., 2014b)

Figura 6 - Regiões características de uma junta soldada pelo processo de Soldagem a Ponto por Fricção.



Fonte: Adaptado de MAZZAFERRO et al. (2009)

No MB é observada a microestrutura original da chapa, isto é, grãos alongados na direção de laminação.

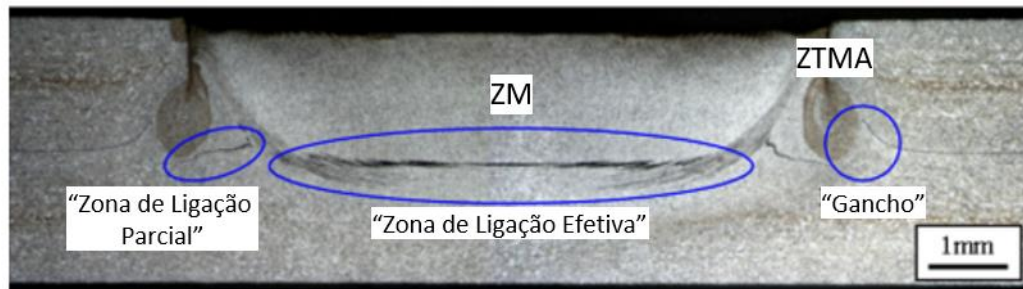
A ZAC é uma região onde não ocorre deformação plástica, entretanto ela é sujeita ao ciclo térmico do processo de soldagem, o que significa que a temperatura pode atingir níveis suficientes para ocasionar a recuperação da microestrutura laminada das chapas, bem como alterações no tratamento térmico da liga. Desta forma, a ZAC apresenta estrutura de grão similar ao MB. (ROSENDO, 2009)

A ZTMA é submetida ao ciclo térmico e à deformação que ocorre durante o processo de SPF. Os grãos desta região apresentam um grau de deformação menor do que os grãos da ZM. O efeito sobre o material depende de suas propriedades. Em geral, ocorrerá recuperação do material ou, eventualmente, modificação das propriedades obtidas pelo tratamento térmico. A ZTMA é localizada adjacente à região de penetração da camisa. (ROSENDO, 2009; SHEN et al., 2014b; ZHAO et al., 2014)

A ZM é misturada deformada diretamente pela ferramenta de soldagem. A elevada rotação da ferramenta leva ao aumento da temperatura local e intensa deformação plástica, promovendo uma mistura entre os materiais da chapa superior e inferior. As condições de deformação e temperatura resultarão na recristalização dinâmica dos materiais. Dessa forma essa região apresenta grãos refinados e equiaxiais. (ROSENDO, 2009; SHEN et al., 2014b; ZHAO et al., 2014)

“Gancho”, zona de ligação parcial e zona de ligação efetiva são características metalúrgicas comuns nas juntas soldadas pelo processo SPF (Figura 7).

Figura 7 – “Gancho” e zonas de ligação parcial e efetiva de uma junta soldada pelo processo SPF



Fonte: Adaptado de ROSENDO et al. (2011)

O “gancho” compreende uma transição entre a interface de separação em meio às chapas originais e a ZM, sendo também observados pontos alternados de ligação metalúrgica entre as chapas sobrepostas. A extremidade do “gancho” fica na região de transição entre a ZTMA e a ZM. Dessa forma, a área de soldagem pode ser considerada tomando como diâmetro a distância entre as extremidades dos “ganchos”. O gancho é formado devido ao movimento ascendente da camisa na terceira etapa do processo, o qual promove o dobramento das chapas. A aparência final e as dimensões do “gancho” são controladas pelos parâmetros de processo, tais como Velocidade de Rotação (VR) e Profundidade de Penetração (PP). (CAMPANELLI, 2012)

Como defeito geométrico, o “gancho” atua como um concentrador de tensões, diminuindo a integridade da junta, pois a trinca pode propagar ao longo do “gancho” quando a junta é submetida a um carregamento externo. Um deslocamento vertical externo, ou uma alta razão entre a altura do “gancho” e a espessura da chapa, facilita os mecanismos de falha sob tensão de cisalhamento. (CAMPANELLI et al., 2013; SHEN et al., 2014b)

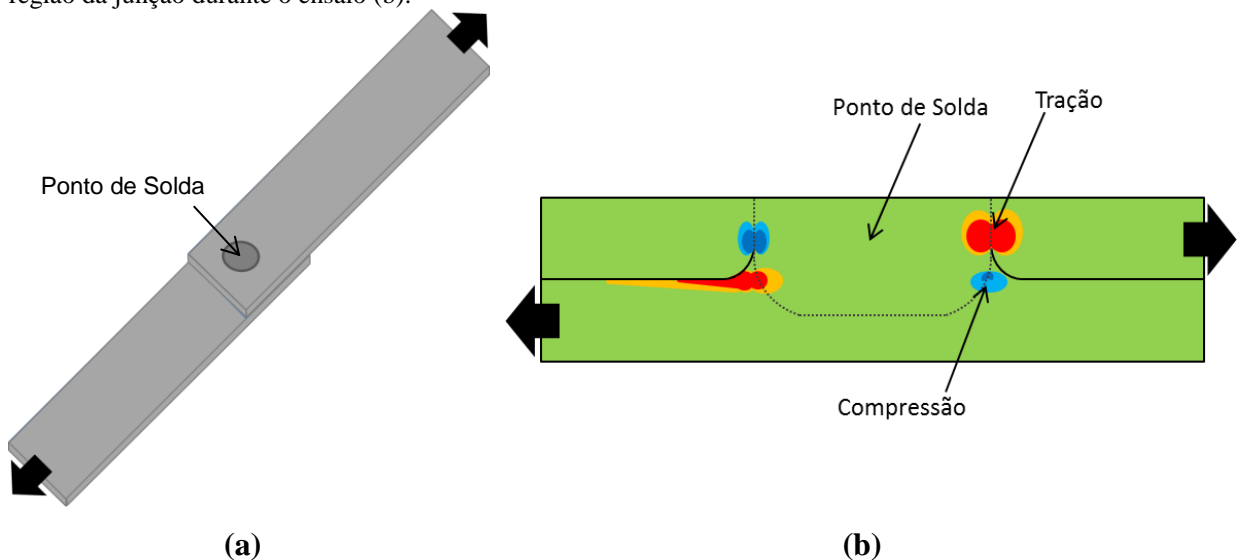
A zona de ligação parcial é uma região de transição na qual a ligação entre as chapas não é muito boa, ocorrendo na periferia da junta. A zona de ligação efetiva é uma região de boa adesão entre as chapas, apresentando resistência superior à zona de ligação parcial, se apresenta no centro da junta. (CAMPANELLI et al., 2013; ROSENDO et al., 2011)

3.2.2.2 Modos de falha sob esforço cisalhante

A norma DIN EN ISO 14272 define o ensaio de cisalhamento. De acordo com a norma, duas chapas sobrepostas são soldadas e submetidas a um esforço de tração, gerando um esforço de cisalhamento na solda ponto, conforme esquematizado na Figura 8 (a). Baseado em resultados disponíveis na literatura, a Figura 8 (b) mostra esquematicamente os esforços

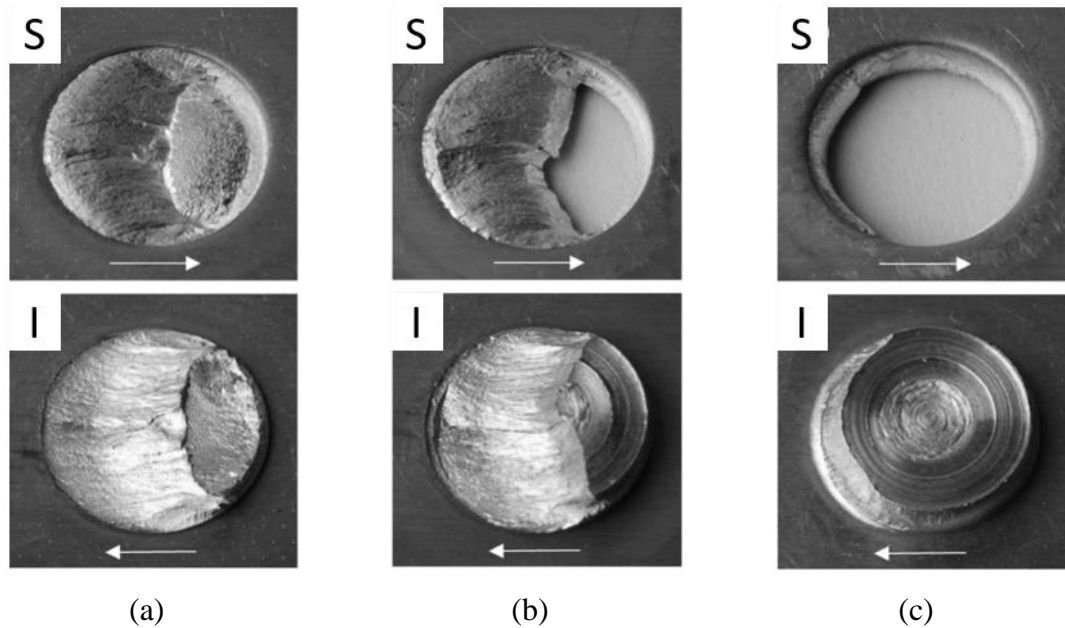
que se desenvolvem na região da junção. (MAZZAFERRO et al. 2009; CAMPANELLI, 2012; BRZOSTEK, 2012) As zonas em vermelho e amarelo mostram as regiões onde são desenvolvidos os maiores esforços de tração, enquanto as zonas azuis representam as regiões onde são desenvolvidos os maiores esforços de compressão. Conforme pode ser observado, os maiores esforços trativos surgem na chapa superior direita, próxima à região localizada na ponta do gancho, e na chapa inferior esquerda. O início das fraturas no ensaio de cisalhamento ocorre preferencialmente nessas regiões de maior tensão trativa.

Figura 8 - Ilustração esquemática do ensaio de cisalhamento (a) e representação dos esforços desenvolvidos na região da junção durante o ensaio (b).



Três diferentes modos de fratura podem ser usualmente observados em amostras soldadas pelo processo SPF quando submetidas ao ensaio de cisalhamento (EC). Os modos de fratura são especificados como: Através da Solda (AS), Arrancamento Não Circunferencial (ANC) e Arrancamento Circunferencial (AC). ANC é observado tipicamente em juntas de melhor qualidade mecânica (alta resistência ao cisalhamento). A Figura 9 mostra os modos de fratura típicos. (CAMPANELLI, 2012)

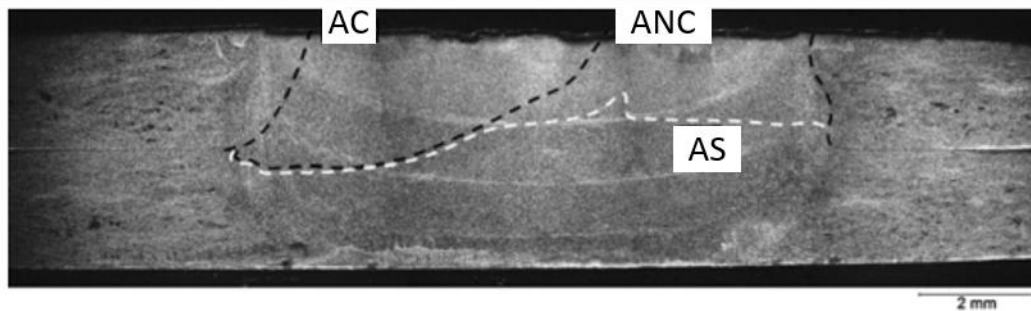
Figura 9 - Modos de falha típicos (a) Através da Solda, (b) Arrancamento não Circunferencial, (c) Arrancamento Circunferencial. S: Chapa Superior, I: Chapa Inferior.



Fonte: Adaptado de (CAMPANELLI, 2012)

A Figura 10 mostra o caminho de propagação da trinca dos três diferentes modos de fratura com linhas pontilhadas. No modo AS, a trinca propaga seguindo uma trajetória aproximadamente paralela à direção de carregamento, atravessando a zona recristalizada até a separação das chapas. O modo de falha ANC também ocorre através da zona recristalizada. Entretanto, neste caso, a propagação começa paralela à superfície e vira aproximadamente 20° em relação à direção de carregamento, formando uma superfície de fratura comprimida na chapa superior, resultando em uma remoção parcial do ponto de solda. Fratura do tipo AC ocorre quando a trinca cresce próximo à fronteira entre a ZM e a ZTMA; a propagação ocorre até atingir a superfície, gerando uma típica zona de cisalhamento a 45° da direção de carregamento. Desta forma, o ponto de solda é arrancado da junta, ficando completamente colado à chapa inferior. (CAMPANELLI et al., 2013)

Figura 10 – Caminho típico de propagação da trinca para os diferentes modos de fratura.



Adaptado de: (CAMPANELLI et al., 2013)

3.2.3 Trabalhos anteriores sobre Soldagem por Fricção de ligas de alumínio AA6XXX

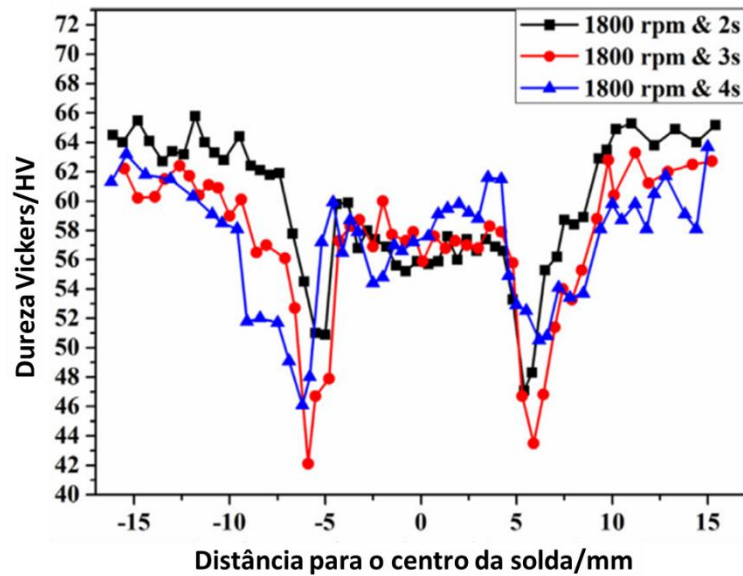
Rosendo (2009) investigou o processo SPF de juntas de chapas com 1,7 mm de espessura da liga de alumínio AA6181 na condição T4. A combinação otimizada de parâmetros de soldagem de 1900 RPM, considerado baixa para o trabalho e tempo moderado de soldagem (3 s). Foi observado que o tempo mais longo de processo implica num maior aporte de energia, resultando em melhores propriedades de ligação da Zona de Ligação Efetiva e da Zona de Ligação Parcial.

Cao et al. (2016) examinou a formação do “gancho” e as propriedades mecânicas de juntas soldadas por SPF da liga de alumínio 6061-T6. Chapas com 2 mm de espessura foram utilizadas para produzir juntas sobrepostas. O maior valor de RC obtido foi de 9093 N para uma junta soldada com VR: 1500 RPM e PP: 2,1 mm. Também foi constatado que a altura do “gancho” tem uma correlação positiva com a VR, tempo de soldagem (TS) e PP. Por sua vez, a RC diminui com o aumento da altura do gancho. Além disso, foi observado que PP é o parâmetro mais significativo que afeta a resistência da junta, seguido pelo TS e a VR.

Shen et al. (2014b) examinou a microestrutura e propriedades mecânicas de juntas soldadas a ponto por fricção de chapas de 2 mm de espessura da liga de alumínio AA6061-T4. A RC máxima obtida foi de 7117 N para a condição de soldagem com VR: 1500 RPM e duração de 4 s. A Figura 11 mostra a distribuição representativa de microdureza na metade da espessura da chapa superior de uma junta obtida neste trabalho. A distribuição de dureza é simétrica em relação à linha de centro da solda, apresentando uma aparência em formato de W, na qual a região soldada tem uma dureza inferior que a do MB. A dureza da ZAC decresce progressivamente em direção ao centro da solda alcançando o valor mínimo na fronteira entre ZTMA e ZM. Então a dureza aumenta e atinge um patamar na ZM. O decréscimo na dureza na ZAC pode ser associado ao aumento de grão e a dissolução ou coalescimento de Mg_2Si

(β). A ZTMA e a ZM passam por deformação plástica intensa, e o ciclo térmico é maior do que na ZAC, o que resulta em dissolução dos precipitados. Como resultado, a variação de dureza na ZTMA e ZM pode ser atribuída à variação do tamanho de grão e dissolução dos precipitados. Além disso, a dureza da ZM é maior do que a ZTMA devido ao menor tamanho de grão, uma vez que a ZM passa por uma agitação mais intensa do que a ZTMA.

Figura 11 – Perfis de Dureza típicos de juntas de ligas de alumínio AA6XXX obtidas pelo processo de SPF.



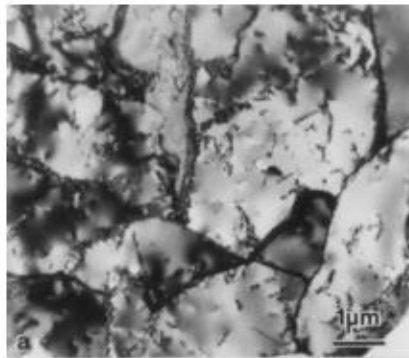
Fonte: Adaptado de SHEN et al. (2014b)

Chen et al. (2013) investigou o efeito do ciclo térmico de cura da pintura no desempenho de uma junta de alumínio produzida pelo processo FSSW de chapas da liga de alumínio AA6111 com 1,0 mm de espessura. Após a simulação do ciclo térmico de cura da pintura com temperatura de 180°C e tempo de 30 minutos, foi observado que a junta passa a apresentar uma dureza maior do que o MB e significativo aumento da RC. Na condição “como soldado” a carga máxima de falha foi em média de 3 kN. Depois da simulação do ciclo térmico de cura a carga máxima de falha aumentou para cerca de 4 kN.

Heinz (2002) caracterizou uma junta produzida pelo processo FSW da liga de alumínio AA6013 nas condições T4 e T6. Foram avaliados, entre outras características, a microestrutura, microdureza e resistência à tração. O perfil de microdureza para a junta produzida com o material na condição T6 também mostrou uma aparência semelhante a um W, com a ZM apresentando menor dureza que o material base. Investigações por meio de Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) da ZM mostrou pequenos grãos

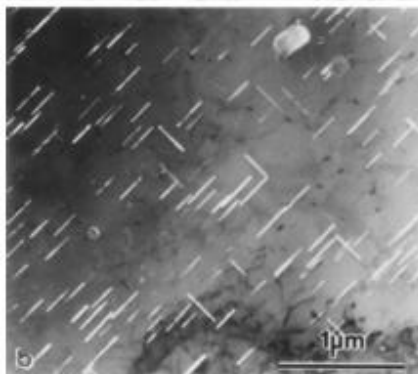
recristalizados contendo sub-grãos e ausência de precipitados, indicando que os precipitados que existiam previamente dissolveram durante a soldagem (Figura 12). Da mesma forma, investigações utilizando MET foram realizadas na ZAC, mostrando precipitados muito maiores no interior dos grãos quando comparados com o MB. Esta microestrutura representa uma condição superenvelhecida devido ao ciclo térmico do processo de soldagem (Figura 13). Nos ensaios de tração realizados nas juntas, as falhas ocorreram na ZAC. Isso indica que esta é a parte de menor resistência do material soldado devido ao superenvelhecimento. (HEINZ; SKROTZKI, 2002)

Figura 12 – Microscopia Eletrônica de Transmissão realizada na zona de mistura de uma junta da liga de alumínio AA 6013 pelo processo *FSW*.



Fonte: (HEINZ; SKROTZKI, 2002)

Figura 13 - Microscopia Eletrônica de Transmissão realizada zona afetada pelo calor de uma junta da liga de alumínio AA 6013 pelo processo *FSW*.



Fonte: (HEINZ; SKROTZKI, 2002)

Vários trabalhos reportaram comportamento similar nos perfis de microdureza e da microestrutura de juntas de alumínio da série 6XXX obtidas por processos de soldagem por fricção. (MOREIRA et al., 2009; SATO et al., 1999; SCIALPI et al., 2008)

3.3 ADESIVO

3.3.1 Adesivos para a união de metais

Conforme a ASTM D907-15 (2016), adesivo é a substância capaz de reter materiais juntos pela superfície de contato.

A união adesiva tem conquistado muita popularidade nas últimas décadas devido às muitas vantagens que ela oferece quando comparadas com técnicas mecânicas clássicas: (ABDEL WAHAB, 2012; BARNES; PASHBY, 2000)

- Não deforma os componentes unidos como na soldagem a arco elétrico.
- A união adesiva produz uma junta contínua, resultando em uma distribuição de esforços mais uniforme ao longo de áreas maiores.
- Juntas obtidas através de união adesiva têm uma boa absorção de energia e tem a tendência a ter boa atenuação de vibração e ruídos.
- Além de fornecer boa resistência mecânica, o adesivo sela a junta contra ingresso de umidade e sujidades.
- A junção contínua e suave reduz a concentração de tensão nas extremidades da junta.
- União adesiva tem alta resistência em esforço de cisalhamento.
- Metais dissimilares podem ser unidos através de adesivos, uma vez que a camada adesiva previne o contato íntimo entre os metais, o que poderia levar à corrosão galvânica.

Entretanto, a união adesiva tem algumas limitações. (BARNES; PASHBY, 2000; HOEHNE, 2013)

- Os adesivos de alto desempenho atuais têm sistema epóxi ou baseado em solvente. Logo, é necessário preocupar-se a respeito de saúde e segurança, como extração adequada de fumos, roupas protetivas e armazenamento apropriado.
- Adesivos estruturais necessitam de cura por aquecimento, o que significa a necessidade de um estágio adicional de processamento.
- Adesivos tem uma vida útil limitada, logo é necessário maior cuidado no controle de estoque desses materiais.

- Juntas adesivas são inerentemente fracas em esforços de descascamento (*peeling*).
- A resistência da junta colada é limitada em condições extremas de calor ou umidade, devido à natureza polimérica do adesivo.
- A união adesiva necessita de dispositivos de fixação durante a cura.
- União adesiva necessita de pré-tratamento superficial para remover contaminantes, tais como lubrificantes e óleos, e para promover ancoramento do adesivo. Os tratamentos mais bem sucedidos e amplamente utilizados na indústria aeroespacial não são amigáveis ambientalmente. Alguns deles possuem produtos baseados em cromo hexavalente.
- Não há técnicas confiáveis de ensaios não destrutivos capazes de detectar defeitos em camadas adesivas.

3.3.2 Princípios e propriedades de juntas obtidas com adesivos estruturais.

Em termos de substâncias envolvidas, o componente essencial de um adesivo ou selante é um polímero orgânico, ou um ou mais componentes (geralmente dois) que podem reagir quimicamente para produzir um polímero. No momento da aplicação, o adesivo ou selante deve ser líquido, pois isso permite o contato molecular íntimo entre o adesivo e os aderentes, isto é, molhar a superfície. Em seguida, o adesivo deve ser endurecido (curado) tornando-se um sólido coesivo. (ADAMS, 2005)

Adesivos e selantes podem ser classificados pela maneira na qual endurecem. Isto pode ocorrer por perda de solvente, perda de água, resfriamento ou reação química. Uma vez endurecido, o polímero presente no adesivo pode ser linear ou reticulado. O ato de formar ligações cruzadas (reticular) torna o polímero insolúvel e infusível e reduz muito a fluência. Todos os adesivos estruturais são reticulados. (ADAMS, 2005)

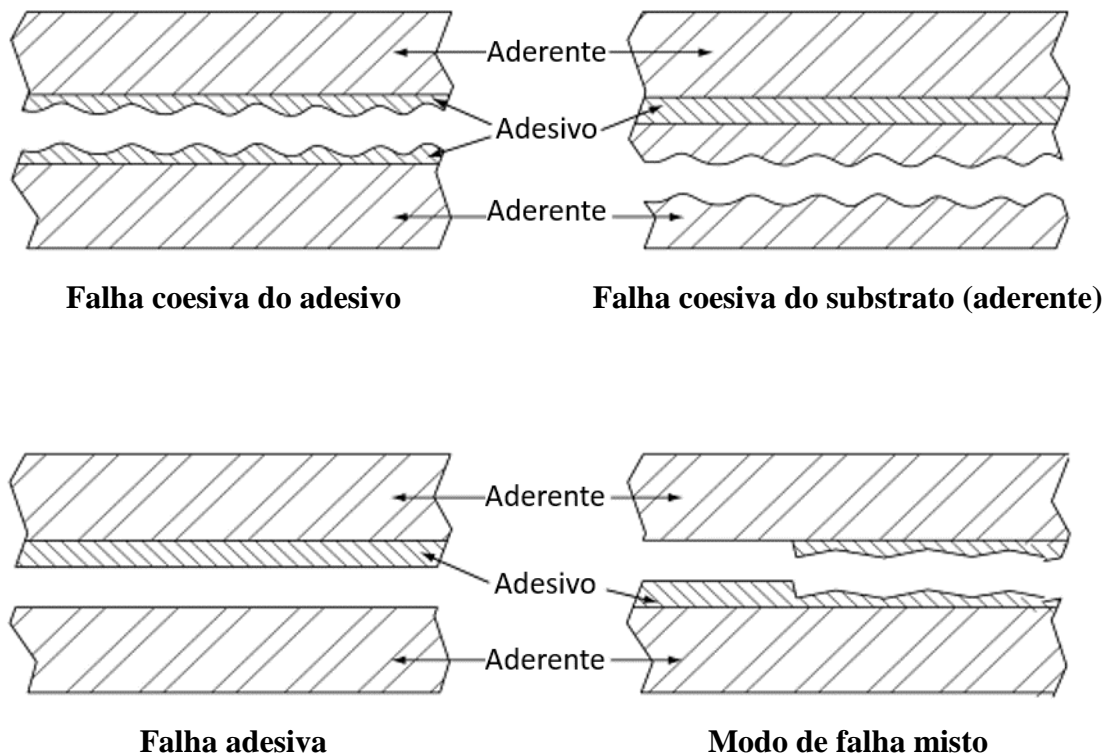
Os adesivos de base química epoxídica são os adesivos estruturais mais bem conhecidos e amplamente utilizados e eles endurecem por reação química. Eles foram introduzidos comercialmente em 1946 e têm vasta aplicação no mercado automotivo e aeroespacial. Há somente poucas resinas epóxi comerciais, mas elas podem ser misturadas com uma ampla variedade de endurecedores, o que incluem aminas e ácidos anidridos. (ADAMS, 2005; MENDES, 2005)

Há quatro teorias básicas a respeito da união adesiva que atribuem a resistência da união à: rugosidade da superfície, difusão do adesivo para a superfície de ligação, atração molecular fraca, ou uma combinação de ligação molecular fraca e ligações químicas entre o adesivo e a superfície dos aderentes. A última teoria é comumente conhecida como teoria da adsorção e é a mais amplamente aceita, apesar de que a combinação de diferentes mecanismos é mais provavelmente a responsável pela ligação. (BALDAN, 2012; DAVIS; BOND, 1999)

A teoria da adsorção argumenta que os materiais vão aderir devido às forças interatômicas e intermoleculares que são estabelecidas entre os átomos e moléculas na superfície do adesivo e do substrato depois do seu contato íntimo. Esta teoria diz que para ser bem sucedido, um adesivo deve molhar a superfície a ser unida. (BALDAN, 2012)

Ligações adesivas podem falhar adesivamente ou coesivamente. A falha adesiva é a falha interfacial que ocorre entre a interface do adesivo e um dos aderentes. A falha coesiva ocorre quando a fratura permite que uma camada de adesivo permaneça em ambas as superfícies. Quando o aderente falha antes do adesivo é conhecido como falha coesiva do substrato. Ilustrações esquemáticas dos modos de falha são mostradas na Figura 14. (EBNESAJJAD, 2011; MESSLER, 2004).

Figura 14 - Ilustração esquemática do modo de falha das uniões adesivas.



Fonte: Adaptado de (MESSLER, 2004)

Falha coesiva através do adesivo ou um dos aderentes é o tipo ideal de falha, pois nesta situação a resistência máxima dos materiais na junta foi atingida. Falhas coesivas encontradas em campo são tipicamente causadas por projeto equivocado da junta (comprimento insuficiente de sobreposição ou excessivo esforço de descascamento), embora porosidade excessiva possa resultar também em falha coesiva. (DAVIS; BOND, 1999; EBNESAJJAD, 2011; MESSLER, 2004)

Falha adesiva ocorre ao longo na interface entre a camada de adesivo e os aderentes e ocorre devido à hidratação das ligações químicas que formam o elo entre o adesivo e a superfície. Ligações entre aderentes de alumínio normalmente falham porque o óxido metálico se converte para sua forma hidratada a qual causa dissociação das ligações químicas do adesivo com o aderente. Qualquer falha adesiva que ocorre durante serviço é um resultado direto do processo de manufatura. (DAVIS; BOND, 1999)

Existem três causas de falha adesiva: (DAVIS; BOND, 1999)

- Falha em gerar uma superfície quimicamente ativa devido a não efetividade ou contaminação no processo de preparação da superfície.
- Uso de uma técnica de preparação de superfície inapropriada.
- O adesivo curou antes de a ligação ser formada.

Falha das juntas adesivas em serviço ou durante teste normalmente não é puramente adesiva ou coesiva, acontece normalmente uma mistura de ambos os modos. Por esta razão, o modo de falha é frequentemente expresso como uma porcentagem de falha adesiva ou coesiva, onde a falha ideal é 100% coesiva ao longo da camada de adesivo. (EBNESAJJAD, 2011; MESSLER, 2004)

O modo de falha não deve ser usado como o único critério de uma boa junta. Algumas combinações de adesivos e aderentes podem falhar adesivamente, mas exibir uma resistência maior do que uma junta similar com um adesivo mais fraco que falha coesivamente. Na prática, a resistência máxima da junta é normalmente utilizada como critério mais relevante. A análise do modo de falha, contudo, pode ser uma ferramenta muito útil para determinar se uma falha ocorreu devido a uma camada adesiva fraca ou à preparação deficiente da superfície. (EBNESAJJAD, 2011; MESSLER, 2004)

Juntas adesivadas são muito resistentes à fadiga e apenas sob devidas circunstâncias uma falha coesiva será causada por fadiga. Desde que uma junta tenha comprimento de

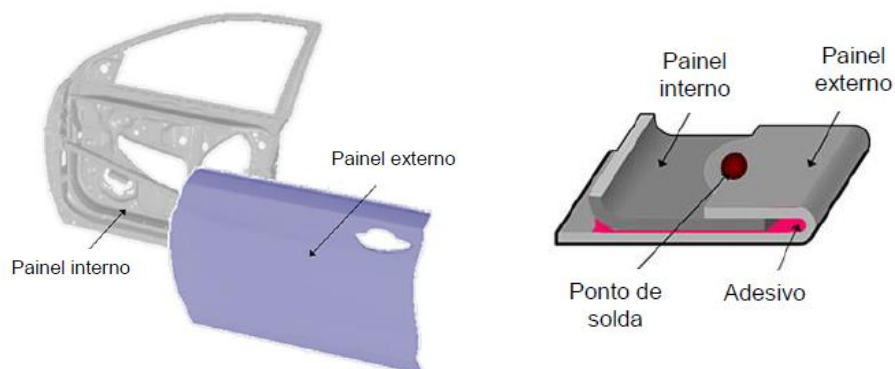
sobreposição suficiente e aderentes finos, é pouco provável que ocorra fadiga da união. Falhas por fadiga em juntas adesivadas normalmente ocorrem somente quando a estrutura a ser unida é muito espessa ou quando os esforços são altos. As falhas por fadiga sempre ocorrem no adesivo, não na interface. (ABDEL WAHAB, 2012; DAVIS; BOND, 1999)

3.3.3 Solda a ponto com adesivo

Solda a ponto com adesivo é a combinação do ponto de solda por resistência elétrica com a aplicação do adesivo estrutural. O adesivo é aplicado entre os componentes a serem unidos e a corrente elétrica é aplicada, atravessando o material adesivo. A força de compressão aplicada pelos eletrodos na operação de solda expulsa o excesso do adesivo da região específica do ponto, criando um caminho para a passagem da corrente. (MENDES, 2005)

Neste tipo de junta, a função adicional do ponto de solda é manter unidos e posicionados os componentes a serem unidos pelo adesivo até o seu período total de cura. Além disso, os pontos de solda reduzem a susceptibilidade do adesivo às cargas de descascamento. Um exemplo de aplicação na manufatura automotiva onde esse tipo de junta híbrida pode ser observada é a junção de painéis através do processo denominado *hemming flange*, ou dobramento (Figura 15). (AWS, 1991; BRISKHAM et al., 2006; HOEHNE, 2013; MENDES, 2005; NIKS, [s.d.]; VIJAYENTHIRAN, 2013)

Figura 15 – Ilustração de um *hem flange*.



Fonte: (VIJAYENTHIRAN, 2013)

A combinação de solda a ponto e adesivo pode proporcionar as vantagens de ambos os processos enquanto minimiza as desvantagens. Quando comparado com a solda a ponto ou

união adesiva sozinha, a solda a ponto com adesivo oferece as seguintes vantagens: (PETRIE, 2013)

- Maior vida em fadiga, uma vez que a concentração de tensões na junta é reduzida.
- Maior absorção de energia (tenacidade).
- Maior durabilidade.
- Maior tolerância a altas temperaturas.
- A solda ponto prende a junta dispensando a necessidade de ferramentas de alto custo para prender as juntas
- Solda ponto com adesivo automaticamente proporciona uma função de selagem da junta, enquanto em juntas mecânicas é necessário um processo adicional.
- Esforços nas juntas soldadas a ponto com adesivo são menores e mais uniformes do que nas juntas somente soldadas a ponto.

Não obstante, há preocupações a respeito da aplicação dessa técnica. A maior delas é o quão difícil é a aplicação do processo na prática. Se o adesivo for aplicado anteriormente à soldagem, ele não deve prejudicar a formação da solda ou a integridade da mesma devido à contaminação. Alternativamente, devem ser encontrados meios de eliminar o adesivo da área a ser soldada. (ROBERT, 2002)

Uma nova abordagem no processo de união seria a seleção de um processo de soldagem capaz de tolerar a presença do adesivo ou remover o adesivo durante o processo. Não há métodos conhecidos de solda por fusão capazes de tolerar a presença do adesivo, pois os mesmos geram porosidade através da liberação de gases ou resíduos carbonosos devido à decomposição do adesivo. (ROBERT, 2002)

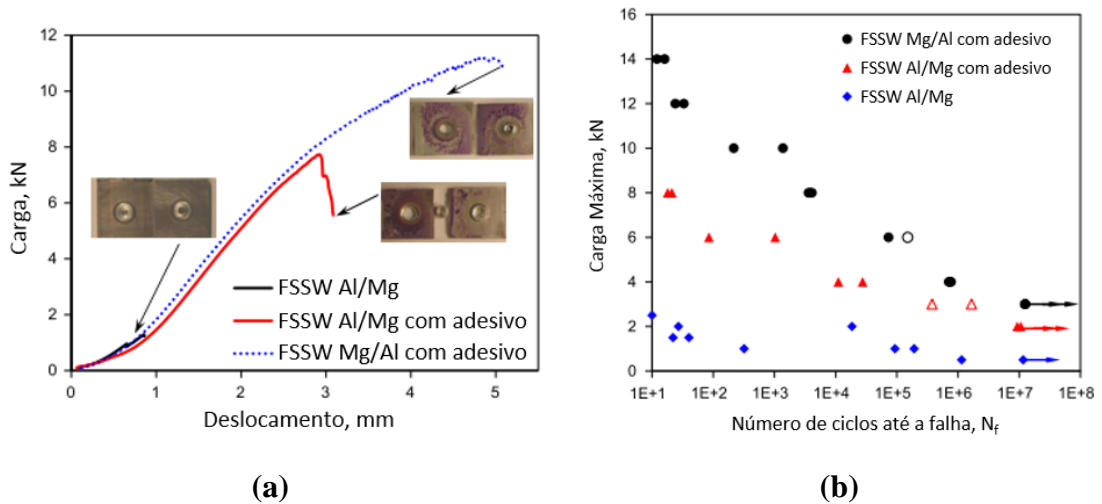
A *RSW* remove efetivamente o adesivo da região soldada, pois a pressão aplicada pelos eletrodos espreme o adesivo para fora da região soldada. Acredita-se que processos sem fusão e com aplicação de pressão, como soldagem ultrassônica ou soldagem por fricção sejam eficientes para a aplicação dessa técnica híbrida de união. (ROBERT, 2002)

3.3.4 Trabalhos anteriores sobre soldagem por fricção com adesivo

Chowdhury et al. (2013) avaliou a RC e o comportamento em fadiga de uma junta dissimilar de liga de magnésio AZ31B-H24 e liga de alumínio AA 5754-O unidas pelo

processo de *FSSW*. Foram avaliadas três combinações: Al (chapa superior) / Mg (chapa inferior), Al/Mg com camada de adesivo e Mg/Al com camada de adesivo. Ambas as soldas dissimilares Mg/Al e Al/Mg com adesivo tiveram uma resistência ao cisalhamento e vida em fadiga significativamente maiores do que a junta dissimilar Al/Mg sem a camada adesiva (Figura 16).

Figura 16 - Resultados de ensaio de cisalhamento (a) e fadiga (b) de soldas dissimilares Al/Mg com e sem camada de adesivo.



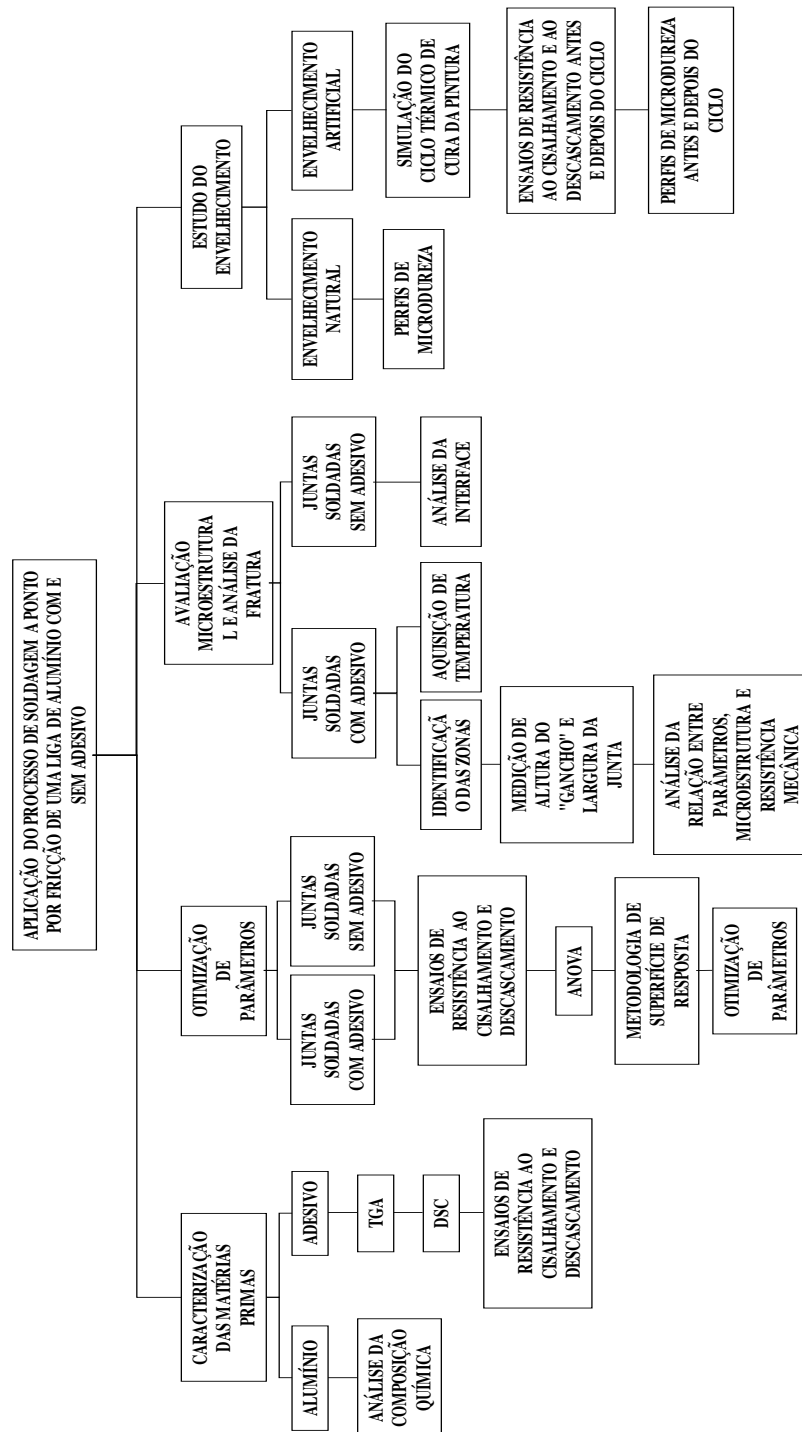
Fonte: Adaptado de CHOWDHURY et al. (2013)

Combinar soldagem e adesivagem para aumentar a vida em fadiga de juntas soldadas tem atraído muitos pesquisadores. Entretanto, adicionar soldas a uma junta adesivada não é benéfico. Wang et al. (1995) investigou o comportamento em fadiga de juntas de liga de alumínio soldadas com adesivo. Através da análise dos resultados, foi observado que as juntas soldadas com adesivo têm uma resistência à fadiga ligeiramente menor do que juntas adesivadas de alumínio, entretanto apresentam resistência à fadiga muito maior do que soldas ponto de alumínio e aço. (ABDEL WAHAB, 2012)

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 17 mostra o fluxograma do procedimento experimental realizado neste trabalho.

Figura 17 - Fluxograma dos ensaios realizados.



4.1 MATÉRIA PRIMA

4.1.1 Amostra de alumínio

A composição química da liga de alumínio foi analisada em um Espectrômetro de Emissão Ótica Bruker Q2 ION, o resultado é mostrado na Tabela 3, observa-se que o material está de acordo com a especificação AA6111, exceto pelo conteúdo de silício que está ligeiramente inferior. O material foi recebido na condição T6 (solubilizado e envelhecido artificialmente). As propriedades típicas para esta liga são mostradas na Tabela 4. Amostras com dimensões de 100 x 25,4 e 3,0 mm de espessura foram utilizadas nesse trabalho. Previamente à solda, as chapas foram limpas com acetona para remover contaminações na superfície.

Tabela 3 - Composição química da liga de alumínio.

Elemento	Mg	Si	Cu	Cr	Fe	Mn	Ti	Zn	Al
Conteúdo (% peso)	0,71	0,57	0,60	0,05	0,21	0,22	0,05	0,01	Balanco
Especificação AA6111	0,5 - 1,0	0,6 - 1,1	0,5 - 0,9	<0,1	<0,4	0,1 - 0,45	<0,1	<0,15	-

Tabela 4 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio, em temperatura ambiente.

Propriedade	Valor
Tensão de Escoamento, $R_{p0,2}$	Min. 140 MPa
Tensão Máxima, R_m	Min. 275 MPa
Elongamento, A	Min. 22% ($L_0= 50\text{mm}$)

Fonte: ("Azo Materials", 2015)

4.1.2 Adesivo

Neste trabalho, um adesivo estrutural epóxi monocomponente produzido pela *The Dow Chemical Company* foi utilizado para estudar o comportamento do processo de Soldagem a Ponto por Fricção com adesivagem.

4.2 APLICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO ADESIVO

4.2.1 Análise Termogravimétrica (TGA)

Análise Termogravimétrica (*Thermogravimetric Analysis – TGA*) é a medida da perda de peso em função da temperatura ou tempo. Essa análise é usada extensivamente no estudo da decomposição de polímeros (BILYEU, 2000).

As análises foram realizadas em uma termobalança do fabricante Netzsch, modelo TG209 F3 Tarsus®. As análises foram utilizadas para avaliar a estabilidade térmica do adesivo estrutural. A varredura foi registrada entre 30 e 800°C a uma taxa de aquecimento de 20°C/min e a massa da amostra foi monitorada em função do tempo. A análise foi executada em uma atmosfera inerte de nitrogênio.

4.2.2 Calorimetria Diferencial de Varredura

A fim de obter informações a respeito da reação de cura do adesivo, foram realizadas análises de Calorimetria Diferencial de Varredura (*Differential Calorimetry Scanning – DSC*). As medidas foram feitas em amostras com peso entre 10 e 50 mg com um equipamento do fabricante Netzsch, Modelo DSC 200 F3 Maia, operando sob uma atmosfera de nitrogênio.

O perfil de cura cinética foi investigado submetendo uma amostra de adesivo a uma taxa de aquecimento de 20°C/min até a temperatura de 260°C. A temperatura de início, de fim e de pico, bem como a quantidade de calor liberada na reação exotérmica de cura foi avaliada.

O resfriamento até temperatura abaixo de 0°C e reaquecimento até 600°C da resina curada também foi investigada com o objetivo de caracterizar a comportamento térmico da resina curada.

Além disso, perfis de cura isotérmica foram realizados para determinar o tempo de cura para temperaturas de 140°C, 160 °C, 180°C e 200°C.

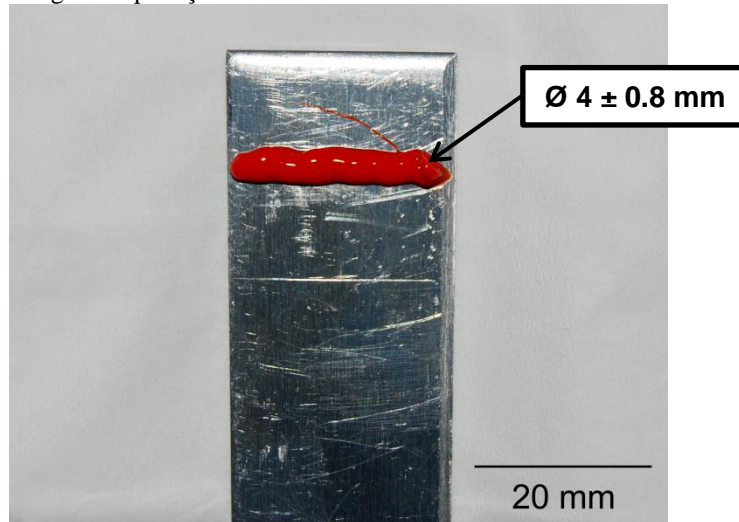
Realizando uma análise do material já curado, usando o mesmo perfil térmico que foi utilizado para medir o material não curado, é possível determinar o percentual de cura da resina, aplicando a seguinte relação: (BILYEU, 2000)

$$\%Cura = \frac{\Delta H_{n\tilde{a}o\ curado} - \Delta H_{curado}}{\Delta H_{n\tilde{a}o\ curado}} \times 100\% \quad (1)$$

4.2.3 Aplicação do adesivo

O adesivo foi aplicado manualmente em uma linha traçada transversalmente no meio da área de sobreposição previamente limpa com acetona, como mostrado na Figura 18. Foi mantida uma atenção particular para manter o diâmetro do filete de adesivo entre a faixa de 3,2 a 4,8 mm e cobrir toda a largura do substrato.

Figura 18 – Ilustração da metodologia de aplicação do adesivo.



4.2.4 Ensaio de Cisalhamento

O EC (Ensaio de Cisalhamento) do adesivo foi realizado para investigar seu comportamento mecânico. Juntas sobrepostas foram obtidas aplicando o adesivo como descrito no item 4.2.3 em uma chapa e sobrepondo uma segunda chapa de forma a obter uma área de sobreposição de 25,4 x 25,4 mm, os corpos de prova foram confeccionados desta forma a fim de igualarem os corpos de prova soldados e permitirem a comparação dos resultados. Subsequentemente, a junta foi colocada em um forno a 180°C pelo tempo de 30 minutos. Este ciclo tem por objetivo simular o processo de cura da pintura e curar o adesivo.

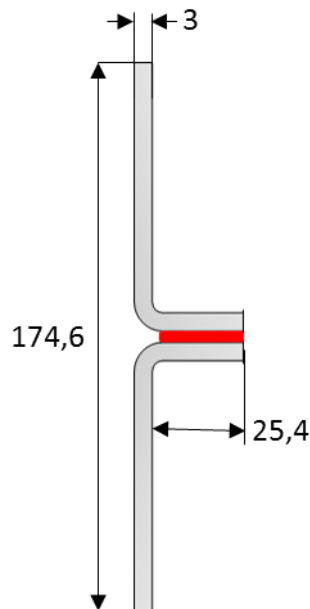
O EC foi executado usando uma máquina de teste universal do fabricante Zwick-Roell modelo 1478 com velocidade de 2 mm/min em temperatura ambiente. Três amostras foram testadas e a RC foi calculada com a média aritmética das mesmas.

Depois do ensaio mecânico, foram extraídas amostras de adesivo do corpo de prova. Esse material foi analisado via DSC, com a intenção de investigar a eficiência do ciclo de cura da tinta como um processo de cura para o adesivo.

4.2.5 Ensaio de Descascamento (*Coach Peel Strength*)

O Ensaio de Descascamento (*Coach Peel Strength – CPS*) do adesivo foi executado para investigar o seu comportamento mecânico sob esse tipo de esforço. As chapas foram inicialmente dobradas a fim de obter um corpo de prova com área de adesivagem de 25,4 x 25,4 mm e então o adesivo foi aplicado como descrito no item 4.2.3, os corpos de prova foram confeccionados desta maneira a fim de igualarem os corpos de prova soldados e permitirem a comparação dos resultados. Em seguida, a junta foi colocada em um forno pré-aquecido a 180°C por um período de 30 minutos. Uma ilustração esquemática do corpo de prova pode ser vista na Figura 19.

Figura 19 - Corpo de Prova de Teste de Descascamento com adesivo



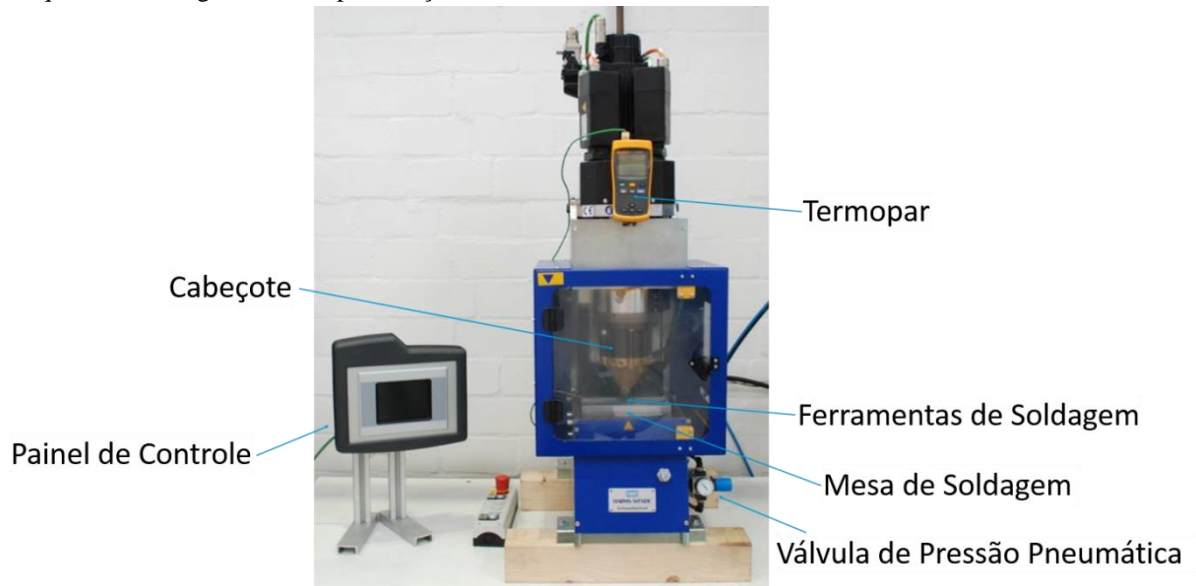
O Ensaio de Descascamento foi realizado usando uma máquina de ensaio universal da fabricante Zwick Roell, modelo 1478 com velocidade de 2 mm/min em temperatura ambiente. Três amostras foram testadas e a Força de Descascamento foi calculada como a média aritmética das mesmas.

4.3 EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM E FERRAMENTA

As soldas foram realizadas no centro de pesquisa Helmholtz Zentrum Geesthacht (HZG), utilizando uma máquina de Soldagem a Ponto por Fricção do fabricante Harms & Wende GmbH, modelo RPS100 (Figura 20). A máquina é construída sob um projeto do tipo

moldura (*frame*) em formato de C e tem uma alimentação pneumática de 6 bar, o que pode proporcionar até 15 kN de força de fixação. A VR máxima é de 3300 RPM. O processo de soldagem é realizado por controle de posição; o procedimento de soldagem é programado no controle de painel da máquina por meio de um *software* desenvolvido especialmente para o equipamento.

Figura 20 - Máquina de Soldagem a Ponto por Fricção RPS100.



Uma ferramenta não consumível com diâmetros externos de 17 mm, 9 mm e 6,4mm para o anel de fixação, camisa e pino, respectivamente, foram utilizados nesse trabalho. A camisa e o pino têm extremidades roscadas para favorecer o fluxo de material. As ferramentas são fabricadas usando aço ferramenta para trabalho a quente.

4.4 PROJETO DE EXPERIMENTOS

4.4.1 Janela de Processo

A Tabela 5 mostra os parâmetros de processo e os níveis utilizados nesse trabalho. A faixa de parâmetros de processo (níveis), ou entradas de processos, foi selecionada por experimentos preliminares baseados no conhecimento prévio do instituto. Várias juntas foram realizadas com diferentes combinações de parâmetros a fim de descobrir os limites inferiores e superiores de cada parâmetro. Essas juntas foram avaliadas através análise visual e, em alguns casos, através de ensaios mecânicos A fim de realizar as soldas o mais rápido

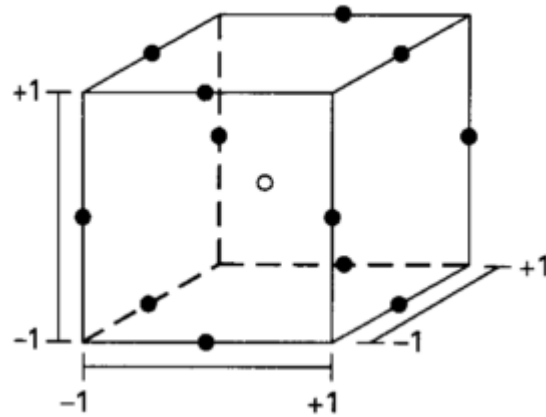
possível, não foi utilizado tempo de mistura nesse processo e a taxa de penetração foi mantida em 4 mm/s. A força de fixação foi mantida constante em 13 kN.

Tabela 5 - Parâmetros de processo e níveis.

Símbolo	Parâmetro de Soldagem	Unidade	Níveis		
			-1	0	1
VR	Velocidade de Rotação	RPM	1800	2400	3000
PP	Profundidade de Penetração	mm	3,0	3,4	3,8
TR	Taxa de Retração	mm/s	2,5	3,5	4,5

4.4.2 Box Behnken

Box Behnken Design (BBD) é uma metodologia de projeto de experimentos de três níveis capaz de modelar superfícies de resposta, um esquema visual deste projeto é mostrado na Figura 21. Pode ser visto que o BBD tem um *design* esférico com raio igual a $\sqrt{2}$. O projeto resultante tem como vantagem o baixo número de experimentos exigidos e não contém nenhum ponto localizado no vértice do cubo, significando que não é necessário testar combinações que podem ser muito extremas (muito custosas ou impossíveis de testar devido a limitações físicas). (MONTGOMERY, 2008)

Figura 21 - *Box Behnken Design*

Fonte: (MONTGOMERY, 2008)

As combinações de parâmetros resultantes dos níveis e projeto propostos acima são mostradas na Tabela 6. Como pode ser observado, na condição 13 até a 17, é repetida 5 vezes a mesma combinação de parâmetros. Isso significa que foram realizadas 5 repetições do ponto central, a fim de verificar o erro.

Tabela 6 – Combinações de parâmetros de soldagem.

Combinação	Velocidade de Rotação (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)
1	1800	3	3,5
2	3000	3	3,5
3	1800	3,8	3,5
4	3000	3,8	3,5
5	1800	3,4	2,5
6	3000	3,4	2,5
7	1800	3,4	4,5
8	3000	3,4	4,5
9	2400	3	2,5
10	2400	3,8	2,5
11	2400	3	4,5
12	2400	3,8	4,5
13	2400	3,4	3,5
14	2400	3,4	3,5
15	2400	3,4	3,5
16	2400	3,4	3,5
17	2400	3,4	3,5

4.4.3 ANOVA

Uma Análise de Variância (ANOVA) dos resultados obtidos do BBD foi realizada a fim de investigar a influência dos parâmetros de soldagem e suas interações na RC e ao descascamento (RD) nas condições sem e com adesivagem. A significância de cada fator e interação foi verificada através do valor-p.

Para chegar ao valor-p, é necessário calcular o valor F, conforme a equação 2, e correlacionar com o valor-p por meio de tabelas de conversão.

$$F = \frac{SQ_{Tratamentos}/(\alpha - 1)}{SQ_E/[\alpha(n - 1)]} = \frac{MQ_{Tratamentos}}{MQ_E} \quad (2)$$

Onde:

- $SQ_{Tratamentos}$: Soma da diferença quadrada dos tratamentos
- α : graus de liberdade
- SQ_E : Soma da diferença quadrada do erro
- n : número de tratamentos
- $MQ_{Tratamentos}$: Quadrados Médios dos Tratamentos
- MQ_E : Quadrados Médios do Erro

Foi assumido que termos significantes têm um valor-p menor que 0,05.

4.4.4 Metodologia de Superfície de Resposta, Validação e Otimização

Com o objetivo de obter um modelo que descreva a influência dos parâmetros de soldagem na RC e RD de juntas sem e com adesivagem, a metodologia de superfície de resposta foi aplicada utilizando os termos significantes para o processo de acordo com a ANOVA realizada anteriormente para cada caso.

Para validar o modelo, foram realizados testes de confirmação com parâmetros dentro da janela de processo do BBD. Além disso, os modelos obtidos foram utilizados para otimizar as respostas.

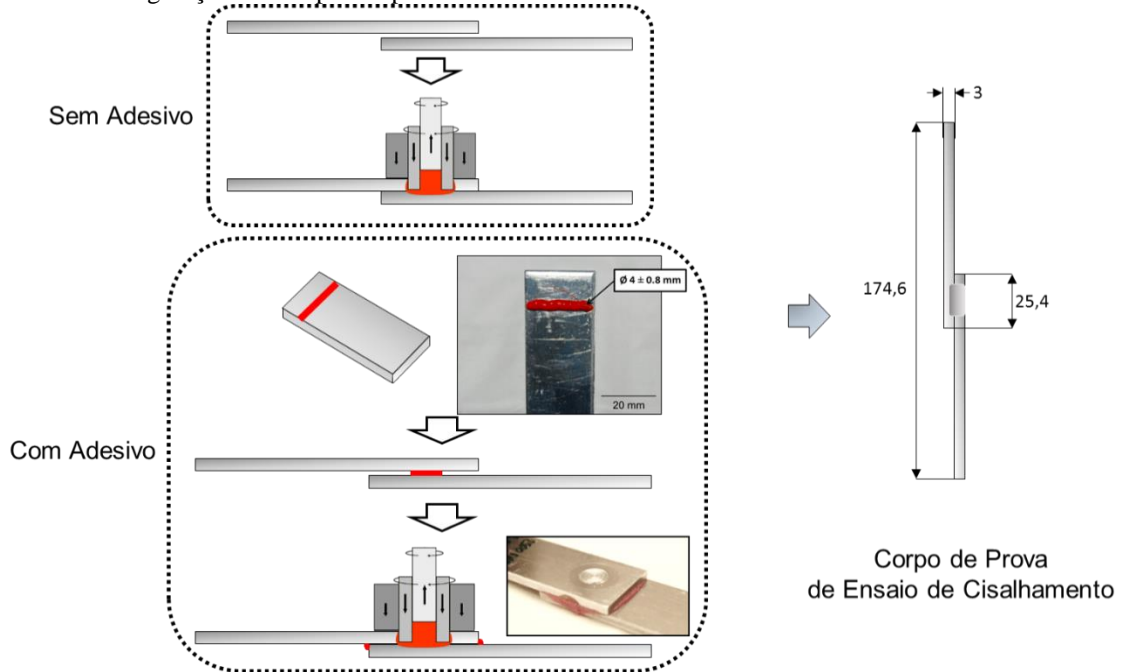
As análises estatísticas desse trabalho foram realizadas com o Programa Minitab®.

4.5 ENSAIO DE CISALHAMENTO

O EC foi realizado a fim de avaliar o desempenho mecânico das juntas sob tensão de cisalhamento. O ensaio foi realizado utilizando uma máquina de ensaios universal da fabricante Zwick-Roell, modelo 1478. A velocidade utilizada foi de 2 mm/min e os ensaios foram realizados na temperatura ambiente e geometria dos corpos de prova em acordo com a norma ISO EN 14273 (2002). Os ensaios foram realizados logo após a soldagem. Uma amostra foi testada para cada combinação de parâmetros, com exceção do ponto central no qual foi realizado 5 replicatas.

A Figura 22 mostra a configuração dos corpos de prova de EC sem e com adesivo.

Figura 22 – Configuração dos corpos de prova de Ensaio de Cisalhamento sem e com adesivo.

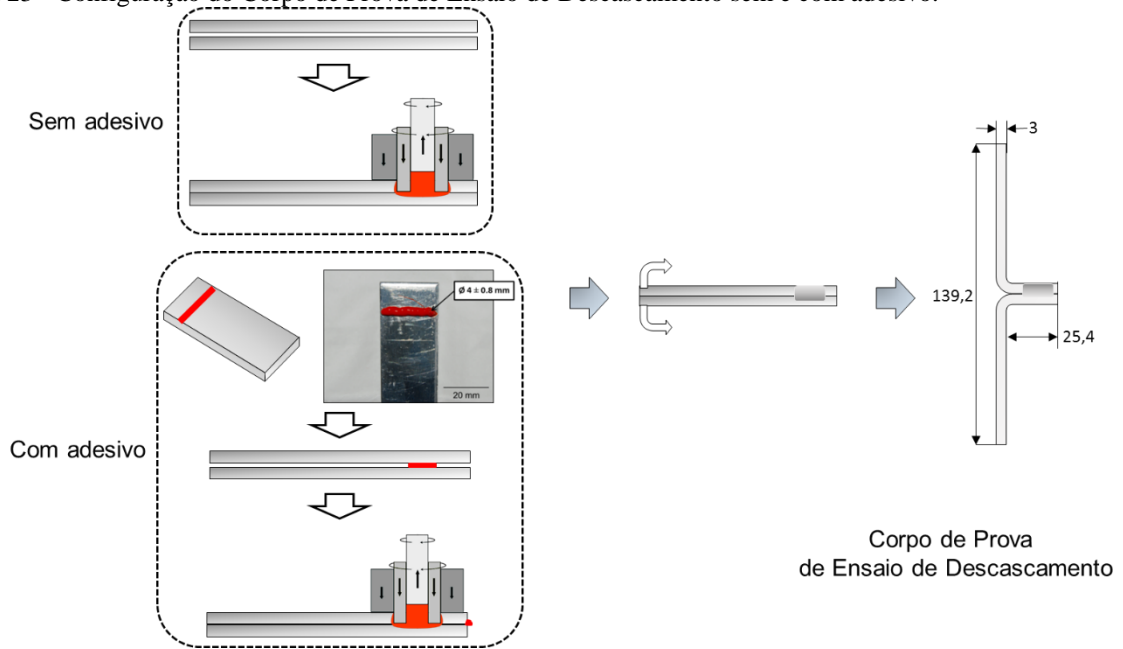


4.6 ENSAIO DE DESCASCAMENTO (*COACH PEEL TEST - CPS*)

O ensaio de descascamento (*Coach Peel Test – CPS*) foi realizado a fim de avaliar o desempenho mecânico das juntas sob esforços de descascamento. O ensaio foi realizado utilizando uma máquina de ensaios universal da fabricante Zwick-Roell, modelo 1478. A velocidade utilizada foi de 2 mm/min e os ensaios foram realizados na temperatura ambiente. O ensaio foi realizado conforme procedimento interno do fornecedor da amostra. Uma amostra foi testada para cada combinação de parâmetros, com exceção do ponto central no qual foram ensaiadas 5 amostras.

A Figura 23 mostra esquematicamente como foram obtidos os corpos de prova de Ensaio de Descascamento, bem como suas dimensões principais.

Figura 23 - Configuração do Corpo de Prova de Ensaio de Descascamento sem e com adesivo.



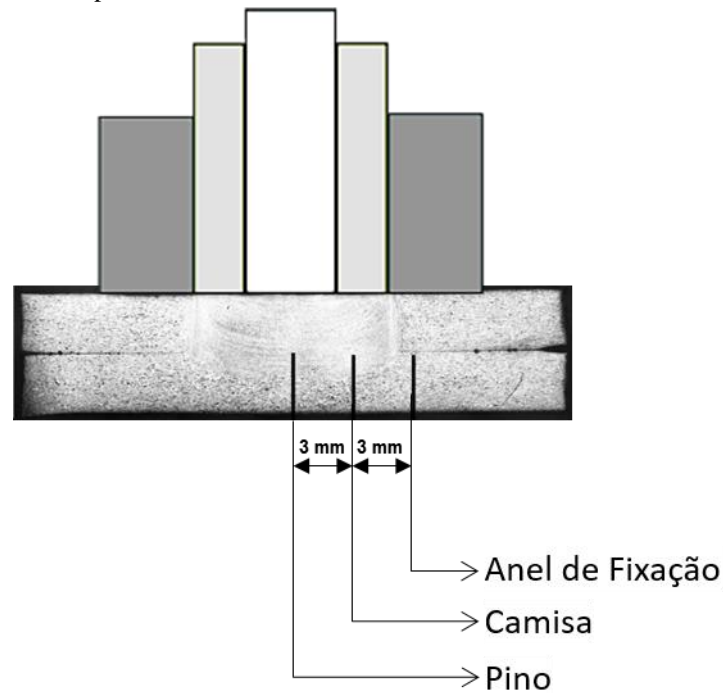
4.7 AQUISIÇÃO DE TEMPERATURA

Foi avaliado o ciclo térmico durante o processo de soldagem, com o objetivo de verificar as temperaturas atingidas durante o processo. O perfil térmico foi obtido com três termopares tipo K de 0,5 mm de diâmetro.

Os termopares foram localizados na junta como mostrado na Figura 24. O posicionamento dos termopares foi realizado furando três furos passantes na chapa inferior, o primeiro furo no centro da área a ser soldada e os furos subsequentes a uma distância de 3 e 6 milímetros ao longo da direção longitudinal, a fim de obter a temperatura abaixo do pino, da camisa e do anel de fixação.

Os termopares foram conectados em um equipamento de aquisição de dados manufaturado pela (National Instruments, modelo SCXI), integrado com um computador. O software LabView foi utilizado. A taxa de aquisição de dados foi de 50 Hz.

Figura 24 - Posição dos termopares



4.8 AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL

As amostras selecionadas para as análises metalográficas foram cortadas a alguns milímetros do centro da junta com disco abrasivo de diamante em uma policorte (Struers, modelo Secotom 50). Em seguida, as seções foram embutidas a frio com resina acrílica (Struers ClaroCit), que proporciona suportes transparentes que permitem observar se o centro da junta foi atingido na preparação metalográfica.

Os processos de lixamento e polimento das amostras foram executados até atingir o centro da junta. Eles foram realizados em um sistema de preparação automática (Struers, modelo Tegramin 300). Posteriormente, as amostras foram limpas com etanol e então atacadas via processo eletrolítico utilizando solução Barker (1,8 % de ácido Fluorbórico em solução aquosa) para revelar os contornos de grão.

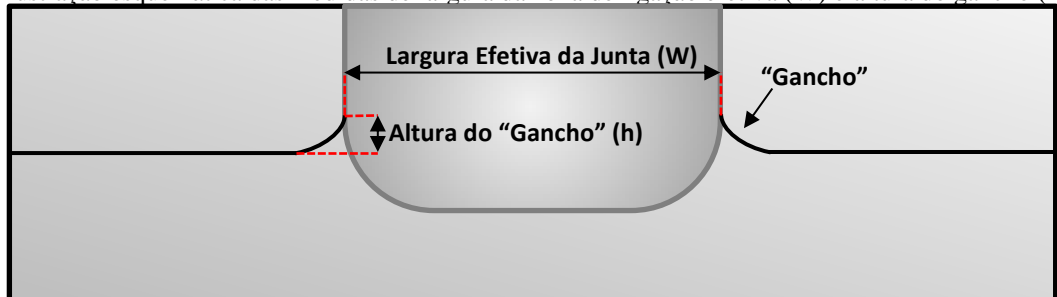
As amostras foram analisadas em um microscópio ótico (Leica DM IRM) com luz polarizada e com auxílio do software *Leica Application Suite 3.5*.

As diferentes morfologias de grão desenvolvidas durante a soldagem foram avaliadas para compreender como o processo afeta a microestrutura original do material.

A fim de discernir a relação entre o desempenho mecânico e a macroestrutura, a largura efetiva da junta (W) e a altura do gancho (h) foram medidas, conforme ilustrado na Figura 25. Esses parâmetros foram escolhidos com base em trabalhos anteriores que

avaliaram essas características e a relacionaram com a resistência mecânica das juntas. (CAMPANELLI, 2012; CAO et al, 2016; ZHAO et al, 2014b)

Figura 25 - Ilustração esquemática das medidas de largura da zona de ligação efetiva (W) e altura do gancho (h)

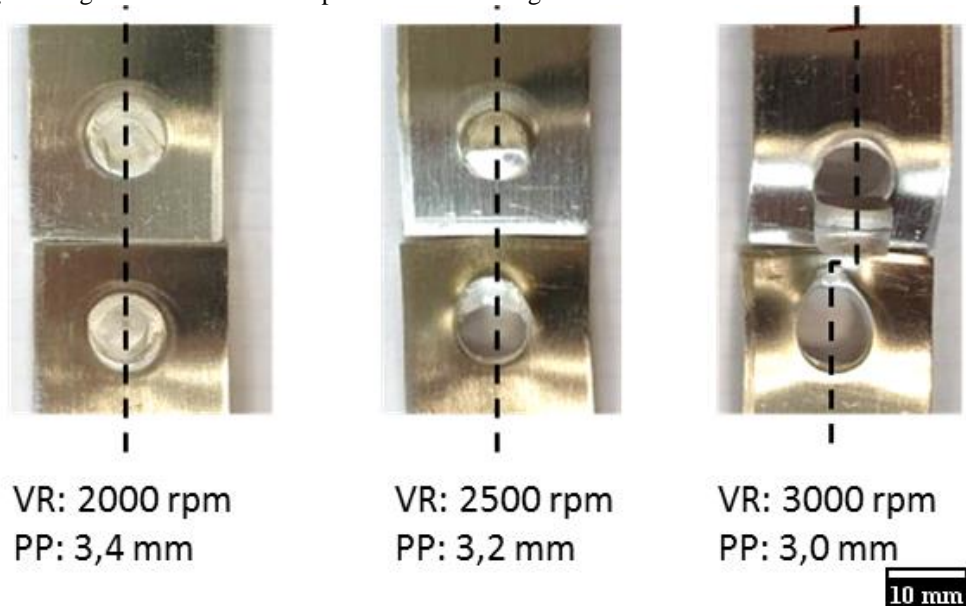


4.9 ANÁLISE DA FRATURA

As amostras separadas para análise da fratura foram observadas via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em um microscópio FEI Quanta FEG 650 no modo de elétrons retroespalhados.

Além disso, as seções transversais das fraturas na direção longitudinal, como mostrado na Figura 26, foram preparadas para investigação metalográfica de acordo com o procedimento descrito no item 4.7.

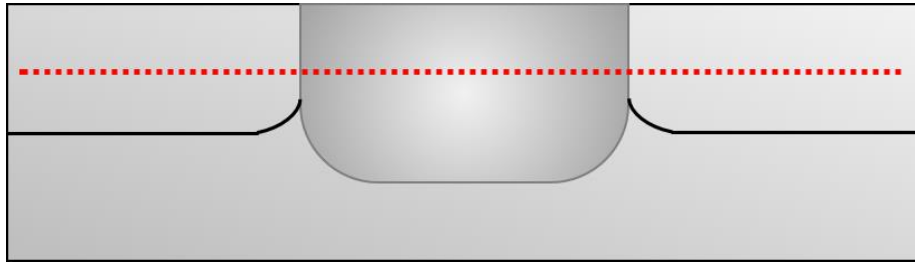
Figura 26 - Seções longitudinais das fraturas para análise metalográfica.



4.10 ESTUDO DO ENVELHECIMENTO NATURAL

Com vistas de entender a influência do processo de soldagem na resistência mecânica da liga, foram realizadas medidas de microdureza na metade da espessura da chapa superior, como mostrado na Figura 27. Foi utilizada uma máquina de microdureza vickers (Zwick-Roell ZHV), com indentador padrão, 0,3 kgf de carga e tempo de indentação de 10 segundos. A distância entre endentações foi de 0,3 mm. Foi utilizada uma distância de 0,3 mm entre os pontos. As medidas foram realizadas com auxílio do *software* TestXpert.

Figura 27 - Ilustração esquemática das medidas de microdureza.



Para este estudo, duas combinações de parâmetros foram selecionadas, de acordo com a Tabela 7. Foram selecionados parâmetros idênticos, exceto pela velocidade de rotação, a fim de avaliar a influência do aporte térmico no perfil de microdureza da junta.

Tabela 7 - Parâmetros selecionados para realizar o estudo de microdureza.

Velocidade de Rotação (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)
1800	3,4	2,5
3000	3,4	2,5

4.10.1 Estudo de envelhecimento natural

Novas juntas foram produzidas para avaliar a evolução da dureza durante um envelhecimento natural de 6 semanas. Como consequência, foram analisados os resultados de microdureza de 4 amostras diferentes para cada combinação de parâmetros, seguindo sempre a metodologia apresentada na Figura 27.

- Como Soldado
- 1 semana de envelhecimento natural
- 4 semanas de envelhecimento natural

- 6 semanas de envelhecimento natural

4.11 ESTUDO DE ENDURECIMENTO DA JUNTA PELO CICLO TÉRMICO DE CURA DA PINTURA

O ciclo de cura da pintura (*Paint Bake Cycle – PBC*) é um ciclo térmico utilizado para curar a pintura e também para promover o envelhecimento artificial em painéis para a indústria automotiva. Neste trabalho, o PBC foi simulado colocando amostras em um forno pré-aquecido a 180°C e removendo-as após 30 minutos, deixando resfriar ao ar. As amostras foram avaliadas por meio de Ensaio de RC, Ensaio de RD e Microdureza antes e depois do PBC, com o objetivo de investigar a influência deste ciclo térmico no comportamento metalúrgico e mecânico da junta.

Três parâmetros foram comparados em termos de RC e RD, antes e depois do PBC (Tabela 8). Estes parâmetros foram selecionados a fim de verificar se o fenômeno de envelhecimento responderia de forma diferente com a variação de velocidade de rotação.

Tabela 8 - Parâmetros selecionados para o estudo do ciclo de cura da pintura.

Velocidade de Rotação (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)
1800	3,4	2,5
2400	3,4	2,5
3000	3,4	2,5

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

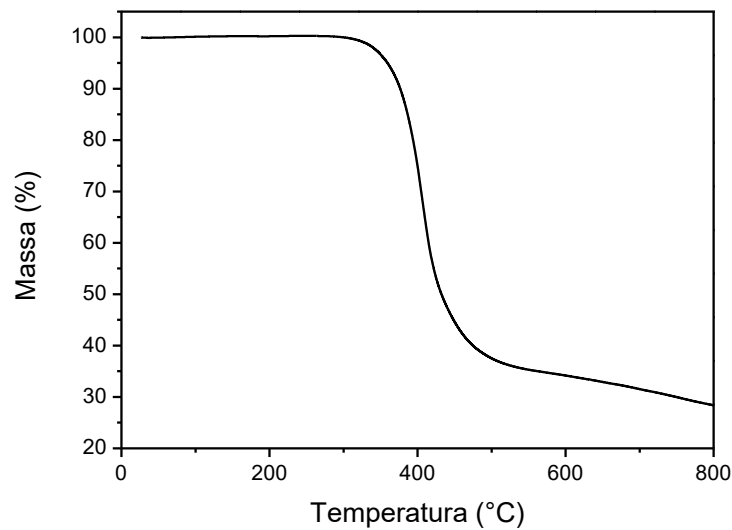
5.1 ADESIVO

5.1.1 Análise Termogravimétrica

A Figura 28 mostra a análise termogravimétrica realizada em uma amostra de adesivo. A partir desse gráfico pode-se observar que a degradação do polímero começa aproximadamente em 375°C e termina em 436°C, atingindo a taxa máxima de perda de massa em 408°C.

No final da análise, a 850°C, menos de 30% da massa inicial ainda permanecia no cadinho.

Figura 28 - Análise termogravimétrica do adesivo.



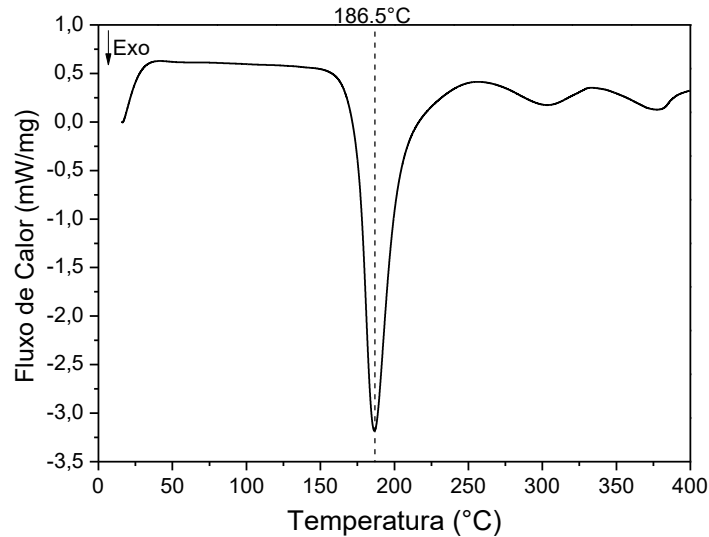
5.1.2 Calorimetria Diferencial de Varredura

5.1.2.1 Cura Cinética

A curva do fluxo de calor obtida no aquecimento de uma amostra de adesivo até 400°C é mostrada na Figura 29. A cura do adesivo ocorre durante o pico exotérmico observado em 186,5°C. O início da reação ocorre aproximadamente em 170°C e o final da

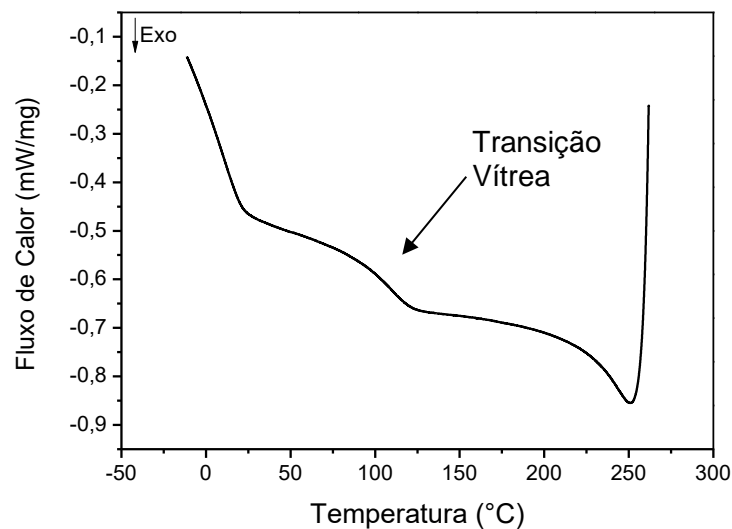
reação ocorre por volta de 205°C. O calor total liberado na reação exotérmica foi calculado em torno de 280 J/g.

Figura 29 – Curva DSC de aquecimento do adesivo.



Logo após o aquecimento, a amostra foi resfriada até -10°C com uma taxa de resfriamento de 20°C/min. A curva de fluxo de calor durante o resfriamento da amostra pode ser observada na Figura 30. Pode ser observado que ocorre uma transição vítrea próximo dos 100°C, de acordo com o método de teste apresentado na ASTM D3418 (2016), o qual caracteriza a transição vítrea por um deslocamento na linha de base.

Figura 30 - Curva DSC de resfriamento do adesivo.



Após o resfriamento, o adesivo já curado foi reaquecido até 600°C a uma taxa de aquecimento de 20°C/min. A curva DSC de aquecimento da resina curada pode ser observada na

Figura 31. Pode ser observada uma transição vítrea em torno de 111°C, na mesma faixa observada durante o resfriamento. Durante o reaquecimento, não foi observado pico exotérmico por volta de 186,5°C, o que significa que a amostra estava totalmente curada. Em uma faixa de temperatura superior a 300°C, parece acontecer uma série de eventos endotérmicos. De fato, ao analisar a curva DSC de aquecimento do adesivo curado sobreposto à curva TGA, como mostrado na Figura 32, verifica-se que esses eventos endotérmicos ocorrem na mesma faixa de temperatura na qual o adesivo degrada, o que aponta que a decomposição do adesivo está associada aos picos endotérmicos.

Figura 31 - Curva DSC de aquecimento do adesivo curado.

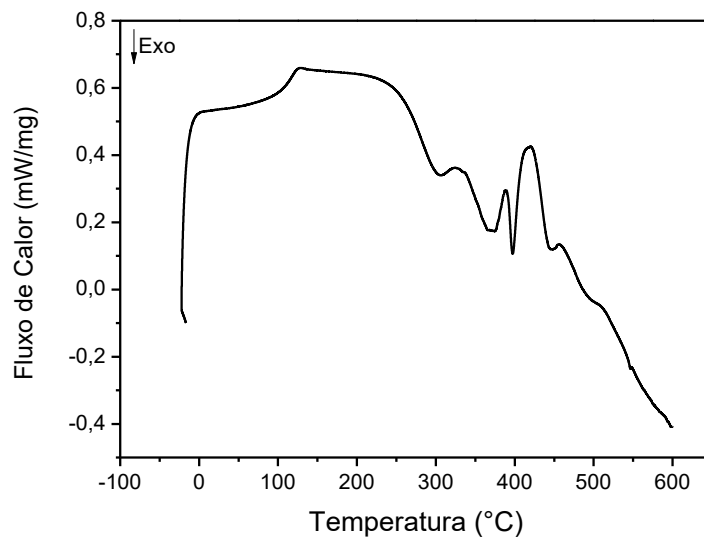
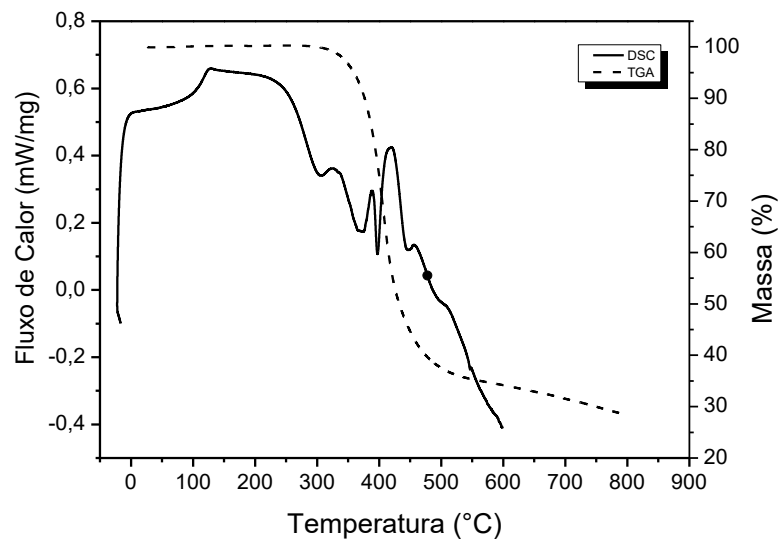


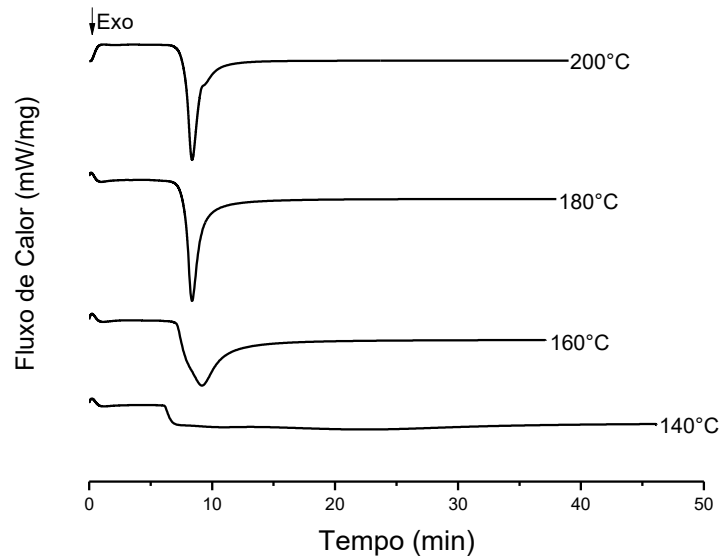
Figura 32 - Curva DSC do adesivo curado sobreposto à curva TGA.



5.1.2.2 Cura Isotérmica

Perfis de cura isotérmica foram realizados para determinar o tempo de cura nas temperaturas de 140°C, 160°C, 180°C e 200°C, como mostrado na Figura 33. É possível observar os diferentes picos exotérmicos para cada temperatura de cura. Quanto menor a temperatura de cura, mais amplo o pico exotérmico, o que significa maior tempo para completar a reação.

Figura 33 - Perfis de cura isotérmica do adesivo curado a 140°C, 160°C, 180°C e 200°C.



O percentual de cura em função do tempo é dado pela Equação 1, apresentado na seção 4.2.2. A integração das áreas abaixo dos picos exotérmicos fornece as curvas de cura do adesivo para as temperaturas de 140°C, 160°C, 180°C e 200°C, Figura 34. O gráfico revela que, para a faixa de temperatura entre 160-200°C, o tempo de conversão total do adesivo fica entre 10-20 minutos. Para a temperatura de cura de 140°C, o tempo para atingir a conversão total da resina é maior do que 35 minutos. Como comparação, o tempo para 95% de cura em função da temperatura de cura isotérmica está mostrado na Figura 35.

Figura 34 - Curvas de cura isotérmica

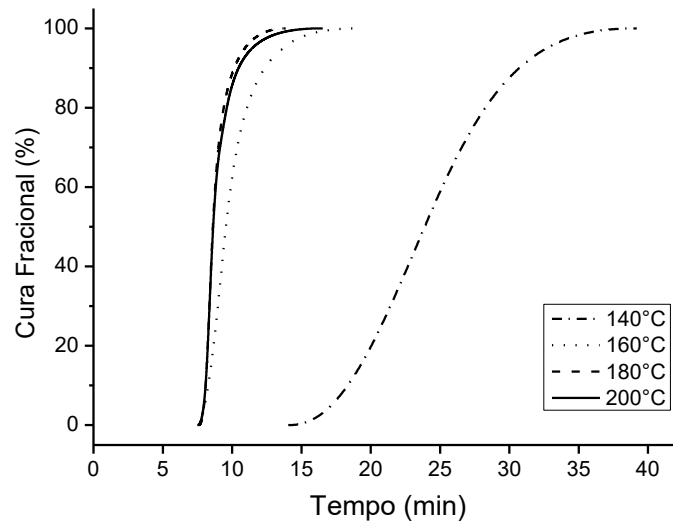
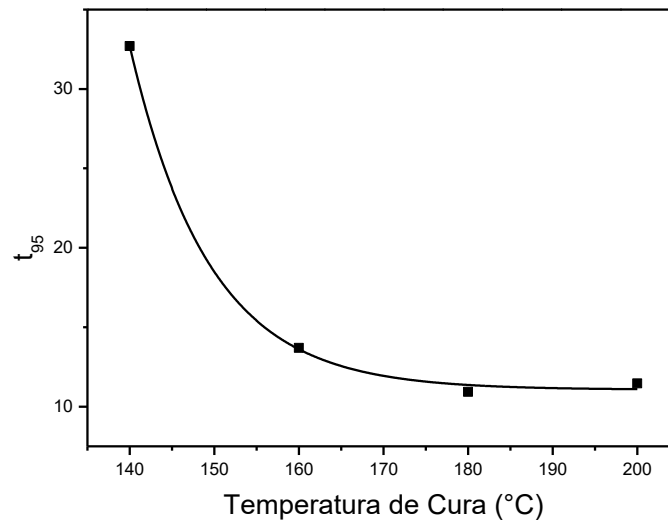


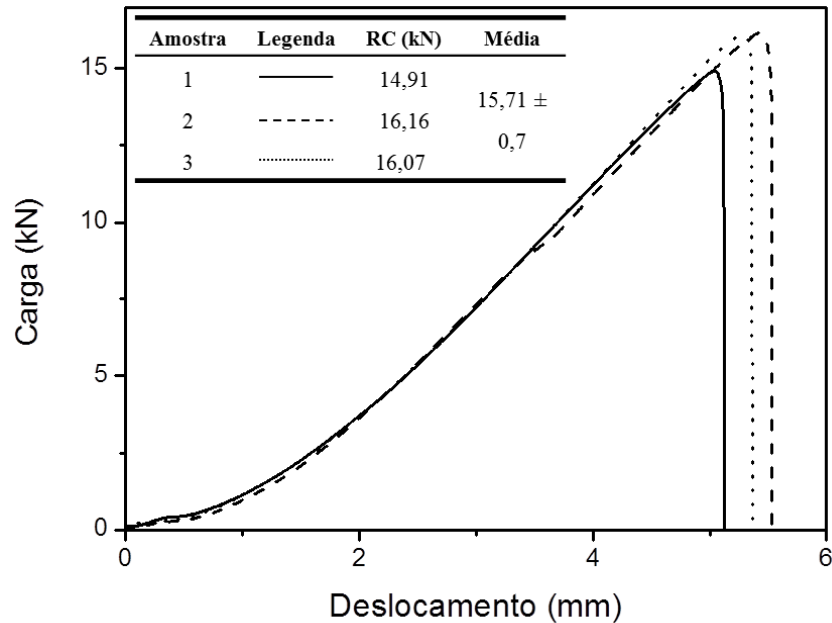
Figura 35 - Tempo para 95% de cura em função da temperatura de cura isotérmica.



5.1.3 Resistência ao Cisalhamento

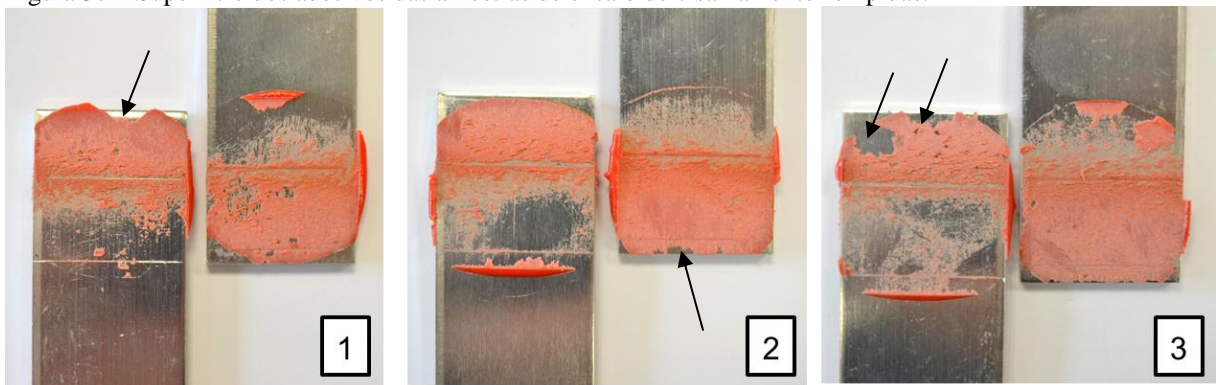
A Figura 36 mostra o resultado dos Ensaios de Cisalhamento do adesivo. O valor médio obtido foi de 15,71 kN. O gráfico da RC *versus* deformação mostra o comportamento frágil da camada adesiva.

Figura 36 - Resistência ao cisalhamento do adesivo.



Para uma maior compreensão da falha uma análise da superfície dos adesivos nas amostras ensaiadas, como mostrado na Figura 37. A maior parte da chapa de alumínio está exposta, indicando predominância de falha adesiva. Conforme indicado pelas flechas na figura, a falha parece começar nas extremidades livres da junta, onde é conhecido que passa por maiores níveis de tensão. (ASGARI MEHRABADI, 2012; YANG; TOMBLIN; GUAN, 2003; ZHU; KEDWARD, 2005)

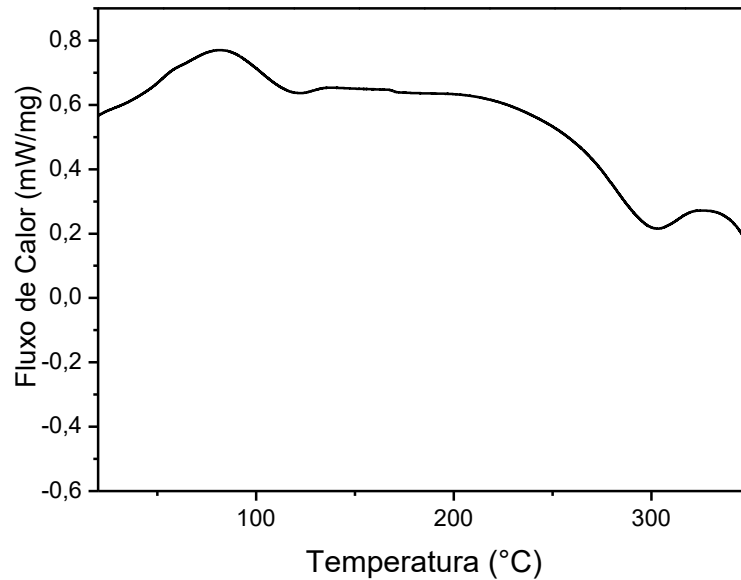
Figura 37 – Superfície dos adesivos das amostras de ensaio de cisalhamento rompidas.



Amostra do adesivo extraído do corpo de prova de EC, após o teste, foi analisada por DSC a fim de avaliar a efetividade do processo de cura. O resultado dessa análise é mostrado na Figura 38. Nenhum comportamento exotérmico pode ser observado em torno de 186,5°C, o que significa que o adesivo estava totalmente curado. Portanto, o PBC simulado foi capaz

de curar o adesivo, como era esperado de acordo com os resultados mostrados acima na Figura 34 e na Figura 35.

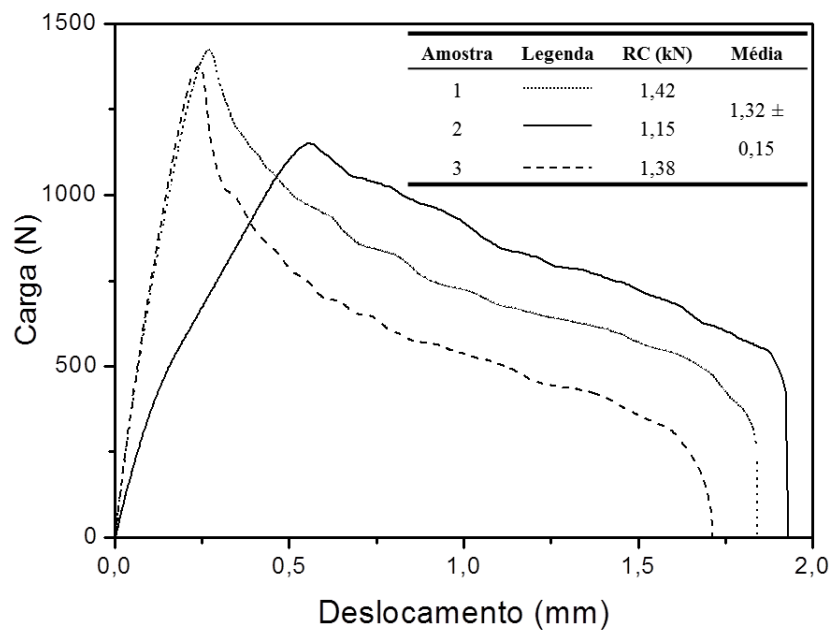
Figura 38 - Curva DSC da amostra de adesivo extraído no corpo de prova de ensaio de cisalhamento após teste.



5.1.4 Ensaio de Descascamento

A Figura 39 mostra os resultados do ensaio de descascamento do adesivo. O valor médio de RD foi de 1,32 kN.

Figura 39 - Resistência ao Descascamento do adesivo.



A Figura 40 mostra a superfície do adesivo dos corpos de prova após o ensaio de descascamento. No primeiro corpo de prova, é possível observar a falha coesiva do adesivo, o que é desejado, pois indica boa aplicação do adesivo. Nos dois outros corpos de prova, ocorreu falha mista, o que pode indicar que a superfície não estava em boas condições de limpeza em algumas regiões. Apesar disso, os resultados apresentaram baixa dispersão.

Figura 40 – Superfície dos adesivos das amostras de ensaio de descascamento rompidas.



5.2 ENSAIO DE CISALHAMENTO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM

5.2.1 Resistência ao cisalhamento de juntas soldadas sem adesivo

As combinações do BBD junto com os valores experimentais de RC são apresentadas na Tabela 9. As juntas exibiram RC variando de 6,01 kN (combinação 4 – VR: 3000 RPM, PP: 3,8 mm, TR: 3,5 mm/s) até 9,7 kN (combinação 5 – VR: 1800 RPM, PP: 3,4 mm, TR: 2,5 mm/s). O desvio padrão é dado pela repetição do ponto central (combinações 13 a 17). Neste experimento, o desvio padrão foi de 0,37 kN.

Tabela 9 - Valores de Resistência ao cisalhamento para as diferentes combinações do BBD.

Combinação	Velocidade de Rotação (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)	Resistência ao Cisalhamento (kN)
1	1800	3	3,5	8,45
2	3000	3	3,5	8,26
3	1800	3,8	3,5	9,54
4	3000	3,8	3,5	6,01
5	1800	3,4	2,5	9,70
6	3000	3,4	2,5	7,00
7	1800	3,4	4,5	9,42
8	3000	3,4	4,5	8,84
9	2400	3	2,5	9,43
10	2400	3,8	2,5	7,05
11	2400	3	4,5	8,57
12	2400	3,8	4,5	7,95
13	2400	3,4	3,5	8,99
14	2400	3,4	3,5	9,18
15	2400	3,4	3,5	8,30
16	2400	3,4	3,5	9,14
17	2400	3,4	3,5	9,08

5.2.1.1 Análise de Variância

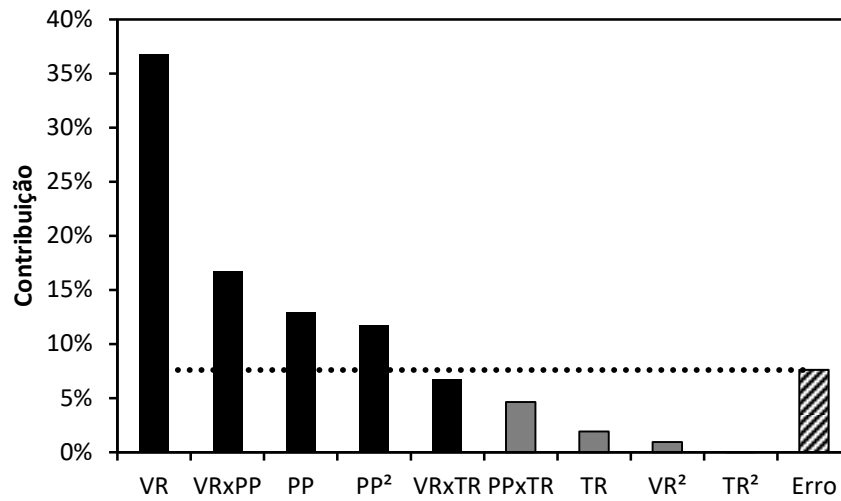
A ANOVA foi realizada para verificar identificara influência dos parâmetros de soldagem no desempenho das juntas no EC. A Tabela 10 mostra a ANOVA realizada com os dados adquiridos nos ensaios, com um intervalo de confiança de 95%. De acordo com os resultados, VR e PP são fatores significantes e afetam o desempenho no EC das juntas, pois resultaram em valor-p menor do que 0,05, enquanto a TR parece não ser significativa para o desempenho da junta sob solicitação de cisalhamento. Além disso, o comportamento quadrático da PP também é significativo para o modelo, enquanto o comportamento quadrático da VR e da TR não são significantes. Também, as interações VRxPP e VRxTR mostraram ser importantes para explicar o processo enquanto a interação PPxTR não é importante.

Tabela 10 - Análise de Variância para Resistência ao Cisalhamento sem adesivo

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F calculado	p-valor
Modelo	15,4785	9	1,71983	9,51	0,004
Linear	8,6066	3	2,86885	15,87	0,002
VR (RPM)	6,125	1	6,125	33,88	0,001
PP (mm)	2,162	1	2,16201	11,96	0,011
TR (mm/s)	0,3195	1	0,31954	1,77	0,225
Quadrático	2,186	3	0,72867	4,03	0,059
VR ²	0,1546	1	0,15464	0,86	0,386
PP ²	1,9547	1	1,95473	10,81	0,013
TR ²	0,0002	1	0,00017	0	0,976
Interações	4,6859	3	1,56197	8,64	0,009
VR X PP	2,7889	1	2,7889	15,43	0,006
VR X TR	1,1236	1	1,1236	6,22	0,041
PP X TR	0,7734	1	0,7734	4,28	0,077
Erro	1,2654	7	0,18077		
Falta de Ajuste	0,7361	3	0,24537	1,85	0,278
Erro Puro	0,5293	4	0,13232		
Total	16,7439	16			

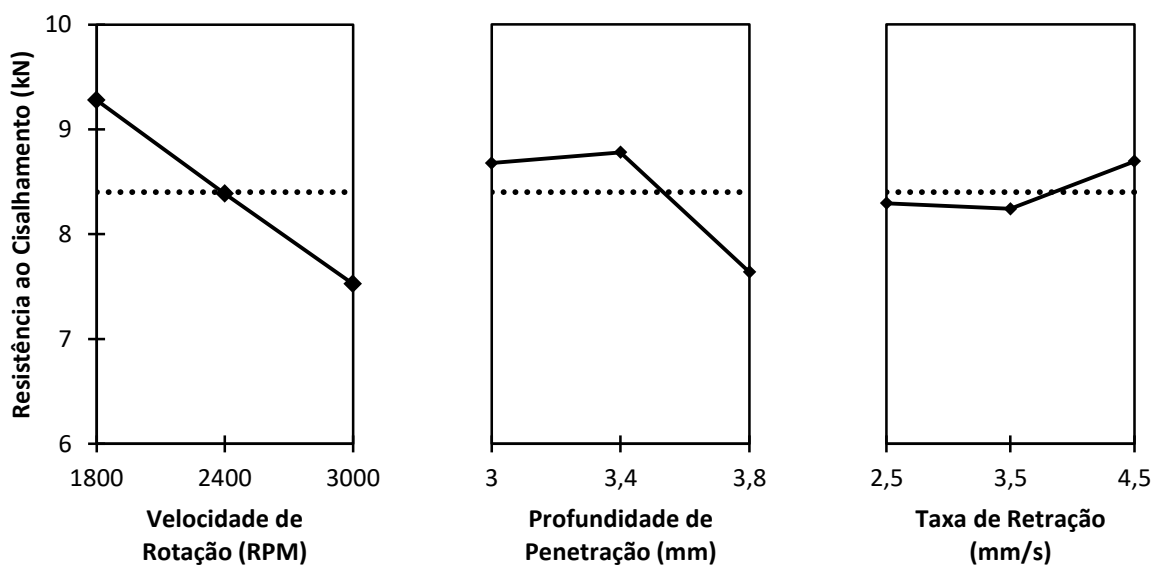
Para melhor entendimento, a contribuição de cada fator na variação total do experimento pode ser escrita em termos de porcentagem, dividindo a Soma dos Quadrados de cada fator pela Soma dos Quadrados total do experimento. Estes resultados são mostrados na Figura 41. Os fatores são considerados fisicamente importantes se a contribuição em termos percentuais é maior do que o erro associado. A VR mostrou ser o parâmetro com maior efeito no EC (36,75%), seguido pela interação VRxPP (16,73%) e PP (12,97%). Entretanto, a TR parece não ter influência significativa para a RC nas faixas de parâmetros de soldagem selecionadas.

Figura 41 - Contribuição de cada parâmetro na resistência ao cisalhamento sem adesivo.



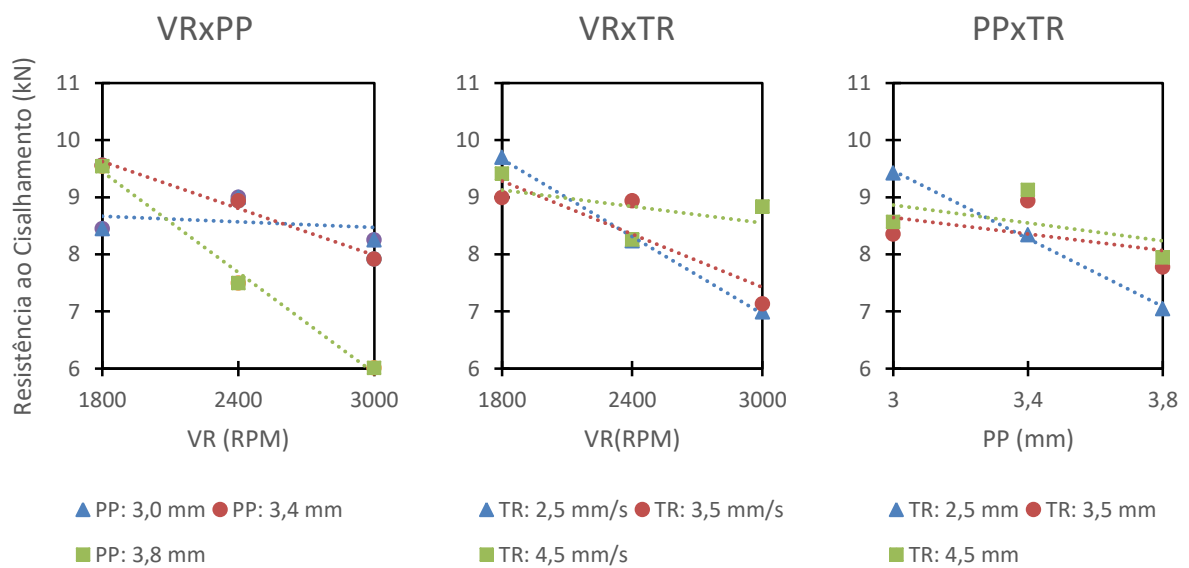
A Figura 42 mostra os gráficos de efeitos principais para a RC, a linha pontilhada representa a média dos resultados. Como pode ser observado, a VR tem a maior influência na RC, sendo que o aumento da VR leva a uma redução na RC. A PP sugere um comportamento quadrático, o aumento da PP aumenta a RC até um máximo localizado em torno de 3,3 mm de PP, maior aumento de PP provoca uma redução na RC. Adicionalmente, é possível observar que o aumento da TR leva a um aumento da RC. Entretanto, o efeito da TR na RC é muito baixo quando comparado com o efeito da VR e da PP.

Figura 42 - Gráficos de efeitos principais para a Resistência ao Cisalhamento sem adesivo, a linha pontilhada representa a média dos resultados.



O efeito das possíveis interações de fatores na RC pode ser visto em um gráfico de interações, onde as médias são dispostas como uma combinação dos fatores. A Figura 43 mostra uma projeção bidimensional de VRxPP, VRxTR e PPxTR em termos de RC médio. Como as curvas mostradas no gráfico de VRxPP e VRxTR não são paralelas, o diagrama indica que há interação entre os parâmetros. Entretanto, como o comportamento de PPxTR não muda consideravelmente, é assumido que não há uma interação significativa entre esses fatores.

Figura 43 - Gráficos de Interações para a Resistência ao Cisalhamento sem adesivo.



Outros pesquisadores observaram comportamentos similares na soldagem a ponto por fricção de juntas similares de ligas de alumínio. Cao et al. (2016) realizaram o estudo de ANOVA em juntas a ponto por fricção de chapas de 2 mm da liga de alumínio AA6061. A análise revelou que PP, TS e VR são parâmetros significativos para o processo e não foi observado efeito importante na interação entre os parâmetros para a resistência da junta. Da mesma forma que foi observado nesse trabalho, o aumento de VR causou uma redução na RC. Também de maneira semelhante, PP apresentou um efeito quadrático com maior RC no valor intermediário de PP. Bem como Cao et al. (2016), Rosendo (2009) e Dias (2013) também observaram redução de RC para aumento de VR. Zhaos et al. (2014) também observaram efeito quadrático na influência de PP na RC. Cao e Zhao associam os comportamentos observados à morfologia do “gancho”, enquanto Rosendo (2009) conclui que baixas rotações contribuem para uma melhor união na Zona de Ligação Parcial.

Adicionalmente, Shen et al. (2014b) encontraram que, para maiores tempos de solda, a VR não tem efeito significativo na RC da junta.

Maiores discussões a respeito da influência da VR na RC serão realizadas na seção 5.6.1

5.2.1.2 Metodologia de Superfície de Resposta

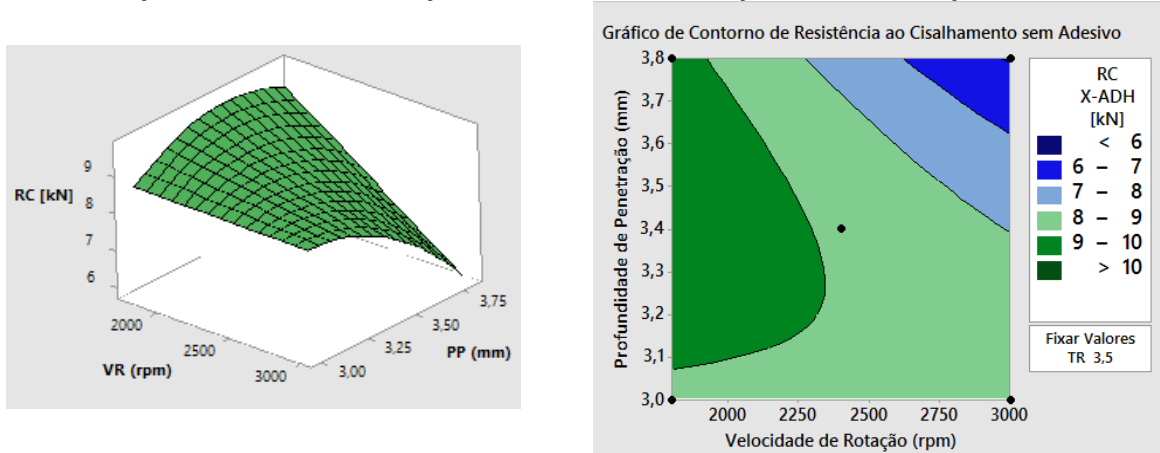
A Metodologia de Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology – RSM*) (MSR) pode ser aplicada quando a resposta de interesse é influenciada por muitas variáveis. Neste trabalho, MSR foi aplicado para compreender melhor o desempenho da RC com a variação de VR, PP e TR.

Baseado nos resultados obtidos através do BBD, foi desenvolvido um modelo de regressão para a RC em termos dos valores reais dos parâmetros significantes. Como resultado desta abordagem, a Equação 3 descreve RC em função da VR, PP e TR. Apesar da TR ter indicado baixa contribuição para a RC, ela deve ser considerada na equação por uma questão de hierarquia. Em outras palavras, como a TR está presente na interação TRxPP, ela deve ser incluída na equação. O modelo estatístico apresentou bom ajuste aos dados experimentais, com $R^2 = 0,8689$.

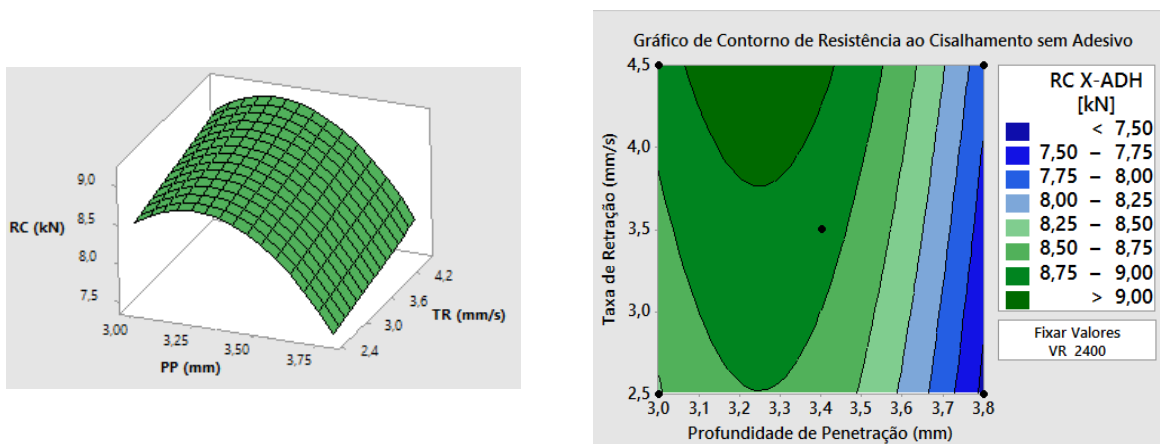
$$RC (VR, PP, TR) = -54,9 + 0,00728 \times VR + 36,48 \times PP - 1,92 \times TR - 4,33 \times PP^2 - 0,003479 \times VR \times PP + 0,0008833 \times VR \times TR \quad (3)$$

A Equação 3 está reproduzida na Figura 44 como três pares de superfícies de respostas e gráficos de contorno. Está retratado o comportamento da RC em função de VR e PP para uma TR constante a 3,5 mm/s na Figura 44-(a), RC em função de PP e TR para uma VR constante a 2400 RPM na Figura 44-(b) e RC em função de VR e TR para uma PP constante a 3,4 mm na Figura 44-(c). Pode ser notado que maiores valores de RC são obtidos para níveis de VR e PP intermediário. O aumento da TR tende a aumentar a RC, mas o efeito é menos evidente.

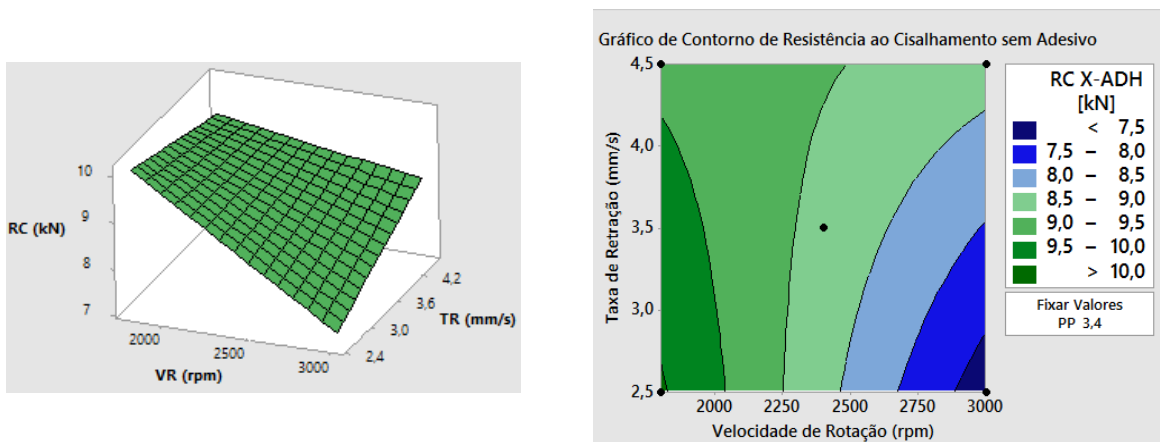
Figura 44 – Superfícies de Respostas e Gráficos de Contorno da Resistência ao Cisalhamento sem adesivo em função da Velocidade de Rotação, Profundidade de Penetração e Taxa de Retração.



(a)



(b)



(c)

5.2.1.3 Verificação

Pode-se observar um ajuste satisfatório entre o modelo e os valores experimentais ao analisar o gráfico dos valores previstos *versus* valores observados, mostrado como pontos preto na Figura 45.

A fim de verificar a conformidade do modelo desenvolvido, oito experimentos de confirmação (quadrados vazios na Figura 45) foram realizados como novas combinações de parâmetros de soldagem escolhidos dentro da janela de processo com a qual o modelo foi desenvolvido. A Tabela 11 mostra os parâmetros empregados na validação, valores previstos e experimentais, bem como o erro percentual. Comparado com os dados experimentais, o erro de previsão varia de -10,4% a 11,4%, o que está de acordo com o valor de 0,8689 obtido para o R^2 da equação. A fim de comparação, Plaine et al. (2015) obteve erro de previsão de 1,8% a 6,1%, utilizando uma metodologia semelhante de modelamento estatístico utilizando Metodologia de Superfície de Resposta.

Figura 45 - Gráfico de verificação do modelo de Resistência ao Cisalhamento sem adesivo.

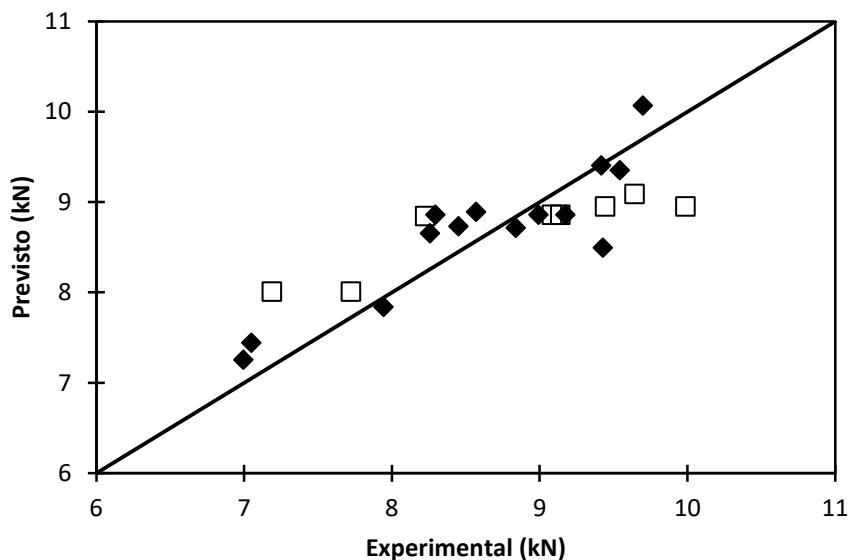


Tabela 11 - Experimentos de validação para o modelo de resistência ao cisalhamento sem adesivo.

Velocidade de Rotação (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)	RC Experimental (kN)	RC Previsto (kN)	Δ	%
2700	3,2	4	9,99	8,95	-1,04	-10,4%
2700	3,6	4	7,19	8,01	0,82	11,4%
2200	3,2	3	9,64	9,09	-0,56	-5,8%
2200	3,6	3	8,23	8,84	0,62	7,5%
2700	3,2	4	9,44	8,95	-0,49	-5,2%
2700	3,6	4	7,72	8,01	0,28	3,7%

5.2.1.4 Otimização

A fim de obter o maior valor possível de RC sem adesivo, foram realizados experimentos com o auxílio da Equação 3 e da abordagem OFAT (*One factor at time*).

De acordo com a equação, o maior valor de RC seria 9,95 kN, este resultado seria alcançado com a combinação de VR: 1800 RPM, PP: 3,45 mm e TR: 2,5 mm/s, conforme mostrado na Figura 46. Um ensaio com essa combinação foi realizado, entretanto o RC atingido foi de 8,64 kN, conforme pode ser observado na Tabela 12.

Figura 46 - Parâmetro otimizado de acordo com o modelo obtido.

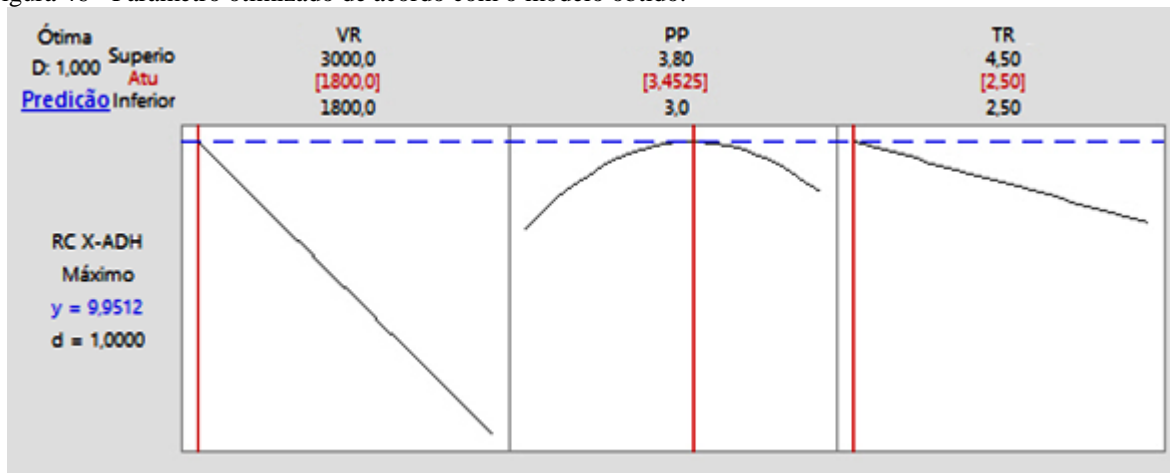


Tabela 12 - Resultados de Resistência ao Cisalhamento do parâmetro otimizado de acordo com o modelo obtido

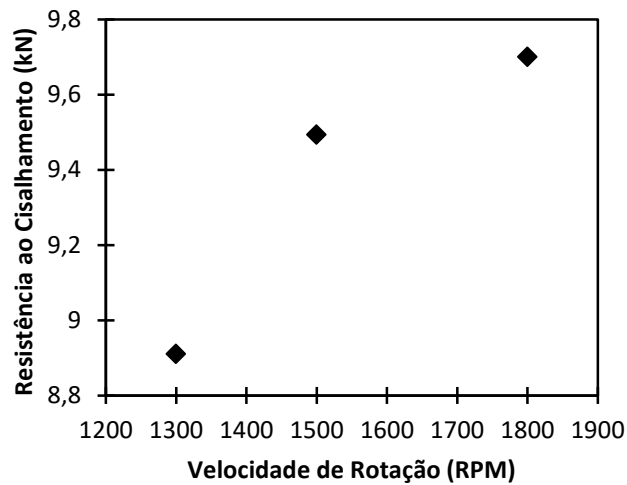
Parâmetro Otimizado				
SOLDA	Velocidade de Rotação (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)	RC (kN)
45	1800	3,4	2,5	9,7
60	1800	3,45	2,5	8,64

Como o aumento na PP não mostrou aumento na RC, foram realizadas tentativas diminuindo a VR, como mostrado na Tabela 13 e Figura 47. Como pode ser visto maior redução na VR até um valor de 1300 RPM não aumentou a RC.

Tabela 13 - Otimização OFAT para Velocidade de Rotação

Abordagem OFAT (Velocidade de Rotação)				
SOLDA	Velocidade de Rotação (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)	RC (kN)
45	1800	3,4	2,5	9,7
63	1500	3,4	2,5	9,49
64	1300	3,4	2,5	8,91

Figura 47 - Otimização OFAT para Velocidade de Rotação.

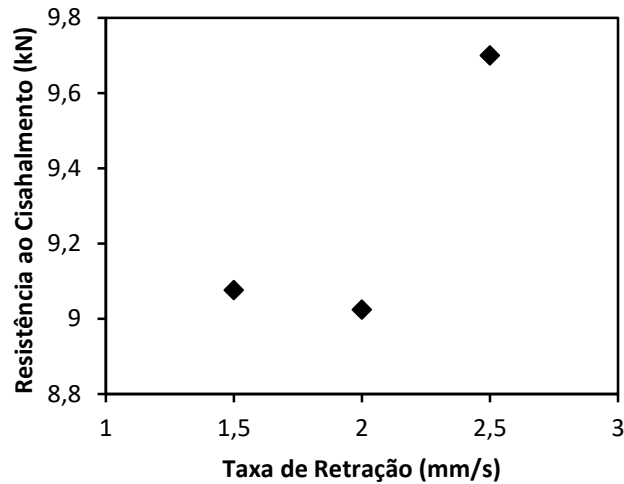


Adicionalmente, foram realizados experimentos reduzindo a TR. Novamente esta mudança no parâmetro não foi eficaz em alcançar maiores valores de RC, como pode ser visto na Tabela 14 e Figura 48. Não foi possível tentar aumentar a TR porque 4,5 mm/s já é o limite do equipamento.

Tabela 14 - Abordagem OFAT da Taxa de Retração para otimização da Resistência ao Cisalhamento sem adesivo.

Abordagem OFAT (Taxa de Retração)				
SOLDA	Velocidade de Rotação (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)	RC (kN)
45	1800	3,4	2,5	9,7
61	1800	3,4	2	9,0
62	1800	3,4	1,5	9,1

Figura 48- Abordagem OFAT da Taxa de Retração para otimização da Resistência ao Cisalhamento sem adesivo.



Desta forma, foi considerado que o melhor resultado de RC sem adesivo foi de 9,7 kN, atingido com a combinação de parâmetros de soldagem VR: 1800 RPM, PP: 3,4 mm e TR: 2,5 mm/s.

5.2.2 Resistência ao cisalhamento de juntas soldadas com adesivo

A matriz de planejamento experimental junto com os valores obtidos de RC com adesivo está mostrada na Tabela 15. As juntas exibiram RC variando de 5,61 kN (Combinação 11 – VR: 2400 RPM, PP: 3,0 mm, TR: 4,5 mm/s) a 8,58 kN (Combinação 8 – VR: 3000 RPM, PP: 3,4 mm, TR: 4,5 mm/s). O desvio padrão é dado pela repetição do ponto central (Combinações de 13 a 17), para este experimento o desvio padrão foi de 0,38 kN. Em relação aos valores de RC das juntas soldadas sem adesivo, a adição de adesivo resultou em uma queda média de 13% no valor de RC.

Tabela 15 - Valores de Resistência ao Cisalhamento com adesivo.

Combinação	Velocidade de Rotação (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)	Resistência ao Cisalhamento (kN)
1	1800	3	3,5	6,13
2	3000	3	3,5	6,57
3	1800	3,8	3,5	7,14
4	3000	3,8	3,5	8,56
5	1800	3,4	2,5	7,94
6	3000	3,4	2,5	8,40
7	1800	3,4	4,5	6,73
8	3000	3,4	4,5	8,58
9	2400	3	2,5	6,81
10	2400	3,8	2,5	7,22
11	2400	3	4,5	5,61
12	2400	3,8	4,5	7,43
13	2400	3,4	3,5	7,42
14	2400	3,4	3,5	8,31
15	2400	3,4	3,5	8,20
16	2400	3,4	3,5	7,39
17	2400	3,4	3,5	7,78

Diferente dos resultados obtidos no presente trabalho, Chowdhury et al. (2013) obtiveram maiores valores de RC com a adição de adesivo em juntas dissimilares de alumínio e magnésio obtidos pelo processo de *FSSW*. Entretanto, o trabalho destes pesquisadores foi realizado com uma metodologia diferente. Em primeiro lugar, a largura do corpo de prova era de 35 mm, o que garante uma maior área para a junta adesivada. Além disso, o adesivo foi aplicado nas amostras e curado antes da soldagem, o que garante que a maior parte do adesivo permanecerá na junta mesmo com a aplicação da carga axial de soldagem. Essa combinação de fatores contribui para o aumento da resistência das juntas com a adição de adesivo. No caso do presente trabalho, foram utilizadas amostras com largura de 25,4 mm e a soldagem foi realizada através do adesivo não curado, a fim de obter uma condição mais próxima da prática industrial. No procedimento experimental utilizado, ao aplicar a força de fixação, a maior parte do adesivo era movimentado para fora da área de sobreposição das chapas, o que

significa que o mesmo não exerceria nenhuma influência positiva sobre a resistência mecânica da junta. O motivo pelo qual as juntas soldadas com adesivo apresentaram menor resistência mecânica será novamente discutido na seção 5.6.2.

5.2.2.1 Análise de Variância

A ANOVA foi realizada com o objetivo de distinguir a influência dos parâmetros de soldagem no desempenho da junta no ensaio de RC.

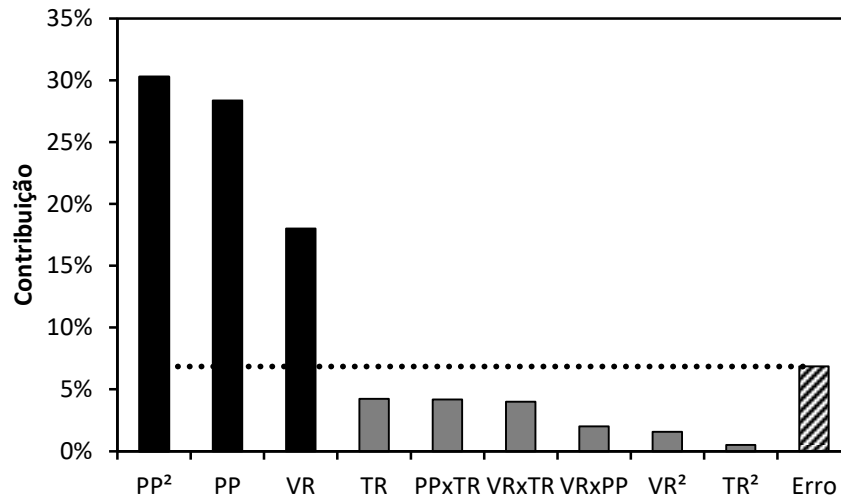
A Tabela 16 mostra os resultados da ANOVA realizado com os dados obtidos, para um intervalo de confiança de 95%. De acordo com os resultados, VR e PP são fatores expressivos no desempenho da junta com adesivo no desempenho no EC. Novamente, a TR parece não ser um fator com grande influência na RC com adesivo. Além disso, o comportamento quadrático da PP também se mostrou significativo para o modelo, enquanto o comportamento quadrático de VR e TR não são significantes. Nenhuma das possíveis interações (VRxPP, VRxTR e PPxTR) se mostraram importantes para explicar o processo.

Tabela 16 - Análise de Variância do Ensaio de Cisalhamento de juntas soldadas com adesivo.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F calculado	p-valor
Modelo	11,1949	9	1,24388	10,53	0,003
Linear	6,0973	3	2,03244	17,21	0,001
VR (RPM)	2,1705	1	2,17049	18,38	0,004
PP (mm)	3,4178	1	3,41781	28,94	0,001
TR (mm/s)	0,509	1	0,50904	4,31	0,077
Quadrático	3,8698	3	1,28992	10,92	0,005
VR ²	0,1875	1	0,18746	1,59	0,248
PP ²	3,6495	1	3,64952	30,9	0,001
TR ²	0,0614	1	0,06139	0,52	0,494
Interações	1,2278	3	0,40926	3,46	0,08
VR X PP	0,2421	1	0,24206	2,05	0,195
VR X TR	0,4823	1	0,48233	4,08	0,083
PP X TR	0,5034	1	0,50339	4,26	0,078
Erro	0,8268	7	0,11812		
Falta de Ajuste	0,0975	3	0,03251	0,18	0,906
Erro Puro	0,7293	4	0,18232		
Total	12,0217	16			

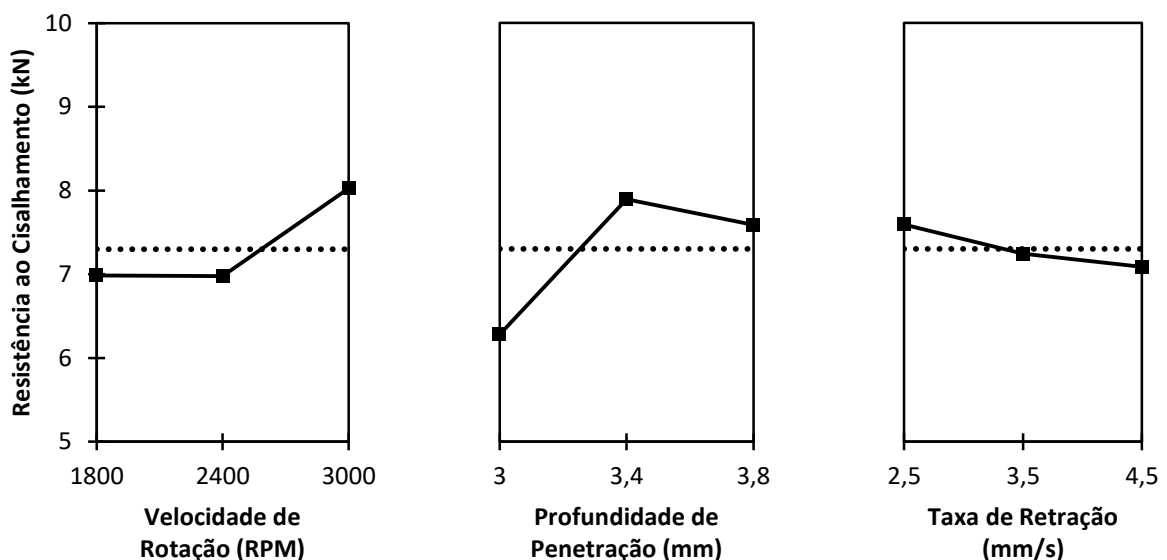
Para melhor entendimento, a contribuição de cada fator na variação total pode ser descrita em termos de percentagem, dividindo a Soma dos Quadrados de cada fator pela Soma dos Quadrados Total do experimento. Estes resultados estão mostrados na Figura 49. Os fatores são considerados significativos se a percentagem de contribuição for maior do que o erro associado. PP² mostrou ser o fator mais importante para explicar o comportamento da RC das juntas soldadas com adesivo (30,29%), seguido pela PP (28,36%) e VR (18,01%). Entretanto, TR não mostrou notável influência na RC para a faixa de parâmetros de soldagem selecionada.

Figura 49 - Contribuição de cada parâmetro na Resistência ao Cisalhamento com adesivo.



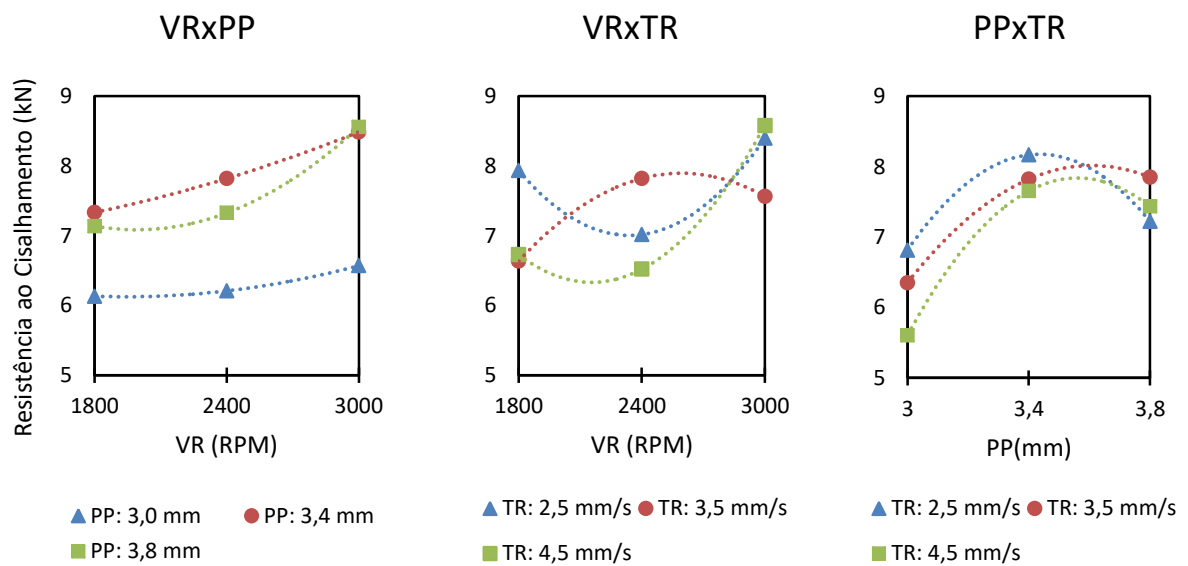
A Figura 50 mostra o gráfico de efeitos principais para a RC com adesivo, as linhas pontilhadas representam as médias dos resultados. Como pode ser observado, a VR tem uma influência importante na RC, o aumento da VR leva a um aumento da RC nas juntas soldadas com adesivo. A PP parece mostrar um comportamento quadrático, o aumento da PP aumenta a RC até um valor máximo localizado por volta de 3,4 mm, maior aumento da PP ocasiona uma redução da RC das juntas soldadas com adesivo. Esse comportamento é semelhante ao encontrado no caso de juntas soldadas sem adesivo. O efeito da TR na RC é muito baixo quando comparado com o efeito da VR e da PP.

Figura 50 - Gráficos de efeitos principais para a Resistência ao Cisalhamento com adesivo.



As possíveis interações dos fatores podem ser vistas em um gráfico de interação, onde as médias são dispostas como uma combinação dos fatores. A Figura 51 demonstra uma projeção bidimensional de VRxPP, VRxTR e PPxTR em termos de RC das juntas soldadas com adesivo. Como os comportamentos das curvas são virtualmente paralelos, assume-se que não há interação significativa entre os fatores.

Figura 51 - Gráficos de Interações para a Resistência ao Cisalhamento sem adesivo.



5.2.2.2 Metodologia de Superfície de Resposta

A Metodologia de Superfície de resposta foi aplicada para melhor compreensão de como a resposta RC se comporta com a variação da VR, PP e TR nas juntas soldadas com adesivo.

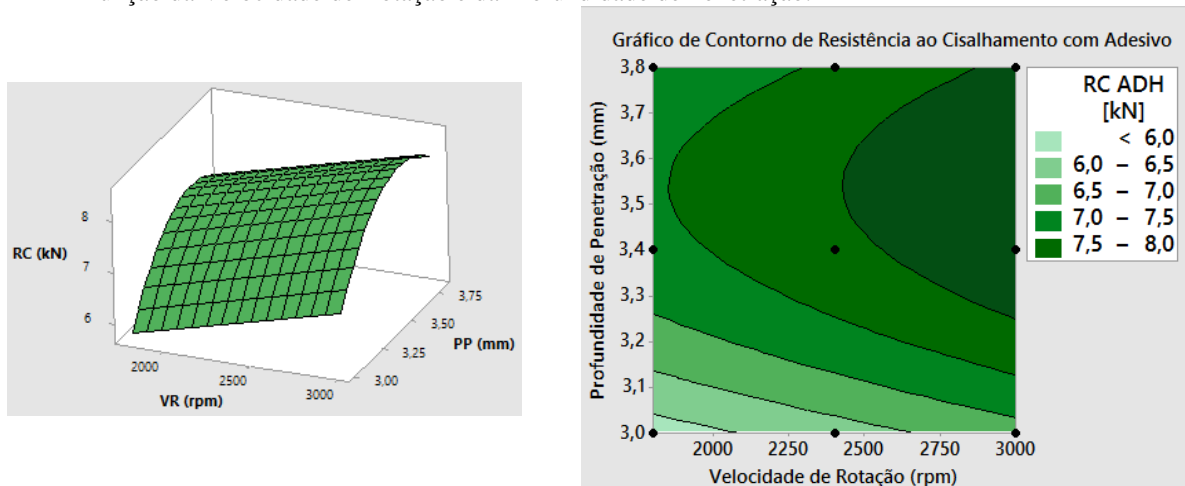
Baseado nos resultados obtidos com a matriz experimental, um modelo de regressão da RC das juntas soldadas com adesivo foi desenvolvido em termos dos valores reais dos fatores considerados significativos para o processo de acordo com a ANOVA. Como resultado desta abordagem, a Equação 4 descreve RC em função de VR e PP. Este modelo estatístico demonstrou ajuste satisfatório com os dados experimentais uma vez que o valor obtido para R^2 foi de 0,7669. A aplicação de adesivo na junta previamente a soldagem representou um fator experimental a mais a ser controlado durante o processo, além de influenciar diretamente no desempenho mecânico da junta. Dessa forma, as juntas adesivadas

apresentaram uma menor regularidade nos resultados, o que culminou no menor coeficiente de determinação do modelo obtido estatisticamente.

$$RC (VR, PP, TR) = -66,7 + 0,000868 \times VR + 40,99 \times PP - 5,79 \times PP^2 \quad (4)$$

A Equação 4 está reproduzida na Figura 52 como uma Superfície de Resposta e Gráfico de Contorno, onde a RC pode ser observada como uma função de VR e PP. As combinações de parâmetros estão ilustradas como pontos no gráfico. Pode ser notado que os maiores valores de RC são obtidos para altas VR e PP intermediária.

Figura 52 - Superfície de Resposta e Gráfico de Contorno da Resistência ao Cisalhamento com adesivo em função da Velocidade de Rotação e da Profundidade de Penetração.



5.2.2.3 Verificação

A Figura 53 mostra uma comparação dos dados experimentais com os resultados previstos pelo modelo. Através dos pontos pretos, é possível observar um ajuste satisfatório entre o modelo e os dados experimentais.

Com intenção de verificar a adequação do modelo desenvolvido, foram realizados 4 testes de confirmação (pontos brancos na Figura 53) com novos parâmetros de processo escolhidos dentro da faixa na qual a equação foi originada. A Tabela 17 mostra o conjunto de parâmetros empregados na validação, valores experimentais e previstos, bem como o erro percentual. Comparado com os dados experimentais, o erro da previsão do modelo varia de -1,8% a 6,8%, o que está de acordo com o valor de $R^2 = 0,7669$ obtido para a equação.

Figura 53 - Gráfico de verificação do modelo para Resistência ao Cisalhamento das juntas soldadas com adesivo.

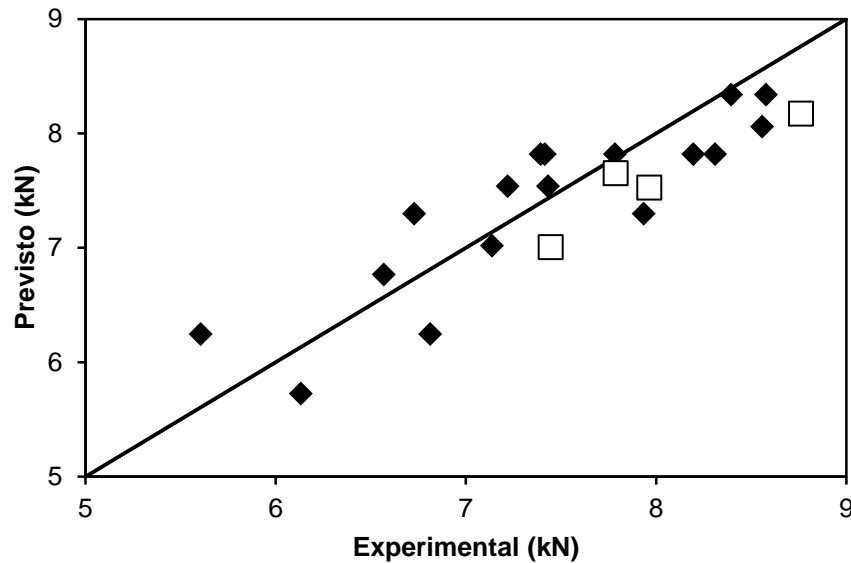


Tabela 17 - Experimentos de validação para o modelo de resistência ao cisalhamento com adesivo.

Velocidade de Rotação (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)	RC Experimental (kN)	RC Previsto (kN)	Δ	%
2100	3,2	3,5	7,45	7,001	-0,447	-6,0%
2100	3,6	3,5	7,79	7,648	-0,142	-1,8%
2700	3,2	3,5	7,97	7,522	-0,444	-5,6%
2700	3,6	3,5	8,76	8,169	-0,595	-6,8%

5.2.2.4 Otimização

A fim de obter o maior valor possível de RC em juntas soldadas com adesivo foram executados experimentos com o auxílio da Equação 4 e a abordagem OFAT.

De acordo com a equação, o maior valor possível de RC seria 8,49 kN, este valor seria atingido com a combinação de parâmetros VR: 3000 RPM e PP: 3,54 mm para qualquer valor de TR, conforme pode ser observado na Figura 54. Um experimento foi realizado com essa combinação de parâmetros e o valor obtido de RC foi de 8,66 kN, mostrado na Tabela 18.

Figura 54 - Parâmetro otimizado de acordo com o modelo obtido.

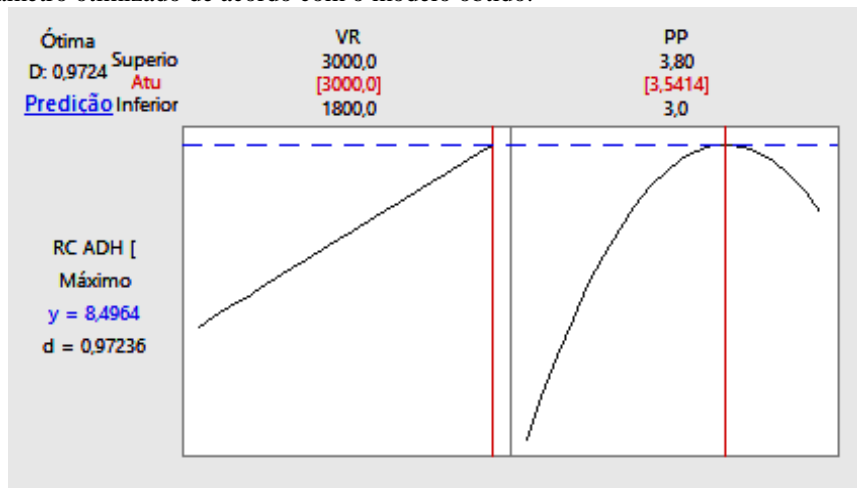
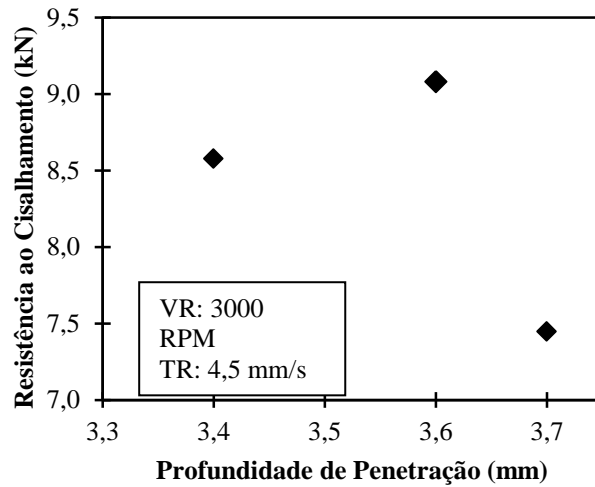


Tabela 18 - Resultado de Resistência ao Cisalhamento do parâmetro otimizado de acordo com a modelo obtido

Parâmetro Otimizado				
SOLDA	Velocidade de Rotação (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)	RC (kN)
119	3000	3,4	4,5	8,58
136	3000	3,54	2,5	8,66

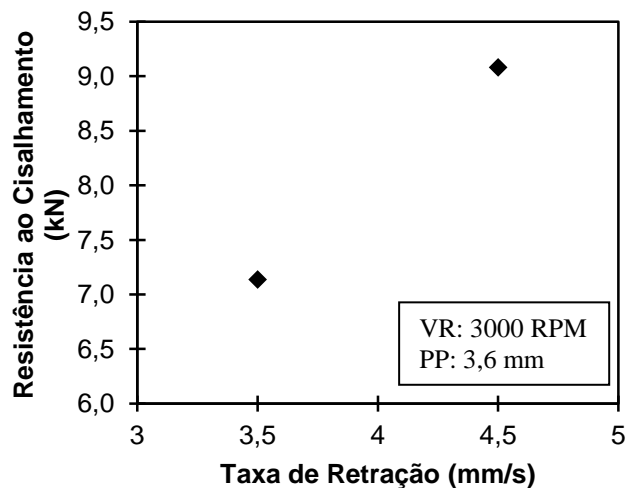
A partir dos parâmetros testados na solda N° 119, foi testado como o aumento da PP influenciaria a RC. Os resultados estão mostrados na Figura 55. Como pode ser observado, o aumento da PP apresentou o melhor resultado de RC em 3,6 mm (9,08 kN).

Figura 55 - Abordagem OFAT da Taxa de Retração para a otimização da Resistência ao Cisalhamento sem adesivo.



Adicionalmente, foram realizadas tentativas de otimização diminuindo a TR. Esta mudança de parâmetro não foi capaz de alcançar maiores valores de RC, como pode ser visto na Figura 56. Não foi possível realizar testes aumentando a TR, pois 4,5 mm/s já é o limite da máquina.

Figura 56 - Abordagem OFAT da Taxa de Penetração para otimização da Resistência ao Cisalhamento com adesivo.



Desta forma, considera-se que o maior valor de RC de juntas soldadas com adesivo foi de 9,08 kN. Este resultado foi obtido com a combinação de parâmetros VR: 3000 RPM, PP: 3,6 mm e TR: 4,5 mm/s.

5.3 RESISTÊNCIA AO DESCASCAMENTO

5.3.1 Resistência ao Descascamento de juntas soldadas sem adesivo

A matriz experimental obtida conforme a abordagem do BBD, bem como os valores experimentais de RD de cada uma das combinações de parâmetros de soldagem, pode ser vistos na Tabela 19. As juntas exibiram RD variando de 1,73 kN (combinação 6 – VR: 3000 RPM, PP: 3,4 mm, TR: 2,5 mm/s) até 3,26 kN (combinação 1 – VR: 1800 RPM, PP: 3,0 mm, TR: 3,5 mm/s). O desvio padrão foi calculado através da repetição do ponto central (combinações de 13 a 17). Neste experimento, o desvio padrão foi de 0,23 kN.

Tabela 19 - Valores de Resistência ao Descascamento para as diferentes combinações do BBD.

Combinação	Velocidade de Rotação (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)	Resistência ao Descascamento (kN)
1	1800	3	3,5	3,264
2	3000	3	3,5	2,765
3	1800	3,8	3,5	2,918
4	3000	3,8	3,5	2,092
5	1800	3,4	2,5	2,681
6	3000	3,4	2,5	1,730
7	1800	3,4	4,5	2,753
8	3000	3,4	4,5	2,574
9	2400	3	2,5	2,901
10	2400	3,8	2,5	1,988
11	2400	3	4,5	3,013
12	2400	3,8	4,5	2,239
13	2400	3,4	3,5	2,133
14	2400	3,4	3,5	2,693
15	2400	3,4	3,5	2,097
16	2400	3,4	3,5	2,524
17	2400	3,4	3,5	2,478

Foram observados valores consideravelmente mais baixos para a RD em comparação à RC, da mesma forma que ocorre em ensaios de resistência mecânica sob solicitação de tração. Rosendo (2009) justifica esse comportamento devido à severidade deste tipo de solicitação.

5.3.1.1 Análise de Variância

A ANOVA foi realizada para distinguir a influência dos parâmetros de soldagem no desempenho da RD das juntas soldadas sem adesivo.

A Tabela 20 mostra a ANOVA realizada para os dados experimentais obtidos, com um intervalo de confiança de 95%. Segundo os resultados, apenas VR e PP são fatores significativos afetando o desempenho das juntas na RD. A TR, os termos quadráticos e as

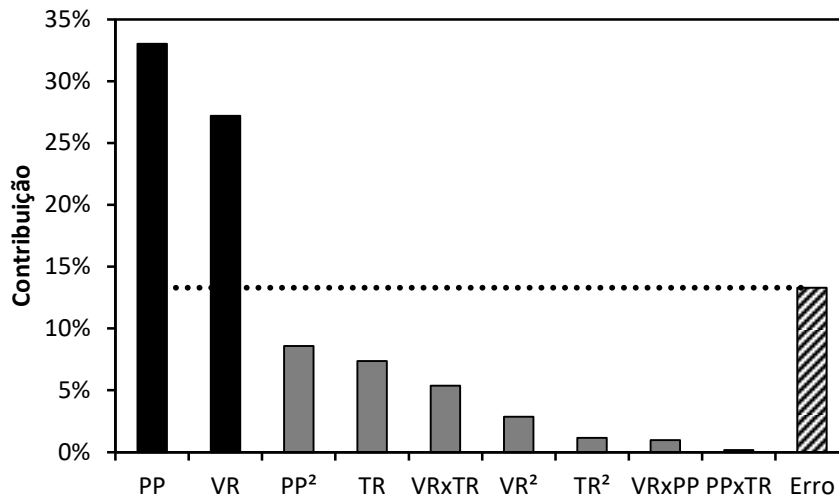
interações não se mostraram significativos para o desempenho das juntas soldadas sem adesivo sob ensaio de descascamento.

Tabela 20 - Análise de Variância do Ensaio de Descascamento de juntas soldadas sem adesivo

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F calculado	p-valor
Modelo	2,40494	9	0,267215	5,08	0,022
Linear	1,87316	3	0,624388	11,88	0,004
VR (RPM)	0,75338	1	0,753378	14,33	0,007
PP (mm)	0,9153	1	0,915304	17,41	0,004
TR (mm/s)	0,20448	1	0,20448	3,89	0,089
Quadrático	0,35122	3	0,117072	2,23	0,173
VR ²	0,07903	1	0,079027	1,5	0,26
PP ²	0,238	1	0,238	4,53	0,071
TR ²	0,03224	1	0,032237	0,61	0,459
Interações	0,18056	3	0,060186	1,14	0,395
VR X PP	0,02673	1	0,026732	0,51	0,499
VR X TR	0,149	1	0,148996	2,83	0,136
PP X TR	0,00483	1	0,00483	0,09	0,771
Erro	0,36804	7	0,052577		
Falta de Ajuste	0,09876	3	0,032919	0,49	0,708
Erro Puro	0,26928	4	0,067321		
Total	2,77298	16			

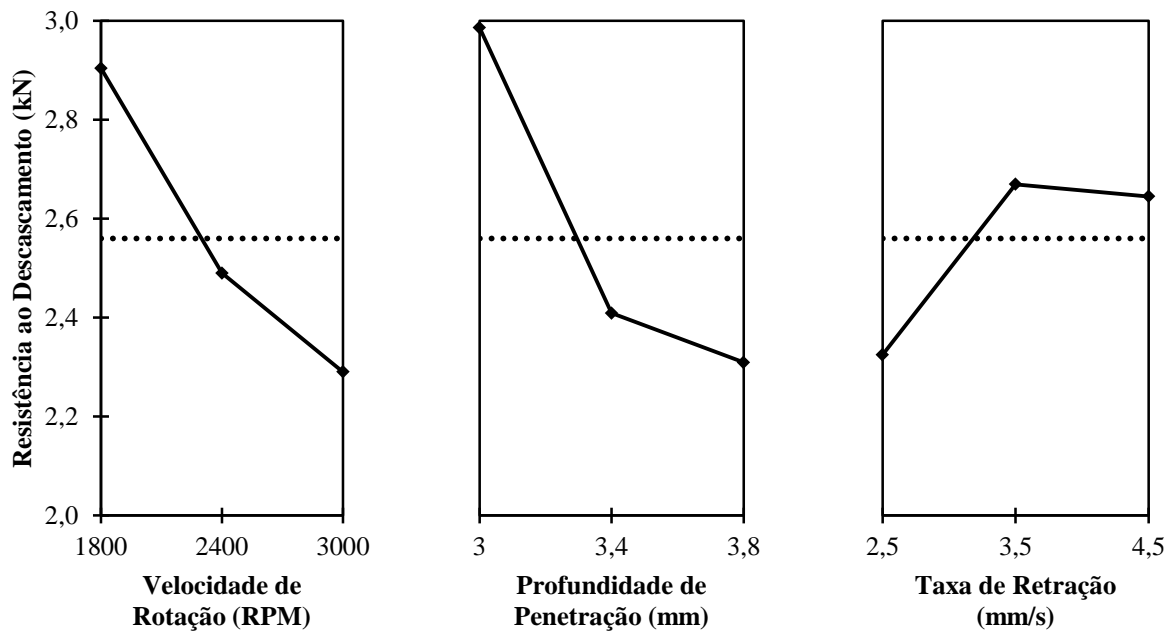
Para melhor compreensão, a contribuição de cada fator na variação total do experimento pode ser escrita em termos de percentagem, dividindo a soma dos quadrados de cada termo pela soma dos quadrados total do experimento. Estes resultados estão mostrados na Figura 57. Os fatores são considerados significativos quando a percentagem de contribuição é maior do que o erro do experimento. A PP mostrou ser o parâmetro de soldagem com maior influência na RD das juntas soldadas sem adesivo (33,03%), seguido pela VR (27,19%). Todos os outros termos parecem não ter influência significativa na RD das juntas soldadas sem adesivo para a faixa de parâmetros selecionada.

Figura 57 - Contribuição de cada parâmetro na Resistência ao Descascamento sem adesivo



A Figura 58 mostra o gráfico de efeitos principais para a RD de juntas soldadas sem adesivo, a linha pontilhada representa a média dos resultados. Como pode ser observado, VR e PP tem um grande efeito no desempenho do ensaio de descascamento. O aumento de VR e PP levam a uma redução na RD. Além disso, é possível observar que o aumento da TR leva a um aumento da RD. Entretanto, o efeito da TR é muito baixo quando comparado com o efeito da VR e da PP.

Figura 58 - Gráficos de efeitos principais para a Resistência ao Descascamento sem adesivo, a linha pontilhada representa a média dos resultados.



5.3.1.2 Metodologia de Superfície de Resposta

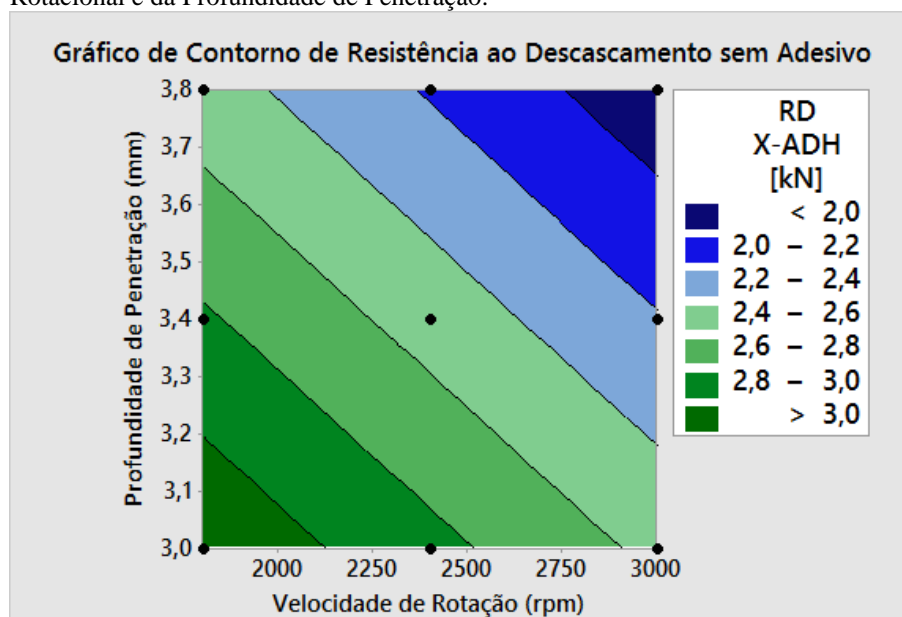
A metodologia de superfície de resposta foi aplicada para entender melhor como o desempenho no ensaio de descascamento de juntas soldadas sem adesivo varia com VR e PP.

Baseado nos resultados obtidos, foi desenvolvido um modelo de regressão que descreve a RD das juntas soldadas sem adesivo em termos dos valores reais dos fatores considerados importantes pela ANOVA. Como resultado desta abordagem, a Equação 5 descreve a RD em função da VR e PP. Este modelo estatístico demonstrou um ajuste deficiente aos dados experimentais com R^2 igual a 0,6022. O baixo valor do coeficiente de determinação é reflexo no desvio padrão alto observado nos experimentos. Tal fato pode ser associado à dificuldade na padronização dos corpos de prova.

$$RD (VR, PP) = 6.63 - 0.000511 \times VR - 0.8468 \times PP \quad (5)$$

A Equação 5 está reproduzida na Figura 59 como um gráfico de contorno, no qual está reproduzido o comportamento da RD em função da VR e da PP para qualquer valor de TR. Pode ser notado que maiores valores de RD são obtidos para menores valores de VR e PP.

Figura 59 - Gráfico de Contorno da Resistência ao Descascamento sem adesivo em função da Velocidade Rotacional e da Profundidade de Penetração.



5.3.2 Resistência ao Descascamento de juntas soldadas com adesivo.

A matriz de planejamento experimental obtida segundo a abordagem BBD junto aos valores experimentais de RD das juntas soldadas com adesivo pode ser vista na Tabela 21. As juntas exibiram RD variando de 0,68 kN (combinação 2 – VR: 3000 RPM, PP: 3,0 mm, TR: 3,5 mm/s) até 2,74 kN (combinação 15 – VR: 2400 RPM, PP: 3,4 mm, TR: 3,5 mm/s). O desvio padrão foi calculado com base nos resultados obtidos com a repetição do ponto central (combinações 13 a 17). Neste experimento, o desvio padrão foi de 0,41 kN. Semelhante ao ocorrido com a RC das juntas soldadas com adesivo, a RD diminui em média 35% devido à adição de adesivo.

Tabela 21 - Valores de Resistência ao Descascamento para as diferentes combinações do BBD.

Combinação	Velocidade de Rotação (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)	Resistência ao Descascamento (kN)
1	1800	3	3,5	1,067
2	3000	3	3,5	0,684
3	1800	3,8	3,5	2,067
4	3000	3,8	3,5	1,787
5	1800	3,4	2,5	2,254
6	3000	3,4	2,5	1,996
7	1800	3,4	4,5	1,398
8	3000	3,4	4,5	2,104
9	2400	3	2,5	1,398
10	2400	3,8	2,5	1,969
11	2400	3	4,5	1,078
12	2400	3,8	4,5	1,914
13	2400	3,4	3,5	1,718
14	2400	3,4	3,5	1,681
15	2400	3,4	3,5	2,740
16	2400	3,4	3,5	1,937
17	2400	3,4	3,5	1,651

5.3.2.1 Análise de Variância

A ANOVA foi realizada para compreender como a RD das juntas soldadas com adesivo varia em função dos parâmetros de soldagem.

A Tabela 22 mostra os resultados da ANOVA realizada com os dados obtidos, para um intervalo de confiança de 95%. De acordo com os resultados, apenas a PP é um fator com influência significativa na RD das juntas soldadas com adesivo. VR, TR, termos quadráticos e interações não mostraram influência significativa, segundo esta análise.

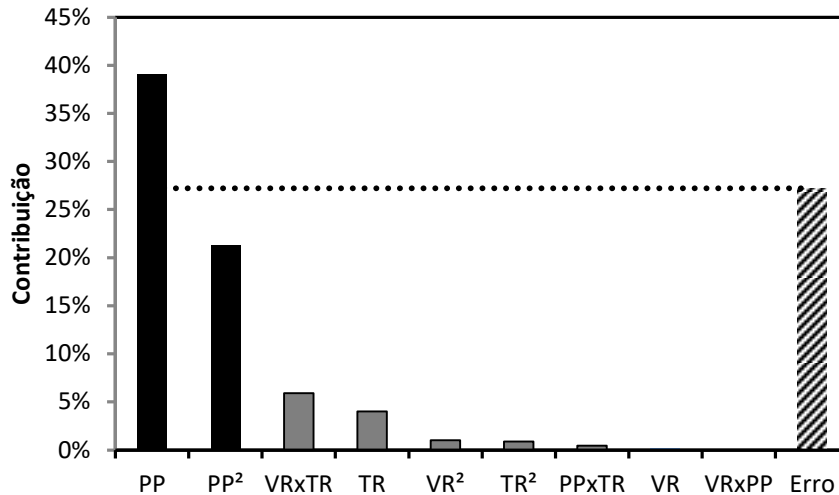
Tabela 22 - Análise de Variância do Ensaio de Descascamento de juntas soldadas com adesivo

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F calculado	p-valor
Modelo	2,87193	9	0,3191	2,08	0,173
Linear	1,70343	3	0,56781	3,71	0,07
VR (RPM)	0,00578	1	0,00578	0,04	0,852
PP (mm)	1,54001	1	1,54001	10,06	0,016
TR (mm/s)	0,15764	1	0,15764	1,03	0,344
Quadrático	0,91596	3	0,30532	1,99	0,204
VR ²	0,0404	1	0,0404	0,26	0,623
PP ²	0,83829	1	0,83829	5,47	0,052
TR ²	0,03452	1	0,03452	0,23	0,649
Interações	0,25253	3	0,08418	0,55	0,664
VR X PP	0,00265	1	0,00265	0,02	0,899
VR X TR	0,23232	1	0,23232	1,52	0,258
PP X TR	0,01756	1	0,01756	0,11	0,745
Erro	1,07198	7	0,15314		
Falta de Ajuste	0,23223	3	0,07741	0,37	0,781
Erro Puro	0,83975	4	0,20994		
Total	3,94391	16			

A fim de compreender melhor os resultados, a contribuição de cada fator na variação total do experimento foi escrita em forma de porcentagem, dividindo a soma dos quadrados de cada fator pela soma dos quadrados total do experimento. Estes resultados estão mostrados na Figura 60. Os fatores são considerados significativos quando a porcentagem da sua

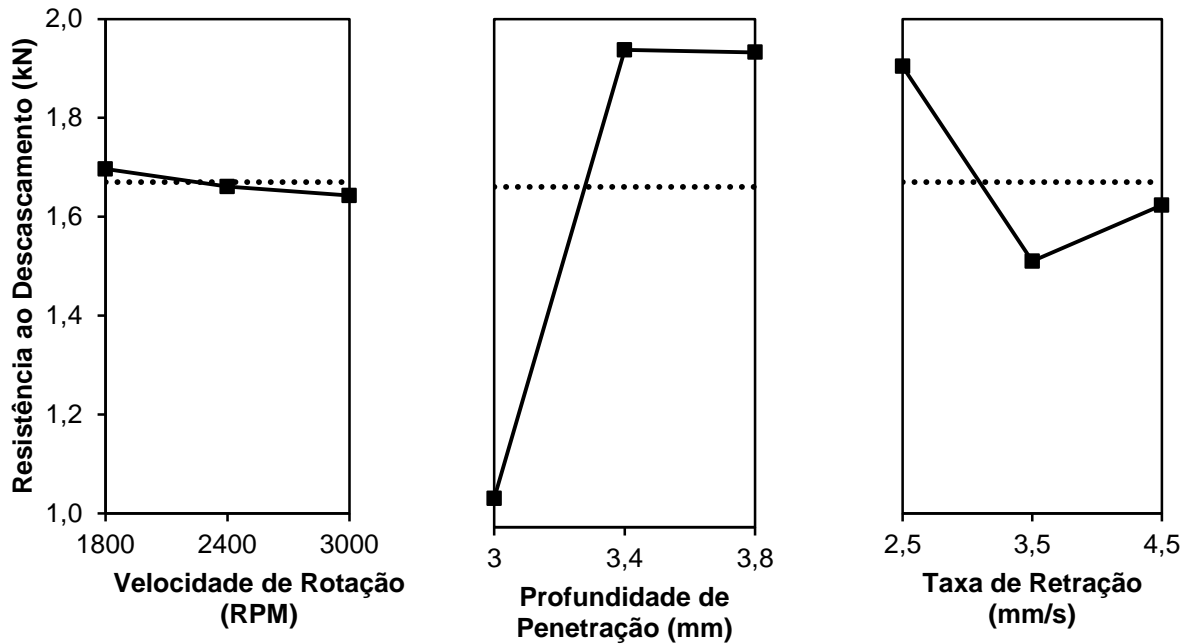
contribuição na resposta é maior do que o erro do experimento. A PP mostrou ser o fator de maior influência da RD das juntas soldadas com adesivo (39,08%), seguido pelo termo PP^2 (21,27%).

Figura 60 - Contribuição de cada parâmetro na Resistência ao Descascamento com adesivo



A Figura 61 mostra o gráfico de efeitos principais para a RD das juntas soldadas com adesivo. Como pode ser observado, a VR não se mostrou influente na RD. A PP é o fator com maior influência na RD. O aumento da PP de 3,0 para 3,4 mm levou a um expressivo aumento de RD. Entretanto, um aumento adicional da PP não mostrou aumento adicional na RD. Adicionalmente, é possível observar a influência da TR na RD. A TR parece ter maior influência na RD do que a VR e, além disso, apresentou um comportamento quadrático com RD mínimo em TR: 3,5 mm/s. Maiores valores de RD foram observados para TR: 2,5 mm/s.

Figura 61 - Gráficos de efeitos principais para a Resistência ao Descascamento com adesivo



5.3.2.2 Metodologia de Superfície de Resposta

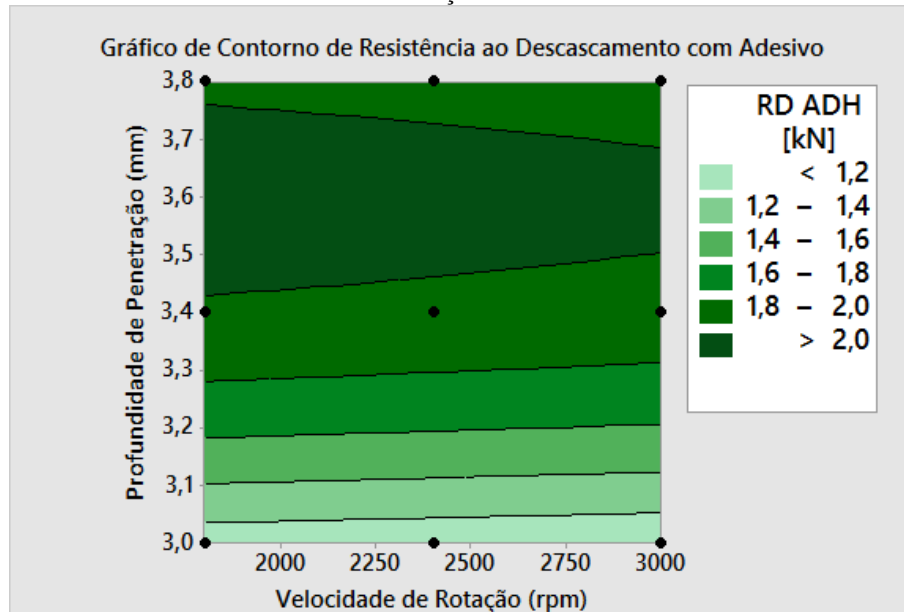
A metodologia de superfície de resposta foi aplicada para melhor compreensão de como a RD das juntas soldadas com adesivo variam em função da VR e da PP.

Fundamentado nos resultados obtidos experimentalmente, foi desenvolvido um modelo de regressão da RD das juntas soldadas com adesivo em termos dos valores reais dos fatores considerados significativos segundo a ANOVA. Embora a ANOVA não tenha indicado a VR como um fator importante, ele foi empregado na equação para desenvolver um modelo similar aos obtidos anteriormente. Ainda, o termo PP^2 foi incluído na equação porque o valor-p deste parâmetro foi apenas um pouco maior do que 0,05. Como resultado desta abordagem, a Equação 6 descreve a RD das juntas soldadas com adesivo em função de VR e PP. Este modelo estatístico demonstrou um fraco ajuste aos dados experimentais, sendo que o R^2 foi de 0,6061.

$$RD (VR, PP) = -33.9 - 0.000045 \times VR + 20.02 \times PP - 2.79 \times PP^2 \quad (6)$$

A Equação 6 está reproduzida na Figura 62 como um gráfico de contorno. No gráfico está ilustrado o comportamento da RD em função da VR e da PP para qualquer TR. Pode ser notado que os maiores valores de RD são obtidos para qualquer faixa de VR e alta PP.

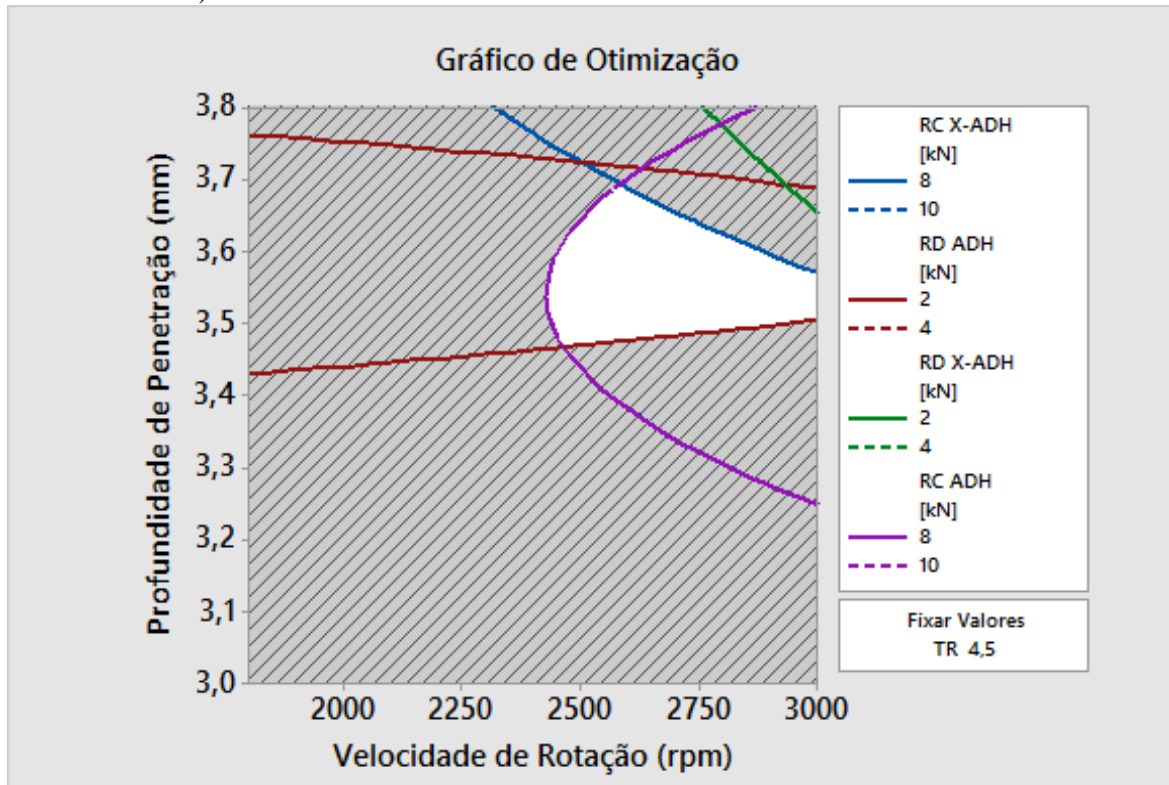
Figura 62 - Gráfico de Contorno da Resistência ao Descascamento com adesivo em função da Velocidade Rotacional e da Profundidade de Penetração.



5.4 OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETRO PARA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E RESISTÊNCIA AO DESCASCAMENTO PARA JUNTAS SOLDADAS SEM ADESIVO E COM ADESIVO

Apesar do baixo coeficiente de determinação (R^2) de ambos os modelos estatísticos para RD (Equações 5 e 6), eles foram utilizados juntamente aos modelos de regressão de RC a fim de obter uma área comum onde a RC de juntas soldadas sem adesivo ou com adesivo seja maior do que 8 kN e a RD de juntas soldadas sem adesivo ou com adesivo seja maior do que 2 kN. Os quatro gráficos de contorno foram combinados para determinar esta área; o resultado desta operação pode ser visto na Figura 63. Neste gráfico, a área branca localiza a faixa de parâmetros onde, segundo os modelos obtidos, RC é maior do que 8 kN e RD é maior do que 2 kN.

Figura 63 - Gráfico de contorno combinado de Resistência ao Cisalhamento e Resistência ao Descascamento, com valores maiores do que 8 e 2 kN, respectivamente; para ambas as condições (juntas sem e com adesivo).



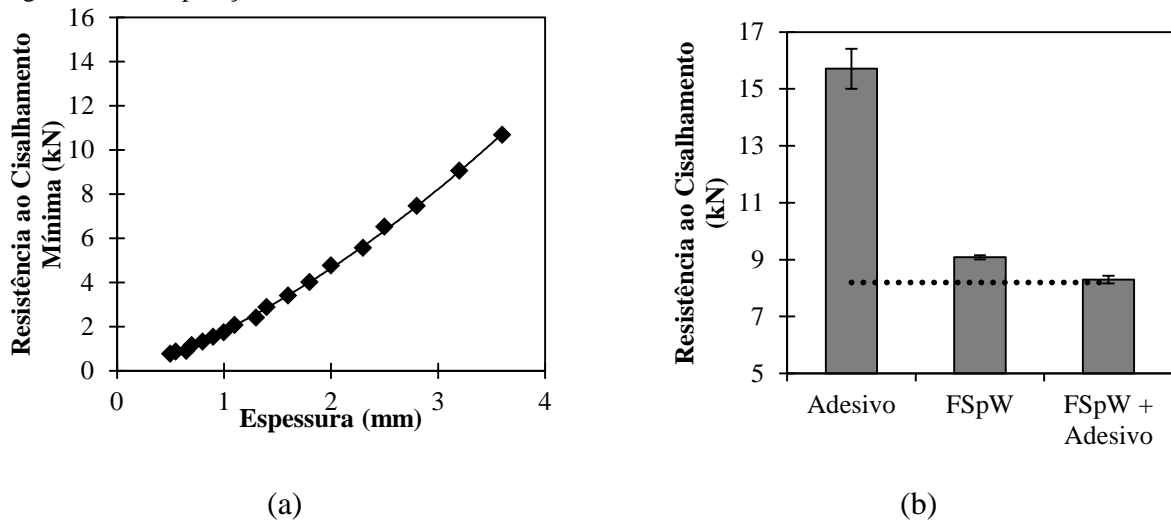
A fim de confirmar este resultado, uma combinação de parâmetros de soldagem localizada na área branca indicada na Figura 63 foi escolhida para produção de novas juntas e execução de ensaios mecânicos. Além disso, as soldas foram executadas com TR de 4,5 mm/s, com o objetivo de executar o processo o mais rápido possível. O parâmetro selecionado, bem como o resultado dos testes mecânicos, pode ser visto na Tabela 23. Como pode ser observado, os resultados atenderam aos requisitos propostos acima.

Tabela 23 – Parâmetro otimizado para Resistência ao Cisalhamento e Resistência ao Descascamento para juntas soldadas sem adesivo e com adesivo.

SOLDA	Velocidade	Profundidade	Taxa	RC	RC	RD	RD
	de Rotação (RPM)	de Penetração (mm)	de Retração (mm/s)	Sem Adesivo (kN)	Com Adesivo (kN)	Sem Adesivo (kN)	Com Adesivo (kN)
194				9,15			
195				9,01			
196					8,16		
197	2600	3,6	4,5		8,43		
198						2,41	
199						2,77	
200							2,43
201							2,12

O gráfico mostrado na Figura 64 compara os valores obtidos de RC da junta adesivada e das juntas soldadas em ambas as condições com a RC mínima exigida pela norma *AWS D17.2:2013 Aluminium Tensile Shear Strength*, que especifica requisitos para Solda a Ponto por Resistência para aplicações aeroespaciais, a qual é bem conhecida e que são mais severas do que aplicações automotivas. Como pode ser visto, os valores obtidos estão de acordo com os requisitos da norma, que especifica um valor mínimo de resistência ao cisalhamento de 8,2 kN para uma junta soldada com chapas de 3,0 mm de espessura, representada pela linha pontilhada na Figura 64.

Figura 64 – Comparação dos valores obtidos de Resistência ao Cisalhamento com a norma AWS D17.2:2013.



Além disso, o tempo total do processo de soldagem do parâmetro otimizado foi de 1,7 segundos. De acordo com Spinella (2013) o tempo de ciclo típico de uma solda do processo RSW está entre 1,5 a 2 segundos. Isto significa que é possível produzir soldas rápidas com propriedades mecânicas que atendem à norma e que são capazes de competir com o processo de união a ponto vigente na indústria automotiva.

5.5 PERFIL TÉRMICO DO PROCESSO DE SOLDAGEM

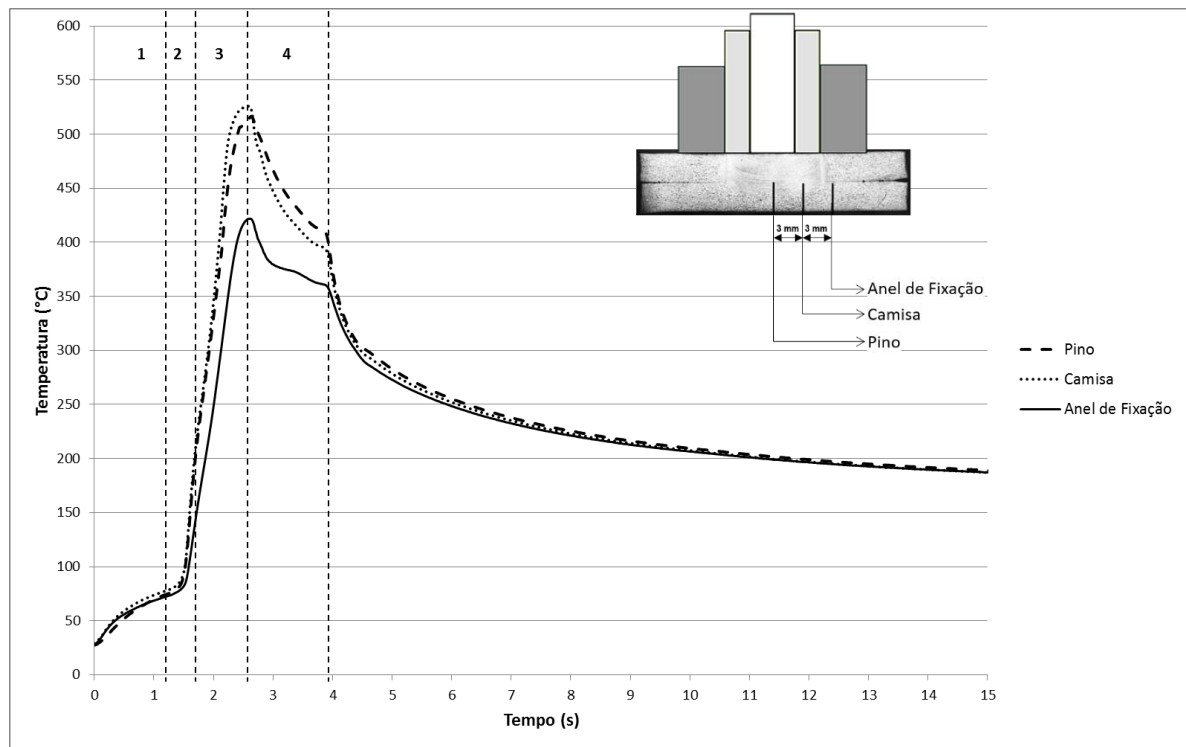
Para verificar as temperaturas atingidas durante o processo, foi avaliado o ciclo térmico durante o processo de soldagem com a utilização de termopares localizados na chapa inferior abaixo da posição do pino, da camisa e do anel de fixação. A Figura 65 retrata o perfil térmico de uma soldagem realizada com VR: 1800 RPM, PP: 3,4 mm e TR: 4,5 mm/s. As diferentes etapas do processo podem ser associadas com os eventos que ocorrem nesse perfil térmico. Na etapa 1 (indicado no gráfico), ocorre a fixação e a temperatura começa a crescer devido à temperatura da ferramenta que já está elevada. Na etapa 2, o pino e a camisa têm a sua rotação elevada até 1800 RPM e tocam a superfície da chapa superior. Na etapa 3, ocorre a penetração da camisa e a retração do pino, nesta fase ocorre a maior taxa de aquecimento. Na etapa 4, o pino e a camisa retornam para suas posições iniciais na superfície da chapa superior.

A temperatura máxima para todas as zonas ocorre no final da etapa de penetração. Abaixo do pino e da camisa, é atingido a temperatura máxima de 510°C. Abaixo do Anel de Fixação, a temperatura máxima atingida é de 420°C. De acordo com a literatura (MIAO; LAUGHLIN, 2000), temperaturas maiores do que 250°C promovem a dissolução dos precipitados na liga de alumínio AA6111. Isto significa que, em função das altas temperaturas

atingidas durante o processo, deve ocorrer a dissolução dos precipitados na ZM, na ZTMA e na ZAC próxima ao botão de solda.

Além disso, a temperatura atingida durante o processo está acima da temperatura de decomposição do adesivo, que é em torno de 400°C, como demonstrado através da análise realizada com TGA (seção 5.1.1). Este fato deve ser levado em conta em uma possível aplicação industrial, pois as propriedades do adesivo (corrosão, selamento, resistência mecânica, etc.) serão muito provavelmente afetadas nas regiões no entorno da junta soldada a ponto por fricção.

Figura 65 - Perfil Térmico do processo de soldagem.



5.6 AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL

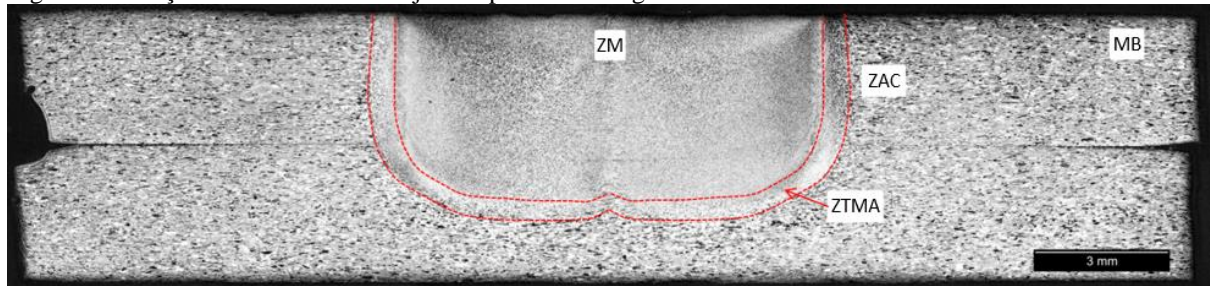
5.6.1 Juntas soldadas sem adesivo

A Figura 66 (a) apresenta a visão geral da macrografia da seção transversal de uma junta típica, produzida com a combinação de parâmetros 7 (VR: 1800 RPM, PP: 3,4 mm, RR: 4,5 mm/s). Nessa imagem foram destacadas a Zona de Mistura (ZM), a Zona Termomecanicamente Afetada (ZTMA), a Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e o Metal Base (MB).

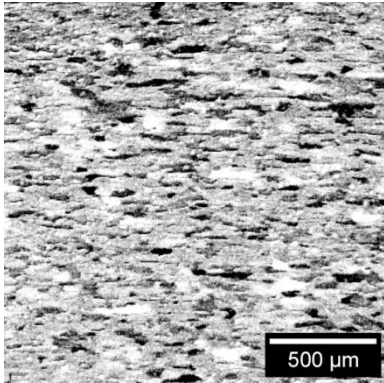
O MB está apresentado em maior magnificação na Figura 66 (b), ele é composto por grãos alongados e não é possível observar precipitados coalescidos. A ZM pode ser vista em maior magnificação na Figura 66 (c), essa zona é caracterizada pela estrutura de grãos equiaxiais finos que ocorreram devido à recristalização dinâmica. Esta região compreende o local onde o material é agitado devido à movimentação da camisa e do pino. A ZTMA em maior magnificação está exibida na Figura 66 (d), esta região é identificada por grãos alongados que foram afetados pela deformação plástica e pelo calor gerado pela fricção. A ZAC é mostrada na Figura 66 (e). Esta zona não pode ser facilmente distinguida apenas por metalografia, pois a microestrutura é similar ao MB. Entretanto, o calor desenvolvido durante o processo promove a dissolução e o coalescimento dos precipitados, afetando o comportamento mecânico (microdureza), como será observado na seção 5.6.1.

O padrão geométrico conhecido como “gancho” para este parâmetro é exibido na Figura 66 (f), é possível observar a ponta do “gancho” na fronteira entre a ZTMA e a ZM.

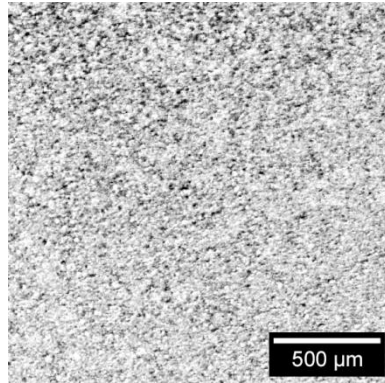
Figura 66 – Seção transversal de uma junta típica e suas regiões características.



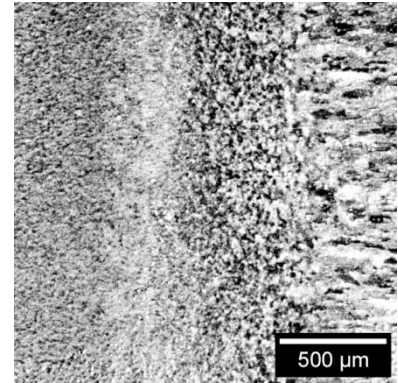
(a) – Visão geral



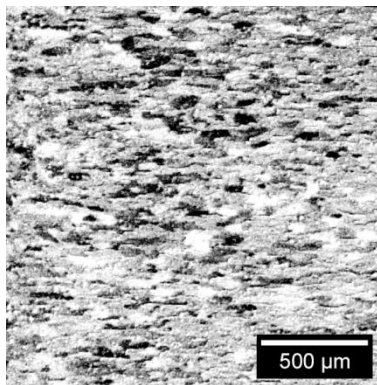
(b) – Metal Base - MB



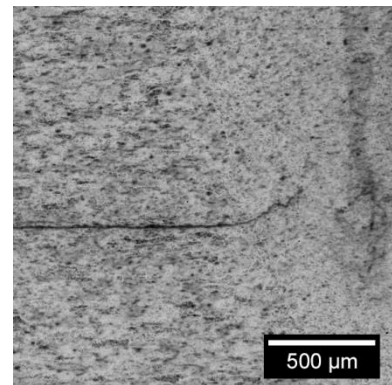
(c) – Zona de Mistura - ZM



(d) – Zona Termomecanicamente Afetada - ZTMA



(e) – Zona Afetada pelo Calor (ZAC)



(f) “Gancho”

Com a finalidade de identificar a relação entre a RC e a microestrutura das juntas, foram medidas a largura efetiva da junta (W) e a altura do gancho (h) como mostrado na Figura 67. Os resultados dessas medidas para a matriz de parâmetros da metodologia BBD podem ser observados na Tabela 24 e Tabela 25.

Figura 67 - Ilustração Esquemática da medição da largura efetiva da junta (W) e da altura do “gancho” (h).

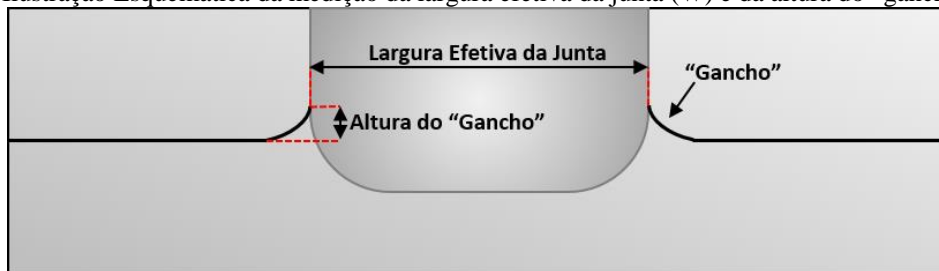
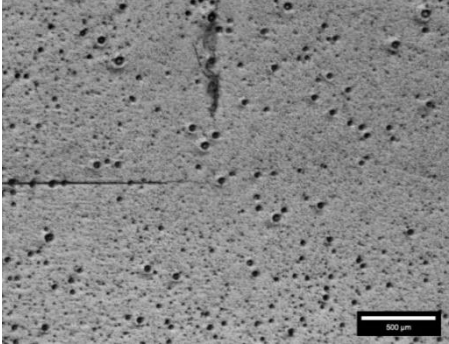
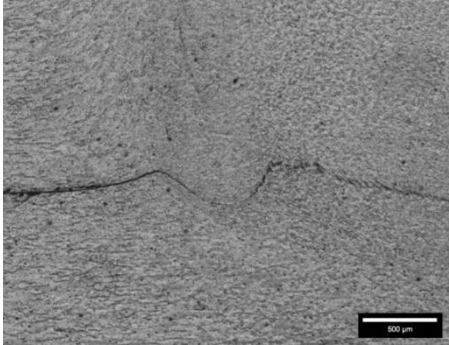
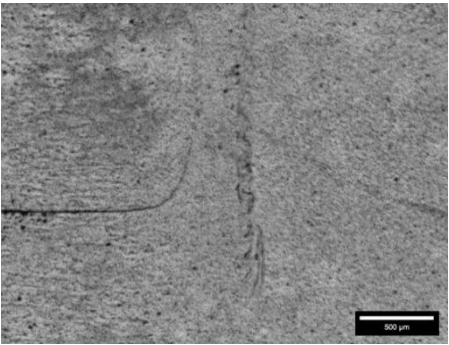
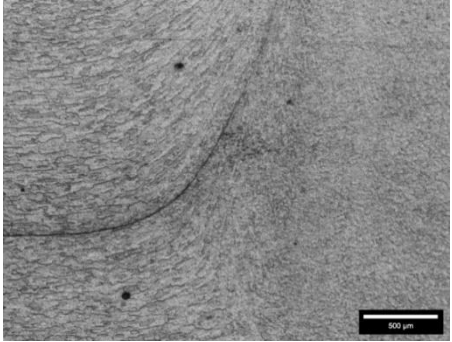
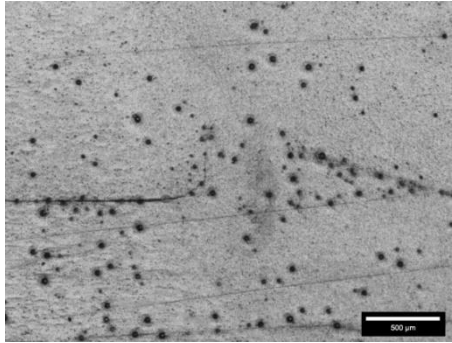
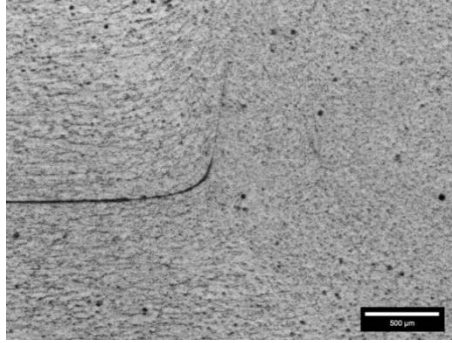
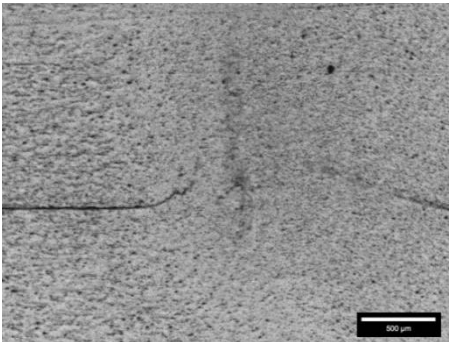
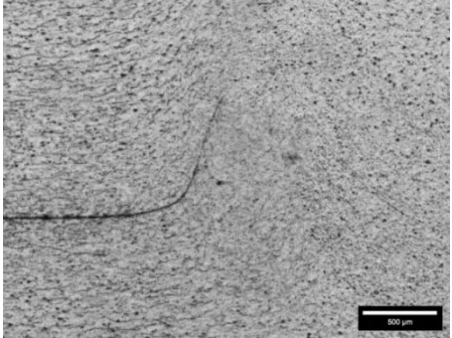
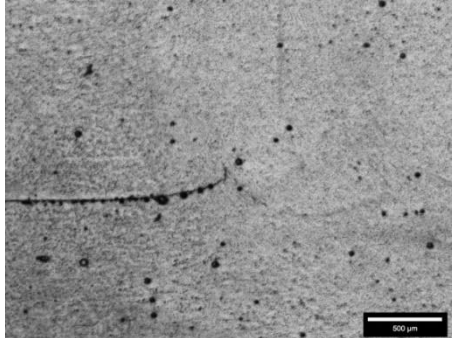
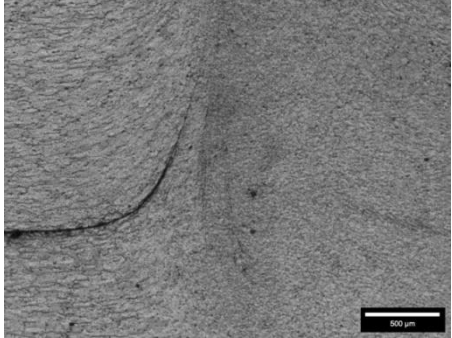
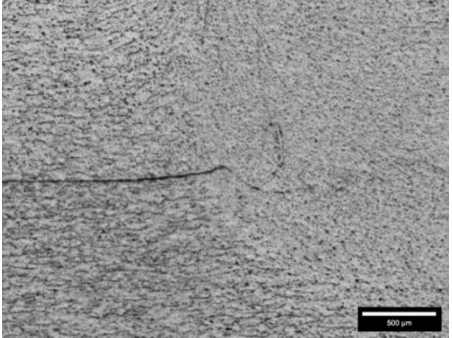


Tabela 24 - Morfologia dos "ganchos" obtidos para os diferentes parâmetros

Parâmetro	Velocidade Rotacional (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)	Imagem
1	1800	3	3,5	
2	3000	3	3,5	
3	1800	3,8	3,5	

4	3000	3,8	3,5	
5	1800	3,4	2,5	
6	3000	3,4	2,5	
7	1800	3,4	4,5	

8	3000	3,4	4,5	
9	2400	3	2,5	
10	2400	3,8	2,5	
11	2400	3	4,5	

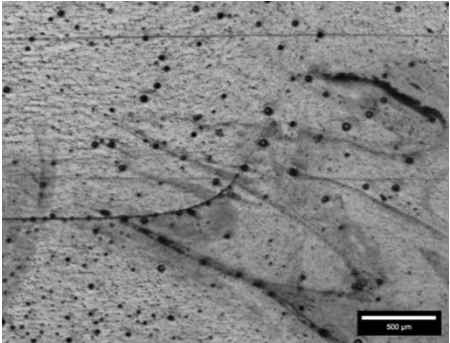
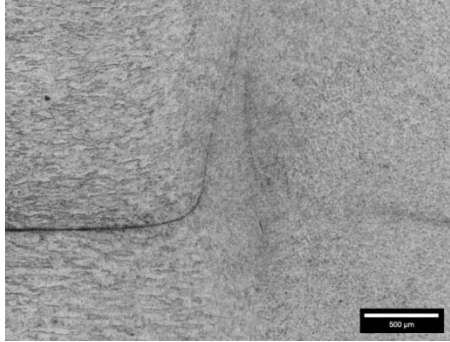
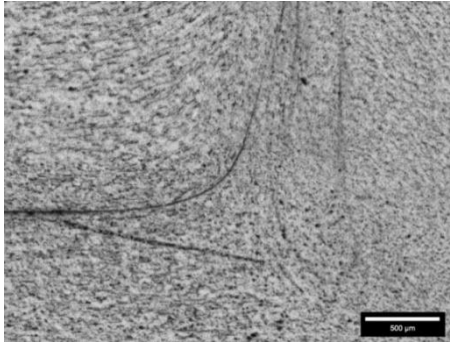
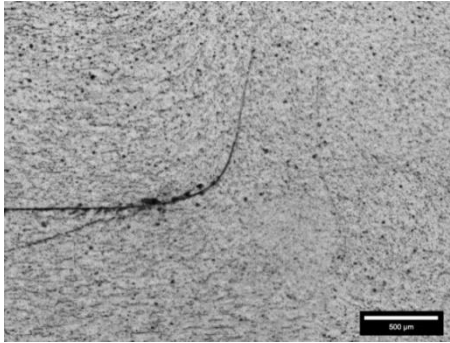
12	2400	3,8	4,5	
13	2400	3,4	3,5	
14	2400	3,4	3,5	
15	2400	3,4	3,5	

Tabela 25 - Medidas das características geométricas das juntas.

Velocidade de Rotação (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)	Altura do “Gancho” (mm)	Largura Efetiva da Junta (mm)
1800	3	3,5	0,03	9,75
3000	3	3,5	0,18	10,28
1800	3,8	3,5	0,59	9,92
3000	3,8	3,5	1,36	10,43
1800	3,4	2,5	0,23	9,96
3000	3,4	2,5	1,68	9,99
1800	3,4	4,5	0,25	9,90
3000	3,4	4,5	0,88	9,88
2400	3	2,5	0,26	10,12
2400	3,8	2,5	1,10	10,26
2400	3	4,5	0,12	9,75
2400	3,8	4,5	0,94	9,66
2400	3,4	3,5	1,33	10,05

Os gráficos de RC e da RD versus h estão mostrados na Figura 68 (a) e (b), bem como os gráficos de RC e da RD versus W podem ser vistos na Figura 68 (c) e (d). Em ambos os casos, é sugerido haver uma relação entre o desempenho mecânico, h e W. De fato, o aumento de h leva a um decréscimo nas propriedades mecânicas (RC e RD). O aumento de W leva a um aumento nas propriedades mecânicas até um máximo, a partir do qual passa a decrescer, como pode ser observado na Figura 68. Assim como no trabalho de Campanelli (2012) foi verificado que o efeito positivo da largura efetiva da junta na resistência mecânica é predominante quando a altura do “gancho” não é tão alta. A partir de certo valor, o efeito deletério da altura do “gancho” supera o efeito da largura efetiva da junta e se torna o fator dominante. Neste trabalho, foram observados maiores valores de W para juntas que apresentaram altos valores de h, conforme ilustrado na Figura 69.

Figura 68 - Gráficos da Resistência ao Cisalhamento e Resistência ao Descascamento *versus* a altura do "gancho" e a largura efetiva da junta.

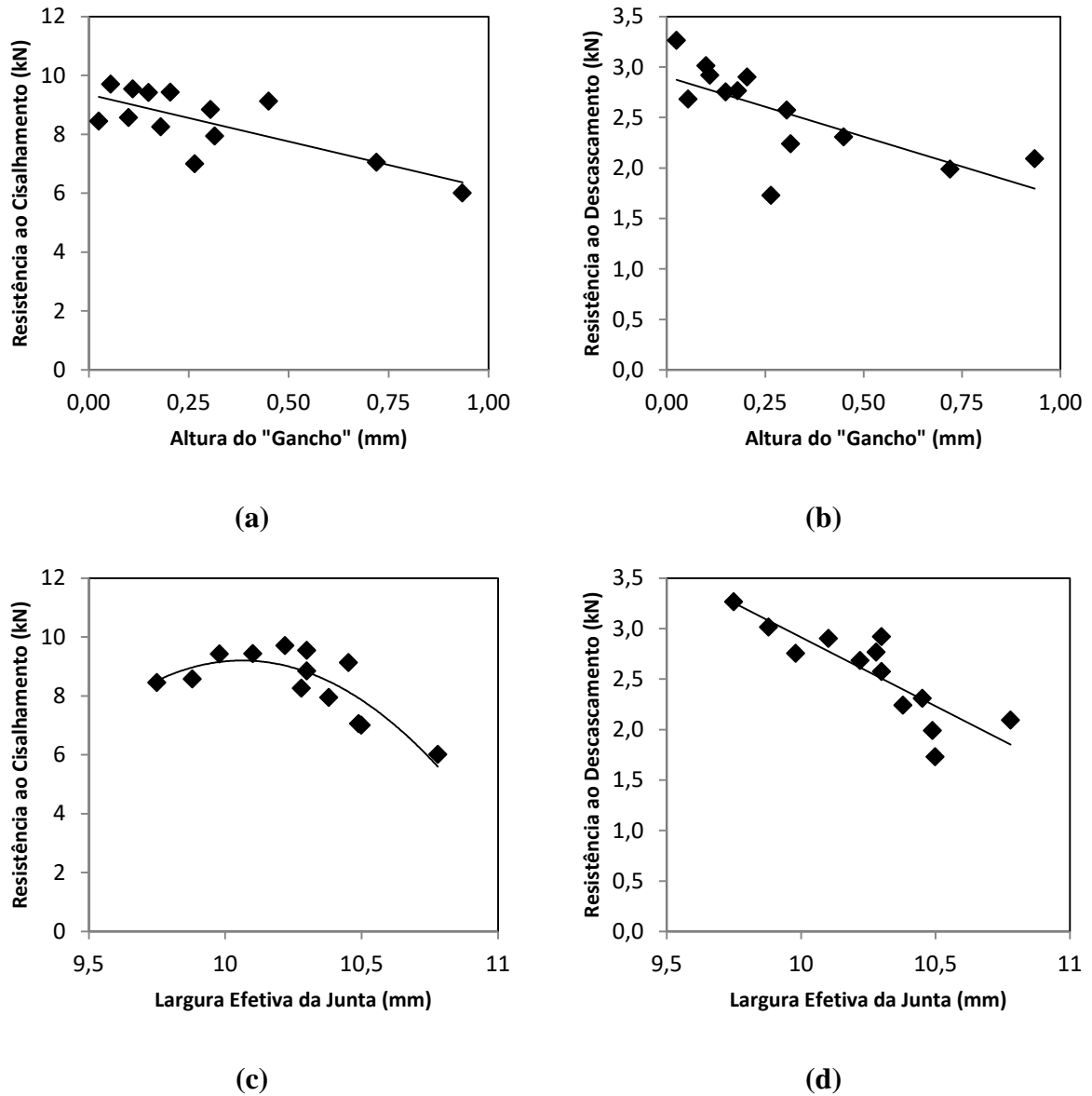
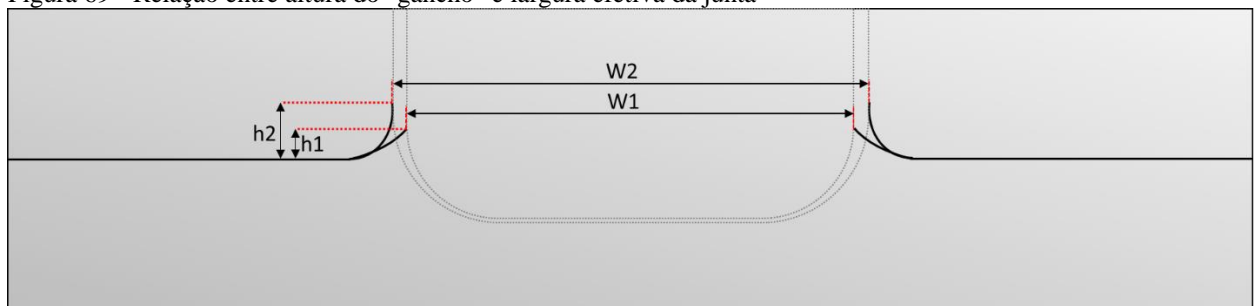


Figura 69 - Relação entre altura do "gancho" e largura efetiva da junta



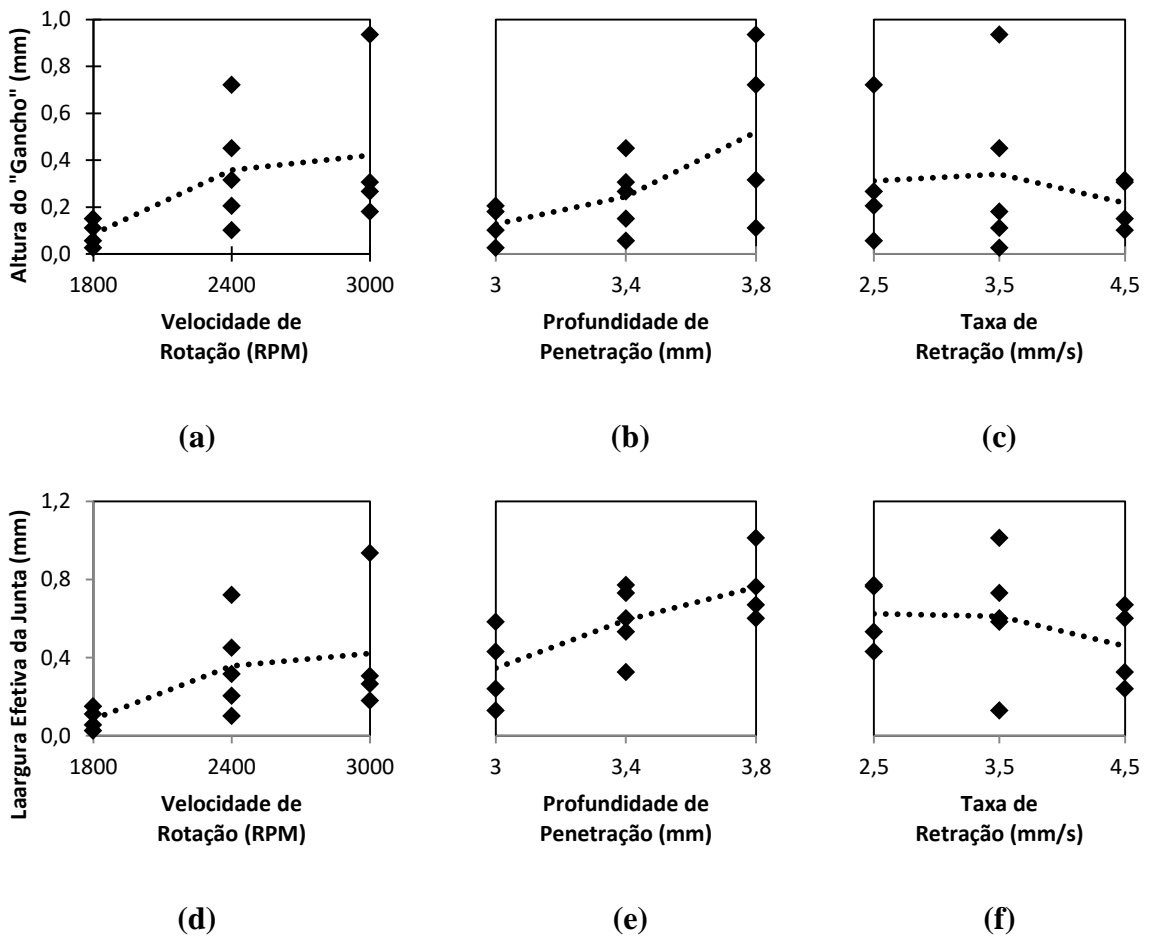
Cao et al. (2016) também estudou a influência do "gancho" em solda a ponto por fricção de liga de alumínio AA6061. Em seu trabalho, similarmente, foi constatado que a altura do "gancho" pode ser usada como um indicador para a resistência da junta, sendo que a

mesma diminui com o aumento da altura do “gancho”. Do mesmo modo, maiores valores de altura do “gancho” foram associados à diminuição da RC na soldagem a ponto por fricção e liga de magnésio, estudado por CAMPANELLI (2012).

Os gráficos de efeitos principais da influência da VR, PP e TR em h podem ser vistos na Figura 70 (a), (b) e (c). Os gráficos de efeitos principais da influência da VR, PP e TR em W podem ser vistos na Figura 70 (d), (e) e (f). Ao observar os gráficos, pode-se notar que o aumento de VR e PP causa o aumento tanto de h quanto de W , já o aumento da TR leva a um decréscimo de h e W ; entretanto, em menor magnitude.

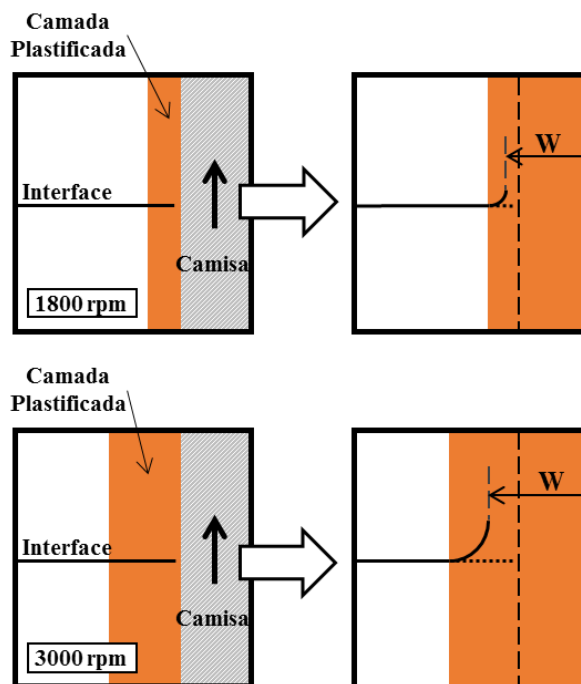
A ANOVA realizada com os dados de h e W revelou que apenas VR e PP são fatores importantes para h e W . A TR parece não ter grande influência na geometria da junta. Adicionalmente, não há influência significativa do comportamento quadrático dos termos (VR^2 , PP^2 e TR^2), bem como as interações entre os termos.

Figura 70 - Gráficos de Efeitos Principais da Velocidade Rotacional, Profundidade de Penetração e Taxa de Retração na Altura do Gancho (acima) e Largura Efetiva da Junta (abaixo).



Cao et al. (2016), (CAMPANELLI, 2012) e (ZHAO et al., 2014) também observaram que o aumento de VR e PP tende a aumentar a altura do “gancho”. Acredita-se que a altura do “gancho” possa ser controlada por dois fatores: a quantidade de material plastificado e o fluxo de material na direção ascendente. O primeiro é governado pelo aporte térmico, o qual é determinado principalmente pela VR e TS. Dessa forma, para uma PP fixa, o aumento da VR irá causar o aumento do aporte térmico e da quantidade de material plastificado adjacente à ferramenta, ocasionando um “gancho” com maior altura (Figura 71). O fluxo de material na direção ascendente é governado principalmente pela PP. A penetração da camisa empurra o material para baixo, levando o material adjacente a se mover para cima. Como resultado, maior PP irá gerar maior fluxo ascendente de material e também aumentar a altura do “gancho”. (CAO et al., 2016)

Figura 71 – Influência da rotação na camada plastificada e formação do “gancho”.

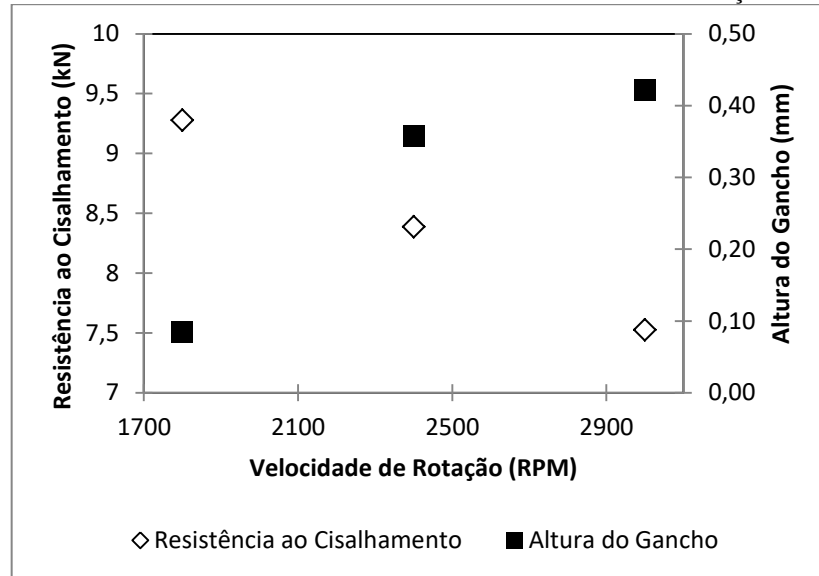


Os resultados de ANOVA para a microestrutura parecem estar em boa concordância com a ANOVA realizada para a RC e a RD, porque em todos os casos, VR e PP aparecem entre os fatores mais importantes. Deve ser notado que essa ANOVA foi realizada somente para a microestrutura sem adesivo.

Considerando a ANOVA realizada para a RC das juntas soldadas sem adesivo, VR é apontado como o parâmetro mais significativo. A fim de obter melhor compreensão a respeito da interação “Processo x Microestrutura x Resistência Mecânica”, um gráfico da RC e h

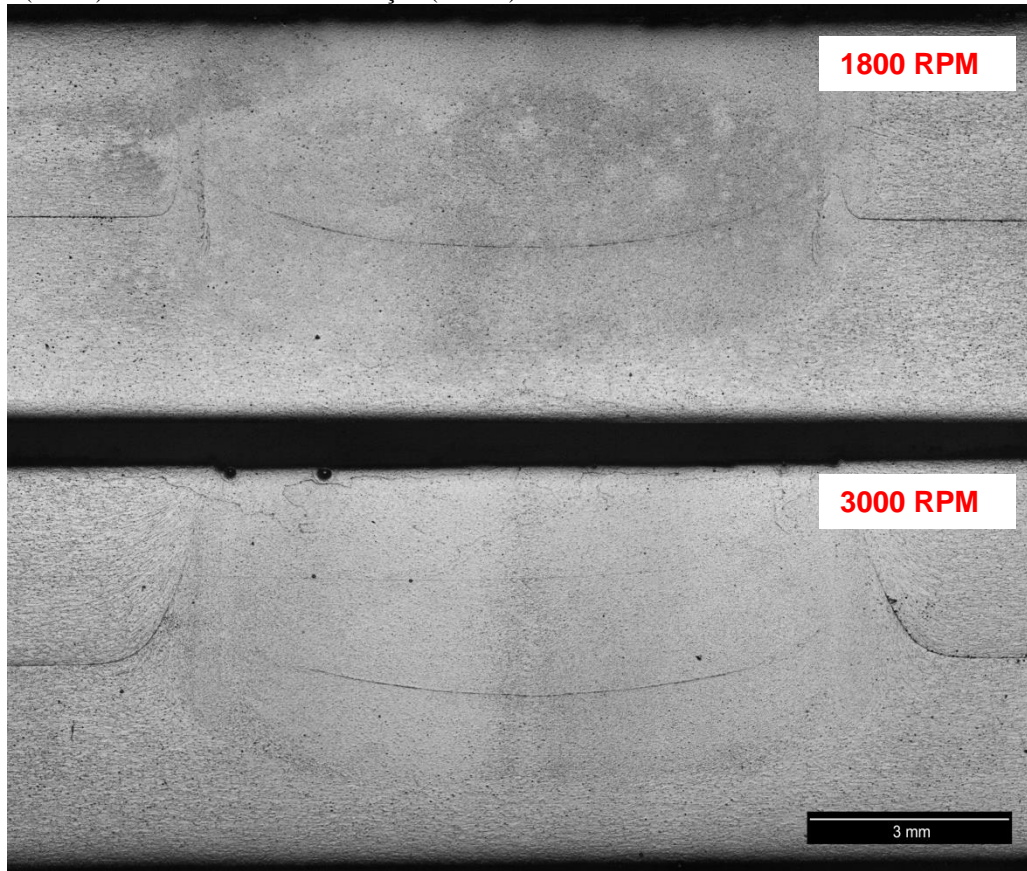
versus VR é mostrado na Figura 72. Como pode ser visto, o aumento da VR leva a uma maior *h* e menor RC.

Figura 72 - Resistência ao Cisalhamento e Altura do Gancho *versus* Velocidade de Rotação



Na Figura 73, é mostrada uma comparação entre uma junta soldada sem adesivo com baixa VR (Combinação 3 – VR: 1800 RPM / PP: 3,8 mm / TR: 3,5 mm/s) acima e outra soldada com alta VR (Combinação 4 – VR: 3000 RPM / PP: 3,8 mm / TR: 3,5 mm/s) abaixo. É possível observar maior *h* na microestrutura da junta soldada sem adesivo com maior VR (3000 RPM).

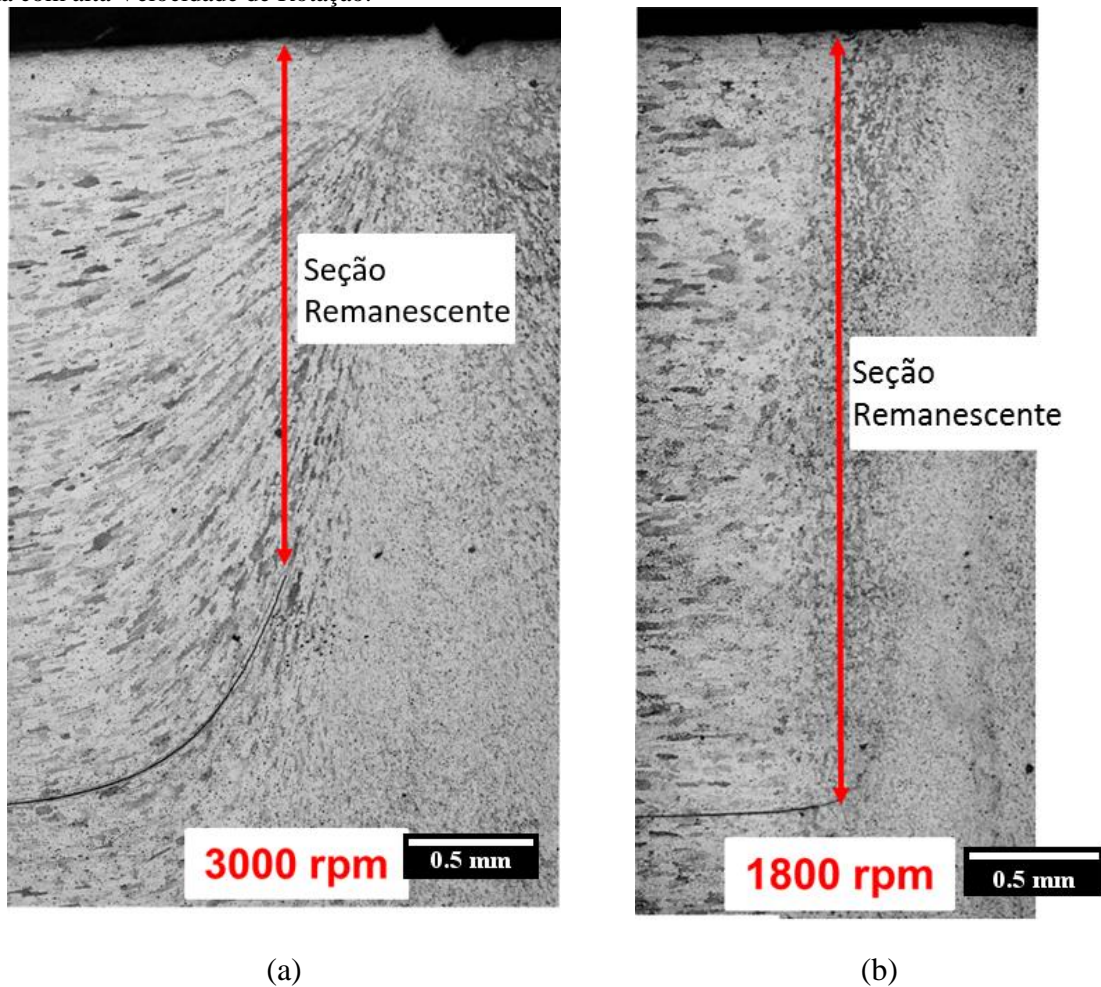
Figura 73 - Comparação da microestrutura de uma junta soldada sem adesivo com Baixa Velocidade de Rotação (acima) e alta Velocidade de Rotação (abaixo).



Na Figura 74, a região do “gancho” é mostrada com maior detalhe. Como pode ser visto, é evidente o maior h para a junta soldada sem adesivo com maior VR, apesar da PP e da TR serem a mesma para ambas as condições. Além disso, podem ser notados dois diferentes aspectos da ZTMA nas duas juntas. Na junta soldada sem adesivo com maior VR (3000 RPM), os grãos da ZTMA estão evidentemente curvados para cima, na direção do caminho que a camisa percorre na junta. Neste caso, também podem ser observados grãos mais alongados em comparação com a junta soldada sem adesivo com menor VR (1800 RPM). Em contraste, é possível notar grãos mais refinados na ZTMA da junta soldada sem adesivo com menor VR (1800 RPM), evidenciando a ocorrência de recristalização durante o processo. Como já é conhecido, a ponta do “gancho” atua como um concentrador de tensões, no qual inicia a propagação de trincas. Na junta soldada sem adesivo com maior VR (3000 RPM), a ponta do “gancho” está localizada entre os grãos alongados; enquanto na junta soldada sem adesivo com menor VR (1800 RPM), a ponta do “gancho” está localizada entre os grãos finos recristalizados. Também, como função da altura e da forma do “gancho”, a seção remanescente da junta soldada sem adesivo com maior VR (3000 RPM) é menor do que a

seção remanescente da junta soldada de maneira semelhante com menor VR (1800 RPM). A combinação de pequena seção remanescente e ponta do “gancho” localizada entre grãos alongados apontados para a superfície da chapa superior contribuem para que as soldas com maior VR apresentem pior resistência mecânica em comparação com as juntas soldadas com menor VR.

Figura 74 - Detalhe da região do "gancho" de uma junta soldada sem adesivo com baixa Velocidade de Rotação e uma com alta Velocidade de Rotação.



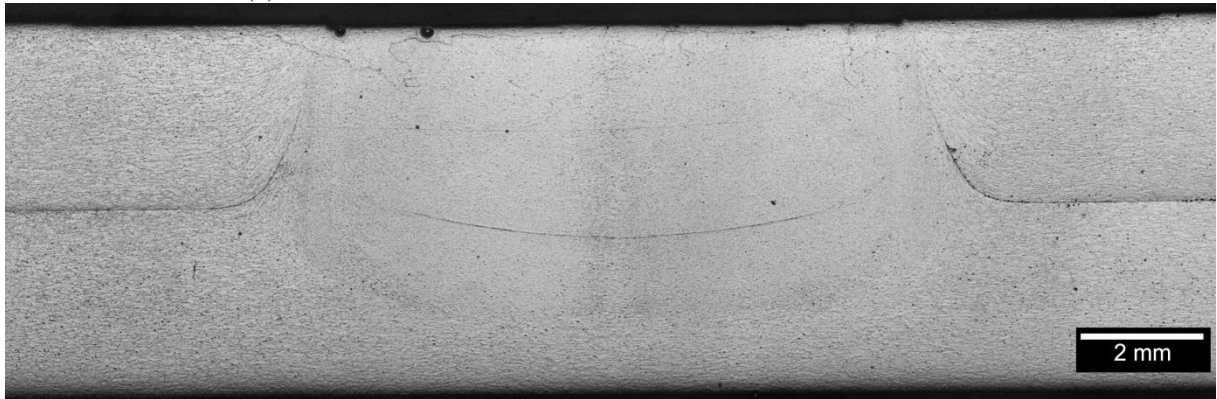
Da mesma forma, (ROSENDO, 2009) encontrou maior resistência mecânica nas juntas soldadas com menor VR. Ele concluiu que, em baixa rotação, o “gancho” se torna moderadamente pronunciado, tendendo a nuclear uma trinca circular em seu vértice. A nucleação da trinca circular a partir do “gancho” seria benéfica, pois a mesma tende a propagar pela ZTMA que é a região de maior tenacidade. Além disso, a baixa rotação contribui para uma melhor adesão da zona de ligação secundária.

Cao et al. (2016) associam a maior resistência das juntas soldadas com menor VR somente à menor altura do “gancho” resultante destas soldas. Tier et al. (2013) constataram que as soldas produzidas com menor VR resultaram em maior RC devido à morfologia retangular da ZM e Zona de Ligação Efetiva maior. Além disso, na análise da fratura, não foram observadas estrias na região da fratura equivalente à localização do “gancho”, o que indica boa mistura do material.

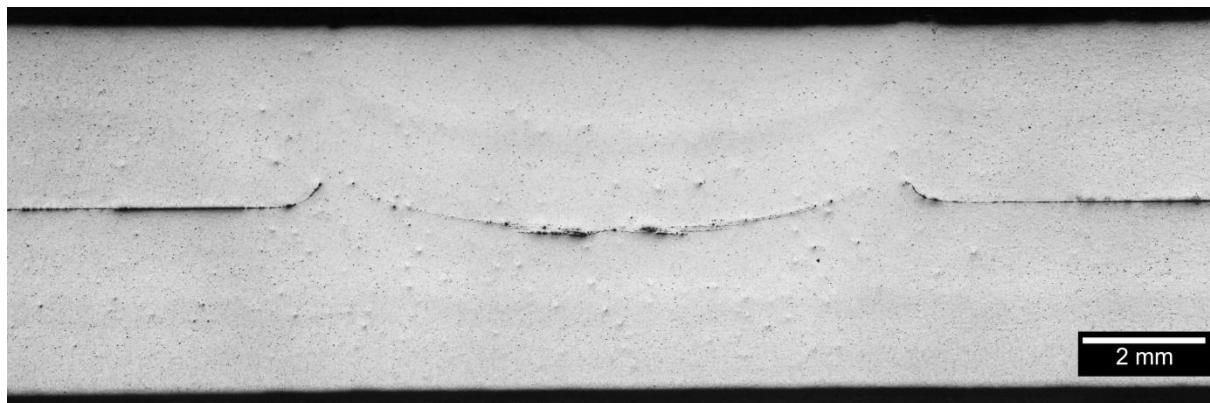
5.6.2 Juntas soldadas com camada adesiva.

As microestruturas das juntas soldadas com camada adesiva foram investigadas de acordo com o mesmo procedimento utilizado nas juntas soldadas sem adesivo. Na Figura 75 está mostrada a comparação entre duas juntas soldadas com o mesmo parâmetro (VR: 1800 RPM / PP: 3,4 mm / TR: 4,5 mm/s) sem adesivo (a) e com adesivo (b). É possível observar a presença de possíveis impurezas na interface original entre as duas chapas na microestrutura retratada na Figura 75 (Figura 75b), estas impurezas devem ser resultantes do processo de soldagem com adesivo entre as chapas.

Figura 75 - Comparação entre a microestrutura de uma junta soldada sem adesivo (a) e uma junta soldada com adesivo (b).



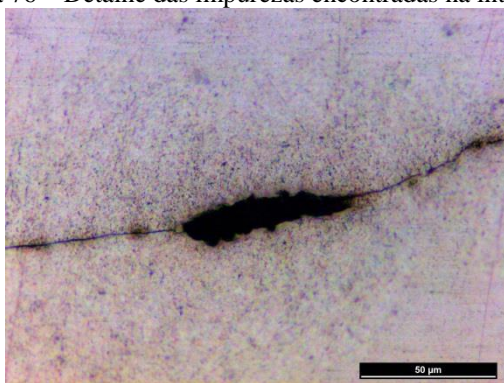
(a)



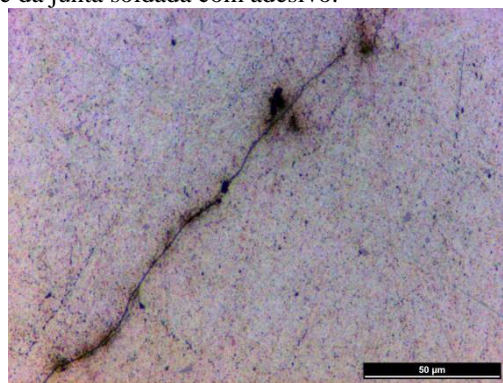
(b)

A Figura 76 mostra as impurezas encontradas na interface com maior magnificação. Estas impurezas são observadas apenas nas juntas soldadas com adesivo. Além disso, todas as juntas fraturaram no modo “Através da Superfície” ou, em outras palavras, ao longo da interface. Isto nos leva a concluir que a redução na resistência mecânica observada nas soldas com adesivo ocorreu devido à contaminação da ZM pelo adesivo.

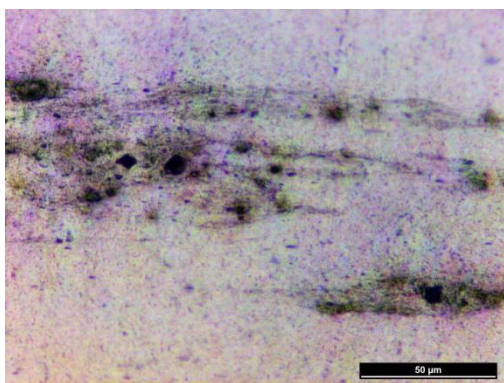
Figura 76 – Detalhe das impurezas encontradas na interface da junta soldada com adesivo.



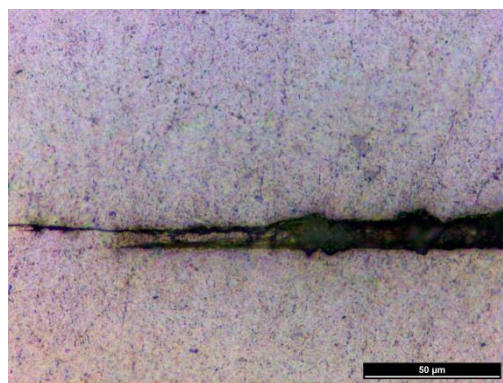
(a)



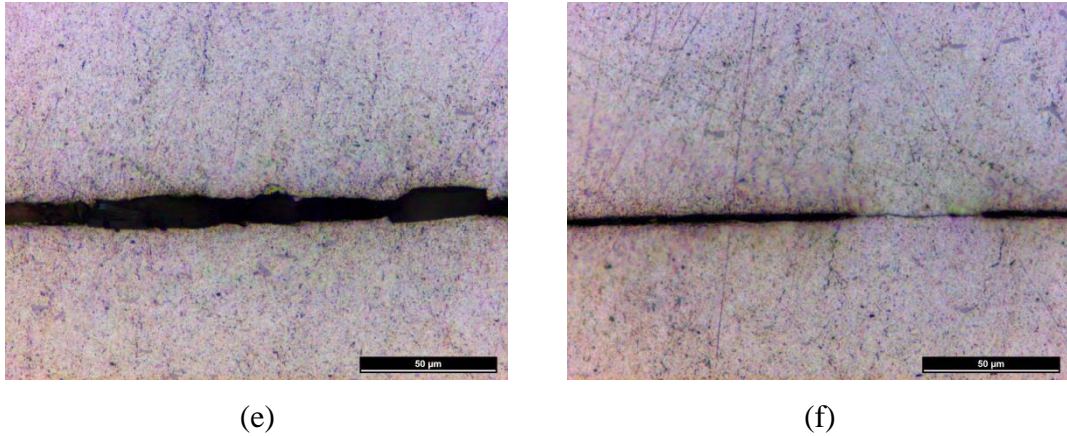
(b)



(c)



(d)

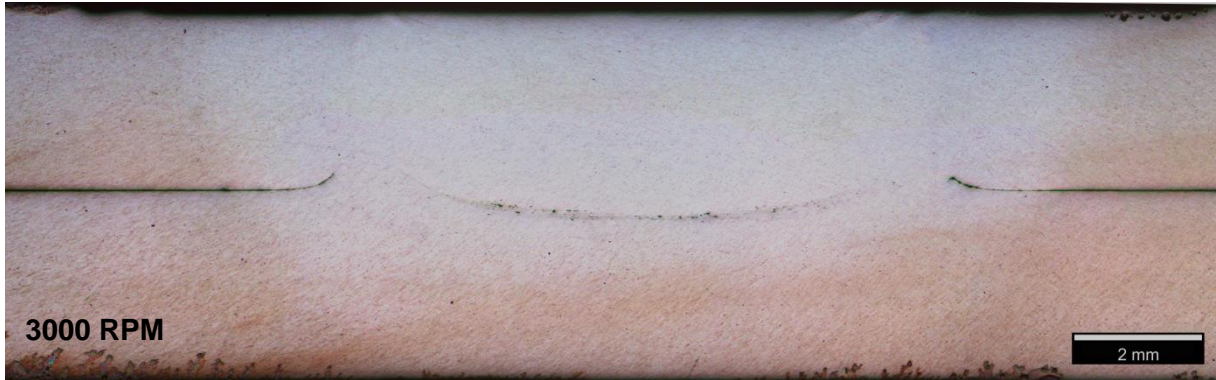


Adicionalmente, a microestrutura de juntas soldadas com adesivos com diferentes VR foram comparadas. Como exemplo, a Figura 77 (a) mostra uma junta soldada com baixa VR (Combinação 5 – VR: 1800 RPM / PP: 3,4 mm / TR: 2,5 mm/s) e a Figura 77 (b) mostra uma junta soldada com alta VR (Combinação 6 – VR: 3000 RPM / PP: 3,4 mm / TR: 2,5 mm/s). Como pode ser visto, a junta soldada com baixa VR parece ter mais impurezas na interface do que a junta soldada com alta VR. Como foi avaliado nos estudos com as propriedades mecânicas, maiores resultados de RC foram observados para maiores níveis de VR quando as juntas foram soldadas com adesivo. Como as juntas soldadas com maior VR apresentaram menos impurezas na superfície, esta pode ser a razão porque estas soldas apresentaram maior RC. Isto nos leva a concluir que a utilização de maior VR na soldagem pode ser uma forma de limpar a interface das impurezas possivelmente originadas pelo adesivo.

Figura 77 - Comparação entre a microestrutura de juntas soldadas com adesivo com diferentes velocidades de rotação.



(a)



(b)

5.7 ANÁLISE DA FRATURA

Três tipos de fratura foram observados durante os ensaios de cisalhamento, como mostrado previamente na Figura 26. Eles são:

- Através da Solda (AS): quando a trinca propaga através da ZM até a separação total da junta.
- Arrancamento Não Circunferencial (ANC): quando a trinca propaga através da ZM, mas atinge a superfície do botão de solda.
- Arrancamento Circunferencial (AC): quando a trinca propaga na interface da ZM e ZTMA, circundando o botão de solda até atingir a superfície. No final, o botão de solda continua parcialmente grudado à chapa inferior.

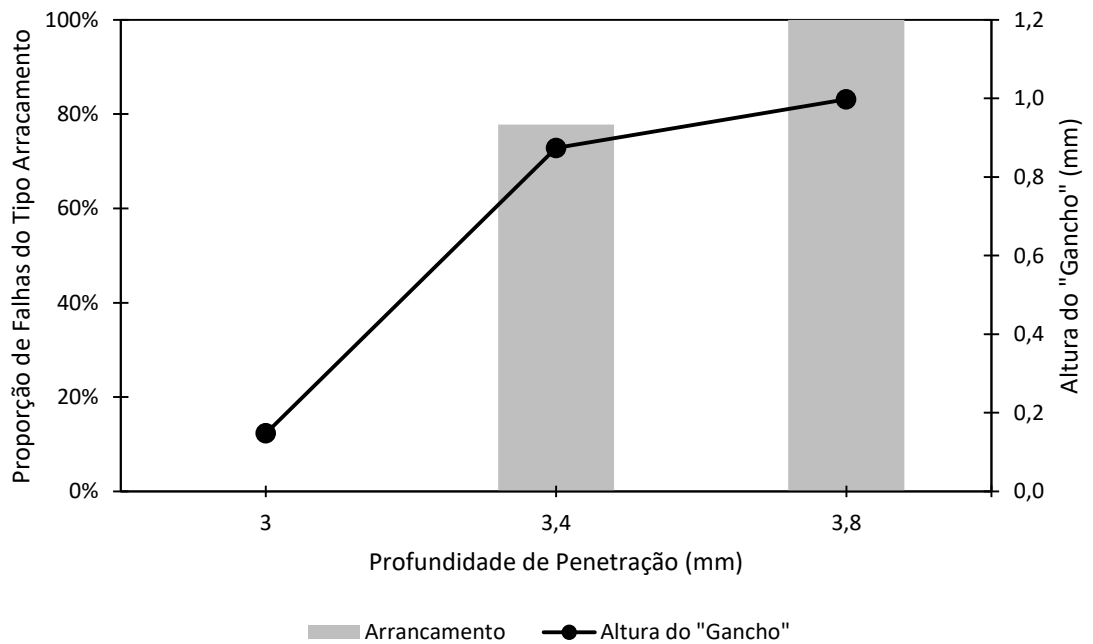
A Tabela 26 mostra as diferentes combinações de parâmetros de soldagem e seus respectivos modos de falha no ensaio de cisalhamento. Conforme pode ser visto, a combinação de maior RC (Combinação 5 – RS: 1800 RPM; PP: 3,4 mm; TR: 2,5 mm/s) foi a única que apresentou fratura do tipo Arrancamento Circunferencial. Na Figura 78 está apresentada uma síntese dos dados de maior interesse levando em conta a interação entre o parâmetro Profundidade de Penetração com a proporção de falhas do tipo Arrancamento e a altura do “gancho”. Observa-se que o aumento da Profundidade de Penetração leva ao aumento da altura do “gancho”, conforme já foi analisado anteriormente na seção 5.6.1. Além disso, também é possível notar que a proporção de falhas do tipo arrancamento aumenta com o incremento da profundidade de penetração. Dessa forma, é possível concluir que o modo de

falha está ligado à morfologia do “gancho” que, por sua vez, tem relação com os parâmetros do processo de soldagem.

Tabela 26 - Parâmetros de processo e respectivos modos de falha sob solicitação de cisalhamento

Combinação	Velocidade Rotacional (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)	Modo de Falha	RC (kN)
1	1800	3	3,5	AS	8,45
2	3000	3	3,5	AS	8,26
3	1800	3,8	3,5	ANC	9,54
4	3000	3,8	3,5	ANC	6,01
5	1800	3,4	2,5	AC	9,70
6	3000	3,4	2,5	ANC	7,00
7	1800	3,4	4,5	AS	9,42
8	3000	3,4	4,5	ANC	8,84
9	2400	3	2,5	AS	9,43
10	2400	3,8	2,5	ANC	7,05
11	2400	3	4,5	AS	8,57
12	2400	3,8	4,5	ANC	7,95
13	2400	3,4	3,5	AS	8,99
14	2400	3,4	3,5	ANC	9,18
15	2400	3,4	3,5	ANC	8,30
16	2400	3,4	3,5	ANC	9,14
17	2400	3,4	3,5	ANC	9,08

Figura 78 - Relação entre Profundidade de Penetração, Modo de Falha em cisalhamento e altura do “gancho”.

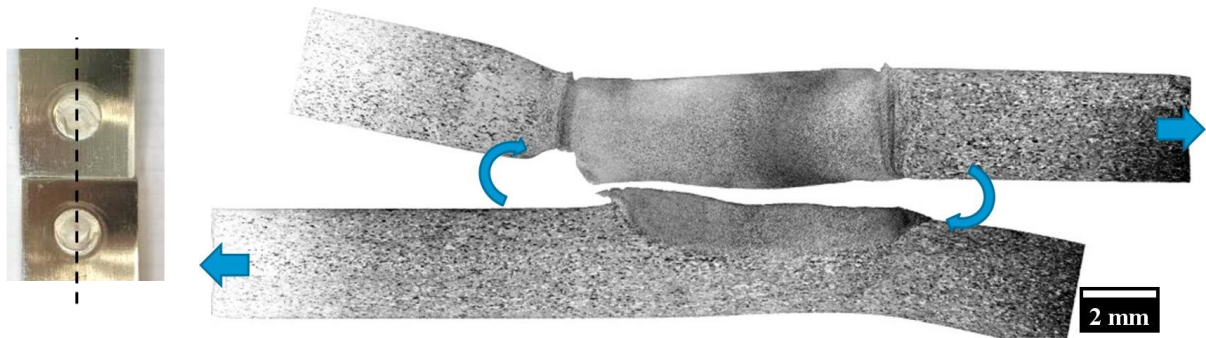


Os diferentes modos de falha foram analisados com o objetivo de obter melhor compreensão da propagação da trinca e micromecanismos de fratura presentes nas amostras.

5.7.1 Através da Solda

A Figura 79 apresenta a seção longitudinal de uma fratura AS. As flechas representam a força aplicada e o momento resultante após certo grau de deformação da junta. Neste caso, a trinca provavelmente iniciou na ponta do “gancho” e propagou ao longo da zona de ligação efetiva.

Figura 79 - Seção longitudinal de uma fratura através da solda.



A Figura 80 apresenta as observações realizadas em MEV na superfície de uma fratura AS. Diferentes pontos estão mostrados em maior magnificação na Figura 81 para permitir uma melhor análise. No ponto 1, é possível ver a região correspondente ao “gancho”. Na parte inferior desta imagem, não é possível notar ligação entre as chapas, enquanto na parte superior da imagem começam a aparecer algumas evidências de ligação, como *dimples* rasos (indicados pelas flechas) que indicam um comportamento dúctil da fratura. No ponto 2, é possível observar algumas estrias e formação de *dimples*. Os pontos 3 e 4 parecem representar um aspecto de fratura de cisalhamento. Dos pontos 5 ao 8, é evidente a grande quantidade de *dimples* orientados na direção do movimento relativo entre a chapa superior e a chapa inferior. Estas observações sugerem que a propagação da trinca pode ter começado na região do “gancho”, onde não há ligação entre os materiais e existe um concentrador de tensões. Uma vez que a propagação começa, ela continua ao longo da ZM, paralela à direção de carregamento, provavelmente ao longo da zona de ligação efetiva. Isto resulta em uma fratura dúctil sob carregamento cisalhante.

Figura 80 - Observação via Microscopia Eletrônica de Varredura em uma amostra de fratura Através da Solda

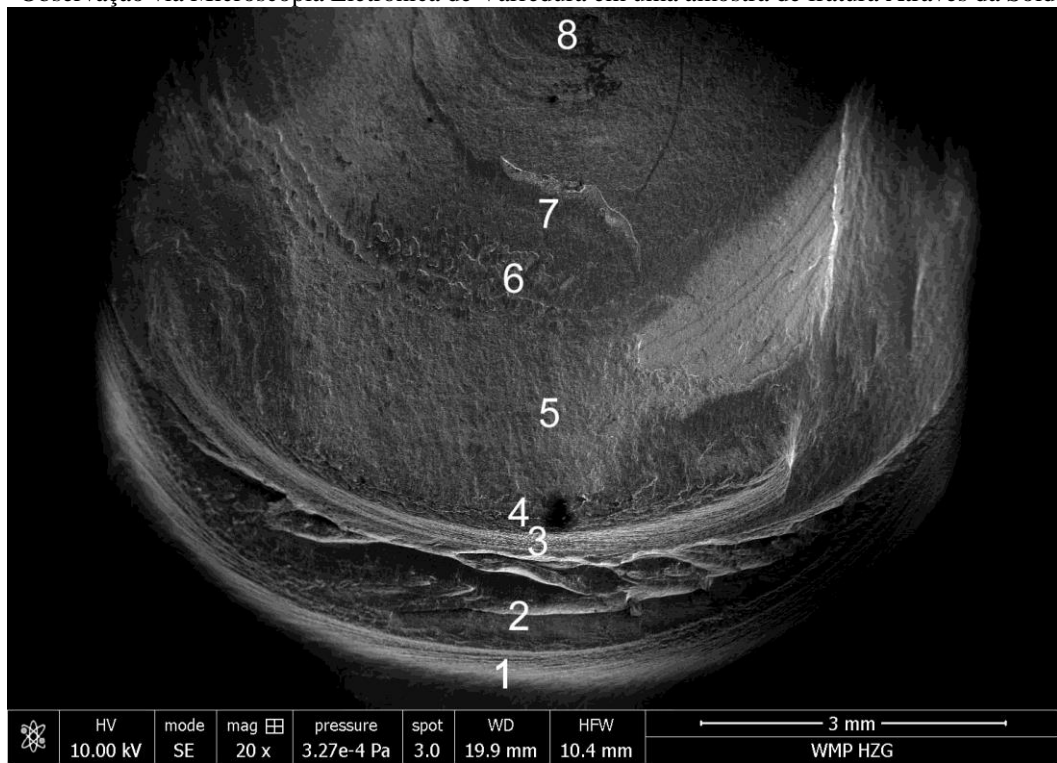
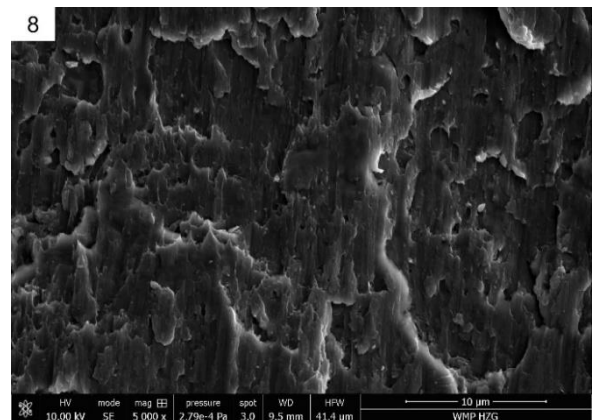
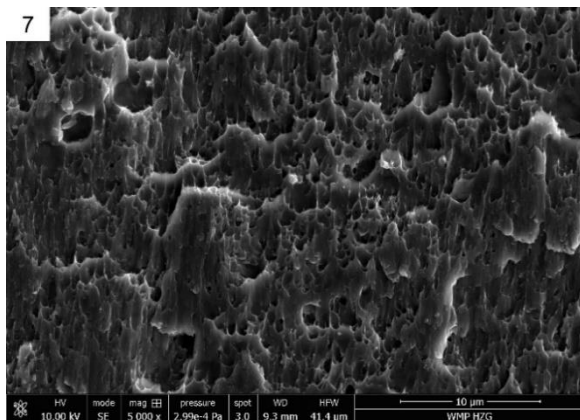
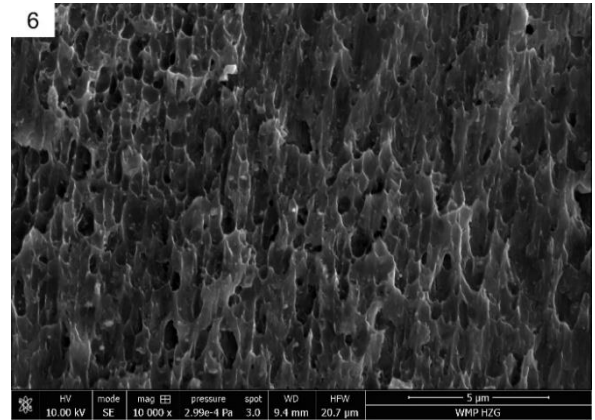
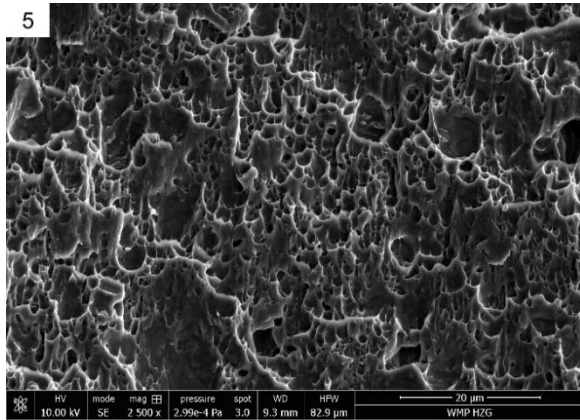
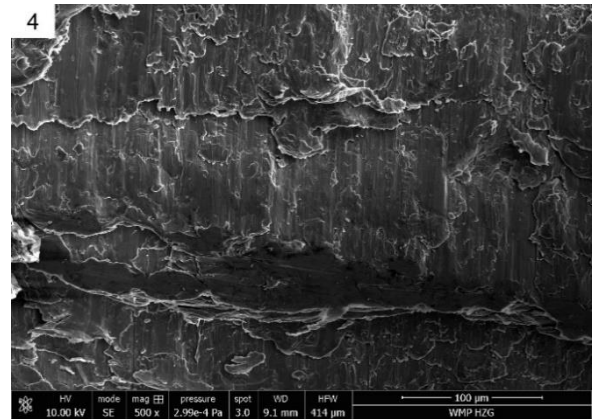
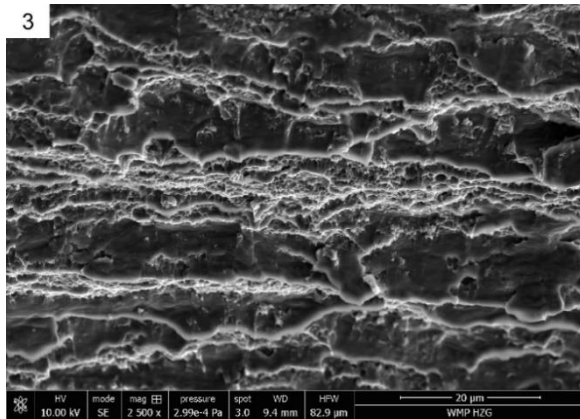
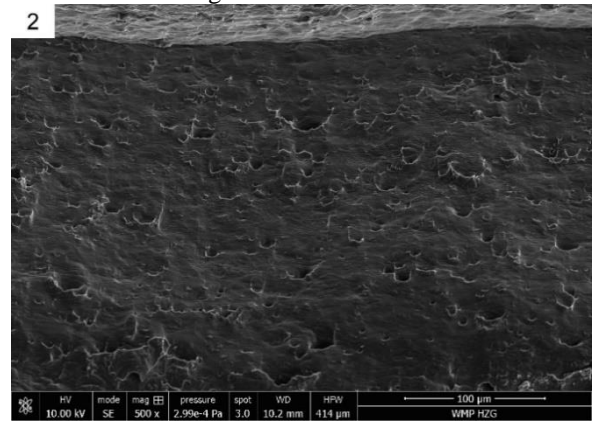
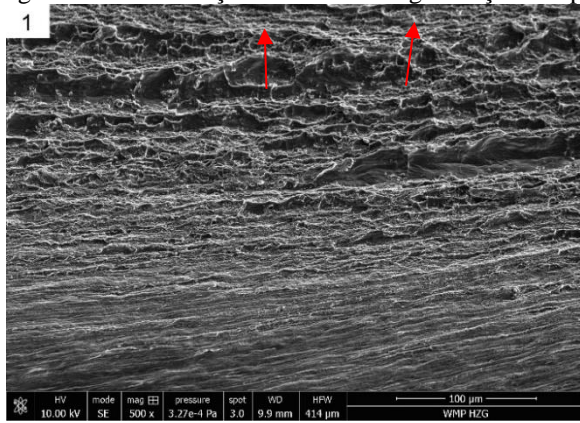
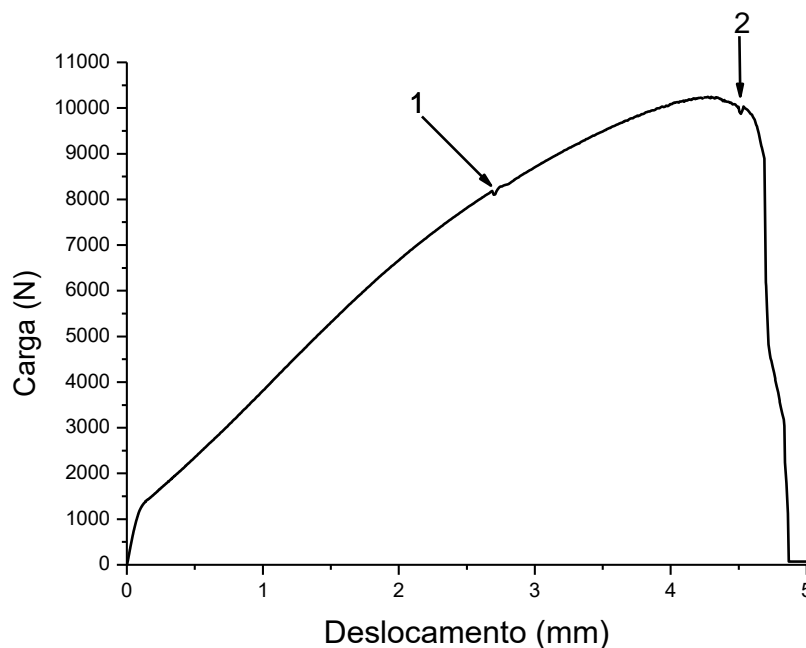


Figura 81 – Observações em maior magnificação dos pontos indicados na Figura 80.



A Figura 82 mostra o gráfico de Carga vs Deslocamento da amostra utilizada nesta investigação. As amostras que falham conforme o modo de fratura AS são capazes de suportar altos níveis de carga, entretanto não suportam grandes deformações. Além disso, há duas flechas indicando perturbações no gráfico. A flecha 1 pode estar indicando a primeira propagação da trinca até a área nos entornos do ponto 4. Esta área deve ter uma ligação fraca uma vez que está localizada na zona de ligação não efetiva, que é uma região onde a ligação entre as chapas inferior e superior não é tão resistente. É possível ver que a união remanescente, representada pelos pontos 5, 6, 7 e 8, suporta muito mais deformação antes da falha que ocorre na flecha 2. Esta superfície de fratura corresponde à zona de ligação efetiva, a qual tem uma forte ligação devido à boa adesão entre as chapas inferior e superior.

Figura 82 - Gráfico da Carga *versus* Deslocamento de uma amostra que falhou Através da Solda.



Campanelli (2012) em sua pesquisa em soldagem a ponto por fricção da liga de magnésio AZ31 também observou fratura AS. No seu trabalho, é descrito que a trinca se propaga por um caminho médio quase paralelo ao esforço aplicado, atravessando por completo a região recristalizada até a separação total da solda. Em observações realizadas no MEV, também foi identificado um comportamento misto de fratura dúctil, constituindo-se de uma mistura aleatória de lábios de cisalhamento e pequenas microcavidades.

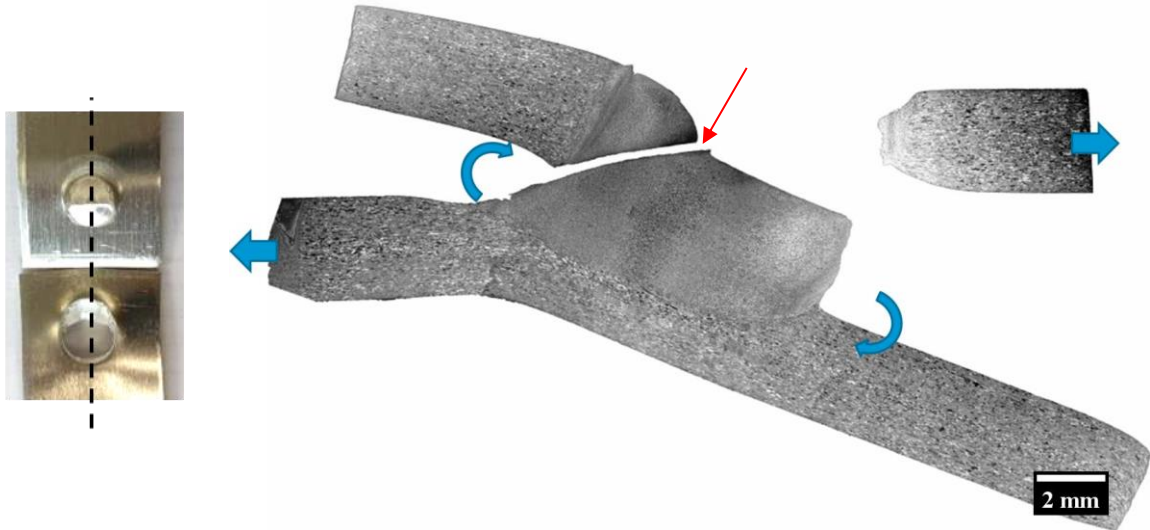
Rosendo (2009) analisou o modo de fratura AS com trinca circunferencial. Este tipo de fratura foi observado em soldas de baixa VR (1900 RPM) e “gancho” de baixa agucidade.

Identificou-se que a trinca anular se origina com o rasgamento da zona de ligação parcial e, posteriormente, propagou ao longo da zona de ligação efetiva.

5.7.2 Arrancamento Não Circunferencial

A Figura 83 apresenta a seção longitudinal de uma fratura do tipo ANC. As flechas representam as forças aplicadas e o momento resultante. No lado direito, uma trinca circunferencial provavelmente nucleou na ponta do “gancho” e propagou ao longo da fronteira entre a ZM e ZTMA até atingir a superfície da chapa superior. É possível observar um alto grau de deformação do material no lado direito da ZM devido à combinação da baixa resistência da ZAC e as tensões trativas nesta região. A propagação da trinca ao longo da fronteira entre a ZM e a ZTMA pode indicar uma mistura ineficiente do material nesta região. No lado esquerdo, a trinca anular pode ter nucleado na ponta do “gancho” e propagou ao longo da ZM da chapa superior em uma direção de aproximadamente 45° em relação à superfície até atingir a superfície da ZM, quando ocorre o colapso.

Figura 83 - Seção longitudinal de uma fratura do tipo Arrancamento não Circunferencial.



A Figura 84 revela as observações realizadas em MEV na superfície de uma fratura do tipo ANC, na superfície onde ocorreu o cisalhamento, conforme indicado pela flecha na Figura 83. Na Figura 85 estão apresentados pontos em maior magnificação a fim de obter uma melhor avaliação. Nos pontos 1 e 2, pode ser observado tanto estrias quanto pequenos *dimples*. Estas estrias são decorrentes da solda, devido à deformação de material produzida pela ferramenta durante a soldagem, e elas podem ser observadas em virtude da mistura

deficiente do material nestes pontos. Como há também pequenos *dimples* entre as estrias, é possível dizer que esta área tem um comportamento misto, entre propagação de baixa carga e comportamento dúctil. Os pontos 3 e 4 apresentam um aspecto de fratura típico de um cisalhamento dúctil, consistindo de lábios de cisalhamento e pequenos *dimples*. Por final, o último momento da fratura é apresentado no ponto 5, onde é claramente visível a grande quantidade de *dimples*. Estas observações sugerem que a propagação da trinca pode ter iniciado a partir da ponta do “gancho”, na região observada nos pontos 1 e 2. Depois disso, ela continua propagando de um modo cisalhante, que foi observado nos pontos 4 e 5, até atingir a proximidade da superfície da ZM, quando a amostra colapsa de maneira completamente dúctil, como mostrado no ponto 5.

Figura 84 - Observações via Microscopia Eletrônica de Varredura em uma fratura do tipo Arrancamento não Circunferencial

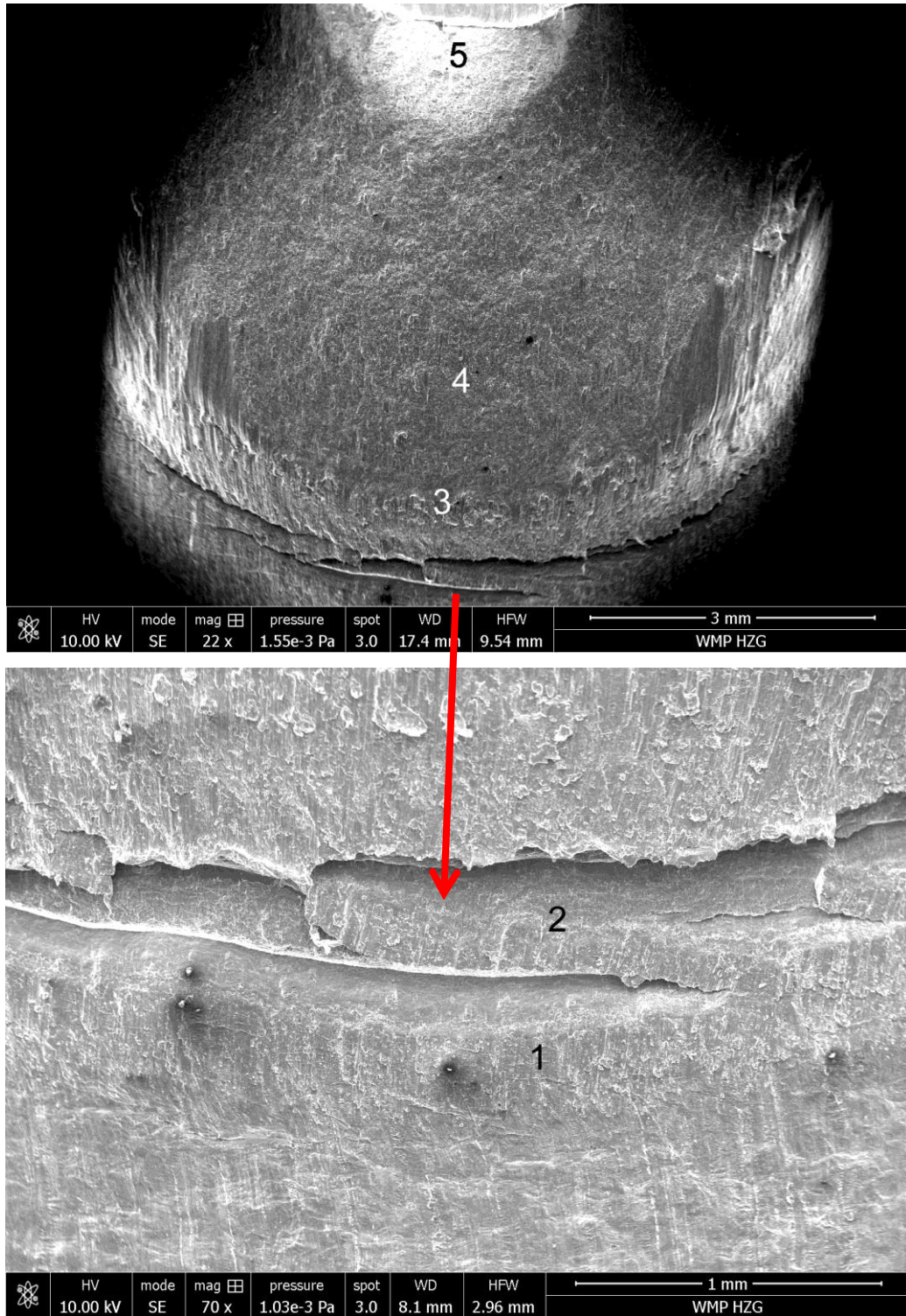
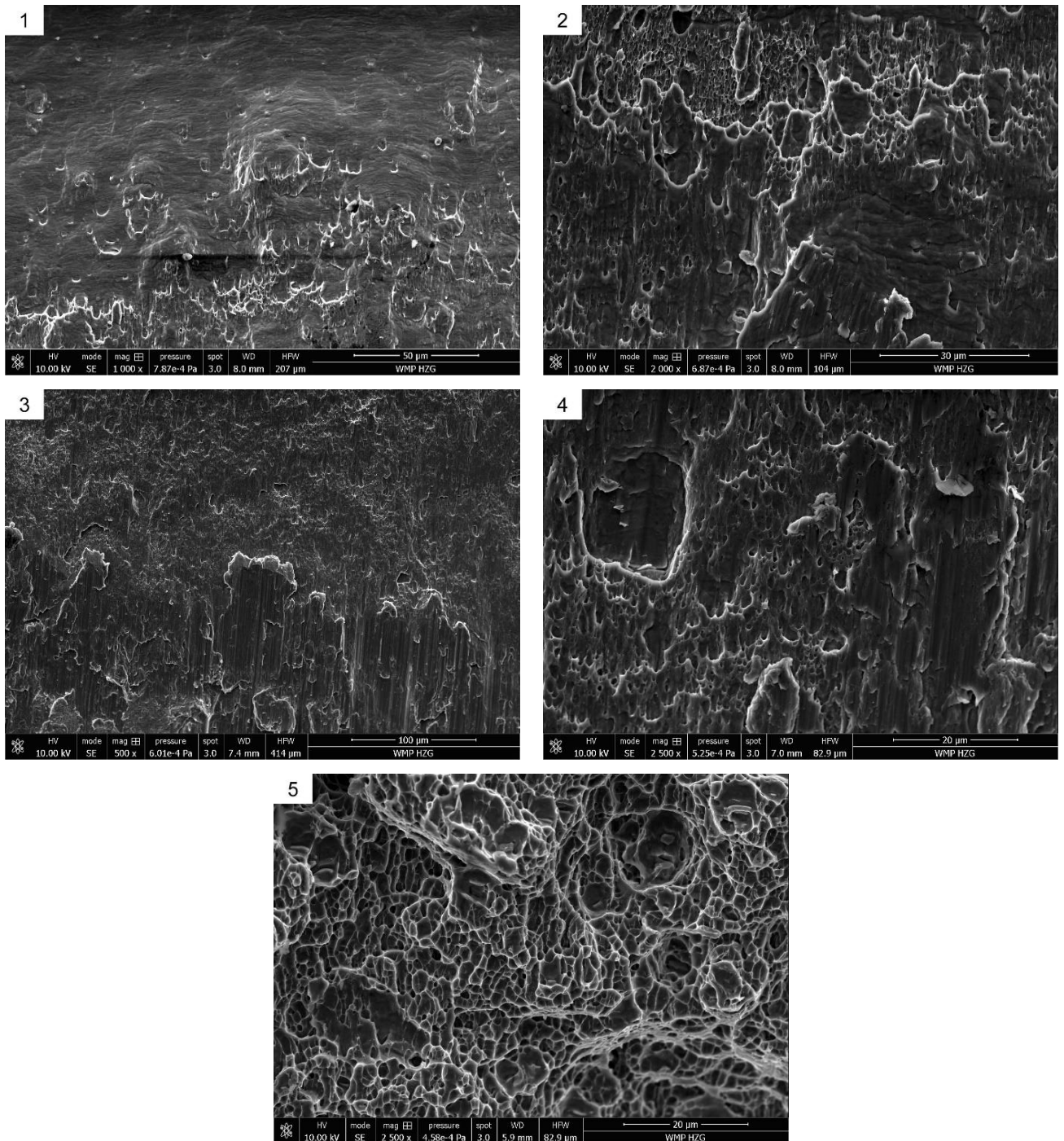


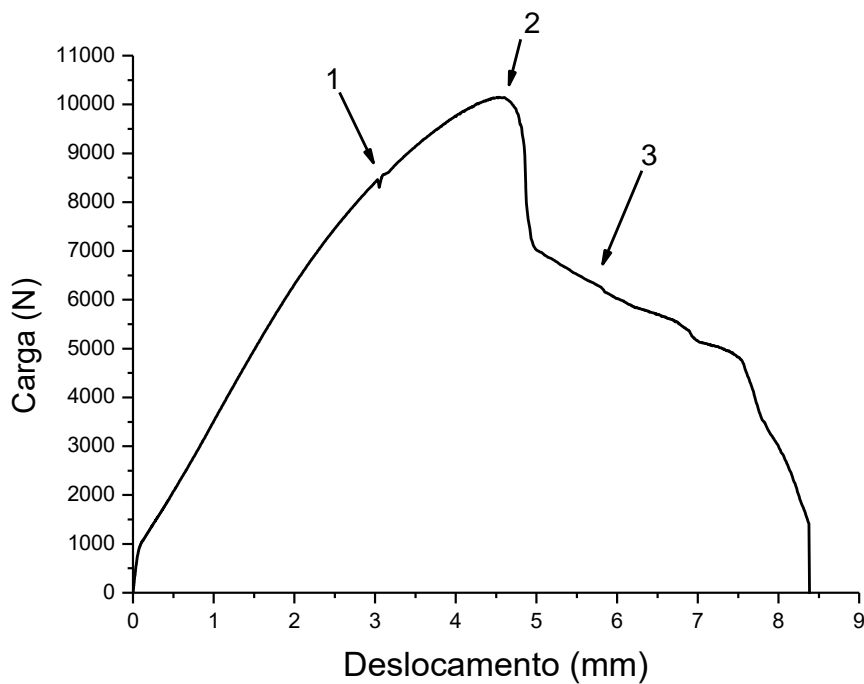
Figura 85 - Observações em maior magnificação dos pontos indicados na Figura 84.



A Figura 86 está mostrando o gráfico de Carga x Deslocamento da amostra utilizada nesta investigação. Em comparação com o modo de fratura AS, este tipo de fratura também é capaz de suportar altos níveis de carga, entretanto suporta maior deformação do que o modo de falha analisado anteriormente. Da mesma forma, há três flechas no gráfico indicando eventos típicos. A flecha 1 indica um provável momento de rápida propagação da trinca,

associado com a superfície de fratura observada nos pontos 1 e 2. Como esta área está localizada próxima ao “gancho”, no canto inferior da ZM, ela deve ter uma ligação mais fraca se comparada com o resto da ZM. Após essa rápida propagação da trinca, a área ligada remanescente continua resistindo à alta carga aplicada, até atingir um valor máximo, indicada pela flecha 2. Neste ponto, devido à força aplicada e ao dobramento do corpo de prova, a trinca começa a propagar através da ZM. A propagação é representada no gráfico pela redução da carga, sinalizado pela flecha 3. Durante este deslocamento, a trinca está cisalhando a ZM em uma orientação de aproximadamente 45° em relação ao plano da superfície. Quando ela atinge as proximidades da superfície, o corpo de prova colapsa e a carga cai à zero, como pode ser visto no gráfico.

Figura 86 – Gráfico da Carga *versus* Deslocamento de uma amostra que falhou por Arrancamento não Circunferencial.

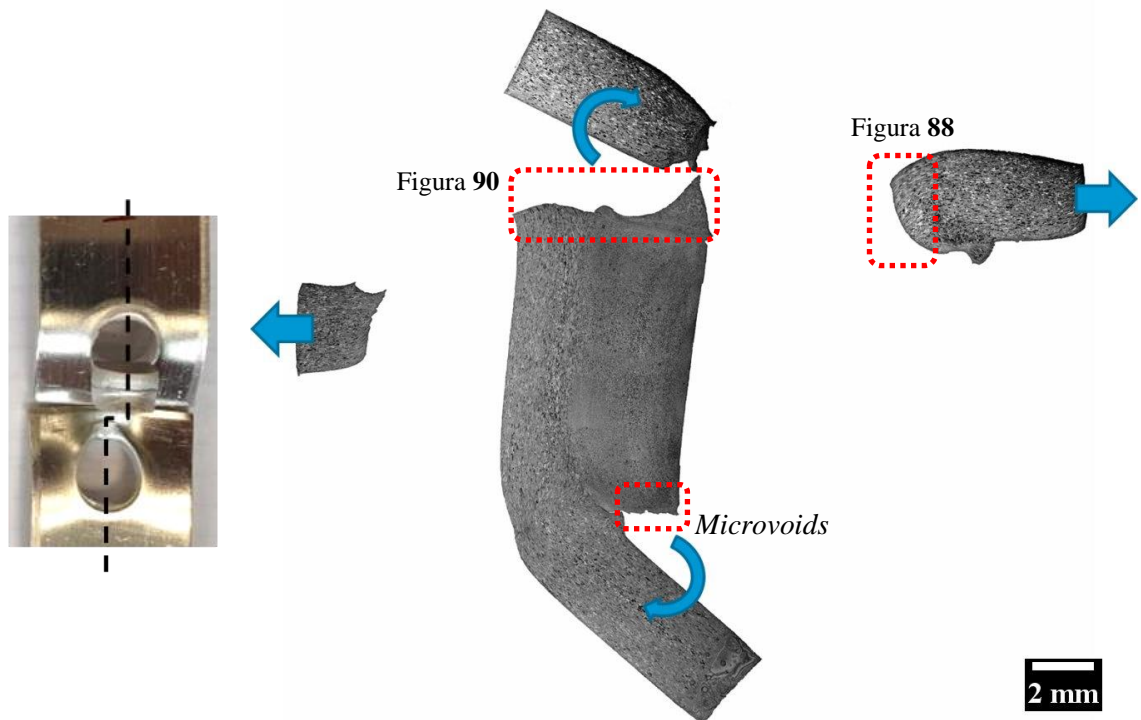


Campanelli (2012) observou por MEV a fratura do modo ANC de juntas soldadas a ponto por fricção da liga de magnésio AZ31. Assim como foi constatado no presente trabalho, a propagação através da zona recristalizada também exibiu um aspecto dúctil sob um efeito cisalhante, tornando as microcavidades alongadas.

5.7.3 Arrancamento Circunferencial

A Figura 87 apresenta a seção longitudinal de uma fratura do tipo AC. As flechas representam as forças aplicadas e o momento resultante. No lado direito, a trinca provavelmente nucleou na ponta do “gancho” e propagou ao longo da fronteira entre a ZM e ZTMA até atingir a superfície da chapa superior, o que pode indicar mistura insuficiente de material nesta região. É possível ver pequenos vazios no lado direito do botão de solda (conforme destacado com o retângulo pontilhado), indicando que a fratura neste ponto ocorreu devido à sobrecarga de tração. No lado esquerdo, uma trinca circular nucleou na ponta do “gancho” e propagou ao longo da chapa inferior, ao invés de propagar através da ZM. Posteriormente, com o elevado dobramento do botão de solda, a trinca que havia nucleado no lado esquerdo começa a propagar para a chapa superior. É importante notar que este tipo de falha é observado em juntas soldadas com alta RC. Uma observação adicional é que, neste tipo de fratura, não há propagação da trinca através da ZM, o que pode ser um indicativo da razão pela qual estas juntas apresentam grande RC.

Figura 87 - Seção longitudinal de uma fratura do tipo Arrancamento Circunferencial



A Figura 88 apresenta observações realizadas com MEV no lado direito da chapa superior de uma fratura do tipo AC. De um modo geral, é evidente a mistura deficiente do material ao longo da superfície de fratura. Pontos com maior magnificação são mostrados na Figura 89 para possibilitar uma melhor análise. O ponto 1 está localizado na região do

“gancho”, é possível ver as estrias associadas à rotação da ferramenta. Estas estrias caracterizam a região com baixa mistura do material. Além disso, os pontos 2, 3, 4 e 5 apresentaram uma morfologia mista, onde é possível ver tanto estrias quanto *dimples*. Nesta região, mesmo com a mistura insuficiente do material, alguns pontos apresentam boa ligação, pois apresentam pequenos *dimples* que indicam que houve deformação plástica antes da separação das superfícies. Os pontos 6 e 7 mostram *dimples*, o que significa que esta região tem uma melhor ligação e passa por uma maior deformação durante o carregamento. Na superfície da chapa superior, o ponto 8 mostra a falta de mistura de material nesta porção da junta, o que pode ter prejudicado a resistência mecânica. É possível até mesmo ver os contornos de grão da ZTMA. Isto pode ter acontecido devido à alta VR (esta solda foi produzida com VR: 3000 RPM) que não foi capaz de obter uma boa mistura do material. É possível sugerir, então, que a propagação da trinca começa na região do “gancho”, propagando para cima ao longo da região de mistura insuficiente do material até atingir a superfície da chapa superior.

Figura 88 - Observações via Microscopia Eletrônica de Varredura no lado direito da chapa superior de uma fratura do tipo Arrancamento Circunferencial.

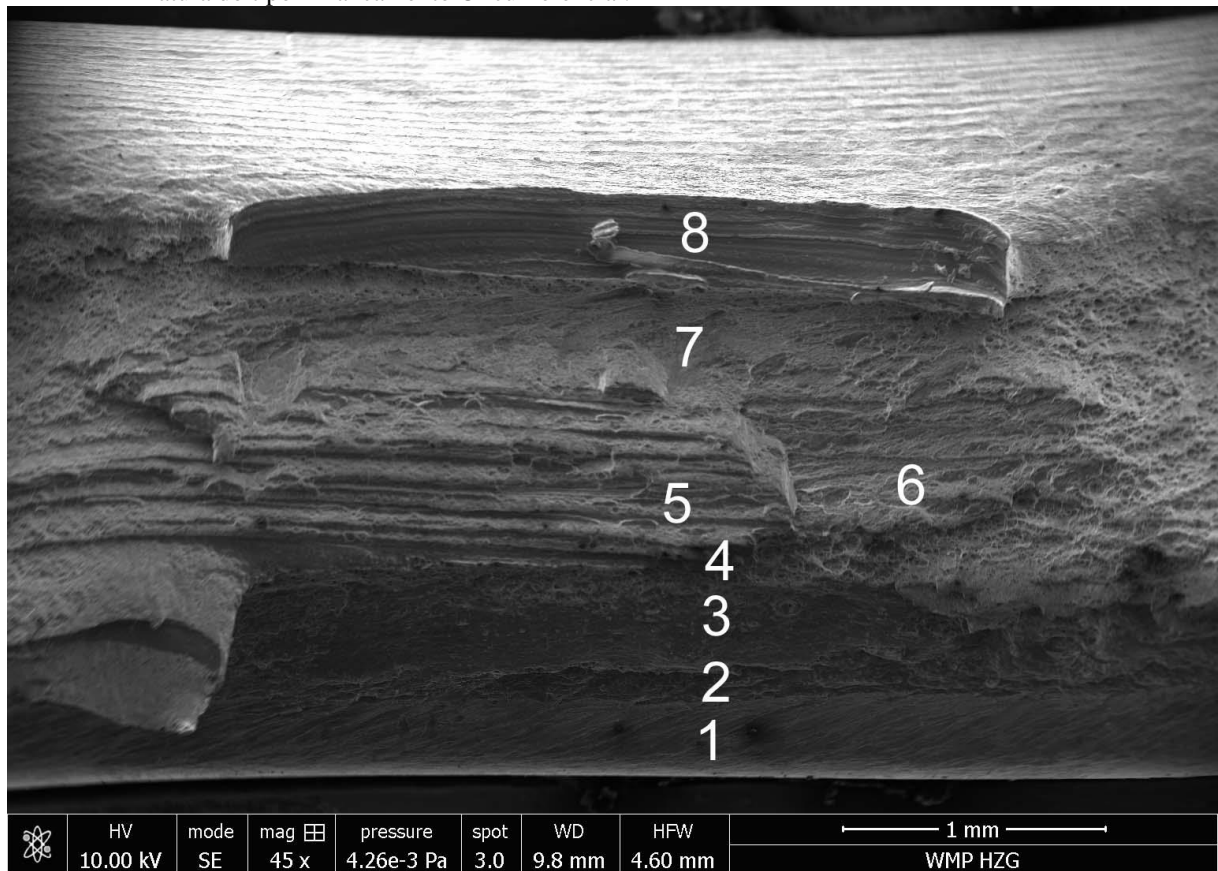
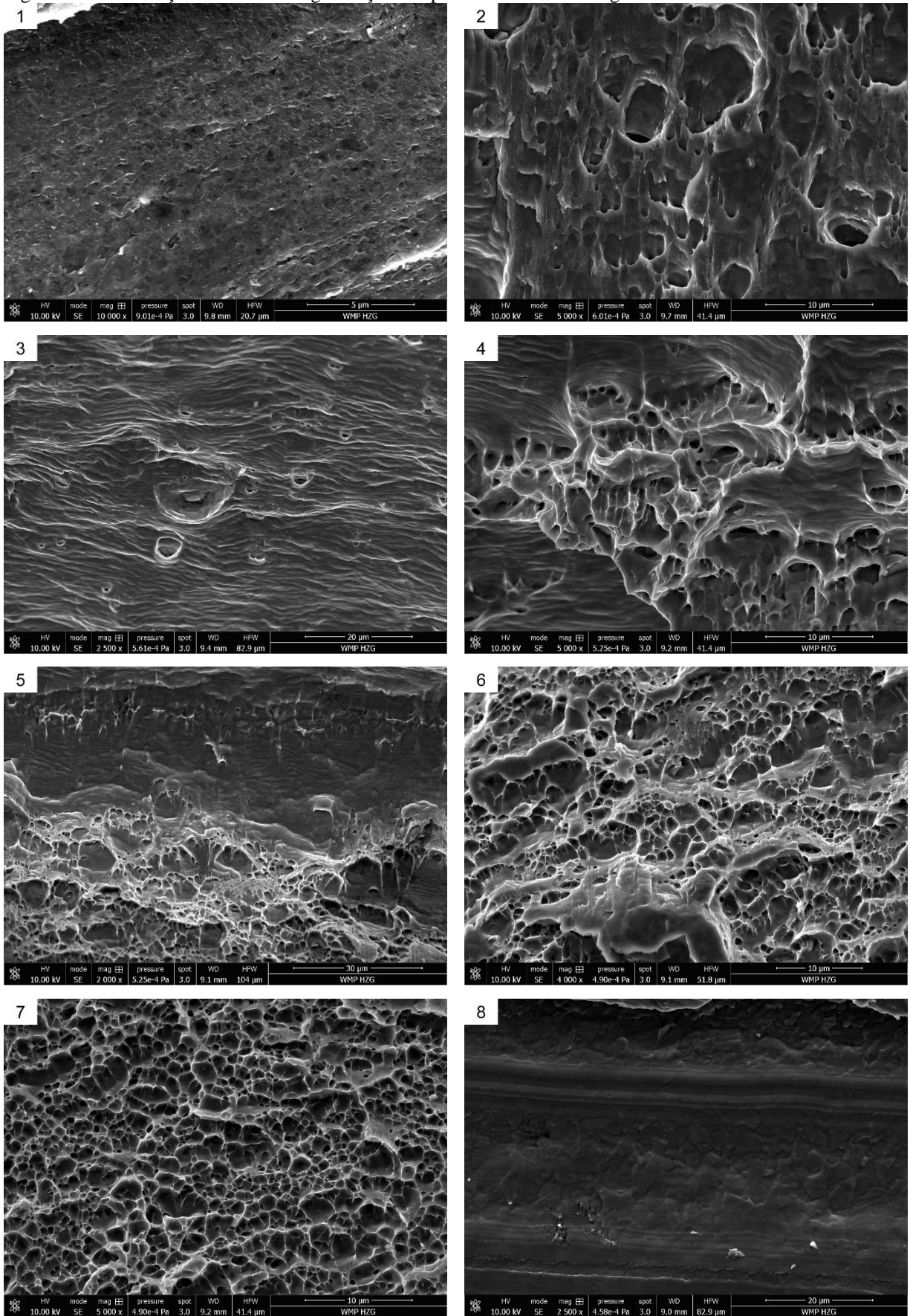
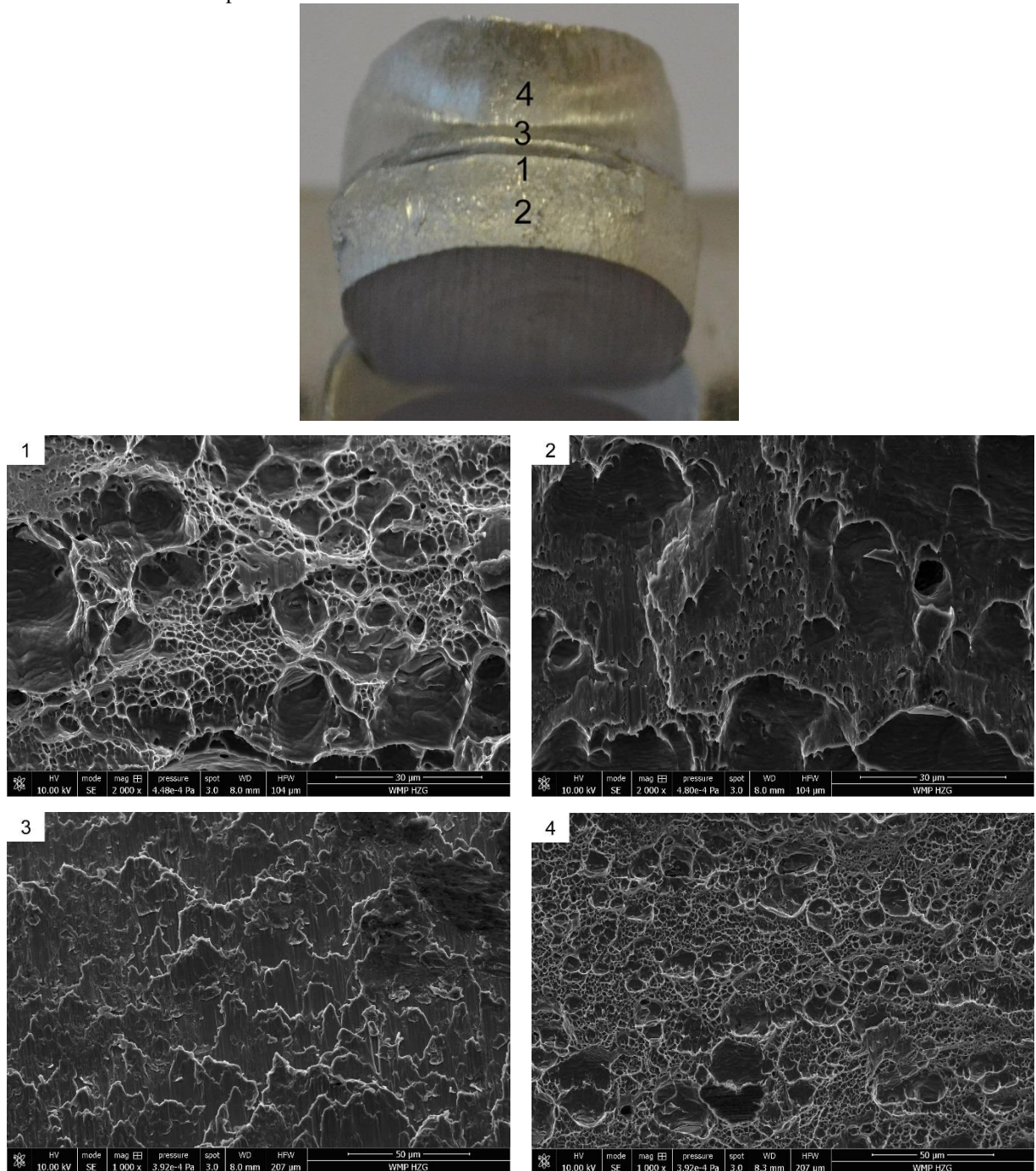


Figura 89 – Observações em maior magnificação dos pontos indicados na Figura 88.



Adicionalmente, imagens de MEV foram executadas no lado esquerdo do botão de solda a fim de aumentar a compreensão a respeito da propagação da trinca. Estas imagens podem ser vistas na Figura 90. O ponto 1 está localizado na região onde a trinca deve ter começado a propagação, uma vez que se localiza na região do “gancho”, pode ser visto um comportamento dúctil. Este aspecto pode ser o resultado das tensões trativas nesta região. Depois do início da propagação, a trinca anda para baixo, na direção da superfície da chapa inferior. O aspecto da superfície desta fase da propagação pode ser visto no ponto 2, onde observamos uma típica superfície de fratura dúctil. Isto significa que, com a flexão da amostra, o estado de tensões deve mudar de tensões trativas para tensões cisalhantes. Olhando para a chapa superior, acontece uma propagação secundária da trinca que inicia na região do “gancho” e se desloca para cima até atingir a superfície da chapa superior. O ponto 3 está localizado na região do “gancho”, onde a propagação começa. É possível observar uma superfície típica de fratura por cisalhamento dúctil neste ponto. Um pouco acima, no ponto 4, podem ser vistos pequenos vazios. Este aspecto da superfície de fratura pode indicar que a trinca propagou ao longo da região de boa mistura de material. De fato, como foi observado na Figura 87, a propagação ocorreu fora da fronteira do botão de solda, indo em direção à ZAC até atingir a superfície.

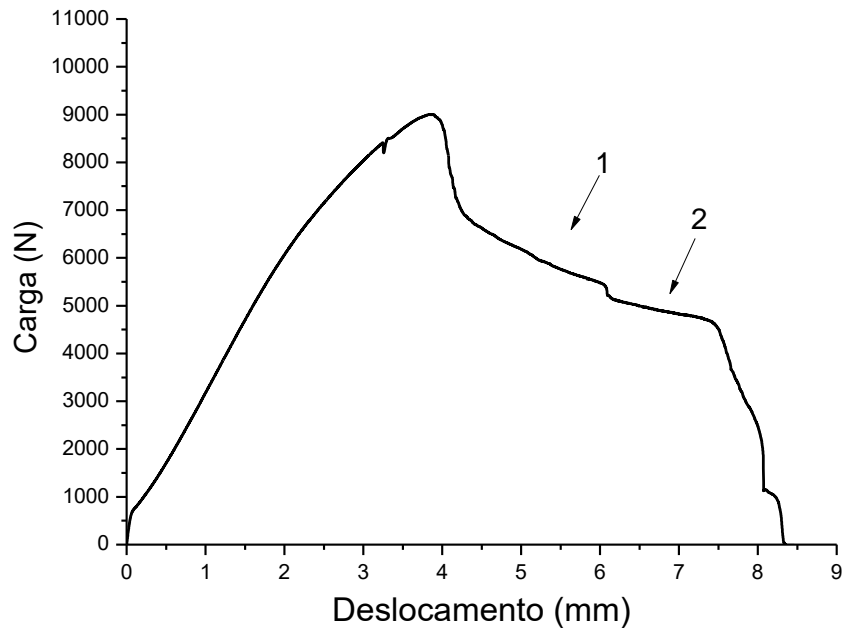
Figura 90 - Observações via Microscopia Eletrônica de Varredura no lado esquerdo do botão de solda de uma fratura do tipo Arrancamento Circunferencial.



A Figura 91 está mostrando o gráfico de Carga x Deslocamento da amostra utilizada nesta investigação. Este tipo de fratura tem um comportamento similar à fratura do tipo ANC, pois é capaz de suportar altas cargas e deformações. Na primeira parte do gráfico, até atingir a carga máxima, as tensões trativas estão crescendo nos cantos superior-direito e inferior-esquerdo da junta, onde as trincas estão nucleando. Depois de atingir a carga máxima, a trinca começa sua propagação. Esta propagação está representada pelo quase patamar indicado pelas

duas flechas. A flecha 1 representa a propagação da trinca gerada no canto superior direito, enquanto a flecha 2 representa o cisalhamento da porção superior do lado esquerdo da junta.

Figura 91 - Gráfico da Carga *versus* Deslocamento de uma amostra que falhou por Arrancamento Circunferencial.



Rosendo (2009) observou o mesmo tipo de fratura em suas investigações. Assim como foi observado na Figura 87, a trinca circular no canto superior direito da junta iniciou por sobrecarga de tração. Para Rosendo (2009), esse modo de falha foi observado apenas nas amostras de desempenho inferior, que apresentavam defeitos de soldagem devido ao curto tempo de processamento.

5.8 ESTUDO DO ENVELHECIMENTO NATURAL

A

Figura 92 apresenta o perfil de microdureza de uma junta soldada processada com a Combinação 5 (VR: 1800 RPM / PP: 3,4 mm / TR: 2,5 mm/s). As medidas de microdureza foram realizadas no mesmo dia em que a solda foi realizada. Portanto, o perfil de microdureza representa a condição de uma junta “como soldada”.

Uma macrografia de uma junta soldada na mesma condição é mostrada na Figura 93 para facilitar a correlação entre as zonas da junta soldada e as diferentes posições do perfil de microdureza.

O perfil de microdureza exibe um formato de “W”; isto significa que a microdureza é simétrica em relação ao centro da junta e que a dureza média da junta é menor do que a dureza do MB.

A dureza média do MB é de aproximadamente 75 HV. À medida que o perfil se aproxima da periferia da junta, a microdureza diminui ao longo da ZAC. Isto continua a acontecer até atingir um ponto de dureza mínima (45 HV) um pouco antes da ZTMA, onde a dureza volta a crescer até atingir a fronteira entre a ZTMA e a ZM. Na porção mais externa da ZM, o perfil cai novamente, atingindo uma dureza em torno de 50 HV. No centro da ZM, o perfil se estabelece em um patamar em torno de 60 HV.

De acordo com Shen et al. (2014b), o comportamento mecânico de uma liga de alumínio endurecível por precipitação é influenciada principalmente pela morfologia e distribuição dos precipitados. Assim, a queda gradual da dureza na ZAC deve ocorrer devido ao coalescimento de precipitados na região mais afastada do botão de solda e à dissolução dos mesmos na região mais próximo ao botão de solda. Como a ZTMA e a ZM passam por temperaturas mais altas do que a ZAC, somente a dissolução dos precipitados ocorre nesta região. A microdureza ligeiramente maior que é observada no centro da ZM pode ser atribuída ao refino de grão.

Figura 92 - Perfil de microdureza (como soldado) de uma junta soldada de acordo com a combinação

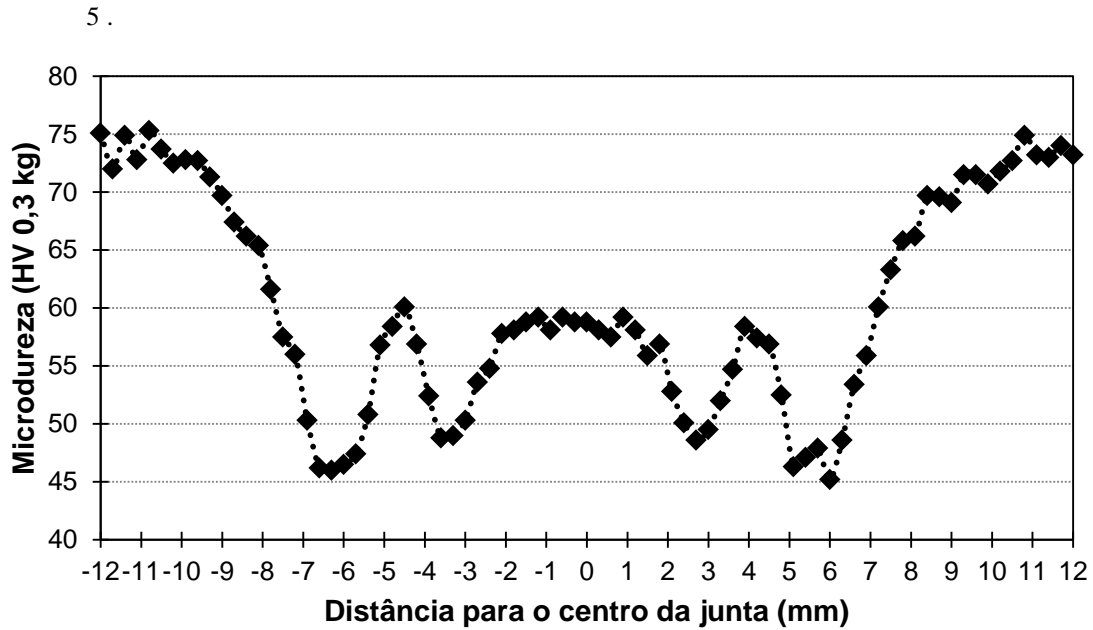
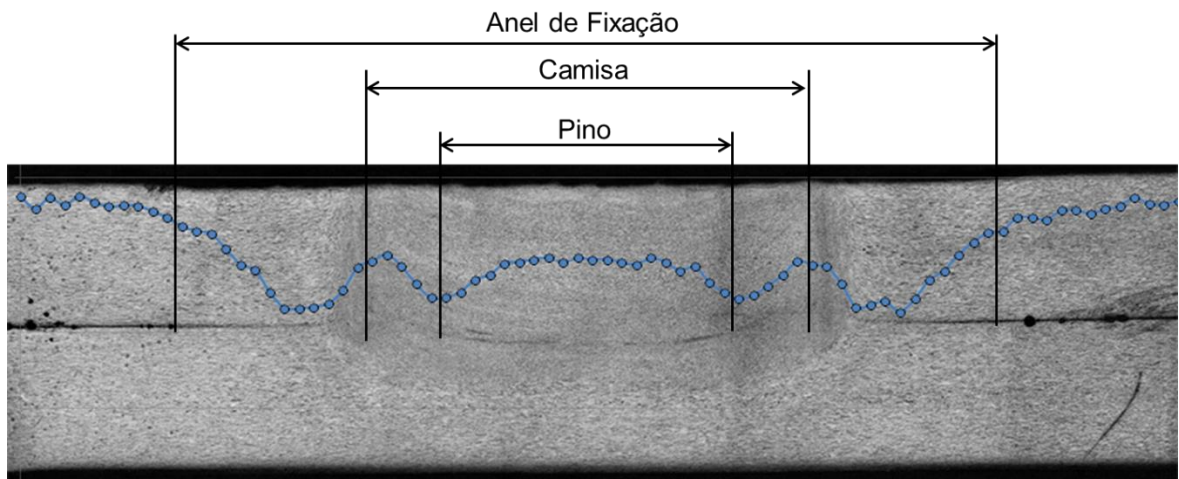


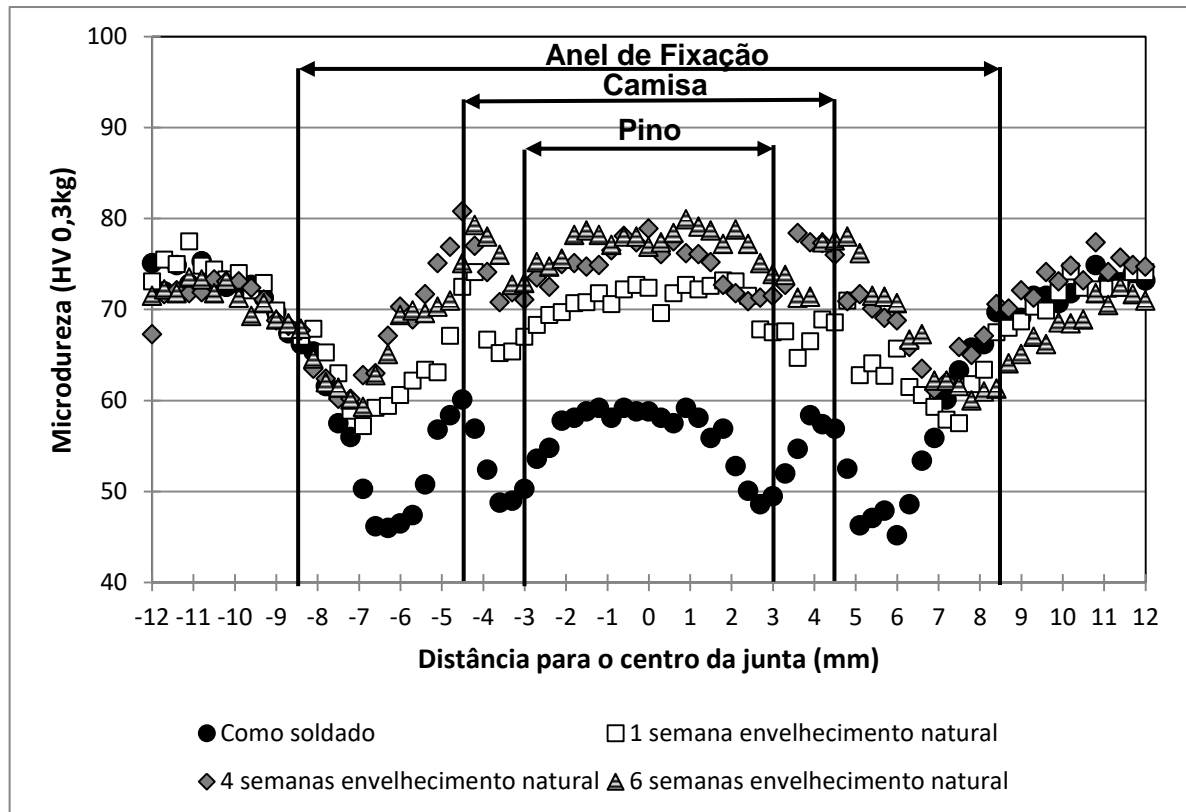
Figura 93 - Perfil de microdureza ao longo da microestrutura correlacionado com a geometria da ferramenta.



A Figura 94 apresenta os perfis de microdureza de várias juntas soldadas utilizando a combinação de parâmetros 5 (VR: 1800 RPM / PP: 3,4 mm / TR: 2,5 mm/s) para vários tempos de envelhecimento natural. Além da condição “como soldada”, medidas foram realizadas com amostras envelhecidas naturalmente por 1 semana, 4 semanas e 6 semanas. As áreas abaixo do anel de fixação, da camisa e do pino estão identificadas no gráfico. Olhando para os valores fora da área do anel de fixação, pode ser visto o comportamento do MB. A dureza desta área permanece na mesma faixa durante o tempo, o que evidencia que a microestrutura nessa região é estável. A área abaixo do anel de fixação corresponde à ZAC e à ZTMA, como discutido anteriormente na Figura 93. A dureza da ZAC e da ZTMA aumenta com o envelhecimento natural. O que mostra que, mesmo com o coalescimento dos

precipitados, ainda há elementos de liga em solução sólida ou Zonas GP nesta região, levando à formação de precipitados β'' . A área abaixo da Camisa e do Pino corresponde à ZM. Como esperado, a dureza da ZM aumenta de uma média de 55 HV para 77 HV com 10 semanas de envelhecimento natural.

Figura 94 - Perfis de Microdureza de várias juntas soldadas de acordo com a combinação de parâmetros 5. Comparação entre a condição "como soldado", 1 semana, 4 semanas, 6 semanas e 10 semanas de envelhecimento natural.

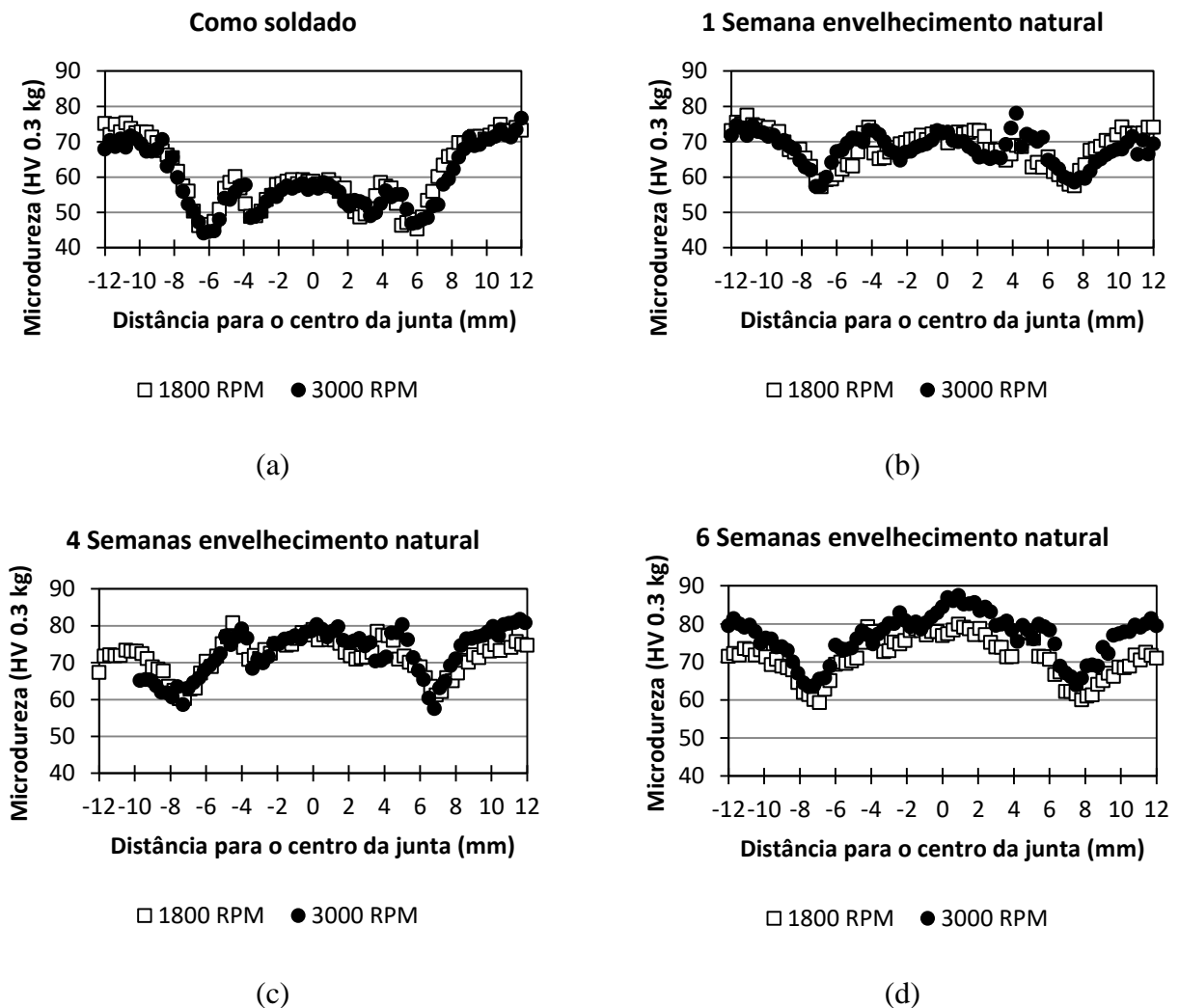


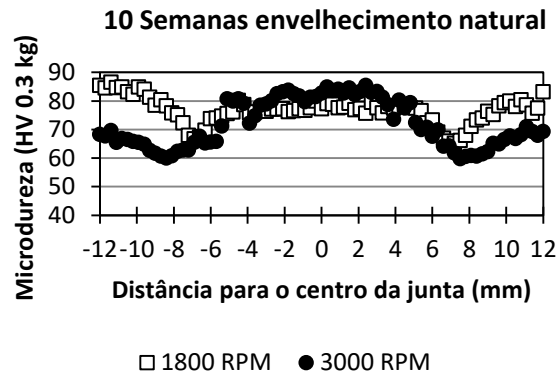
Chen et al. (2012) avaliaram a evolução da microdureza de uma junta da liga de alumínio AA 6111, soldada a ponto por ultrassom. Da mesma forma como foi observado no presente trabalho, o perfil de microdureza da junta “como soldada” apresentou um formato de W com dureza média do MB de 80 HV. Após duas semanas de envelhecimento natural, a dureza da junta aumentou para uma média ligeiramente maior do que a dureza do MB. Após 8 meses de envelhecimento natural, a dureza da junta continuou a aumentar e atingiu uma dureza média de 90-95 HV. Nos três perfis de microdureza, pode ser observada uma região de dureza mínima no qual não houve aumento dessa propriedade ao longo do tempo. De acordo com Kou (2003), esse ponto do perfil de microdureza corresponde à região onde houve o

coalescimento dos precipitados, não havendo mais elementos de liga em solução para promover o endurecimento por precipitação.

Um parâmetro com o mesmo valor de PP e TR e maior VR também foi avaliado ao longo do tempo a fim de investigar se uma junta soldada com maior aporte térmico teórico poderia apresentar um comportamento diferente na precipitação. Como pode ser visto na Figura 95, não há diferença significativa entre os perfis ao longo de 4 semanas de envelhecimento natural. Uma possível explicação para isso pode ser porque, como a soldagem ocorre muito rapidamente, a diferença de aporte térmico não é suficiente para produzir maiores ZACs.

Figura 95 - Comparação entre os perfis de microdureza de dois diferentes parâmetros de soldagem ao longo do tempo.





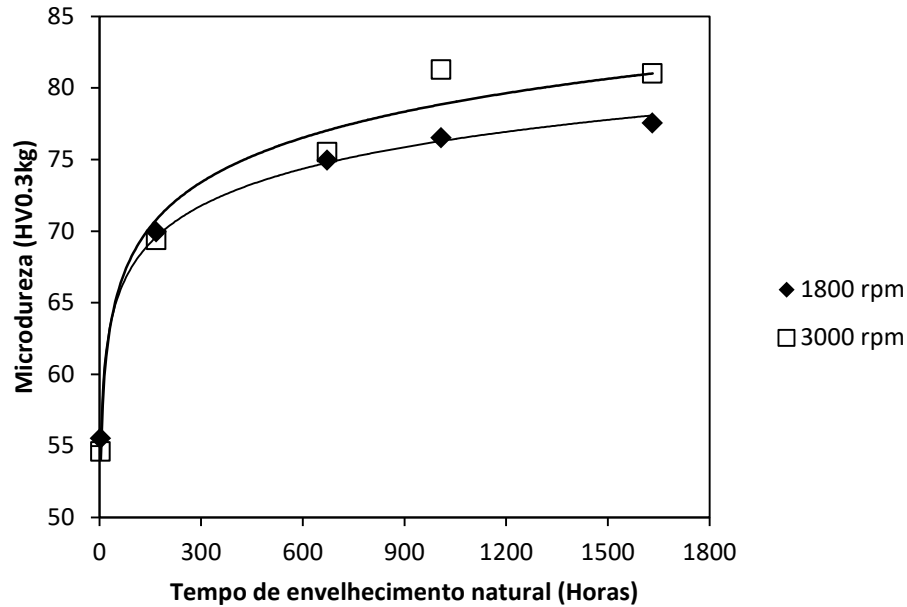
(e)

Entretanto, é possível notar que depois de decorridas 6 semanas de envelhecimento natural, a microdureza da ZM da junta soldada com VR: 3000 RPM é ligeiramente maior do que a junta soldada com VR: 1800 RPM. A evolução da microdureza média da ZM das duas juntas avaliadas ao longo do tempo de envelhecimento é mostrada na Figura 96. É possível notar que os dados atendem a seguinte equação: (ESMAEILI, 2002)

$$\sigma_{NA} = \sigma_l + k_{NA} \log t \quad (7)$$

Onde σ_{NA} é a tensão de escoamento após um tempo t na temperatura ambiente e σ_l e k_{NA} são constantes.

Figura 96 - Evolução da microdureza da Zona de Mistura durante o tempo de envelhecimento natural.



Imam (2014) estudou o efeito do envelhecimento natural nas propriedades mecânicas e microestruturais de uma junta de liga de alumínio 6063-T4 soldada pelo processo FSW. Neste trabalho foi verificado que a taxa de endurecimento durante o envelhecimento natural é maior para soldas realizadas com alta rotação. Segundo o autor, espera-se que juntas soldadas com maior rotação contenham um maior número de vacâncias, que fornecem mais caminhos para a difusão e aceleram o envelhecimento. Olea (2008) complementa que os efeitos da recristalização dinâmica na ZM podem resultar em discordâncias remanescentes depois do resfriamento, uma vez que deformação e calor são introduzidos simultaneamente. Totten (2003) também enfatiza o efeito das vacâncias na resposta da liga para o envelhecimento. Fazendo um paralelo com outro processo, Das et al. (2011) verificou que maiores velocidades de rotação no processo de lingotamento contínuo em cilindros (twin roll casting) resultam em maior taxa de endurecimento e maior pico de dureza no envelhecimento artificial da uma liga Al-Mg-Si, devido a melhor solubilização dos elementos de liga. Dessa forma, a maior dureza obtida através do envelhecimento natural na ZM da junta soldada com maior rotação pode ter ocorrido devido à maior quantidade de vacâncias e discordâncias presentes nessas juntas. Além disso, melhor solubilização da ZM pode ter contribuído para a maior dureza devido ao envelhecimento natural.

5.9 ESTUDO DE ENDURECIMENTO DA JUNTA PELO CICLO TÉRMICO DE CURA DA PINTURA

O ciclo de cura da pintura (*Paint Bake Cycle – PBC*) foi simulado a fim de avaliar a influência deste ciclo térmico nas propriedades mecânicas de junta soldadas pelo processo de soldagem a ponto por fricção da liga de alumínio AA 6111.

Três parâmetros diferentes foram testados. Como a ANOVA (seção 5.1.2.1) revelou que a VR é um parâmetro significativo para RC e RD, a partir disso decidiu-se fixar PP e TR e variar a VR em três níveis: 1800 2400 e 3000 RPM.

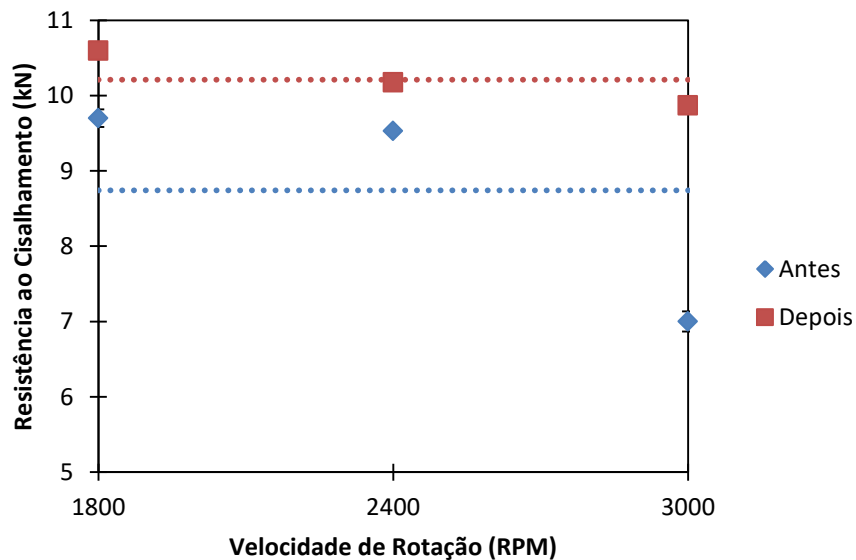
5.9.1 Resistência ao Cisalhamento

A Tabela 2727 Tabela 27 sintetiza os resultados de RC antes e depois do PBC. O ciclo térmico tem um efeito positivo na propriedade mecânica, aumentando a RC em 16,8% em média. A Figura 97 mostra que a tendência a diminuir a RC com a VR continua presente após o PBC. Entretanto, após o PBC, a curva parece mais plana do que anteriormente. Isto pode representar que as propriedades mecânicas são mais estáveis depois do PBC, para qualquer um dos parâmetros estudados nesta seção.

Tabela 27 - Resultados de RC antes e depois do Ciclo de Cura da Pintura.

Velocidade de Rotação (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)	RC médio (kN)	
			Antes	Depois
1800	3,4	2,5	9,70	10,60
2400	3,4	2,5	9,53	10,18
3000	3,4	2,5	7,00	9,87
		Média:	8,74	10,21

Figura 97 - Comparação entre a Resistência ao Cisalhamento antes e depois do Ciclo de Cura da Pintura.



Chen et al. (2013) observaram um aumento médio de 25% na RC de juntas de liga de alumínio AA6111 produzidas pelo processo de FSSW e submetidas ao mesmo processo de PBC. Sendo que as amostras utilizadas nesse estudo tinham 1 mm de espessura.

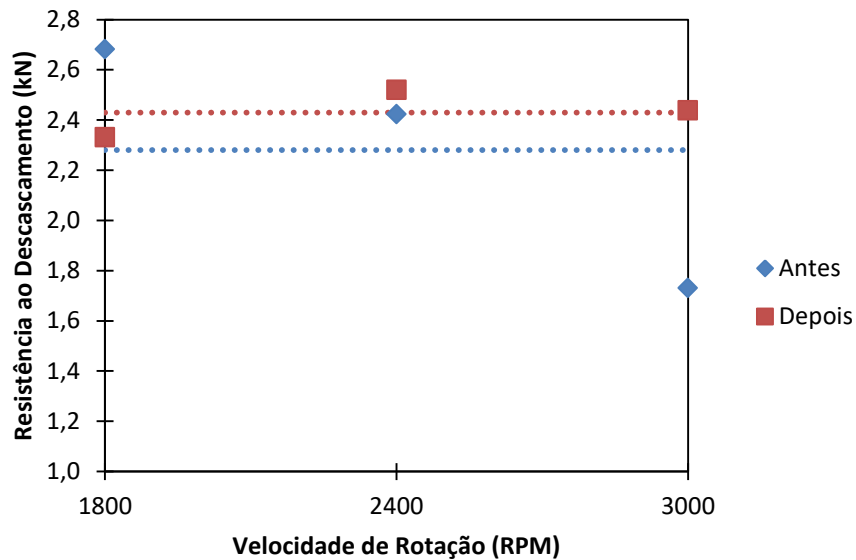
5.9.2 Resistência ao Descascamento

A Tabela 28 resume os resultados de RD antes e depois do PBC. O aumento médio foi de 6,7%, o que é menor do que o desvio padrão dos resultados obtidos nos experimentos apresentados na seção 5.3.1. Isso pode ser o caso, por conseguinte, que o PBC não aumenta consideravelmente a RD. A Figura 98 mostra que os valores obtidos de RD após o PBC têm um comportamento diferente dos que foram obtidos antes. Isto pode ter ocorrido devido ao alto desvio padrão do ensaio, ou devido ao PBC. No segundo caso, estaria de acordo com a proposta de que o PBC tem um efeito de estabilização nas propriedades mecânicas.

Tabela 28 - Resultados de Resistência ao Descascamento antes e depois do Ciclo de Cura da Pintura.

Velocidade de Rotação (RPM)	Profundidade de Penetração (mm)	Taxa de Retração (mm/s)	RD médio (kN)	
			Antes	Depois
1800	3,4	2,5	2,68	2,33
2400	3,4	2,5	2,42	2,52
3000	3,4	2,5	1,73	2,44
		Média	2,28	2,43

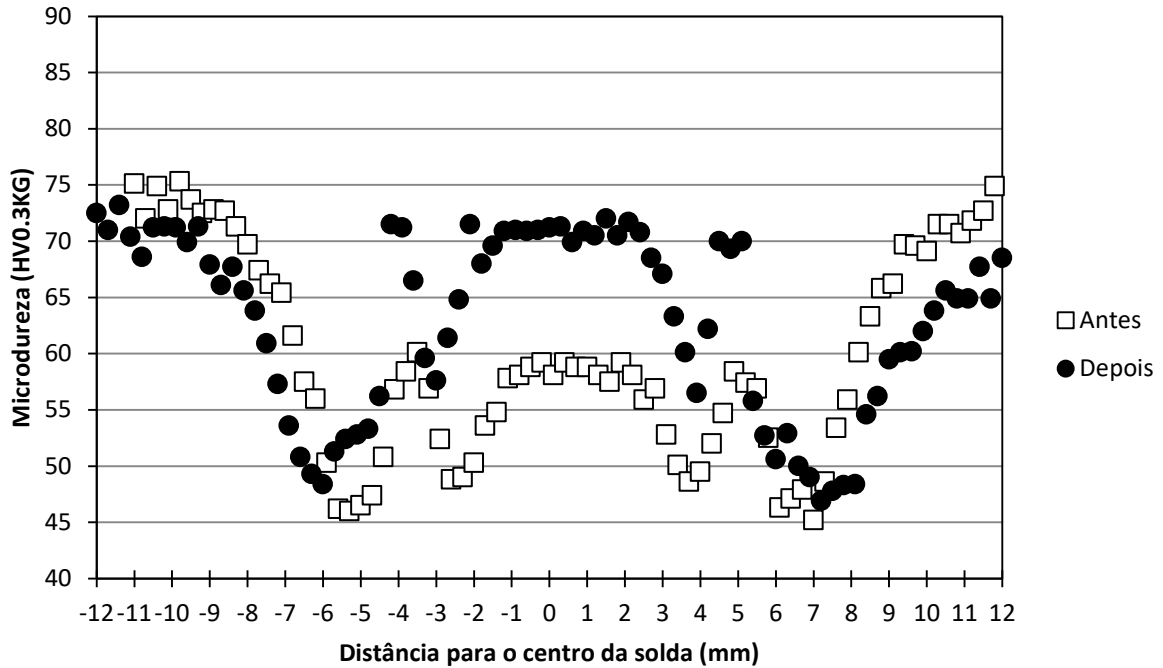
Figura 98 - Comparação entre a Resistência ao Descascamento antes e depois do Ciclo de Cura da Pintura.



5.9.3 Microdureza

A Figura 99 mostra a comparação entre os perfis de microdureza da combinação de parâmetros 5 (RS: 1800 RPM / PP: 3,4 mm / TR: 2,5 mm/s) antes do PBC (vermelho) e depois do PBC (azul). Pode ser observado o maior valor de dureza da ZM na amostra após o PBC, em comparação com a amostra na condição CS. Antes do PBC, a dureza média da ZM (55 HV) é 23% menor do que a do MB (72 HV). Em contraste, após o PBC, MB e ZM têm aproximadamente a mesma microdureza.

Figura 99 - Comparação dos perfis de microdureza antes e depois do Ciclo de Cura da Pintura.



Chen et al. (2013) avaliaram a microdureza de juntas da liga de alumínio AA 6111-T4 produzidas por FSSW antes e depois do PBC. Em contraste com os resultados obtidos no presente trabalho, Chen et al. (2013) observaram que a dureza da ZM após o PBC aumentou além da dureza do Material Base. Entretanto, foi observado que o MB também passou por um pequeno aumento de dureza. A explicação para esse fenômeno pode ser que, como Chen et al. (2013) utilizaram amostras na condição T4 (naturalmente envelhecida), a microestrutura das mesmas ainda não estava totalmente estabilizada e, portanto, havia mais potencial para aumento de dureza do que as amostras utilizadas no presente trabalho.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, juntas soldadas a ponto por fricção da liga de alumínio AA 6111 foram investigadas. Chapas de 3 mm de espessura foram utilizadas para produzir juntas sobrepostas com e sem uma camada adesiva entre as chapas.

O Planejamento de Experimentos e Metodologia de Superfície de Resposta foram aplicados a fim de obter uma faixa de parâmetros de soldagem otimizada para Resistência ao Cisalhamento e Resistência ao Descascamento nas condições sem adesivo e com adesivo. Além disso, o processo foi desenvolvido com o objetivo de obter baixos ciclos de soldagem,

Além disso, investigações adicionais foram realizadas com o objetivo de aumentar o entendimento a respeito das relações entre processo, metalurgia e desempenho mecânico. Estas investigações incluem metalografia, observação da fratura, avaliação do perfil térmico, microdureza e calorimetria diferencial de varredura. Para complementar o estudo, o ciclo de cura da pintura foi simulado a fim de investigar o efeito desse processo na junta.

Os resultados mostraram que é possível obter soldas com resistência mecânica satisfatória para a indústria automotiva, com ou sem adesivo. Além disso, o estudo mostrou que:

- O parâmetro ótimo, tendo como critério o desempenho da junta soldada sem adesivo sob carregamento de cisalhamento, foi alcançado com VR: 1800 RPM, PP: 3,4 mm e TR: 2,5 mm/s. Soldas produzidas com este parâmetro alcançaram a média de 9,7 kN em ensaios de cisalhamento.
- O parâmetro ótimo, tendo como critério o desempenho da junta soldada com adesivo sob carregamento de cisalhamento, foi alcançado com VR: 3000 RPM, PP: 3,6 mm e TR: 4,5 mm/s. Soldas produzidas com este parâmetro alcançaram a média de 9,1 kN em ensaios de cisalhamento.
- O parâmetro ótimo combinando os resultados dos ensaios de cisalhamento e descascamento para juntas soldadas com e sem adesivo foi investigado com o objetivo de obter resistência ao cisalhamento maior do que 8 kN e resistência ao descascamento maior do que 2 kN. Uma faixa de parâmetros foi encontrada e o ponto escolhido (VR: 2600 RPM, PP: 3,6 mm e TR: 4,5 mm/s) atendeu aos requisitos propostos.

- O tempo de solda do parâmetro otimizado para cisalhamento e descascamento com e sem adesivo foi de 1,7 segundos, o qual é competitivo com a solda a ponto por resistência elétrica.
- Três modos de fratura foram identificados nesta investigação: Através da Solda, Arrancamento Não Circunferencial e Arrancamento Circunferencial. Foi observado que o local preferencial para o início de propagação da trinca é a ponta do “gancho” devido à baixa mistura de material.
- A investigação da microestrutura das juntas soldadas sem adesivo revelou que a altura do “gancho” tem um papel fundamental na resistência mecânica das juntas. Elevadas alturas do “gancho” foram observadas principalmente em juntas de baixa resistência. Estes tipos de “ganchos” aparecem predominantemente na ZTMA de juntas soldadas com alta VR, estas regiões apresentaram baixa mistura do material. Além disso, elevada altura do “gancho” culmina em pequena seção remanescente, o que significa que a trinca precisa propagar por um caminho menor para atingir a superfície.
- A investigação da microestrutura das juntas soldadas com adesivo revelou que prováveis resquícios do adesivo estavam presentes na interface da solda. Esta constatação sugere que a contaminação da interface com resquícios do adesivo é responsável pela redução das propriedades mecânicas das juntas soldadas com adesivo.
- As medidas de microdureza revelaram qual a extensão que o processo modifica o material. Foi observada uma redução da microdureza na ZM e nas regiões vizinhas: ZTMA e ZAC. A maior redução ocorreu na ZAC (aproximadamente 35%).
- Foram observadas as modificações no perfil de microdureza ao longo do tempo. O envelhecimento natural acontece na ZM, na ZTMA e na ZAC. Isto sugere que após o processo de soldagem, há elementos de liga dissolvidos na junta que podem combinar-se formando precipitados que endurecem o material. Depois de 10 semanas de envelhecimento natural, o centro da ZM atingiu uma dureza média no mesmo patamar do MB.
- Dois parâmetros diferentes foram avaliados no estudo do perfil de microdureza da junta. Pode ser sugerido que a variação do parâmetro VR (e, por consequência, o aporte térmico) não afetou significativamente o perfil de

microdureza da junta. A mesma consideração pode ser dita a respeito do efeito do envelhecimento natural na microdureza das juntas soldadas com diferentes parâmetros. Entretanto, foi observado que a junta soldada com maior VR apresentou um maior aumento da dureza da ZM.

- Os ensaios de cisalhamento mostraram um aumento médio de 16,8% no desempenho da junta após o PBC. Já o ensaio de descascamento mostrou um aumento de 6,7%, o qual é menor do que o desvio padrão desse tipo de ensaio. Em ambos os casos, a resistência da junta após o PBC se mostrou mais estável.
- Foi observado que, após o PBC, a dureza do centro da ZM aumenta até atingir o mesmo patamar da dureza do MB.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de obter maior aprofundamento a respeito do tema, estudos adicionais podem ser realizados:

- Realização de ensaios de resistência ao cisalhamento e ao descascamento com corpo de provas maiores ou com múltiplos pontos de solda, a fim de verificar se a combinação de solda a ponto por fricção e adesivo pode apresentar desempenho mecânico superior se comparado às técnicas isoladas.
- Realização de ensaios de fadiga para diferentes parâmetros de soldagem e morfologias de “ganchos”, a fim de aprofundar qual o efeito destes aspectos na resistência da junta sob tensão cíclica.
- Realização de ensaios de fadiga de juntas soldadas com adesivo a fim de verificar a influência das impurezas encontradas no desempenho mecânico sob tensão cíclica.
- Investigação ~~mais aprofundada~~ a respeito da precipitação nas juntas devido ao envelhecimento natural ou artificial, utilizando de técnicas tais como Microscopia Eletrônica de Transmissão e Espalhamento de Raios-X a baixo ângulo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL WAHAB, M. M. Fatigue in Adhesively Bonded Joints: A Review. **ISRN Materials Science**, v. 2012, p. 1–25, 2012.
- ADAMS, R. D. **Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications**. Reimpressã ed. [s.l.] Elsevier Science, 2005.
- AMANCIO-FILHO, S. T. et al. Preliminary Investigation of the Microstructure and Mechanical Behaviour of 2024 Aluminium Alloy Friction Spot Welds. **Materials Transactions**, v. 52, n. 5, p. 985–991, 2011.
- ASGARI MEHRABADI, F. Experimental and Numerical Failure Analysis of Adhesive Composite Joints. **International Journal of Aerospace Engineering**, v. 2012, p. 1–10, 2012.
- ASM. **ASM Metals Handbook Volume 2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials** ASM International, , 1990.
- ASTM. **D907-15 - Standard Terminology of Adhesives**, 2016a.
- ASTM. **Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning**, 2016b.
- AWS. **Welding Handbook Vol. 2**. 8^a. ed. [s.l.] American Welding Society, 1991.
- Azo Materials**. Disponível em: <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8640>>. Acesso em: 22 mar. 2016.
- BALDAN, A. Adhesion phenomena in bonded joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 38, p. 95–116, 2012.
- BARNES, T. A.; PASHBY, I. R. Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles Part II - adhesive bonding and mechanical fasteners. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 99, n. 1-3, p. 72–79, 2000.
- BENEDYK, J. C. Aluminum alloys for lightweight automotive structures. In: MALLICK, P. K. (Ed.). **Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2010. p. 79–113.
- BILYEU, B. Epoxy thermosets and their applications II . Thermal analysis. **Journal of Materials Education**, v. 22, n. 4-6, p. 107–129, 2000.
- BRISKHAM, P. et al. **Comparison of self-pierce riveting , resistance spot welding and spot friction joining for aluminium automotive sheet**. 2006 SAE World Congress. **Anais...**Detroit: SAE International, 2006
- BRZOSTEK, R. C. **Estudo Da Fratura Em Solda Ponto Por Fricção Em Alumínio Alclad 2024-T351 E Alumínio 2024-T351 : Uma Abordagem Numérica E Experimental**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7th. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- CAMPANELLI, L. C. **Estudo do processo de soldagem por fricção por ponto (FSpW) da liga de magnésio AZ31**. Dissertação Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2012.
- CAMPANELLI, L. C. et al. Metallurgy and mechanical performance of AZ31 magnesium alloy friction spot welds. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 213, n. 4, p. 515–

521, 2013.

CAO, J. Y. et al. Hook formation and mechanical properties of friction spot welding in alloy 6061-T6. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 230, p. 254–262, 2016.

CHEN, Y. C. et al. HAZ development and accelerated post-weld natural ageing in ultrasonic spot welding aluminium 6111-T4 automotive sheet. **Acta Materialia**, v. 60, n. 6-7, p. 2816–2828, 2012.

CHEN, Y. C. et al. The effect of a paint bake treatment on joint performance in friction stir spot welding AA6111-T4 sheet using a pinless tool. **Materials Chemistry and Physics**, v. 141, n. 2–3, p. 768–775, 2013.

CHOWDHURY, S. H. et al. Lap shear strength and fatigue behavior of friction stir spot welded dissimilar magnesium-to-aluminum joints with adhesive. **Materials Science and Engineering A**, v. 562, p. 53–60, 2013.

CHRISTOPH SCHILLING, J. DOS S. **Method and device for joining at least two adjoining work pieces by friction welding**. Estados Unidos, 2004.

DAS, S. et al. Effect of rolling speed on microstructure and age-hardening behaviour of Al – Mg – Si alloy produced by twin roll casting process. **Materials and Design**, v. 32, n. 8-9, p. 4603–4607, 2011.

DAVIS, M. J.; BOND, D. A. **The Importance of Failure Mode Identification in Adhesive Bonded Aircraft Structures and Repairs**. International Conference on Composite Materials. **Anais...**1999

DIAS, G. P. **Aplicação do Processo de Soldagem a Ponto por Fricção em Estruturas Aeronáuticas: Otimização de Parâmetros de Processo e Avaliação da Integridade das Soldas para a Liga de Alumínio 2198-T8**. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

EBNESAJJAD, S. **Handbook of Adhesives and Surface Preparation: Technology, Applications and Manufacturing**. Oxford: Elsevier Science, 2011.

EFFERTZ, P. S. et al. Fatigue life assessment of friction spot welded 7050-T76 aluminium alloy using Weibull distribution. **International Journal of Fatigue**, v. 87, p. 381–390, 2016.

ESMAEILI, S. **PRECIPITATION HARDENING BEHAVIOUR OF AA6111**. [s.l.] University of British Columbia, 2002.

HEINZ, B.; SKROTZKI, B. Characterization of a friction-stir-welded aluminum alloy 6013. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 33, n. 3, p. 489–498, 2002.

HOEHNE, J. L. **Estudo da utilização de adesivo estrutural para redução de pontos de solda nas partes móveis de veículos e correlação da estrutura do compósito metal/recobrimento/adesivo formado com seu desempenho mecânico**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

IMAM, M.; RACHERLA, V.; BISWAS, K. Effect of post-weld natural aging on mechanical and microstructural properties of friction stir welded 6063-T4 aluminium alloy. **Journal of Materials & Design**, v. 64, p. 675–686, 2014.

ISO. **14273 - Specimens dimensions and procedure for shear testing resistance spot, seam and embossed projection welds**, 2002.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2nd. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.

LUNDER, O.; OLSEN, B.; NISANCIOGLU, K. Pre-treatment of AA6060 aluminium alloy for adhesive bonding. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 22, n. 2, p.

143–150, 2002.

MAZZAFERRO, J. A. E. et al. Preliminary study on the mechanical behavior of friction spot welds. **Soldagem & Inspeção**, v. 14, p. 238–247, 2009.

MENDES, C. N. R. P. **Contribuição ao desenvolvimento de projeto de carrocerias automotivas utilizando adesivo estrutural para junção de chapas metálicas**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2005.

MESSLER, R. W. **Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology**. Oxford: Elsevier, 2004.

MIAO, W. F.; LAUGHLIN, D. E. A differential scanning calorimetry study of aluminum alloy 6111 with different pre-aging treatments. **Journal of Materials Science Letters**, v. 19, n. 3, p. 201–203, 2000.

MILLER, W. S. et al. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. **Materials Science and Engineering A**, v. 280, p. 37–49, 2000.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 5^a. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, 2008.

MOREIRA, P. M. G. P. et al. Mechanical and metallurgical characterization of friction stir welding joints of AA6061-T6 with AA6082-T6. **Materials and Design**, v. 30, p. 180–187, 2009.

NIKS, S. **Hem Flange Bonding: Part 1**. Disponível em: <<http://www.adhesives.org/resources/knowledge-center/aggregate-single/hem-flange-bonding-part-1>>. Acesso em: 17 mar. 2016.

OLEA, C. A. W. **Influence of Energy Input in Friction Stir Welding on Structure Evolution and Mechanical Behaviour of Precipitation-Hardening in Aluminium Alloys (AA2024-T351, AA6013-T6 and Al-Mg-Sc)**. Tese (Doutorado) Ruhr-Universität Bochum, 2008.

PEREIRA, A. M. et al. Strength of aluminium resistance spot welded and weldbonded joints. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 22, p. 25–31, 2010.

PETRIE, E. M. Weldbonding - a hybrid method of assembly. **Metal Finishing**, v. 111, n. 2, p. 42–44, 2013.

PLAINE, A. H. GONZALEZ, A. R. SUHUDDIN, U. F. H. DOS SANTOS, J. F. ALCÂNTARA, N. G. The optimization of friction spot welding process parameters in AA6181-T4 and Ti6Al4V dissimilar joints. **Materials & Design**, v. 83, p. 46–41, 2015.

QUINI, J. G.; MARINUCCI, G. Polyurethane structural adhesives applied in automotive composite joints. **Materials Research**, v. 15, n. 3, p. 434–439, 2012.

REIMANN, M. GARTNER, T. SUHUDDIN, U. GÖBEL, J. DOS SANTOS, J. F. Keyhole closure using friction spot welding in aluminium alloy 6061-T6. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 237, p. 12–18, 2016.

ROBERT, W. M. Weld-bonding: the best or worst of two processes? **Industrial Robot: An International Journal**, v. 29, n. 2, p. 138–148, 2002.

ROSENDO, T. et al. Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181-T4 aluminium alloy. **Materials and Design**, v. 32, n. 3, p. 1094–1100, 2011.

ROSENDO, T. DE S. **Estudo do desempenho mecânico de solda(s) ponto por fricção (FSpW) da liga AA6181-T4**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

- SATO, Y. et al. Precipitation sequence in friction stir weld of 6063 aluminum during aging. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 30, n. 12, p. 3125–3130, 1999.
- SCIALPI, A. et al. Mechanical analysis of ultra-thin friction stir welding joined sheets with dissimilar and similar materials. **Materials & Design**, v. 29, n. 5, p. 928–936, 2008.
- SHEN, J. et al. Eutectic structures in friction spot welding joint of aluminum alloy to copper. **Applied Physics Letters**, v. 104, n. 19, 2014a.
- SHEN, Z. et al. Microstructure and mechanical properties of friction spot welded 6061-T4 aluminum alloy. **Materials & Design**, v. 54, p. 766–778, 2014b.
- SPINELLA, D. J. **Common Joining Methods Used in Aluminium Structures**. Disponível em: <http://www.alcoainnovation.net/fr/pdf/Donald_Spinella-Joining_Methods_nov21.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2016.
- SUHUDDIN, U. et al. Materials Science & Engineering A Microstructure and mechanical properties of friction spot welds of dissimilar AA5754 Al and AZ31 Mg alloys. **Materials Science & Engineering A**, v. 590, p. 384–389, 2014.
- TIER, M. D. et al. The influence of refill FSSW parameters on the microstructure and shear strength of 5042 aluminium welds. **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 213, n. 6, p. 997–1005, 2013.
- TOTTEN, G. E. **Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes**. [s.l.] CRC Press, 2003.
- VERÁSTEGUI, R. N. **Estudo de Uniões Dissimilares Alumínio-Aço Soldadas por “Solda Ponto por Fricção e Mistura Mecânica com Preenchimento do Furo” (Friction Spot Welding – FSpW)**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- VIJAYENTHIRAN, V. **Honda develops new technology to join steel and aluminum**. Disponível em: <http://www.motorauthority.com/news/1082391_new-welding-technique-helps-acura-integrate-more-aluminum-in-its-cars>. Acesso em: 17 mar. 2016.
- WANG, P. C. et al. The Role of Failure Mode, Resistance Spot Weld and Adhesive on the Fatigue Behavior of WELD-Bonded Aluminum. **Welding Journal**, v. 74, n. 2, p. S41–S47, 1995.
- XU, W. et al. Microstructure and mechanical properties of weld-bonded and resistance spot welded magnesium-to-steel dissimilar joints. **Materials Science and Engineering A**, v. 537, p. 11–24, 2012.
- YANG, C.; TOMBLIN, J. S.; GUAN, Z. **Analytical Modeling of ASTM Lap Shear Adhesive Specimens**. [s.l.: s.n.].
- ZHAO, Y. Q. et al. Effects of sleeve plunge depth on microstructures and mechanical properties of friction spot welded alclad 7B04-T74 aluminum alloy. **Materials and Design**, v. 62, p. 40–46, 2014.
- ZHU, Y.; KEDWARD, K. **Methods of Analysis and Failure Predictions for Adhesively Bonded Joints of Uniform and Variable Bondline Thickness**. Santa Barbara: [s.n.].

