

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**REBITAGEM POR FRICÇÃO DE ALUMÍNIO 2024-T351 EM
POLICARBONATO**

Camila Fernanda Rodrigues

São Carlos-SP

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

REBITAGEM POR FRICÇÃO DE ALUMÍNIO 2024-T351 EM
POLICARBONATO

Camila Fernanda Rodrigues

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial à obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Bresciani Canto

Co-orientadores: Prof. Dr. Elias Hage Junior

Prof. Dr.-Eng. Sergio de Traglia Amancio Filho

Agências Financiadoras: CAPES e FAPESP

São Carlos-SP

2014

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

R696f Rodrigues, Camila Fernanda.
Rebitagem por fricção de alumínio 2024-T351 em polycarbonato / Camila Fernanda Rodrigues. -- São Carlos : UFSCar, 2015.
140 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2014.

1. Alumínio. 2. Rebitagem. 3. Polycarbonato. 4. Fricção. I. Título.

CDD: 620.186 (20ª)

“Depois de termos conseguido subir a uma grande montanha, só descobrimos
que existem ainda maiores montanhas para subir”

Nelson Mandela

VITAE DO CANDIDATO
Engenheira de Materiais pela UFSCar (2011)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
CAMILA FERNANDA RODRIGUES
APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO
CARLOS, EM 24 DE OUTUBRO DE 2014.

BANCA EXAMINADORA:



Dr. LEONARDO BRESCIANI CANTO
ORIENTADOR
UFSCar



Dr. JOSÉ ALEXANDRINO DE SOUSA
UFSCar



Dr. JOSÉ RICARDO TARPANI
USP

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por ter me dado força e iluminado meu caminho para que pudesse concluir este trabalho.

Aos meus pais e irmãos, por todo amor e dedicação que sempre tiveram comigo, pelos momentos que estiveram ao meu lado me apoiando e me fazendo acreditar que nada é impossível.

Aos amigos de São Carlos (Renata, Mariele, Daniel, Larissa, Luciane, André, Ana Carolina, Daniela, e Margaret) por todos os momentos que passamos durante esse período, meu especial agradecimento.

Ao meu orientador na Alemanha, Prof. Dr. Sergio Traglia Amancio Filho, pelo ensinamento, paciência, confiança e dedicação dispensados no auxílio da concretização dessa Dissertação.

A todos do Instituto Helmholtz Zentrum Geesthacht, pela ajuda, amizade e apoio durante toda estada na Alemanha. Em especial ao Dr. Lucian Blaga pelo auxílio no desenvolvimento da parte experimental e pelo companheirismo. Ao Dr. Jorge, pela confiança e oportunidade oferecida.

Aos meus Orientadores Prof. Elias Hage Junior e Prof. Leonardo B. Canto, pela paciência e dedicação durante todo o período de elaboração dessa Dissertação.

A todos os professores e funcionários do departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar, pela dedicação e ensinamentos disponibilizados nas aulas, laboratórios, corredores, a cada um que de forma especial contribuiu para a conclusão desse trabalho.

Aos meus amigos e familiares de Piracicaba, pelo carinho e pela compreensão nos momentos em que a dedicação aos estudos foi exclusiva, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para que esse trabalho fosse concretizado, meus agradecimentos.

A CAPES e à FAPESP pelo auxílio financeiro para a realização desse trabalho.

RESUMO

Nesta dissertação de mestrado foi realizado um estudo da viabilidade de fabricação de juntas híbridas de Policarbonato (PC) e Alumínio 2024-T351 através do processo de rebiteamento por fricção (“Friction Riveting”). Técnicas de planejamento de experimentos aliadas à modelagem por redes neurais foram utilizadas na investigação da influência dos parâmetros de processo, nas propriedades mecânicas e microestruturais das juntas. As juntas foram produzidas no Instituto de Pesquisa Helmholtz Zentrum Geesthacht (HZG), na Alemanha, durante o período de estágio da proponente. A temperatura dos materiais durante o processamento foi medida utilizando-se uma câmera de infravermelho. As propriedades mecânicas das juntas foram determinadas por meio de ensaios de tração. As características macro e microestruturais foram avaliadas por meio de microscopia ótica e ensaios de microdureza Vickers. Os mecanismos de fratura foram investigados por análises em microscópio ótico e de varredura (MEV). O nível de degradação do PC na região da solda foi investigado por viscosimetria e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). As temperaturas médias atingidas na área friccionada estiveram entre 56% a 72% do intervalo de ponto de fusão da liga AA 2024. Foram produzidas juntas com alta eficiência de ancoramento do rebite metálico, com limites de resistência à tração de aproximadamente 90% da resistência mecânica do rebite, e falha dúctil não catastrófica, ocorrendo no rebite na região externa à placa de PC. As análises de viscosimetria e FTIR demonstraram a ausência de degradação térmica do PC na área de união. A modelagem estatística e via redes neurais do processo demonstraram boa repetitividade e reprodutibilidade dentro das condições estudadas. Tais resultados permitiram demonstrar a viabilidade de produzir juntas de qualidade, com rebites de 2024-T351 e placas de PC, utilizando o processo de Rebiteamento por Fricção.

FricRiveting of AA 2024-T351 into Polycarbonate

ABSTRACT

This dissertation addressed the feasibility study of Friction Riveting technique on polycarbonate and 2024-T351 aluminum alloy spot joints. Design of experiments and Artificial Neural Network modelling were used to investigate the influence of process parameters on mechanical and microstructural properties of joints. These joints were produced at the Institute for Research Helmholtz Zentrum Geesthacht (HZG), in Germany, during the undergraduate years of the applicant. Process temperature was measured using an infrared camera. The mechanical properties of the joints were determined by tensile testing. The macro and microstructural characterization were carried out by light optical microscopy (LOM) and Vickers microhardness tests. The fracture mechanisms were investigated by optical and scanning electron microscopy (SEM). The level of PC degradation in the joining area was obtained by viscometry and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The average peak temperatures measured during joining varied between 52% and 72% of the melting point interval of AA 2024 aluminium alloy. Strong joints with high anchoring efficiency were achieved, with ultimate tensile strength of approximately 90% of metallic rivet, and non-catastrophic ductile fracture at the metallic rivet outside the joined area. This is desirable failure type in riveted polymeric structures and an indication of high-strength joints. The viscometry and FTIR analysis showed the absence of thermal degradation of the PC in the riveted joint. Statistical and Artificial Neural Networks modeling process showed good repeatability and reproducibility within the conditions studied. These results demonstrated the feasibility of producing spot joints of rivets 2024-T351 and PC by using the FricRiveting process.

PUBLICAÇÕES

C. F. Rodrigues, S. T. Amancio-Filho, J. F. dos Santos, L. B. Canto, E. Hage Jr. Processo de rebitagem por fricção de juntas híbridas de policarbonato e alumínio 2024-T351. Anais do Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais, CBECIMAT 2012. Joinville (BR), 04-08.11.2012. Anais do Congresso p. 10819-10826, 2012.

C.F. Rodrigues, L.A. Blaga, J.F. dos Santos, L.B. Canto, E. Hage Jr., S.T. Amancio-Filho. FricRiveting of aluminum 2024-T351 and polycarbonate: Temperature evolution, microstructure and mechanical performance. Journal of Materials Processing Technology, v. 214, p. 2029-2039, 2014.

SUMÁRIO

BANCA EXAMINADORA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vii
PUBLICAÇÕES.....	ix
SUMÁRIO.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE TABELAS.....	xxi
ÍNDICE DE ABREVIACÕES.....	xxiii
ÍNDICE DE SÍMBOLOS.....	xxv
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Policarbonato (PC).....	5
2.2 Liga de alumínio 2024-T351.....	8
2.3 Rebitagem por fricção (<i>friction riveting</i>).....	10
2.3.1 Parâmetros e variáveis de processo.....	13
2.3.2 Fases do processo.....	15
2.3.3 Zonas microestruturais das juntas.....	16
2.3.4 Tipos de fraturas de juntas produzidas por rebitagem por fricção.....	19
2.3.5 Estudos recentes de juntas produzidas por rebitagem por fricção.....	20
2.4 Projeto de experimentos (PdE).....	23
2.4.1 Planejamento fatorial 2^k	24
2.5 Modelagem via redes neurais artificiais – RNAs.....	26
2.5.1 Características de uma RNA.....	26
2.5.2 Aplicações das RNAs na área de soldagem.....	29
2.5.3 Modelagem de uma RNA.....	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1 Materiais.....	33
3.2 Métodos experimentais.....	34
3.2.1 Procedimento de produção das juntas PC/AA 2024-T351.....	39

3.2.2 Monitoramento da temperatura na área de união das juntas	41
3.2.3 Medidas de razão de aspecto de ancoramento (RA)	43
3.2.4 Caracterização microestrutural das juntas.....	44
3.2.5 Ensaio de microdureza Vickers	45
3.2.6 Análise da degradação PC: viscosimetria de solução diluída e FT-IR	45
3.2.7 Ensaio de tração	47
3.2.8 Análises de falhas	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1 Definição do intervalo de união via rebitagem por fricção.....	49
4.2 Análise da influência dos parâmetros de processo sobre as características gerais das juntas.....	53
4.2.1 Temperatura do processo.....	53
4.2.2 Razão de aspecto de ancoramento (RA).....	61
4.2.3 Caracterização microestrutural.....	66
4.2.4 Avaliação das propriedades mecânicas locais por microdureza Vickers.....	67
4.2.5 Análise da massa molar do PC por viscosimetria em solução diluída.....	69
4.2.6 Análise espectroscópica do PC por FTIR	71
4.2.7 Resistência mecânica das juntas	74
4.2.8 Análise de falha e superfície de fratura	81
4.3 Otimização do processo de rebitagem por fricção de PC/AA 2024-T351 via Planejamento de experimentos.....	86
4.3.1 Redes neurais artificiais (RNAs).....	91
5 CONCLUSÕES.....	97
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
APÊNDICE A - MONITORAMENTO DA TEMPERATURA.....	113
APÊNDICE B - CÁLCULO DA RAZÃO DE ASPECTO DE ANCORAMENTO (AR) E RAZÃO VOLUMÉTRICA (VR).....	117
APÊNDICE C - ENSAIO DE TRAÇÃO.....	123
APÊNDICE D - MODELAGEM ESTATÍSTICA E REDES NEURAS.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Carro conceito Qarma Q da Hyundai ilustrando aplicações do PC nas janelas laterais (A) e no teto solar (B) [5].	1
Figura 1.2: Exemplos de aplicações potenciais da rebiteagem por fricção na indústria automobilística. À esquerda o exemplo de união de policarbonato e polipropileno com rebite de alumínio para aplicação no farol. À direita o exemplo de união de policarbonato e liga de alumínio com rebite de alumínio. [11].	3
Figura 2.1: Estrutura molecular do PC derivado do Bisfenol A.	5
Figura 2.2: Algumas das reações que ocorrem como resultado da degradação térmica do policarbonato. (A) cisão de cadeia dos grupos isopropilideno e carbonatos. (B) cisão de cadeia dos grupos carbonato por hidrólise e alcoólise. (C) reações de rearranjo dos grupos carbonato. Adaptado [18].	7
Figura 2.3: Esquema de três possíveis configurações das juntas fabricadas por Rebiteagem por Fricção. (A) Junta polímero-rebite metálico. (B) União de dois polímeros com auxílio do rebite metálico. (C) Junta do tipo sanduíche metal-polímero-metal unida pelo rebite metálico [31].	11
Figura 2.4: Esquema de fabricação de juntas Polímero/Metal a partir da rebiteagem por fricção. (A) Posicionamento dos componentes a serem unidos. (B) Penetração do rebite no polímero. (C) Diminuição da velocidade de rotação e forjamento da ponta plastificada do rebite. (D e E) Consolidação da junta após resfriamento dos materiais plastificados.	12
Figura 2.5: Gráfico das variáveis e parâmetros do processo de Rebiteagem por Fricção [31].	15
Figura 2.6: Etapas da rebiteagem por fricção em função do tempo de união exemplificadas pelas curvas do deslocamento axial e do torque do rebite [12].	16
Figura 2.7: Esquema das zonas microestruturais de juntas fabricadas por rebiteagem por fricção. PZAC: zona do polímero afetada pelo calor. PZTMA: zona do polímero termomecanicamente afetada. MZAC: zona do metal afetada pelo calor. MZTMA: zona do metal termomecanicamente afetada [10].	17

Figura 2.8: Cinco tipos de fratura que podem ocorrer durante o ensaio de tração em juntas fabricadas por rebiteagem por fricção. As linhas vermelhas indicam a propagação das trincas ao final da fratura. Adaptado de [37].	19
Figura 2.9: Características geométricas da secção transversal de juntas de PEI/AA2024-T351. A figura mostra a zona de ancoramento do rebite ranhurado no interior da placa polimérica. O corte vertical representa a profundidade de penetração do rebite, P, e o corte horizontal a largura, L, de deformação da ponta do rebite, ambos os valores são utilizados no cálculo da razão de aspecto de ancoramento do rebite ($RA = L/P$) [31,38]. Adaptado [31]	21
Figura 2.10: Geometria simplificada de uma junta rebitada por fricção usada para calcular a razão volumétrica de acordo com a Equação 2.1: V_{rebite} = volume do rebite metálico ancorado na placa polimérica, $V_{\text{inserção}}$ = volume nominal de polímero deslocado e $V_{\text{Int. Polímero}}$ = volume de interação polimérico na zona de ancoramento [37].	22
Figura 2.11: Componentes básicos de um neurônio biológico. Adaptado [54].	27
Figura 2.12: (A) Modelo típico de um neurônio artificial. (B) Estrutura padrão de uma RNA multicamada [54].	28
Figura 2.13: Mudança no MSE do conjunto de treinamento e teste com o tempo de treinamento. Adaptado de [69].	32
Figura 3.1: Geometrias dos materiais utilizados na fabricação das juntas. (A) Placa de PC. (B) Rebite de alumínio 2024-T351.	33
Figura 3.2: (A) Mapa de microdureza Vickers e (B) microestrutura da secção longitudinal do rebite de AA 2024-T351.	34
Figura 3.3: Esquema da arquitetura 3-3-1 de RNA treinada neste estudo para prever as principais características das juntas PC/AA 2024-T351.	38
Figura 3.4: Fluxograma resumindo as principais etapas deste estudo.	39
Figura 3.5: Esquema geral do equipamento de rebiteagem por fricção RSM 400 Harms & Wende, Alemanha.	41
Figura 3.6: (A) Esquema de medição de temperatura por infravermelho na área de fricção (B) Fotografia de junta, com seu rebite e sua placa de PC pintados	

com tinta preta, juntamente com a imagem das temperaturas registradas no volume de polímero amolecido e expelido como rebarba.	42
Figura 3.7: Seção transversal da região de ancoramento do rebite e a razão de aspecto RA definida como sendo a razão entre a profundidade de penetração (P) e a largura (L) da ponta do rebite no interior do polímero.	44
Figura 3.8: (A) Configuração do tipo <i>T-pull</i> do corpo de prova PC/AA 2024-T351. (B) Representação esquemática do suporte de fixação da placa polimérica utilizado no ensaio de tração.	48
Figura 4.1: Comportamento da largura (L), profundidade (P) e razão de aspecto de ancoramento do rebite (RA) na matriz de PC de juntas fabricadas em um intervalo de velocidade de rotação variando entre 18000 e 21000 rpm, mantendo-se fixos o tempo de união em 4 s e a pressão de união em 0,90 MPa.	50
Figura 4.2: Comportamento da largura (L), profundidade (P) e razão de aspecto de ancoramento do rebite (RA) na matriz de PC de juntas fabricadas em um intervalo de velocidade de rotação variando entre 19000-21000 rpm, mantendo-se fixos o tempo de união em 3 s e a pressão de união em 1,05 MPa.	51
Figura 4.3: Comportamento da largura (L), profundidade (P) e razão de aspecto de ancoramento do rebite (RA) na matriz de PC de juntas fabricadas em um intervalo de pressão de união variando entre 1,00 e 1,15 MPa, mantendo-se fixos o tempo de união em 3 s e a velocidade de rotação em 21000 rpm.	52
Figura 4.4: Macrografias com os valores de L e P para as juntas PC/AA 2024-T351 que apresentaram altos valores de RA. Amostra 1: 21000 rpm; 3 s; 1,10 MPa. Amostra 2: 21000 rpm; 3 s; 1,05 MPa. Amostra 3: 19000 rpm; 3 s; 1,10 MPa.	53
Figura 4.5: (A) Exemplo da curva média de temperatura indicando a temperatura máxima obtida para uma junta produzida com VR = 21000 rpm, TU = 3 s e PU = 0,75 MPa e (B) as temperaturas máximas médias obtidas para as juntas PC/AA 2024-T351 analisadas no estudo do planejamento experimental 2 ³ (Tabela 3.4).	54
Figura 4.6: Efeito principal de cada parâmetro de processo na temperatura máxima na área de união das juntas PC/AA 2024-T351.	55

Figura 4.7: Variação percentual da temperatura em função da variação dos parâmetros de rebiteamento por fricção.....	56
Figura 4.8: Gráficos da interação entre dois dos parâmetros de união para a resposta temperatura máxima média.	58
Figura 4.9: Contribuição percentual (P%) de cada parâmetro sobre a temperatura máxima média atingida na área de união dentro do PdE estudado.	60
Figura 4.10: Razão de aspecto média (RA) do rebite nas juntas fabricadas a partir das oito condições de processamento definidas no PdE.	61
Figura 4.11: Efeito principal de cada parâmetro de processo na razão de aspecto de ancoramento (RA) das juntas de PC/AA 2024-T351.....	62
Figura 4.12: Gráficos de interação entre dois dos parâmetros de processo sobre a razão de aspecto de ancoramento (RA).	63
Figura 4.13: Valores de torque friccional (T_z) durante a confecção das juntas com nível alto de pressão de união. (A) T_{z-III} torque friccional na F-III (fase dissipação viscosa em estado estacionário) (B) T_{z-IV} torque friccional na F-IV (forjamento da ponta do rebite).	64
Figura 4.14: Contribuição percentual (P%) de cada parâmetro sobre a razão de aspecto de ancoramento (RA).	66
Figura 4.15: Características microestruturais da ponta do rebite de uma junta pontual de PC/AA 2024-T351 rebiteada por fricção (20000 rpm, 3 s e 0,95 MPa). (A) zona termicamente afetada do metal, MZAC. (B) zona termomecanicamente afetada do metal MZTMA – grãos realinhados na direção no qual o metal plastificado foi deformado no interior do PC. (C) região da MZTMA em que ocorreu a recristalização dinâmica.....	67
Figura 4.16: (A) Mapa de distribuição de microdureza Vickers do rebite de AA 2024-T355 deformado na junta. (B) Esquema do local em que foram realizadas as medidas de microdureza (pontos brancos) na placa polimérica. (C) Valores de microdureza obtidos no material polimérico localizado na região adjacente à região de ancoramento do rebite junto aos valores de microdureza do PC (material de base).....	68

Figura 4.17: Gráficos de η_{red} versus c para determinação da viscosidade intrínseca $[\eta]$ pelo método de Huggins, para as soluções do (A) PC virgem e do PC retirado da área friccionada das juntas que atingiram temperaturas de (B) 310°C, (C) 330°C (D) 360°C e (E) 390°C.	70
Figura 4.18: Espectros de infravermelho do PC virgem e de amostras de PC retiradas da área de união das juntas que atingiram temperaturas de 360 °C e 390 °C.	72
Figura 4.19: Efeito principal de cada parâmetro de processo na resistência à tração das juntas de PC/AA 2024 T351.	76
Figura 4.20: Gráficos de interação entre parâmetros de processo dois a dois para a resposta de resistência à tração das juntas.	77
Figura 4.21: Contribuição percentual (P%) de cada parâmetro sobre a resistência à tração.	79
Figura 4.22: Relação entre os valores de resistência à tração e os valores da razão de aspecto (RA) das juntas de PC/AA 2024-T351.	80
Figura 4.24: Relação entre a resistência à tração e a razão volumétrica (RV) para as juntas de PC/ AA 2024-T351.	81
Figura 4.25: Fratura do Tipo III observada nas juntas das condições 5 e 7 que apresentaram os menores valores médios de resistência a tração (A) Placa de PC fraturada (B) rebite totalmente removido do interior da placa de PC (C, D e E) Detalhes da superfície interna fraturada da placa de PC por falha por cisalhamento.	83
Figura 4.26: Fratura do Tipo-I observada nas juntas da condição 6 que apresentaram maiores valores médios de resistência à tração. (A) Rebite e placa de PC fraturados após o ensaio de tração. (B) Secção transversal da junta com a parte do rebite que permaneceu presa no interior da placa de PC. (C e D) Detalhes da fratura do tipo “taça/cone” na região do rebite localizada na região externa da placa de PC.	85
Figura 4.27: Validação do modelo reduzido para temperatura máxima (T) na área de união das juntas.	88
Figura 4.28: Validação do modelo completo para razão de aspecto de ancoramento (RA).	89

Figura 4.29: Validação do modelo reduzido para resistência à tração (RT)	91
Figura 4.30: Valores previstos e valores experimentais da RNA ₃₋₃₋₁ para a resistência à tração (RT).	92
Figura 4.31: Valores previstos versus valores experimentais da RNA ₅₋₃₋₁ para a resistência à tração (RT).	93
Figura 4.32: Valores previstos pela RNA ₅₋₃₋₁ versus valores experimentais da temperatura máxima (T) na área de união.	94
Figura 4.33: Valores previstos pela RNA ₅₋₃₋₁ e valores experimentais da razão volumétrica (VR).	95
Figura A.1: Temperatura Cond 1.	113
Figura A.2: Temperatura Cond 2.	113
Figura A.3: Temperatura Cond 3.	113
Figura A.4: Temperatura Cond.4.	113
Figura A.5: Temperatura Cond.5.	114
Figura A.6: Temperatura Cond.6.	114
Figura A.7: Temperatura Cond.7.	114
Figura A.8: Temperatura Cond. 8.	114
Figura A.9: Temperatura Cond. 21000 rpm, 3 s e 0,95 MPa.	115
Figura A.10: Temperatura Cond. 19500 rpm, 4 s e 0,95 MPa.	115
Figura A.11: Temperatura Cond. 19500 rpm, 4 s e 1,10 MPa.	115
Figura A.12: Temperatura Cond. 20200 rpm, 3,6 s e 1,0 MPa.	115
Figura A.13: Temperatura Cond. 19500 rpm, 3,6 s e 0,95 MPa.	116
Figura B.1: Seção transversal das condições 1, 2, 3 e 4 usadas na construção do modelo estatístico da razão de aspecto de ancoramento (RA).	119
Figura B.2: Seção transversal das condições 5, 6, 7 e 8 usadas na construção do modelo estatístico da razão de aspecto de ancoramento (RA).	120
Figura B.3: Seção transversal das condições utilizadas na validação do modelo estatísticos da razão de aspecto de ancoramento (RA).	121
Figura C.1: Gráfico força-alongamento Cond. 1.	123
Figura C.2: Gráfico força-alongamento Cond. 2.	123
Figura C.3: Gráfico força-alongamento.	123
Figura C.4: Gráfico força-alongamento Cond. 4.	123

Figura C.5: Gráfico força alongamento Cond. 5.....	124
Figura C.6: Gráfico força-alongamento Cond. 6.....	124
Figura C.7: Gráfico força-alongamento Cond. 7.....	124
Figura C.8: Gráfico força-alongamento Cond. 8.....	124
Figura C.9: Gráfico força-alongamento Cond.19500 rpm, 4 s e 1,10 MPa	125
Figura C.10: Gráfico força-alongamento Cond. 19500 rpm, 3,6 s e 1,10 MPa	125
Figura C.11: Gráfico força-alongamento Cond. 19500 rpm, 2,5 s e 0,80 MPa	125
Figura C.12: Gráfico força-alongamento Cond. 19500 rpm, 2,5 s e 1,10 MPa	125
Figura C.13: Gráfico força-alongamento Rebite AA 2024-T351.....	126
Figura D.1: MSE da RNA ₃₋₃₋₁ de resistência à tração (RT) treinada pelo método de aprendizagem supervisionada, utilizando o algoritmo de treinamento Levenberg-Marquardt.....	138
Figura D.2: MSE da RNA ₅₋₃₋₁ de resistência à tração (RT) treinada pelo método de aprendizagem supervisionada, utilizando o algoritmo de treinamento Levenberg-Marquardt.....	138
Figura D.3: MSE da RNA ₅₋₃₋₁ temperatura máxima (T) na área de união treinada pelo método de aprendizagem supervisionada, utilizando o algoritmo de treinamento Levenberg-Marquardt.....	139
Figura D.4: MSE da RNA ₅₋₃₋₁ da razão volumétrica (VR) treinada pelo método de aprendizagem supervisionada, utilizando o algoritmo de treinamento Levenberg-Marquardt.....	139
Figura D.5: Valores de R^2 (coeficiente de determinação) das interpolações dos dados experimentais e preditos pela RNA ₃₋₃₋₁ e RNA ₃₋₃₋₁ para a resistência à tração.....	140
Figura D.6: Valores de R^2 (coeficiente de determinação) das interpolações dos dados experimentais e preditos pelas RNAs ₃₋₃₋₁ para a temperatura na área de união e razão volumétrica (RV).....	140

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Composição química nominal da liga de AA 2024 [23].	9
Tabela 2.2: Experimento fatorial completo de três fatores - caso geral [42]. ...	24
Tabela 3.1: Composição química nominal da liga de alumínio 2024-T351.	34
Tabela 3.2: Intervalo de parâmetros de processo utilizado como referência na confecção das primeiras juntas do sistema PC/AA 2024-T351.....	35
Tabela 3.3: Níveis dos parâmetros utilizados no planejamento de experimento fatorial completo 2^3 para a fabricação das juntas PC/AA 2024-T351.....	36
Tabela 3.4: Oito combinações de parâmetros geradas do PdE fatorial completo 2^3 para a fabricação das juntas PC/AA2024-T351	37
Tabela 3.5: Definições das viscosidades usadas na Equação 3.1	46
Tabela 4.1: ANOVA para avaliação da influência dos parâmetros de rebiteagem por fricção sobre a temperatura máxima da junta.	60
Tabela 4.2: ANOVA para avaliação da influência dos parâmetros de processo sobre a razão de aspecto de ancoramento (RA).....	65
Tabela 4.3: Viscosidade intrínseca e massa molar viscosimétrica média do PC virgem e de amostras de PC retiradas da área friccionada das juntas que atingiram temperaturas de 310 até 390°C.....	71
Tabela 4.4: Absorbâncias das bandas relativas estiramento da ligação C=O do grupo carbonato (1775 cm^{-1}) e a deformação angular fora do plano da ligação C-H do anel aromático (1506 cm^{-1}) e a razão destas absorbâncias para amostras do PC virgem e de amostras de PC retiradas da área de união das juntas que atingiram temperaturas de 360 °C e 390 °C.....	73
Tabela 4.5: Médias e desvios padrão dos valores médios de limite de resistência à tração e alongamento das juntas fabricadas nas diferentes combinações de parâmetros de processo e desempenho mecânico das mesmas, relativo ao valor médio de limite de resistência à tração do rebite metálico AA 2024-T351.....	75
Tabela 4.6: ANOVA para avaliação da influência dos parâmetros de soldagem na resistência à tração.	78

Tabela 4.7: Modelos de regressões obtidos para as respostas temperatura máxima de processo (T), razão de aspecto de ancoramento (RA) e resistência à tração (RT). A é a velocidade de rotação (VR), B é o tempo de união (TU) e C é a pressão de união (PU).....	87
Tabela B.1: Valores usados para o cálculo de AR e VR (Diâmetro inicial do rebite igual a 5 mm).....	118
Tabela B.2: Valores de RA usados na validação do modelo estatístico da razão de aspecto de ancoramento (RA).....	121
Tabela D.1: Condições de Soldagem selecionada para a validação do modelo estatístico de Temperatura máxima de processo (T)	128
Tabela D.2: Condições de Soldagem selecionada para a validação do modelo estatístico da razão de aspecto de ancoramento (RA).....	130
Tabela D.3: Condições de Soldagem selecionada para a validação do modelo estatístico de resistência à tração (RT)	132
Tabela D.4: Valores de resistência (RT) à tração usados no treinamento da RNA de topologia 3-3-1.	135
Tabela D.5: Valores de resistência à tração (RT) usados no teste da RNA de topologia 3-3-1.....	135
Tabela D.6: Valores de temperatura máxima (T) na área de união usada no treinamento da RNA de topologia 5-3-1.	136
Tabela D.7: Valores de temperatura máxima (T) na área de união usados no teste da RNA de topologia 5-3-1.	136
Tabela D.8: Valores de razão volumétrica (RV) usados no treinamento da RNA de topologia 5-3-1.....	137
Tabela D.9: Valores de razão volumétrica (RV) usados no teste da RNA de topologia 5-3-1.....	137

ÍNDICE DE ABREVIações

ANOVA	Análise de Variância
AR	Razão de Aspecto de Ancoramento
BD	Bandas de Deformação
CFC	Cúbico de Face Centrada
DOE	<i>Design of Experiments</i>
DTA	Análise Térmica Diferencial
EBP	Algoritmo de Retropropagação do Erro
EDE	Energia de Defeito de Empilhamento
EQM	Erro Quadrático médio
EQM _T	Erro Quadrático médio dos dados de teste
FT-IR	Espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier
G.L	Grau de Liberdade
GP	Guinier-Preston
HZG	Helmholtz Zentrum Geesthacht
L	Largura de deformação da ponta do rebite
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MPL	Redes do tipo Perceptron Multicamadas
MO	Microscopia ótica
MQ	Média Quadrática
MQ _E	Média quadrática do erro
MTMAZ	Zona do Metal Termomecanicamente Afetada
MZAC	Zona do Metal Afetada pelo Calor'
OFAT	Um Fator por Vez
p-valor	p-valor
P	Profundidade de inserção da ponta do rebite
PC	Polycarbonato
PdE	Planejamento de Experimentos
PEI	Polieterimida
PU	Pressão de União
PZAC	Zona do Polímero Afetada pelo Calor

PZTMA	Zona do Polímero Termomecanicamente Afetada
RNAs	Redes Neurais Artificiais
RP	Razão de Penetração
RT	Resistência à tração
SQ	Soma Quadrática
T	Temperatura Média de Processo
TA	Tempo de Aquecimento
TU	Tempo de União
UV	Ultravioleta
RV	Razão Volumétrica
VR	Velocidade de Rotação
ZA	Zona da Ancoramento

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

HV	Microdureza Vickers
\overline{M}_v	Massa molar viscosimétrica média
R^2	Coefficiente de aproximação de uma regressão
T_z	Torque Friccional
η	Viscosidade Intrínseca
η_r	Viscosidade Relativa
η_{sp}	Viscosidade Específica
η_{red}	Viscosidade Reduzida
T_{peak}	Temperatura de pico
T_g	Temperatura de Transição Vítreia do Polímero
T_m	Temperatura de Amolecimento do Polímero

1 INTRODUÇÃO

Termoplásticos têm sido amplamente utilizados na indústria automobilística na substituição de metais e vidros, devido, principalmente, à baixa densidade. Isso permite a fabricação de componentes automotivos mais leves, diminuindo o consumo de combustível e a emissão de gases poluentes.

A proporção de termoplásticos em aplicações automotivas deverá crescer dos atuais 15% para mais de 25% até 2020, segundo especialistas da empresa alemã Bayer [1]. O Policarbonato (PC) é um dos termoplásticos que apresenta considerável destaque no setor [2]. Este tem sido usado na substituição do vidro em diversos componentes automotivos [3] como janelas, pára-brisas, tetos-solares e faróis. Dentre os projetos mais ambiciosos já realizados com PC destacam-se dois deles. A montadora francesa Renault utilizou chapas de PC de alta qualidade ótica para substituir o vidro nas janelas laterais e traseiras na edição limitada do Mégane Sport R26 R, com o objetivo de reduzir o peso geral do carro e obter melhor desempenho do motor [4]. A montadora coreana Hyundai aplicou o PC nas janelas laterais e no teto solar no carro-conceito Hyundai Qarma Q (Figura 1.1), o que garantiu aos passageiros proteção contra raios ultravioleta (UV), além de alta resistência ao impacto e transparência aos componentes do veículo [5].

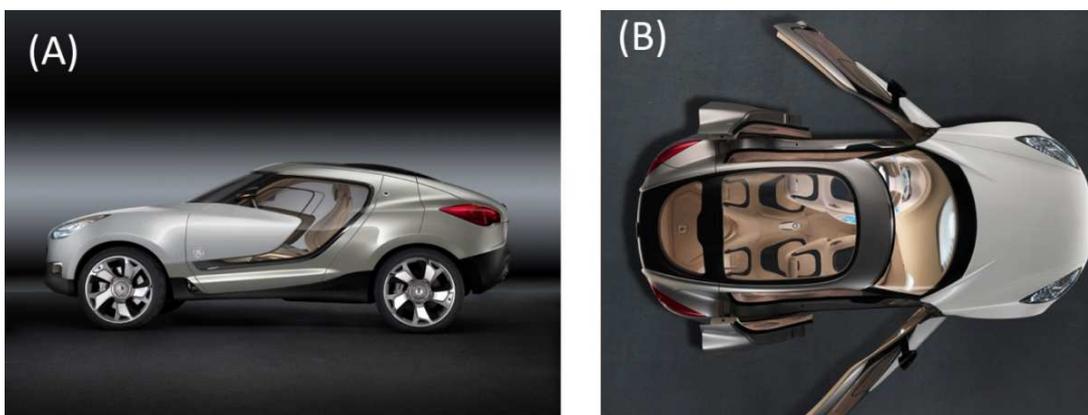


Figura 1.1: Carro conceito Qarma Q da Hyundai ilustrando aplicações do PC nas janelas laterais (A) e no teto solar (B) [5].

O crescimento do uso de componentes automotivos fabricados a partir de polímeros termoplásticos como o PC tem demandado o desenvolvimento de novas abordagens no campo da união e soldagem. As técnicas tradicionais como colagem por adesivos, fixação mecânica, soldagem a laser, por ultrassom e resistência elétrica, bem como, métodos híbridos de união (combinação de um ou mais processos diferentes) apresentam limitações. A colagem por adesivos acarreta longos tempos de processamento, além de conseqüências ao meio ambiente devido ao descarte de substâncias nocivas. A fixação mecânica tradicional (por exemplo, rebites e parafusos que requerem perfuração completa das peças) resulta em propriedades mecânicas limitadas devido às altas concentrações de tensão relativas ao furo transpassante [6,7]. A soldagem a laser apresenta elevados custos operacionais relativos aos procedimentos de pré e pós-união [8]. Sendo assim, o desenvolvimento e o estudo de novos métodos de união são um tema relevante na área de engenharia de materiais.

Nesse contexto, nota-se que a rebitagem por fricção (do Inglês 'Friction Riveting') possui grande potencial de aplicação na indústria automobilística. A técnica foi desenvolvida e patenteada em 2007 pelo Instituto *Helmholtz Zentrum Geesthacht* (HZG) [9], localizado na Alemanha. Essa técnica permite a união de estruturas híbridas polímero-polímero e metal-polímero do tipo inserto metálico e sobrepostas. O seu método é baseado nos princípios de interação (ou ancoramento) mecânica somados aos de soldagem por fricção rotacional, em que um rebite cilíndrico metálico é utilizado para unir partes termoplásticas e/ou metálicas, através do calor friccional, de maneira rápida, simples e eficiente, resultando em juntas com excelentes propriedades mecânicas [10]. A Figura 1.2 apresenta alguns exemplos de potenciais aplicações da rebitagem por fricção em componentes automotivos.



fonte: www.edwinconan.wordpress.com/tag/car-of-the-future

Figura 1.2: Exemplos de aplicações potenciais da rebiteagem por fricção na indústria automobilística. À esquerda o exemplo de união de polycarbonato e polipropileno com rebite de alumínio para aplicação no farol. À direita o exemplo de união de polycarbonato e liga de alumínio com rebite de alumínio. [11].

Apesar de todas as vantagens apresentadas pela rebiteagem por fricção como ciclos de soldagem curtos, baixo consumo de energia, união independente da posição, maquinário simples e barato [12] a técnica ainda necessita de estudos científicos aprofundados para aplicação em escala industrial. Dessa maneira, esta dissertação visa contribuir para o incremento do nível de conhecimento desse processo e, particularmente, para o desenvolvimento de juntas híbridas de Polycarbonato/Alumínio com potencial de aplicação no setor automobilístico.

O objetivo principal dessa pesquisa foi avaliar a viabilidade técnica de fabricação de juntas híbridas de Polycarbonato (PC) e AA 2024-T351 através do processo de rebiteagem por fricção (*“Friction Riveting”*). O estudo envolveu análises da influência dos parâmetros do processo de rebiteagem por fricção - velocidade de rotação, tempo união e pressão de união sobre a razão de aspecto de ancoramento do rebite (estimativa da qualidade de fixação do rebite metálico deformado e ancorado no polímero), a macro e microestrutura do PC

e da liga de alumínio na região de união. Tais características estruturais foram correlacionadas com a temperatura máxima de processo na área de união, bem como a resistência à tração das juntas. Foram utilizadas ferramentas de modelagem estatística (OFAT e PdE) e computacional (via redes neurais). Os resultados obtidos permitiram demonstrar a viabilidade de produzir juntas de qualidade, com rebites de 2024-T351 e placas PC, utilizando o processo de Rebitagem por Fricção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Policarbonato (PC)

O policarbonato (PC) derivado do Bisfenol A é obtido pela reação de policondensação interfacial (fosgenação direta) entre o Bisfenol A (4,4'-dihidroxi 2-2'-definil propano) e o fosgênio. No processo de polimerização interfacial, o Bisfenol-A, dissolvido em meio alcalino, reage com o fosgênio na presença de um solvente inerte, produzindo PC de alta massa molar [13]. A estrutura molecular do PC é apresentada na Figura 2.1.

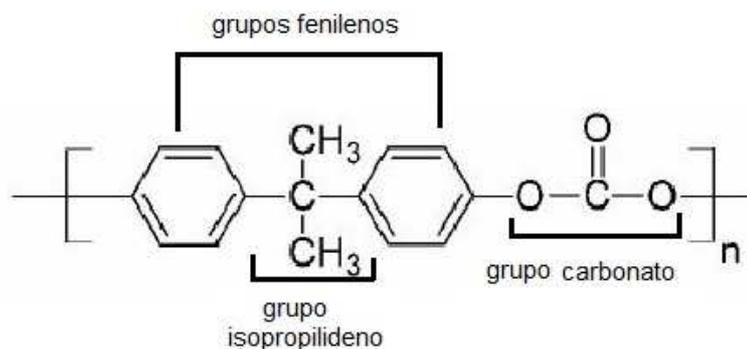


Figura 2.1: Estrutura molecular do PC derivado do Bisfenol A.

O policarbonato (PC) é um termoplástico que apresenta excelentes combinações de propriedades físicas e químicas, as quais são associadas à sua estrutura molecular que combina grupos fenílicos rígidos e grupos carbonato e isopropilideno flexíveis. Os grupos fenílicos são responsáveis pela alta rigidez da molécula que faz com que o mesmo apresente baixa cristalinidade, com alta transparência e estabilidade dimensional. Já os grupos carbonato e isopropilideno permitem uma maior mobilidade à cadeia quando tensionada, conferindo ao PC elevada tenacidade e resistência ao impacto [14].

Atualmente, cinco empresas são detentoras da tecnologia de síntese do PC: Bayer (Makrolon®) na Alemanha, Sabic (Lexan®) nos EUA, Teijin Chemicals (Panlite®), Mitsubishi Engineering (Jupilon®) no Japão e Unigel (Durolon®) no Brasil.

Dentre as principais características do PC destacam-se as excelentes propriedades óticas (alta transparência), mecânicas (elevada resistência à tração e ao impacto em baixas temperaturas, e boa resistência à fluência) e elétricas (isolamento elétrico a baixas frequências e temperaturas de serviço) [14]. O PC possui também notável moldabilidade, capacidade de extrusão, estabilidade dimensional em ambiente úmido, baixa flamabilidade e boa estabilidade térmica na ausência de água e oxigênio, podendo ser submetido, por curtos intervalos de tempo a temperaturas entre 330°C e 350°C, resultando em percentual mínimo de degradação [15]. O PC devidamente estabilizado exibe boa resistência aos efeitos das intempéries, tais como: variações severas de temperatura e erosão sob chuva.

Devido a essas características o PC é um dos termoplásticos de engenharia mais utilizados em diversas aplicações do setor automotivo. Moldados transparentes de PC têm sido usados em substituição aos vidros na fabricação de lentes de faróis dianteiros e lanternas traseiras, lentes para iluminação interna, janelas móveis e fixas, oferecendo redução de peso e maior durabilidade [16]. O PC é também utilizado na forma de blendas e compósitos na fabricação de painéis de instrumentos, calotas, amortecedores, para-choques e capôs, componentes estruturais externos e internos dos veículos, devido à facilidade em ser moldado e as suas excelentes propriedades mecânicas [15].

Estudos de degradação térmica e termo-oxidativa mostraram que a degradação do PC ocorre por reações de cisão de cadeia e por rearranjo das ligações dos grupos carbonato [17]. A Figura 2.2 mostra algumas das reações propostas na literatura. Reações de cisão de cadeia podem ocorrer por quebra de ligações C–C dos grupos isopropilideno ou por quebra dos grupos carbonato com liberação de CO₂ (Figura 2.2A). Reações de cisão de cadeia nos grupos carbonato ocorrem por alcoólise e hidrólise, resultado do ataque de grupos hidroxilas finais de cadeia do PC (Figura 2.2B). Os grupos carbonato podem também sofrer rearranjo por descarboxilação e desidratação, resultando na perda de CO₂ e H₂O, respectivamente (Figura 2.2C).

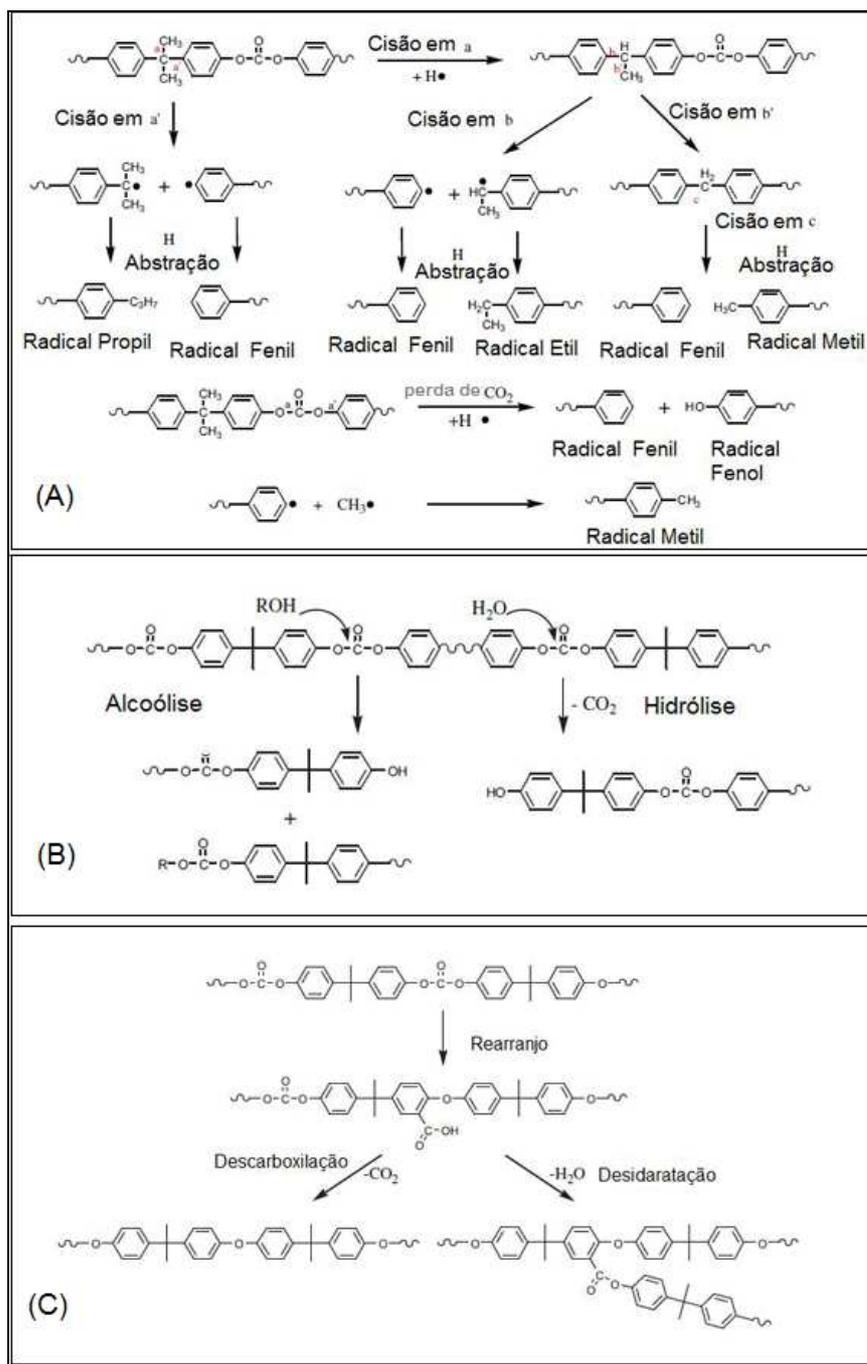


Figura 2.2: Algumas das reações que ocorrem como resultado da degradação térmica do policarbonato. (A) cisão de cadeia dos grupos isopropilideno e carbonatos. (B) cisão de cadeia dos grupos carbonato por hidrólise e alcoólise. (C) reações de rearranjo dos grupos carbonato. Adaptado [18].

Com relação à temperatura de início de degradação do PC, Lee [19] propôs a partir de análises realizadas em um reômetro capilar, que a

degradação térmica do PC inicia-se a 300°C quando a viscosidade começa a diminuir. Lee propôs também, através da análise térmica diferencial (DTA), espectrometria de massa e cromatografia gasosa, que a degradação do PC ocorre segundo três mecanismos diferentes. O primeiro mecanismo ocorre entre 300°C e 320°C quando o grupo isopropilideno é atacado pelo oxigênio formando radicais livres. O segundo ocorre entre 340°C e 380°C com a reação de despolimerização que consiste na hidrólise e alcoólise do grupo carbonato, resultando na quebra da cadeia em duas menores e mudança da posição do grupo éster, bem como, na formação de CO₂ e bisfenol A. Em temperaturas maiores (480-600°C) ocorrem reações complexas aleatórias, como descarboxilação, hidrólise, abstração de hidrogênio, reticulação, etc. [20].

2.2 Liga de alumínio 2024-T351

O alumínio 2024 é uma liga ternária Al-Cu-Mg da série 2XXX [21] bastante utilizada na indústria aeronáutica na forma de chapas laminadas, rebites e outros componentes estruturais. Essa liga apresenta excelentes propriedades mecânicas, razoável resistência à corrosão, boas características de usinabilidade e conformabilidade. O termo T351 da liga AA 2024 significa que o tratamento térmico empregado consiste na solubilização da liga a temperatura elevada ($T \sim 500^{\circ}\text{C}$) com resfriamento rápido até a temperatura ambiente. Isso resulta em uma solução supersaturada de Cu em Al, que é submetida ao trabalho mecânico a frio e ao envelhecimento artificial a 190°C até uma condição estável em que as suas tensões residuais sejam eliminadas [22].

Na Tabela 2.1 são apresentados os elementos que compõem a liga AA 2024 e suas composições aproximadas. A liga contém o cobre como principal elemento de liga e o magnésio como um segundo elemento. O cobre colabora no aumento da resistência mecânica por meio da formação de pequenos precipitados finamente dispersos e coerentes com a matriz de alumínio, por processo de envelhecimento controlado [22]. O cobre também precipita sob a forma de intermetálicos maiores que melhoram a resistência à corrosão do

alumínio quando em solução sólida. O magnésio, quando em solução sólida na matriz de alumínio, aumenta a resistência mecânica e melhora o seu trabalho a frio [23].

Tabela 2.1: Composição química nominal da liga de AA 2024 [23].

Elemento de Liga	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Cr	Zn	Ti	Al
Nominal ASM peso(%)	3,8-4,9	1,2-1,8	<0,5	0,5 max	0,3-0,9	0,1 max	0,25 max	0,15 max	rem

A alta resistência mecânica destas ligas é oriunda do mecanismo de precipitação que ocorre durante o tratamento térmico. A influência de fatores como concentração de Cu/Mg, velocidade de resfriamento e tempo de envelhecimento é bastante significativa. Em baixas concentrações de Cu/Mg ocorrem à precipitação das zonas GP (Guinier-Preston, algumas vezes chamadas de GP1), fases metaestáveis Θ'' e Θ' e a fase de equilíbrio termodinâmico Θ (Al_2Cu). Em altas concentrações de Cu/Mg a formação das zonas GP é seguida pela precipitação das fases S' metaestável e S (Al_2CuMg) fase de equilíbrio termodinâmico [24].

A maioria dos processos de soldagem ou união no estado sólido que utilizam ligas de alumínio resulta em alterações microestruturais devido à aplicação de temperaturas elevadas e altas taxas de deformação que conseqüentemente modificam o desempenho mecânico das juntas. Tais alterações dependem das reações ocorridas durante a consolidação e resfriamento das regiões próximas da área de união ou soldagem.

Sabe-se que em metais com estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) semelhante a do alumínio é mais comum a ocorrência de transformações metalúrgicas na forma de recuperação do que na forma de recristalização. Isso ocorre devido a sua alta energia de defeito de empilhamento (EDE) o que facilita o movimento das discordâncias, promovendo a aniquilação das mesmas que possuem sinais opostos, por meio dos mecanismos de deslocamento cruzado (*cross-slip*) e escalagem de discordâncias (*climb*) [25]. Entretanto, nesses metais, ainda assim a

recristalização ocorre devido à presença dos elementos de liga que alteram o equilíbrio da sua rede cristalina e, com isso, provocam o deslocamento e afastamento das discordâncias, diminuindo a EDE e facilitando o mecanismo de recristalização [26]. A recristalização dinâmica também pode ser estimulada pela adição de partículas insolúveis à matriz que promovem o deslocamento das linhas de discordância sem ocasionar mudanças nos valores de EDE e, com isso, desaceleram os mecanismos de recuperação. A combinação de altas temperaturas e taxas de deformação também estimula a recristalização dinâmica [27]. A liga de alumínio 2024 apresenta esse comportamento quando trabalhada a quente sob condições severas de deformação plástica, sendo a recristalização dinâmica o principal mecanismo de refinamento de grãos. Outro mecanismo que pode acontecer ao mesmo tempo e nas mesmas condições que ocorre a recristalização dinâmica é o de bandas de deformação [28]. As bandas de deformação (BD) são regiões vizinhas dentro de um mesmo grão que sofrem rotações distintas. Tais regiões são delimitadas por contornos planares formados por células de discordâncias alongadas [29]. A origem das BD está diretamente relacionada à taxa de deformação, ao tamanho inicial dos grãos, à presença de precipitados finamente dispersos e partículas secundárias na matriz metálica [30].

2.3 Rebitagem por fricção (*friction riveting*)

A rebitagem por fricção é uma nova técnica de união pontual de estruturas metal-metal e metal-polímero, envolvendo ligas metálicas de alumínio, titânio e aço, termoplásticos, compósitos pultrudados e laminados. Possui como base os princípios da interação (ou ancoramento) mecânica e da soldagem por fricção rotacional. Um rebite metálico é utilizado para unir uma ou mais peças poliméricas e/ou metálicas através do calor friccional gerado pela rotação do rebite sobre as peças. Alguns exemplos de possíveis configurações de juntas pontuais produzidas por rebitagem por fricção são apresentados na Figura 2.3, incluindo juntas polímero-rebite metálico, união de dois polímeros

com rebite metálico e junta do tipo sanduíche metal-polímero-metal unida por rebite metálico [31].

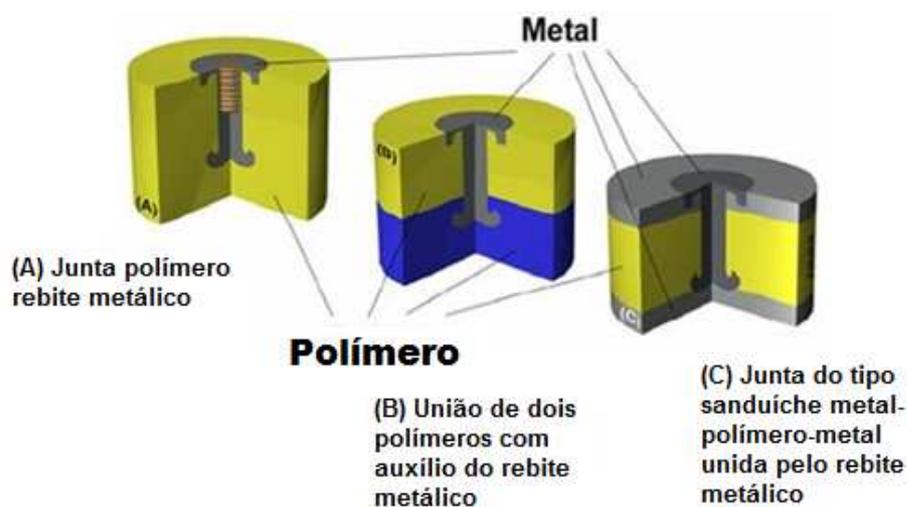


Figura 2.3: Esquema de três possíveis configurações das juntas fabricadas por Rebiteagem por Fricção. (A) Junta polímero-rebite metálico. (B) União de dois polímeros com auxílio do rebite metálico. (C) Junta do tipo sanduíche metal-polímero-metal unida pelo rebite metálico [31].

As etapas do processo de rebiteagem por fricção de uma junta pontual do tipo polímero-metal são ilustradas na Figura 2.4. Inicialmente, um rebite cilíndrico metálico toca a superfície do componente polimérico à pressão axial e velocidade de rotação pré-determinadas (Figura 2.4A). O calor gerado por fricção amolece/funde um determinado volume de polímero em torno da ponta do rebite, o que permite o seu avanço no interior do componente polimérico (Figura 2.4B). Durante essa etapa, parte do volume de polímero amolecido/fundido é expelido como rebarba. Em virtude da baixa condutividade e alto coeficiente de expansão térmica do polímero, o calor gerado pela fricção aquece e plastifica a ponta do rebite a temperaturas entre 60% e 95% de sua temperatura de fusão [31]. Neste instante, a velocidade de rotação do rebite é diminuída e a pressão axial é aumentada de forma controlada, expulsando o restante de polímero amolecido/fundido e levando à deformação (forjamento) da ponta plastificada do rebite (Figura 2.4C) resultando no aumento do seu

diâmetro original. Finalmente, a junta é consolidada sob pressão após o resfriamento dos materiais plastificados (Figura 2.4D).

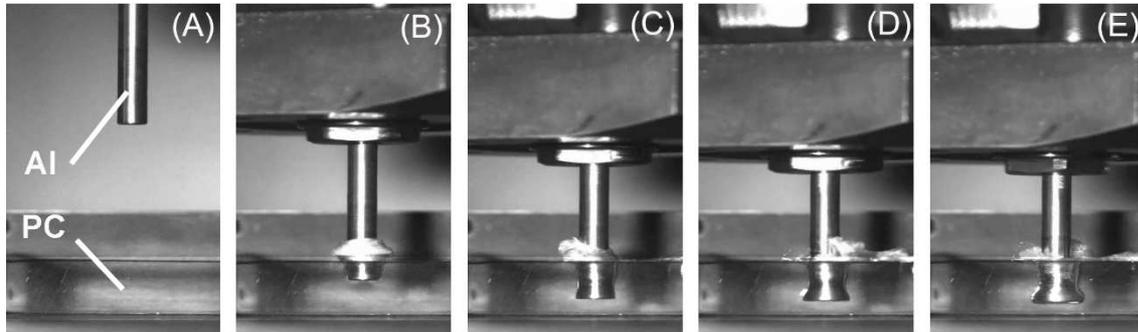


Figura 2.4: Esquema de fabricação de juntas Polímero/Metal a partir da rebiteagem por fricção. (A) Posicionamento dos componentes a serem unidos. (B) Penetração do rebite no polímero. (C) Diminuição da velocidade de rotação e forjamento da ponta plastificada do rebite. (D e E) Consolidação da junta após resfriamento dos materiais plastificados.

O equipamento utilizado na confecção das juntas rebitadas no âmbito deste trabalho consiste em uma máquina comercialmente disponível de soldagem por fricção para metais, que permite unir diferentes geometrias, configurações e combinações de materiais, utilizando uma espessura mínima de trabalho para as placas poliméricas, da mesma maneira que nos processos tradicionais de interação (ancoramento) mecânico [32]. Através da experiência prática verificou-se que para alguns tipos de materiais o diâmetro do rebite deve ser a metade da espessura a ser unida para que um ancoramento mecânico ótimo seja atingido [31]. Tal cuidado permite a confecção de juntas hermeticamente seladas que podem ser adotadas, por exemplo, na produção de insertos metálicos em produtos poliméricos.

Quando comparada à técnica de união de termoplásticos com adesivos químicos, a rebiteagem por fricção apresenta tempos de processamento curtos, além de não necessitar de preparação superficial e utilização de agentes de cura. Quando comparada à rebiteagem convencional, a rebiteagem por fricção dispensa a necessidade de furação prévia dos componentes poliméricos o que reduz as etapas do processo e diminui a concentração de tensões pela

ausência do entalhe associado ao furo passante. A rebitagem por fricção permite a fabricação de juntas com alto desempenho mecânico próximo ou superiores a 90% da resistência mecânica do rebite utilizado na confecção das mesmas [12,33], um comportamento positivamente atípico no caso de juntas rebitadas.

2.3.1 Parâmetros e variáveis de processo

Os principais parâmetros de processo de rebitagem por fricção são descritos a seguir:

A velocidade de rotação (VR) é a velocidade angular do rebite cilíndrico. É um parâmetro importante na evolução da temperatura, que auxilia na geração de calor friccional. Também, controla a viscosidade do polímero, bem como a sua degradação térmica e a formação de defeitos na área de união.

O tempo de união (TU) compreende a soma do tempo de fricção (TF) e de forjamento (TF_o). É um fator determinante para o tempo total do ciclo do processo. Além disso, controla a energia térmica gerada na camada polimérica amolecida/fundida, influenciando o nível de defeitos volumétricos relacionados ao tratamento termomecânico.

A pressão de união (PU) é a soma da pressão de fricção (PF) e de forjamento (PF_o). Esse parâmetro está relacionado com a distribuição de pressão normal aplicada sobre a área friccional e contribui principalmente no controle do forjamento e da consolidação do rebite metálico no interior da matriz polimérica.

As variáveis da rebitagem por fricção são descritas a seguir:

O tempo de aquecimento (TA) é o intervalo definido a partir do instante em que o rebite metálico toca a superfície do polímero e o momento em que a sua rotação é interrompida. A partir dele pode-se estimar o aporte térmico (*heat input*) do processo, permitindo, com isso, a obtenção de boa estimativa do grau de plastificação do rebite durante a união.

A razão de penetração (RP) é a profundidade de penetração da ponta do rebite deformado dentro da matriz polimérica.

A taxa de penetração (TP) é uma estimativa do valor da velocidade média durante a rebitagem por fricção, obtida a partir do quociente entre a razão de penetração (RP) e o tempo de aquecimento (TA).

A temperatura média do processo (T) fornece estimativas sobre mudanças na viscosidade do polímero relacionada às condições de fricção e geração de calor.

O torque friccional (T_z) auxilia na estimativa do comportamento reológico do polímero amolecido, bem como na quantificação do grau de plastificação do rebite. Através dessa variável, podem-se identificar defeitos na junta relacionados ao mau funcionamento do equipamento e ineficiência na fixação das partes a serem soldadas [12].

A Figura 2.5 apresenta os principais parâmetros e variáveis do processo de rebitagem por fricção traduzidos na forma de gráficos obtidos através do monitoramento realizado por um programa específico (RQ-Fuzzy Harms & Wende). Este programa é acoplado ao equipamento utilizado na confecção das juntas por meio de um computador, e permite para o caso de análises estatísticas que os dados experimentais sejam exportados como arquivos ASCII.

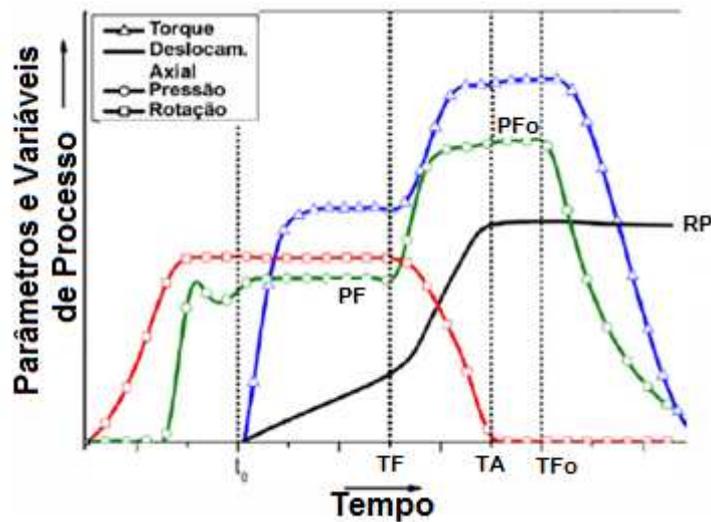


Figura 2.5: Gráfico das variáveis e parâmetros do processo de Rebitagem por Fricção [31].

2.3.2 Fases do processo

O processo de rebitagem por fricção, assim como a maioria dos processos de união por fricção, divide-se em cinco fases [12], as quais se referem ao mecanismo de aquecimento e deslocamento axial do rebite em função do tempo de união. As principais fases estão esquematizadas na Figura 2.6 e são descritas a seguir.

Na fase I (F-I) o principal mecanismo de aquecimento é a fricção Coulombiana (no estado sólido) entre metal-polímero. Durante essa etapa o coeficiente de atrito dinâmico diminui com a rotação e o tempo devido ao deslizamento do polímero na superfície do metal e o deslocamento axial do rebite é praticamente nulo.

Na fase II (F-II) ocorre o início da dissipação viscosa em estado transiente devido ao amolecimento por cisalhamento interno do polímero. O deslocamento axial do rebite aumenta com o tempo.

Na fase III (F-III) inicia-se a dissipação viscosa em estado estacionário como consequência do balanço entre a taxa de fusão/amolecimento do polímero logo abaixo da ponta do rebite em rotação e a taxa de expulsão de material fundido (expelido como rebarba). O rebite desloca-se linearmente com

o tempo e o torque mantêm-se constante. Ao final dessa etapa, a ponta do rebite encontra-se plastificada e está pronta para a fase de forjamento.

Na fase IV (F-IV) ocorre o forjamento do rebite. A velocidade rotacional é desacelerada e a pressão axial é elevada. Com isso, a espessura da camada de polímero fundido/amolecido é reduzida próxima à região da ponta do rebite. Ocorre aumento brusco na taxa de deslocamento axial do rebite e mudança na inclinação das curvas. A ponta do rebite é deformada e assume a conformação parabólica.

A fase V (F-V) é a fase final de consolidação da junta. O deslocamento do rebite atinge um valor máximo tornando-se constante e o polímero fundido/amolecido se consolida ao redor do rebite sob pressão.

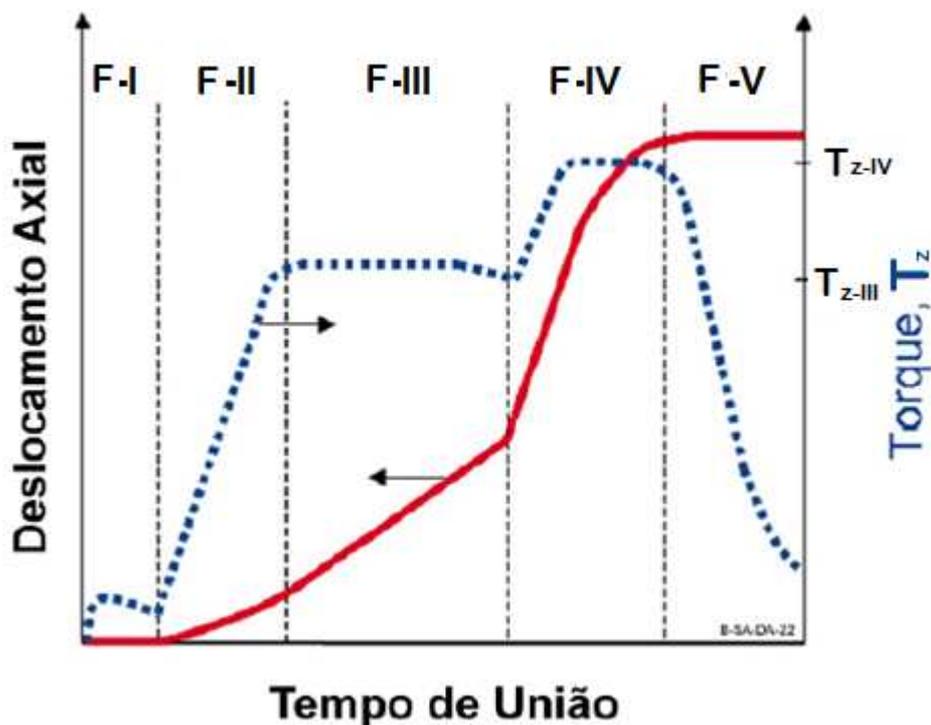


Figura 2.6: Etapas da rebitagem por fricção em função do tempo de união exemplificadas pelas curvas do deslocamento axial e do torque do rebite [12].

2.3.3 Zonas microestruturais das juntas

Amancio [12] descreveu as zonas microestruturais típicas em juntas de poli(éter imida) (PEI) e AA 2024-T351 rebidadas por fricção: zona do polímero

afetada pelo calor (PZAC), zona do polímero termomecanicamente afetada (PZTMA), zona do metal afetada pelo calor (MZAC), zona do metal termomecanicamente afetada (MZTMA). A MZTMA encontra-se no interior da zona de ancoramento (ZA) do rebite, que é a ponta deformada do rebite. Estas zonas são mostradas de forma esquemática na Figura 2.7. Observa-se que a região de ancoramento exibe duas interfaces diferentes do tipo metal-polímero e polímero-polímero. A interface metal-polímero é composta pelas zonas MZAC e MZTMA localizadas na zona de ancoramento (ZA), enquanto que a interface polímero-polímero é definida pela formação de uma linha de solda entre as zonas PZAC e PZTMA [12]

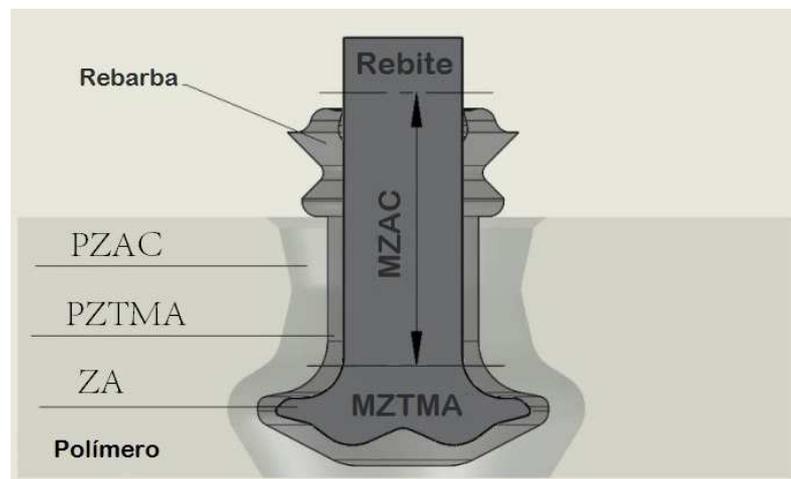


Figura 2.7: Esquema das zonas microestruturais de juntas fabricadas por rebiteagem por fricção. PZAC: zona do polímero afetada pelo calor. PZTMA: zona do polímero termomecanicamente afetada. MZAC: zona do metal afetada pelo calor. MZTMA: zona do metal termomecanicamente afetada [10].

Na zona do metal afetada pelo calor (MZAC) podem ocorrer fenômenos de recozimento estáticos, como recuperação, recristalização e superenvelhecimento (e alguns mecanismos de endurecimento, envelhecimento e reprecipitação, dependentes do tipo de liga, tempo de aquecimento e máxima temperatura de processo). A microestrutura, embora bastante modificada, não sofre mudanças perceptíveis em microscopia ótica.

Por outro lado, na zona do metal termomecanicamente afetada (MZTMA) observa-se o início de mudanças microestruturais. Altas taxas de aquecimento e deformação propiciam refinamento parcial de grãos, formação de grãos e sub-grãos como consequência do fenômeno de recuperação e recristalização dinâmica, além de realinhamento dos grãos na direção do fluxo de forjamento do material plastificado ou ainda formação de precipitados. A MZTMA encontra-se na zona de ancoramento (ZA) do rebite, que é a região em que ocorre deformação plástica acentuada da ponta do rebite, e este geralmente assume um formato parabólico, com diâmetro final maior que o original.

Na PZAC a temperatura de processo não chega a atingir a temperatura de amolecimento do polímero. No entanto, a estrutura do polímero pode ser afetada pelo calor e, conseqüentemente, isso pode causar alterações das propriedades mecânicas. Exemplos dessas possíveis alterações são: cristalização induzida pelo aquecimento (no caso de polímeros semi-cristalinos) e envelhecimento físico (no caso de polímeros amorfos) bem como outros fenômenos de relaxação de tensões residuais [31].

A PZTMA consiste em uma fina camada de polímero consolidada ao redor do rebite, formada devido a forças de cisalhamento e calor impostos durante o processo. Nesta região, a temperatura de processo deve ultrapassar a T_g (no caso de polímeros amorfos) ou T_m (no caso de polímeros semicristalinos), mas pode também atingir a temperatura de degradação termomecânica do polímero [34]. A presença de vazios e defeitos na PZTMA está associada às altas temperaturas e taxas de deformação nesta região. Dependendo da estrutura molecular do polímero, pode ocorrer a formação de vazios relacionados à eliminação de voláteis (por exemplo, no caso de polímeros com moléculas de água estrutural). Vazios podem ser gerados também devido ao ar aprisionado advindo da alta viscosidade do fundido de alguns polímeros. Encolhimento diferencial, relacionado às diferenças entre os coeficientes de expansão térmico dos materiais, pode também causar contrações diferenciais durante a etapa de resfriamento gerando defeitos

volumétricos. Tais fenômenos podem afetar negativamente o desempenho mecânico das juntas [31].

2.3.4 Tipos de fraturas de juntas produzidas por rebiteagem por fricção

Atualmente, existe um número limitado de publicações sobre a técnica de rebiteagem por fricção. Estudos realizados por Borges *et al.* [35] com juntas de PEI /AA 2024-T351 demonstraram valores de resistência próximos de 93% do valor máximo de resistência à tração do rebite metálico com fratura final ocorrendo no rebite metálico. Amancio [36] e Blaga [37] reportaram a presença de cinco tipos de falhas durante o ensaio de tração, esquematizadas na Figura 2.8.

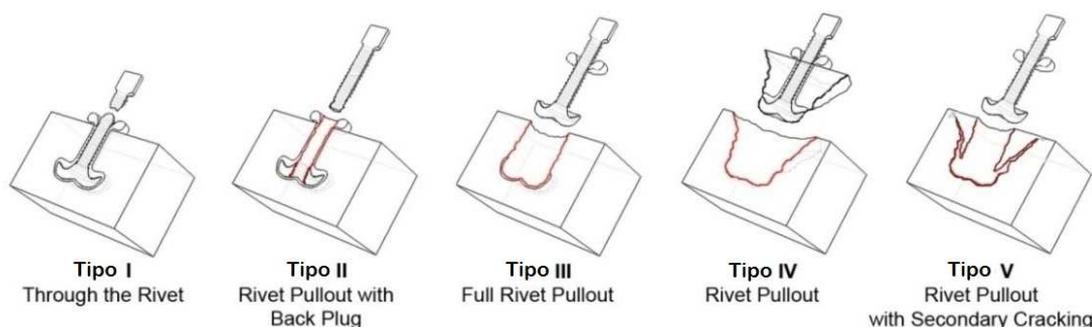


Figura 2.8: Cinco tipos de fratura que podem ocorrer durante o ensaio de tração em juntas fabricadas por rebiteagem por fricção. As linhas vermelhas indicam a propagação das trincas ao final da fratura. Adaptado de [37].

Tipo I (*Through the rivet*): a fratura dúctil ocorre no rebite metálico fora da junta. A resistência à tração da junta é praticamente equivalente ao do rebite metálico.

Tipo II (*Rivet pull out with back plug*): é uma fratura na qual a trinca nucleia na ponta deformada do rebite na zona de ancoramento. O rebite é então arrancado do polímero, deixando parte da zona de ancoramento (*the back plug*) embutida. Nesse tipo de fratura a resistência à tração é inferior ao do rebite metálico.

Tipo III (*Full rivet pull out*): é uma fratura tipicamente observada em juntas com polímeros de alta ductilidade (por exemplo, Policarbonato e Polietereimida), ou em casos em que a ponta do rebite foi pouco deformada (baixo ancoramento mecânico) durante o processo de forjamento. Nesse tipo de fratura a trinca inicia ao redor da zona de ancoramento no polímero e o rebite é removido completamente do mesmo, deixando um orifício com diâmetro similar ao da ponta deformada do rebite. A resistência mecânica das juntas que apresentam esse tipo de fratura geralmente é menor do que a das juntas do Tipo I e II.

Tipo IV (*Rivet pull out*): é um tipo de falha que resulta no arrancamento do rebite. É comumente observada em juntas com grande deformação na ponta do rebite, mas cuja profundidade de inserção é pequena, deixando a zona de ancoramento próxima da superfície do polímero. A trinca nucleia no polímero ao redor do topo da zona de ancoramento e propaga-se em direção à superfície posterior do polímero. Observa-se a formação de um cone de polímero ao redor da zona de ancoramento do rebite destacado da junta.

Tipo V (*Rivet pull out with secondary cracking*): é o modo de falha sob tração mais complexo e que ainda não é bem compreendido. Nesse tipo de falha observa-se a nucleação de trincas em sítios múltiplos no polímero ao redor da zona de ancoramento. Nas fases iniciais de propagação, a trinca parece seguir o mesmo caminho da trinca da falha Tipo IV, mas o rebite é arrancado da junta como no caso da falha Tipo III.

2.3.5 Estudos recentes de juntas produzidas por rebitagem por fricção

Amancio *et al.* [31] estudaram o desempenho do ancoramento do rebite deformado no polímero em juntas de PEI/AA2024-T351. Eles associaram o aporte térmico da junta com a plastificação do rebite e seu nível de deformação através da chamada razão de aspecto (RA) da zona de ancoramento (ZA) por meio de uma relação analítica bi-dimensional simples entre a profundidade de inserção (P) e a largura do rebite deformado (L): $RA = L/P$ (Figura 2.9). Os mesmos autores [38] avaliaram a influência da velocidade

de rotação na RA, mostrando que o aumento do aporte térmico, associado a maiores velocidades de rotação, induz uma maior deformação no rebite, aumentando a RA das juntas.

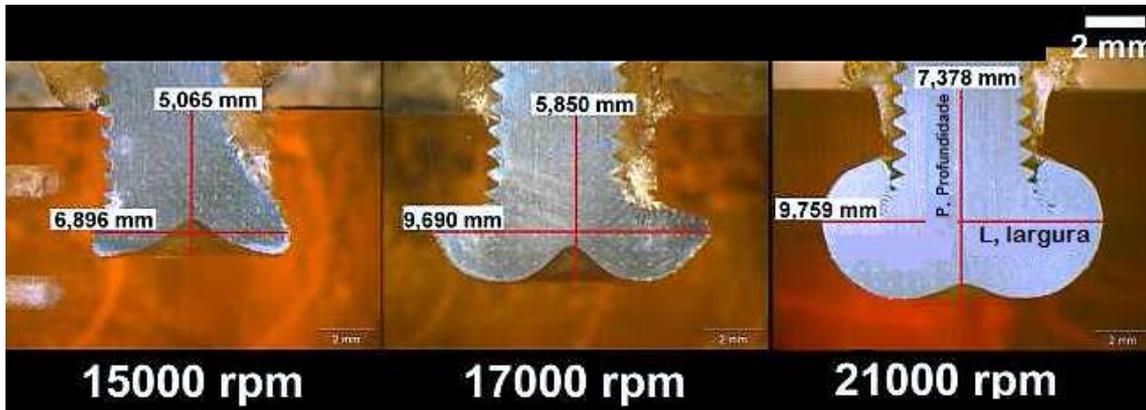


Figura 2.9: Características geométricas da secção transversal de juntas de PEI/AA2024-T351. A figura mostra a zona de ancoramento do rebite ranhurado no interior da placa polimérica. O corte vertical representa a profundidade de penetração do rebite, P, e o corte horizontal a largura, L, de deformação da ponta do rebite, ambos os valores são utilizados no cálculo da razão de aspecto de ancoramento do rebite ($RA = L/P$) [31,38]. Adaptado [31]

Blaga *et al.* [35] propuseram uma formulação mais elaborada para a análise da interferência mecânica da ponta do rebite no interior do polímero, validada para diferentes combinações de materiais rebitados. Essa descreve o comportamento das juntas rebitadas por fricção independente dos níveis de valores de H e W (Equação 2.1). Essa formulação ficou conhecida como razão volumétrica (RV) e estabelece uma relação entre a resistência mecânica à tração e o ancoramento mecânico do rebite considerando os volumes de interação (Figura 2.10) entre polímero e rebite metálico, calculados a partir das dimensões da zona de ancoramento do rebite.

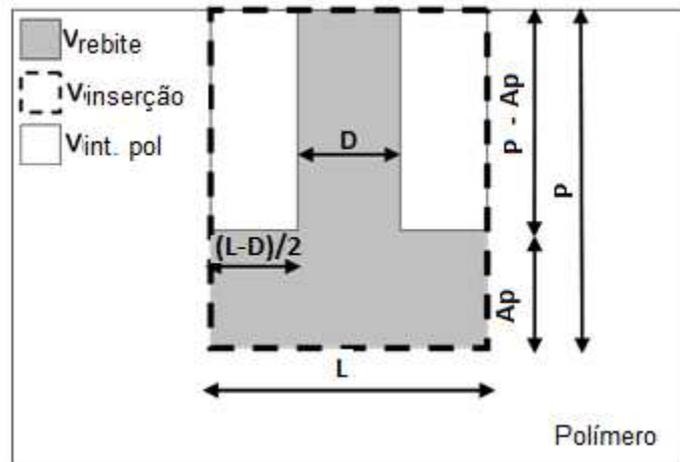


Figura 2.10: Geometria simplificada de uma junta rebitada por fricção usada para calcular a razão volumétrica de acordo com a Equação 2.1: V_{rebite} = volume do rebite metálico ancorado na placa polimérica, $V_{\text{inserção}}$ = volume nominal de polímero deslocado e $V_{\text{Int. Polímero}}$ = volume de interação polimérico na zona de ancoramento [37].

$$RV = \frac{(P - A_p) \cdot (L^2 - D^2)}{L^2 \cdot P} \quad (2.1)$$

As variáveis da Equação 2.1 possuem os seguintes significados:

P: profundidade de penetração do rebite.

L: Largura de deformação da ponta do rebite.

D: Diâmetro inicial do rebite.

A_p : Altura da ponta do rebite deformada.

A Equação 2.1 considera as forças reativas que se opõem ao movimento axial da ponta do rebite deformada sob carregamento no interior do polímero, bem como, as forças de adesão resultantes do contato na interface polímero-metal [33].

Atualmente, a técnica está sendo desenvolvida em compósitos de fibra de vidro e carbono, unidos por meio de rebites de alumínio e titânio [33,39], demonstrando o potencial da técnica em diferentes combinações de materiais.

2.4 Projeto de experimentos (PdE)

A metodologia de Planejamento e Análise de Experimentos, ou simplesmente Projeto de Experimentos, PdE (*Design of Experiments – DOE*) é uma ferramenta baseada em fundamentos da estatística que tem sido bastante utilizada na indústria e nos centros de pesquisa na execução e análise de vários tipos de processos, objetivando a melhoria da sua qualidade e produtividade, bem como, o entendimento das variáveis processuais e sua influência nas propriedades e características do produto manufaturado [40].

As técnicas de planejamento de experimentos são aplicadas em situações que envolvem a análise de dados sujeitos a erros experimentais. A maioria delas permite realizar uma série de testes, induzindo determinadas mudanças ou estímulos nas variáveis de entrada, de tal maneira que é possível observar e identificar os efeitos desses fatores nas variáveis de saídas, produzindo um número máximo de informações sobre o processo.

De acordo com Montgomery [41,42] o sucesso de um planejamento de experimentos dependerá em grande parte da forma com que ele é estruturado e como será realizado. Para isso, é necessário ter um conhecimento prévio do assunto a ser investigado, saber de que maneira os dados devem ser coletados e ter uma idéia de como estes dados podem ser analisados. Também, é necessário conseguir reunir o maior número de informações sobre as variáveis de entrada para obter uma ampla abordagem das características do processo [43].

No campo de pesquisa e desenvolvimento de novas técnicas de união ou soldagem, a metodologia do PdE tem sido usada em diversos estudos de otimização de parâmetros operacionais com a intenção de reduzir a variabilidade, garantir a conformidade do processo e facilitar o entendimento da correlação entre parâmetros de união e propriedades da junta. Para atingir tais metas, várias técnicas têm sido utilizadas como: método Taguchi [44], metodologia da superfície de resposta [45], planejamento fatorial [33,46], entre outros. A maioria delas utiliza um número mínimo de experimentos e através da modelagem estatística das variáveis de entrada e de saída e suas interações

determinam a melhor condição do processo para produção de juntas ou soldas de alta qualidade.

2.4.1 Planejamento fatorial 2^k

O método de planejamento de experimento fatorial completo em dois níveis (2^k , onde k é o número de fatores ou variáveis independentes) é útil para ser aplicado nos estágios iniciais de um trabalho experimental quando muitos fatores são investigados [43].

Para ilustrar o procedimento da técnica de planejamento fatorial completo 2^k , considera-se um experimento com três fatores X_1 , X_2 e X_3 , ou seja, $k = 3$. Cada um desses fatores será testado com dois níveis (+1, -1). Com isso, gera-se uma matriz de planejamento de experimento fatorial 2^3 , com oito combinações de experimentos, em que as respostas de cada ensaio ou tratamento estão descritas na coluna y_i (Tabela 2.2). É importante ressaltar que a ordem de realização dos testes é definida aleatoriamente e esse exemplo já foi apresentado por vários autores que estudaram as técnicas de planejamento e análise de experimentos [42,43].

Tabela 2.2: Experimento fatorial completo de três fatores - caso geral [42].

No. de Testes	Fatores de controle			Ordem dos testes	Resposta (y_i)	Valor médio da Resposta
	X_1	X_2	X_3			
1	+	-	-	5	y_1	\bar{y}_1
2	-	+	-	8	y_2	\bar{y}_2
3	+	+	-	1	y_3	\bar{y}_3
4	-	-	+	2	y_4	\bar{y}_4
5	-	+	+	6	y_5	\bar{y}_5
6	-	-	-	4	y_6	\bar{y}_6
7	+	-	+	3	y_7	\bar{y}_7
8	+	+	+	7	y_8	\bar{y}_8

Na matriz genérica do experimento fatorial 2^k mostrada na Tabela 2.2 às colunas representam o conjunto de fatores investigados ($X_1, X_2, X_3 \dots, X_k$), e as linhas representam os diferentes níveis ou combinações de fatores +1 (máximo) e -1 (mínimo). Tal arranjo permite determinar os efeitos principais e de interação que as variáveis independentes produzem nas respostas por meio de um modelo estatístico dado pela Equação 2.2 [42]:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta_{ij}) + (\tau\gamma_{ik}) + (\beta\gamma_{jk}) + (\tau\beta\gamma_{ijk}) + \varepsilon_{ijk} \quad (2.2)$$

Na Equação 2.1, μ representa a média global das respostas. Os coeficientes τ_i , β_j e γ_k representam as estimativas dos efeitos principais dos fatores X_1, X_2, X_3 , respectivamente. Já os coeficientes $\tau\beta_{ij}$, $\tau\gamma_{ik}$, $\beta\gamma_{jk}$ e $\tau\beta\gamma_{ijk}$ representam as estimativas dos efeitos de interação entre os fatores (X_1 e X_2), (X_1 e X_3), (X_2 e X_3), (X_1, X_2 e X_3), respectivamente, e ε_{ijk} o erro experimental. O efeito principal é estimado pela variação na média da resposta em relação à variação no nível do fator, enquanto que as interações medem a existência ou não de relação linear entre dois ou mais fatores na resposta, ou seja, se existe interação entre fatores e se o efeito de um fator na resposta depende do nível do outro fator [46,47].

Um dos métodos que pode ser utilizado para determinar os coeficientes da Equação 2.1 e também verificar se os efeitos ou interações são significativos nas respostas é o teste de hipóteses simultâneas conhecido como Análise de Variância (ANOVA). Esse método estatístico compara, para cada fonte de variação, o valor da sua média quadrática (MQ) e da média quadrática do modelo ou resíduo (MQ_E). Se a razão entre as duas médias for maior que o $F_{\alpha,1,8(n-1)}$ tabelado, significa que o p-valor (valor de probabilidade, que permite decidir se existe evidência suficiente para rejeitar a hipótese da nulidade) é muito pequeno, e o efeito dessa fonte é significativo [48,47].

O ajuste do modelo representado pela Equação 2.1 pode ser quantificado pelo coeficiente de aproximação das regressões R^2 que é a razão entre SQ_R e SQ_T , no qual SQ_R e SQ_T são as somas quadráticas devidas à regressão em torno da média, respectivamente [49]. Quanto mais próximo R^2

estiver da unidade, significa que o modelo proposto mais se adequa para explicar o comportamento do experimento [50,51].

Nesta dissertação, o planejamento de experimento tipo fatorial 2^k foi utilizado para analisar a influência dos parâmetros operacionais da rebitagem por fricção sobre as propriedades gerais das juntas de PC/AA 2024-T351. O método envolverá a análise dos efeitos de dois níveis de valores para três parâmetros do processo sobre as variáveis respostas que representam as principais características das juntas. A ANOVA foi utilizada para determinar os efeitos de cada parâmetro e a suas interações sobre cada resposta analisada.

2.5 Modelagem via redes neurais artificiais – RNAs

Redes Neurais Artificiais (RNAs) são modelos capazes de representar numericamente um processo a partir de um sistema computacional inspirado na arquitetura e no funcionamento do cérebro humano. Esses modelos adquirem conhecimento através da análise de experiências prévias. Uma RNA, devidamente treinada, pode responder de forma rápida, simples e coerente a padrões desconhecidos [52]. Atualmente, os modelos de RNAs têm sido aplicados no campo da biologia, da análise financeira, ciência da computação, matemática, física e engenharia para solucionar problemas complexos cujas características do processo são difíceis de serem descritas utilizando-se apenas equações lineares [53].

2.5.1 Características de uma RNA

A principal unidade de processamento de uma RNA é o neurônio artificial. Este geralmente se encontra interligado e organizado em camadas com arquitetura semelhante às encontradas nas células das redes neurais biológicas (Figura 2.10). Os neurônios biológicos são constituídos por dendritos, corpo celular e axônios [54]. Os dendritos são responsáveis pela recepção dos sinais oriundos dos outros neurônios e transmissão dos mesmos para o corpo celular. No corpo celular, os sinais são processados e novos

sinais são gerados, e estes são transmitidos pelos axônios até suas extremidades. A região localizada entre a terminação axônica de um neurônio e o dendrito de outro é chamada sinapse. As conexões sinápticas são responsáveis pelo comportamento inteligente e capacidade de recepção, processamento e transmissão das informações que o corpo envia ao cérebro humano [55].

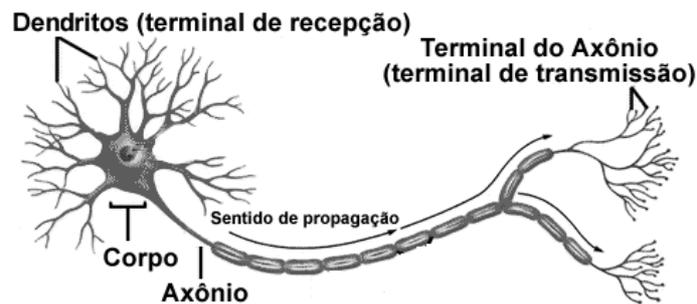


Figura 2.11: Componentes básicos de um neurônio biológico. Adaptado [54].

Na Figura 2.11A tem-se a representação de um modelo de um neurônio artificial em que os dendritos são representados pelos terminais de entrada (x_1, x_2, \dots, x_n) e os axônios pelos terminais de saída y . As conexões entre os neurônios, denominadas pesos sinápticos (w_i), são responsáveis pelo armazenamento de informações [56]. Os estímulos captados pelos terminais de entrada são processados por uma função *soma* (Σ). O limiar de disparo do neurônio biológico é representado pela função transferência (θ), que permite que a resposta gerada propaga-se pela rede.

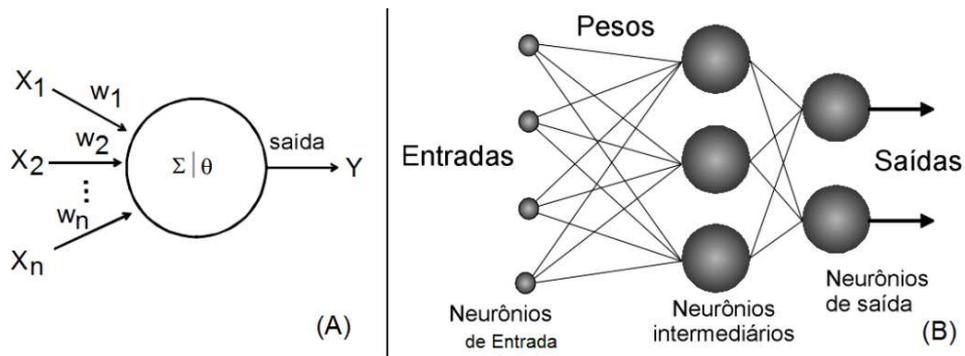


Figura 2.12: (A) Modelo típico de um neurônio artificial. (B) Estrutura padrão de uma RNA multicamada [54].

De maneira geral, uma RNA possui uma estrutura multicamada, como mostrada na Figura 2.10B, sendo cada camada composta por um conjunto de neurônios artificiais. A primeira camada (*input neurons*) é responsável pela recepção e transmissão da informação para os neurônios seguintes. As camadas intermediárias ou ocultas (*hidden neurons*) são as camadas que não estão ligadas às entradas e nem saídas, as quais realizam o processamento não linear da informação recebida pelos neurônios da camada de entrada. A camada de saída (*output neurons*) realiza a comunicação com o ambiente externo, fornecendo os resultados do processamento das informações.

Portanto, a topologia mais comum utilizada durante o desenvolvimento de uma RNA é a de rede de neurais completamente conectadas por múltiplas camadas (*Multilayer Perceptron (MLP)*). A sua principal vantagem é a facilidade de uso que permite aproximar qualquer função de entrada e saída. A MLP pode ser usada na maioria dos casos, no entanto, a rede apresenta processo de aprendizado lento e que geralmente requer uma grande quantidade de dados para o treinamento [54].

Em uma RNA, normalmente, o número de camadas e o número de neurônios em cada camada são definidos em função de uma inspeção prévia dos dados e da complexidade do problema. Segundo Cybenko [57], uma camada intermediária é suficiente para programar qualquer função contínua e a utilização de duas ou mais camadas intermediárias permite aproximar qualquer função matemática.

As RNAs são normalmente processadas utilizando componentes eletrônicos ou programas computacionais. O processo de aprendizagem é realizado por um algoritmo de aprendizagem que tem a função de modificar os pesos sinápticos da rede de forma ordenada visando alcançar o objetivo do projeto desejado [57,58]. Para isso, diversos métodos de treinamento podem ser utilizados dependendo da aplicação desejada. Os mais utilizados são os métodos de aprendizagem supervisionada, que envolvem o uso de um agente externo que indica para RNA a resposta desejada para o padrão de entrada; e aprendizagem não supervisionada (auto-organização), na qual não existe um agente externo indicando a resposta desejada para os padrões de entrada, ou seja, a própria RNA irá ajustar as regularidades estatísticas dos dados de entrada, desenvolvendo com isso a capacidade de formar representações internas e, desta maneira, criar automaticamente as respostas [58].

Nesta dissertação foram utilizadas RNAs de múltiplas camadas treinadas pelo método de aprendizagem supervisionada, com o algoritmo de *Levenberg-Marquardt backpropagation*. Este algoritmo foi desenvolvido para resolver iterativamente problemas de minimização de funções não lineares por meio da correção dos pesos entre as conexões dos neurônios [57] de maneira mais rápida que outros algoritmos, utilizando derivadas de segunda ordem do erro quadrático em relação aos pesos sinápticos [59].

2.5.2 Aplicações das RNAs na área de soldagem

Devido à grande capacidade de aprender através de exemplos e de generalizar a informação aprendida [60,61], as RNAs têm sido usadas na solução de diversos problemas na área de pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias de soldagem. Khorram *et al.* [62] utilizaram essa ferramenta para identificar os efeitos dos parâmetros de processo da soldagem a laser (*laser welding*) nas geometrias das soldas de liga de TiAl6V4. Ozerdem *et al.* [63] usaram as RNAs para prever propriedades mecânicas em soldas da liga de Cu-Sn-Pb-Zn-Ni fabricadas por soldagem pontual por resistência (*resistance spot welding*). Oscar *et al.* [64] desenvolveram um modelo de RNAs para

predizer valores de resistência ao cisalhamento em juntas de aço inoxidável 304 fabricadas por soldagem pontual por resistência (*resistence spot welding*).

2.5.3 Modelagem de uma RNA

O desenvolvimento de uma RNA envolve as seguintes etapas: definição do problema, coleta de dados de treinamento, projeto da estrutura da rede, treinamento e teste, e finalmente a validação ou avaliação da capacidade de generalização do modelo [60,61].

A definição do problema envolve a determinação do número de neurônios na camada de entrada da rede de forma coerente, considerando todos os fatores relevantes do processo o qual se deseja modelar. A escolha desses fatores é importante, pois pode afetar o treinamento da rede. Portanto, a seleção deve ser criteriosa, de modo a obter um modelo de RNA mais completo possível.

Na etapa de coleta dos dados de treinamento é fundamental considerar a quantidade de dados que serão utilizados na alimentação da RNA, sendo que esses devem representar todas as características do problema. Geralmente, os dados coletados são divididos em conjuntos de treinamento, teste e validação. O conjunto de treinamento deve ser o maior possível, para dar à rede um número de exemplos suficientes para que seja efetiva a sua aprendizagem [65]. Alguns autores recomendam que esse conjunto corresponda de 70% a 90% do total dos dados [66]. O restante (10% a 30% dos dados) é usado na composição dos conjuntos de teste e validação [67].

A etapa do projeto da estrutura da RNA envolve a escolha da topologia ou arquitetura ideal de RNA de acordo com a complexidade do problema. Normalmente, o número de neurônios de entrada é o mesmo que o número dos fatores de entrada. O número de camadas escondidas vai depender do número de neurônios da camada de entrada e da natureza dos dados. Na maioria dos casos, uma ou duas camadas escondidas são suficientes. O número de neurônios em cada uma das camadas escondidas irá variar entre metade a três vezes o número de neurônios da camada de entrada [67,68].

No treinamento da RNA, um algoritmo rápido e eficaz é escolhido para fazer o ajuste de pesos sinápticos, os algoritmos mais utilizados são: back-propagation, descida e back-propagação resistente, Quasi-Newton, e o algoritmo de Levenberg-Marquardt [68]. Na avaliação do desempenho do treinamento do modelo de RNA é usando uma função de desempenho específico. Erros, como o desvio mínimo absoluto, soma dos quadrados dos erros e percentual de erro médio absoluto podem ser usados. Neste trabalho foi utilizado o erro médio quadrático (MSE – *Mean Square Error*) [67], definido pela diferença entre o valor previsto e o valor experimental utilizado no treinamento da rede. No início do treinamento das RNA os valores do MSE são elevados, mas logo em seguida diminuem com o aumento do número de iterações e, no final, eles tendem a ser constantes. O melhor modelo de RNA é aquele que resulta no menor valor de MSE.

Outro aspecto que deve ser considerado durante o treinamento é o critério de parada, ou seja, o momento exato da interrupção do treinamento. As abordagens mais aplicadas são especificação do número de iterações antes de iniciar o treinamento, convergência ao mínimo valor de MSE e parada antecipada [63]. A especificação do número de iterações antes de iniciar o treinamento pode resultar em um excesso de treinamento da RNA, se a mesma convergir rapidamente para o mínimo MSE. O oposto pode acontecer se o treinamento é parado antes que a rede seja capaz de convergir. O uso do critério de convergência ao mínimo MSE resolve este problema, pois o treinamento da RNA é interrompido quando a RNA realmente atinge o mínimo valor de MSE. Ainda assim, o critério de parada antecipada é o mais usado. Nele o conjunto de testes não participa da fase de treinamento da rede, este é utilizado ao final de cada iteração para verificar o desempenho de aprendizagem da RNA [69]. O treinamento é interrompido quando o MSE dos dados de teste estabiliza ou começa aumentar (Figura 2.11).

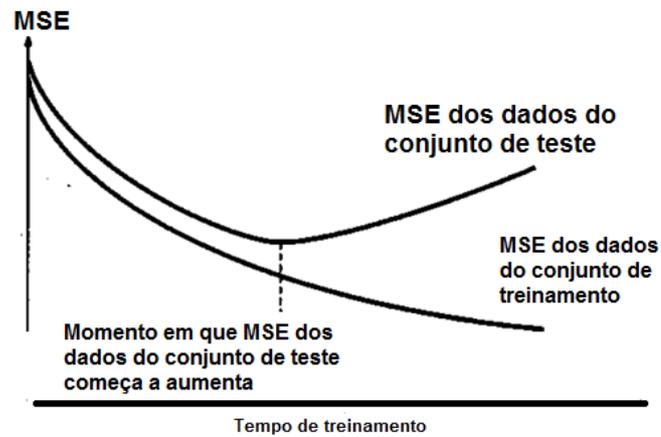


Figura 2.13: Mudança no MSE do conjunto de treinamento e teste com o tempo de treinamento. Adaptado de [69].

Finalmente, na etapa de validação da capacidade de generalização do modelo, um novo conjunto de dados, diferentes do utilizado na etapa de treinamento e teste, é apresentado à RNA, para assim avaliar a sua capacidade de generalização e, com isso, o seu potencial em ser aplicada na resolução do problema em questão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

As amostras de PC utilizadas na confecção das juntas são provenientes de chapas extrudadas (Makrolon Monoclear 099, Bayer Group) com 15 mm de espessura (Figura 3.1A). As chapas foram usinadas para obtenção de corpos de prova utilizados no ensaio de tração (dimensões de 70 mm de comprimento por 70 mm de largura) e corpos de prova de dimensões de 40 mm de comprimento por 25 mm utilizados na realização das medidas de temperatura e análise das características macro e microestruturais na área de união. O PC foi escolhido neste estudo devido à sua transparência visando facilitar a avaliação visual da zona de ancoramento do rebite (análise visual não destrutiva) além do seu vasto uso na indústria de transportes.

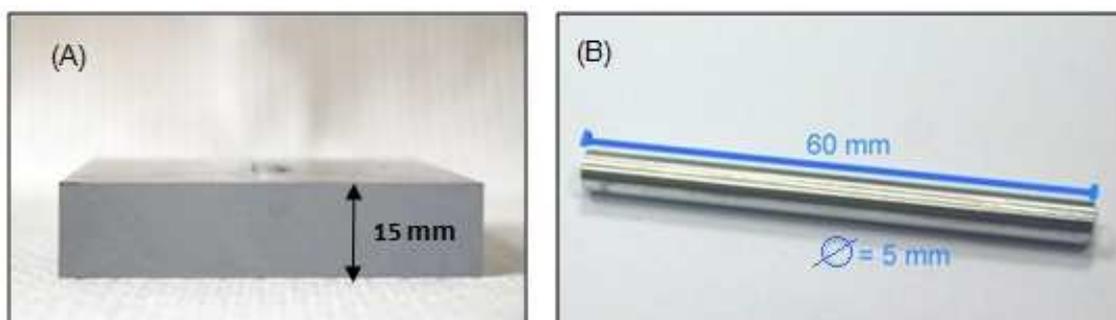


Figura 3.1: Geometrias dos materiais utilizados na fabricação das juntas. (A) Placa de PC. (B) Rebite de alumínio 2024-T351.

Os rebites de alumínio 2024-T351 utilizados neste estudo foram obtidos através do processo de extrusão na forma de pinos lisos com 5 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento (Figura 3.1B). Esses rebites possuem resistência à tração média de 495 ± 3 MPa com alongamento médio de $7,9 \pm 0,4\%$, e valores de microdureza variando entre 151 e 169 HV ao longo da direção de extrusão, como mostrado na Figura 3.2A. A sua composição química nominal está representada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Composição química nominal da liga de alumínio 2024-T351.

Cu	Mg	Si	Mn	Fe	Zn	Cr	Ti	Al
3,9	1,2	0,19	0,55	0,23	0,22	0,001	0,02	bal.

Na Figura 3.2B observa-se a microestrutura obtida por microscopia ótica da seção longitudinal do rebite formada por grãos alongados e orientados na direção de extrusão, sendo que os pontos pretos no interior dos grãos são partículas secundárias (AlMgCuC) e intermetálicos (Al₂Cu-teta) [21].

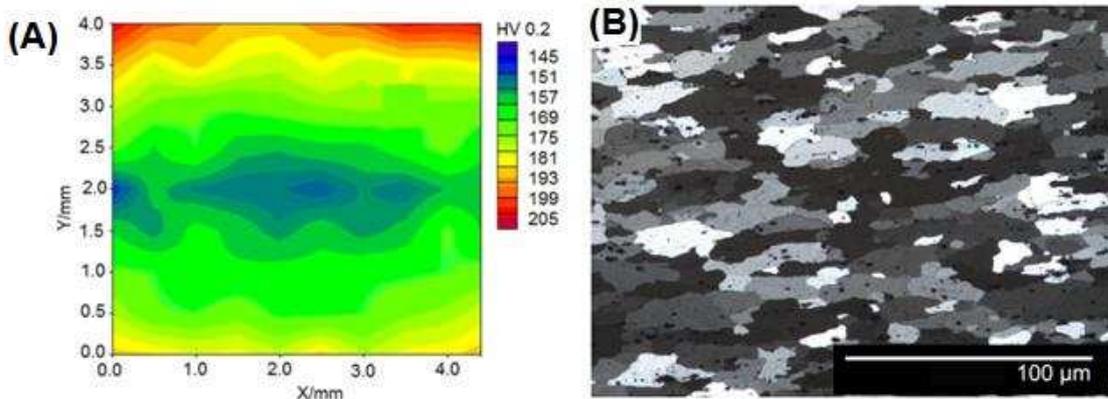


Figura 3.2: (A) Mapa de microdureza Vickers e (B) microestrutura da seção longitudinal do rebite de AA 2024-T351.

3.2 Métodos experimentais

O estudo de viabilidade do processo de rebiteagem por fricção para juntas pontuais de PC/AA 2024-T351 foi realizado em três etapas, utilizando-se as seguintes ferramentas:

- ✓ Planejamento de experimentos (PdE) do tipo um fator por vez e fatorial completo para definir o intervalo e as combinações dos parâmetros a serem utilizados na fabricação das juntas, e análise de variância (ANOVA) para investigação da influência destes parâmetros sobre as características macro e microestruturais, temperatura máxima desenvolvida na área de fricção e a resistência mecânica das juntas.

- ✓ Construção e treinamento de redes neurais artificiais (RNAs) que permitiram prever e gerar informações de forma rápida e eficiente sobre propriedades finais das juntas para diversos parâmetros de processo.

A primeira parte do estudo envolveu a determinação de um intervalo de soldabilidade através da fabricação de uma série de juntas considerando uma ampla faixa de parâmetros de processo, mostrada na Tabela 3.2, definida com base em estudos preliminares realizados em juntas de PEI/AA 2024-T351 [31] e PC/AA 6060-T66 [70] que resultaram no ancoramento efetivo do rebite metálico na matriz polimérica.

Tabela 3.2: Intervalo de parâmetros de processo utilizado como referência na confecção das primeiras juntas do sistema PC/AA 2024-T351.

Intervalo de parâmetros investigados	
Velocidade de rotação, VR	15000 - 21000 rpm
Tempo de união, TU	1,0 - 5,0 s
Pressão de união, PU	0,75 - 1,30 MPa

A qualidade das juntas produzidas nessa primeira etapa do estudo foi quantificada por meio da eficiência de ancoramento das juntas, medida através dos seus valores de profundidade de penetração (P) e largura de deformação da ponta do rebite (L). Tais valores foram correlacionados aos parâmetros de processo utilizados na fabricação das juntas com o objetivo de determinar um intervalo de soldabilidade para a produção das juntas de PC/AA 2024-T351. Durante essa etapa, as juntas foram produzidas seguindo o plano de experimento “um fator por vez” (*one-factor-at-a-time*, OFAT), em que apenas um parâmetro de controle de processo é variado por vez, enquanto os outros são mantidos constantes [71].

Na segunda etapa, um planejamento de experimentos do tipo fatorial completo 2^k foi efetuado, considerando o intervalo de soldabilidade definido na primeira etapa do estudo. Esse modelo foi escolhido por permitir uma análise

eficiente do processo com poucos experimentos. Para isso, foi utilizado um fatorial de dois níveis e três fatores (2^3) como mostrado na Tabela 3.3, resultando em uma matriz de experimentos com oito combinações de parâmetros de processo representados na Tabela 3.4, os quais foram utilizados na fabricação das juntas.

Tabela 3.3: Níveis dos parâmetros utilizados no planejamento de experimento fatorial completo 2^3 para a fabricação das juntas PC/AA 2024-T351.

Parâmetros de processo		Velocidade de rotação [rpm]	Tempo de união [s]	Pressão de união [MPa]
Níveis	Máximo (+)	18000	3,0	0,75
	Mínimo (-)	21000	4,0	1,10

As juntas obtidas a partir do fatorial completo 2^3 foram caracterizadas por meio de medidas de temperatura, análises macro e microestruturais e ensaio de tração. A partir disso, foi possível obter dados que permitiram determinar quais os parâmetros de processo e/ou interações entre parâmetros de processo foram significativos ou exerceram maior influência sobre as suas principais propriedades, tais como: eficiência de ancoramento do rebite de alumínio na matriz de PC e resistência mecânica à tração das juntas. Para tal propósito, foi aplicado a ANOVA com auxílio do software estatístico Minitab®, de modo a fornecer ao estudo um maior grau de confiabilidade.

Por fim, na terceira etapa, a partir de combinações aleatórias de parâmetros de processo obtidas dentro do intervalo de soldabilidade considerado no estudo, realizou-se a construção e o treinamento das redes neurais artificiais (RNAs). Essas permitiram prever e gerar dados sobre o comportamento mecânico, macro e microestrutural, bem como sobre a temperatura desenvolvida na área de união de juntas produzidas a partir de diversos outros parâmetros de processo.

Tabela 3.4: Oito combinações de parâmetros geradas do PdE fatorial completo 2^3 para a fabricação das juntas PC/AA2024-T351

Condições	Parâmetros de processo		
	Velocidade de rotação [rpm]	Tempo de união [s]	Pressão de união [MPa]
1	18000	3,0	0,75
2	21000	3,0	0,75
3	18000	4,0	0,75
4	21000	4,0	0,75
5	18000	3,0	1,10
6	21000	3,0	1,10
7	18000	4,0	1,10
8	21000	4,0	1,10

O modelo de RNA utilizado neste trabalho foi do tipo *perceptron* de múltiplas camadas, constituído por uma camada de entrada (N_1), com três neurônios, inicialmente, representando cada parâmetro de processo, velocidade de rotação, tempo e pressão de união. Esta foi seguida por uma única camada oculta (N_2) compostas por 3 neurônios, sendo a camada de saída (N_3), composta por um único neurônio, correspondente a cada uma das características das juntas analisadas neste estudo. Essa arquitetura foi escolhida com base em trabalhos anteriores realizados por Kano [72] no desenvolvimento de RNA para predizer as principais características de juntas de PEI/AA2024-T351. A arquitetura de RNA resultante está ilustrada na Figura 3.3.

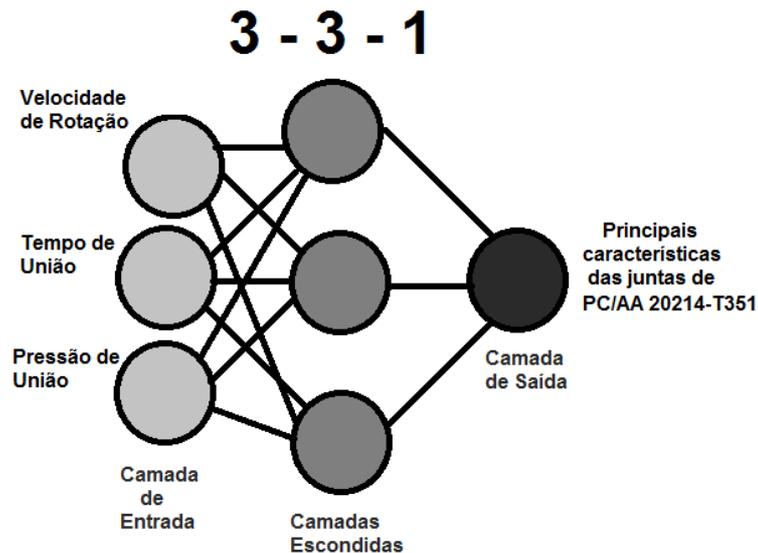


Figura 3.3: Esquema da arquitetura 3-3-1 de RNA treinada neste estudo para prever as principais características das juntas PC/AA 2024-T351.

A avaliação do desempenho desse modelo de RNA foi determinada com base no valor mínimo do erro quadrático médio (EQM) dos conjuntos de dados de treinamento [67].

No treinamento das RNAs utilizou-se o programa FFNN *neural network* contendo do algoritmo de treinamento supervisionado *Levenberg-Marquardt*, que foi desenvolvido por Huber [73]. A interrupção do treinamento foi realizada pelo método conhecido como parada antecipada, quando o EQM_T (erro quadrático médio dos dados de teste) começa a aumentar [68]. Para aplicação desse método os dados foram divididos em dois conjuntos, 70% deles foram destinados ao treinamento e o restante (30%) ao teste das RNAs.

Os modelos obtidos foram ilustrados na forma de gráficos que relacionam os dados experimentais com os dados preditos pela RNA. O valor do coeficiente de determinação (R^2) foi determinado para cada modelo.

A Figura 3.4 apresenta o fluxograma das etapas deste estudo.

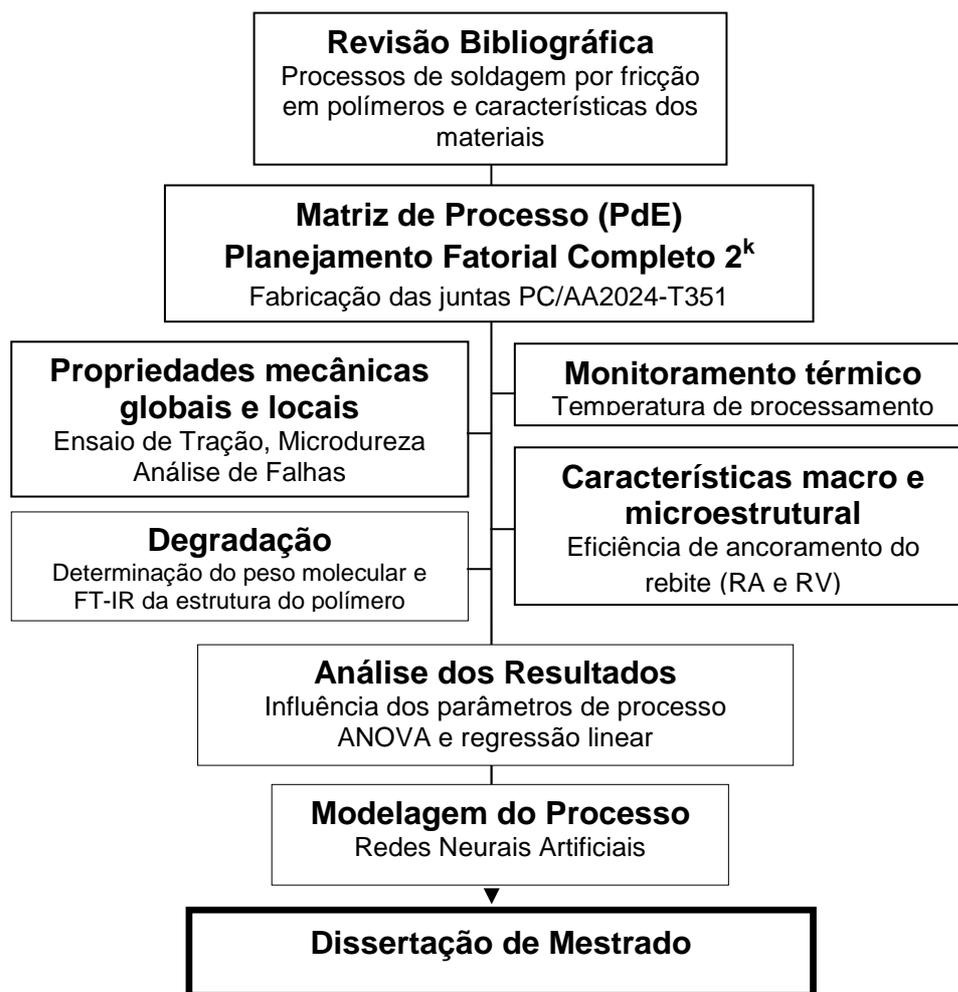


Figura 3.4: Fluxograma resumindo as principais etapas deste estudo.

3.2.1 Procedimento de produção das juntas PC/AA 2024-T351

As juntas do tipo inserto metálico de rebite de AA 2024-T351 inserido em uma placa de PC foram produzidas no laboratório da HZG utilizando-se um equipamento comercial de rebiteamento por fricção modelo RSM 400 produzido pela *Harms e Wende GmbH Co. KG*. Hamburg/Alemanha. Para isso, como mencionado anteriormente, considerou-se uma faixa de parâmetros de processo em que a velocidade de rotação variou entre 15000 e 21000 rpm, tempo de união entre 1 e 5 s e pressão de união entre 0,75 e 1,30 MPa.

O equipamento de soldagem possui três componentes principais: cabeçote RSM 400, gabinete e painel de controle, como mostrado na Figura 3.5. O cabeçote RSM 400 encontra-se acoplado ao motor em uma posição fixa

(horizontal), e é responsável pelo movimento rotacional e de avanço do rebite em direção ao porta amostra localizado na mesa em que a placa polimérica é fixada. Este componente possui um sistema de garras pneumáticas que viabiliza a fixação do rebite de forma eficiente. O gabinete e o painel de controle são os dispositivos dos quais se consegue ter o controle dos parâmetros de união. Estes são monitorados utilizando-se o software RQ fuzzy (Harms & Wende) que registra na forma de gráficos as variáveis e parâmetros do processo em função do deslocamento axial do rebite. Tais informações são importantes e podem ajudar a identificar problemas de mau uso durante a produção das juntas [31].

O equipamento também possui um sistema de medição de força utilizado para a obtenção do registro do torque friccional em função do tempo durante produção das juntas. Este suporte encontra-se fixado verticalmente sobre o porta amostra e alinhado com o centro do cabeçote RSM 400 na posição em que o rebite é fixado. As medidas de torque realizadas (T_z) neste estudo foram consideradas como sendo as medidas do torque friccional na ponta do rebite. Os valores obtidos de T_z permitiram quantificar variações na viscosidade do polímero e a taxa de plastificação da ponta do rebite associadas às diferentes combinações de parâmetros de processo. Todos dados foram obtidos usando o software Dynoware (Kistler Instrumenten AG).

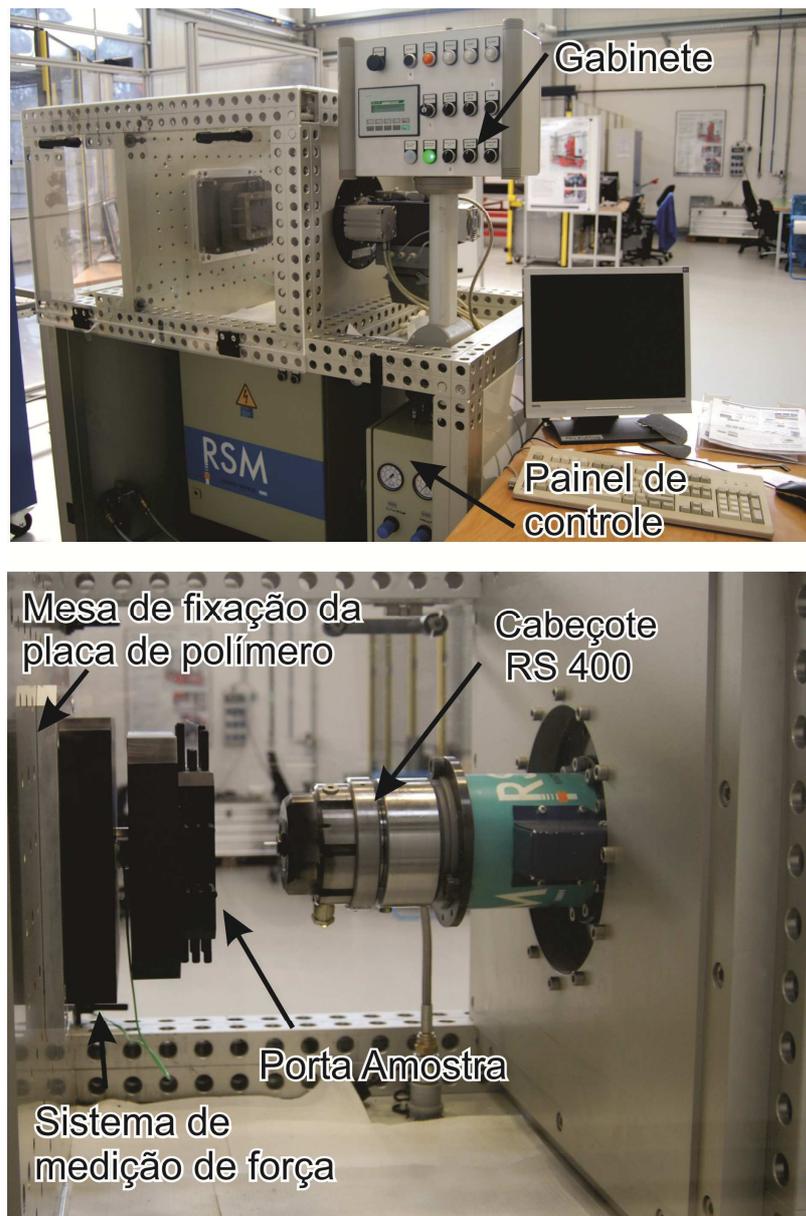


Figura 3.5: Esquema geral do equipamento de rebiteamento por fricção RSM 400 Harms & Wende, Alemanha.

3.2.2 Monitoramento da temperatura na área de união das juntas

Durante o processo de produção das juntas, variações de temperatura podem causar mudanças tanto na microestrutura do rebite metálico de alumínio quanto na placa polimérica de PC. O registro da temperatura de processo foi efetuado por uma câmera de infravermelho (*High-end Camera Series ImageIR*,

Infratech GmbH, Germany) programada para registrar a temperatura num intervalo de 200°C a 400°C. Os rebites de alumínio e as placas de PC foram pintados com tinta preta, a fim de minimizar distúrbios durante as medições associados com a baixa emissividade da liga de alumínio e a alta transparência do PC. As regiões na área de união não foram pintadas para se evitar contaminação devido a eventual mistura da tinta ao polímero amolecido. Os dados foram coletados a partir do volume de polímero amolecido das juntas e expelido como rebarba na região externa da mesma a uma distância de 300 mm (distância entre a área de registro da temperatura e o centro da lente da câmera) e a um ângulo de incidência de aproximadamente 15°, como mostrado na Figura 3.6A.

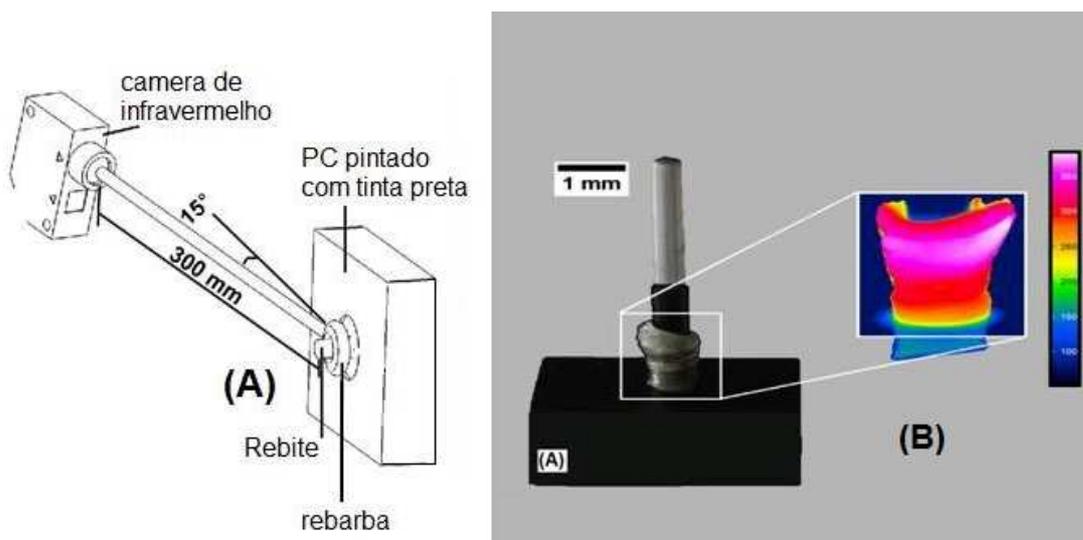


Figura 3.6: (A) Esquema de medição de temperatura por infravermelho na área de fricção (B) Fotografia de junta, com seu rebite e sua placa de PC pintados com tinta preta, juntamente com a imagem das temperaturas registradas no volume de polímero amolecido e expelido como rebarba.

Tal procedimento foi aplicado, pois na maioria dos processos de soldagem baseados em fricção a medição direta da temperatura real na área friccionada é muito complicada devido ao movimento relativo das superfícies em contato [31]. Considerando as curtas fases de aquecimento presentes no processo (1 a 5 s) e a baixa condutividade térmica do PC, pode-se assumir que

as máximas temperaturas médias obtidas na rebarba de polímero amolecido representam a temperatura média atingida na área friccionada. A Figura 3.6B mostra uma fotografia, obtida a partir das imagens da câmera com a temperatura máxima medida numa junta com o sistema de infravermelho.

3.2.3 Medidas de razão de aspecto de ancoramento (RA)

A qualidade das juntas foi avaliada em termos da eficiência de ancoramento do rebite através das medidas de razão de aspecto de ancoramento do rebite (RA), que é o quociente entre a profundidade (P) de penetração atingida pelo rebite no interior do polímero e a largura (L) da sua ponta deformada [12]. A análise de RA foi efetuada por meio de um corte realizado na secção transversal das juntas (Figura 3.7A) utilizando-se uma serra de baixa velocidade (*Buehler Isomet Low-Speed Saw, Germany*). A superfície obtida foi lixada e polida e, em seguida, fotografada com auxílio de um microscópio estéreo (Olympus). O valor de profundidade de penetração (P) da ponta do rebite foi medido por meio de uma linha vertical traçada através secção transversal da espessura da placa de PC, e o valor da largura de deformação (L) através de uma linha foi horizontal traçada por entre as extremidades de maior deformação da ponta do rebite. As linhas foram traçadas com auxílio do programa PHOTOSHOP CS5, como representado esquematicamente na Figura 3.7B.

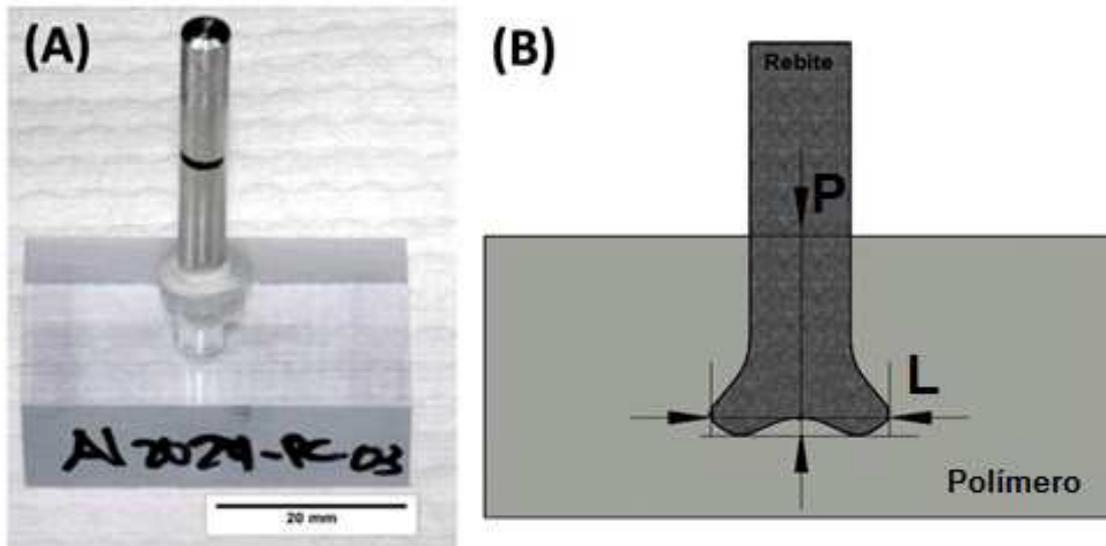


Figura 3.7: Seção transversal da região de ancoramento do rebite e a razão de aspecto RA definida como sendo a razão entre a profundidade de penetração (P) e a largura (L) da ponta do rebite no interior do polímero.

3.2.4 Caracterização microestrutural das juntas

As transformações microestruturais ocorridas nas zonas do metal termicamente afetada (MZAC) e termomecanicamente afetada (MZTMA) foram investigadas através da observação da secção transversal da junta em microscópio ótico (Leica Q550IW, *Germany*) após ataque eletrolítico em solução de Baker (200 mL de água destilada e 5 g de ácido fluorídrico 35%) [31]. Para isso, a preparação das amostras seguiu os seguintes procedimentos:

- ✓ Corte de precisão em baixa velocidade: as amostras foram seccionadas a dois milímetros além do centro da seção transversal do rebite metálico na direção da espessura da matriz polimérica utilizando uma serra a disco de diamante de baixa rotação (Buehler Isomet Low-Speed Saw), com resfriamento a água.
- ✓ Embutimento das amostras a frio com resina epóxi (EPOXIHARD, Buehler) com cura de baixa temperatura.
- ✓ Lixamento e polimento: foi utilizada uma politriz automática (PHOENIX 4000, Buehler) com etapas de lixamento em lixas de SiC (600, 800,

1200, 2500 grit), por 2 minutos, usando uma força de 50 Kgf. O polimento foi realizado em solução aquosa de sílica (0,05 μ m) por um tempo de aproximadamente 8 minutos.

3.2.5 Ensaios de microdureza Vickers

Ensaios de microdureza foram realizados nos materiais de base e na secção transversal da junta (região polimérica e metálica) para identificar alterações microestruturais nos materiais após o processamento e, com isso, definir as extensões das zonas termicamente e termomecanicamente afetadas do polímero (PZAC e PZTMA, respectivamente) e do alumínio (MZAC e MZTMA, respectivamente) na região de ancoramento do rebite metálico. Para isso, utilizou-se um microdurômetro Zwick/Roell ZHV. Na região do rebite metálico as medidas foram realizadas aplicando-se uma carga de HV 0,2 (200 g), tempo de 5 s e espaçamento entre endentações de 500 μ m de acordo com a ASTM E384-992e1 [74]. Na região polimérica foram efetuadas medidas na interface polímero-polímero da junta, localizada próxima da ponta deformada do rebite, aplicando-se uma carga de HV 0,05 (50 gramas), tempo de 15 segundos e espaçamento médio entre endentações de 300 μ m [75].

3.2.6 Análise da degradação termomecânica do PC: viscosimetria de solução diluída e FT-IR

Medidas de viscosidade de soluções diluídas e de espectroscopia na região do infravermelho (FT-IR) foram utilizadas para a avaliação da extensão da degradação termomecânica induzida pelo processo de rebitagem no PC. Essas análises foram conduzidas em amostras retiradas do material expelido durante a rebitagem por fricção. Tais procedimentos foram realizados nas condições de juntas que atingiram temperaturas de 310°C, 330°C, 360°C e 390°C. Essas condições são provenientes de juntas que apresentaram valor mínimo, intermediários e máximo de temperatura, respectivamente.

A viscosimetria foi utilizada para a determinação da massa molar viscosimétrica média (\overline{M}_v) do PC localizado na área de união das juntas. Os resultados obtidos foram comparados ao \overline{M}_v da placa de PC virgem.

As análises viscosimétricas foram realizadas em um viscosímetro Ubbelohde a 30°C, com soluções do PC em clorofórmio na faixa de concentração de 0,1 a 0,5 g/dL, segundo a norma ASTM 2857 [76]. Através deste método, a viscosidade intrínseca foi obtida por extrapolação gráfica, utilizando a equação de Huggins [77] (Equação 3.1):

$$\eta_{red} = \frac{\eta_{sp}}{c} = [\eta] + k'[\eta]^2 c \quad (3.1)$$

A viscosidade intrínseca $[\eta]$ é determinada a partir do coeficiente linear do gráfico de $\eta_{red} \times c$, ou seja, no limite de diluição infinita: $[\eta] = (\eta_{sp}/c)_{c \rightarrow 0} = (\ln \eta_{rel}/c)_{c \rightarrow 0}$, k' é a constante de Huggins. Na Tabela 3.5 estão listadas as definições de viscosidade utilizadas na Equação 3.1, sendo que t é o tempo de escoamento da solução polimérica e t_0 é o tempo do escoamento do solvente puro.

Tabela 3.5: Definições das viscosidades usadas na Equação 3.1

Nome	Equações das Viscosidades	Unidades
Viscosidade relativa	$\eta_r = \frac{t}{t_0}$	Adimensional
Viscosidade específica	$\eta_{sp} = \eta_r - 1$	Adimensional
Viscosidade reduzida	$\eta_{red} = \eta_{sp} - c$	dL/g

A massa molar viscosimétrica média \overline{M}_v do PC foi calculada por meio da Equação 3.3 de Mark-Houwink-Sakurada a partir dos dados de viscosidade

intrínseca (η) adotando os seguintes valores para as constantes: K igual a 12×10^{-3} dL/g e a igual a 0,82 [77].

$$[\eta] = K * (\overline{M}_v^a) \quad (3.2)$$

As análises de espectroscópicas no infravermelho (FT-IR) foram realizadas em um espectrômetro Thermo - modelo 4700, na região entre $4000-400 \text{ cm}^{-1}$, utilizando filmes fabricados a partir das soluções de PC usadas na análise viscosimétrica. Os espectros foram obtidos com resolução de 4 cm^{-1} a partir de 32 varreduras e processados em um gravador de dados Omnic.

3.2.7 Ensaio de tração

A resistência mecânica global das juntas foi avaliada através de ensaio mecânico de tração. Utilizou-se uma máquina universal (Zwick-Roell1484) equipada com célula de carga de 200 kN. Os testes foram efetuados a temperatura ambiente (21°C) em uma configuração de junta pontual do tipo *T-pull* fabricada com placas de PC com dimensões de 70 mm x 70 mm (Figura 3.8A) com rebites de geometria adaptada de acordo com a norma DIN EM 10002 [78], utilizando uma velocidade de travessa de 2 mm/min. Foram executados quatro ensaios para cada combinação de parâmetros de processo. Utilizou-se um suporte especial fabricado em trabalhos anteriores para fixação da placa de PC na junta (Figura 3.8B) [31].

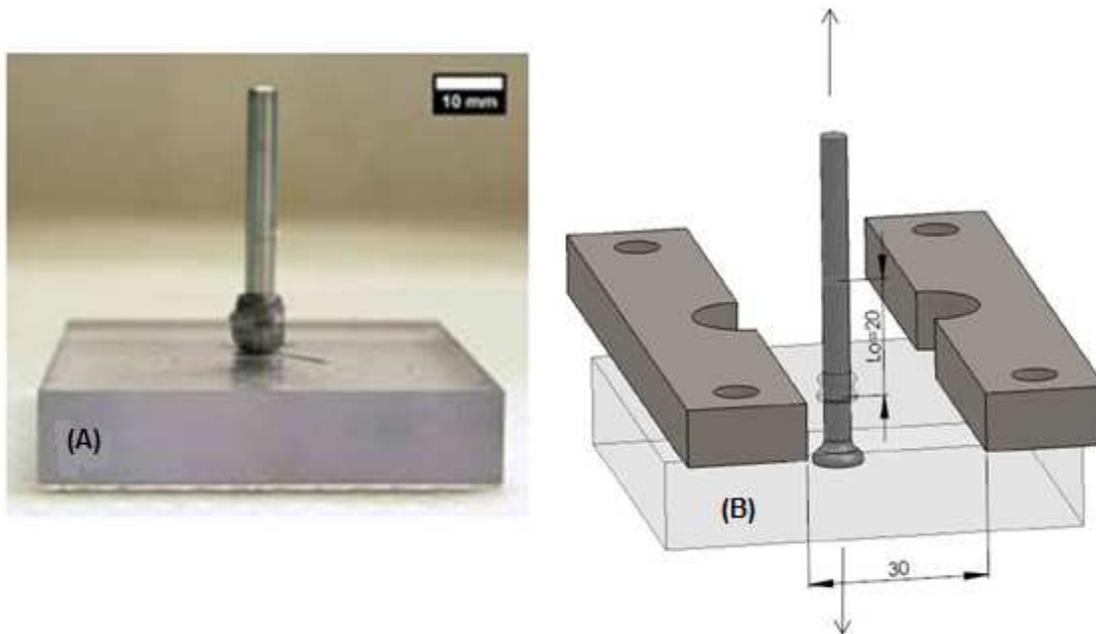


Figura 3.8: (A) Configuração do tipo *T-pull* do corpo de prova PC/AA 2024-T351. (B) Representação esquemática do suporte de fixação da placa polimérica utilizado no ensaio de tração.

3.2.8 Análises de falhas

As amostras fraturadas durante o ensaio de tração foram fotografadas para análise dos tipos de fraturas e os detalhes das suas superfícies de fratura foram observados por microscopia ótica (MO) e de varredura (MEV).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Definição do intervalo de união via rebitagem por fricção

O estudo de viabilidade de fabricação de juntas pontuais de PC/AA 2024-T351 por rebitagem por fricção envolveu primeiramente a determinação de um intervalo de parâmetros de processo que conduzissem à soldabilidade das juntas, como descrito na Secção 3.2. A profundidade (P), largura (L) e razão de aspecto de ancoramento do rebite (RA) na matriz de PC foram os critérios adotados para tal análise.

Inicialmente, variou-se a velocidade de rotação entre 18000 e 21000 rpm, fixando-se o tempo de união em 4 s e a pressão de união em 0,90 MPa. Os resultados obtidos (Figura 4.1) mostram que os valores de profundidade de penetração do rebite na placa (P) tendem a aumentar com a velocidade de rotação, visto que esta resulta em um maior aporte térmico, o que favorece o aumento da temperatura de processo e a diminuição da viscosidade do polímero, resultando em maior penetração [79]. Os valores da largura da ponta do rebite (L) mantiveram-se praticamente constantes. Tal comportamento resultou em baixos valores da razão de aspecto de ancoramento (RA), evidenciando a pouca influência da velocidade de rotação no volume de material metálico plastificado na ponta do rebite no intervalo de combinações de parâmetros de processo estudado.

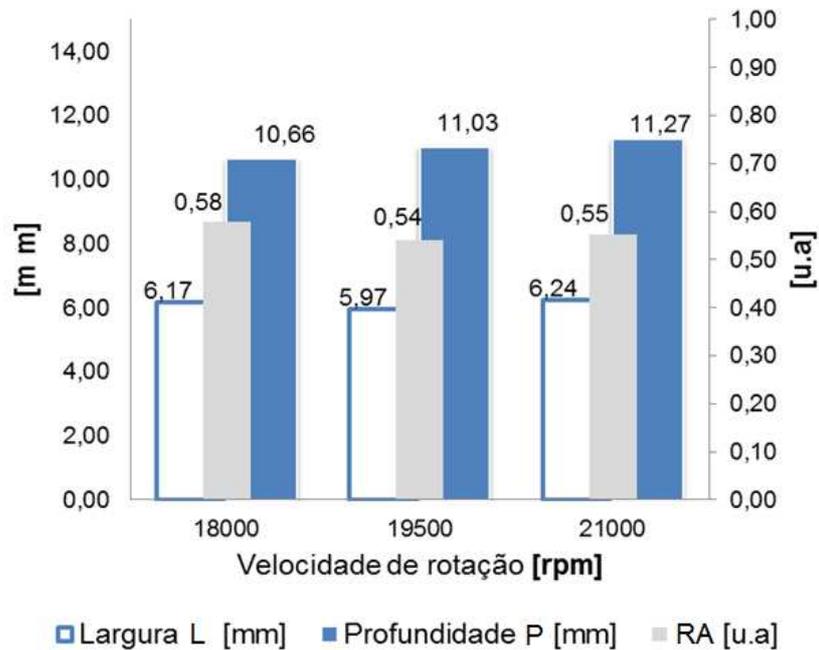


Figura 4.1: Comportamento da largura (L), profundidade (P) e razão de aspecto de ancoramento do rebite (RA) na matriz de PC de juntas fabricadas em um intervalo de velocidade de rotação variando entre 18000 e 21000 rpm, mantendo-se fixos o tempo de união em 4 s e a pressão de união em 0,90 MPa.

Quando o tempo de união foi diminuído para 3 s e a pressão de união aumentada para 1,05 MPa, e estreitando-se o intervalo de variação da velocidade de rotação (19000-21000 rpm) em comparação ao evento anterior da Figura 4.1, ocorreu o aumento dos valores de L e P com aumento da velocidade de rotação, como ilustrado na Figura 4.2. Essa diferença é possivelmente devida ao incremento da pressão de união de 0,90 MPa para 1,05 MPa, ou seja, maiores pressões de união induziram uma melhor eficiência de deformação e penetração do rebite na matriz, evidenciados pelos maiores valores de RA, que variaram entre 0,80 e 0,79 em comparação com os valores de 0,54 e 0,58 observados para as amostras produzidas com 4 s e 0,90 MPa.

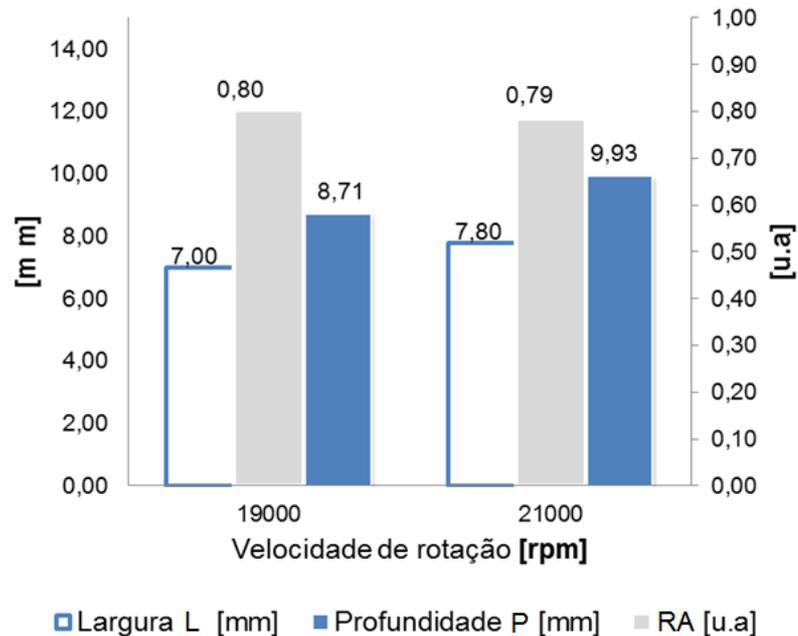


Figura 4.2: Comportamento da largura (L), profundidade (P) e razão de aspecto de ancoramento do rebite (RA) na matriz de PC de juntas fabricadas em um intervalo de velocidade de rotação variando entre 19000-21000 rpm, mantendo-se fixos o tempo de união em 3 s e a pressão de união em 1,05 MPa.

Na análise da influência da pressão de união sobre a RA fixou-se o valor mais alto para a velocidade de rotação (21000 rpm) e o mais baixo para o tempo de união (3 s), e variou-se a pressão num intervalo de 1,0 a 1,15 MPa. Observou-se um pequeno aumento dos valores profundidade de penetração (P) com a pressão de união até 1,10 MPa, e depois disso, ocorreu uma pequena queda (Figura 4.3). Os valores de L não apresentaram grandes variações com a pressão de união, portanto, os valores de RA foram pouco afetados.

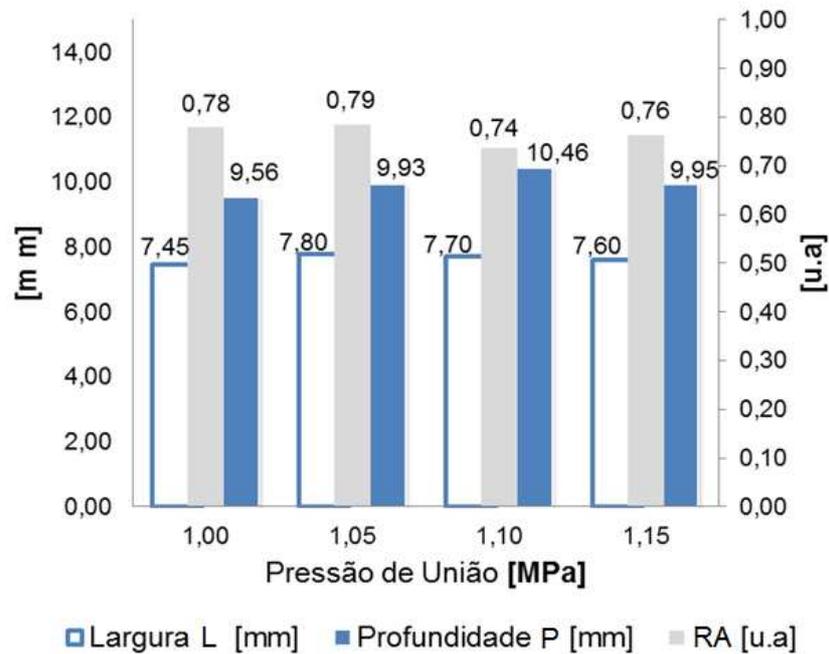


Figura 4.3: Comportamento da largura (L), profundidade (P) e razão de aspecto de ancoramento do rebite (RA) na matriz de PC de juntas fabricadas em um intervalo de pressão de união variando entre 1,00 e 1,15 MPa, mantendo-se fixos o tempo de união em 3 s e a velocidade de rotação em 21000 rpm.

Assim, a partir das características macroscópicas das juntas obtidas no intervalo de parâmetros de união estudados, observou-se que a combinação de altos valores de velocidade de rotação (VR) e pressão de união (PU) junto a baixos valores de tempo de união (TU), resultou em maiores valores de RA, ou seja, maiores valores de largura de deformação e profundidade de penetração da ponta do rebite no interior do polímero. A Figura 4.4 apresenta macrografias realizadas na seção transversal das juntas que apresentaram bom ancoramento (valores de RA próximos a 1) do rebite na chapa de PC.

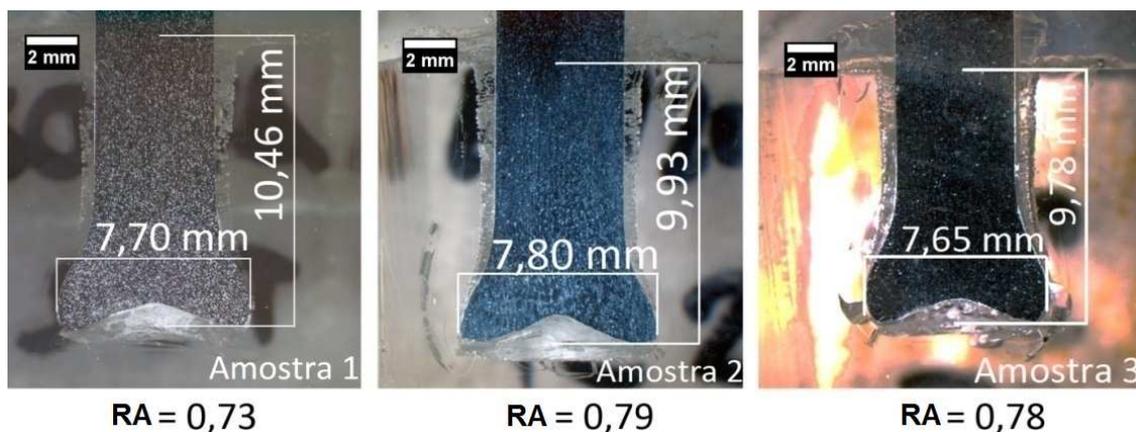


Figura 4.4: Macrografias com os valores de L e P para as juntas PC/AA 2024 T351 que apresentaram altos valores de RA. Amostra 1: 21000 rpm; 3 s; 1,10 MPa. Amostra 2: 21000 rpm; 3 s; 1,05 MPa. Amostra 3: 19000 rpm; 3 s; 1,10 MPa.

A partir da análise dos valores de RA (0,54 a 0,8) do rebite em função da variação dos parâmetros de processo estudados, conseguiu-se determinar o intervalo de união por rebiteagem por fricção para o sistema PC/AA 2024-T351, no qual a zona de ancoramento é formada: velocidade de rotação variando entre 18000 e 21000 rpm, tempo de união entre 3 e 4 s e pressão de união entre 0,75 e 1,10 MPa.

4.2 Análise da influência dos parâmetros de processo sobre as características gerais das juntas

Nesta seção, a avaliação da influência dos parâmetros de processo sobre as características gerais das juntas produzidas foi abordada através do planejamento experimental 2^3 (Seção 3.2).

4.2.1 Temperatura do processo

A temperatura no processo de rebiteagem por fricção é uma variável que está diretamente relacionada às condições de fricção e geração de calor que promovem o aquecimento, a plastificação e a união das superfícies dos

materiais [75]. Neste estudo, as temperaturas máximas alcançadas na região de união das juntas durante a rebitagem por fricção de confecção foram medidas no polímero amolecido e expelido como rebarba na região externa das juntas de acordo com o esquema descrito na Figura 3.6B (Seção 3.2.3). A Figura 4.5A mostra um exemplo do monitoramento de temperatura realizado em uma junta confeccionada na condição 2 a partir dos seguintes parâmetros de processo: 18000 rpm, 3 s e 1,10 MPa. Observa-se o surgimento de um pico de temperatura nos três primeiros segundos do processo de união que está relacionado com as elevadas taxas de aquecimento produzidas na área friccionada. Em seguida, há um decréscimo lento de temperatura devido às baixas taxas de resfriamento presentes na etapa de consolidação da junta, que estão relacionadas com a baixa condutividade térmica do polímero.

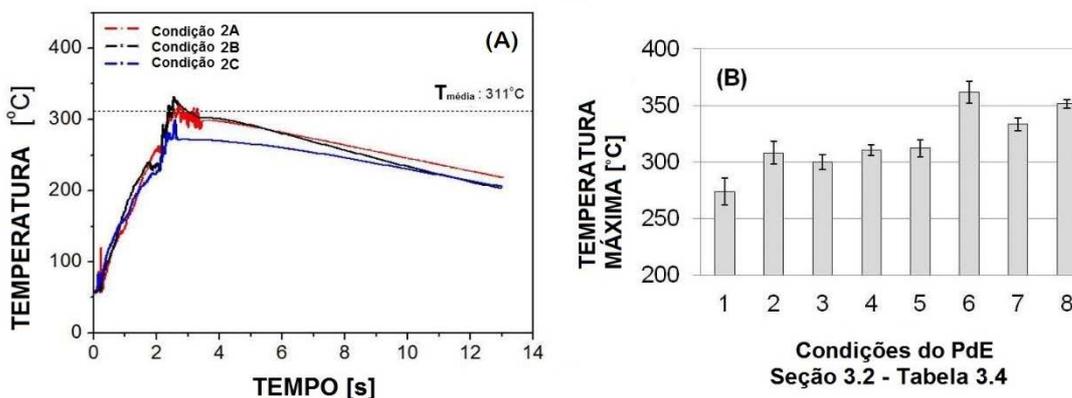


Figura 4.5: (A) Exemplo da curva média de temperatura indicando a temperatura máxima obtida para uma junta produzida com VR = 21000 rpm, TU = 3 s e PU = 0,75 MPa e (B) as temperaturas máximas médias obtidas para as juntas PC/AA 2024-T351 analisadas no estudo do planejamento experimental 2^3 (Tabela 3.4).

A Figura 4.5B apresenta os valores médios das temperaturas máximas alcançadas na área friccionada de juntas de PC/AA 2024-T351 fabricadas a partir das combinações de parâmetros de processo definidas na Tabela 3.4 da Seção 3.2. As temperaturas máximas médias registradas estiveram entre 280°C e 360°C. Essa faixa de temperatura está entre 56% a 72% do intervalo

de temperatura de fusão do rebite de alumínio, que é de 500 a 640°C [22] e acima da temperatura de transição vítrea do PC de 150°C. Isso mostra que o calor friccional gerado na área de união foi suficientemente alto para provocar a plastificação do metal e amolecimento do polímero e permitir o ancoramento efetivo do rebite de alumínio no interior da placa de PC.

A Figura 4.6 apresenta os efeitos dos parâmetros de união na temperatura alcançada. A partir da diferença entre a maior e a menor temperatura média obtida para cada parâmetro de processo separadamente, e comparando-se com a média das médias, foi possível visualizar o efeito de cada parâmetro de união na temperatura, seguindo abordagem similar adotada por Khan *et al.* [80]. A magnitude desse efeito foi quantificada pela inclinação apresentada pelas retas dos gráficos. Quanto maior a inclinação da reta, maior é a variação causada nos valores da temperatura.

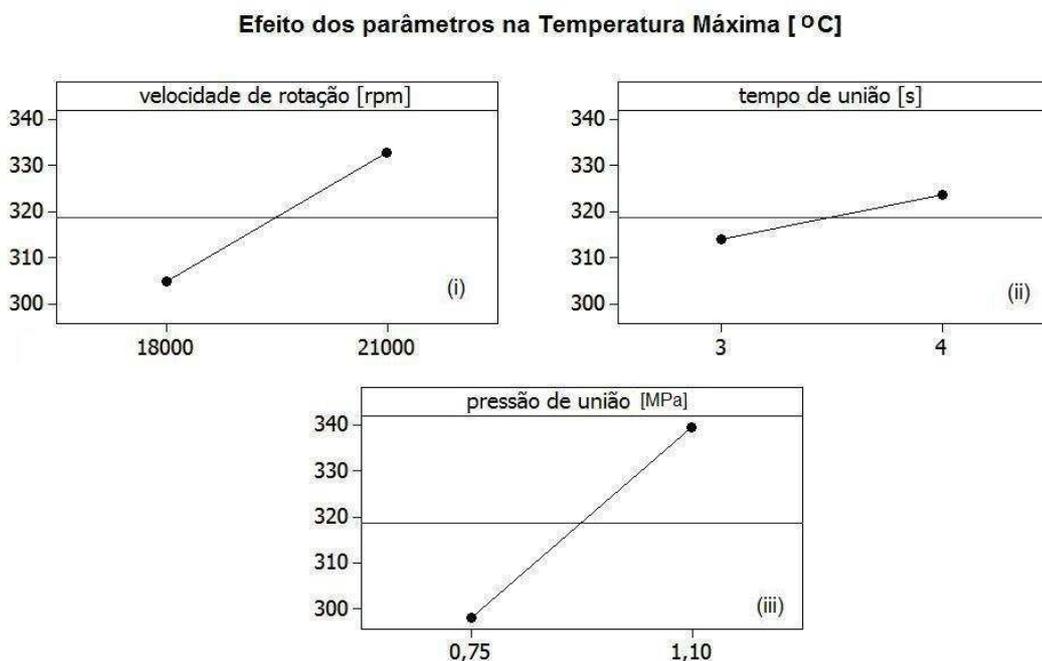


Figura 4.6: Efeito principal de cada parâmetro de processo na temperatura máxima na área de união das juntas PC/AA 2024-T351.

Deste modo, considerando o intervalo de variação dos parâmetros investigado, observou-se que as juntas fabricadas utilizando níveis máximos de

velocidade de rotação de 21000 rpm (Figura 4.6i), tempo de união de 4 s (Figura 4.6ii) e pressão de união de 1,10 MPa (Figura 4.6iii) foram as que apresentaram as maiores taxas de aquecimento e, conseqüentemente, os maiores valores de temperatura na área de união. A pressão de união foi o parâmetro que exerceu maior efeito sobre esse comportamento, resultando em um acréscimo de 15% nos valores de temperatura (de 295°C para 340°C), de acordo com o gráfico da Figura 4.7. No entanto, esse acréscimo foi resultado de uma variação grande de 47% nos valores de pressão de união (de 0,75 para 1,10 MPa), considerada bastante superior em relação à variação pequena, de 17% dos valores de velocidade de rotação (de 18000 para 21000 rpm), que resultou em um acréscimo de 10% nos valores de temperatura (de 305°C para 335°C). Por final, um aumento de 33% no tempo de união (de 3 para 4 s) levou somente a cerca de 3% no aumento de temperatura. Em outras palavras, a conversão de energia friccional em calor ocorreu de forma mais rápida quando a velocidade de rotação foi aumentada em relação ao aumento da pressão e tempo de união, indicando uma relação direta entre a velocidade de rotação e a geração de calor durante o processo.

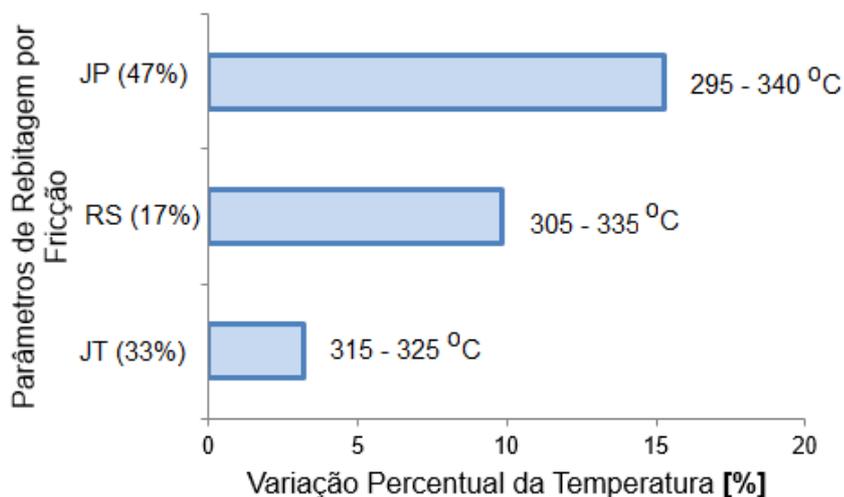


Figura 4.7: Variação percentual da temperatura em função da variação dos parâmetros de rebiteamento por fricção.

Esse efeito já havia sido observado por Amancio [81] em seus estudos com juntas rebitadas de PEI/AA 2024-T351, e justifica-se pelo calor gerado na área de união das juntas ser proveniente de mecanismos de aquecimento por fricção Coloumbiana do tipo metal-polímero (F-I) e dissipação viscosa do cisalhamento interno polímero-polímero (F-II e F-III) [31]. Desse modo, quanto maior a velocidade de rotação, maior é a taxa de geração de calor friccional no estado sólido, devido ao maior atrito entre polímero e metal e também maior a geração de calor viscoso produzido pelo escoamento de uma maior quantidade de polímero fundido.

A pequena influência da pressão de união na geração de calor quando comparada à velocidade de rotação deve-se às menores taxas de calor geradas pela deformação imposta pelo movimento axial de inserção do rebite. As altas temperaturas registradas nas juntas confeccionadas com altos níveis de pressão podem ser justificadas pelo maior volume de polímero amolecido expelido para fora da área de união. Este fenômeno favorece o contato do rebite com o polímero frio no interior da placa polimérica e pode resultar no aumento do aquecimento friccional devido ao maior atrito.

Apesar de trabalhos anteriores indicarem que o tempo de união tem uma maior influência no aumento do aporte térmico teórico, devido à contribuição do tempo de fricção [33], esse pode resultar na prática em valores de temperaturas diferentes, dependendo dos valores de parâmetros de processo adotados. O processo de geração de calor por dissipação viscosa depende diretamente da viscosidade do polímero sob fricção [82]. A viscosidade em contrapartida é dependente da taxa de cisalhamento e temperatura local. Desse modo, sob efeito de altas taxas de cisalhamento (por exemplo, relativas às altas taxas de rotação) um aumento no tempo de união poderá aumentar a temperatura local do polímero, reduzindo a viscosidade. Portanto, a dissipação viscosa diminui e a temperatura local tende a diminuir. Esse é uma explicação possível para a menor contribuição do TU no aumento da temperatura.

A Figura 4.8 mostra o gráfico de efeitos de interação dos parâmetros de união sobre a temperatura da junta. A diferença de inclinação das retas

constitui uma medida visual que representa a existência de interação entre os parâmetros de processo. Quanto maior essa diferença maior é a importância da interação entre os parâmetros, enquanto que o paralelismo das retas é sinônimo da inexistência de interação [83].

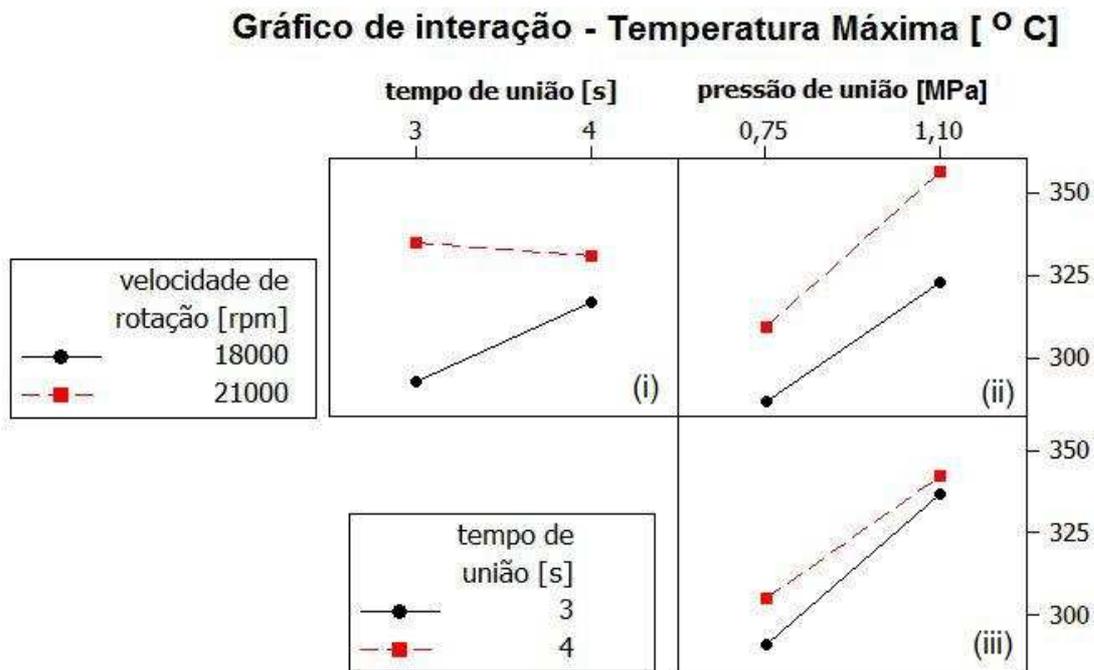


Figura 4.8: Gráficos da interação entre dois dos parâmetros de união para a resposta temperatura máxima média.

A análise dos gráficos da Figura 4.8 mostra que somente a interação entre a velocidade de rotação e o tempo de união (Figura 4.8i) foi significativa sobre os valores da temperatura atingida na área de união. Verificou-se que a variação da temperatura, com o aumento do tempo de união (-1→+1), foi positiva e apresentou maior magnitude em juntas produzidas com nível baixo de velocidade de rotação (18000 rpm), enquanto que o contrário (21000 rpm) resultou em pouca variação nos valores de temperatura. Isso é devido a menor taxa de aquecimento na área de união quando velocidades menores são utilizadas na fabricação das juntas (menores taxas de cisalhamento impostas). Nessas condições as temperaturas são menores, por isso, a diferença na geração de quantidade de calor é mais significativa com o aumento do tempo

de aquecimento. O mesmo não acontece quando se utiliza velocidades maiores, visto que nessas condições são altas as taxas de aquecimento, resultando na rápida elevação da temperatura na área de união e, desse modo, a diferença da quantidade de calor gerada com o aumento do tempo de aquecimento na área de união é pouco significativa.

A interação entre a velocidade de rotação e a pressão de união (Figura 4.8ii), bem como, entre o tempo e a pressão de união (Figura 4.8iii) também foram detectadas, porém, ambas as interações não foram tão significativas. Houve pouca diferença na inclinação entre as retas, ou seja, o efeito de um parâmetro praticamente pouco difere com a variação do nível do outro sobre os valores de temperatura.

Para confirmar a importância relativa dos parâmetros de processo e suas interações sobre a temperatura atingida na área de união foi realizada a análise de variância (ANOVA). O procedimento envolve o uso da estatística do teste F, no qual os parâmetros e as interações que apresentam razão F_0 maior que a estatística F-crítico, foram os fatores considerados mais importantes sobre o valor da temperatura. O valor de F-crítico foi obtido usando as tabelas estatísticas existentes [84], para o nível de 5% de probabilidade ($\alpha = 0,05$), considerando os graus de liberdade (G.L) de cada fonte de variação e o do modelo ou resíduo. Os resultados da ANOVA são apresentados na Tabela 4.1.

A partir da ANOVA foi possível realizar o cálculo da porcentagem de contribuição (P%) que é a função da soma de quadrados (SQ) que representa o poder relativo de cada parâmetro e suas interações em reduzir a variação total [83,84]. Os valores obtidos estão contidos no gráfico na Figura 4.9.

Os dados obtidos confirmam o que foi observado nas Figuras 4.6 e 4.8. A pressão de união (TU), seguida da velocidade de rotação (VR), foram os parâmetros que mais contribuíram individualmente sobre o valor de temperatura atingida na área de união da junta. Em terceiro lugar, apareceu a interação secundária entre a velocidade de rotação (VR) e o tempo de união (TU) e, por último, o tempo de união (TU), ambos com valores menores que o erro percentual, o que evidencia, mais uma vez, a sua menor relevância na atual avaliação. Os demais fatores considerados não apresentaram importância

estatística significativa, dentro do intervalo de parâmetros de processo considerado neste estudo.

Tabela 4.1: ANOVA para avaliação da influência dos parâmetros de rebitegem por fricção sobre a temperatura máxima da junta.

Fonte	G.L	SQ	MQ	Valor F_0
Velocidade de rotação [VR]	1	5169	5169	55
Tempo de união [TU]	1	734	734	8
Pressão de união [PU]	1	10909	10909	116
VR x TU	1	1333	133	14
VR x PU	1	121	121	1
TU x PU	1	177	177	2
VR x TU x PU	1	4	4	0,04
Erro	16	1506	94	
Total	23	19953		F-crítico ($F_{0,05;1;16}$) 4,5

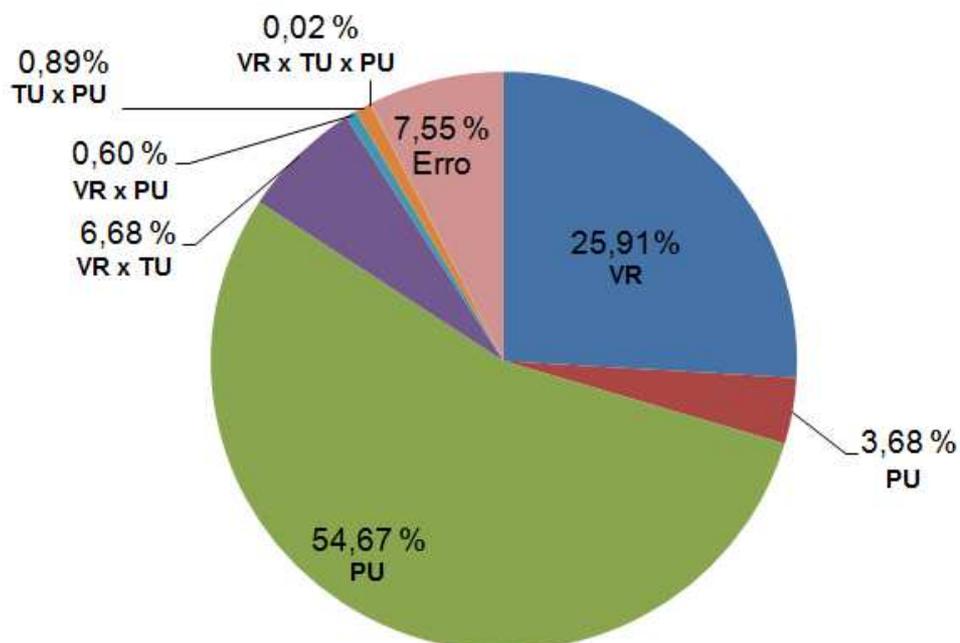


Figura 4.9: Contribuição percentual (P%) de cada parâmetro sobre a temperatura máxima média atingida na área de união dentro do PdE estudado.

4.2.2 Razão de aspecto de ancoramento (RA)

A razão de aspecto (RA) da zona de ancoramento (ZA) é uma estimativa da qualidade de fixação do rebite metálico deformado e ancorado no polímero [12]. A zona de ancoramento (ZA) é a região em que ocorre deformação da ponta do rebite, e este geralmente assume um formato paraboloidal, com diâmetro maior que o original. Essa característica geométrica é determinada pela quantidade de calor friccional e a força de deformação aplicada ao rebite durante a etapa de forjamento, ou seja, pela combinação eficiente de parâmetros de processo juntamente com as propriedades características dos materiais a serem unidos - condutividade térmica, expansão térmica, viscosidade do fundido, entre outras. Esse comportamento continua não inteiramente compreendido. Portanto, está fora do escopo desse trabalho, não sendo abordado.

A Figura 4.10 apresenta os valores médios de RA obtidos a partir de medidas realizadas na secção transversal das juntas produzidas utilizando as oito combinações de parâmetros de processo definidas na Tabela 3.4 da Seção 3.2. Os valores obtidos no cálculo estão contidos no Apêndice B.

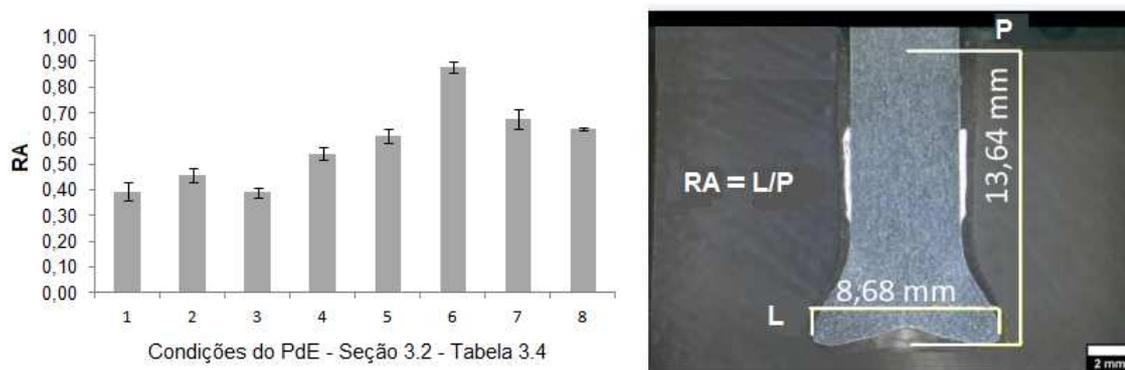


Figura 4.10: Razão de aspecto média (RA) do rebite nas juntas fabricadas a partir das oito condições de processamento definidas no PdE.

Os resultados obtidos permitiram avaliar qual o parâmetro de processo apresentou efeito mais significativo sobre RA. A avaliação foi feita através da

análise dos gráficos de efeitos de cada parâmetro de processo mostrados na Figura 4.11.

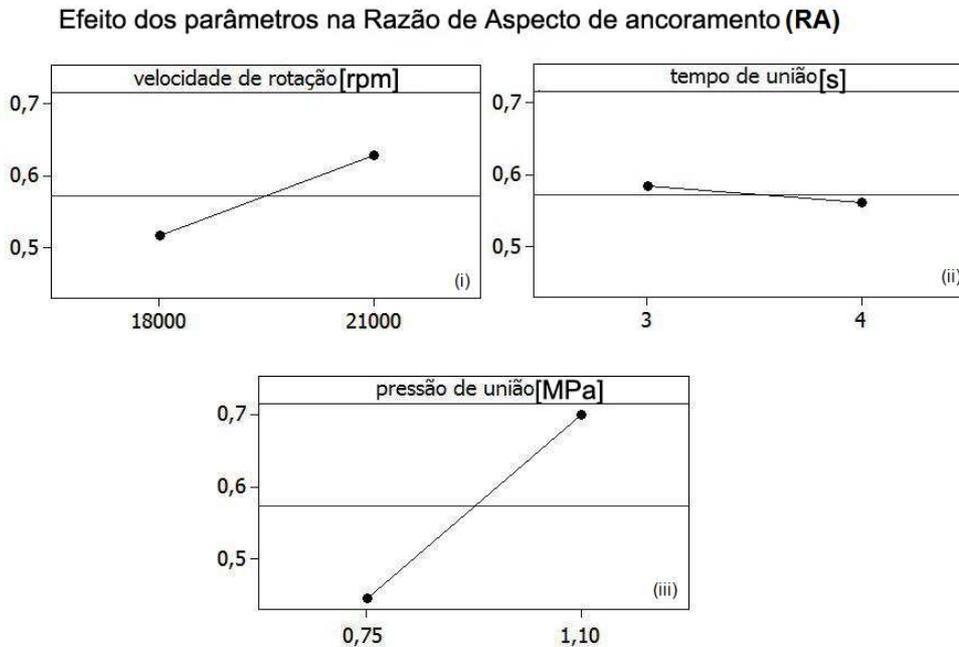


Figura 4.11: Efeito principal de cada parâmetro de processo na razão de aspecto de ancoramento (RA) das juntas de PC/AA 2024-T351.

Notou-se que as juntas fabricadas com níveis máximos de velocidade de rotação (Figura 4.11i) e pressão de união (Figura 4.11iii) foram as que apresentaram os maiores valores de RA. Essas condições proporcionaram maior quantidade de calor na área de união devido ao maior atrito entre polímero-metal, fenômeno este que nas fases iniciais de união, reduziu a viscosidade do polímero facilitando a penetração do rebite. Posteriormente, essas condições aumentaram o nível de plastificação da ponta do rebite, que sob uma maior pressão de união, sofreu maior deformação plástica no interior da placa polimérica, durante a fase de forjamento. O tempo de união (Figura 4.11ii) afetou muito pouco os valores de RA (pouca variação do nível de plastificação na ponta do rebite), seguindo a tendência observada para a temperatura processual.

Na Figura 4.12 foram analisados os efeitos das interações entre os parâmetros sobre a razão de aspecto de ancoramento (RA).

Gráfico Interação - Razão de Aspecto de Ancoramento (RA)

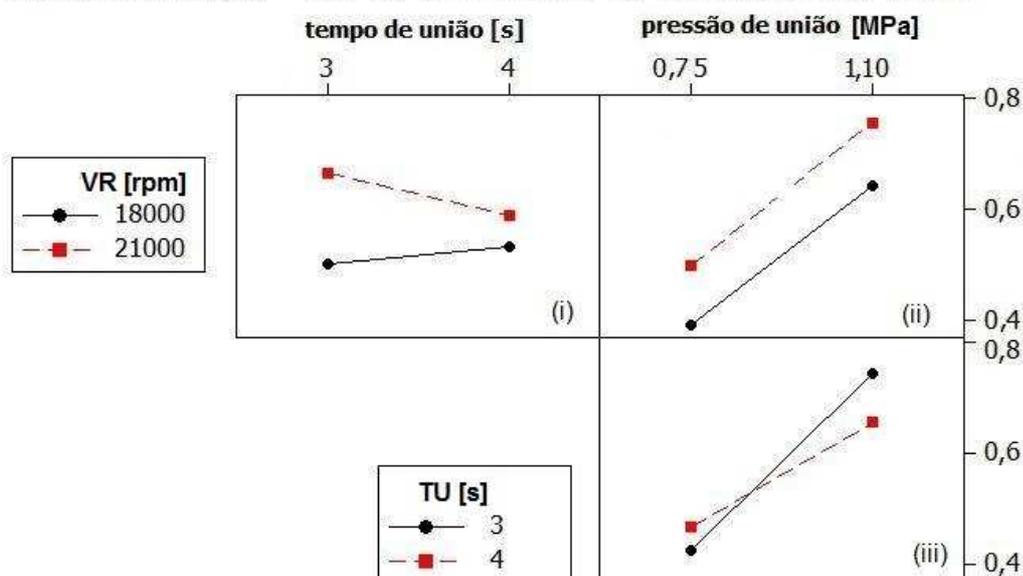


Figura 4.12: Gráficos de interação entre dois dos parâmetros de processo sobre a razão de aspecto de ancoramento (RA).

Verifica-se no gráfico de interação entre tempo de união e velocidade de rotação (Figura 4.12i) que em níveis altos de velocidade de rotação (21000 rpm) o aumento do tempo de união (3 s para 4 s) provoca redução da RA (10%), enquanto que em níveis baixos (18000 rpm) ocorre o aumento de RA (36%). Tal comportamento é resultado da elevada energia friccional gerada pela utilização de altos níveis de velocidade de rotação que geram uma redução drástica da viscosidade do polímero fundido localizado em torno da ponta do rebite, acarretando no deslizamento entre as superfícies dos materiais a serem unidos, diminuindo o atrito na área de união. Tais fenômenos contribuem na redução da taxa de geração de calor friccional e, conseqüentemente, afetam o nível de plastificação do material metálico, resultando na menor eficiência de ancoramento da ponta do rebite no interior do polímero. Pelo mesmo motivo, também, observa-se na Figura 4.12iii que o aumento da pressão de união de 0,75 MPa para 1,10 MPa provocou aumento menor (menor inclinação da curva) dos valores da resposta RA em altos níveis (4 s) de tempo de união que em baixos níveis (3 s).

No processo de rebiteagem por fricção a diminuição da viscosidade dos materiais a serem unidos pode ser visualizada através de reduções na intensidade do torque friccional (T_z) na ponta do rebite metálico durante o processo [31]. A Figura 4.13 apresenta os gráficos com os valores de torque (T_z) em função do tempo de união para as juntas produzidas com altos níveis de pressão de união (1,10 MPa). No primeiro gráfico são mostrados os valores de T_{z-III} (Figura 4.13A) que representam o nível de amolecimento do polímero formado em torno da ponta do rebite na etapa F-III (dissipação viscosa em estado estacionário) do processo. Já no segundo gráfico são mostrados os valores de T_{z-IV} , correspondentes ao nível de plastificação na ponta do rebite na F-IV (fase de forjamento do rebite), que permitem quantificar a resistência do rebite contra a força de deformação aplicada durante a etapa de forjamento. Ambos os torques estão diretamente associados à variação da viscosidade dos materiais durante a união.

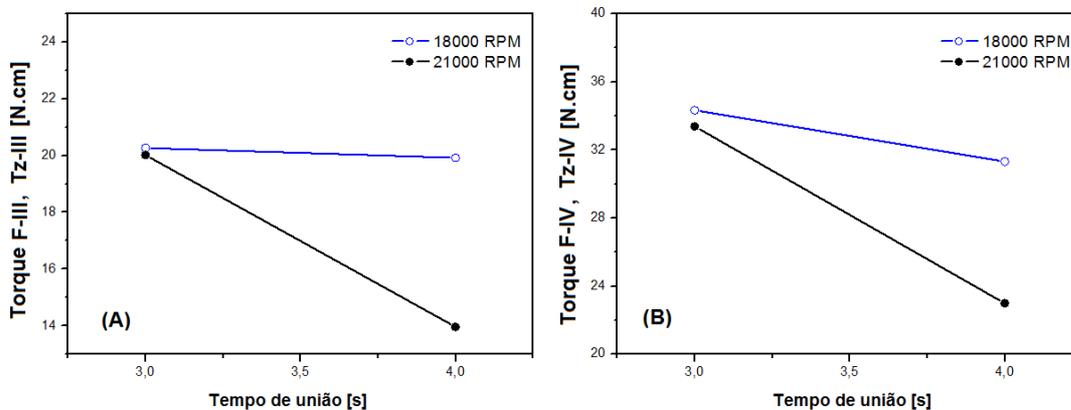


Figura 4.13: Valores de torque friccional (T_z) durante a confecção das juntas com nível alto de pressão de união. (A) T_{z-III} torque friccional na F-III (fase dissipação viscosa em estado estacionário) (B) T_{z-IV} torque friccional na F-IV (forjamento da ponta do rebite).

Nota-se que os torques T_{z-III} e T_{z-IV} apresentaram maior redução com o aumento do tempo de união nas juntas produzidas com o nível mais alto de velocidade de rotação (21000 rpm). Tal comportamento confirma que nessas condições a viscosidade do polímero fundido localizado em torno da ponta do

rebite é reduzida drasticamente, e justifica a menor eficiência de ancoramento da ponta do rebite, refletida nos baixos valores de RA.

Na Tabela 4.2 é exibida a análise de variância (ANOVA) dos valores médios da razão de aspecto de ancoramento (RA).

Tabela 4.2: ANOVA para avaliação da influência dos parâmetros de processo sobre a razão de aspecto de ancoramento (RA).

Fonte	G.L	SQ (10^{-2})	MQ (10^{-2})	Valor F_0
Velocidade de rotação [VR]	1	8,6	8,6	72
Tempo de união [TU]	1	0,1	0,1	0,9
Pressão de união [PU]	1	42	42	347
VR x TU				
VR x PU	1	2,3	2,3	19
TU x PU	1	0,02	0,02	0,1
VR x TU x PU	1	3,4	3,4	28,1
Velocidade de rotação [VR]	1	4,9	4,9	41
Erro	16	1,9	0,12	
				F-crítico
Total	23	63		($F_{0,05;1;16}$) 4,5

A partir da ANOVA realizou-se o cálculo da contribuição percentual (P%) individual de cada fator sobre AR (Figura 4.14). Nota-se que a pressão de união (PU) foi o fator que exerceu maior efeito sobre os valores da RA. Quanto maior a pressão normal distribuída na área friccionada, maior é a deformação da ponta do rebite no interior do polímero, fenômeno esse reportado por Altmeyer *et al.* [33]. O segundo fator de importância foi à velocidade de rotação (VR). O terceiro fator foi o efeito da interação entre a velocidade de rotação (VR), tempo (TU) e pressão de união (PU). Em seguida, apareceram às interações secundárias entre o tempo (TU) e pressão de união (PU), velocidade de rotação (VR) e tempo de união (TU). O parâmetro tempo de união (TU) e a interação entre a velocidade de rotação (VR) e pressão de união (TU) não foram estatisticamente significantes sobre a RA.

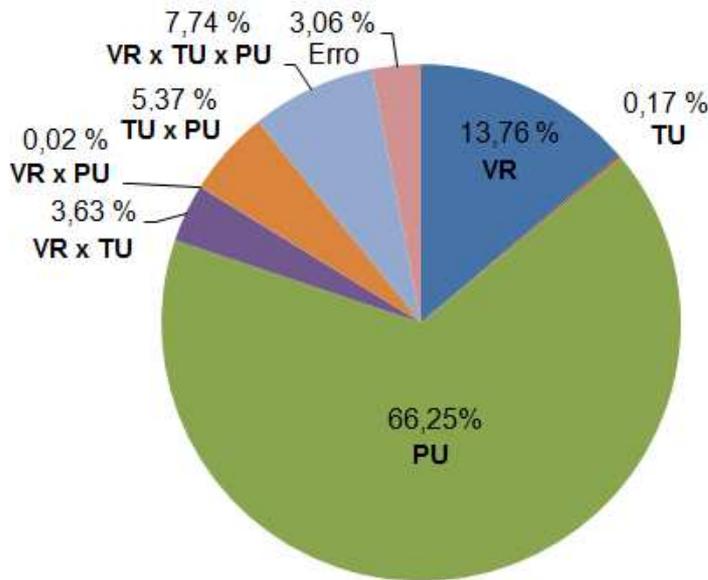


Figura 4.14: Contribuição percentual (P%) de cada parâmetro sobre a razão de aspecto de ancoramento (RA).

4.2.3 Caracterização microestrutural

A microestrutura de juntas fabricadas por rebiteagem por fricção é influenciada significativamente pelo aporte térmico e deformação impostos durante o processo de união, como descrito na Seção 4.2.2 e na referência [12]. A análise metalográfica (Figura 4.15) realizada na região da secção transversal de uma junta confeccionada na condição 20000 rpm, 3 s e 0,95 MPa identificou a presença de transformações metalúrgicas nas diferentes zonas microestruturais típicas do processo, situadas na região de ancoramento do rebite na placa polimérica de PC.

As Figuras 4.15B e 4.15C mostram a zona termomecanicamente afetada da ponta deformada do rebite (MZTMA), contida na zona de ancoramento (ZA). Observa-se que nessa região ocorreu o realinhamento dos grãos na direção do fluxo de material forjado e plastificado, bem como, o refinamento parcial de grãos, fenômenos metalúrgicos característicos de recristalização e recuperação dinâmica em ligas AA 2024-T351 [31]. Na zona termicamente afetada do metal (MZAC) (Figura 4.15A) não foi visualizada

alteração microestrutural do tipo variação do tamanho de grão em relação ao material de base (Figura 3.2 da Seção 3.1).

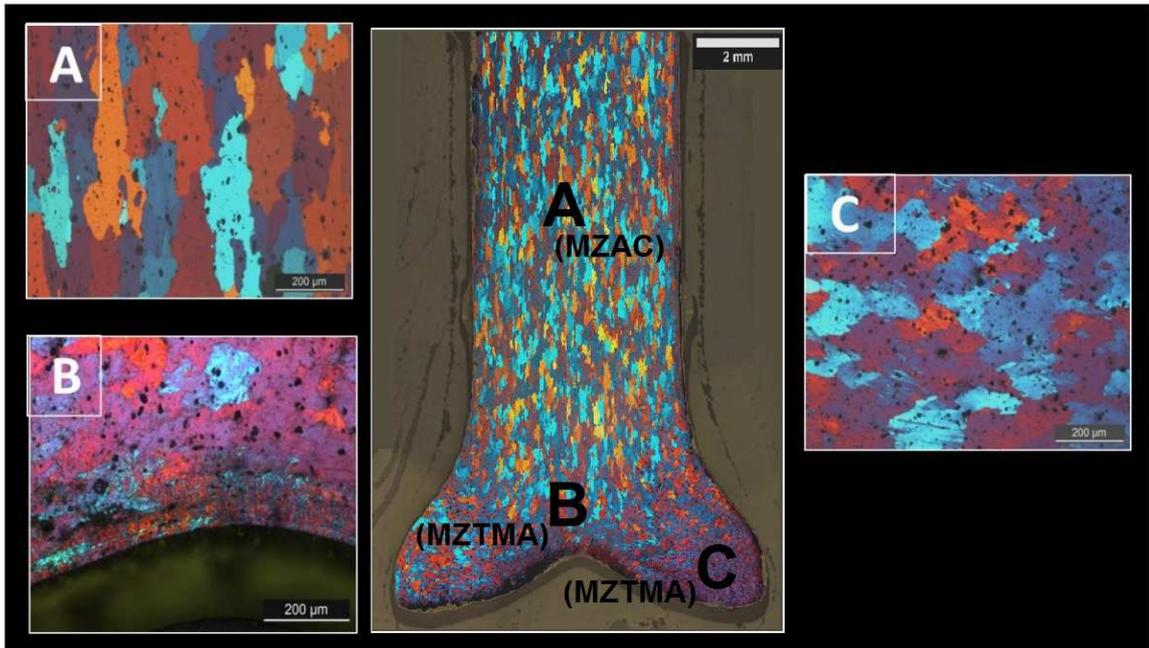


Figura 4.15: Características microestruturais da ponta do rebite de uma junta pontual de PC/AA 2024-T351 rebitada por fricção (20000 rpm, 3 s e 0,95 MPa). (A) zona termicamente afetada do metal, MZAC. (B) zona termomecanicamente afetada do metal MZTMA – grãos realinhados na direção no qual o metal plastificado foi deformado no interior do PC. (C) região da MZTMA em que ocorreu a recristalização dinâmica.

As zonas termicamente (PZAC) e termomecanicamente (PZTMA) afetadas do PC na região de interface polímero-polímero não puderam ser identificadas por microscopia ótica. De fato, essas zonas são de difícil observação para polímeros amorfos, assim como citado por Amancio *et al.* [38] em juntas PEI/AA 2024-T351.

4.2.4 Avaliação das propriedades mecânicas locais por microdureza Vickers

A Figura 4.16 mostra um exemplo do mapeamento de microdureza realizado na secção transversal de uma junta PC/AA 2024-T351. A variação

nos valores de microdureza ajudou a delimitar as zonas microestruturais devido aos processos termomecânicos ocorridos durante a rebiteagem por fricção. Isso se deve à relação entre dureza (H) e limite de escoamento (Y), ($H \approx 3 \cdot Y$) proposta por Calleja *et al.* [75]. Observa-se na Figura 4.16A decréscimo dos valores de dureza de aproximadamente 12% ($HV_{MHAZ} \approx 141,5$ HV) na zona microestrutural termicamente afetada do metal (MZAC) e de 36% ($HV_{MTMAZ} = 103$ HV) na zona termomecânicamente afetada do metal (MZTMA) em relação à microdureza média do material de base ($HV_{AA\ 2024-T351} = 160$ HV, Figura 3.2A da Seção 3.1).

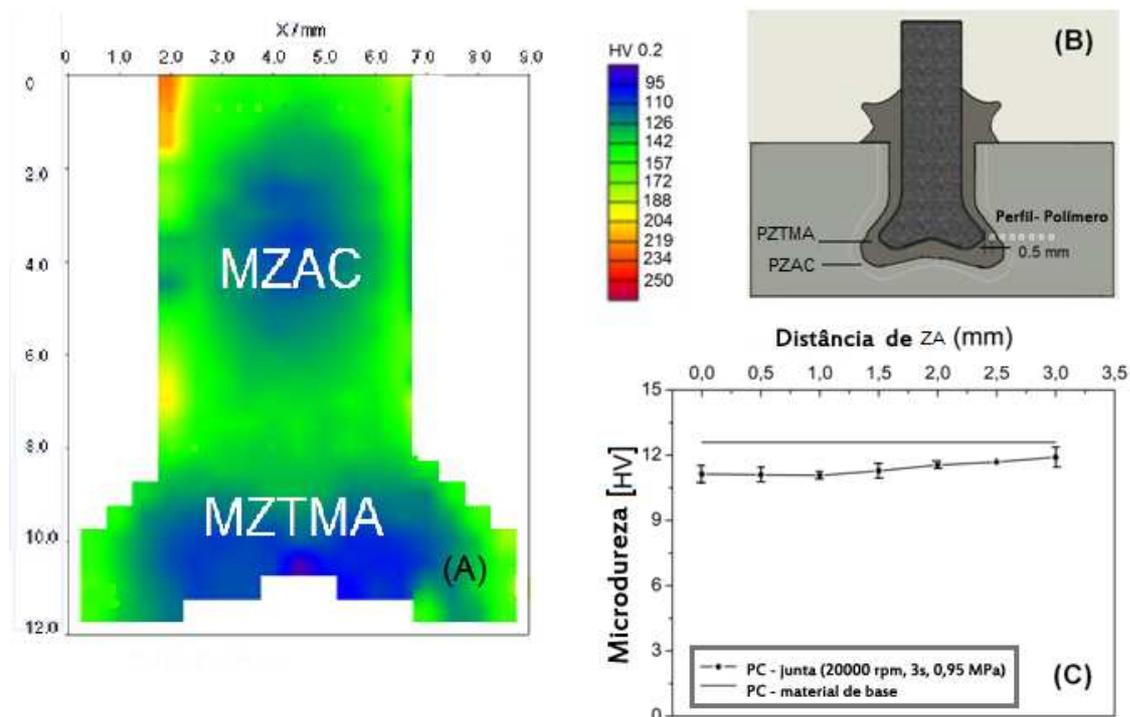


Figura 4.16: (A) Mapa de distribuição de microdureza Vickers do rebite de AA 2024-T35 deformado na junta. (B) Esquema do local em que foram realizadas as medidas de microdureza (pontos brancos) na placa polimérica. (C) Valores de microdureza obtidos no material polimérico localizado na região adjacente à região de ancoramento do rebite junto aos valores de microdureza do PC (material de base).

A microdureza no volume polimérico adjacente à zona de ancoramento do rebite (Figura 4.16B) que engloba as regiões PZAC e PZTMA apresentou

apenas uma pequena redução, com valores médios de dureza de aproximadamente 94% do valor de dureza do material de base PC ($HV_{PC-base\ material} = 12,6 \pm 0,4$ HV) e da interface da junta ($HV_{PC-junta} = 11,9 \pm 0,3$ HV). Sabe-se que a dureza está relacionada à massa molar dos polímeros, sendo que para polímeros amorfos maiores massas molares resultam em maiores valores de dureza [75]. A degradação térmica por cisão de cadeia leva normalmente a redução da massa molar [79]. Deste modo à redução da microdureza do PC observada na Figura 4.16C pode ser um indicativo de início de degradação térmica induzida pelo processo. Essa hipótese foi descartada por análise de massa molar do polímero, como será mostrado na seção 4.2.5. Outro fator que pode estar contribuindo para a redução da dureza do PC nas zonas PZAC e PZTMA é a relaxação da orientação molecular da chapa extrudada de PC quando rebitada por fricção.

4.2.5 Análise da massa molar do PC por viscosimetria em solução diluída

A Figura 4.17 apresenta os gráficos de $\eta_{red} \times c$ obtidos pelo método de Huggins (Equação 3.1) para a determinação da viscosidade intrínseca $[\eta]$ do PC virgem e do PC retirado da área friccionada das juntas que atingiram temperaturas de 310°C, 330°C, 360°C e 390°C.

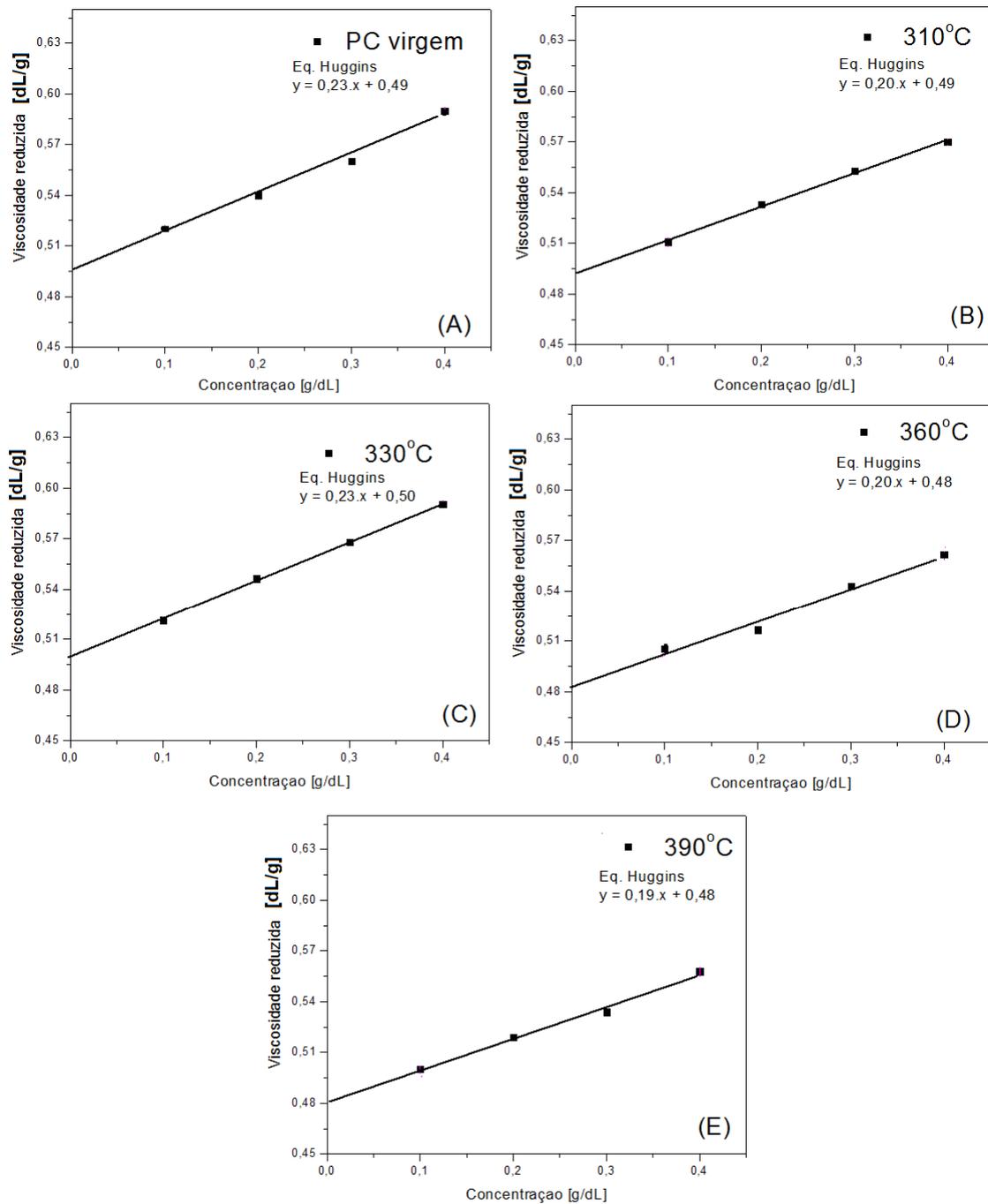


Figura 4.17: Gráficos de η_{red} versus c para determinação da viscosidade intrínseca $[\eta]$ pelo método de Huggins, para as soluções do (A) PC virgem e do PC retirado da área friccionada das juntas que atingiram temperaturas de (B) 310°C, (C) 330°C (D) 360°C e (E) 390°C.

A Tabela 4.3 apresenta os valores médios de viscosidade intrínseca $[\eta]$ determinados pelo método de Huggins e os respectivos valores de massa molar viscosimétrica média (\overline{M}_v) determinados segundo a Equação 3.2 de Mark-Houwink-Sakurada.

Tabela 4.3: Viscosidade intrínseca e massa molar viscosimétrica média do PC virgem e de amostras de PC retiradas da área friccionada das juntas que atingiram temperaturas de 310 até 390°C.

Condição	Viscosidade Intrínseca (dL/g)	Massa molar viscosimétrica média (g/mol)
PC-virgem	0,49	25.500
310°C	0,49	25.500
330°C	0,50	25.900
360°C	0,48	24.800
390°C	0,48	24.800

Observou-se que os valores de viscosidade intrínseca $[\eta]$ e massa molar viscosimétrica média (\overline{M}_v) das juntas de PC quando comparados ao valor do PC virgem apresentaram-se próximos, sendo a máxima variação ($\pm 4\%$), dentro do limite de detecção da técnica. Tal constatação indica que as temperaturas atingidas na área de fricção não ocasionaram alterações macromoleculares nas cadeias poliméricas do PC, ou seja, a estrutura molecular do polímero localizado na área de fricção das juntas não apresentou degradação térmica.

4.2.6 Análise espectroscópica do PC por FTIR

A Figura 4.18 mostra os espectros de FTIR do PC virgem e de amostras de PC retiradas da área de união das juntas que atingiram as temperaturas de 360°C e 390°C.

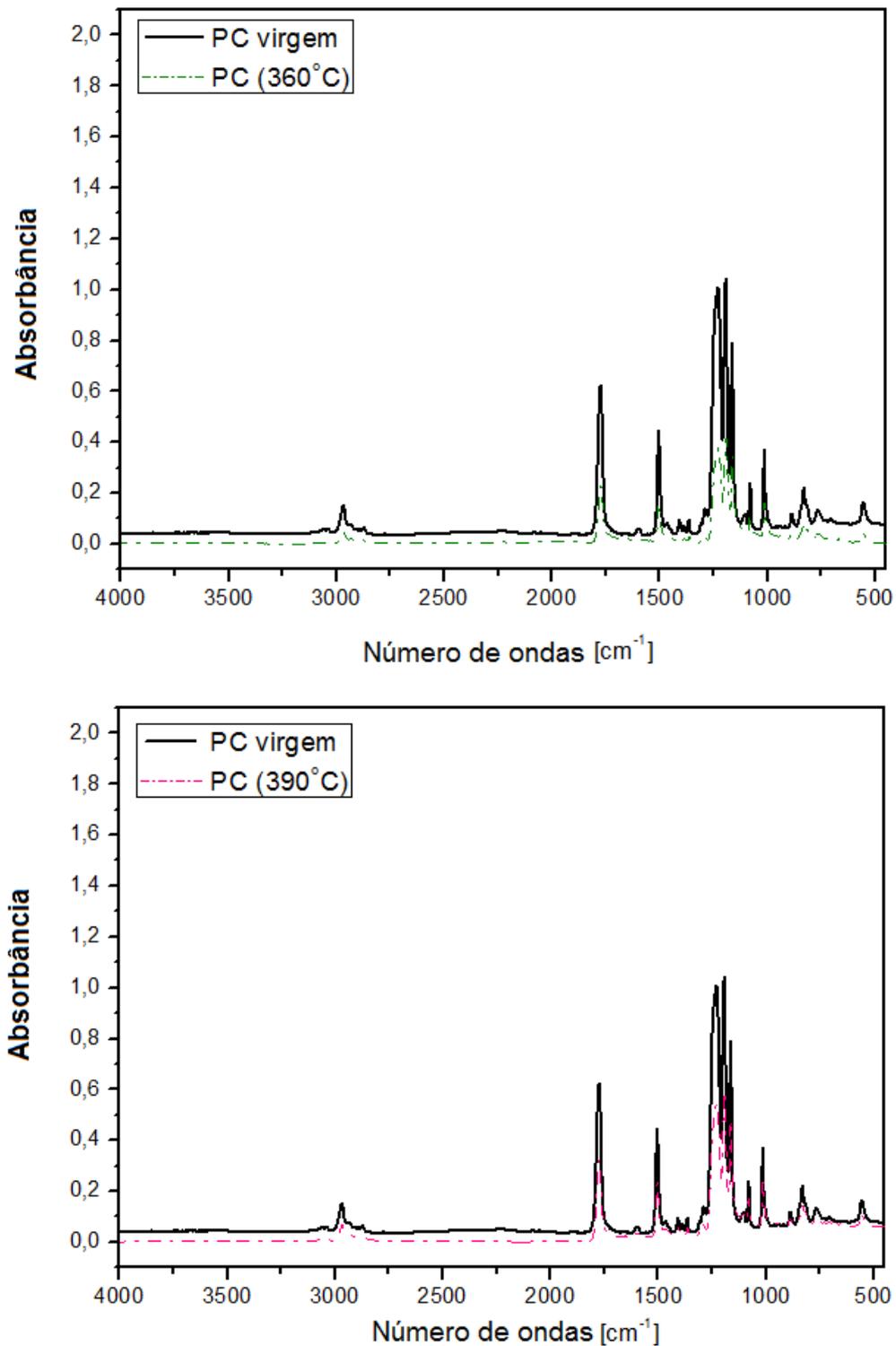


Figura 4.18: Espectros de infravermelho do PC virgem e de amostras de PC retiradas da área de união das juntas que atingiram temperaturas de 360 °C e 390 °C.

Os espectros das amostras de PC retiradas das juntas apresentam as mesmas bandas com relação à amostra de PC virgem. As intensidades (absorbâncias) das bandas em 1506 cm^{-1} , relativas à deformação angular fora do plano da ligação C-H do anel aromático, e em 1775 cm^{-1} , relativas ao estiramento da ligação C=O do grupo carbonato, foram tomadas como referência para avaliação da degradação do PC. Considerando-se que a degradação do PC levaria ao consumo de grupos carbonila (Figura 2.2), o decréscimo do valor relativo da intensidade da banda desse grupo (1775 cm^{-1}), em relação ao da banda do grupo C-H (1506 cm^{-1}), estável, pode ser adotado como um indicativo da degradação do PC durante a rebitagem por fricção. A Tabela 4.4 apresenta as relações de intensidade dessas bandas.

Tabela 4.4: Absorbâncias das bandas relativas estiramento da ligação C=O do grupo carbonato (1775 cm^{-1}) e a deformação angular fora do plano da ligação C-H do anel aromático (1506 cm^{-1}) e a razão destas absorbâncias para amostras do PC virgem e de amostras de PC retiradas da área de união das juntas que atingiram temperaturas de $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $390\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Condição	$A_{1775\text{ cm}^{-1}}$	$A_{1506\text{ cm}^{-1}}$	$A_{1775\text{ cm}^{-1}} / A_{1506\text{ cm}^{-1}}$
PC virgem	0,5850	0,3962	1,48
360°C	0,2280	0,1545	1,47
390°C	0,3150	0,2114	1,49

As razões de absorbância $A_{1775\text{ cm}^{-1}} / A_{1506\text{ cm}^{-1}}$ das amostras de PC das juntas variaram de 1,47 a 1,49, o que corresponde a uma alteração de no máximo 1% com relação à amostra de PC virgem, cuja razão é de 1,48. Portanto, pode-se concluir que embora o processo de rebitagem por fricção induza altas taxas de deformação e elevadas temperaturas na área de união, próximas do intervalo de degradação do PC, o tempo de exposição do polímero nas máximas temperaturas atingidas não foi suficientemente alto para ocasionar degradação do polímero.

Assim, conclui-se que a redução dos valores de dureza do polímero na área de união (Figura 4.16C) pode estar relacionada à relaxação da orientação molecular da chapa extrudada de PC devido à rebitagem por fricção.

4.2.7 Resistência mecânica das juntas

O desempenho mecânico global das juntas produzidas por rebiteagem por fricção é bastante influenciado pelo tipo da geometria de ancoramento do rebite, pois esta suporta grande parte da carga imposta à junta durante uma sollicitação mecânica através de interferência mecânica com a matriz polimérica [31].

A resistência mecânica das juntas de PC/AA 2024-T351 foi avaliada por meio de ensaios de tração 'T-pull', descritos na Seção 3.2.7. O valor da força máxima registrado nas curvas dos ensaios foi considerado como sendo o valor da resistência à tração das juntas, devido à dificuldade de se realizar o cálculo da área de aplicação da força de tração (região de ancoramento do rebite). Como o alongamento no teste de tração 'T-pull' é normalmente influenciado pela profundidade de inserção do rebite, esse não pode ser interpretado da mesma maneira como o alongamento de um corpo de prova normatizado testado sobre tração. Deste modo, essa análise não será abordada nesse estudo.

O desempenho mecânico das juntas foi calculado tomando-se como base a força máxima registrada na curva do ensaio de tração do rebite AA 2024-T351. A Tabela 4.5 apresenta as médias e os desvios padrão dos valores de resistência à tração das juntas produzidas a partir das oito condições de processo definidas no PdE, seus desempenhos mecânicos relativos à resistência à tração do rebite metálico AA 2024-T351, bem como, seus valores de alongamento na resistência a tração, para fins informativos.

Tabela 4.5: Médias e desvios padrão dos valores médios de limite de resistência à tração e alongamento das juntas fabricadas nas diferentes combinações de parâmetros de processo e desempenho mecânico das mesmas, relativo ao valor médio de limite de resistência à tração do rebite metálico AA 2024-T351.

Cond.	Parâmetros de Processo			Deslocamento no ponto de resistência à tração [mm]	Resistência à tração [N]	Comparação da junta com o rebite metálico [%]
	VR [rpm]	TU [s]	PU [MPa]			
1	18000	3	0,75	3,91 ± 0,24	1389 ± 102	14
2	21000	3	0,75	4,64 ± 0,03	4781 ± 148	49
3	18000	4	0,75	4,55 ± 0,03	3357 ± 287	35
4	21000	4	0,75	4,79 ± 0,65	4278 ± 313	44
5	18000	3	1,10	4,71 ± 0,38	6659 ± 62	68
6	21000	3	1,10	7,56 ± 0,64	8653 ± 104	89
7	18000	4	1,10	7,08 ± 0,48	8040 ± 195	83
8	21000	4	1,10	7,98 ± 0,55	8645 ± 168	89
Rebite	-	-	-	10,22 ± 0,39	9730 ± 71	-

Os valores de deslocamento no ponto de resistência à tração podem ser interpretados como um resultado qualitativo da ductilidade da junta em substituição ao alongamento na fratura. No Apêndice C são exibidas todas as curvas dos ensaios mecânicos de resistência à tração.

As juntas de PC/AA 2024-T351 fabricadas nas condições descritas apresentaram valores de desempenho da resistência à tração variando entre 13% e 89% em relação ao rebite metálico. A Figura 4.19 mostra a influência de cada parâmetro de processo sobre a resistência à tração das juntas de PC/AA 2024-T351.

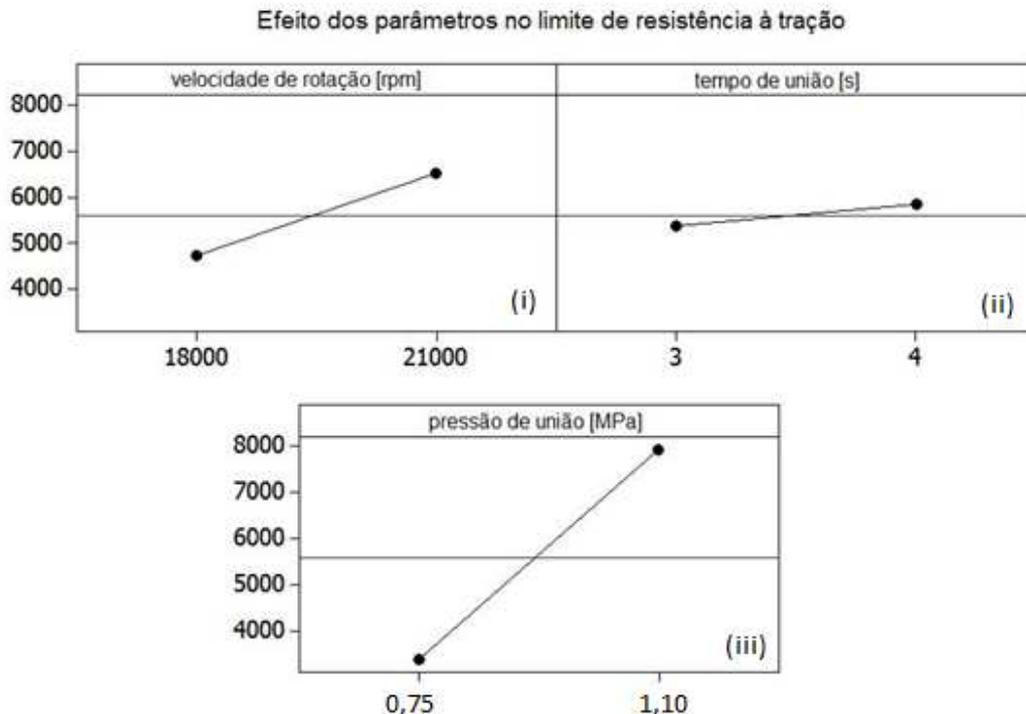


Figura 4.19: Efeito principal de cada parâmetro de processo na resistência à tração das juntas de PC/AA 2024 T351.

Observa-se na Figura 4.19i, que as juntas fabricadas com nível elevado de pressão de união ($PU = 1,10$ MPa) apresentaram os valores mais altos de resistência à tração devido à maior distribuição da pressão na área de união, principalmente na etapa de forjamento. Esse efeito indica que existe uma correlação entre as respostas de resistência à tração e razão de aspecto de ancoramento. Conforme observado anteriormente na Figura 4.11 iii, a mesma condição, também, apresentou o maior valor de RA. Portanto, pode-se afirmar que quanto maior a inserção e deformação da ponta do rebite no interior do componente polimérico, maior será a carga suportada pela junta, devido a melhor eficiência de ancoramento do seu rebite.

O mesmo efeito foi verificado nas juntas fabricadas com alto nível velocidade de rotação ($VR = 21.000$ rpm) (Figura 4.19ii) e tempo de união ($TU = 4$ s) (Figura 4.19iii), porém, de forma menos pronunciada, o que se deve ao aumento do atrito entre polímero-metal e aos longos tempos de aquecimento na área de união durante o processo de rebitagem por fricção.

Estes mecanismos geram calor suficientemente alto para garantir a formação de um volume satisfatório de material polimérico amolecido e metálico plastificado, resultando na melhor qualidade da zona de ancoramento e desempenho mecânico das juntas.

Nos gráficos de interação da Figura 4.20 foi observada a influência de parâmetros de processo dois a dois sobre a resistência à tração das juntas.

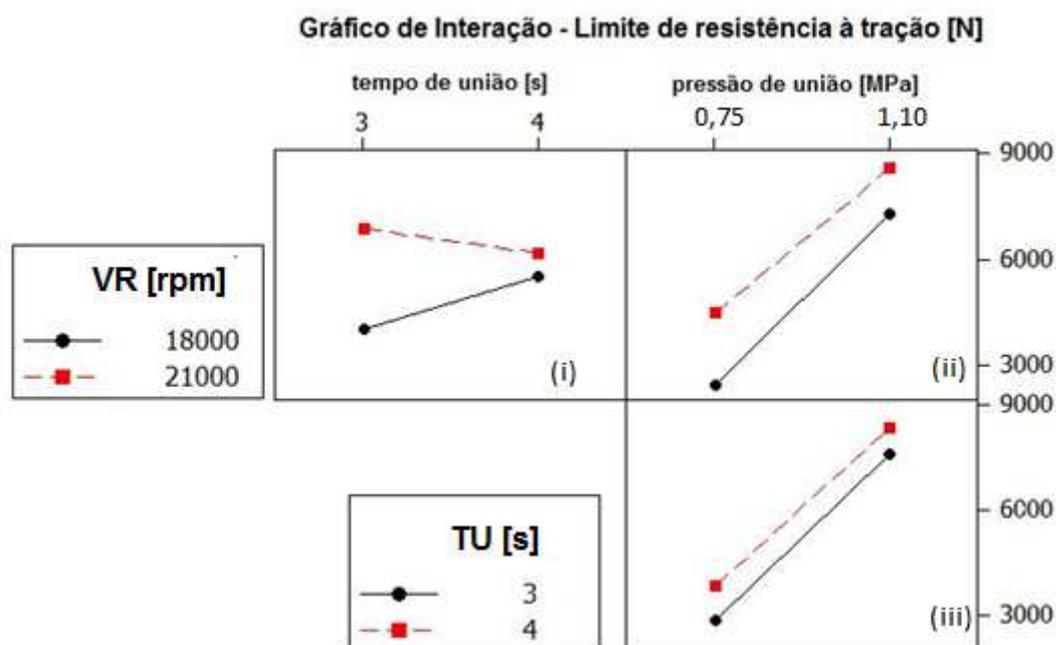


Figura 4.20: Gráficos de interação entre parâmetros de processo dois a dois para a resposta de resistência à tração das juntas.

A Figura 4.20i mostra que o aumento do tempo de união de 3 s para 4 s provocou decréscimo dos valores de resistência à tração nas juntas fabricadas com alta velocidade de rotação (21000 rpm), enquanto que as juntas obtidas com baixa velocidade de rotação (18000 rpm) apresentaram efeito contrário. Tal ocorrência também foi verificada na análise da razão de aspecto de ancoramento (RA) e está também associada à redução brusca da viscosidade dos materiais devido a maior quantidade de calor na área de união. Este fator provoca a redução do atrito entre o polímero e o metal, reduzindo a

plastificação da ponta do rebite. Desta maneira, a razão de aspecto é diminuída e, conseqüentemente, o desempenho mecânico das juntas é reduzido.

As interações entre os parâmetros pressão de união e velocidade de rotação (Figura 4.20ii), pressão de união e tempo de união (Figura 4.20iii) não foram significativas. Nos dois casos, a resistência à tração aumentou com o aumento da pressão de união, para ambos os níveis de velocidade de rotação e tempo de união considerados neste estudo. Estas observações são semelhantes aos resultados observado para a resposta RA.

A Tabela 4.6 mostra o resultado da análise de variância (ANOVA) obtidos a partir dos valores de resistência à tração das juntas PC/AA 2024-T351.

Tabela 4.6: ANOVA para avaliação da influência dos parâmetros de soldagem na resistência à tração.

Fonte	G.L	SQ (10⁵)	MQ (10⁵)	Valor F_o
Velocidade de rotação [VR]	1	239	239	407
Tempo de união [TU]	1	40	40	69
Pressão de união [PU]	1	1656	1656	2815
VR x TU	1	75	75	127
VR x PU	1	15	15	25
TUx PU	1	0,04	0,04	0,08
VR x TU x PU	1	5,9	5,9	10
Erro (ε)	24	14	0,6	
Total	31	2045		F-crítico (F_{0,05;1;24}) 4,3

Foi possível observar que somente a interação secundária entre pressão (PU) e tempo de união (TU) não apresentou importância significativa (valor de F_o menor que 4,26) sobre os valores de resistência à tração. Os outros parâmetros e interações influenciaram a resposta analisada com valores F maiores que o valor F-crítico de 4,26.

O gráfico com percentual de contribuição (P%) de cada parâmetro da Figura 4.21 ilustra esses resultados.

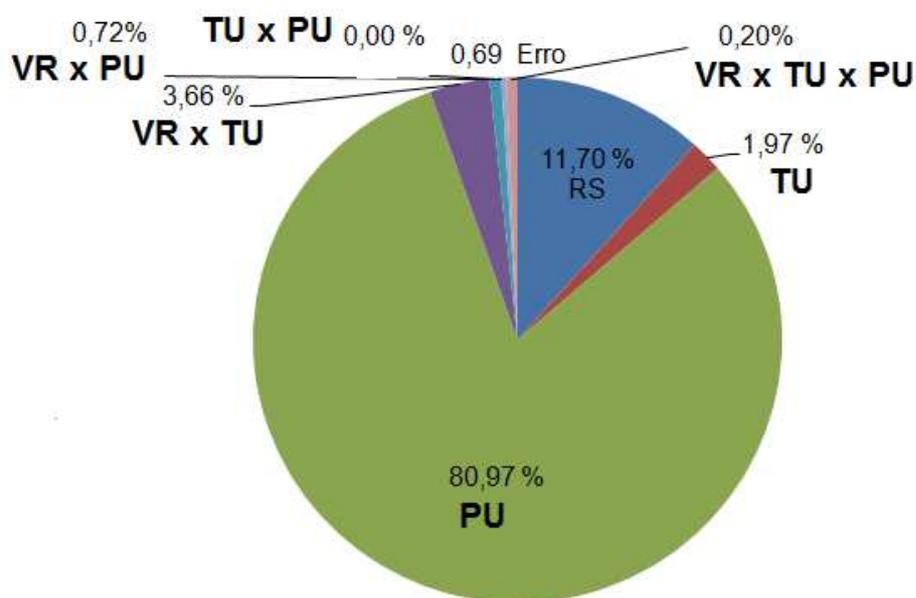


Figura 4.21: Contribuição percentual (P%) de cada parâmetro sobre a resistência à tração.

Nota-se que a pressão de união (PU) foi o parâmetro de maior significância na resistência à tração, seguido pela velocidade de rotação (VR) e pelo efeito de interação entre velocidade de rotação (VR) e tempo de união (TU). O tempo de união (TU) e as interações secundária da pressão de união (JP) e velocidade de rotação (VR) e terciária da pressão união (PU), velocidade de rotação (VR) e tempo de união (TU), também geraram efeitos significativos sobre a resposta analisada, porém, de menor intensidade.

Para melhor compreender o comportamento mecânico das juntas de PC/AA 2024-T351, escolheu-se três condições (Condições 5, 6 e 7 definidas na Tabela 3.4 na Secção 3.2) que apresentaram altos valores de resistência à tração das juntas e de RA. Os valores de resistência à tração das juntas obtidas nessas condições foram confrontados com os respectivos valores de RA, como ilustrado no gráfico da Figura 4.22. Observa-se que os maiores valores de resistência à tração foram os das juntas que apresentaram maiores valores de RA, devido à maior interferência mecânica da ponta do rebite deformada no interior da matriz polimérica. Tal comportamento foi também reportado para as juntas de PEI/AA 2024-T351 [79], indicando que a RA

aparenta ter uma relação direta com os valores de resistência à tração. No entanto, neste outro trabalho foi verificado também que esta relação é válida somente nos casos nos quais P e L do rebite deformado não apresentam valores similares, o que pode invalidar a análise bidimensional utilizada para calcular a AR no caso das juntas PC/AA 2024-T351.

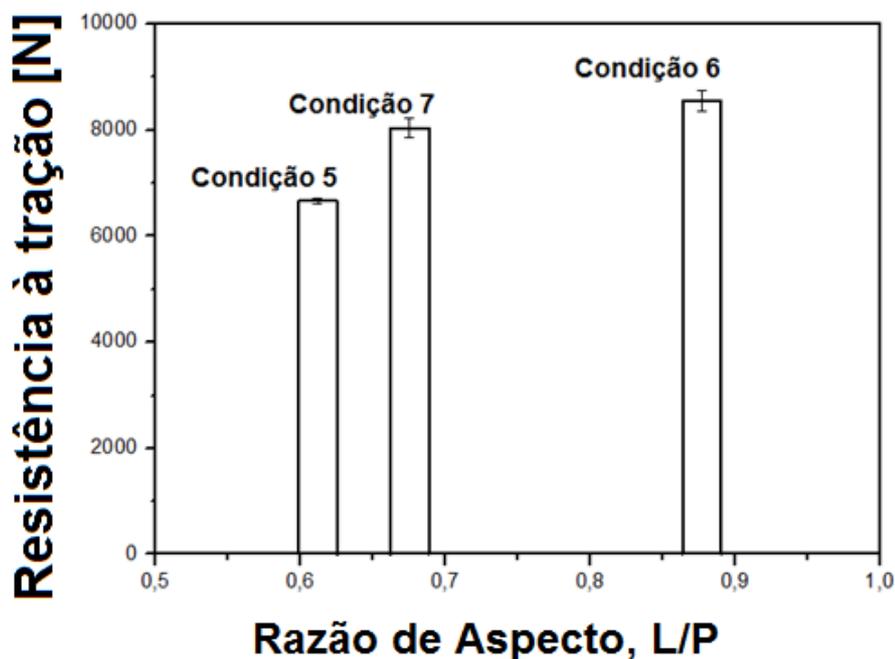


Figura 4.22: Relação entre os valores de resistência à tração e os valores da razão de aspecto (RA) das juntas de PC/AA 2024-T351.

Portanto, neste estudo, usou-se adicionalmente a Equação 4.2 para estudar o comportamento mecânico sob tração das juntas PC/AA 2024-T351. A Figura 4.24 apresenta os valores médios de resistência à tração das juntas em função dos valores calculados de RV a partir da geometria da zona de ancoramento das juntas. Observou-se uma tendência de aumento da resistência a tração com RV. Essa tendência seguiu o mesmo comportamento de juntas rebitadas por fricção de PEI e AA 2024-T351 e de compósito de PEI reforçado com fibra de vidro e Ti [82]. Além disso, observou-se que a RV segue o mesmo comportamento da RA (Figura 4.22), resultado que valida o uso de procedimento bi-dimensional da RA para a juntas de PC/AA 2024-T351

fabricadas no intervalo de parâmetros de rebiteamento por fricção investigado neste estudo. Portanto verificou-se a presença da interação direta entre a temperatura processual, nível de plastificação e geometria da zona de ancoramento do rebite, com o desempenho mecânico sobre tração das juntas de PC/AA2024-T351.

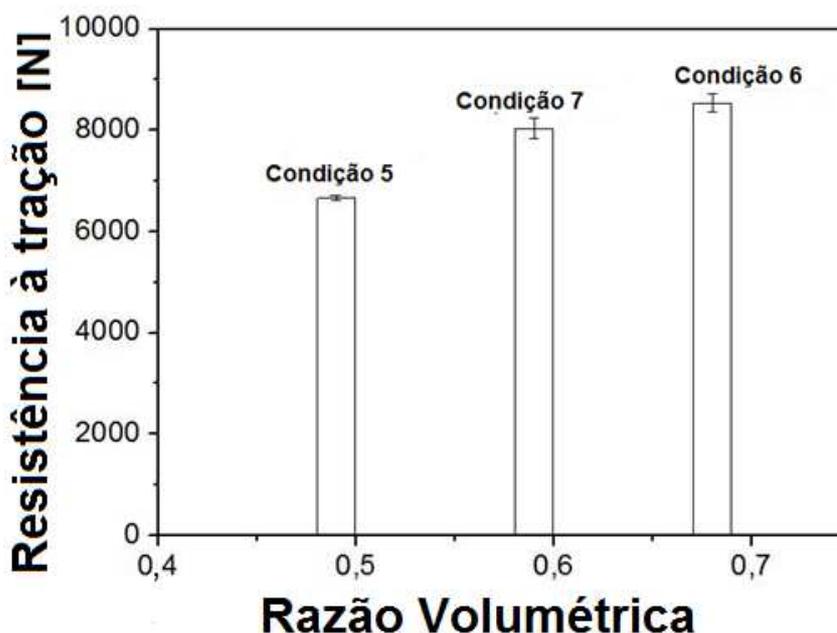


Figura 4.23: Relação entre a resistência à tração e a razão volumétrica (RV) para as juntas de PC/ AA 2024-T351.

4.2.8 Análise de falha e superfície de fratura

Dois tipos de fraturas foram observados nas juntas de PC/AA 2024-T351: Tipo I - *Through the Rivet* e Tipo III - *Full Rivet Pullout*.

As juntas produzidas nas Condições 5 e 7 (Tabela 3.4 – Seção 3.2) desenvolveram fraturas do Tipo III em que o rebite de alumínio foi totalmente destacado de dentro da placa de PC sem apresentar qualquer deformação visível na ZA. A Figura 4.25A exibe o rebite completamente removido do seu interior. Esse tipo de fratura é comum em estruturas constituídas por polímeros dúcteis com baixos valores de ancoramento efetivo do rebite na matriz de polimérica ($RA_5 = 0,61 \pm 0,03$, $RA_7 = 0,68 \pm 0,04$, $RV_5 = 0,49 \pm 0,02$ e $RV_7 =$

0,59 ± 0,03). Nelas, o volume de interação polimérico (V_{lp}) sobre a zona de ancoramento é deformado plasticamente pela ação da força de cisalhamento imposta através do deslocamento axial do rebite. A trinca nucleia e propaga-se na superfície do polímero localizado na interface em torno da zona de ancoramento do rebite (Figura 4.25B), separando a área da junta ligada adesivamente e facilitando o total destacamento do rebite.

A observação por microscopia eletrônica mostra que a superfície de início da fratura (parte inferior da placa de PC) apresentou um aspecto plano com poucas zonas de deformação (Figura 4.25C). As regiões do PC mais deformadas aparecem ao longo do percurso de destacamento do rebite na forma de estrias (Figura 4.25D). Estas se intensificam a medida que o rebite atinge a superfície da placa polimérica e destaca-se totalmente. Nessa região, também, nota-se algumas zonas características de rasgamentos do polímero (Figura 25E). Todas essas ocorrências caracterizam o comportamento dúctil do PC.

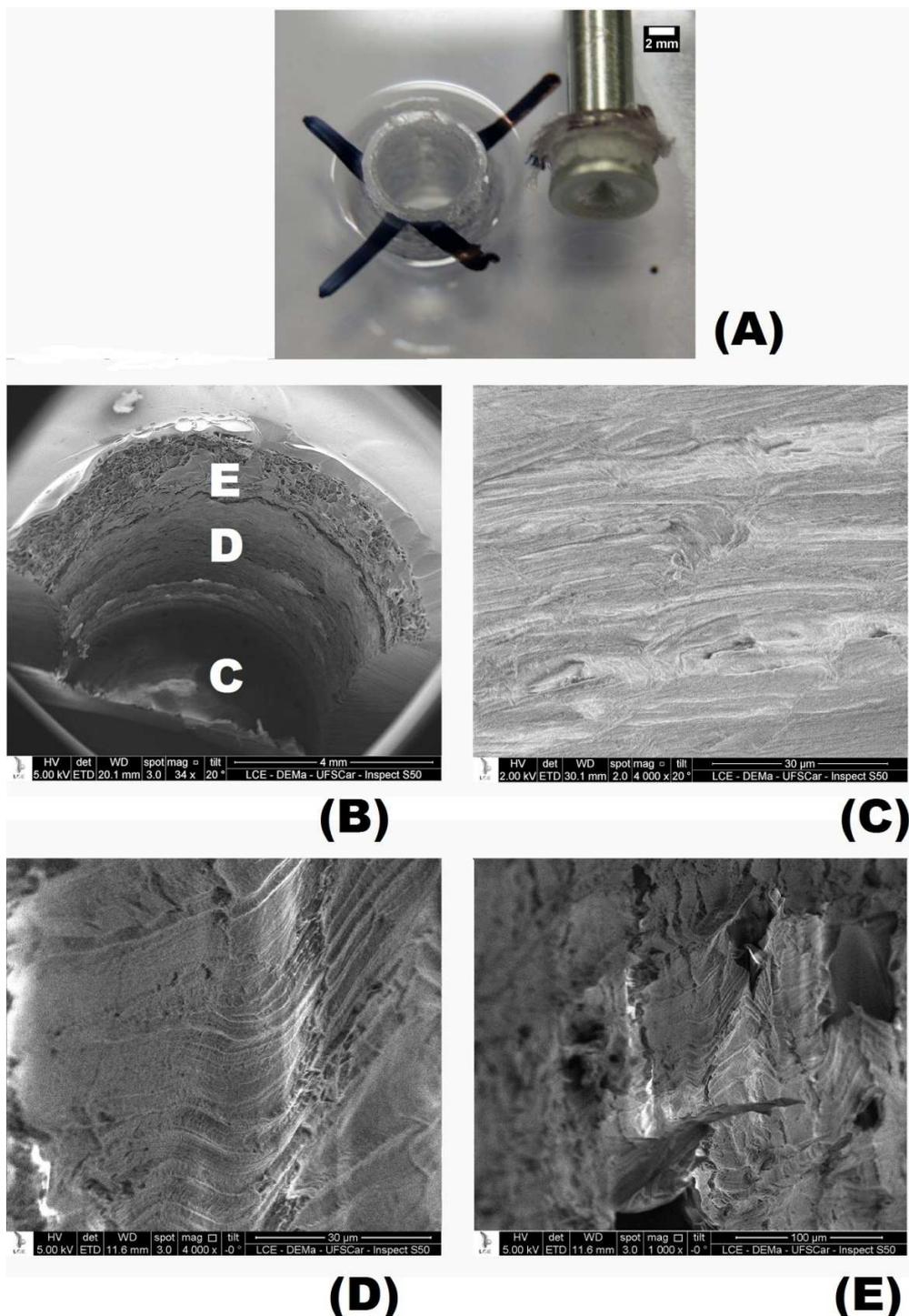


Figura 4.24: Fratura do Tipo III observada nas juntas das condições 5 e 7 que apresentaram os menores valores médios de resistência a tração (A) Placa de PC fraturada (B) rebite totalmente removido do interior da placa de PC (C, D e E) Detalhes da superfície interna fraturada da placa de PC por falha por cisalhamento.

As juntas produzidas na condição 6 desenvolveram fraturas do Tipo I apresentando os maiores valores de resistência à tração. Esse tipo de fratura tem falha final do tipo dúctil (“taça/cone”) na região do rebite metálico localizada externamente à matriz de PC (Figura 4.26A). Esse tipo de fratura é desejável em estruturas rebitadas e é justificada pelo ancoramento efetivo do rebite na matriz de PC ($RA_6 = 0,88 \pm 0,02$ e $RV_6 = 0,68 \pm 0,01$). A Figura 4.26B exibe a secção transversal da junta com a parte do rebite que permaneceu presa no interior da placa de PC. A Figura 4.26C mostra detalhes da fratura “taça/cone” registrados na área central do rebite que não se destacou da placa de PC. Nela observam-se inúmeros microvazios interconectados, característicos de deformação plástica ocasionada pela tração uniaxial. Cada microvazio é uma metade de uma microcavidade que se formou e depois se separou durante o processo de fratura. Nota-se também a presença de partículas secundárias dentro de alguns microvazios (marcadas com setas brancas na Figura 26D) que, ao cavitarem, geraram sítios de nucleação de microtrincas. Posteriormente, os micros vazios ao redor da partícula cativada cresceram, coalesceram com as outras microcavidades, levando à propagação final da trinca.

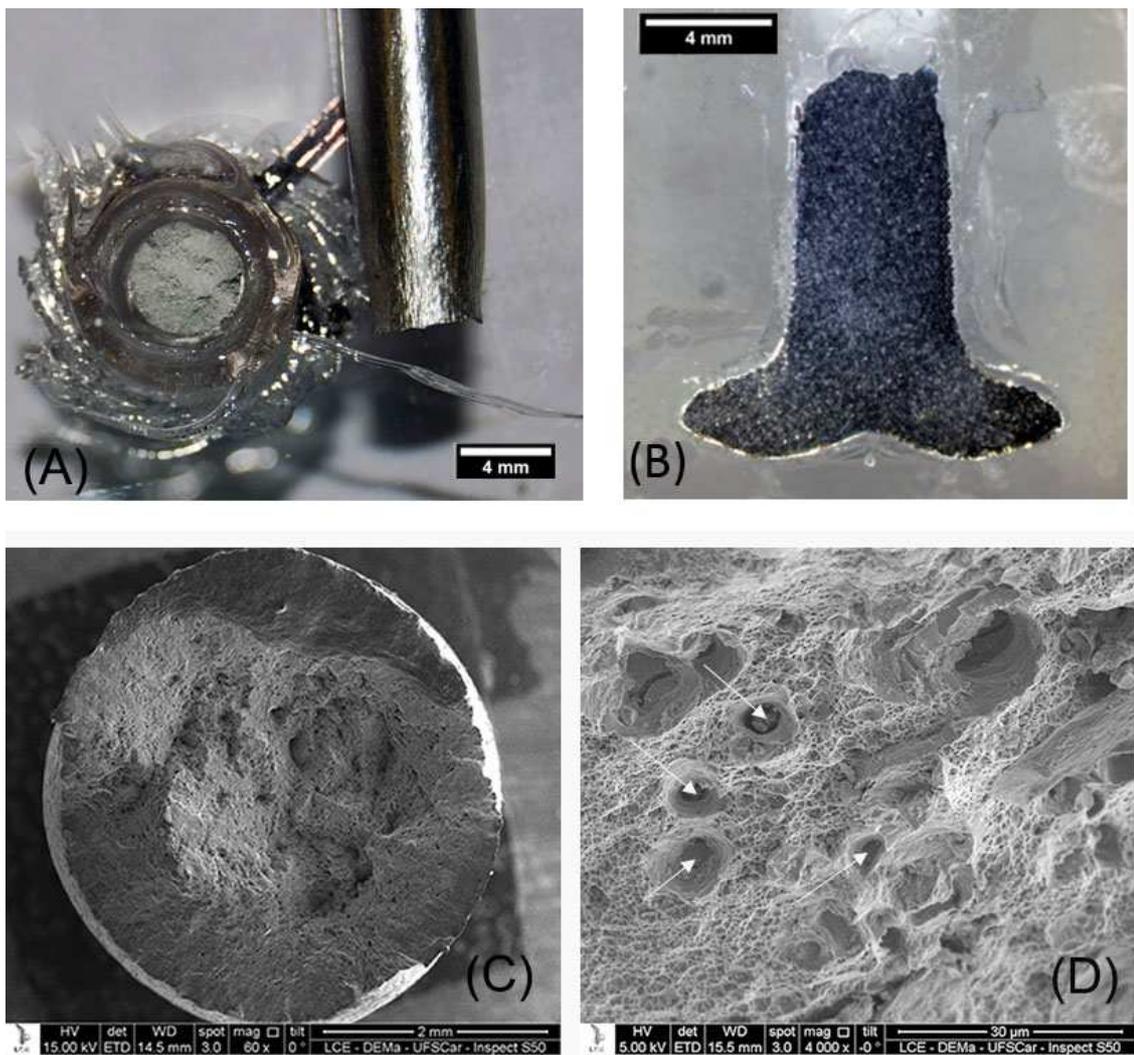


Figura 4.25: Fratura do Tipo-I observada nas juntas da condição 6 que apresentaram maiores valores médios de resistência à tração. (A) Rebite e placa de PC fraturados após o ensaio de tração. (B) Secção transversal da junta com a parte do rebite que permaneceu presa no interior da placa de PC. (C e D) Detalhes da fratura do tipo “taça/cone” na região do rebite localizada na região externa da placa de PC.

4.3 Otimização do processo de rebitagem por fricção de PC/AA 2024-T351 via Planejamento de experimentos

O uso do planejamento de experimento do tipo fatorial completo 2^3 permitiu a elaboração de modelos matemáticos que descrevessem a dependência de cada resposta analisada na Secção 4.2, em relação aos parâmetros de processo da rebitagem por fricção. Tais modelos são equações de primeiro grau constituídas por coeficientes estimados a partir da regressão linear da média aritmética dos dados experimentais. Quando validados estes modelos podem ser utilizados na predição de novos dados a partir de novas combinações de parâmetros de processo que estejam dentro do intervalo considerado no estudo [85].

A confiabilidade dos modelos obtidos foi avaliada a partir dos valores do coeficiente de aproximação das regressões R^2 , com o qual foi possível identificar o quão os coeficientes das equações geradas estavam ajustados aos valores experimentais de cada resposta analisada. Além disso, permitiu também analisar qual a probabilidade de um valor experimental distinto daquele utilizado na construção do modelo ser predito pelas equações. Quanto maior o valor de R^2 (próximo de 1), maior a concordância dos dados preditos pelo modelo com os dados experimentais [85,86]. Desta maneira, foram obtidos três modelos estatísticos com intervalo de confiança de 95%. Os resultados são mostrados na Tabela 4.7.

As equações dos modelos obtidos apresentaram valores de R^2 entre 0,89 e 0,99, o que comprova que houve uma boa adequação dos valores experimentais. Porém, a grande quantidade de fatores geradas no PdE fatorial completo resultou em um modelo extenso e complexo. Deste modo, como forma de simplificação, novas regressões foram geradas, eliminando os fatores considerados estatisticamente insignificantes pela ANOVA de cada resposta.

Tabela 4.7: Modelos de regressões obtidos para as respostas temperatura máxima de processo (T), razão de aspecto de ancoramento (RA) e resistência à tração (RT). A é a velocidade de rotação (VR), B é o tempo de união (TU) e C é a pressão de união (PU).

Respostas	Modelos	R ²
Temperatura máxima (T)	$T = -460,7 - 0,03A + 179,9B - 139,3C - 0,007AB - 0,002AC + 26,9BC - 0,003ABC$ (4.2)	0,89
Razão de aspecto de ancoramento (RA)	$RA = 16,4 - 0,0009A - 4,9B - 20,9C + 0,0003AB + 0,001AC + 6,3BC - 0,0003ABC$ (4.3)	0,95
Resistência à tração (RT)	$RT = -144561 + 7A + 32076B + 100082C - 1,6AB - 4,4AC - 20322,9BC + 1ABC$ (4.4)	0,99

No caso da temperatura, segundo os resultados da ANOVA (Tabela 4.1), as interações secundárias entre velocidade de rotação (VR) e pressão de união (PU), pressão de união (PU) e tempo de união (TU), juntamente com a interação terciária entre velocidade de rotação (VR), tempo de união (TU) e pressão de união (PU) não foram estatisticamente relevantes ao modelo, por isso, esses fatores foram desconsiderados no novo modelo. A seguir a Equação 4.5 representa o modelo reduzido para a temperatura na área de união (T).

$$T = -697,8 - 0,05A + 206,2B - 111,4C - 0,010AB \quad (4.5)$$

O modelo reformulado resultou em um valor de R² de 0,94 maior que o do modelo anterior (0,89), apresentando maior ajuste aos valores experimentais. Na Figura 4.27 é exibido o gráfico dos pontos experimentais para a temperatura máxima em função dos pontos preditos pela equação reduzida, para as condições utilizadas na obtenção e validação do modelo. Para a validação dos modelos estatísticos foram produzidas cinco condições adicionais (ver Apêndice D) com parâmetros de processo localizados dentro da faixa processual nesse estudo.

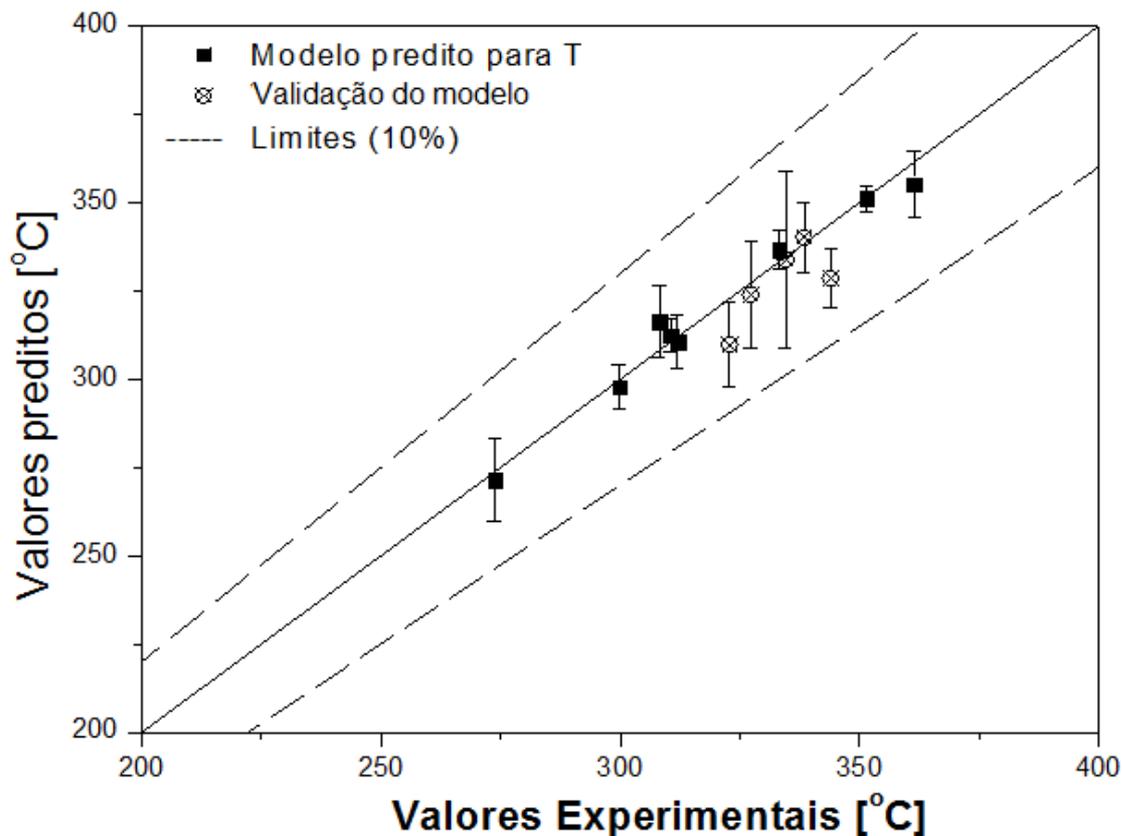


Figura 4.26: Validação do modelo reduzido para temperatura máxima (T) na área de união das juntas.

Observou-se que os valores preditos pela Equação 4.5 e os valores experimentais apresentaram excelente concordância, ou seja, o modelo apresentou uma ótima capacidade de predição da temperatura na área de união das juntas de PC/AA 2014-T351. Além disso, verificou-se que todas as 4 combinações de parâmetros de processo utilizadas na validação (APÊNDICE D, Tabela D.1) encontraram-se dentro dos limites inferior e superior de erro de 10% estabelecido pela comunidade de soldagem como ótimo para este tipo modelagem.

Analisando a ANOVA da razão de aspecto de ancoramento RA (Tabela 4.2) nota-se que o parâmetro tempo de união (TU) e a interação secundária entre velocidade de rotação (VR) e pressão de união (PU) não foram estatisticamente relevantes ao modelo. Porém, para este caso em especial, não foi possível a dedução do modelo reduzido, visto que o tempo de união

(TU) não pôde ser excluído, pois existem outras interações dependentes do mesmo e que são importantes sobre o comportamento da RA. Desta maneira, a Equação 4.3 da Tabela 4.7 do modelo completo, obtida a partir de todos os parâmetros e interações como coeficientes da regressão, foi utilizada para prever RA. Na Figura 4.28 é mostrada a validação do modelo completo da RA.

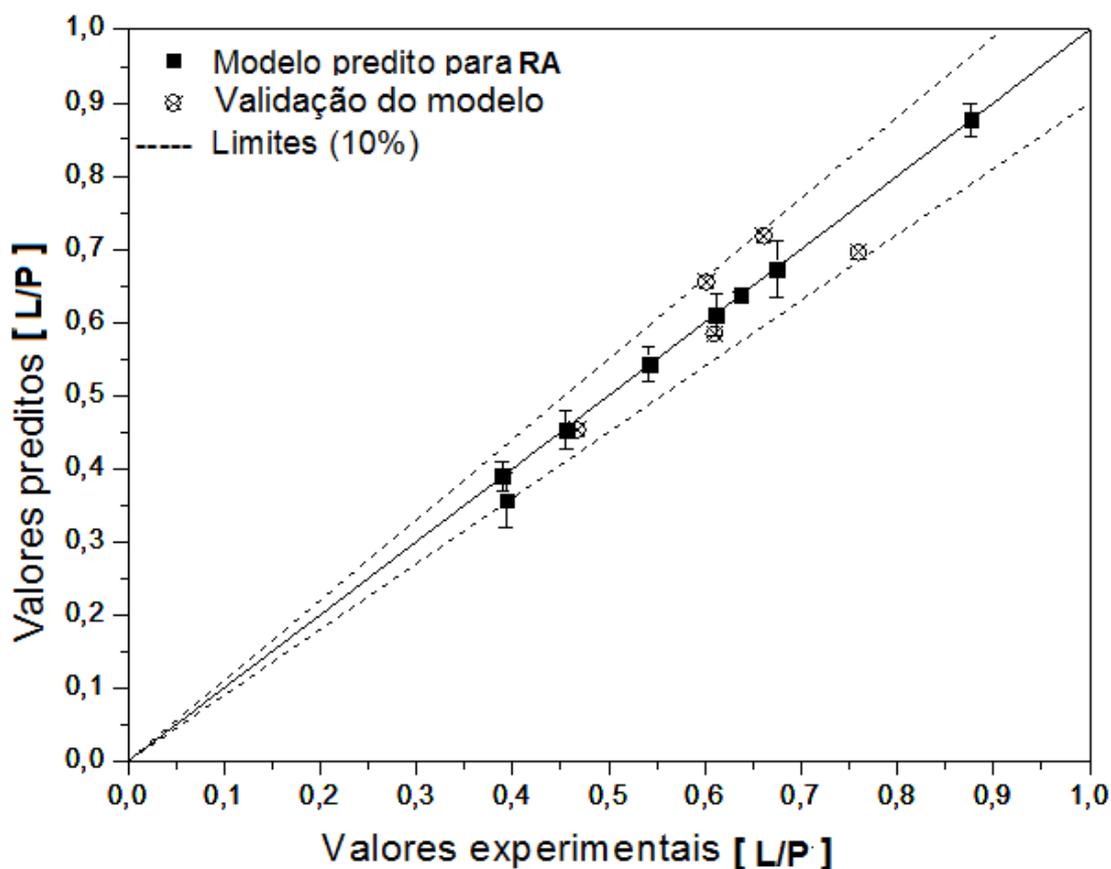


Figura 4.27: Validação do modelo completo para razão de aspecto de ancoramento (RA)

No gráfico da Figura 4.28 observa-se a boa qualidade da regressão pela proximidade entre os valores experimentais usados para obtenção do modelo e os valores preditos pela Equação 4.3. Tal comportamento é confirmado pelo alto valor de R^2 de 0,95 apresentado pela equação da regressão. Três das cinco combinações de parâmetros de processo (APÊNDICE D, Tabela D.2) usadas para validação do modelo estão dentro do limite de erro de 10%

estabelecido, enquanto que os demais se encontram nas suas proximidades. Portanto, esse modelo apresenta uma boa capacidade de predição da RA.

A análise da ANOVA (Tabela 4.6) da resistência à tração (VR) mostra que somente a interação entre o tempo de união (TU) e a pressão (PU) não foi considerada estatisticamente importante. Deste modo, na dedução do modelo reduzido de RT a mesma não foi considerada. A Equação 4.6 resultante é mostrada a seguir:

$$RT = -78397 + 3,7A + 12245,3B + 3190C - 0,6AB - 0,9AC - 0,003ABC \quad (4.6)$$

Essa equação apresentou R^2 de 0,99, igual ao R^2 de 0,99 do modelo completo. Na Figura 4.29 a boa qualidade da regressão pode ser comprovada pela proximidade entre os valores experimentais usados para obtenção do modelo e os valores preditos pela equação. A maioria dos pontos usados para a validação (APÊNDICE D, Tabela D.3) encontra-se próximos do limite de 10% estabelecido. Isso mostra que esse modelo apresenta um potencial razoável em prever os valores da resistência a tração das juntas.

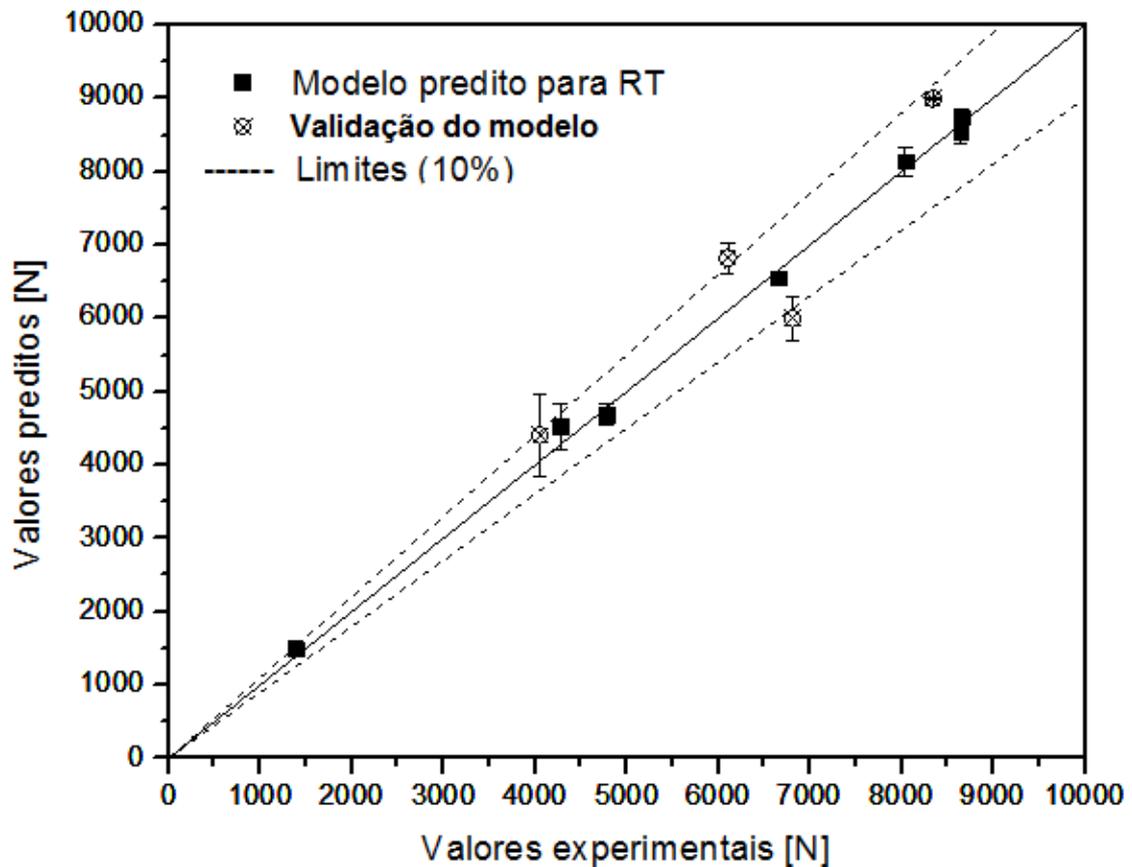


Figura 4.28: Validação do modelo reduzido para resistência à tração (RT)

4.3.1 Redes neurais artificiais (RNAs)

Esta parte do estudo envolveu o uso de uma arquitetura de RNA para correlacionar de forma coerente os parâmetros do processo da rebiteagem por fricção e as principais propriedades das juntas de PC/AA 2024-T351. Inicialmente testou-se a arquitetura de RNA do tipo 3-3-1, formada por três neurônios na camada de entrada, cada um representando os mesmos parâmetros de processo utilizados no PdE (velocidade de rotação, tempo e pressão de união), três neurônios na camada oculta, e um único neurônio na camada de saída. O treinamento deste modelo de RNA foi realizado utilizando dados de resistência a tração (RT) das juntas de PC/AA2024-T351. De um total de 18 dados, 12 foram utilizados para treinamento e 6 para testes da RNA (APÊNDICE D, Tabela D.4 e D.5). O desempenho de aprendizagem da RNA₃₋₃₋₁ foi quantificado a partir da comparação dos valores experimentais de

RT com os valores previstos pela rede. O resultado está no gráfico na Figura 4.30.

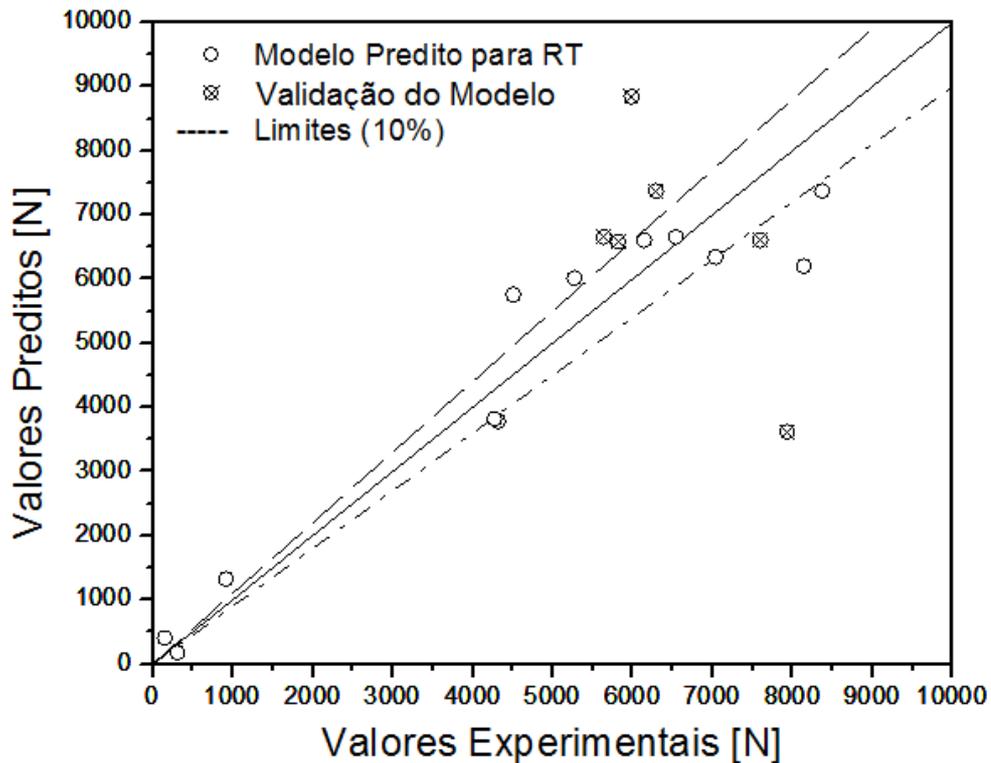


Figura 4.29: Valores previstos e valores experimentais da RNA₃₋₃₋₁ para a resistência à tração (RT).

No gráfico é possível observar que os valores previstos de RT pela RNA₃₋₃₋₁ não se mostraram próximos dos valores experimentais. O modelo apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,81. O baixo ajustamento do modelo da RNA em relação aos valores experimentais foi comprovado pelo alto valor do erro mínimo quadrático médio de (MSE_T) de $2,1 \times 10^{-3}$ (APÊNDICE D, Figura D.1). Dessa maneira, não foi possível validar este modelo, pois o conjunto de dados de teste usado para medir o desempenho do treinamento, também não se mostrou próximo dos valores experimentais. Portanto, a arquitetura 3-3-1 não apresentou uma boa capacidade de aprendizagem, ou seja, esse modelo não pode ser usado para prever os valores de RT das juntas de PC/AA 2024-T351.

Na tentativa de obter um melhor modelo de RNA, foi decidido alterar o número de neurônios da camada de entrada, que inicialmente era representado pelos parâmetros de processo na sua forma reduzida 1-velocidade de rotação, 2-tempo e 3-pressão de união, agora seria representado na sua forma completa, resultando em cinco neurônios: 1' velocidade de rotação, 2' tempo de fricção, 3' tempo de forjamento, 4' pressão de união e 5' pressão de forjamento. Esta modificação é resultado da separação dos parâmetros do processo, tempo e pressão de união, de acordo com as suas respectivas contribuições nas etapas de atrito e forjamento do processo. Desse modo, obteve-se uma RNA do tipo 5-3-1, com cinco neurônios na camada de entrada, três neurônios na camada escondida e apenas um neurônio na camada de saída. Na Figura 5-31 o desempenho da RNA₅₋₃₋₁ foi quantificado a partir da comparação entre os valores experimentais de RT e os valores preditos pela rede.

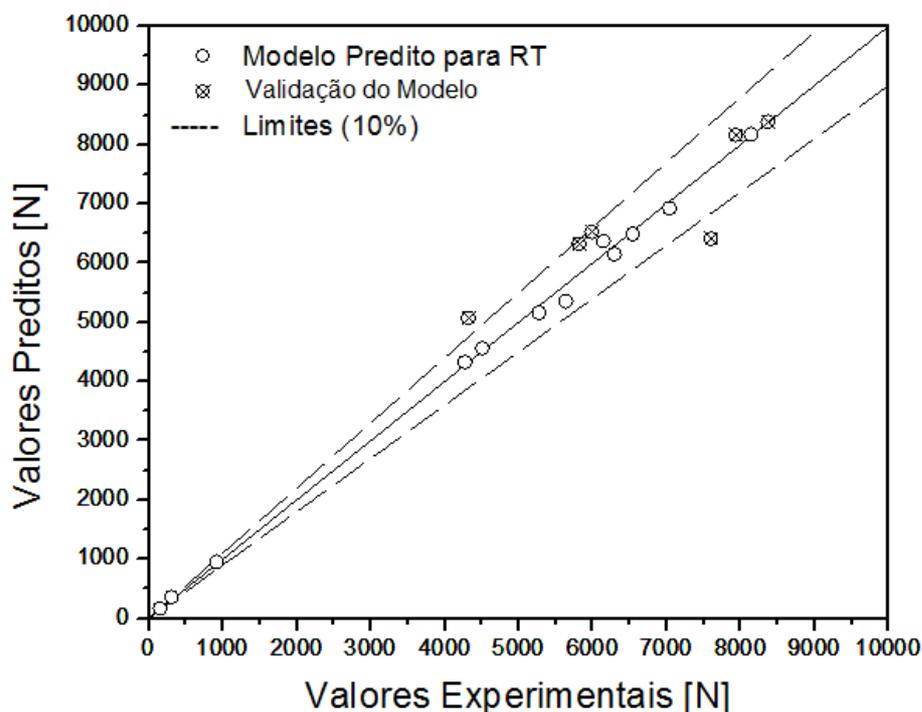


Figura 4.30: Valores previstos versus valores experimentais da RNA₅₋₃₋₁ para a resistência à tração (RT).

A Figura 4.31 mostra que todos os valores preditos pela RNA₅₋₃₋₁ estiveram próximos dos valores experimentais usados na sua dedução ($R^2 = 0,99$). A RNA₅₋₃₋₁ apresentou um valor de MSE_T de $2,3 \times 10^{-5}$ (APÊNDICE D, Figura D.2), considerado um valor pequeno quando comparado com o valor de $2,1 \times 10^{-3}$ da RNA₃₋₃₋₁. Isso significa que a topologia 5-3-1 mostrou um bom desempenho comparado a 3-3-1, ou seja, a maior parte dos pontos usados no teste da RNA encontra-se próxima do limite de erro de 10% estabelecido.

A mesma topologia 5-3-1 foi testada para valores de temperatura máxima (T) na área de união, onde de um total de 18 dados, 12 foram utilizados para treinamento e 6 para testes da RNA₅₋₃₋₁ (APÊNDICE D, Tabela D.6 e D.7). A RNA₅₋₃₋₁ também apresentou bom desempenho na previsão da T, justificado pelo pequeno valor de MSE_T de $2,1 \times 10^{-5}$ (APÊNDICE D, Figura D.3). O modelo apresentou coeficiente de determinação (R^2) no valor de 0,99. Os valores previstos pelo modelo estiveram próximos dos valores usados na sua dedução e teste. (Figura 4.32).

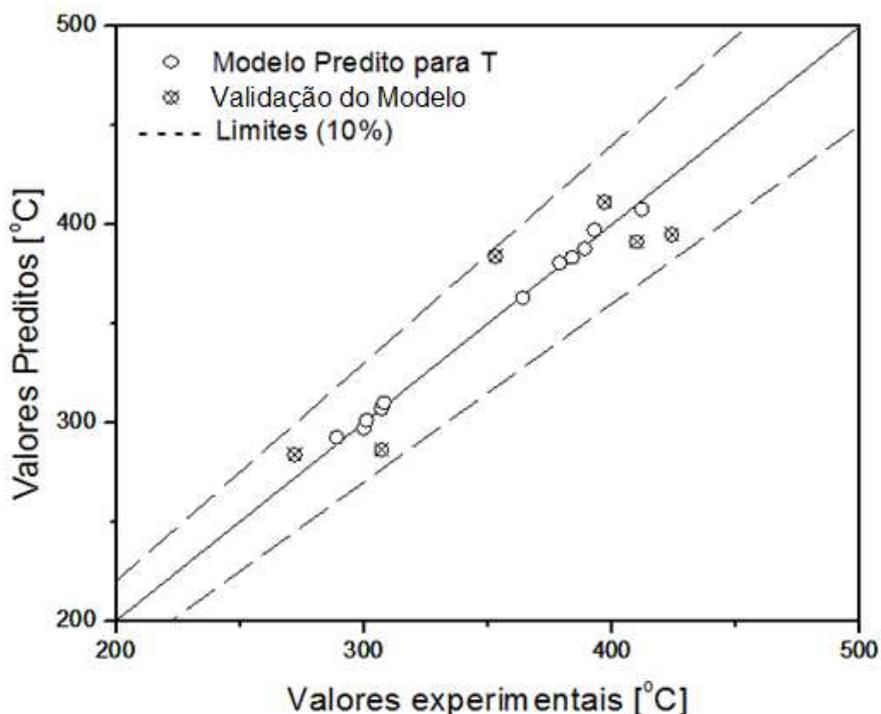


Figura 4.31: Valores previstos pela RNA₅₋₃₋₁ versus valores experimentais da temperatura máxima (T) na área de união.

No treinamento da RNA que representa eficiência de ancoramento do rebite, os valores de razão de aspecto de ancoramento (RA) foram intencionalmente substituídos por valores de razão volumétrica (RV), atualmente o estado da arte para descrever a eficiência de ancoramento do rebite [37]. Como visto na Seção 4.2.7 a formulação proposta para RA apresenta algumas limitações dimensionais com relação aos valores de largura (L) e profundidade (P) similares alcançados pelo rebite AA 2024 no interior das placas de PC. Desse modo, a mesma topologia 5-3-1 de RNA foi testada para razão volumétrica (RV), de um total de 15 dados, 10 foram utilizados para treinamento e 5 para testes da RNA (APÊNDICE D, Tabela D.8 e D.9). O desempenho de aprendizagem de RNA₅₋₃₋₁ para VR foi quantificado a partir da comparação entre os valores previstos gerados pela rede e os valores experimentais como mostrado na Figura 4.33.

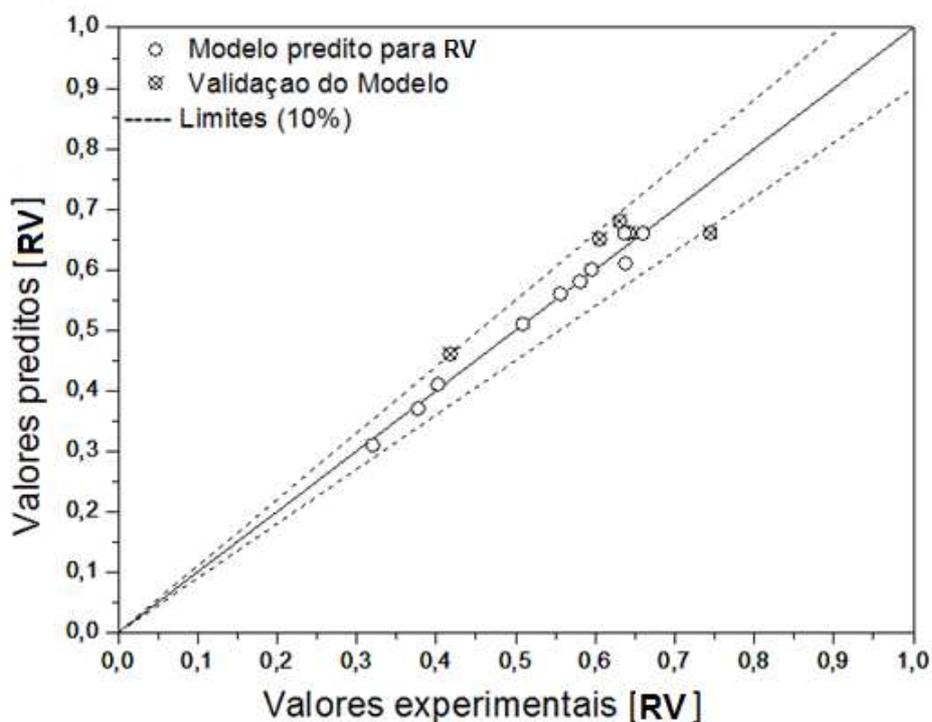


Figura 4.32: Valores previstos pela RNA₅₋₃₋₁ e valores experimentais da razão volumétrica (VR).

O treinamento da RNA₅₋₃₋₁ para RV apresentou um valor de MSE_T de $1,57 \times 10^{-4}$ (APÊNDICE D, Figura D.3), resultando em valores de RV previstos próximos dos valores experimentais ($R^2 = 0,98$). O modelo apresentou um bom desempenho de aprendizagem, com maioria dos dados de teste dentro do limite de erro de 10%.

Os resultados mostram que a inclusão dos parâmetros de processo na sua forma estendida (RNA₅₋₅₋₃₋₁) e não resumida (RNA₃₋₃₋₁), melhorou o poder de generalização e a qualidade de ajuste dos dados. Tal constatação comprova o que já havia sido mencionado na Seção 2.5.3, que uma RNA deve conter todas as informações possíveis a respeito do processo, para que o seu treinamento, resulte em uma aprendizagem satisfatória [67].

O modelo de RNA₅₋₃₋₁ mostrou ser uma boa opção para modelar o processo de rebitagem por fricção, dentro da janela de parâmetro considerada neste estudo. Quando comparado ao PdE, as RNAs apresentaram melhor ajuste dos valores observados de temperatura e RV. Verificou-se, também, que a modelagem das propriedades das juntas via RNA exigiu um menor número de amostras e de ensaios.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou a viabilidade de fabricação de juntas pontuais de Policarbonato (PC) e rebites de AA 2024-T351 por rebitagem por fricção, através do estudo das relações entre os parâmetros de processos e as principais propriedades das juntas (mecânicas, macro e microestruturais, e a evolução da temperatura) facilitando a compreensão do processo.

Foram obtidas juntas com desempenho mecânico satisfatório garantido pelo ancoramento eficaz do rebite metálico na matriz de PC, com temperaturas máximas médias de processo entre 280°C e 360°C. Essa faixa de temperatura é próxima às temperaturas em que o rebite de alumínio experimenta transformações metalúrgicas (502-638°C) e acima da temperatura de transição vítrea do PC (150°C). Portanto, transformações metalúrgicas e físico-químicas aconteceram devido ao processamento termo-mecânico experimentado durante a rebitagem por fricção. Fenômenos metalúrgicos tais como recristalização, recuperação e refinamento parcial de grãos, ocorreram na zona do metal térmica e termomecanicamente afetada, e foram identificados através da análise microestrutural e de microdureza (redução na microdureza da junta em comparação com o material de base metálico). Além disso, observou-se que as temperaturas processuais mostraram-se próximas do intervalo no qual a degradação térmica do PC ocorre por cisão de cadeias (300-380°C). Mas devido ao curto tempo de exposição, o PC na região da junta não sofreu degradação térmica de modo extensivo, o que foi comprovado pela pequena variação da massa molar medida via viscosimetria (com variações dentro do erro experimental), sustentadas pelas observações via espectroscopia no infravermelho (ausência de mudanças acentuadas nas intensidades dos picos das juntas rebitadas em comparação com o PC virgem). Notou-se um pequeno decréscimo da microdureza (6%) na zona consolidação de polímero, localizada na interface polímero-metal, este foi relacionado à relaxação da orientação molecular da chapa extrudada de PC devido à rebitagem por fricção.

A pressão de união foi considerada o parâmetro de processo mais importante para a formação de juntas de qualidade com ancoramento eficiente

do rebite metálico na matriz de PC. Entretanto, é importante considerar a geração de calor promovida pela velocidade de rotação através do atrito friccional, colaborando na plastificação e amolecimento dos materiais de base.

Em adição aos cálculos de razão de aspecto (RA), utilizou-se o conceito de razão volumétrica (RV), um método mais elaborado e atualmente adotado para avaliar o ancoramento do rebite, que considera os volumes de interação entre a zona de ancoramento e o polímero, na observação do comportamento dos valores de resistência a tração com a performance de ancoramento. Em ambos os casos, observou-se um comportamento similar, com a resistência a tração das juntas aumentando com a RV. Isso é um indicativo de que a RA, apesar de simples, é válida para a combinação PC/AA 2024-T351 avaliada nesse trabalho.

As juntas obtidas apresentaram valores de resistência à tração variando entre 1389 ± 102 N e 8653 ± 104 N, com o aparecimento de dois tipos de fraturas: fratura dúctil no rebite localizado externamente a região da matriz de PC (Type I - Through the Rivet) e fratura com remoção total do rebite (Type III - Full Rivet Pullout). Para fins de designer estrutural, é desejável que as juntas falhem pelo modo I, que induz uma falha não catastrófica do tipo dúctil.

O estudo mostrou a importância do uso de ferramentas estatísticas e computacionais (Redes Neurais Artificiais, RNAs) para a avaliação de resultados experimentais, facilitando a interpretação das respostas obtidas. Modelos matemáticos simples foram obtidos para as propriedades das juntas, através da análise estatística. Tais modelos, validados experimentalmente, apresentaram boa confiabilidade e puderam ser usados para prever as propriedades das juntas. Os modelos obtidos por meio das RNAs, também, foram usados para o mesmo propósito. Ambas as ferramentas permitiram reduzir o número de experimentos e o consumo de materiais na otimização do processo.

Os resultados obtidos demonstraram o potencial da tecnologia de rebite na união de PC e rebites de AA 2024-T351. Estudos mais aprofundados na área de propriedades mecânicas e microestrutura em andamento ajudarão a melhor entender o comportamento do processo,

ajudando a acelerar a transferência dessa nova tecnologia em aplicações automotivas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Simulação da distribuição das deformações e/ou tensões induzidas nas juntas através do método de fotoelasticidade.

- ✓ Realização de testes de cisalhamento de juntas sobrepostas (*“lap shear”*) e análise dos seus mecanismos de falhas e a sua correlação com a microestrutura.

- ✓ Aprimoramento do modelo de redes neurais com maior volume de dados sobre as propriedades das juntas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] OLIVEIRA, C. Setor automotivo impulsiona o surgimento de novas resinas. **Revista Plástico Industrial**, São Paulo, v. 15, n. 172, p. 102-104, 2012.
- [2] BENDA, B. C. Automotive materials (Polyurethane and Polycarbonate). **Bayer Material Science**, Troy - Michigan, p. 4, 2011.
- [3] THOMAZ, I. **Vidros logo farão parte do passado**. Disponível: <<http://www.revistaautoesporte.com.br>>. Acesso em 14 de fev. de 2013.
- [4] MATSUBARA, V. **Renault apresenta Mégane R26.R em Londres**. Disponível: <<http://www.quatrorodas.abril.com.br>>. Acesso em 15 de fev. de 2013.
- [5] AZIZ, N. **Hyundai QarmaQ concept**. Disponível: <<http://www.leftlanenews.com/hyundai-qarmaq-conceot.html>> .Acesso em 15 de fev. de 2013.
- [6] MESSLER JR, R. W. **Trends in key joining technologies for the twenty-first century**, Assembly Automomation, v. 20, n. 2, p. 118-128, 2000.
- [7] LINCOLN, B. **Mechanical fastening of plastics**—An Engineering Handbook. New York: Marcel Dekker, 1984.
- [8] HILTON, P. A.; JONES, I. A.; KENNISH, Y. IN THE FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH-POWER LASER MACROPROCESSING, SPIE, 2002. **Proceedings**. Osaka: The International Society for Optical Engineering, 2002. v. 4831.
- [9] AMANCIO FILHO, S. T.; BEYER, M.; DOS SANTOS, J. F. **Method of connecting a metallic bolt to a plastic workpiece**. US 7575149 B2, 2009.
- [10] AMANCIO-FILHO, S. T. Friction Riveting: development and analysis of a new joining technique for polymer-metal multi-material structures. **Welding in the World**, v. 55, n. 1-2, p. 13-24, 2011.

- [11] EDWIN, C. **Car of the future project**. Design Research. Disponível: <<http://edwinconan.wordpress.com/tag/car-of-the-future/>> Acesso em 09 de abr. de 2013.
- [12] AMANCIO-FILHO S. T. Rebitagem por fricção ("FricRiveting"). Desenvolvimento de uma nova técnica de união para juntas híbridas do tipo polímero-metal. Parte II: propriedades térmicas e mecânicas. São Paulo, **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 4, p. 396-404, 2011.
- [13] WEHRMANN, R. **Encyclopedia of materials: science and technology – polycarbonate**. Amsterdam: Elsevier Ltd., p. 7148-7151, 2001.
- [14] BRUNELLE, D. J. **Polycarbonates**. In: Mark H. F. Encyclopedia of polymer science and technology. 3th edition. New York: John Wiley & Sons, 2003, v. 7, p. 397-426.
- [15] PAKULL, R.; GRIGO, U.; FREITAS, D. Polycarbonates. USA, **Rapra Review Reports**, v. 4, p. 3-10, 1991.
- [16] MONTENEGRO, S. P. **Policarbonato**. Informe setorial, n.8, 1995. Disponível: <<http://www.federativo.bndes.gov.br/conhecimento/setorial/pc2.pdf>> Acesso em 09 de abr. de 2013.
- [17] JANG, B. N.; WILKIE, C. A. A TGA/FTIR and mass spectral study on the thermal degradation of bisphenol A polycarbonate. **Polymer Degradation and Stability**, v. 86, p. 419-430, 2004.
- [18] DAVIS, A.; GOLDEN, J. H. **J.Chem Soc.** (B) 1968, 45.
- [19] LEE, L.H. J. **Polymer Science**. Part A, 2, 2859, 1964.
- [20] PULGLISI, C.; STURIALE, L.; MONTEUDO, G. Thermal decomposition processes in aromatic polycarbonates investigated by mass spectrometry. **Macromolecules**, v. 32, p. 2194-2203, 1999.
- [21] AMERICAN SOCIETY FOR METALS – ASM. **International handbook of aluminium & aluminium alloys**. 3th edition. USA, 1996.
- [22] IMMARIGEON, G. P *et al.* Lightweight materials for aircraft application. **Materials characterization**, v. 35, p. 41-67, 1995.

- [23] AMERICAN SOCIETY FOR METALS – ASM. **Metals handbook: Properties and selection – nonferrous alloys and special-purpose materials**. 2th edition. USA, 1990.
- [24] HATCH, J. E. **Properties of commercial wrought alloys**. In: _____ **Aluminum: properties and physical metallurgy**. Metals Park, OH: ASM, cap. 9, p. 351-378, 1984.
- [25] SMALLMANN, R. E. **Modern physical metallurgy**, 4th edition. London: Oxford Butterworths, 1985.
- [26] UEKI, M.; HORIE, S.; NAKAMURA, T. Factors affecting dynamic recrystallization of metals and alloys. **Materials Science and Technology**, v. 3, p. 329-337, 1987.
- [27] FRATIN, L.; BUFFA, G.; CDRX modeling in friction stir welding of aluminium alloys. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 45, p. 1188-1194, 2005.
- [28] KULKARIN, S. S.; STARKE, E. A.; KUHLMANN-WILLDORF, D. Some observations on deformation banding and correlated microstructures of two aluminium alloys compressed at different temperatures. **Acta Materialia**, v. 46, p. 5283-5301, 1998.
- [29] PÉREZ-PRADO, M. T. *et al.* Texture analysis of transition from slip to grain boundary sliding in a continuous recrystallized superplastic alloy. **Materials Science and Engineering**, v. A342, p. 216-230, 2003.
- [30] LIU, J. Shear banding in rolled dispersion hardened Al-Mg₂Si alloys. **Cripta Metallurgica**, v. 23, p. 1811-1816, 1989.
- [31] AMANCIO-FILHO, S. T. **Friction Riveting**: development and analysis of a new joining technique for polymer-metal multi-materials structures. 145p. Tese (Doutorado em engenharia) - Technische Universität Hamburg, Hamburg, Alemanha, 2007.
- [32] AMANCIO-FILHO, S. T.; DOS SANTOS, J. F. FricRiveting: a new joining technique for thermoplastics - lightweight alloy structures. **Materials science &**

technology conference and exhibition (MS&T partner societies), Pittsburgh, 2008.

[33] ALTMAYER, J.; DOS SANTOS, J. F.; AMANCIO-FILHO, S. T. Effect of the friction riveting process parameters on the joint formation and performance of Ti alloy/short-fibre reinforced polyether etherketone joints. **Materials and Design**, v. 60, p.164-176, 2014.

[34] AMANCIO FILHO, S. T *et al.* Thermal degradation of polyetherimide joined by friction riveting (FricRiveting). Part I: Influence of rotational speed. **Polymer Degradation and Stability**, v. 93, n. 8, p. 1529-1538, 2008.

[35] BORGES, M. F. E. *et al.* Development of computational models to predict the mechanical behavior of Friction Riveting joints. **Computational Materials Science**, v. 54, p. 7-15, 2012.

[36] AMANCIO-FILHO, S. T.; DOS SANTOS J. F.; VENTZKE, V. Determination of fracture mechanism under tensile loading in commercial available engineering thermoplastic material joined by FricRiveting. In: 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE OF POLYMER, **Composites and Adhesives**, 2008. p. 7-11.

[37] BLAGA, L. **Inovating materials in bridge construction. Contribution to construction with composite fiber reinforced materials.** 150p.Tese (Doutorado de engenharia), Universitatea "Politehnica" Timisoara, Romania, 2012.

[38] AMANCIO FILHO, S. T.; BECKMANN, F.; DOS SANTOS, J. F. Synchrotron X- Ray computer microtomografic and light optical microscopic investigation of strength an microstructure of polymer-metal joints produced by FricRiveting. In: TMS, 2009. **Proceedings**. San Francisco: Annual Meeting & Exhibition, 2009. p. 5-13.

[39] BLAGA, L. *et al.* Fricriveting of civil engineering composite laminates for bridge construction. In: ANTEC, 2012. **Proceedings**. Orlando: Society of Plastics Engineers, 2012. n. 850.

- [40] BOOKER, J. D. Industrial practice in designing for quality. **International journal of quality reliability and management**, v. 20, n. 3, p. 388-203, 2003.
- [41] MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 6th edition. Arizona: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [42] MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. 3th edition. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [43] BARROS-NETO, B. B.; SCARMÍNIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas, 2007.
- [44] CAMPANELLI, L. C. *et al.* Otimização dos parâmetros de soldagem por fricção por ponto da liga de magnésio AZ31 pelo método de Taguchi. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, v. 17, p. 26-31, 2012.
- [45] GUNARAJ, V.; MURUGAN, N. Application of response surface methodology for predicting weld bead quality in SAW of pipes, **Journal of Mater Processing Technology**, v. 88, p. 266-275, 1999.
- [46] SINGLA, M.; SINGH, D. Parametric optimization of gas metal arc welding processes by using factorial design approach, **Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering**, v. 9, p. 353-363, 2010.
- [47] BARROS-NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. 2^a edição. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas, 1995.
- [48] KLEIJNEN, J. P. C. *et al.* State-of-art review A user's guide to the brave new world of designing simulation experiments. **Inform journal on computing**, v. 17, n. 3, p. 263-289, 2005.
- [49] XIANSHENG, N. *et al.* The use of Taguchi method to optimize the laser welding of sealing neuro-stimulator. **Optics and lasers in engineering**, v. 48, n. 3, p. 297-304, 2011.
- [50] ROWLANDS, H.; ANTONY, F. Application of design of experiments to a spot welding process. **Assembly Automotion**, v. 23, n. 3, p. 273-279, 2003.

- [51] DEVOR, R. E.; CHANG, T.; SUTHERLAND, J. W. **Statistical quality design and control**: contemporary concepts and methods. New Jersey: Prentice Hall, Inc. cap. 15-20, p. 503-744, 1992.
- [52] HAYKIN, S. **Redes neurais**: princípios e prática. 2th edition. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- [53] BRAGA, A. P.; LUDEMIR, T. B.; CARVALHO, A. C. **Redes neurais artificiais**: teoria e aplicações. Rio de Janeiro: editora LTC, 2000.
- [54] LIAO, W.; TANG, K. Automated extraction of welds from digitized radiographic images based on MLP neural networks, **Applied artificial intelligence**, v. 11, n. 13, p. 197-218, 1997.
- [55] OLIVEIRA, M. **Neurônios**. Disponível:<<http://www.infoescola.com/sistema-nervoso/neurônios>>. Acesso em 08 de abr. de 2013.
- [56] MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **Bulletin of mathematical biophysics**, v. 5, p. 115-133, 1943.
- [57] CYBENKO, G. Approximation by superpositions of a sigmoidal function. **Mathematics of Control, Signals, and Systems**, v. 2, p. 303-314, 1989.
- [58] PINTO, D. P. **Modelagem da forma geométrica dos cordões de solda utilizando ajuste de curva para simulação computacional**. Fev., 2011. 139p. Dissertação (Mestrado no programa de pós-graduação da engenharia mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- [59] ZHANG, G.; PATUWO, B. E.; HU, M. Y. Forecasting with artificial neural networks: the state of the art. **International Journal of Forecasting**, Kent (Ohio), v. 14, n. 1, p. 35-62, 1998.
- [60] BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. C.; LUDERMIR, T. B. **Redes neurais artificiais**. In: REZENDE, S. O. **Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações**. Barueri: Manole, 2003. cap. 6.

- [61] BENYOUNIS, K. Y., OLABI, A. G. Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches: reference guide. **Advances in Engineering Software**, v. 39, p. 483–496, 2008.
- [62] KHORRAN, A.; Yazdi, M. R.; Ghoreishi, M.; Moradi, M. Using ANN approach to investigate the weld geometry of Ti 6Al 4V titanium alloy. **IACSIT International Journal of Engineering and Technology**, v. 2, n. 5, 2010.
- [63] ÖZERDEM, M. S.; SEDAT, K. Artificial neural network approach to predict the mechanical properties of Cu–Sn–Pb–Zn–Ni cast alloys. **Materials and Design**, v. 30, p. 764–769, 2009.
- [64] Martion, O.; DE TIEDRA, P.; MANUEL, L. Artificial neural networks for pitting potential prediction of resistance spot welding joints of AISI 304 austenitic stainless steel. **Corrosion Science**, v. 52, p. 2397–2402, 2010.
- [65] HIMMELBLAU, D. M. **Applied nonlinear of optimization**, New York: McGraw Hill, 1972.
- [66] ZURADA, J. M. **Introduction to artificial neural systems**, New York: West Publishing Company, 1992.
- [67] HAGAN, M.T.; DEMUTH, H. P.; BEALE, M. **Neural networks design**. Boston: PWS Publishing, 1996.
- [68] FAUSSET, L. **Fundamental of neural networks: architectures, algorithms, and applications**. 3th edition. New Jersey: Prentice Hall, 2008.
- [69] HOU, F. **Development of a neural network fault diagnostic system for gas turbine engine**. 2007. 138p. MSc Thesis (School of Engineering). Cranfield University, 2007.
- [70] MATTOS, F. **FricRiveting of aluminium/thermoplastics for automotive application**. Alemanha: Helmholtz-Zentrum Geesthacht, 2010. Internal report.
- [71] MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 6th edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2008.

- [72] KANO, E., **Influence of process parameters on Friction Riveting and modeling of Friction Riveting by statistical and artificial neural networks approaches**. Alemanha: Helmholtz-Zentrum Geesthacht, 2009. Internal report.
- [73] HUBBER, N. **Anwendung Neuronaler Netze bei nichtlinearen Problemen der Mechanik**. Forschungszentrum Karlsruhe, zugleich Habilitationsschrift. Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2000.
- [74] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Test method for microindentation hardness of material**. ASTM E384-992e, USA, 2005.
- [75] CALLEJA, F. J. B.; FAKIROV, S. **Microhardness of polymers**. England: Cambridge University Press, 2000.
- [76] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for dilute solution viscosity of polymers**. ASTM 2857-95, USA, 2007.
- [77] ALLEN, N. S.; EDGE, M. **Fundamentals of polymer degradation and stabilization**. Inglaterra: Elsevier Science Publishers, cap. 1, p. 1-20, 1992.
- [78] DEUTCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Tensile testing of metallic materials, method of test at ambient temperature**. DIN EN10002, Alemanha, 1999.
- [79] AMANCIO FILHO S. T. Rebitagem por fricção ("FricRiveting"): desenvolvimento de uma nova técnica de união para juntas híbridas do tipo polímero-metal. Parte II: processo e microestrutura. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 387-395, 2011.
- [80] KHAN, M. M. A. *et al.* Experimental design approach to the process parameter optimization for laser welding of martensitic stainless steels in constrained overlap configuration. **Optics & Laser Technology**, v. 43, p. 158-172, 2011.
- [81] AMANCIO FILHO S. T.; DOS SANTOS J. F., Influence of processing parameters on microstructure and properties of a polyetherimide joined by FricRiveting: investigation of rotational speed. In: ANTEC 2009, McCormick Place, Illinois, p. 759-756, 2009.

- [82] BLAGA, L. *et al.* Friction Riveting of glass–fibre-reinforced polyetherimide composite and titanium grade 2 hybrid joints. **Materials & Design**, v. 50, p. 825-829, 2013.
- [83] SENTHILVELAN, T.; RAGHUKANDAN, K.; VENKATRAMAN, A. Modelling of process parameters on the working of P/M copper preforms. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 142. p. 767-772, 2003.
- [84] BUSSAB, W. O; MORETIN, P. A. **Estatística básica**. São Paulo: Atual, 1985.
- [85] WERKEMA, M. C. C. **Planejamento e análise de experimentos**: como identificar, avaliar as principais variáveis influentes em um processo. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, E.E.UFMG, 1996.
- [86] SARSILMAZ, F.; CAYDAS, U. Statistical analysis on mechanical properties of friction-stir-welded AA 1050/AA 5083 couples. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 43, p. 248-255, 2009.
- [87] LIN, J. T.; BHATTACHARYYA, D.; KECMAN, V. Multiple regression and neural networks analyses in composites machining, **Composites Science and Technology** v. 63, p. 539-548, 2003.

APÊNDICE A - MONITORAMENTO DA TEMPERATURA

Dados de temperatura na área de união das juntas, obtidos através de monitoramento utilizando uma câmera de infravermelho. Cada gráfico, das Figuras A.1 até A.8, contém as medições referentes a cada uma das condições e suas réplicas, utilizadas neste estudo (Tabela 3.4 - Seção 3.2).

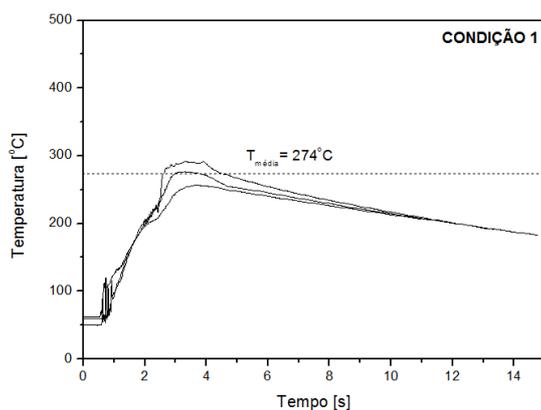


Figura A.1: Temperatura Cond 1.

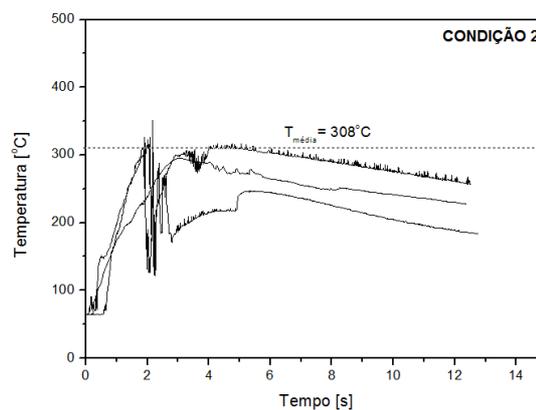


Figura A.2: Temperatura Cond 2.

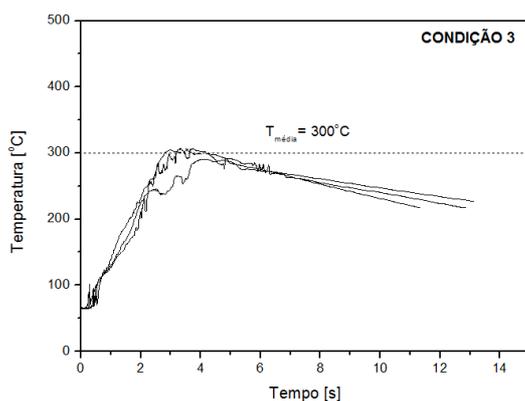


Figura A.3: Temperatura Cond 3

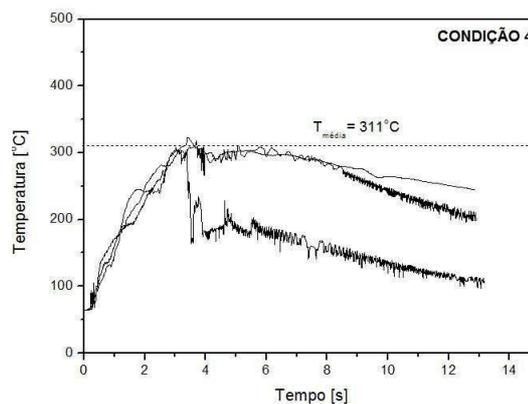


Figura A.4: Temperatura Cond.4

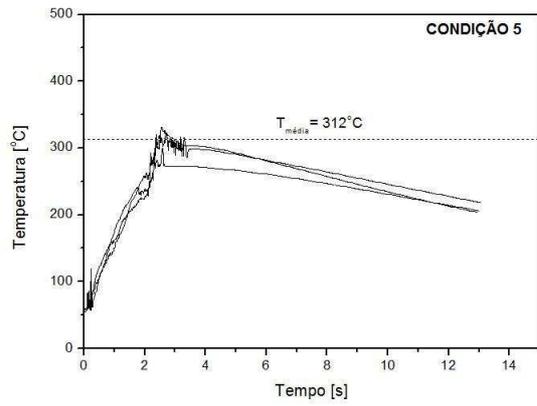


Figura A.5: Temperatura Cond.5

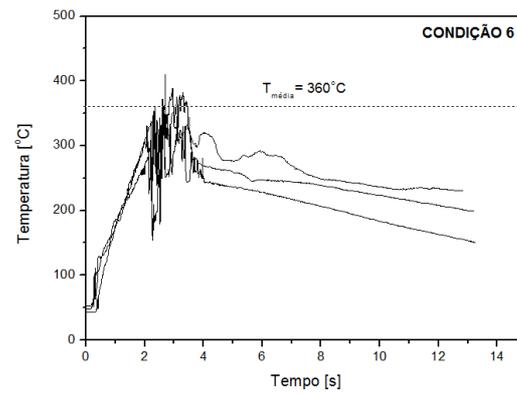


Figura A.6: Temperatura Cond.6

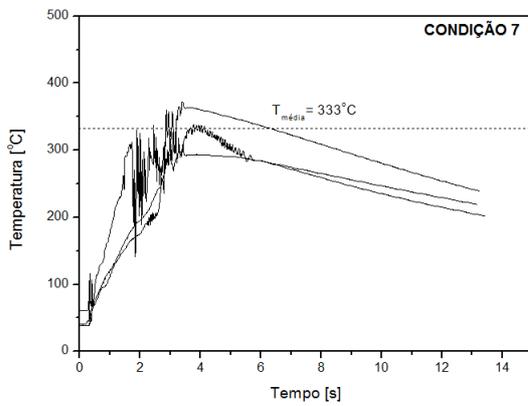


Figura A.7: Temperatura Cond.7

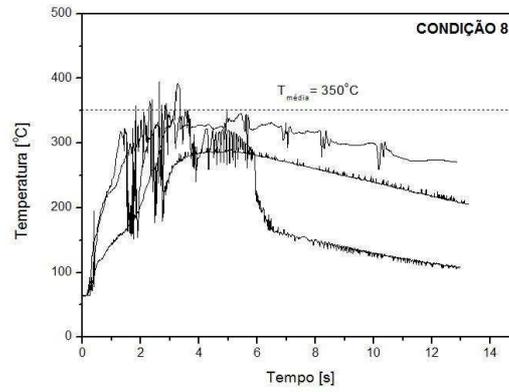


Figura A.8: Temperatura Cond. 8

Nos gráficos, das Figuras A.9 até A.13, estão os dados de temperatura na área de união das juntas utilizados na validação do PdE fatorial completo.

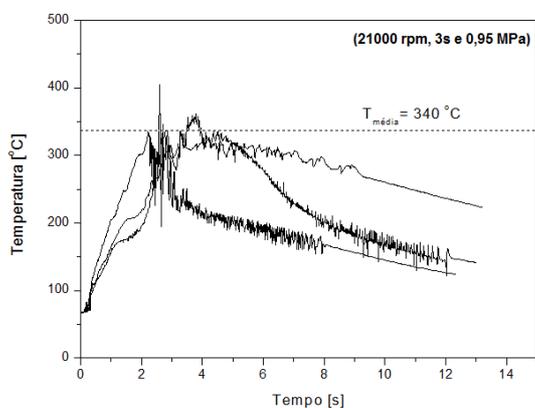


Figura A.9: Temperatura Cond. 21000 rpm, 3 s e 0,95 MPa

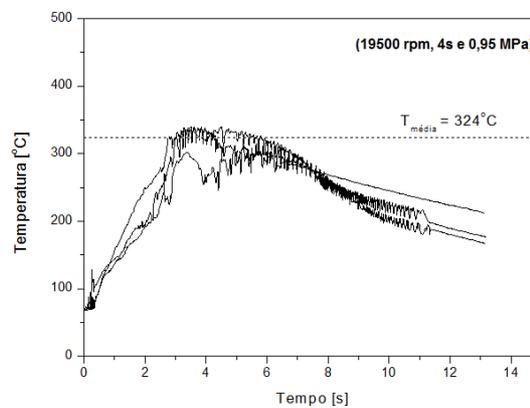


Figura A.10: Temperatura Cond. 19500 rpm, 4 s e 0,95 MPa

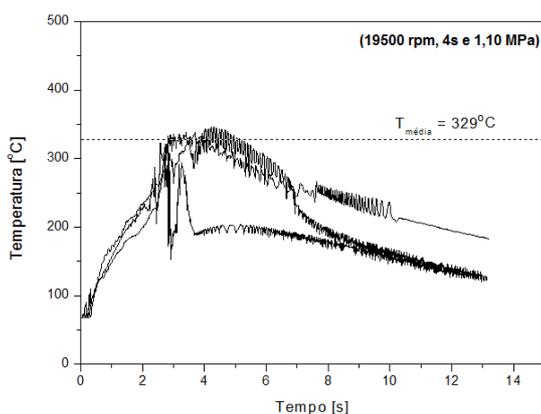


Figura A.11: Temperatura Cond. 19500 rpm, 4 s e 1,10 MPa

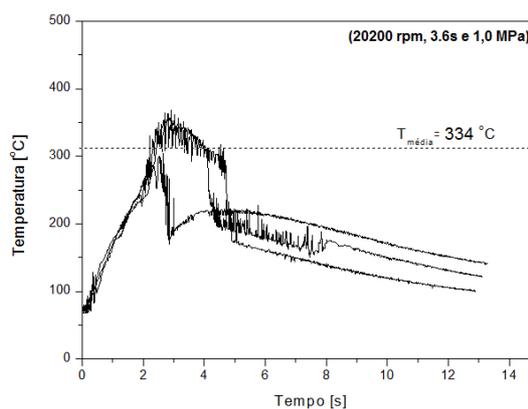


Figura A.12: Temperatura Cond. 20200 rpm, 3,6 s e 1,0 MPa

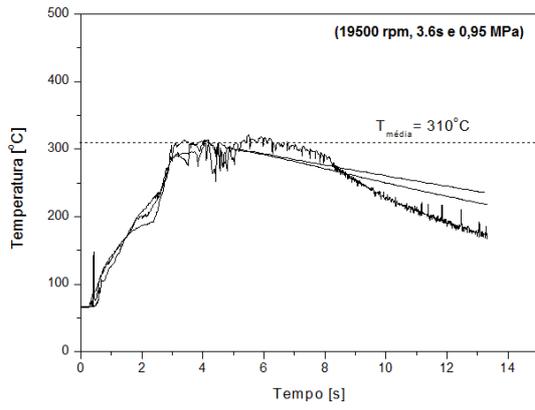


Figura A.13: Temperatura Cond.
19500 rpm, 3,6 s e 0,95 MPa

APÊNDICE B - CÁLCULO DA RAZÃO DE ASPECTO DE ANCORAMENTO (AR) E RAZÃO VOLUMÉTRICA (VR)

O valor da razão de aspecto de ancoramento (RA) foi calculado via software Photoshop CS5, a partir dos valores de profundidade de penetração (P) da ponta do rebite, linha vertical traçada através secção transversal da espessura da placa de polímero, e largura de deformação (L) - linha horizontal traçada por entre as extremidades de maior deformação da ponta do rebite. Já os valores de razão volumétrica foram obtidos através da Equação 4.2, definida na Seção 4.2.7. Na Tabela B.1 são exibidos os valores usados o cálculo de RA e RV. E em seguida, nas Figuras B.1 e B.2 estão as macrografias usadas na obtenção das medidas.

Tabela B.1: Valores usados para o cálculo de AR e VR (Diâmetro inicial do rebite igual a 5 mm).

Condições do PdE Fatorial Completo						
Cond.	P [mm]	WL[mm]	D [mm]	P-D [mm]	RA, W/H [a.u]	RV [a.u]
1A	13,99	5,58	0,27	13,72	0,34	0,19
1B	14,91	5,03	-	-	0,33	-
1C	12,60	5,61	0,54	12,06	0,40	0,20
2A	13,26	6,56	0,80	12,56	0,49	0,39
2B	13,95	6,14	0,93	13,02	0,44	0,31
2C	14,24	6,16	0,64	13,60	0,43	0,33
3A	14,63	5,74	0,72	13,91	0,39	0,23
3B	14,95	5,38	-	-	0,36	-
3C	14,22	5,92	0,25	13,97	0,42	0,28
4A	12,73	7,28	0,77	11,96	0,51	0,50
4B	13,05	7,13	0,76	12,29	0,57	0,48
4C	13,34	6,75	0,84	12,50	0,55	0,42
5A	12,22	7,22	0,81	11,41	0,59	0,49
5B	12,23	7,23	1,20	11,03	0,59	0,47
5C	12,04	7,87	1,67	10,37	0,65	0,51
6A	10,41	9,38	0,66	9,75	0,90	0,67
6B	11,26	9,50	0,57	10,69	0,84	0,69
6C	10,73	9,50	0,58	10,15	0,89	0,68
7A	12,39	8,32	0,55	11,84	0,73	0,61
7B	11,49	8,43	0,82	10,67	0,67	0,60
7C	12,85	7,97	1,00	11,85	0,62	0,56
8A	12,53	7,91	0,76	11,77	0,63	0,56
8B	12,75	8,21	0,55	12,20	0,64	0,60
8C	13,64	8,68	0,49	13,15	0,64	0,64

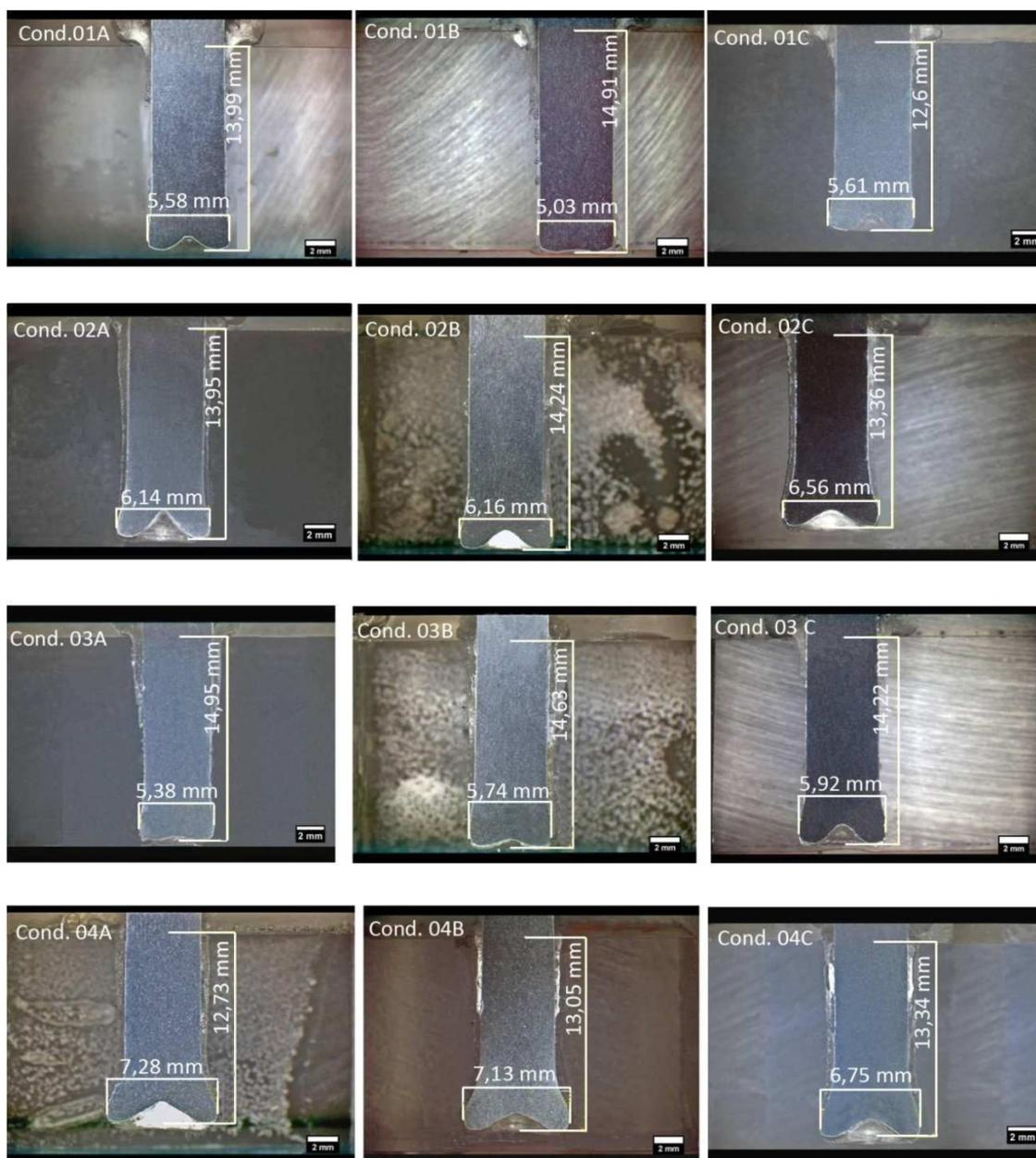


Figura B. 1: Seção transversal das condições 1, 2, 3 e 4 usadas na construção do modelo estatístico da razão de aspecto de ancoragem (RA).

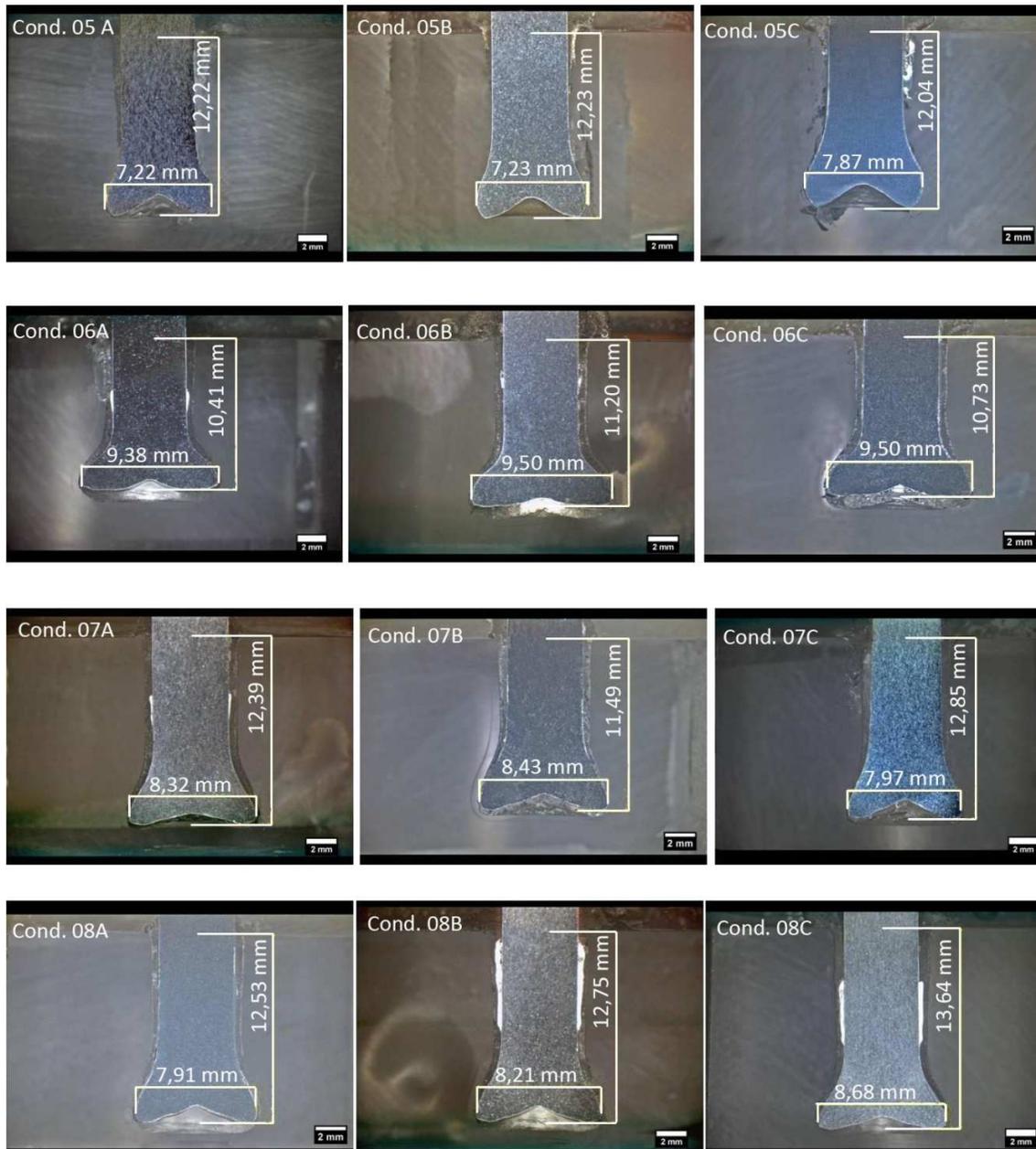


Figura B.2: Seção transversal das condições 5, 6, 7 e 8 usadas na construção do modelo estatístico da razão de aspecto de ancoragem (RA).

Tabela B.1: Valores de RA usados na validação do modelo estatístico da razão de aspecto de ancoramento (RA).

Condições utilizadas na validação do PdE Fatorial Completo					
VR [rpm]	TU [s]	PU [MPa]	P [mm]	L [mm]	RA
19500	3,6	0,95	12,53	7,76	0,61
19500	4,0	1,10	12,72	7,65	0,60
21000	3,0	0,95	11,77	8,94	0,76
19000	2,5	1,10	11,46	7,58	0,66
20000	2,5	0,80	13,45	6,29	0,47

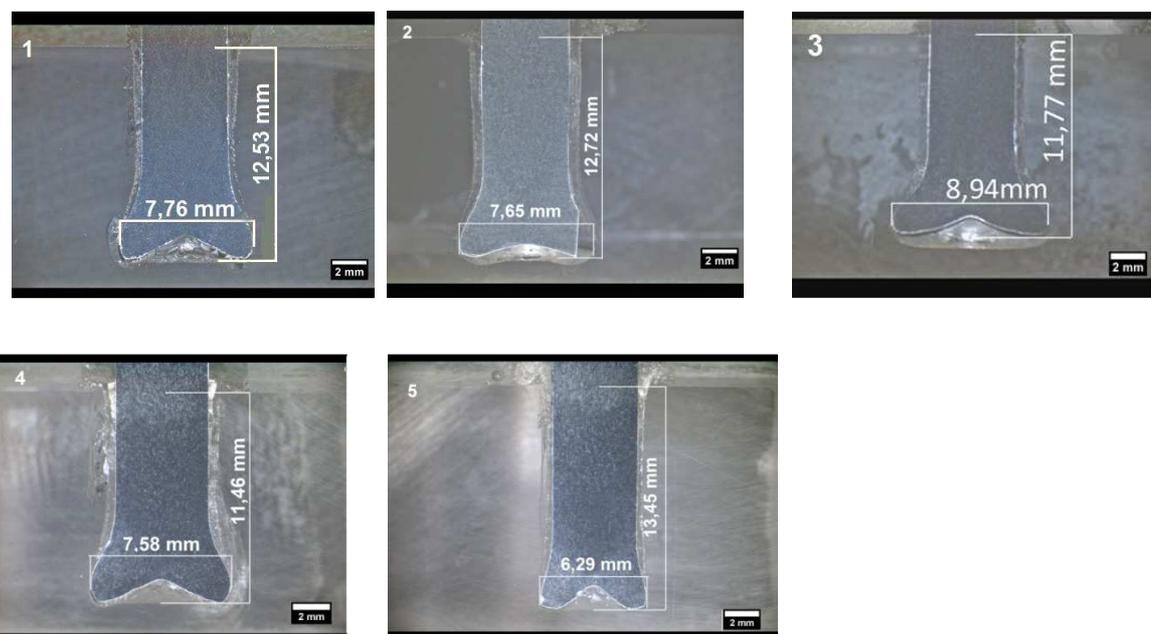


Figura B. 3: Seção transversal das condições utilizadas na validação do modelo estatísticos da razão de aspecto de ancoramento (RA).

APÊNDICE C - ENSAIO DE TRAÇÃO

As amostras soldadas foram ensaiadas mecanicamente sob tração. A seguir, nas Figuras C.1 a C.8, são exibidas as curvas força-alongamento para cada condição utilizada neste estudo.

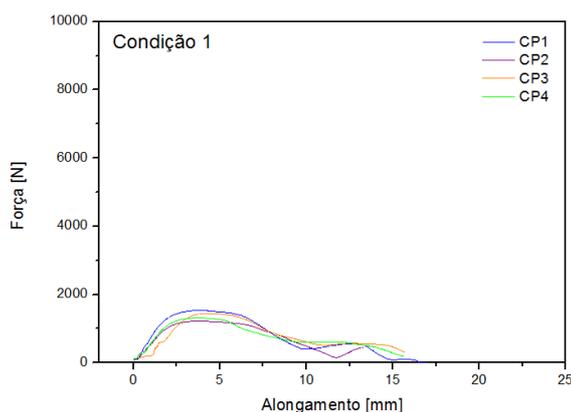


Figura C.1: Gráfico força-alongamento Cond. 1

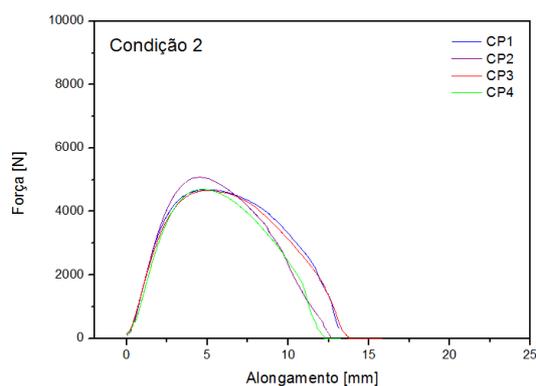


Figura C.2: Gráfico força-alongamento Cond. 2

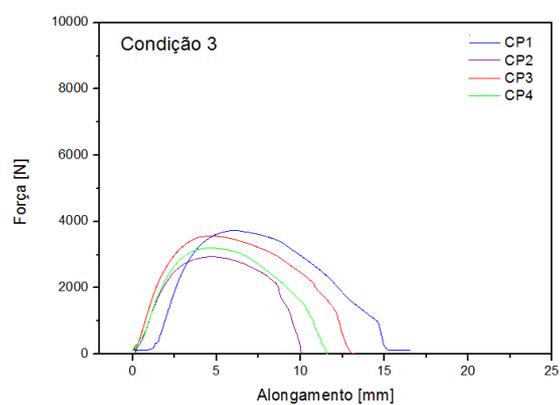


Figura C.3: Gráfico força-alongamento Cond. 3

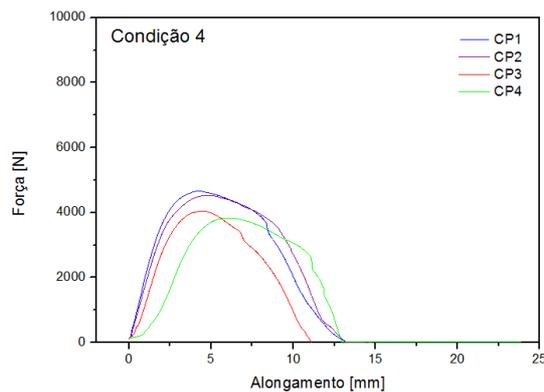


Figura C.4: Gráfico força-alongamento Cond. 4

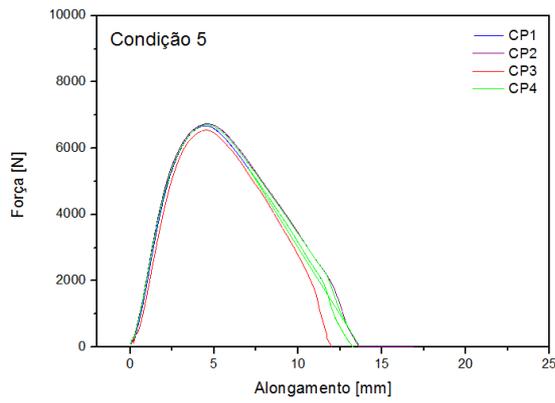


Figura C.5: Gráfico força alongamento Cond. 5

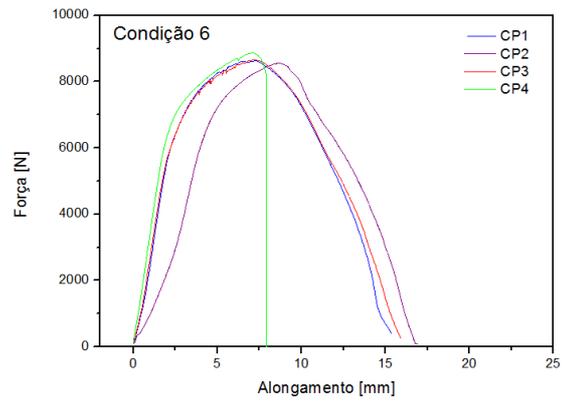


Figura C.6: Gráfico força alongamento Cond. 6

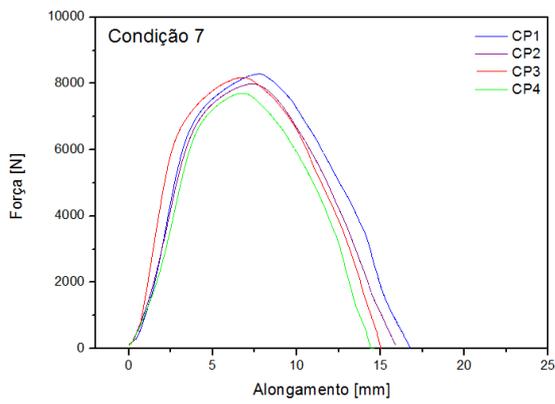


Figura C.7: Gráfico força alongamento Cond. 7

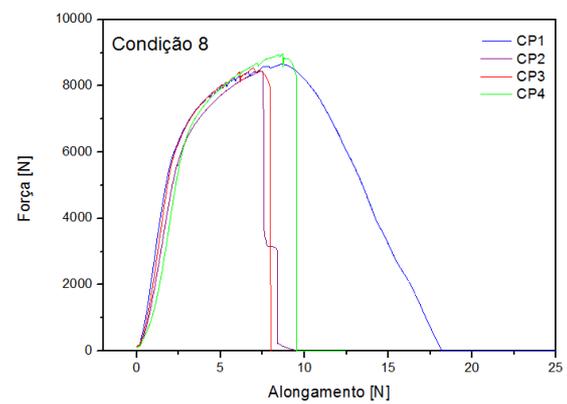


Figura C.8: Gráfico força alongamento Cond. 8

Validação PdE fatorial completo

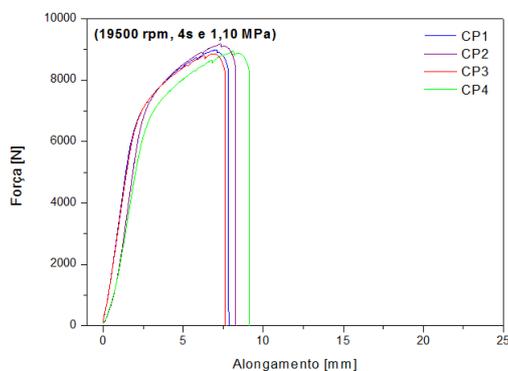


Figura C.9: Gráfico força-alongamento Cond. 19500 rpm, 4 s e 1,10 MPa

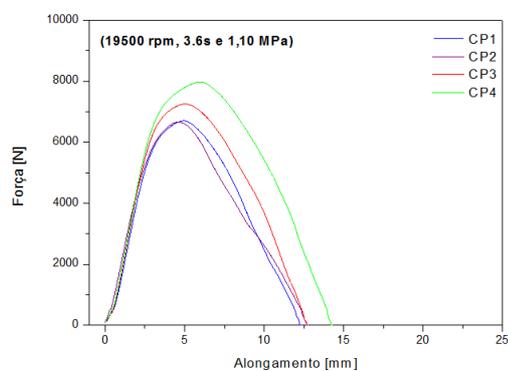


Figura C.10: Gráfico força-alongamento Cond. 19500 rpm, 3,6 s e 1,10 MPa

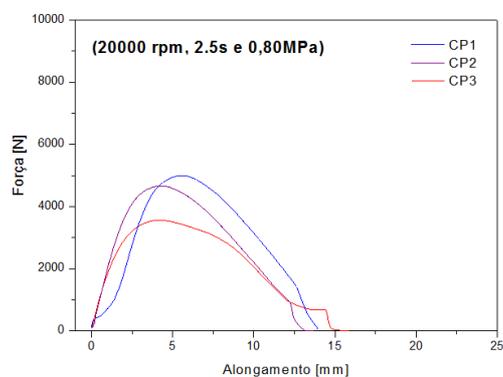


Figura C.11: Gráfico força-alongamento Cond. 19500 rpm, 2,5 s e 0,80 MPa

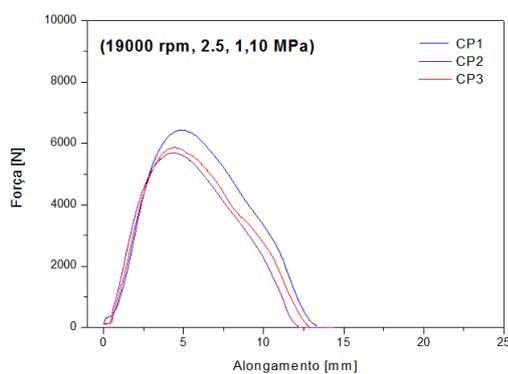


Figura C.12: Gráfico força-alongamento Cond. 19500 rpm, 2,5 s e 1,10 MPa

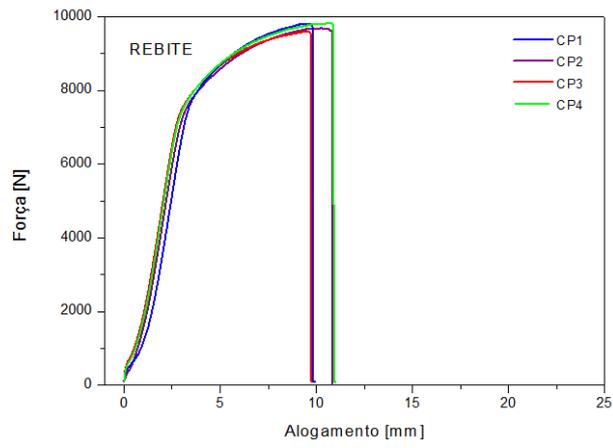


Figura C. 13: Gráfico força-alongamento Rebite AA 2024-T351

APÊNDICE D - MODELAGEM ESTATÍSTICA E REDES NEURAIS

VR = velocidade de rotação, TU = Tempo de União e PU = pressão de união						
Regression Equation - Max. Temperature						
Max. Temperature = - 460,744 + 0,0270344 VR + 179,890 TU - 139,26 PU - 0,0071868 VR* TU + 0,0189556 VR* PU + 26,990 TU * PU - 0,0029746 VR* TU * PU						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		-460,744	1,981	160,67	0,000	
VR		29,353	0,027	1,981	7,41	0,000
TU		11,059	179,890	1,981	2,79	0,013
PU		42,639	-139,260	1,981	10,76	0,000
VR* TU		-14,907	-0,007	1,981	-3,76	0,002
VR* PU		4,486	0,018	1,981	1,13	0,274
TU * PU		-5,428	26,990	1,981	-1,37	0,190
VR* TU * PU		-0,781	-0,003	1,981	-0,20	0,846
Summary of Model						
S = 9,70301 PRESS = 3389,34						
R-Sq = 92,45% R-Sq(pred) = 83,01% R-Sq(adj) = 89,15%						
Analysis of Variance						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
VR	1	5169,4	5169,4	5169,4	54,91	0,000
TU	1	733,8	733,8	733,8	7,79	0,013
PU	1	10908,6	10908,6	10908,6	115,87	0,000
VR* TU	1	1333,4	1333,4	1333,4	14,16	0,002
VR* PU	1	120,7	120,7	120,7	1,28	0,274
TU * PU	1	176,7	176,7	176,7	1,88	0,190
VR* TU * PU	1	3,7	3,7	3,7	0,04	0,846
Error	16	1506,4	1506,4	94,1		
Total	23	19952,8				
VR = velocidade de rotação, TU = Tempo de União e PU = pressão de união						
Regression Equation Reduction - Max. Temperature						
Max. Temperatura = -697,797 + 0,0448572 VR + 206,157 TU + 111,395 PU - 0,0100106 VR* TU						
Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	-697,797	148,337	-4,7041	0,000		
RS	0,045	0,008	5,8608	0,000		
JT	206,157	41,339	4,9869	0,000		
JP	111,395	8,997	12,3809	0,000		
RS* JT	-0,010	0,002	-4,6956	0,000		
Summary of Model						
S = 7,38517 R-Sq = 94,19% R-Sq(adj) = 92,82%						
PRESS = 1502,94 R-Sq(pred) = 90,58%						
Analysis of Variance						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	15027,4	15027,4	3756,84	68,881	0,000000
RS	1	4604,5	1873,4	1873,40	34,349	0,000019
JT	1	859,9	1356,4	1356,40	24,870	0,000113
JP	1	8360,4	8360,4	8360,43	153,288	0,000000
RS* JT	1	1202,5	1202,5	1202,53	22,048	0,000208
Error	17	927,2	927,2	54,54		
Lack-of-Fit	3	72,6	72,6	24,20	0,396	0,757627
Pure Error	14	854,6	854,6	61,04		
Total	21	15954,6				

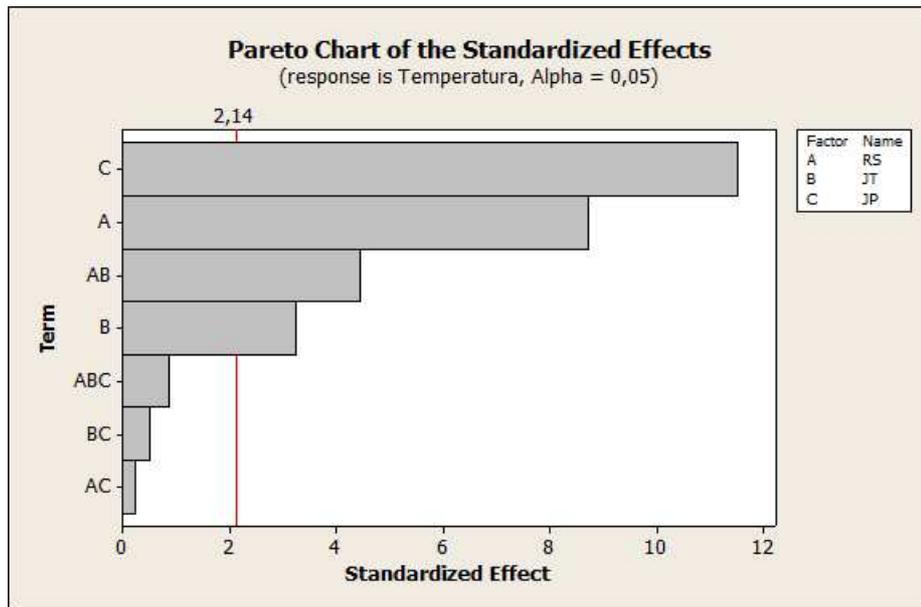


Tabela D.1: Condições de Soldagem selecionada para a validação do modelo estatístico de Temperatura máxima de processo (T)

Velocidade de rotação [RPM]	Tempo de união [s]	Pressão de união [MPa]	Valores experimentais [°C]	Valores preditos [°C]
19500	3,60	0,95	310	323
19500	4,00	1,10	329	344
21000	3,00	0,95	340	338
19500	4,00	0,95	324	327
20200	3,60	1,00	334	335

VR = velocidade de rotação, JT = Tempo de União e JP = pressão de união

Regression Equation - Aspect of Ratio (RA)

RA = 16,4181 - 9,17302E-04 VR - 4,99952 TU - 20,9619 PU + 0,000276032 VR*TU+ 0,00119048 VR*PU + 6,25714 TU*PU - 3,42857E-04 VR*TU*PU

Coefficientes

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		16,4181	0,007071	80,26	0,000
VR	0,12000	-0,0009	0,007071	8,49	0,000
TU	-0,01333	-4,9995	0,007071	-0,94	0,360
JP	0,26333	-20,9619	0,007071	18,62	0,000
VR*TU	-0,06167	0,0002	0,007071	-4,36	0,000
VR*PU	-0,00500	0,0012	0,007071	-0,35	0,728
TU*PU	-0,07500	6,2571	0,007071	-5,30	0,000
VR*TU*PU	-0,09000	-0,0004	0,007071	-6,36	0,000

Summary of Model

S = 0,0346410 PRESS = 0,0432

R-Sq = 96,94% R-Sq(pred) = 93,12% R-Sq(adj) = 95,61%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
VR	1	0,086400	0,086400	0,086400	72,00	0,000
TU	1	0,001067	0,001067	0,001067	0,89	0,360
PU	1	0,416067	0,416067	0,416067	346,72	0,000
VR*TU	1	0,022817	0,022817	0,022817	19,01	0,000
VR*PU	1	0,000150	0,000150	0,000150	0,13	0,728
TU*PU	1	0,033750	0,033750	0,033750	28,13	0,000
VR*TU*PU	1	0,048600	0,048600	0,048600	40,50	0,000
Error	16	0,019200	0,019200	0,001200		
Total	23	0,628050				

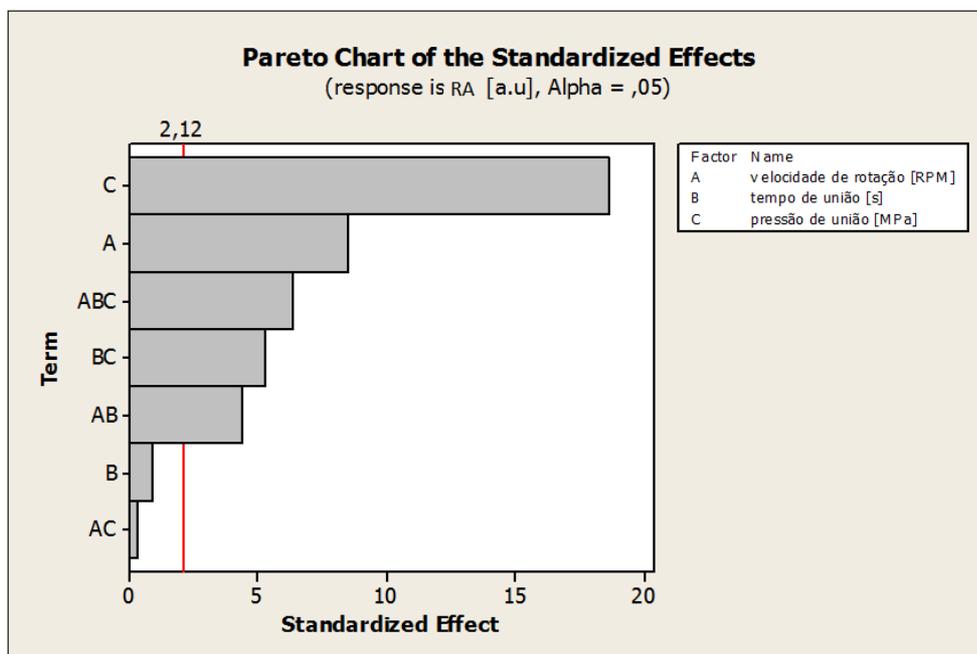


Tabela D.2: Condições de Soldagem selecionada para a validação do modelo estatístico da razão de aspecto de ancoramento (RA)

Velocidade de rotação [RPM]	Tempo de união [s]	Pressão de união [MPa]	Valores experimentais [u.a]	Valores preditos [u.a]
19500	3,60	0,95	0,58	0,61
19500	4,00	1,10	0,66	0,60
21000	3,00	0,95	0,70	0,76
19000	2,50	1,10	0,72	0,66
20000	2,50	0,80	0,45	0,47

VR = velocidade de rotação, TU = Tempo de União e PU = pressão de união

Regression Equation - Tensile Test (RT)

$$RT = -144561 + 6,94045 VR + 32076,2 TU + 100082 PU - 1,60211 VR* TU - 4,44151 VR*PU - 20322,9 TU*PU + 1,03527 VR* TU*PU$$

Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		144561,00	42,87	133,52	0,000
VR	1729,1	6,94	42,87	20,16	0,000
TU	710,1	32076,20	42,87	8,28	0,000
PU	4549,6	100082,00	42,87	53,06	0,000
VR* TU	-966,7	-1,60	42,87	-11,27	0,000
VR* PU	-429,5	-4,44	42,87	-5,01	0,000
TU* PU	-23,7	20322,90	42,87	-0,28	0,785
VR* TU* PU	271,8	1,03	42,87	3,17	0,004

Summary of Model

S = 242,534 PRESS = 2509762

R-Sq = 99,31% R-Sq(pred) = 98,77% R-Sq(adj) = 99,11%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
VR	1	23917015	23917015	23917015	406,60	0,000
TU	1	4033808	4033808	4033808	68,58	0,000
PU	1	165592519	165592519	165592519	2815,12	0,000
VR* TU	1	7476496	7476496	7476496	127,10	0,000
VR* PU	1	1475702	1475702	1475702	25,09	0,000
TU* PU	1	4480	4480	4480	0,08	0,785
VR* TU* PU	1	590817	590817	590817	10,04	0,004
Error	24	1411741	1411741	58823		
Total	31	204502579				

VR = velocidade de rotação, TU = Tempo de União e PU = pressão de união

Regression Equation Reduction

$$RT = -78397 + 3,56055 VR + 12245,2 TU + 31901,1 PU - 0,588839 VR* TU - 0,95944 RS* PU - 0,00286977 VR* TU* PU$$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-78397,0	4931,36	-15,8977	0,000
RS	3,6	0,27	13,3898	0,000
JT	12245,2	1159,05	10,5648	0,000
JP	31901,1	3311,58	9,6332	0,000
RS* JP	-1,0	0,19	-5,0013	0,000
RS* JT	-0,6	0,06	-9,1851	0,000
RS* JT* JP	-0,0	0,03	-0,1102	0,913

Summary of Model

S = 242,288 R-Sq = 99,31% R-Sq(adj) = 99,13%

PRESS = 2374084 R-Sq(pred) = 98,79

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	195265389	195265389	32544232	554,386	0,000000
RS	1	25218656	10524675	10524675	179,286	0,000000
JT	1	8002650	6552197	6552197	111,616	0,000000
JP	1	153749345	5447570	5447570	92,798	0,000000
RS* JP	1	2445533	1468334	1468334	25,013	0,000046
RS* JT	1	5848493	4952575	4952575	84,366	0,000000
RS* JT* JP	1	712	712	712	0,012	0,913236
Error	23	1350175	1350175	58703		
Lack-of-Fit	1	324812	324812	324812	6,969	0,014959

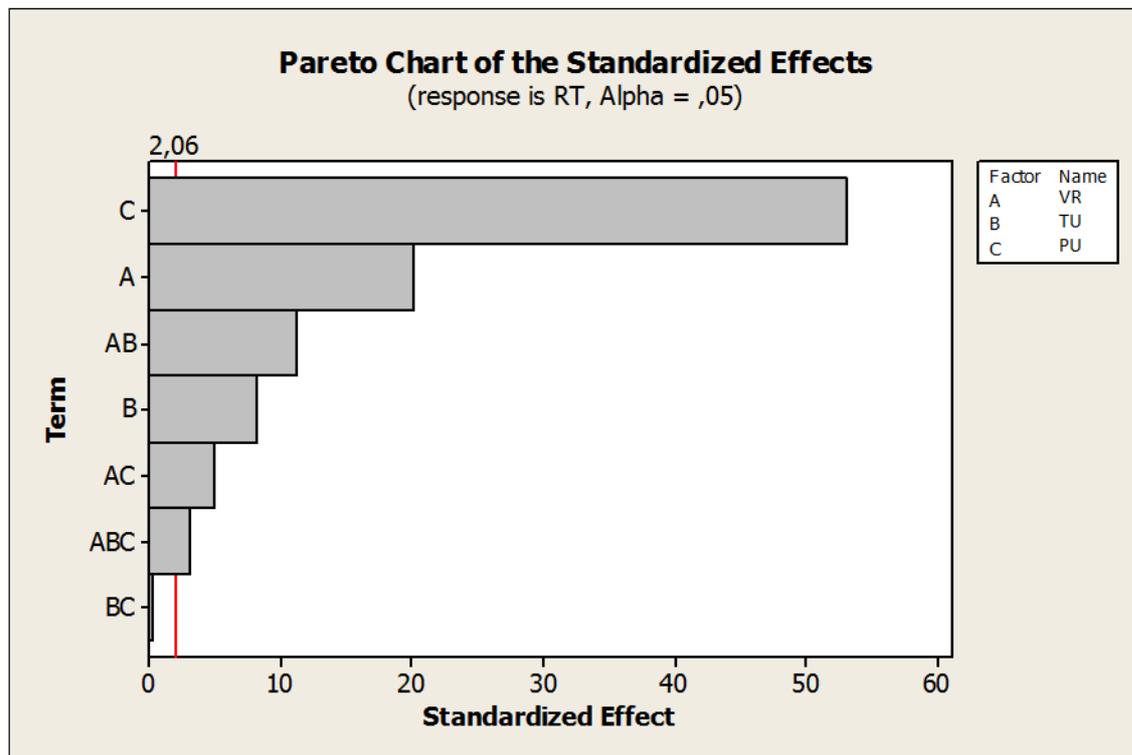


Tabela D. 3: Condições de Soldagem selecionada para a validação do modelo estatístico de resistência à tração (RT)

Velocidade de rotação [RPM]	Tempo de união [s]	Pressão de união [MPa]	Valores experimentais [N]	Valores preditos [N]
19500	3,60	0,95	6817	6120
19500	4,00	1,10	8342	8350
19000	2,50	1,10	5995	6788
20000	2,50	0,80	4405	4040

VR = velocidade de rotação, TU = Tempo de União e PU = pressão de união

Regression Equation Reduction for Volumetric Ratio (RV)

$$RV = 13,2043 - 7,31746E-04 VR - 4,66524 TU - 16,0857PU + 0,000250476 VR*TU + 0,000901587 VR*PU + 5,40476 TU*PU - 2,87302E-04 VR*TU*PU$$

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		0,44521	0,008746	50,91	0,000	
RS		0,14625	0,07312	0,008746	8,36	0,000
JT		0,03625	0,01813	0,008746	2,07	0,056
JP		0,28125	0,14062	0,008746	16,08	0,000
RS*JT		-0,02292	-0,01146	0,008746	-1,31	0,210
RS*JP		-0,05458	-0,02729	0,008746	-3,12	0,007
JT*JP		-0,03458	-0,01729	0,008746	-1,98	0,067
RS*JT*JP		-0,07542	-0,03771	0,008746	-4,31	0,001

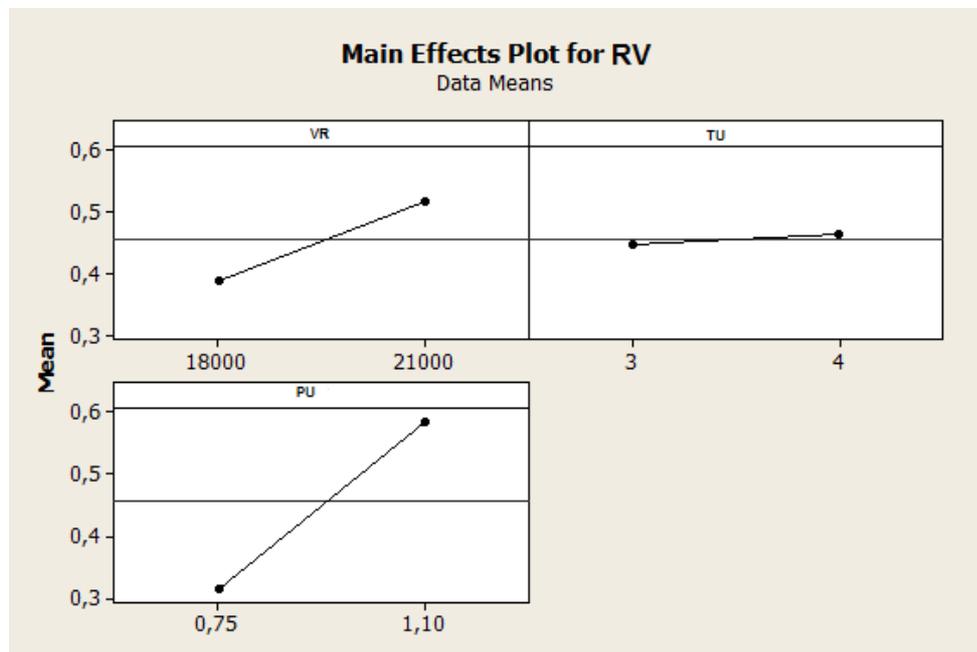
Summary Model

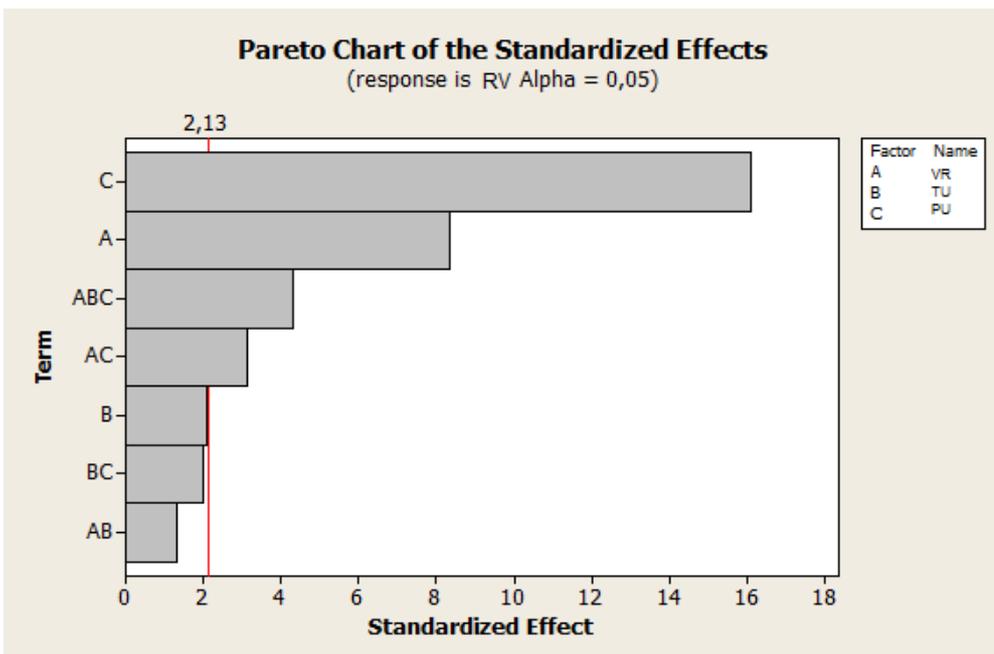
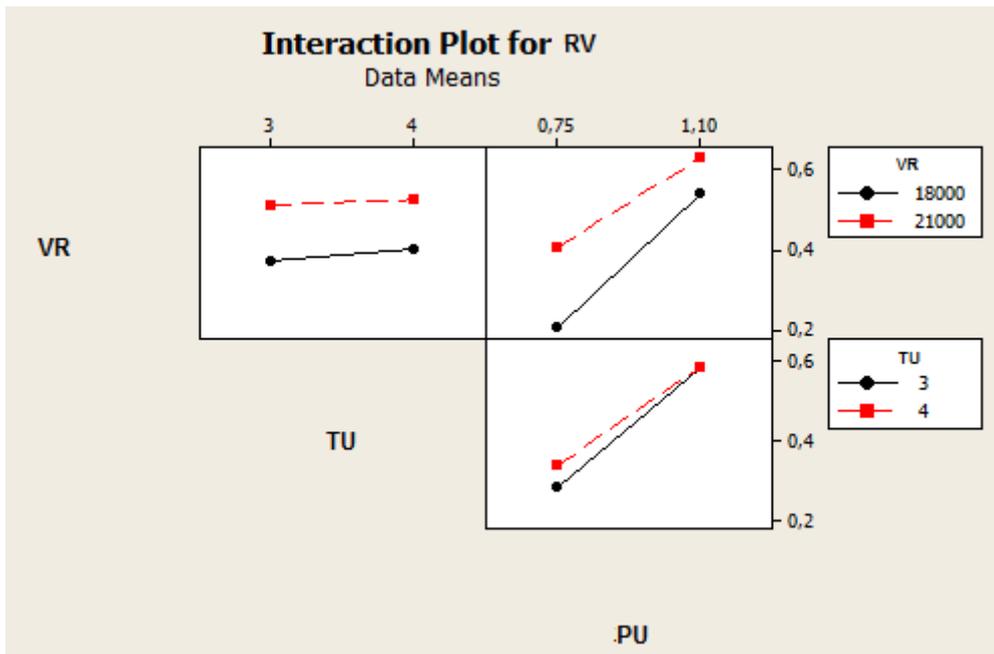
S = 0,0415665 PRESS = 0,0584

R-Sq = 95,91% R-Sq(pred) = 90,78% R-Sq(adj) = 94,00%

Analysis of Variance for RV

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
RS	1	0,097218	0,120785	0,120785	69,91	0,000
JT	1	0,002553	0,007421	0,007421	4,29	0,056
JP	1	0,446135	0,446691	0,446691	258,54	0,000
RS*JT	1	0,002807	0,002966	0,002966	1,72	0,210
RS*JP	1	0,018372	0,016825	0,016825	9,74	0,007
JT*JP	1	0,008628	0,006754	0,006754	3,91	0,067
RS*JT*JP	1	0,032119	0,032119	0,032119	18,59	0,001
Error	15	0,025917	0,025917	0,001728		
Total	22	0,633748				





Dados utilizados no treinamento e teste das RNAs

Tabela D.4: Valores de resistência (RT) à tração usados no treinamento da RNA de topologia 3-3-1.

Velocidade de Rotação [rpm]	Tempo de união [s]	Pressão de união [MPa]	Força [N]
21000	4,00	1,30	6146
21000	3,00	1,10	7038
20500	3,00	0,90	8142
20000	4,00	1,20	6543
19000	4,00	1,10	8373
18000	3,00	1,00	151
19500	3,50	0,75	311
20500	3,50	0,75	4507
20500	3,50	0,80	5274
18000	5,00	1,00	4321
19000	3,00	0,85	4276
21000	3,00	0,95	919

Tabela D.5: Valores de resistência à tração (RT) usados no teste da RNA de topologia 3-3-1.

Velocidade de rotação [rpm]	Tempo de união [s]	Pressão de união [MPa]	Força [N]
21000	3,00	1,30	7599
18000	2,50	1,20	5988
20500	4,00	1,20	5817
19000	6,00	1,10	7933
20000	4,00	1,20	5639
19000	4,00	1,10	6295

Tabela D.6: Valores de temperatura máxima (T) na área de união usada no treinamento da RNA de topologia 5-3-1.

Velocidade de rotação [rpm]	Tempo de fricção [s]	Pressão de fricção [MPa]	Tempo de forjamento [s]	Pressão de forjamento [MPa]	T [°C]
21000	2,00	0,40	2,00	0,90	393
21000	1,50	0,40	1,50	0,70	389
20500	2,00	0,40	1,00	0,50	384
20000	1,50	0,40	2,50	0,80	364
19000	2,00	0,50	2,00	0,60	379
20500	2,50	0,35	1,50	0,85	412
20500	2,00	0,30	1,50	0,45	289
20500	2,00	0,30	1,50	0,50	300
19000	2,00	0,30	2,00	0,80	307
19000	2,00	0,35	1,00	0,50	308
21000	1,00	0,35	2,00	0,60	301

Tabela D.7: Valores de temperatura máxima (T) na área de união usados no teste da RNA de topologia 5-3-1.

Velocidade de rotação [rpm]	Tempo de fricção [s]	Pressão de fricção [MPa]	Tempo de forjamento [s]	Pressão de forjamento [MPa]	T [°C]
21000	1,50	0,40	1,50	0,90	424
18000	1,50	0,50	1,00	0,70	353
19000	3,00	0,50	3,00	0,60	410
18000	2,00	0,30	3,00	0,70	307
18000	1,00	0,30	2,00	0,70	272
20000	2,50	0,40	1,50	0,80	397

Tabela D.8: Valores de razão volumétrica (RV) usados no treinamento da RNA de topologia 5-3-1.

Velocidade de rotação [rpm]	Tempo de fricção [s]	Pressão de fricção [MPa]	Tempo de forjamento [s]	Pressão de forjamento [MPa]	RV [a.u]
21000	2,00	0,40	2,00	0,90	0,61
18000	1,50	0,50	1,00	0,70	0,58
20000	2,50	0,40	1,50	0,80	0,66
20000	1,50	0,40	2,50	0,80	0,60
19000	2,00	0,50	2,00	0,60	0,66
20500	2,50	0,35	1,50	0,85	0,56
20500	2,00	0,30	1,50	0,45	0,37
20500	2,00	0,30	1,50	0,50	0,41
19000	2,00	0,30	2,00	0,80	0,51
19000	2,00	0,35	1,00	0,50	0,31

Tabela D.9: Valores de razão volumétrica (RV) usados no teste da RNA de topologia 5-3-1.

Velocidade de rotação [rpm]	Tempo de fricção [s]	Pressão de fricção [MPa]	Tempo de forjamento [s]	Pressão de forjamento [MPa]	RV [a.u]
21000	1,50	0,40	1,50	0,90	0,65
18000	2,00	0,30	3,00	0,70	0,46
21000	1,50	0,40	1,50	0,70	0,68
19000	3,00	0,50	3,00	0,60	0,66
20500	2,00	0,40	1,00	0,50	0,66

Valores de MSE em função do número de épocas para as diferentes topologias de RNAs.

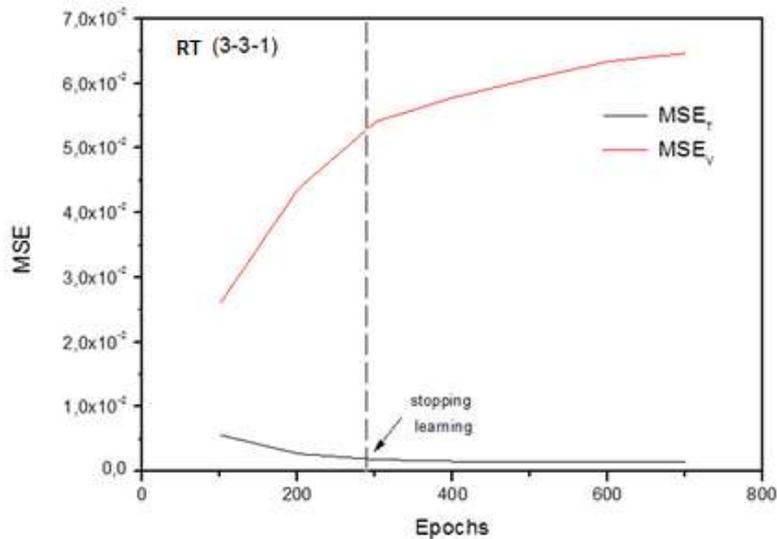


Figura D.1: MSE da RNA₃₋₃₋₁ de resistência à tração (RT) treinada pelo método de aprendizagem supervisionada, utilizando o algoritmo de treinamento Levenberg-Marquardt.

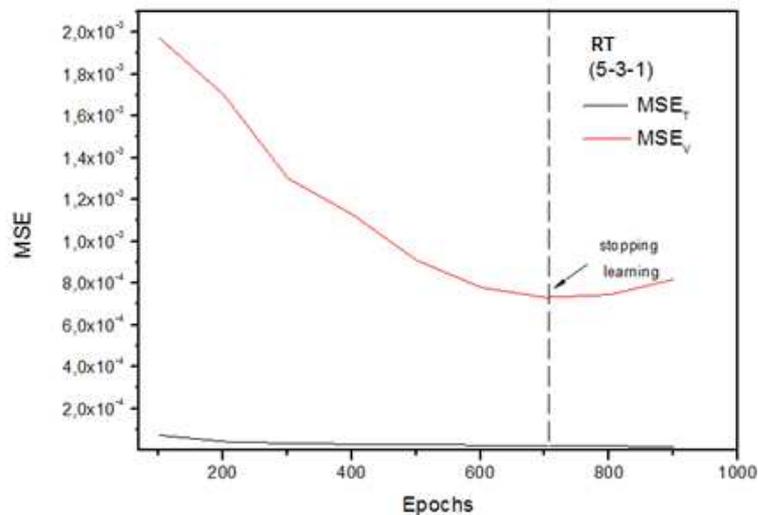


Figura D.2: MSE da RNA₅₋₃₋₁ de resistência à tração (RT) treinada pelo método de aprendizagem supervisionada, utilizando o algoritmo de treinamento Levenberg-Marquardt.

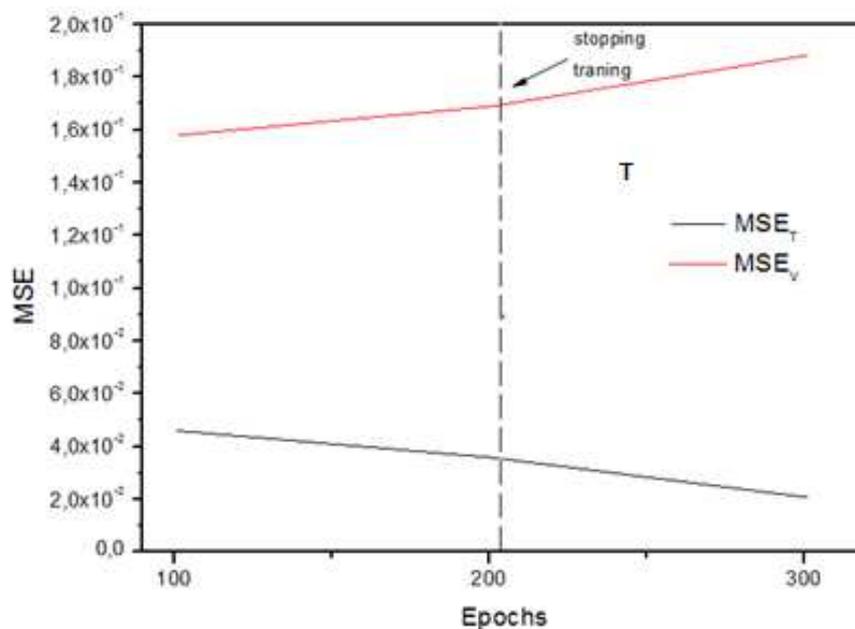


Figura D.3: MSE da RNA₅₋₃₋₁ temperatura máxima (T) na área de união treinada pelo método de aprendizagem supervisionada, utilizando o algoritmo de treinamento Levenberg-Marquardt.

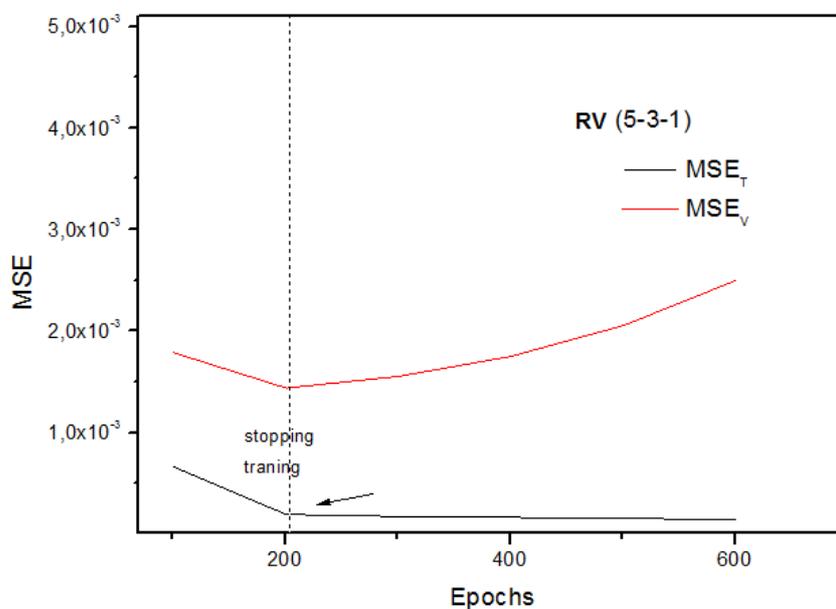
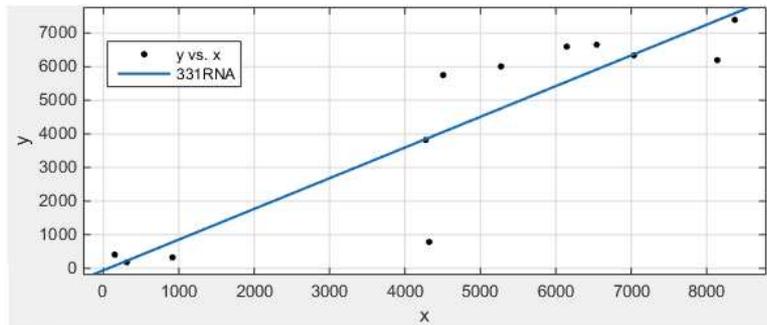


Figura D.4: MSE da RNA₅₋₃₋₁ da razão volumétrica (VR) treinada pelo método de aprendizagem supervisionada, utilizando o algoritmo de treinamento Levenberg-Marquardt.

Linear model Poly1:
 $f(x) = p1 \cdot x + p2$
 Coefficients (with 95% confidence bounds):
 $p1 = 0.9144 (0.6062, 1.223)$
 $p2 = -62.47 (-1733, 1608)$

Goodness of fit:
 SSE: 1.745e+07
R-square: 0.8138
 Adjusted R-square: 0.7952
 RMSE: 1321

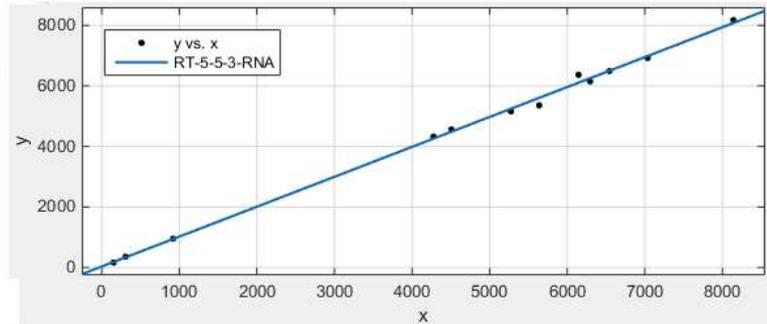
RT-3-3-1



Linear model Poly1:
 $f(x) = p1 \cdot x + p2$
 Coefficients (with 95% confidence bounds):
 $p1 = 0.9883 (0.9557, 1.021)$
 $p2 = 32.05 (-140.3, 204.4)$

Goodness of fit:
 SSE: 1.732e+05
R-square: 0.9976
 Adjusted R-square: 0.9976
 RMSE: 131.6

RT-5-3-1

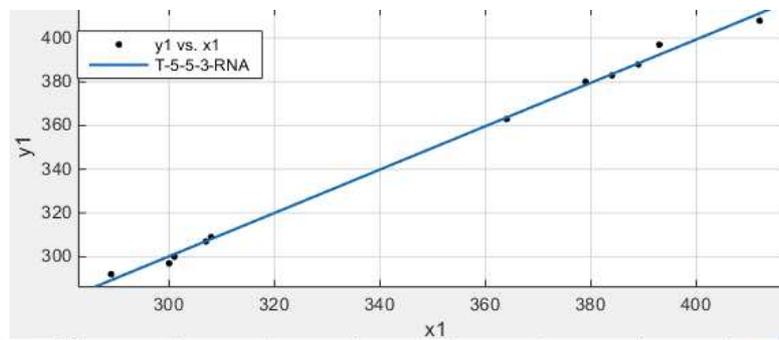


Fi

Figura D.5: Valores de R^2 (coeficiente de determinação) das interpolações dos dados experimentais e preditos pela RNA₃₋₃₋₁ e RNA₃₋₃₋₁ para a resistência à tração.

Linear model Poly1:
 $f(x) = p1 \cdot x + p2$
 Coefficients (with 95% confidence bounds):
 $p1 = 0.9924 (0.9545, 1.03)$
 $p2 = 2.466 (-10.8, 15.74)$

Goodness of fit:
 SSE: 54.39
R-square: 0.9974
 Adjusted R-square: 0.9972
 RMSE: 2.458



Linear model Poly1:
 $f(x) = p1 \cdot x + p2$
 Coefficients (with 95% confidence bounds):
 $p1 = 0.9728 (0.8652, 1.08)$
 $p2 = 1.333 (-4.475, 7.14)$

Goodness of fit:
 SSE: 23.89
R-square: 0.9819
 Adjusted R-square: 0.9797
 RMSE: 1.728

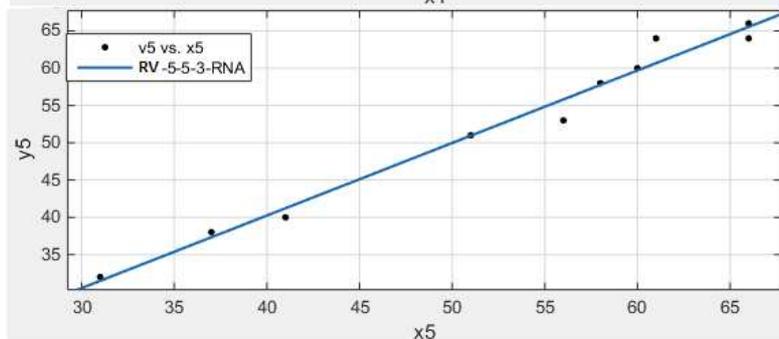


Figura D.6: Valores de R^2 (coeficiente de determinação) das interpolações dos dados experimentais e preditos pelas RNAs ₃₋₃₋₁ para a temperatura na área de união e razão volumétrica (RV).