

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

DESENVOLVIMENTO DE NOVA GEOMETRIA DE REBITE PARA USO EM  
ESTRUTURAS HÍBRIDAS COMPÓSITO-METAL OBTIDAS ATRAVÉS DO PROCESSO  
DE REBITAGEM POR FRICÇÃO

**Marcelo Favaro Borges**

Dissertação para obtenção do Título de Mestre  
em Engenharia

Porto Alegre  
2013

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

DESENVOLVIMENTO DE NOVA GEOMETRIA DE REBITE PARA USO EM  
ESTRUTURAS HÍBRIDAS COMPÓSITO-METAL OBTIDAS ATRAVÉS DO PROCESSO  
DE REBITAGEM POR FRICÇÃO

MARCELO FAVARO BORGES  
Engenheiro Mecânico

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

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre  
2013

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

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Co-orientador: Prof. Dr.-Ing. Sergio de Traglia Amancio Filho

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Arthur Ferreira , PPGE3M - UFRGS  
Prof. Dr. Marco Durlo Tier, PPENG - UNIPAMPA  
Prof.<sup>a</sup> Dra. Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro, PROMEC - UFRGS

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGE3M

Dedico esta dissertação a minha família que sempre esteve ao meu lado, em especial a minha noiva Fabiane.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker pelo apoio durante a realização deste trabalho, pelas trocas de ideias, pelo apoio profissional e pessoal e amizade.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Sergio de Traglia Amancio Filho pela oportunidade, ajuda, por disponibilizar os dados de sua pesquisa que serviram de base para este trabalho, pela disponibilidade e amizade.

Ao chefe do departamento *Solid State Joining Processes* do HZG, Dr. Jorge dos Santos pelas oportunidades e pela amizade.

À UFRGS em especial ao PPGE3M e seus professores pelo esforço para oferecer ensino de qualidade e apoio dentro e fora de sala de aula e pela oportunidade.

Ao Dr. Lucian Blaga, pela ajuda na produção dos corpos de prova, longas jornadas de trabalho, incentivo e amizade.

Ao Eng. Otávio Pinto, pela ajuda, apoio e incentivo no desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas e amigos do LAMEF em especial do grupo Proeng-EC pelas longas noites de estudo e momentos de lazer.

Ao *Young Investigator Group “Advanced Polymer-Metal Hybrid Structures”* do HZG pelo apoio na realização deste trabalho e disponibilização do espaço físico e equipamentos.

À minha noiva Fabiane, pelo apoio, paciência, compreensão, companheirismo, incentivo e carinho.

Aos meus pais Edson Luiz Borges e Silvana Favaro Borges por todo o incentivo aos estudos, ideais e valores os quais me guiaram durante toda a vida. As minhas avós Terezinha e Angelina.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. POTENCIAL DE APLICAÇÃO.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Evolução dos materiais na construção aeronáutica.....	4
3.2. Estruturas híbridas .....	7
3.3. Compósitos .....	8
3.4. Polímeros .....	9
3.5. Termoplásticos.....	10
3.6. Ligas de Alumínio .....	11
3.7. Titânio.....	12
3.8. Processos de união de materiais dissimilares.....	13
3.8.1. Colagem por adesão .....	14
3.8.2. Rebitagem .....	15
3.9. Soldagem por atrito.....	16
3.10. Rebitagem por fricção .....	18
3.11. Parâmetros de Processo.....	20
3.12. Geometria e Propriedades da Junta .....	22
3.13. Vantagens e Limitações .....	25

3.14.	Método dos elementos finitos (MEF) .....	25
3.15.	Planejamento de experimentos: Método de Taguchi .....	26
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1.	Metodologia proposta .....	28
4.2.	Clips de polieterimida reforçada com fibra de vidro (GRF-PEI) .....	30
4.3.	Frame de AA2198-T851 .....	31
4.4.	Titânio Graduação 2 (Ti-Gr2).....	32
4.5.	Equipamento de rebiteagem por fricção .....	33
4.6.	Procedimento de união.....	34
4.7.	Aquisição de dados .....	35
4.8.	Termografias .....	36
4.9.	Juntas Híbridas.....	38
4.10.	Modelos de Elementos Finitos .....	40
4.11.	Modelos estruturais analíticos .....	41
4.12.	Planejamento de experimentos.....	41
4.13.	Caracterização metalográfica e avaliação das propriedades mecânicas locais via microdureza Vickers .....	42
4.14.	Ensaio de tração em juntas rebiteadas .....	43
4.15.	Ensaio de cisalhamento sob tração em juntas sobrepostas.....	44
4.16.	Sistema ótico de medição de deformação .....	45
4.16.1.	Calibração.....	46
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	48

5.1.	Avaliação da composição química dos rebites .....	48
5.2.	Produção das amostras de referência .....	48
5.3.	Pré-análise de parâmetros de união para a fabricação das amostras com as novas geometrias de rebites propostas e seleção da melhor geometria para análise quantitativa.....	49
5.4.	Planejamento de experimentos (PdE) numérico .....	54
5.5.	Histórico térmico das juntas rebitadas .....	56
5.6.	Microestrutura e propriedades geométricas da zona de ancoragem .....	58
5.6.1.	Propriedades locais mecânicas dos materiais: análise de microdureza Vickers ....	60
5.6.2.	Uso de modelos numéricos pelo método dos elementos finitos (MEF) para predição da resistência à tração como resposta no PdE Taguchi L4 ( $2^3$ ).....	62
5.6.3.	Modelos analíticos para predição da resistência à tração como resposta no PdE Taguchi L4 (23).....	67
5.6.4.	Avaliação estatística dos resultados do PdE Taguchi L4 ( $2^3$ ) através de análise de variância .....	69
5.6.5.	Validação dos modelos .....	71
5.7.	Avaliação mecânica da condição de saída otimizada pelo modelo Taguchi L4 ( $2^3$ ) (Resultado do PdE) .....	74
5.7.1.	Ensaio de ancoragem da amostra de saída (E5).....	76
5.8.	Ensaio de cisalhamento .....	80
6.	CONCLUSÕES .....	85
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	87
8.	REFERÊNCIAS .....	88
9.	APÊNDICES.....	97



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Exemplos de reforços (clips) estruturais entre frame e fuselagem (a). Exemplo de aplicação utilizado pela <i>PREMIUM AEROTEC</i> apresentado no <i>49th Paris International Air Show</i> (HIGH-PERFORMANCE COMPOSITES 2011)(b). ....	3
Figura 3.1	AIRBUS A300, pioneiro na utilização de compósitos em estruturas primárias durante voo de exibição (AIRBUS 2013). ....	5
Figura 3.2	Distribuição percentual global de peso dos materiais utilizados na fabricação das aeronaves comerciais de passageiros: a) BOEING 777; b) AIRBUS A380 e c) EMBRAER 170. Adaptado de REZENDE 2007. ....	6
Figura 3.3	Distribuição percentual global de peso dos materiais utilizados na fabricação das aeronaves comerciais de passageiros: a) BOEING 787 <i>Dreamliner</i> ; b) AIRBUS A350 XAW. (Adaptado de The Wall Street Journal 2013).....	7
Figura 3.4	Evolução da aplicação de materiais compósitos ao longo dos últimos 30 anos. Adaptado de ATSB 2007.....	8
Figura 3.5	Histórico de aplicação de ligas de alumínio em aeronaves. Adaptado de REZENDE (2007). ....	11
Figura 3.6	Tipos comuns de cabeça de rebites convencionais (NASA 1990).....	15
Figura 3.7	Rebite auto-perfurante (esquerda) e rebite bifurcado (direita), exemplos comuns de rebites que dispensam pré-furos (NASA 1990).....	16
Figura 3.8	Representação esquemática do processo de soldagem por fricção (FW). Adaptado de MARQUES et al. 2005. ....	17

Figura 3.9	Evolução dos parâmetros de soldagem por fricção em função do tempo de processo. (SOUZA 2006) .....	18
Figura 3.10	Representação esquemática do processo de rebitagem por fricção (“FricRiveting”). Adaptado de AMANCIO 2009b. ....	19
Figura 3.11	Principais parâmetros de controle em relação ao tempo de processo, adaptado de AMANCIO (2007a).....	21
Figura 3.12	Etapas do processo de rebitagem por fricção, adaptado de AMANCIO (2007a).....	22
Figura 3.13	Geometrias da zona de ancoragem (a, b e c) obtidas com a variação dos parâmetros de processo (AMANCIO, 2007a) para a geometria do tipo inserto metálico de rebite de alumínio 2024-T351 em Polieterimida (PEI).....	23
Figura 3.14	a) Regiões com propriedades distintas presentes na junta Adaptado de BORGES 2009, b) Esquerda: Macrografia do polímero (PEI) e mapa de microdureza do metal (AA 2024-T351), Direita: configuração oposta. Adaptado de AMANCIO 2008b. ....	24
Figura 3.15	Quadro comparativo de vantagens e desvantagens do processo de rebitagem por fricção (BORGES 2009).....	25
Figura 3.16	Exemplo de construção da matriz de experimentos do modelo de Taguchi (CASTRO 1990).....	27
Figura 4.1	Fluxograma da metodologia proposta. ....	29
Figura 4.2	Amostras dos rebites de Ti-Gr2: a) rebites sólidos de 5mm; b) rebites sólidos com rosca externa M5; c) rebites vazados com diâmetro externo 5mm e interno 2,5mm; d) rebites vazados com rosca externa M5 e diâmetro interno 2,5mm...	32
Figura 4.3	Máquina RSM 400, utilizada para a produção das juntas estudadas configurada com a mesa de vácuo e sistema de medição de força (BORGES 2009). ....	34

Figura 4.4	Detalhe do transdutor de torque (sistema de medição de força/torque) montado entre o porta amostra (fixação da placa de compósito) e a placa de reação. ....	36
Figura 4.5	Montagem da câmera termográfica e do rack do sistema de aquisição e processamento dos dados. ....	37
Figura 4.6	Representação esquemática da montagem do sistema de medição de temperatura e região medida.....	38
Figura 4.7	Sequência de preparação das amostras para termografia durante o processo de união. a) Marcação do centro; b)Proteção da área de contato; c) Pintura das amostras com tinta especial e d) Remoção da proteção e amostra finalizada. ...	38
Figura 4.8	Junta híbrida de GFR-PEI/AA2198-T851 para ensaio de cisalhamento sob tração. ....	39
Figura 4.9	Junta para ensaio de tração e metalografia, usada para a validação da capacidade de ancoragem do rebite.....	39
Figura 4.10	Posição esquemática das linhas de medição de microdureza Vickers realizadas nas amostras metalográficas. ....	43
Figura 4.11	Máquina de tração Zwick-Roell montada para realização de ensaios de tração para avaliação da ancoragem. a) Visão geral; b) Porta amostra com corpo de prova de tração e c) Garra mecânica fixada ao rebite.....	44
Figura 4.12	Máquina de ensaio Zwick-Roell, configurada com duas garras mecânicas para ensaios de cisalhamento. Amostra preparada (pintada) para a medição de deformação via sistema de correlação de imagem digital (ARAMIS), placa de compósito fixa na garra inferior e placa de alumínio fixa na garra superior.....	45
Figura 4.13	Sistema ARAMIS montado em sua configuração 3D, com duas câmeras e dois canhões LED para iluminação auxiliar.....	46
Figura 4.14	Detalhe da placa de calibração montada entre as duas garras mecânicas da máquina de tração Zwick-Roell.....	47

Figura 5.1	Exemplo da seção transversal das três amostras produzidas com os parâmetros de união sugeridos por BLAGA (2011) para a configuração de sólido roscado M5.....	49
Figura 5.2	Comparação esquemática da área da seção transversal das quatro geometrias de rebite propostas calculadas de acordo com SHIGLEY (2005) para seções transversais de juntas parafusadas. ....	50
Figura 5.3	Intervalo de parâmetros de união escolhidos para os pré-testes de parâmetros. ....	51
Figura 5.4	Seção transversal das amostras da Tabela 5.2 para análise qualitativa dos parâmetros a serem utilizados no PdE.....	52
Figura 5.5	Mecanismo de formação da rebarba nas duas classes de rebites, (A) sólido e (B) vazado.....	54
Figura 5.6	Intervalo de parâmetros de união escolhidos para o planejamento de experimentos de Taguchi L4 ( $2^3$ ). ....	55
Figura 5.7	Esquema da posição onde foram medidas as temperaturas máximas de processo. ....	56
Figura 5.8	Mapa de termografias das amostras do PdE Taguchi L4 ( $2^3$ ), onde E(x) representam os experimentos e R(x) as repetições.....	57
Figura 5.9	Macrografia do experimento E1 amostra 01 (E1-01) exemplificando as medidas realizadas em cada amostra. ....	58
Figura 5.10	Quadro de macrografias do PdE Taguchi L4 ( $2^3$ ), onde E(x) representam os experimentos e R(x) as repetições.....	59
Figura 5.11	Exemplo da localização das micro endentações geradas pelo ensaio de microdureza Vickers: a) Matriz polimérica do compósito; b) Conglomerado de fibras na direção transversal; c) Conglomerado de fibras na direção longitudinal; d) rebite de Titânio vazado com rosca M5 e e) Matriz polimérica termomecanicamente afetada (ZTMA). ....	60

Figura 5.12	Resultados dos quatro ensaios mecânicos com a configuração de parâmetros de validação.....	63
Figura 5.13	Amostras de validação do modelo estatístico com pino vazado após os ensaios de ancoragem evidenciando os modos de falha.....	64
Figura 5.14	Resultados de Força x Deslocamento obtidos com os modelos numéricos via MEF e dados experimentais obtidos do teste de tração.....	64
Figura 5.15	Mapa de resultados dos modelos de elementos finitos das amostras do Taguchi L4 ( $2^3$ ) mostrando a tensão pelo critério de von Mises (lado esquerdo das figuras) sobrepostas as macrografias das amostras (lado direito das figuras)....	65
Figura 5.16	Sobreposição do modelo numérico (tensão de von Mises) e da macrografia para a amostra E4-03.....	67
Figura 5.17	Modos de falha identificados e relação com a MF, sendo apresentado a esquerda o modo de falha no rebite ( $MF > 1$ ) e a direita o modo de falha na interface ( $MF < 1$ ).....	68
Figura 5.18	Resultados do modelo estatístico sobre a média das médias para a resposta em relação a variável: a) velocidade de rotação (P1), b) tempo de união (P2) e c) força de forjamento (P3) com o critério “quanto maior a relação sinal-ruído melhor”.....	70
Figura 5.19	Resultados do modelo estatístico sobre a média das variâncias sinal-ruído para a resposta em relação a variável: a) velocidade de rotação (P1), b) tempo de união (P2) e c) força de forjamento (P3) com o critério “quanto maior a relação sinal-ruído melhor”.....	70
Figura 5.20	Validação do modelo de Taguchi com base nos resultados dos ensaios mecânico e do modelo analítico.....	73
Figura 5.21	Comparativo dos modelos analíticos e simulação com os ensaios mecânicos de validação.....	74

Figura 5.22	Seção longitudinal das amostras do experimento 5 (E5), da esquerda para direita E5-01, E5-02 e E5-03 respectivamente. ....	75
Figura 5.23	Perfis de dureza produzidos nas três linhas das três amostras. ....	76
Figura 5.24	Ensaio mecânico com a configuração de parâmetros proposta pelo modelo estatístico (E5). ....	77
Figura 5.25	Força máxima para os rebites sólidos M5 e vazados M5 representando a resistência específica das juntas rebitadas. ....	79
Figura 5.26	Deslocamento na força máxima para os rebites sólidos M5 e vazados M5 representando a ductilidade específica das juntas rebitadas. ....	79
Figura 5.27	Evolução dos deslocamentos na direção Y em função do tempo de ensaio da amostra LS_E5_01. ....	81
Figura 5.28	Resultados dos quatro ensaios mecânicos com a configuração de parâmetros proposta pelo modelo estatístico (E5). ....	81
Figura 5.29	Resultados parametrizados de força máxima para os rebites sólidos M5 e vazados M5 representando a resistência específica em cisalhamento das juntas rebitadas. ....	83
Figura 5.30	Resultados parametrizados de deslocamento máximo para os rebites sólidos M5 e vazados M5 representando a resistência específica em cisalhamento das juntas rebitadas. ....	84
Figura 8.1	Folha de resultado das análises químicas do Titânio-Gr2. ....	96
Figura 8.2	Gráfico com os resultados dos quatro ensaios mecânicos de ancoragem dos rebites vazados M5 com a configuração de parâmetros (E5) proposta pelo modelo estatístico de Taguchi, em comparação com os rebites sólidos M5. ....	97
Figura 8.3	Amostras com rebite sólido M5 após os ensaios de ancoragem, evidenciando o modo de falha na interface do rebite. ....	98

Figura 8.4	Amostras com rebite vazado M5 após os ensaios de ancoragem evidenciando, o modo de falha na seção transversal do rebite. ....	98
Figura 8.5	Gráfico com os resultados dos quatro ensaios mecânicos de cisalhamento sob tração dos rebites vazados M5 com a configuração de parâmetros (E5) proposta pelo modelo estatístico de Taguchi, em comparação com os rebites sólidos M5. ....	99
Figura 8.6	Amostras com rebite vazados M5 após os ensaios de cisalhamento sob tração, evidenciando o modo de falha de cisalhamento da seção transversal do rebite. ....	100
Figura 8.7	Amostras com rebite sólido M5 após os ensaios de cisalhamento sob tração, evidenciando o modo de falha de cisalhamento da seção transversal do rebite. ....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Propriedades Mecânicas do polímero PEI (GE ULTEM 1000) (BORGES 2011). .....	30
Tabela 4.2	Propriedades mecânicas da fibra de vidro. ....	30
Tabela 4.3	Propriedades Mecânicas do compósito GFR-PEI (BLAGA 2011). ....	31
Tabela 4.4	Composição química do AA2198-T851 (PIETA 2011). ....	32
Tabela 4.5	Propriedades mecânicas do AA2198-T851 (TAVARES 2011). ....	32
Tabela 4.6	Composição química nominal do titânio Ti-Gr2 (ASM 2006). ....	33
Tabela 4.7	Propriedades mecânicas do titânio (Ti-Gr2). ....	33
Tabela 5.1	Composição química medida do titânio Ti-Gr2 (APÊNDICE A). ....	48
Tabela 5.2	Parâmetros usados na pré-análise baseadas no fatores de depreciação da área da seção transversal. ....	50
Tabela 5.3	Quadro de resultados da análise qualitativa. ....	53
Tabela 5.4	Combinações da parâmetros para o DOE segundo a matriz ortogonal para o modelo de Taguchi. ....	56
Tabela 5.5	Resultados das medidas de temperatura máxima de processo para as amostras do PdE Taguchi L4 (2 <sup>3</sup> ). ....	57
Tabela 5.6	Resultados dimensionais da zona de ancoragem (ZA) das amostras apresentadas na Figura 5.9. ....	60
Tabela 5.7	Resultados dos ensaios de dureza. ....	61



Tabela 5.8	Propriedades utilizadas nas diferentes regiões da junta (percentagem em relação ao material base) para uso posterior nos modelos numéricos de elementos finitos.....	62
Tabela 5.9	Combinações da parâmetros para validação do modelo estatístico Taguchi L4 ( $2^3$ ).....	63
Tabela 5.10	Resultados de força máxima de ancoragem ( $F_a$ ) obtida com as simulações numéricas.....	66
Tabela 5.11	Previsão de força máxima dos modelos analíticos para o desempenho de ancoragem das amostras do PdE Taguchi L4 ( $2^3$ ).....	69
Tabela 5.12	Tabela de resultados da validação do modelo Taguchi L4 ( $2^3$ ) com base nos ensaios mecânicos. ....	72
Tabela 5.13	Tabela de resultados da validação do modelo Taguchi L4 ( $2^3$ ) com base nos modelos analíticos. ....	72
Tabela 5.14	Quadro de resultados da análise qualitativa das amostras do experimento 5 (E5). .....	75
Tabela 5.15	Análise dimensional da zona de ancoragem das amostras E5. ....	75
Tabela 5.16	Resultados analíticos calculados para as mostras E5-XX.....	77
Tabela 5.17	Resultados dos ensaios mecânicos de ancoragem. ....	78
Tabela 5.18	Resultados dos ensaios mecânicos de cisalhamento sob tração para rebites sólidos M5 e vazados M5. ....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

PEI	Polieterimida
GFR-PEI	Compósito de matriz polieterimida reforçada com fibra de vidro
Ti-Gr2	Titânio puro graduação 2
AA2198	Liga de alumínio lítio com tratamento térmico T851
AA2XXX	Família de ligas de alumínio da série 2000
AA6XXX	Família de ligas de alumínio da série 6000
A7XXXX	Família de ligas de alumínio da série 7000
PDE L4	Planejamento de experimentos de Taguchi L4 2 <sup>(3)</sup>
ICJ	Rebitagem por injeção ( <i>Injection Clinching Joining</i> )
IMA/PMA	Injeção direta de nervuras plásticas em chapas
SRP	Rebitagem auto-perfurante
FSW	Soldagem por fricção e mistura mecânica
FSSW	Soldagem ponto por fricção e mistura mecânica
FSpW	Soldagem ponto por fricção e mistura mecânica com refil
FSpJ	União pontual por fricção
FHPP	Soldagem por fricção com pino consumível
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ASM	<i>American Society of Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
GE	<i>General Electric Co.</i> ®
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
MB	Material base
ZA	Zona de ancoragem
ZAC	Zona afetada pelo calor
ZTMA	Zona termomecanicamente afetada
ZR	Zona de rebarba
VR	Velocidade de rotação

TU	Tempo de união
PF	Pressão de fricção
PFo	Pressão de forjamento
MEF	Método dos elementos finitos
Tg	Temperatura de transição vítrea
IHM	Sistema de interface humana
CAD	Desenho auxiliado por computador
CAE	Engenharia auxiliada por computador
M	Matriz do compósito
FT	Fibra transversal
FL	Fibra longitudinal
MD	Material degradado
Fa	Força de ancoragem
FD(x)	Fator de depreciação parametrizado
Qx	Quesito (x)
A(xx)	Amostra (xx)
P(x)	Parâmetro (x)
V(x)	Amostra de validação (x)
E(x)	Experimento (x)
H	Altura de ancoragem
R	Raio de ancoragem
n	Número de fios de rosca inseridos na matriz

## RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo principal avaliar duas novas geometrias de rebites para serem aplicados através do processo de rebitagem por fricção. Ambas são baseadas no uso de rebites vazados para reduzir o peso da junta e aperfeiçoar o processo, viabilizando sua aplicação em estruturas aeronáuticas.

As juntas estudadas foram produzidas com base nos novos materiais utilizados na produção de jatos comerciais. Para tal foram empregadas placas de compósito polimérico PEI-Fibra de vidro e chapas de alumínio AA2198-T851 unidas por rebites de titânio puro Gr2.

Para atingir estes objetivos as novas geometrias foram produzidas e qualitativamente comparadas entre si e com resultados de estudos anteriores. Após a análise qualitativa, a geometria que apresentou os melhores resultados foi selecionada para ser estudada quantitativamente. Tal análise foi promovida através de uma combinação de ferramentas de planejamento de experimentos, modelos numéricos de elementos finitos, análise estatística e ensaios mecânicos.

Para a geometria selecionada foram melhorados os parâmetros de processo visando determinar a significância de cada parâmetro e de suas interações sendo utilizado o modelo estatístico multifatorial Anova, com o planejamento de experimentos de Taguchi L4 cruzado a 3 fatores e 2 níveis para cada fator.

Como resultados foram obtidos: uma nova geometria de rebite com desempenho mecânico específico em tração superior aos anteriormente reportados na literatura; um conjunto de parâmetros de processo para utilização da nova geometria e um modelo analítico simplificado capaz de prever a força máxima de ancoragem suportada pela junta com base na análise da seção longitudinal.

## ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate two new geometries of rivets to be applied through the friction based riveting process named FricRiveting. Both geometries are based on the use of hollowed rivets, within the objective to reduce the weight of the joint and improve the process allowing its use in aircraft structures.

The joints analyzed were produced based on the new materials used in the production of commercial jets, were employed for such plates of PEI composite-fiberglass, aluminum sheets AA2198-T851 joined by rivets of pure titanium Gr2.

To achieve these goals the new geometries were produced and qualitatively compared between themselves and with results of previous studies. After that the best results obtained in this step were selected to be studied quantitatively. This analysis was promoted through a combination of tools for design of experiments, numerical finite element models, statistical analysis and mechanical testing.

For the selected geometry were improved process parameters, to determine the significance of each parameter and their interactions, were used the statistical model Multi-Factor ANOVA, with the design of experiments Taguchi L4 crossed the three factors and two levels for each factor .

As results were obtained: a new rivet geometry with specific mechanical performance at superior tensile strength when compared to those previously reported in the literature, a set of process parameters for application of the new geometry, and a simplified analytical model able to predict the maximum strength supported by the joint based on the analysis of the longitudinal section.

## 1. INTRODUÇÃO

Desde seus primórdios a indústria aeroespacial alavancou o desenvolvimento de novos materiais, sempre objetivando aumentar a eficiência de seus produtos. Tal processo evolutivo teve início com a utilização de tecidos e cordas nos primeiros balões, passando pela madeira, aço, alumínio e hoje se encontra, em seu estado da arte, com os materiais compósitos como matriz principal.

Com a chegada dos materiais compósitos às estruturas primárias, viu-se uma revolução semelhante à substituição da madeira pelo alumínio na década de trinta (BOEING 2013). Desta forma, com o uso dos compósitos, a relação peso-potência e a aerodinâmica melhoraram a ponto de reduzir em 25% o consumo de combustível, quando comparado com as aeronaves construídas baseadas em ligas de alumínio (AeroMagazine 2012).

Em contraponto, avaliando o custo dos materiais compósitos, que pode facilmente alcançar dez vezes o custo do alumínio, nem todos os componentes nas estruturas aeronáuticas puderam ser substituídos. Com isso, alumínio e compósitos passaram a conviver lado a lado na construção aeronáutica, surgindo as estruturas híbridas ou macrocompósitos. Assim, os processos convencionais de união passaram a não atender em pleno as demandas criadas, sendo necessária a busca de alternativas. Dentre os novos processos desenvolvidos visando este mercado se destacam a soldagem a laser (AMANCIO 2009c), rebiteagem auto-perfurante (GARDSTAM 2006), a rebiteagem por injeção (ICJ) (ABIBE 2013) e a união pontual por fricção (FSpJ) (GOUSHEGIR 2014, AMANCIO 2011), juntamente com uma nova geração de adesivos estruturais (SILVA 2007, RECKTENWALD 2005).

Na substituição da rebiteagem convencional, amplamente utilizada (em um avião comercial são usados cerca de 50 mil rebites), se apresenta com grande potencial a rebiteagem por fricção (*FricRiveting*). Este processo permite a fixação de componentes compósitos a estruturas ou a inserção de reforços metálicos, através de rebites aplicados por fricção. Tal

técnica desenvolvida por AMANCIO (2007a) dispensa pré-furos e forma juntas permanentes hermeticamente seladas.

As aplicações em potencial para o processo de rebiteagem por fricção são unir peças sobrepostas e ater insertos em termoplásticos e termofixos de alto desempenho. Posteriormente, estes podem ser anexados a outros materiais/estruturas através de elementos de fixação convencionais ou até mesmo por conformação.

Tendo em vista as potencialidades da rebiteagem por fricção, este trabalho tem como objetivo desenvolver e testar duas novas geometrias de rebites de titânio para serem aplicados por fricção em componentes compósitos poliméricos. Como resultados, são esperadas juntas híbridas mais leves, com menos rebarba e que possam ser aplicadas com ferramentas menores e maquinários convencionais de usinagem como fresas e furadeiras industriais. A principal contribuição pretendida é a viabilização da aplicação da técnica em estruturas aeronáuticas.

## 2. POTENCIAL DE APLICAÇÃO

A aplicação potencial deste trabalho é a substituição do *clip* metálico rebitado que atualmente é utilizado em estruturas aeronáuticas para união da fuselagem ao *frame* do avião (Figura 2.1), por um clip compósito unido a estrutura com os novos rebites inseridos por fricção. A substituição do componente apresenta um ganho significativo em redução de peso e aumento da resistência mecânica. Já a substituição da rebiteagem convencional pela rebiteagem por fricção apresenta um ganho na qualidade e desempenho mecânico da união além da redução do tempo de processo e do aumento de confiabilidade (maior reprodutibilidade do processo).

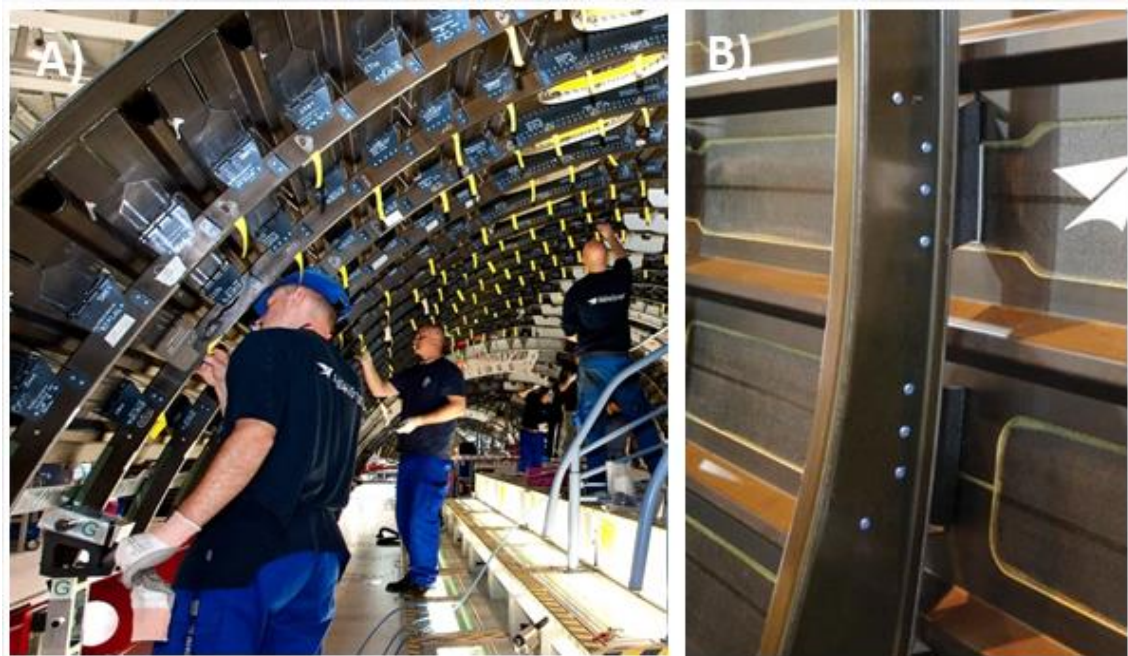


Figura 2.1 Exemplos de reforços (clips) estruturais entre frame e fuselagem (a). Exemplo de aplicação utilizado pela *PREMIUM AEROTEC* apresentado no *49th Paris International Air Show* (HIGH-PERFORMANCE COMPOSITES 2011)(b).



### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o completo entendimento do estado da arte das estruturas aeronáuticas híbridas, fez-se nesta revisão bibliográfica um resumo da história, materiais, metodologia e aplicações dos diferentes componentes que estão envolvidos nesta dissertação. Os principais tópicos destacados foram a evolução dos materiais usados na aviação comercial e suas características, o estado da arte das técnicas de união, modelos estatísticos de planejamento de experimentos e simulação numérica computacional pelo método dos elementos finitos.

#### 3.1. Evolução dos materiais na construção aeronáutica

A fascinação do homem pelo voo levou a inúmeras tentativas de produzir equipamentos capazes de voar, as quais sempre esbarraram na relação peso-potência necessária para mantê-los no ar. Somente em 21 de novembro de 1783 os irmãos Montgolfier, transpassaram essa barreira ao levantarem voo com seu balão de ar quente tripulado (NASA 2002). A evolução continuou, mas só em 1933 a fabricante de aeronaves BOEING construiu o revolucionário modelo 247, o primeiro avião comercial de passageiros nos moldes que conhecemos hoje. Fabricado completamente de materiais metálicos (liga de alumínio anodizado e aço), mais leve e resistente, seu desempenho aerodinâmico foi muito superior quando comparado aos modelos construídos de madeira e tecido (Van der LINDEN 1991). Tal tecnologia permitiu oito anos mais tarde o desenvolvimento do primeiro avião com cabine pressurizada, o BOEING 307 *Stratoliner* (BOEING 2013).

Nas últimas três décadas a grande aposta para substituir o alumínio em estruturas aeronáuticas foram os materiais compósitos poliméricos, neste trabalho citado como materiais compósitos, que são materiais baseados em fibras de alta resistência embebidas em matrizes poliméricas. Como as construções aeronáuticas apresentam estruturas de alta criticidade e risco agregado, a utilização de compósitos teve início restrito, sendo aplicado apenas em estruturas terciárias, como revestimento e acessórios de interiores. Como resultado do

investimento, o peso das aeronaves foi significativamente reduzido, tal melhoria refletiu na direta redução do consumo de combustível. No ano de 1974, a AIRBUS foi pioneira no uso de compósitos em estruturas primárias em aeronaves comerciais, mais especificamente em um leme de direção de seu primeiro avião, o A300 (ATSB 2007) (Figura 3.1).



Figura 3.1 AIRBUS A300, pioneiro na utilização de compósitos em estruturas primárias durante voo de exibição (AIRBUS 2013).

Desde então, com a comprovação dos benefícios da substituição de materiais tradicionais sem detrimento à qualidade ou segurança, mais estruturas secundárias começaram a ser fabricadas em materiais compósitos (MIDDLETON 1990). Ao mesmo tempo teve início a substituição do alumínio pelo titânio em algumas aplicações não estruturais. Como exemplo dessa segunda geração de aeronaves se destacam o BOEING 777, o AIRBUS A380 e o EMBRAER 170 (REZENDE 2007). A Figura 3.2, apresenta a porcentagem global dos materiais utilizados na fabricação destas aeronaves.

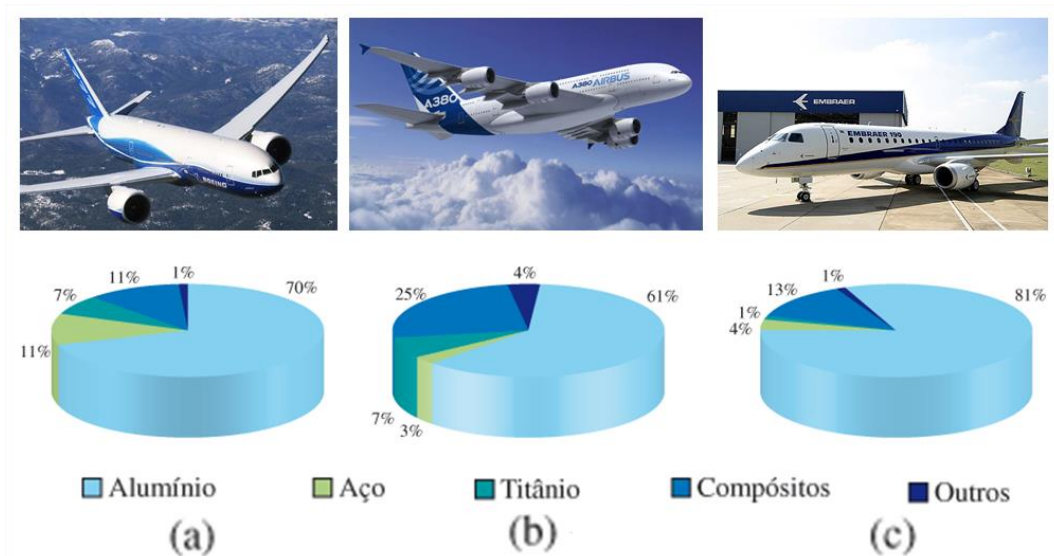


Figura 3.2 Distribuição percentual global de peso dos materiais utilizados na fabricação das aeronaves comerciais de passageiros: a) BOEING 777; b) AIRBUS A380 e c) EMBRAER 170. Adaptado de REZENDE 2007.

Nesse grupo de aeronaves a utilização de materiais compósitos, em substituição aos tradicionais, aço e alumínio, já se encontrava na ordem de 11 a 25%. Seguindo a tendência, os dois últimos lançamentos de jatos comerciais de passageiros deram mais um passo nessa evolução. Os jatos BOEING 787 *Dreamliner* e o AIRBUS A350 XAW passaram a integrar materiais compósitos em estruturas primárias, ultrapassando em ambos os casos a marca de 50% de materiais compósitos e 14% de titânio em sua construção, Figura 3.3. Em virtude disso, quando se compara uma missão de mesmo alcance e com a mesma carga a bordo, o ganho obtido na economia de combustível devido à redução de peso através do uso de materiais compósitos, em relação ao jato BOEING 777, chega facilmente a 25%. Isso levou estas aeronaves a serem conhecidas como de ultra-longo alcance, mais eficientes que suas antecessoras. Segundo a AIRBUS, 70% do ganho em eficiência pretendida com o modelo A350 XAW em comparação com seu antecessor A350 será em decorrência da utilização de compósitos combinado com titânio (AeroMagazine 2012).

No estado da arte da construção aeronáutica atual, compósitos, alumínio e titânio compreendem juntos, no mínimo, 85% do peso das aeronaves. Apesar de toda a evolução já obtida nos últimos anos, ainda existem possíveis formas de alcançar ganhos através de troca de materiais. As apostas da NASA (2010) em seu programa “N+3”, que prevê as tendências para a aviação comercial em 2030, estão voltadas para uso de materiais nano-estruturados

com matriz polimérica ativa. Entretanto, é importante ressaltar que além da evolução dos materiais utilizados, outro fator importante é a forma como são unidos, nesse ponto, ainda existem oportunidades de melhorias a serem estudadas.

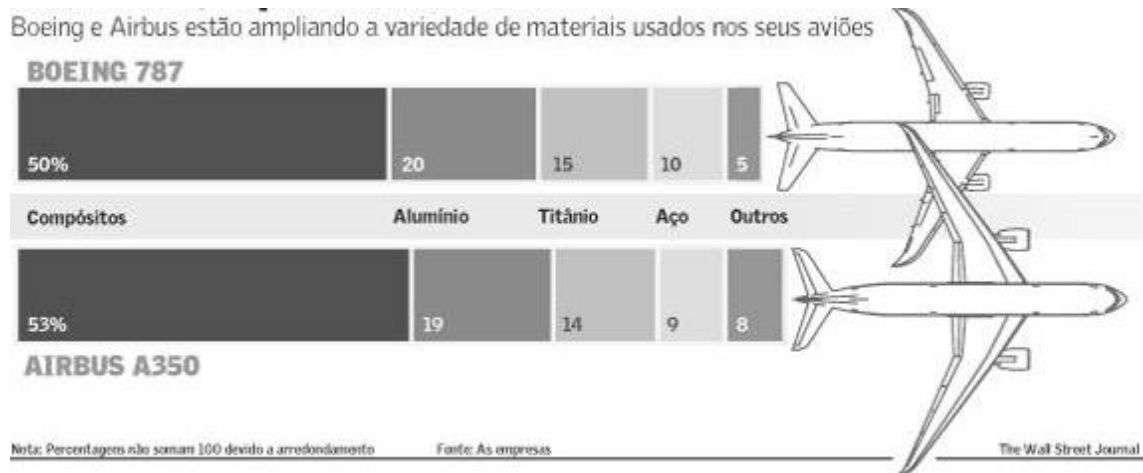


Figura 3.3 Distribuição percentual global de peso dos materiais utilizados na fabricação das aeronaves comerciais de passageiros: a) BOEING 787 *Dreamliner*; b) AIRBUS A350 XAW. (Adaptado de The Wall Street Journal 2013)

### 3.2. Estruturas híbridas

Denominadas também de macrocompósitos, as estruturas híbridas são caracterizadas por possuir interface bem definida entre os materiais que a compõe.

A evolução da utilização de materiais compósitos na aviação, tanto comercial quanto militar, apresentada na Figura 3.4, evidencia a consolidação do seu uso, mesmo que a um custo atual muito maior que o do alumínio (ATSB 2007; MANGALGIRI 1999). Frente a impressionante taxa em que se intensificou seu uso, surgem questionamentos quanto ao limite de utilidade destes materiais e à viabilidade da substituição total das ligas de alumínio. Em busca de alternativas de menor custo, os fabricantes de aeronaves junto com as companhias produtoras de alumínio desenvolveram novas ligas, mais leves e resistentes, através da incorporação de elementos como o lítio em sua composição (KING et al. 2009; HIGASHI 2012).

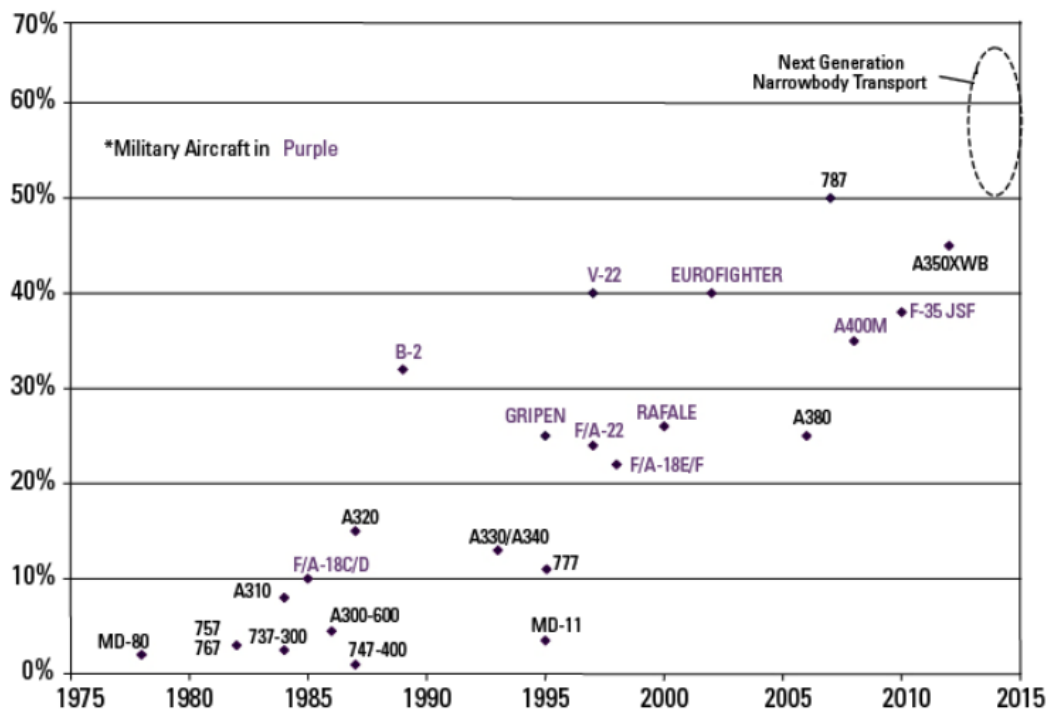


Figura 3.4 Evolução da aplicação de materiais compósitos ao longo dos últimos 30 anos. Adaptado de ATSB 2007.

O desenvolvimento das novas ligas de alumínio voltou à atenção para o material que estava sendo sistematicamente abandonado. A tendência, com essas novas ligas é a estabilização dos percentuais de aplicação do alumínio e dos compósitos. Com isso, as estruturas híbridas que pareciam ser apenas um tipo de construção de transição até a completa utilização dos compósitos, passam a exercer um papel importante.

### 3.3. Compósitos

Por definição, segundo HOLLOWAY (1993), compósitos são a “combinação de dois ou mais materiais em escala macroscópica para formar um material útil, frequentemente exibindo características que nenhum dos componentes exibe independentemente”. Tal definição não é unânime, principalmente pela grande gama de combinações possíveis de materiais que formam os compósitos.

Muitos autores estabeleceram critérios para a definição de um compósito, a exemplo CALLISTER (1991) define como critérios a serem atendidos por um compósito:

- Consistir de dois ou mais materiais, intrinsecamente insolúveis (mantém a identidade no material final), com formas e/ou propriedades diferentes;
- As propriedades do compósito precisam ser notadamente distintas daquelas dos constituintes (exclui-se assim aditivação convencional, por exemplo, com lubrificantes);
- Os constituintes devem estar presentes em proporções razoáveis;
- Os diferentes materiais (fases) devem estar separados por uma interface de escala microscópica.

Mesmo os compósitos constituídos por mais de dois materiais tem seus constituintes divididos em dois grandes grupos: a matriz e o reforço. A matriz é uma fase contínua, em geral se apresenta como principal constituinte, responsável pela transferência de carga e coesão do compósito. Já o reforço é o responsável por conferir resistência ao compósito, geralmente um material mais duro, rígido porém mais frágil que a matriz (CALLISTER 1991).

Na matriz, os principais materiais utilizados são polímeros e cerâmicos, dentre eles se destacam os termoplásticos, termorrígidos em especial as resinas epóxi e fenólicas. Já para o reforço são utilizadas principalmente as fibras, podendo ser elas sintéticas, orgânicas ou naturais (CALLISTER 1991).

A aplicação dos compósitos em estruturas primárias como a fuselagem é dominada pela utilização de compósitos de matriz epóxi e reforço de fibra de carbono. Nas estruturas secundárias a construção é regida pelo uso de polímeros termoplásticos reforçados com fibra de vidro.

### 3.4. Polímeros

A matéria prima a partir da qual os polímeros são obtidos chama-se monômero, este é obtido em sua maioria a partir do petróleo ou do gás natural. Polímeros também podem ser processados a partir de outros materiais base, contanto que eles sejam ricos em carbono, que é o átomo principal que constitui os materiais poliméricos (BILLMEYER 1971, BORGES 2009).

Há diversas possíveis classificações para os polímeros, dentre elas, a que leva em consideração as suas propriedades mecânicas é a mais abrangente. Os polímeros podem ser classificados desta forma em: termoplásticos, termorrígidos (termofixos) e elastômeros (borrachas) (BORGES 2009).

### 3.5. Termoplásticos

Popularmente denominados de plásticos, os termoplásticos compõem a principal parcela dos polímeros comerciais. Apresentam como principal característica, sua capacidade de serem reprocessados (fundidos) diversas vezes, o que torna sua reciclagem possível. Esta característica é bastante desejável na conjuntura atual que privilegia o uso de produtos retornáveis (amigáveis ao ambiente) aumentando a sustentabilidade do produto. As propriedades mecânicas variam conforme o plástico: sob temperatura ambiente podem ser maleáveis, rígidos ou mesmo frágeis. Segundo BILLMEYER (1971) através da adição de cargas ou fibras durante seu processamento é possível alterar suas propriedades mecânicas e químicas.

Quanto a sua estrutura, são compostos por moléculas de cadeias longas, dispostas na forma de cordões soltos, mas agregados, como em um novelo de lã. Dentre os tipos mais comuns podemos citar o polietileno (PE), o polipropileno (PP), o poli(tereftalato de etileno) (PET), o poli(cloreto de vinila) (PVC) e o poli(metacrilato de metila) (PMMA). Nesta categoria se encontram os chamados plásticos avançados de engenharia, os quais são conhecidos por serem materiais que apresentam excelente estabilidade dimensional e elevado desempenho mecânico (possuem custo equivalente), os quais começam a desafiar os materiais tradicionais, como o aço, em diversas aplicações (BORGES 2009). Dentre estes se destacam o polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) e a polieterimida (PEI) (HARPER 1999).

A fabricante General Electric (GE) disponibiliza comercialmente a série ULTEM, de termoplásticos PEI. O mesmo é um termoplástico amorfo de alto desempenho que tem como principais características a excelente estabilidade dimensional, boa rigidez à temperaturas elevadas, comportamento mecânico bem definido, alta resistência mecânica quando comparado com outros termoplásticos de engenharia, baixa flamabilidade e reduzida emissão de fumaça quando incinerado (GE 2006). Adicionalmente, apresenta elevada temperatura de transição vítrea que varia entre 215 e 220°C. Devido a essas características é, amplamente aplicado em reforços estruturais aeronáuticos, componentes automotivos e itens de acabamento de interiores (LYON 1998).

### 3.6. Ligas de Alumínio

As ligas de alumínio são amplamente utilizadas na indústria metal-mecânica, principalmente em aplicações que necessitam a combinação de fatores como leveza, baixa suscetibilidade à corrosão e elevada resistência mecânica. Algumas ligas (a exemplo a série 7XXX) chegam a possuir propriedades mecânicas superiores aos aços estruturais. A resistência à corrosão deve-se ao fato de que o Al, mesmo sendo um metal quimicamente muito ativo, quando exposto ao O<sub>2</sub> naturalmente forma um fino filme de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, não permeável (CALLISTER 1991) evitando a exposição do material base ao ataque corrosivo atmosférico (gases e/ou fluídos).

Dentre as ligas de alumínio mais utilizadas pelo setor da aviação as séries AA2XXX, AA6XXX e AA7XXX se destacam (Figura 3.5), pois apresentam a possibilidade de receber tratamento térmico (solubilização, envelhecimento e recozimento) através do qual se obtém significativa elevação nas suas propriedades mecânicas. Dentre essas três séries, a mais utilizada é a série AA2XXX, onde historicamente foram amplamente aplicadas as ligas AA2024, AA2524 e AA2198 (REZENDE 2007).

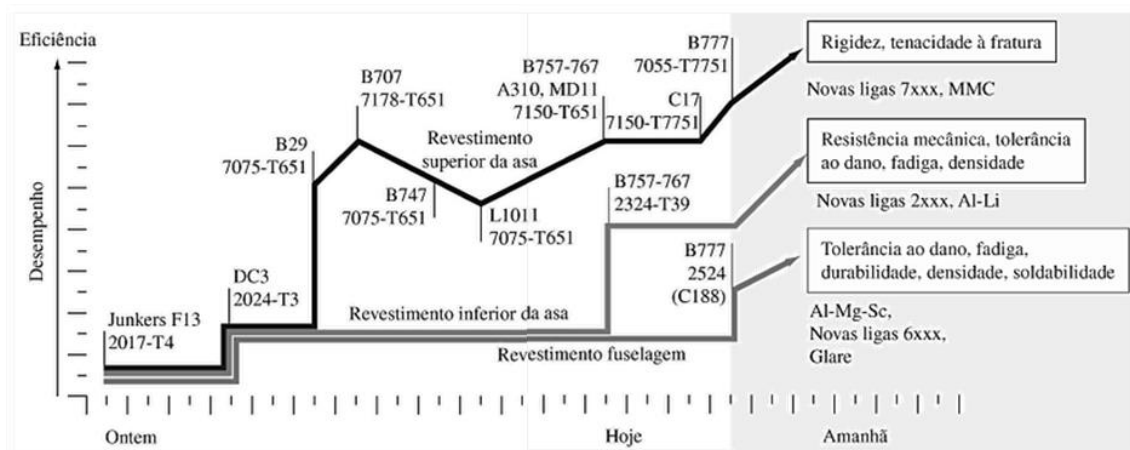


Figura 3.5 Histórico de aplicação de ligas de alumínio em aeronaves. Adaptado de REZENDE (2007).

A liga AA2024-T351 tradicionalmente utilizada (liga com tratamento térmico de solubilização, têmpera e posterior encruamento a frio seguidos de alívio de tensões residuais por deformação) é encontrada em grande parte em aplicações aeronáuticas devido à baixa



sensibilidade aos efeitos de fadiga (LAGE 2009). A liga AA2524-T3 é uma liga com propriedades similares a AA2024-T351 mas com melhor desempenho em fadiga e resistência equivalente à corrosão.

A liga AA2198-T851 é uma das novas ligas da série 2000, baseada na matriz alumínio-cobre-lítio, desenvolvida para aplicação em fuselagem de aeronaves. Devido a presença do Li em sua composição, sua densidade é mais baixa melhorando a resistência específica deste material (BORDESOULES 2007, PIETA 2011). Estudos comprovam que o ganho em propriedades mecânicas pode chegar a 50% quando comparada com ligas convencionais. Esta liga também apresenta boa resistência à corrosão e bom desempenho mecânico em elevadas temperaturas (MORETO 2012).

### 3.7. Titânio

O titânio (Ti), o nono elemento mais abundante na terra, se caracteriza por ser um metal de brilho prateado levemente amarelado. Dentre os metais é o que possui a maior resistência específica, isso se deve ao fato de possuir resistência mecânica equivalente a do aço e densidade da ordem de  $4,51 \text{ g/cm}^3$ . Não fosse seu alto custo, em média quinze vezes o do aço carbono, tal característica o elevaria como primeira escolha em aplicações estruturais onde o baixo peso é pretendido (ASM 2006).

O titânio considerado comercialmente “puro”, ou seja, sem elementos de liga em sua composição química, é fornecido nas graduações 1, 2, 3, 4, 7, 11 e 12. As graduações 5, 6, 8, 9 e 10 são consideradas ligas. Nas condições “puras”, todas apresentam características mecânicas semelhantes (tensão de ruptura de 240-440 MPa), consideravelmente diferente das características encontradas nas ligas (podem chegar a 1000 MPa). Porém muitas das séries de titânio “puro” exibem resistência à tração semelhante às ligas de alumínio (por exemplo, Ti Gr3 e AA2024). A principal vantagem das séries não ligadas fica por conta da maior condutividade térmica (ASM 2006).

Em aeronaves, o titânio tem como aplicação principal a fabricação de pás de rotores de turbinas e eixos. Em segundo plano é utilizado como matéria prima para elementos de fixação como, por exemplo, parafusos e rebites (SPITTLE 2003).

### 3.8. Processos de união de materiais dissimilares

A união de materiais dissimilares tem como maior desafio a grande diferença entre os coeficientes de expansão térmica dos mesmos. Esta, com o passar do tempo, resulta no relaxamento da junta, principalmente em aplicações sob carregamento combinado, térmico-mecânico, onde após determinado número de ciclos acarreta na conseqüente falha da união por fadiga. Outros problemas no âmbito de ciência dos materiais que devem ser considerados quando o processo de união dissimilar envolver aquecimento localizado e/ou fusão de materiais, são:

- Baixa miscibilidade: devido às diferenças em energia de coesão e superficiais. Por isso não há mistura, sendo que o metal tende a formar *clusters* esféricos quando dissolvidos na matriz polimérica (AMANCIO 2012). Por isso difusão na interface é prejudicada e a união metalúrgica ou plástica não acontece (não se forma solda);
- Diferenças de propriedades térmicas: metais e polímeros possuem calores específicos e temperaturas de fusão/transição diferentes e por isso aquecem e esfriam de forma diferente. Isso pode gerar degradação térmica no polímero ou gerar uma separação na etapa do resfriamento (o metal resfria mais rápido e contrai mais depressa que o polímero) acarretando a separação da junta durante etapa de consolidação.

Como opções tradicionais de união se destacam, a utilização de elementos de fixação (parafusos e rebites) e o uso de adesivos estruturais como resinas epóxi e fenólicas (da SILVA et al. 2007; RECKTENWALD 2005). Dentre as técnicas recentes se destacam a injeção direta de nervuras plásticas em chapas (IMA/PMA) estudada por ZOELLNER (2002), a rebitagem auto-perfurante (SPR) estudada por GARDSTAN (2006) o ICJ (“Injection Clinching Joining”) estudado por ABIBE (2010 e 2013), a união pontual por fricção (FSpJ) estudada por GOUSHEGIR (2014) e AMANCIO (2011) e a rebitagem por fricção desenvolvida e estudada por AMANCIO (2007a).

### 3.8.1. Colagem por adesão

A colagem por adesão, popularmente conhecida como adesivagem, consiste na união de dois materiais através do estabelecimento de ligações químicas entre eles, tal efeito é chamado de adesão. O termo está relacionado ao fato de se realizar esta união através de uma substância chamada de adesivo. O adesivo pode ter viscosidade variável, de um líquido a uma massa pastosa, e sua aplicação pode ser realizada em filme ou camada (KINLOCH 1987). Em aplicações de engenharia, os adesivos são designados como adesivos estruturais. A colagem por adesão pode também acontecer de modo autógeno, ou seja, quando um dos materiais a serem unidos é um termoplástico que ao ser aquecido funde, molhando assim a superfície do material adjacente (SILVA 2007).

Em sua pesquisa, SILVA (2008) mostrou que os adesivos estruturais, além de conferirem resistência mecânica a junta, ainda apresentam a vantagem de gerar juntas hermeticamente seladas. Quando comparados aos processos concorrentes, apresentam como vantagem uma melhor distribuição de cargas ao longo da junta. Isso se deve ao fato de formarem uma ligação contínua e não pontual que reduz significativamente os concentradores de tensões.

Entretanto, a qualidade destas juntas depende diretamente da preparação das superfícies, principalmente em aplicações com condições severas de uso como, por exemplo, carregamentos cíclicos complexos. Devido a necessitarem de várias etapas de preparação acarretam em um aumento nos tempos e nos custos de produção. Após a preparação e aplicação do adesivo vem o processo de cura, que em alguns casos necessita ser realizada em alta temperatura ou pressões e, em outros casos, pode levar até 24h. Além disso, em geral, estas juntas apresentam baixa tenacidade e resistência mecânica quando comparado às uniões mecânicas metálicas, limitando seu uso em poucas aplicações (NASCIMENTO 2013).

NETO (2011) realizou um estudo paramétrico avaliando numericamente e através de ensaios mecânicos a influência do comprimento de sobreposição sobre a resistência mecânica de juntas adesivadas sobrepostas. Neste estudo ficou evidente a relação direta entre a sobreposição e o desempenho da união, sendo necessária uma área sobreposta grande a fim de garantir uma elevada resistência da junta, resultando em um aumento de peso da estrutura.

Em um estudo sobre o efeito da espessura do filme de adesivo na resistência mecânica da junta, NASCIMENTO (2013) demonstrou que, para os materiais estudados, o

aumento da espessura do filme passando de 0,2 mm para 3 mm acarreta em uma redução de 50% na resistência da junta. Essa constatação comprova a sensibilidade da técnica ao processo, o que aumenta a dispersão nos resultados e diminui sua confiabilidade.

### 3.8.2. Rebitagem

Rebites são soluções permanentes amplamente aplicados na construção aeronáutica para juntas estruturais e de custo relativamente baixo quando comparado a parafusos. Aliado a estas características, a rebitagem tradicional ainda apresenta como principal diferencial o baixo peso (devido ao uso de ligas leves como alumínio e titânio) e instalação mais fácil e rápida. Como ponto fraco, possuem uma menor resistência em aplicações sob tração, porém com excelente desempenho quando submetidos a carregamentos cisalhantes. O processo depende de furos passantes, os quais enfraquecem as juntas de compósitos devido ao efeito de concentração de tensões. As juntas rebitadas não são estanques nem ao ar nem à água, sendo necessário para vedação total o uso de adesivos ou selantes. Uma vez que as juntas rebitadas são permanentes, estas só podem ser removidas por processo de furação, o que pode se apresentar como uma tarefa trabalhosa (NASA 1990). A Figura 3.6 apresenta alguns tipos comuns de rebites.

BLANCHOT (2008) usou modelagem numérica para melhorar o entendimento do comportamento mecânico e a distribuição de tensões em diferentes juntas rebitadas quando submetidas a carregamentos de tração, cisalhamento ou a combinação dos dois. Como resultado principal provou a relação da pré-tensão dada no rebite durante sua aplicação com o desempenho mecânico da junta em operação. Esse resultado evidencia a criticidade da necessidade de um processo controlado para garantia da qualidade da junta. Como em sua maioria a aplicação de rebites é feita de forma manual, se faz necessário o aumento da quantidade de rebites para a garantia da integridade estrutural.

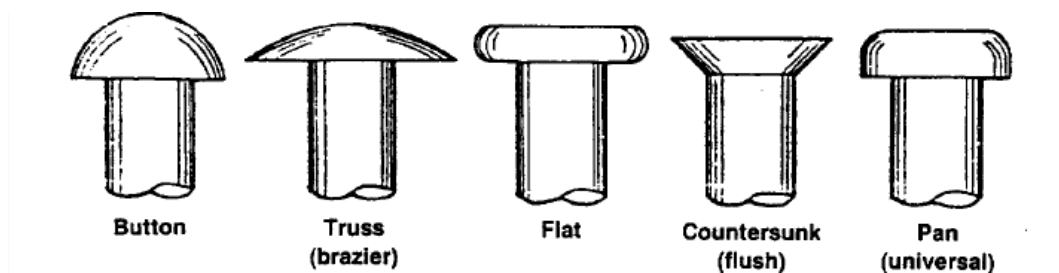


Figura 3.6 Tipos comuns de cabeça de rebites convencionais (NASA 1990).

Além dos rebites convencionais, estão disponíveis comercialmente inúmeros tipos de rebites que podem ser aplicados em estruturas híbridas. Entre eles destacam-se os rebites auto-perfurante e bifurcado (NASA 1990); ambos são respectivamente ilustrados na Figura 3.7.

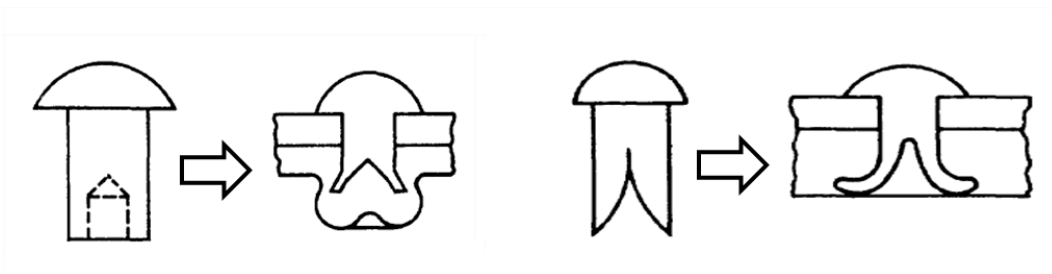


Figura 3.7 Rebite auto-perfurante (esquerda) e rebite bifurcado (direita), exemplos comuns de rebites que dispensam pré-furos (NASA 1990).

Como alternativa a essas junções, se apresenta a rebiteagem por fricção (do inglês “*FricRiveting*”) (AMANCIO 2008a), um novo processo de união multi-material baseado no conceito da soldagem por fricção (FW) que apresenta como diferencial o reduzido tempo de produção e boa resistência mecânica da junta obtida. O processo ainda agrega como vantagem uma baixa produção de resíduos, sendo os mesmos passíveis de reciclagem e não agressivos ao meio-ambiente. Por esses motivos, a rebiteagem por fricção mostra-se como uma alternativa atraente frente às técnicas de união disponíveis.

### 3.9. Soldagem por atrito

A soldagem por atrito (do inglês “*Friction Welding*”) é definida pela *American Welding Society* (AWS 1997) como: “Um processo de união no estado sólido que produz a união dos materiais sob força de compressão dos componentes, com rotação ou deslocamento entre si, para produzir calor e deslocar plasticamente material das superfícies de contato. Tais superfícies sob condições normais não fundem. Materiais de adição, fluxo e gás de proteção não são obrigatórios neste processo”. Em sua configuração básica, é um processo de união metalúrgico de materiais fundamentado no aquecimento local gerado pelo atrito entre dois componentes: o primeiro (geralmente) em rotação e o segundo fixo (AWS 1997).

O processo é composto por quatro estágios distintos, representados esquematicamente na Figura 3.8: início da rotação (I), avanço/contato (II),

aquecimento/deformação plástica (III) e caldeamento/forjamento (IV) (MARQUES et al. 2005).

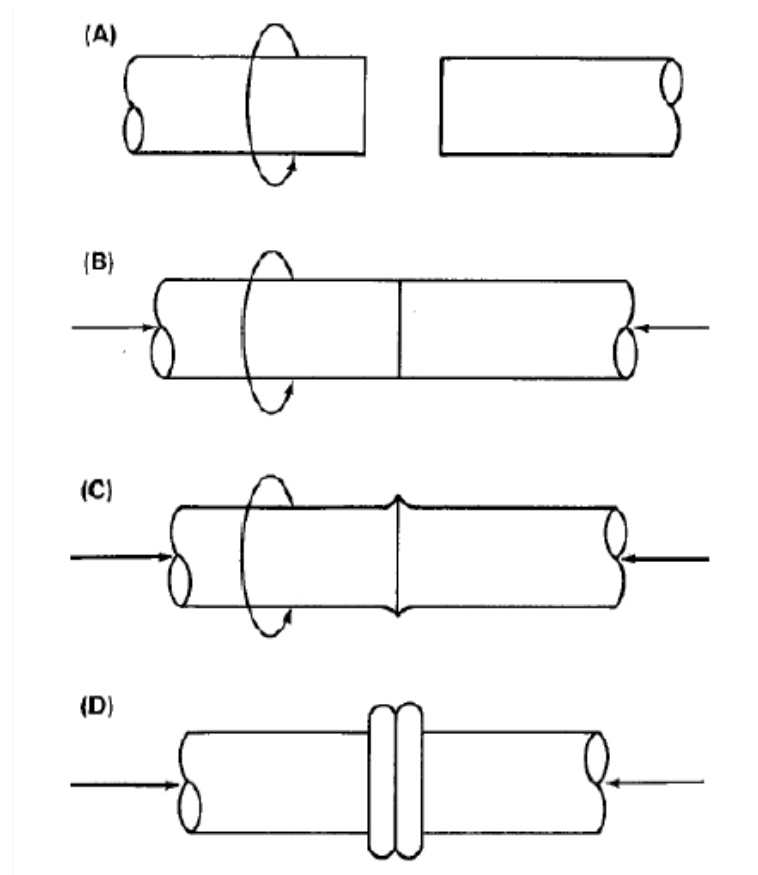


Figura 3.8 Representação esquemática do processo de soldagem por fricção (FW). Adaptado de MARQUES et al. 2005.

A rotação relativa entre os componentes em contato produz uma deformação plástica severa devido ao atrito, e o conseqüente aquecimento da junta a temperaturas próximas da fusão. Após a rotação cessar a força de forjamento é aplicada e a junta consolidada (ANDRADE 2011).

A união dos materiais é obtida sem que ocorra a fusão dos mesmos, dispensando o uso de atmosfera protetora uma vez que as concentrações de hidrogênio e nitrogênio absorvidas são baixas em comparação com os processos de soldagem baseados na fusão. Outro fator determinante é o reduzido número de parâmetros de processo a serem controlados, os quais são basicamente: rotação, velocidade de avanço e pressão de forjamento. A Figura

3.9 apresenta a variação típica destes parâmetros e seu controle ao longo do tempo de processo (AWS 1997).

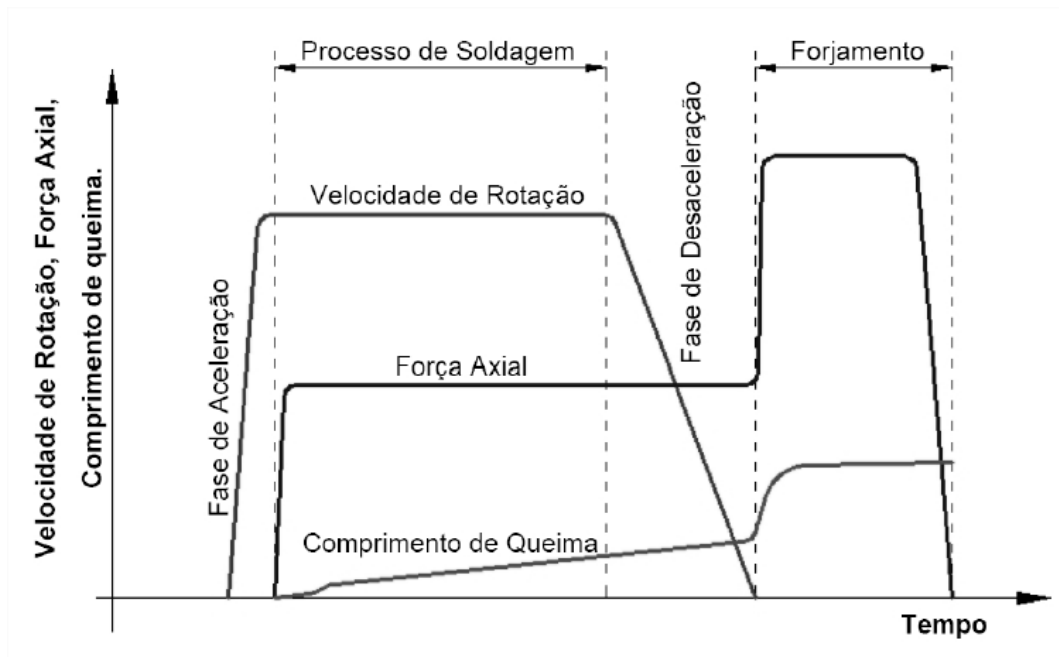


Figura 3.9 Evolução dos parâmetros de soldagem por fricção em função do tempo de processo. (SOUZA 2006)

Como aspectos característicos do processo, se destacam: a pequena zona afetada pelo calor (ZAC), a ausência de fusão e a formação de rebarba (ANDRADE 2011).

Recentemente foram desenvolvidos outros processos baseados em fricção, dos quais se destacam a soldagem por fricção e a mistura mecânica (FSW), a soldagem a ponto por fricção e mistura mecânica (FSSW), a soldagem a ponto por fricção com refil (FSpW) e a soldagem por fricção com pino consumível (FHPP). Derivada dos processos de soldagem a ponto por atrito, a rebiteagem por fricção (“FricRiveting” do inglês “*FrictionRiveting*”), desenvolvida por AMANCIO 2007, oferece uma alternativa aos processos convencionais de união de polímeros com metais, como a união por aquecimento, colagem ou até mesmo a utilização de rebites tradicionais (MARQUES et al. 2005).

### 3.10. Rebiteagem por fricção

O processo de rebiteagem por fricção, representado esquematicamente na Figura 3.10, se apresenta como uma técnica de união por fricção entre materiais dissimilares que dispensa

grandes preparações prévias ao processo, o mesmo foi patenteado pela *GKSS Forschungszentrum GmbH* (Alemanha), atualmente chamado Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) em 2007 por AMANCIO (2007b).

Em seu estudo AMANCIO (2007a) apresentou um processo que consiste em um pino sólido de material metálico (rebite) que girando em alta rotação é pressionado contra uma placa/peça polimérica. O aporte térmico gerado pela fricção entre os dois materiais funde a camada superficial do polímero. Enquanto o rebite avança, uma fina camada deste material fundido cerca o mesmo. Devido à elevação local de temperatura, tem início a plastificação da ponta do pino. Por fim, a velocidade de rotação é diminuída enquanto que uma força de forjamento é aplicada. Assim, uma deformação no sentido de aumentar seu diâmetro é induzida, levando o pino a obter sua forma final com diâmetro maior que o original. Após um breve intervalo de tempo a junta consolida. A Figura 3.10 apresenta a sequência do processo e as geometrias iniciais e finais da junta.

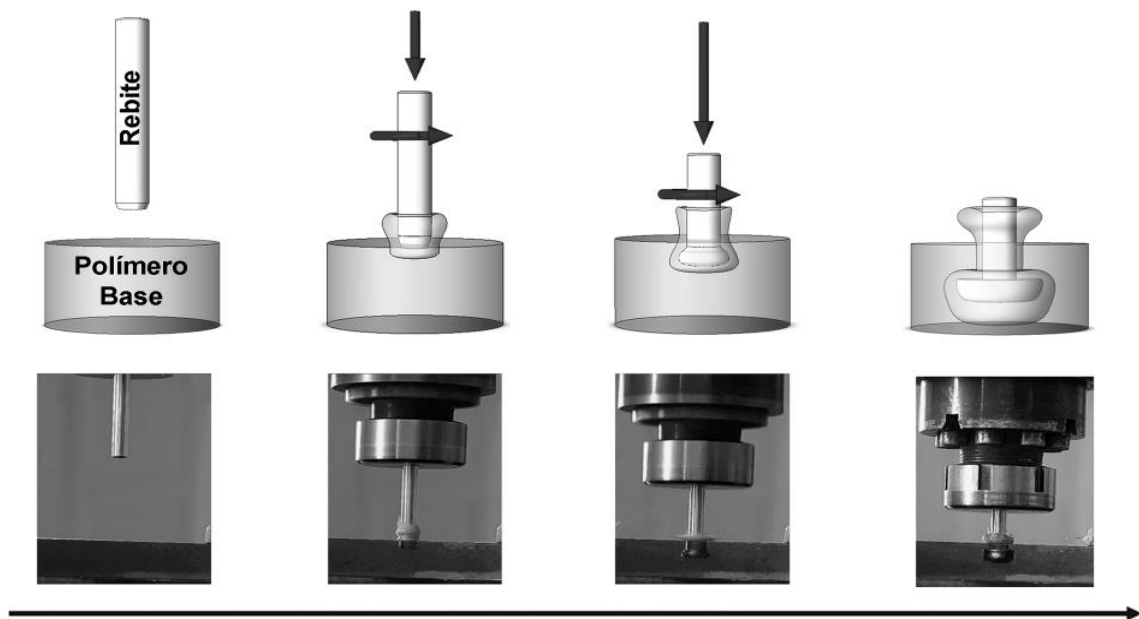


Figura 3.10 Representação esquemática do processo de rebiteamento por fricção (“FricRiveting”). Adaptado de AMANCIO 2009b.

A geometria final da junta assemelha-se com a geometria de rebites auto-perfurantes e bifurcados, com a vantagem de ser inserido aquecido, gerando uma geometria final mais saliente e ser melhor moldada à matriz.



Quando comparado ao uso de rebites, o processo de rebiteagem por fricção dispensa a necessidade de pré-furos e produz uma junta hermeticamente selada. Já na comparação ao uso de adesivos químicos, dispensa a preparação superficial e o tempo de cura dos mesmos. Em linhas gerais, o processo apresenta um curto tempo de aplicação (0,5 a 10 s) e resistência similar ou superior aos seus análogos. Como desvantagem pode ser citada a necessidade de equipamento de maior custo para sua aplicação e a indisponibilidade de equipamentos portáteis. Porém, para aplicações com rebites de resistência mecânica menor como alumínio ou magnésio existe a possibilidade do uso de fresas ou furadeiras industriais adaptadas para o processo, devido à similaridade de operação destes maquinários com os desenvolvidos especialmente para a técnica (HZG 2013). Como produtos finais do processo, apresentam-se juntas híbridas polímero-metal, as quais possuem baixa densidade e elevada resistência mecânica.

Durante o desenvolvimento deste processo, uma completa análise metalúrgica e mecânica foi realizada por AMANCIO (2007a e 2011), e a modelagem numérica realizada por BORGES (2011).

BORGES (2009) demonstrou que a seção do rebite que está submetido às maiores tensões é a região periférica, sendo assim dispensável o material no centro do rebite. Em seu trabalho sugeriu como possibilidade o uso de rebites vazados.

BLAGA (2012) realizou um estudo de viabilidade para a utilização do processo de rebiteagem por fricção em pontes móveis construídas com materiais compósitos reforçados com fibra de vidro. Em seu estudo testou diferentes materiais incluindo titânio puro, resultados publicados recentemente por BLAGA (2013) e geometrias de pino. BLAGA (2012) avaliou o uso de rebites vazados de alumínio, porém concluiu que não possuíam desempenho mecânico satisfatório para sua aplicação.

### 3.11. Parâmetros de Processo

Após a união consolidada, a porção do rebite inserida na matriz polimérica assume em alguns casos a forma de uma âncora com geometria característica do processo. A sua geometria varia de acordo com os parâmetros usados para a obtenção da mesma. Como principais variáveis se apresentam: a velocidade de rotação do pino (VR), o tempo de união (TU), a pressão de fricção (PF) e a pressão de forjamento (PFo) (Figura 3.11).

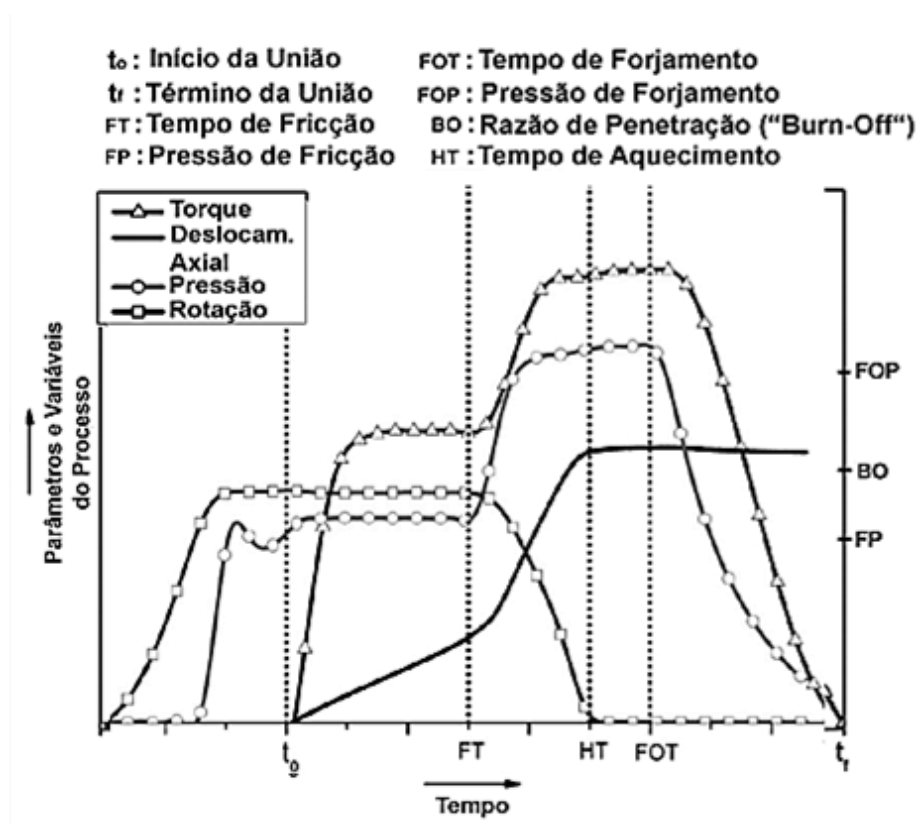


Figura 3.11 Principais parâmetros de controle em relação ao tempo de processo, adaptado de AMANCIO (2007a).

Durante seu estudo AMANCIO (2007a) decompôs o processo em cinco etapas. A Figura 3.12 apresenta a divisão destas fases com base no torque e deslocamento axial. As cinco etapas são brevemente descritas abaixo (BORGES 2009):

- Na Etapa I (aquecimento), a geração de calor tem início devido ao atrito (Coulomb, estado sólido) e o deslocamento axial é apenas o suficiente para obtenção do contato entre o rebite e a placa.
- A Etapa II (avanço) tem início após a fusão/amolecimento da matriz, enquanto o rebite avança no sentido axial o desentrelaçamento das cadeias do polímero (cisalhamento interno) continua a elevar o aporte térmico.

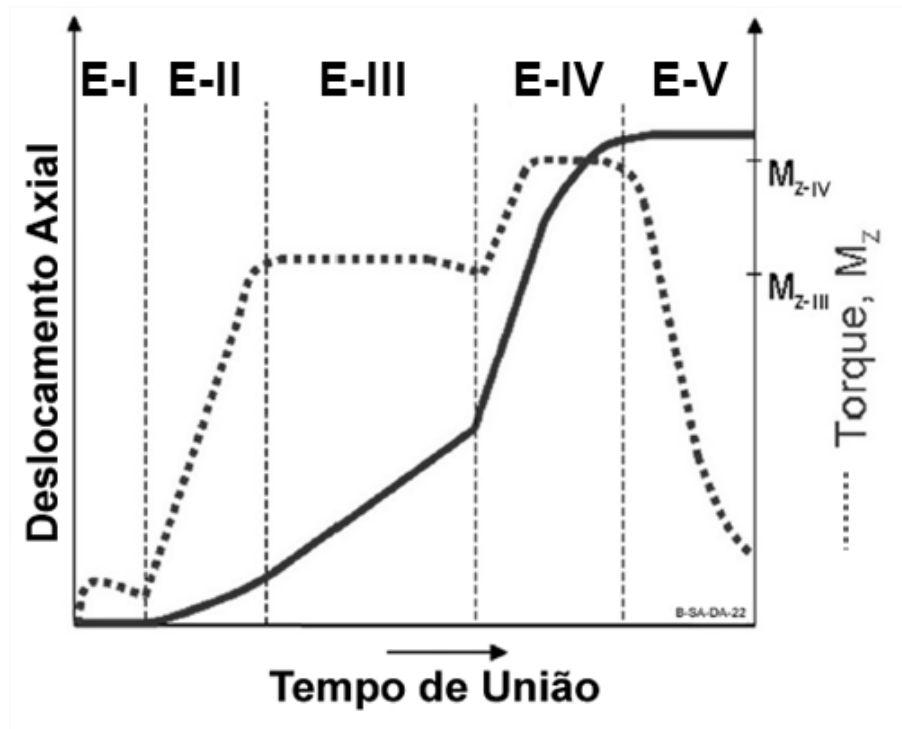


Figura 3.12 Etapas do processo de rebiteamento por fricção, adaptado de AMANCIO (2007a).

- Na Etapa III (dissipação viscosa em estado estacionário), a ponta do rebite inserida na matriz atinge o nível desejado de plastificação. Nesta etapa o material é expulso na forma de rebarba e a formação da zona de ancoragem (ZA) tem início.
- A Etapa IV (forjamento do rebite) é quando a forma característica da zona de ancoragem (ZA) toma sua forma final através da interrupção da rotação e elevação da carga axial, ao mesmo tempo que a rebarba é expulsa.
- A Etapa V (consolidação), a pressão axial é mantida e a junta consolida através do resfriamento à temperatura abaixo da temperatura de transição vítrea e o material fundido/amolecido retorna ao estado sólido.

### 3.12. Geometria e Propriedades da Junta

Como apresentado, a geometria final da zona de ancoragem é diretamente dependente dos parâmetros utilizados durante o processo. Através do uso de ferramentas de

planejamento de experimentos, AMANCIO (2007a) aperfeiçoou a geometria da zona de ancoragem para rebites de alumínio inseridos em termoplásticos. Seu trabalho visou a análise das combinações de penetração e diâmetro final que geram as melhores condições de ancoragem. Na Figura 3.13 (A, B, C) são apresentadas as macrografias de três geometrias consideradas de boa qualidade de ancoragem. Dentre as três, a representada na Figura 3.13 A, possui 9,5 mm de diâmetro, 6,6 mm de penetração e apresentou o melhor desempenho mecânico conforme resultados obtidos por AMANCIO (2007a).

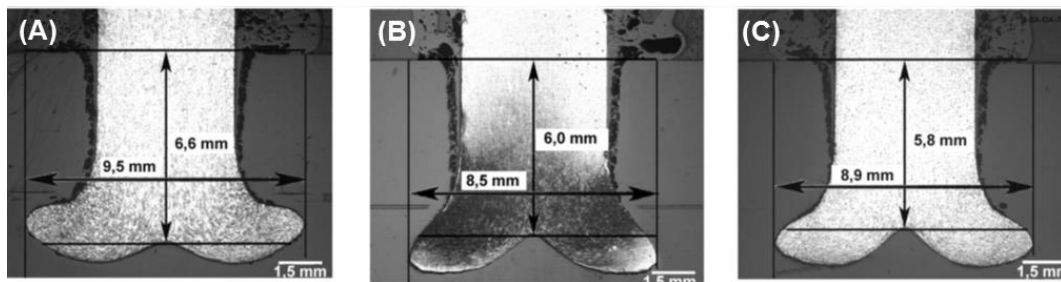


Figura 3.13 Geometrias da zona de ancoragem (a, b e c) obtidas com a variação dos parâmetros de processo (AMANCIO, 2007a) para a geometria do tipo inserto metálico de rebite de alumínio 2024-T351 em Polieterimida (PEI).

Um estudo sobre as propriedades dos materiais pré e pós-consolidação da junta foi realizado por AMANCIO (2008b), com rebites de alumínio AA2024-T351. BLAGA (2012) confirmou os mesmos resultados para rebites de titânio gr. 2 em polieterimida, e em compósitos de polieterimida reforçados com fibra de vidro (BLAGA 2013). Estas juntas apresentam características distintas principalmente no que diz respeito às regiões que apresentaram maiores variações de temperatura e deformações plásticas severas. Através do cruzamento de resultados de ensaios de microdureza e análises de microscopia combinados com medições de temperatura, as regiões da junta com características similares foram subdivididas em:

- Material Base ou Substrato (MB): as propriedades permanecem inalteradas, uma vez que as temperaturas atingidas e esforços aplicados não causam alterações significativas no material original;

- Zona Afetada pelo Calor (ZAC): a temperatura atingida nessa região é suficientemente elevada para promover pequenas alterações microestruturais, por consequência alterando suas propriedades mecânicas, porém não há modificações decorrentes da deformação plástica executada pela força de forjamento;
- Zona Termo-Mecanicamente Afetada (ZTMA): esta região sofreu os efeitos da temperatura como também da deformação mecânica ocasionada pela aplicação da força de forjamento.
- Zona de Rebarba (ZR): esta é formada pelo material polimérico fundido expelido em torno do rebite metálico (devido à inserção do mesmo na matriz polimérica). Nas aplicações práticas, a zona de rebarba é removida na última etapa do processo

As três primeiras zonas microestruturais (MB, ZAC, ZTMA) se subdividem em relação ao material a qual correspondem no caso do metal MXXXX (prefixo M) e no polímero PXXXX (prefixo P), já a última (ZR) é restrita ao polímero. Estas podem ser visualizadas mais facilmente na Figura 3.14A, e sua classificação melhor compreendida através dos mapas de microdureza do rebite metálico e micrografias apresentadas na Figura 3.14B (AMANCIO 2008b).

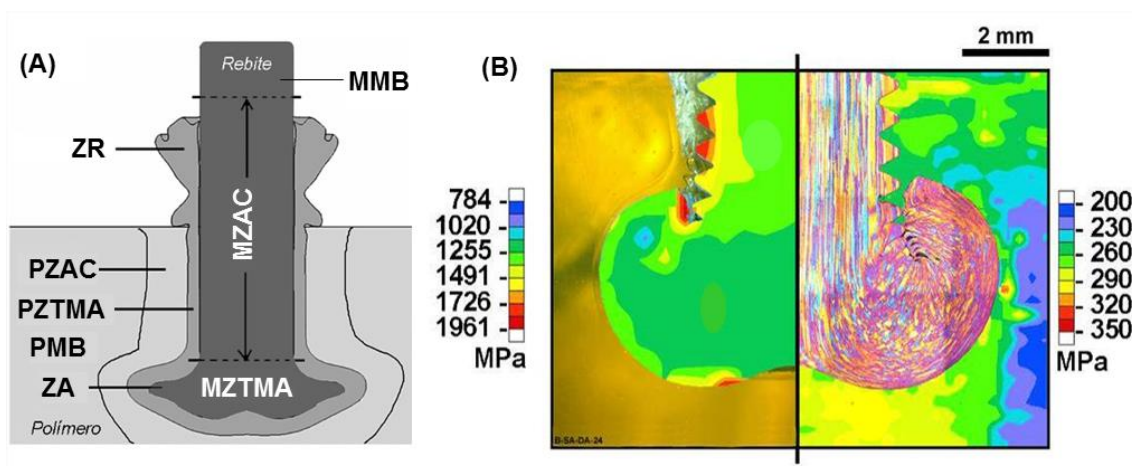


Figura 3.14 a) Regiões com propriedades distintas presentes na junta Adaptado de BORGES 2009, b) Esquerda: Macrografia do polímero (PEI) e mapa de microdureza do metal (AA 2024-T351), Direita: configuração oposta. Adaptado de AMANCIO 2008b.

A Rebitagem por Fricção foi estudada recentemente usando outras combinações de materiais incluindo materiais com conhecida aplicação pela indústria automotiva, como alumínio/polycarbonato (RODRIGUES 2013), compósitos reforçados com fibra de carbono curtas (ALTMAYER 2012). Também foram estudados a união de compósitos laminados de fibra de carbono unidas por rebites de titânio para aplicações aeronáuticas (ALTMAYER 2013), este último mostrando resultados de resistência ao cisalhamento comparáveis ao processo referência “lock-bolting”, porém com ciclos mais rápidos de união, ausência de pré-furos e uso de selantes.

### 3.13. Vantagens e Limitações

A seguir está apresentado um quadro comparativo entre as principais vantagens e limitações do processo de rebitagem por fricção.

<b>VANTAGENS</b>	<b>LIMITAÇÕES</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispensa grandes preparações/limpeza da superfície;</li> <li>• Pode ser aplicado mesmo quando apenas um lado da peça está acessível;</li> <li>• Pode ser realizada em ângulo;</li> <li>• Curto ciclo de processo (0,5 a 10 s);</li> <li>• Juntas hermeticamente seladas;</li> <li>• Bom desempenho mecânico da junta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produz apenas juntas do tipo ponto;</li> <li>• Difícil aplicação em polímeros termofixos;</li> <li>• Não possibilita desmontagem após consolidação;</li> <li>• Necessita de uma espessura mínima da matriz polimérica (min. 2 x Ø inicial do pino).</li> </ul>

Figura 3.15 Quadro comparativo de vantagens e desvantagens do processo de rebitagem por fricção (BORGES 2009)

### 3.14. Método dos elementos finitos (MEF)

A utilização de ferramentas numéricas computacionais possibilita análise de modelos físicos complexos em ambiente virtual, reduzindo o número de testes experimentais a serem realizados e, conseqüentemente, os custos de desenvolvimento. A utilização do método dos elementos finitos (MEF), aplicado a união de materiais dissimilares, é contemplada em

inúmeros trabalhos científicos (da SILVA et al. 2008; GRUJICIC 2009) apresentando resultados importantes a fim de se compreender os mecanismos atuantes nas uniões em questão (rebitadas, coladas, injetadas, etc.). A compreensão das distribuições de tensões e das deformações, bem como deslocamentos e forças de reação, são importantes quando o intuito é aprimorar a geometria da junta e complementar o entendimento de seus mecanismos de falha.

BORGES (2009) estudou o processo de rebitagem por fricção sob a abordagem numérico computacional. Em seu estudo elaborou modelos para juntas sobrepostas e de ancoragem para juntas de PEI e alumínio com rebites de alumínio. BORGES (2011) continuou o trabalho anterior desenvolvendo modelos de falha, baseados no critério de Johnson-Cook, aplicáveis a juntas produzidas pelo processo de rebitagem por fricção. Porém não há na literatura nenhum estudo usando MEF para juntas de compósito rebitadas por fricção.

### 3.15. Planejamento de experimentos: Método de Taguchi

O planejamento de experimentos (PdE) foi desenvolvido inicialmente por Fisher, na década de 20, para análise de fatores climáticos sobre o rendimento da colheita. Sua análise é baseada na análise de variância, a fim de identificar os efeitos de cada variável (ou parâmetro) sobre um determinado resultado (ou resposta). Para tal, são variados conjuntamente os níveis dos fatores, sempre observando as alterações na resposta sob análise. Esta técnica ajuda em estudos de sistemas complexos onde são desconhecidas as relações funcionais entre a variável de resposta (saída) e as variáveis de entrada (fatores) (FISHER 1971, PHADKE 1989).

Baseado nos princípios do desenho estatístico de experimentos fatoriais, Taguchi desenhou diversos conjuntos de experimentos altamente fracionados. Apresentados em forma matricial, como exemplificado na Figura 3.16, considerando o número de fatores e seus respectivos níveis envolvidos no estudo. O método proposto por Taguchi é empregado principalmente em problemas de resposta única, ou seja, casos onde só existe uma variável de saída (TAGUCHI 1991). Devido a essa característica é muito empregado em sistemáticas de controle de qualidade *on-line* e *off-line* (CASTRO 1990) e em otimização de processos de soldagem (ANAWA 2008, BILICI 2012) e rebitagem (GHANI 2012).

A análise feita sobre o efeito da variação simultânea de fatores múltiplos é denominada fatorial. A diferença entre o experimento completo e o fatorial é que enquanto o primeiro varre toda a gama de combinações possíveis, o segundo é constituído por um

subespaço de combinações estrategicamente definido de modo que a omissão de informação decorrente da redução no tamanho do experimento seja minimizada (CASTRO 1990). O método de Taguchi apresenta como principal vantagem o fato de ser baseado na análise fatorial. Em termos práticos demanda um número consideravelmente menor de experimentos ao teoricamente previsto pelo PdE. Esse fato impacta diretamente na redução do custo experimental (PHADKE 1989).

matriz intrínseca:	<b>L8</b>	(8 ensaios)
matriz extrínseca:	<b>L4</b>	(4 ensaios)

Ensaio	Réplicas	Observações	$y_m$	SN
1	(1), (2), (3), (4)	$y_{11}, y_{12}, y_{13}, y_{14}$	$y_{m1}$	$SN_1$
2	(1), (2), (3), (4)	$y_{21}, y_{22}, y_{23}, y_{24}$	$y_{m2}$	$SN_2$
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
8	(1), (2), (3), (4)	$y_{81}, y_{82}, y_{83}, y_{84}$	$y_{m8}$	$SN_8$
Total de Observações		<b>32 (= 8 x 4)</b>		

$(y_m$  : resposta média; SN: quociente sinal-para-ruído)

Figura 3.16 Exemplo de construção da matriz de experimentos do modelo de Taguchi (CASTRO 1990).

Como evidenciado por CASTRO (1990), “as experiências poderão, também, ser simuladas em computador, em vez de realizadas laboratorialmente, com a vantagem de se tornar desnecessário contabilizar quer o erro experimental, quer o efeito do ruído”. Dado isso, a combinação da análise numérica computacional aliada ao modelo de Taguchi se apresenta como uma forma eficaz de determinação de parâmetros funcionais para processos de união.

Como saída o modelo de Taguchi apresenta uma combinação de parâmetros que irão gerar a melhor resposta e prevê-la. Dado isso, TAGUCHI (1991), prevê a confirmação da melhoria (obtenção de robustez), através de uma nova experiência com os parâmetros obtidos e com base nessa comparação validar ou não os resultados.



## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Metodologia proposta

Durante este trabalho foi estudada a capacidade de construção de juntas híbridas polímero-metal, com aplicação estrutural aeronáutica, obtidas pelo processo de rebitagem por fricção. O material base utilizado para o clip compósito foi o compósito de matiz polimérica de polieterimida reforçado com fibra de vidro (GFR-PEI), para os rebites foi escolhido o titânio graduação 2 (Ti-GR2) e a fuselagem foi representada por placas de AA2198-T851. Os motivos pelos quais tais materiais foram selecionados serão apresentados nas seções a seguir. A metodologia utilizada para a avaliação das novas geometrias para a rebitagem por fricção de estruturas híbridas compósito-metal foi baseada na análise de seu desempenho mecânico de tração e cisalhamento. Duas novas geometrias propostas de rebites de titânio, ambas vazadas, foram testadas. Os rebites vazados foram escolhidos devido a três características principais: minimização da rebarba uma vez que o material flui para o centro do rebite, redução em 40% da massa de material do rebite, e diminuição do aporte térmico, o que propicia menor área degradada de material base e maior inserção do rebite na matriz. Para comparação juntas com rebite sólido, e sólido roscado M5 foram produzidas com base nos parâmetros utilizados por BLAGA (2011), em trabalho anterior.

Para os testes de viabilidade, inicialmente os parâmetros utilizados por AMANCIO (2007a), BORGES (2009) e BLAGA (2011) foram reduzidos proporcionalmente à redução de área da seção transversal. Juntas foram produzidas com as quatro geometrias utilizando esses parâmetros. Essas foram, em seguida, cortadas em sua seção transversal e qualitativamente analisadas via microscopia ótica em busca de degradação térmica, falta de penetração, quantidade de rebarba, falta de ancoragem ou presença de defeitos (microfissuras) no rebite.

Após a análise qualitativa, as geometrias que apresentaram desempenho satisfatório foram selecionadas e submetidas para uma análise quantitativa. Tal processo foi iniciado com

o estudo dos parâmetros de processo. Para este estudo, visando à redução do número de testes a serem realizados, foi escolhida uma metodologia baseada em um método estatístico (PdE Taguchi) aliado a modelagem numérica (via MEF), cálculos analíticos e caracterização metalográfica. A aplicação da metodologia proposta foi dividida da seguinte forma: 1) montagem da matriz de experimentos; 2) Produção das juntas com os parâmetros especificados; 3) Caracterização metalográfica das seções transversais; 4) Modelagem numérica do desempenho da junta; 5) Modelagem analítica do desempenho da junta; 6) Validação dos modelos numéricos e analíticos; 7) Uso das ferramentas estatísticas sobre os resultados; 8) Produção de juntas com os parâmetros de saída do modelo estatístico; 9) Validação do modelo estatístico; 10) Avaliação da geometria final da junta produzida com os parâmetros otimizados, através de ensaios mecânicos de tração e cisalhamento. A Figura 4.1 resume em um fluxograma a metodologia proposta.

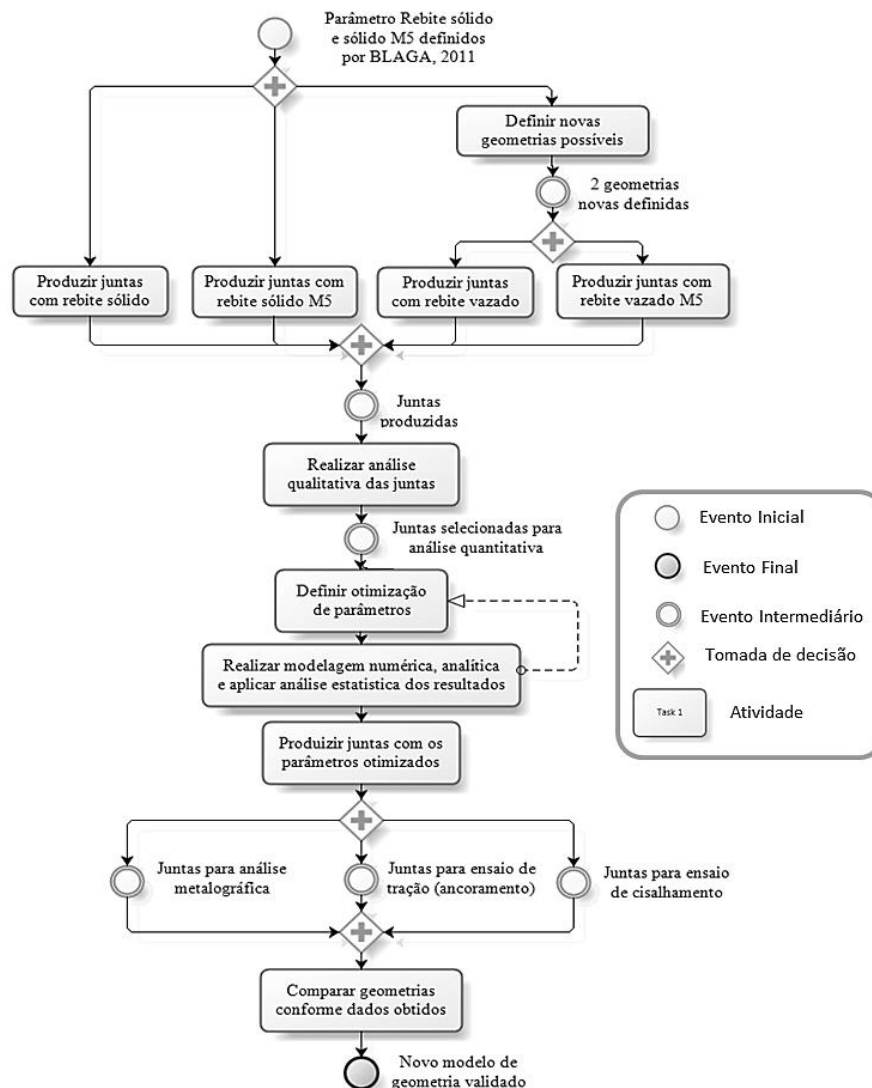


Figura 4.1 Fluxograma da metodologia proposta.

#### 4.2. Clips de polieterimida reforçada com fibra de vidro (GRF-PEI)

Os corpos de prova utilizados neste trabalho, para representar os clips compósitos, mencionados anteriormente na Seção 1, foram obtidos de placas poliméricas laminadas de 6,2 mm de PEI reforçado com 50% em massa (30% em volume) de fibras orientadas a 0° e 90°, [0,90]<sub>14</sub>. A matriz polimérica de PEI (CETEX® PEI) foi reforçada por 28 camadas alternadas de fibra de vidro (*E-glassFibers 8H satin*) a 0-90 com espessuras de 0,24 mm por camada (produzido pela Tem Cate Advanced Composites, Holanda). Tal material já possui aplicação consolidada na construção estrutural em aplicações de mobilidade, quase sempre utilizado na substituição de estruturas metálicas visando redução de peso e aumento de resistência mecânica. O PEI apresenta, além de um excelente desempenho mecânico, boa estabilidade dimensional e baixa flamabilidade. As propriedades mecânicas do plástico PEI sem reforço e da fibra de vidro estão apresentadas nas Tabela 4.1 e Tabela 4.2, respectivamente. As microdurezas Vickers, média experimental calculada por AMANCIO (2007a) também são evidenciadas nestas tabelas.

Tabela 4.1 Propriedades Mecânicas do polímero PEI (GE ULTEM 1000) (BORGES 2011).

Tensão de Escoamento, $\sigma_e$ (MPa)	Tensão de Ruptura, $\sigma_r$ (MPa)	Módulo de Elasticidade, E (GPa)	Coefficiente de Poisson, $\nu$	Microdureza HV
69	120	2,88	0,39	28,96 ± 0,41

Tabela 4.2 Propriedades mecânicas da fibra de vidro.

Tensão de Escoamento, $\sigma_e$ (MPa)	Tensão de Ruptura, $\sigma_r$ (MPa)	Módulo de Elasticidade, E (GPa)	Coefficiente de Poisson, $\nu$	Microdureza HV
n/a	1700	76	0,22	n/a

As placas de GFR-PEI foram confeccionadas através do processo de moldagem por compressão que apresenta como resultado uma placa plana e com bom acabamento

superficial. O compósito escolhido é anisotrópico, ou seja, com propriedades diferentes nas duas direções principais. Entretanto, a diferença entre as duas direções principais é de menos de 10%. Os ensaios para determinar estas propriedades foram realizados de acordo com a Norma DIN 53455. Tais propriedades do compósito GFR-PEI, nas direções 0° e 90°, estão apresentadas na Tabela 4.3. O compósito ainda é caracterizado por ser um polímero amorfo com condutividade térmica de 0,22 W/m.K e temperatura de transição vítrea (Tg) de 210°C. A matriz de PEI em sua condição não reforçada, quando em estado sólido, apresenta cor âmbar transparente. Uma vez atingida a Tg ele passa a ter comportamento similar a elastômeros (ex: borracha), tal fato é possível devido a sua característica amorfa.

Tabela 4.3 Propriedades Mecânicas do compósito GFR-PEI (BLAGA 2011).

Orientação	Tensão de Escoamento, $\sigma_e$ (MPa)	Tensão de Ruptura, $\sigma_r$ (MPa)	Módulo de Elasticidade, E (GPa)	Coefficiente de Poisson, $\nu$	Microdureza HV
0°	n/a	484	2,6	0,36	n/a
90°	n/a	445	2,4	0,36	n/a

\*valores obtidos a 23°C e 50% de umidade relativa.

#### 4.3. Frame de AA2198-T851

Para representar a fuselagem da aeronave e os *stringers* foram escolhidas chapas de 3 mm de liga de alumínio 2198. Esta é uma liga de alumínio de baixa densidade devido à presença de lítio em sua matriz principal. Além do Li e do Al, os outros componentes principais da liga são Ag e Cu. A Tabela 4.4 apresenta a composição química da liga, previamente caracterizada por PIETA 2011. Tal combinação confere a liga uma elevada alongação na ruptura e um elevado módulo de elasticidade quando comparada com outras ligas de Al. Tais características são desejáveis em estruturas de alto desempenho mecânico.

A classificação “T” identifica um material que foi termicamente tratado, no caso o T851 foi trabalhado a frio e envelhecido artificialmente. As propriedades mecânicas da liga são apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.4 Composição química do AA2198-T851 (PIETA 2011).

Fe	Cu	Li	Mg	Mn	Ag	Si	Ti	Zr	Al
0,04	3,40	0,80	0,27	0,04	0,18	0,03	0,03	0,10	bal.

Tabela 4.5 Propriedades mecânicas do AA2198-T851 (TAVARES 2011).

Tensão de Escoamento, $\sigma_e$ (MPa)	Tensão de Ruptura, $\sigma_r$ (MPa)	Módulo de Elasticidade, E (GPa)	Coefficiente de Poisson, $\nu$	Microdureza HV
491,2	532,3	73,1	0,31	141,5

#### 4.4. Titânio Graduação 2 (Ti-Gr2)

Tarugos de titânio graduação 2, DIN 3.7035 (Ti-Gr2), com diâmetro inicial de 5 mm foram utilizados como base para a produção de rebites lisos de 5 mm, rebites roscados M5, rebites lisos de 5mm vazados e rebites roscados M5 vazados (através de processo de usinagem), todas apresentadas na Figura 4.2.

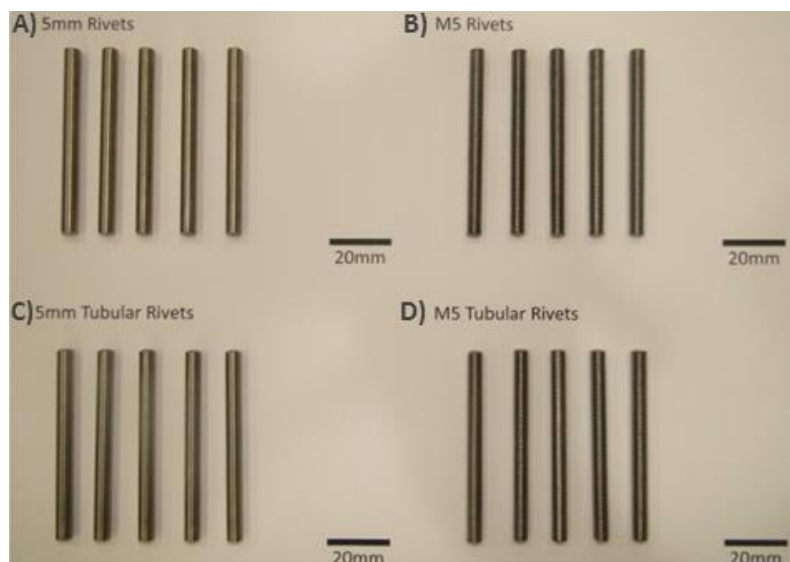


Figura 4.2 Amostras dos rebites de Ti-Gr2: a) rebites sólidos de 5mm; b) rebites sólidos com rosca externa M5; c) rebites vazados com diâmetro externo 5mm e interno 2,5mm; d) rebites vazados com rosca externa M5 e diâmetro interno 2,5mm.

A partir dos rebites apresentados as juntas de tração e juntas sobrepostas foram produzidas. A Tabela 4.6 apresenta a composição química nominal de acordo com a literatura ASM (2006).

Tabela 4.6 Composição química nominal do titânio Ti-Gr2 (ASM 2006).

C	H	Fe	N	O	Ti
<0,10	<0,015	<0,30	<0,30	<0,25	bal.

O titânio graduação 2 é considerado um material comercialmente puro, conforme ASM (2006). Isso pode ser comprovado de acordo com a baixa concentração dos elementos de liga encontrados. Tal combinação confere ao material uma boa resistência à corrosão e uma resistência mecânica específica elevada quando comparada com outras ligas, a exemplo da AA2024. Estas características são desejáveis em estruturas de alto desempenho mecânico. As propriedades mecânicas, obtidas através de ensaios de acordo com a norma DIN 50125, do Ti-Gr2 são apresentadas juntamente com os valores de microdureza Vickers na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 Propriedades mecânicas do titânio (Ti-Gr2).

Tensão de Escoamento, $\sigma_e$ (MPa)	Tensão de Ruptura, $\sigma_r$ (MPa)	Módulo de Elasticidade, E (GPa)	Coefficiente de Poisson, $\nu$	Microdureza HV
275	344	105	0,37	145

#### 4.5. Equipamento de rebitagem por fricção

O equipamento de rebitagem por fricção utilizado pertence ao Helmholtz Zentrum Geesthacht (HZG) e está apresentado na Figura 4.3. Seu componente principal é um cabeçote de soldagem por fricção, RSM 400 (Harms & Wende GmbH & Co. KG, Hamburgo, Alemanha). O cabeçote é montado horizontalmente em um quadro de reação de alumínio, juntamente com os seus componentes periféricos, sendo seu acionamento pneumático e todo o

controle automatizado através de um sistema de interface humana (IHM). Os mesmos sensores utilizados para controle do cabeçote têm seus parâmetros gravados através de um sistema de aquisição de dados ligado a um computador.

Para a fixação do rebite no cabeçote, o equipamento possui uma garra pneumática automatizada. Por sua vez, a placa de compósito pode ser fixada de duas maneiras: por uma mesa de vácuo ou por um porta amostra mecânico atuado por nove parafusos. Ambas as formas de fixação da placa de compósito permitem a perfeita centragem da amostra em relação à garra pneumática. A mesa de reação pode ser deslocada horizontalmente em intervalos de 20 mm, facilitando o ajuste de avanço do cabeçote. Entre o porta amostra e a mesa de reação do equipamento é montado um sistema de medição de força ou torque, dependendo do objetivo do estudo.

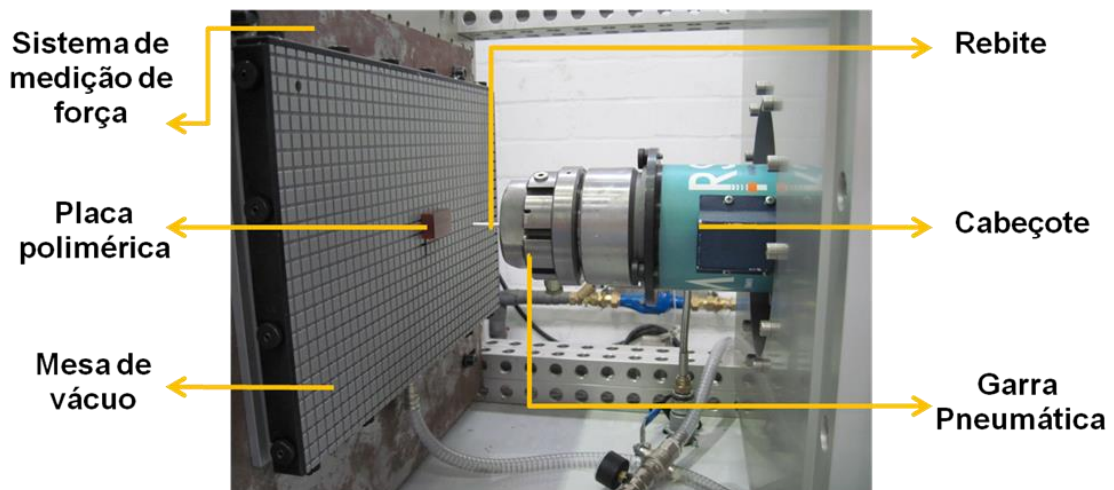


Figura 4.3 Máquina RSM 400, utilizada para a produção das juntas estudadas, configurada com a mesa de vácuo e sistema de medição de força (BORGES 2009).

#### 4.6. Procedimento de união

Antes do início do processo de união por fricção, foi realizada a limpeza dos materiais base (placas de GFR30-PEI e pinos de titânio) com acetona e em seguida com pano seco para a remoção de impurezas e desengraxe das superfícies. De posse dos materiais, tem início a fixação dos mesmos, sendo a placa de compósito fixa no porta amostra e o pino de

titânio (rebite) na garra pneumática. Após a fixação dos materiais, um avanço controlado do pino em direção a placa é realizado com o objetivo de certificar o posicionamento e alinhamento do conjunto. Feito isso, com a ajuda do software de monitoramento e entrada de dados RQ-Fuzzy, é feita a programação dos parâmetros de processo a serem utilizados. Só então é iniciado, pelo operador, o processo com o início da rotação do cabeçote até a rotação programada, ainda com o pino afastado da placa.

Quando atingida a rotação desejada, inicia-se o movimento axial do cabeçote em direção à placa de compósito, por sua vez a placa quando atingida marca o início do processo propriamente dito. O atrito entre as superfícies gera uma grande quantidade de calor de forma não uniforme devido às diferenças de velocidades angulares ao longo do raio do pino. O pino então começa a adentrar a matriz polimérica que devido ao aquecimento perde rigidez. Inicia-se a formação da junta. Ao passo que o rebite metálico é inserido, o material polimérico amolecido é removido em forma de rebarba. Por fim, atingido o tempo de aquecimento programado, a rotação cessa e a força de forjamento determinada é aplicada consolidando a junta. A garra pneumática é aberta, o cabeçote recua e a junta finalizada já pode ser removida do porta amostra. A temperatura aliada à força de forjamento posteriormente aplicada ajuda na formação de uma geometria triangular em forma de tronco de cone com diâmetro superior ao inicial, que aumenta a resistência mecânica da junta.

#### 4.7. Aquisição de dados

Todos os parâmetros de controle do processo foram coletados no software RQ-Fuzzy, acima citado, para posterior avaliação. Além destes, o torque e a força durante o processo foram monitorados através de uma mesa de torque (Figura 4.4) e um sistema de aquisição de dados. Tal sistema é composto por um computador, um condicionador de sinais especial para força e torque Kistler 5017B (Kistler Instrumenten AG, Alemanha) e o seu respectivo software Dynoware V.13 (Kistler Instrumenten AG, Alemanha). Estes dois últimos são importantes, pois possibilitam a posterior avaliação do processo a fim de garantir que não ocorreram erros de controle no equipamento.



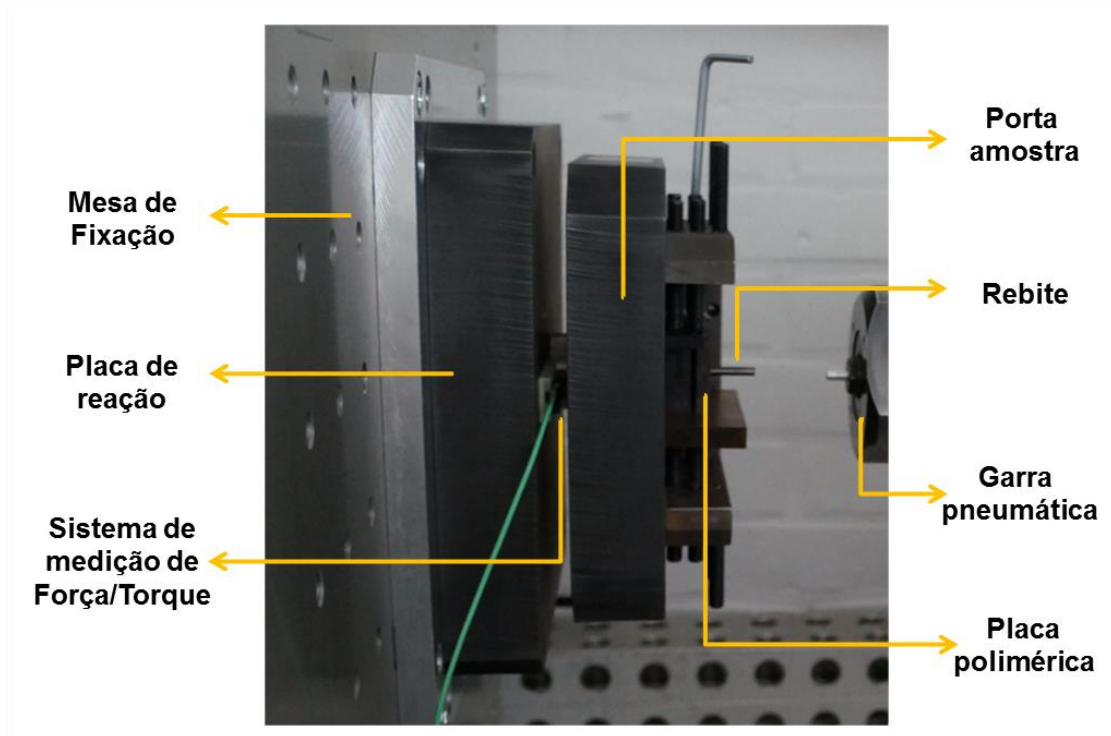


Figura 4.4 Detalhe do transdutor de torque (sistema de medição de força/torque) montado entre o porta amostra (fixação da placa de compósito) e a placa de reação.

#### 4.8. Termografias

Durante o processo de união por rebiteamento por fricção, um dos parâmetros mais importantes é o aporte térmico gerado durante a Etapa I do processo (ver Figura 3.12). Para monitorar a evolução da temperatura desde o primeiro contato entre o rebite de Ti e a matriz de compósito até a expulsão da rebarba foi utilizado o método de termografia por infravermelho. Para tanto foi utilizada uma câmera termográfica da marca Infratec modelo 8300 Highend Camera Series ImageIR (Infratech GmbH, Alemanha) conectada a um computador com o sistema de aquisição de dados e software IRBIS3 Professional (Infratech GmbH, Alemanha), como mostrado na Figura 4.5.

A câmera foi posicionada com ângulo de incidência de  $35^\circ$  e uma distância de trabalho de 415 mm entre o rebite e o ponto de primeiro contato na placa de compósito, vide Figura 4.6. A calibração foi realizada para a faixa de 100 a  $700^\circ\text{C}$  e a taxa de aquisição usada foi de 80 Hz.



Figura 4.5 Montagem da câmera termográfica e do rack do sistema de aquisição e processamento dos dados.

Para viabilizar a leitura, as luzes da sala foram apagadas e as janelas cobertas com placas. Ainda assim, para minimizar as reflexões o rebite e a placa (com exceção dos pontos de contato, vide Figura 4.7) foram pintados com uma tinta preta opaca especial para resistir a temperaturas de até  $1200^{\circ}\text{C}$ . A cor negra tem como objetivo aumentar a emissividade (propriedade física intrínseca do material que o permite emitir radiação, nesse caso infravermelha). O nível desejado é o de absorção quase total da luz (emissividade total de infravermelho tendendo a um, valor relativo às propriedades de “corpo negro”) reduzindo assim os erros de medição associado à refletividade da superfície dos materiais.

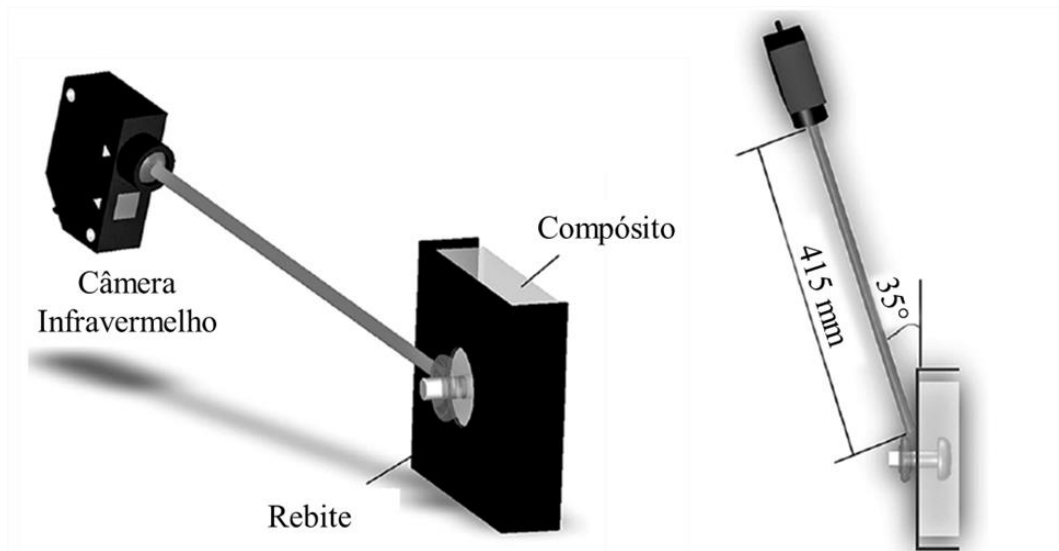


Figura 4.6 Representação esquemática da montagem do sistema de medição de temperatura e região medida.

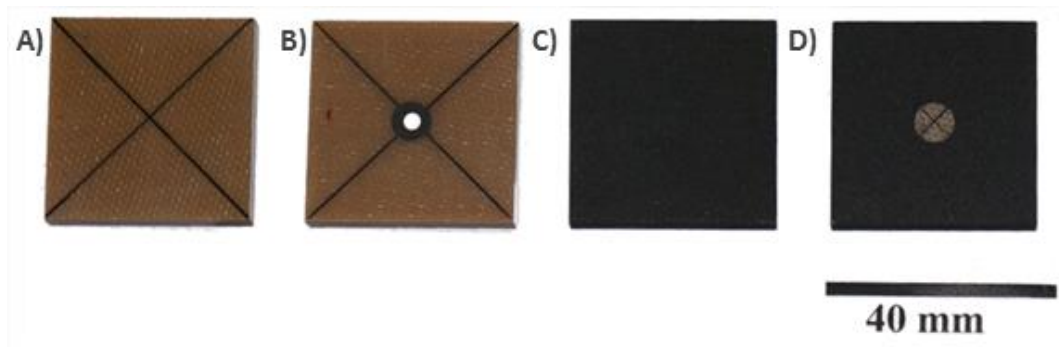


Figura 4.7 Sequência de preparação das amostras para termografia durante o processo de união. a) Marcação do centro; b) Proteção da área de contato; c) Pintura das amostras com tinta especial e d) Remoção da proteção e amostra finalizada.

#### 4.9. Juntas Híbridas

A máquina comercial de soldagem por atrito RSM 400 (Harms & Wende, Alemanha), que foi apresentada anteriormente, foi utilizada para produzir as juntas estudadas neste trabalho. Foram fabricadas juntas sobrepostas produzidas a partir de duas placas, uma de GRF30-PEI e outra de AA2198-T851, de acordo com a norma ASTM D5961, ambas com dimensões 190x36x6,2 mm sobrepostas em 36 mm, como mostrado na Figura 4.8. Como rebite foram utilizadas quatro geometrias: pinos lisos de 5 mm, pinos roscados M5, pinos lisos de 5mm vazados e pinos roscados M5 vazados com comprimento de 50 mm. O torque

aplicado nas porcas para a finalização da junta foi o mesmo sugerido por BLAGA (2011), que foi de 0,5 Nm para todas as amostras.

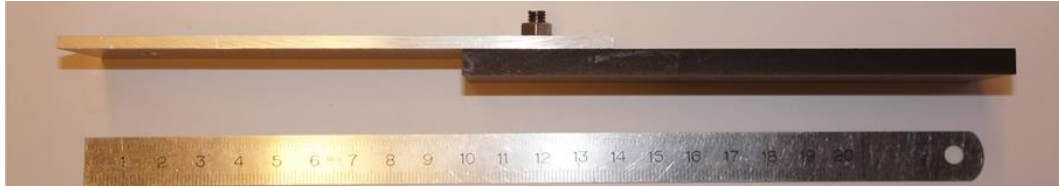


Figura 4.8 Junta híbrida de GFR-PEI/AA2198-T851 para ensaio de cisalhamento sob tração.

Além das juntas, foram fabricados corpos de prova de ancoragem para a determinação das melhores combinações de parâmetros. Tais amostras consistiam em rebites com as geometrias acima citadas inseridos, através do processo de rebiteagem por fricção, em placas de GRF30-PEI de 70x70 mm com espessura de 6,2 mm, apresentados na Figura 4.9.

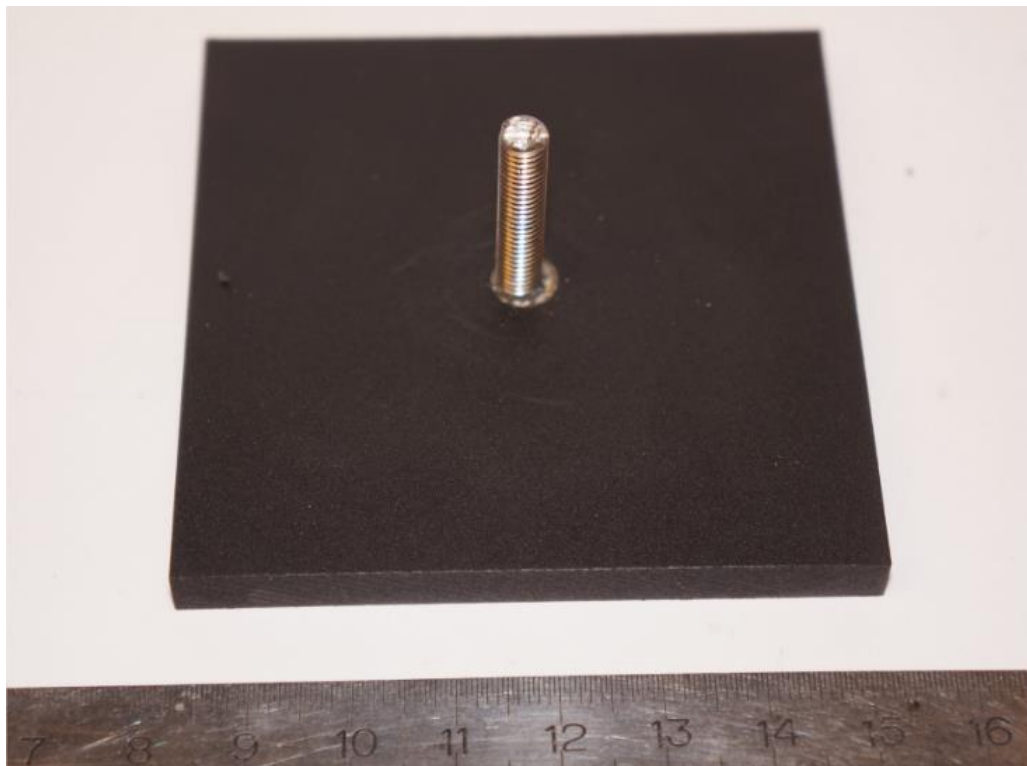


Figura 4.9 Junta para ensaio de tração e metalografia, usada para a validação da capacidade de ancoragem do rebite.

As propriedades mecânicas das diferentes regiões da junta são de difícil determinação devido às reduzidas dimensões das mesmas. Por este motivo foi utilizada uma relação percentual da resistência de cada região em relação ao material base correspondente. Estes foram definidos a partir dos resultados em testes de microdureza Vickers. A metodologia usada para relacionar estes valores, já foi aplicada por outros autores, como TABORD (1951) e MAZZAFERRO et al. (2008), durante estudos desta natureza e será explicada em detalhes nas seções subsequentes.

#### 4.10. Modelos de Elementos Finitos

Modelos 3D gerados no programa de CAD, SOLIDWORKS versão 2012 (Dassault Systèmes, França), foram exportados para o pacote CAE, ABAQUS 6.12-1 (Simulia - Dassault Systèmes, França), onde posteriormente foram aplicadas as condições de contorno, os carregamentos, as propriedades dos materiais e as condições de contato (pré-processamento). Uma vez definidos estes valores, o modelo foi calculado e, em seguida, realizado o pós-processamento para obtenção dos resultados definitivos.

As condições de contorno foram aplicadas de forma a reproduzir a fixação de um corpo de prova em garras mecânicas de uma máquina de ensaio de tração, uma vez que resultados de ensaios experimentais serão utilizados para ajustar e validar os modelos numéricos. Já os esforços foram aplicados na forma de deslocamentos prescritos e as propriedades das regiões da junta de acordo com os dados apresentados nas seções anteriores. Para todos os modelos foi utilizada simetria axissimétrica e elementos triangulares planos de 6 nós quadráticos modificados (CAX6M).

A máquina empregada foi uma estação de trabalho, Dell-Workstation, provida de dois processadores Intel XEON-5130 (resultando em 4x 2,0 GHz), 8 Gb de memória de acesso aleatório (RAM) rodando com sistema operacional 64 bits e placa gráfica 3D ATI de 1 Gb. A rotina de cálculo e pós-processamento para o modelo final com malha refinada foi de aproximadamente 2 minutos por modelo, utilizando a capacidade do software CAE de gerenciar a paralelização de múltiplos processadores (4x) e disponibilizando 90% da memória (RAM). Para fins de visualização todos os resultados serão mostrados com fator de deformação igual a 1, assim sendo está apresentada a configuração deformada real da estrutura.

#### 4.11. Modelos estruturais analíticos

Foram analisadas as principais propriedades geométricas da junta consolidada para o desenvolvimento de modelos analíticos simplificados. Estes foram construídos com base nos estudos de BLAGA (2012) e adaptados das teorias de adesão entre matriz e substrato em materiais compósitos. Tais modelos permitiram uma análise prévia da influência dos parâmetros do processo no desempenho mecânico final da junta consolidada.

#### 4.12. Planejamento de experimentos

Para a avaliação da influência dos parâmetros de processo na qualidade das juntas produzidas, foi utilizada a ferramenta estatística planejamento de experimentos (PDE). Com a avaliação dos parâmetros é obtido como saída a melhor combinação dos mesmos para se alcançar o desempenho mecânico máximo, dentro do intervalo de parâmetros testados. O modelo escolhido foi o de Taguchi-L4 ( $2^3$ ). Onde as combinações são testadas aos pares reduzindo assim o número de amostras.

Para a análise dos dados foi utilizado o software MINITAB v.14.0, que possui um módulo de planejamento de experimentos. A análise de variância (ANOVA) foi selecionada como método estatístico de avaliação do planejamento experimental. Neste método, os resultados médios de vários grupos de parâmetros e suas respectivas medidas de variância são comparados. As variâncias são então separadas em sistemáticas (oriundas dos efeitos do processo) e as não sistemáticas (desencadeadas por erros ou mau funcionamento dos equipamentos).

As combinações de entrada foram definidas pelo arranjo ortogonal do modelo de Taguchi; 5 réplicas das juntas para cada combinação de parâmetros foram produzidas, caracterizadas e modeladas numericamente. O resultado do modelo de elementos finitos foi utilizado como entrada para o planejamento de experimentos. Como saídas foram obtidos os parâmetros ótimos do intervalo testado. Para fins de segunda validação, juntas foram produzidas com esses parâmetros e subsequentemente numericamente modeladas. Ensaios mecânicos foram realizados e os valores comparados. Por fim, com a comparação se apresentando consistente, os parâmetros foram utilizados na avaliação do desempenho mecânico da junta.

#### 4.13. Caracterização metalográfica e avaliação das propriedades mecânicas locais via microdureza Vickers

Devido à necessidade de se caracterizar a geometria e propriedades metalúrgicas finais das juntas, foram realizadas caracterizações metalográficas. As amostras foram identificadas e cortadas em sua seção transversal a 2 mm do centro em relação ao seu plano médio, com uma máquina de corte Struers Axitom-5 (STRUERS 2012) sob resfriamento e com velocidade de rotação adequada para se evitar modificações na matriz polimérica e rebite. Após o corte, as amostras foram embutidas em uma resina epóxi termofixa transparente de cura a frio (Epoxicure, Buehler) (AMANCIO 2007a) a fim de evitar quaisquer danos a matriz polimérica e a interface, devido a degradação térmica.

As amostras embutidas passaram por uma preparação com sequência de lixamento P120, P400, P800 e P1200 (300 rpm, 8 lb/amostra e tempo de 1,5 min por granulação), seguido de posterior polimento com pastas de diamante de 9 (150 rpm, 8 lb, 3-5 min.), 3 micra (150 rpm, 5 lb, 3-5 min.) e por fim OPS (SiO<sub>2</sub>) de 0,5 micra (150 rpm, 5 lb, 2-3 min.). Todo o procedimento de preparação foi realizado em um máquina automática (Struers TegraPoll-15) e os ataques químicos de acordo com a metodologia proposta por PETZOW 1999. Todo o processo de lixamento e polimento foi executado de maneira a garantir a remoção dos 2 mm de sobre-material deixado no corte, a fim de se obter a seção transversal central da amostra polida para análise. Após a preparação, a secção transversal foi fotografada em estereoscópio (Olympus SZ-ST com lente SZ40 (40x) e câmera Olympus DP12) e analisada em microscópio ótico (LOM, LEICA DM-IRM com lente DFC295 com câmera acoplada). Micrografias foram fotografadas através do software Leica (*Leica Application Suite* v.3.8.0).

Por fim estas tiveram sua microdureza medida em três linhas horizontais e três verticais em um microdurômetro automático (INSTRON Tukon 2100B) com carga de 1000 g e tempo de endentação 10 s, e analisadas com o software WI (*Minuteman ELT* v.4.3, Wilson Instruments, Alemanha). O primeiro perfil horizontal inicia a 2 mm (L1) de distância da face superior do compósito, o segundo a 3 mm (L2) e o terceiro, a 4 mm (L3). Todos os três têm início no centro da amostra e avançam 5 mm em direção às faces laterais com 10 pontos cada (distância entre pontos 0,5 mm), conforme esquema apresentado na Figura 4.10.

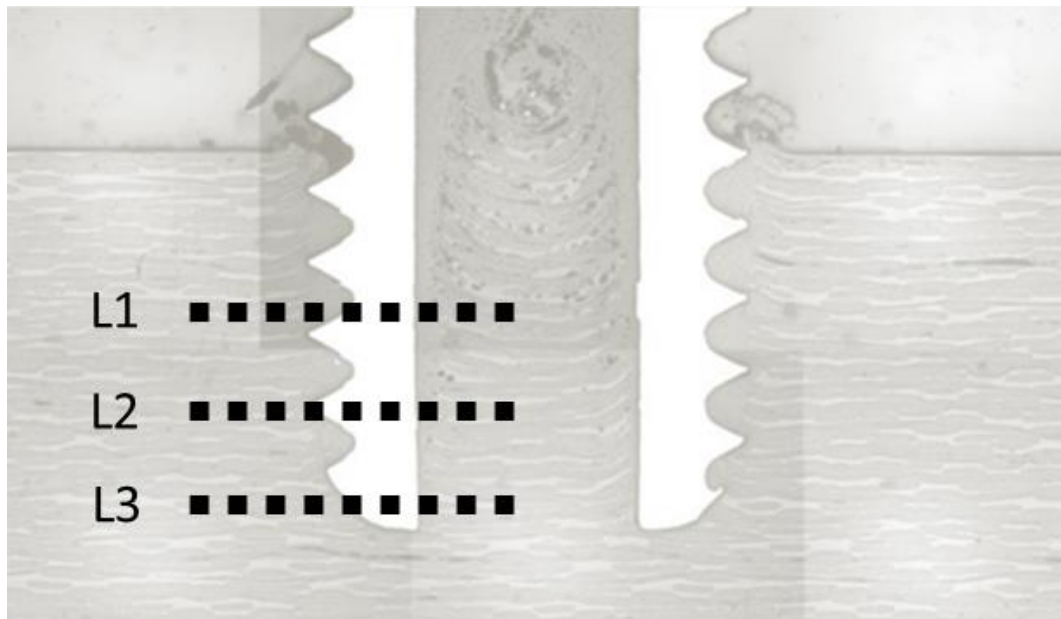


Figura 4.10 Posição esquemática das linhas de medição de microdureza Vickers realizadas nas amostras metalográficas.

#### 4.14. Ensaio de tração em juntas rebitadas

A avaliação da capacidade de ancoragem das juntas foi definida como critério de escolha dos melhores parâmetros de união. O método escolhido para essa avaliação foi o ensaio de tração em amostras do tipo ponto único (ou inserto metálico). As amostras foram fixadas pela placa de GFR30-PEI a placa fixa de uma máquina de tração Zwick-Roell 1484 (com capacidade de 200 kN). A fixação foi realizada através de um dispositivo especialmente desenhado para as amostras em questão. A metodologia de teste e a geometria da amostra foram adaptadas da norma VDI-2230 parte 1 enquanto o rebite foi fixado a uma garra mecânica do mesmo equipamento, conforme evidenciado na Figura 4.11.

O ensaio foi realizado com uma taxa de deslocamento de 2 mm/minuto e temperatura da sala a 21°C. Como critério de parada foi utilizado a falha completa da junta, ou seja, separação completa em duas partes.

Em estudo anterior BORGES (2009), definiu como critério de falha da junta sobrepostas ensaiadas em cisalhamento como sendo o momento em que a separação entre as placas supera o valor de 2 mm ou o momento em que o rebite é completamente cisalhado. Estes critérios foram adotados para a definição do modo de falha.



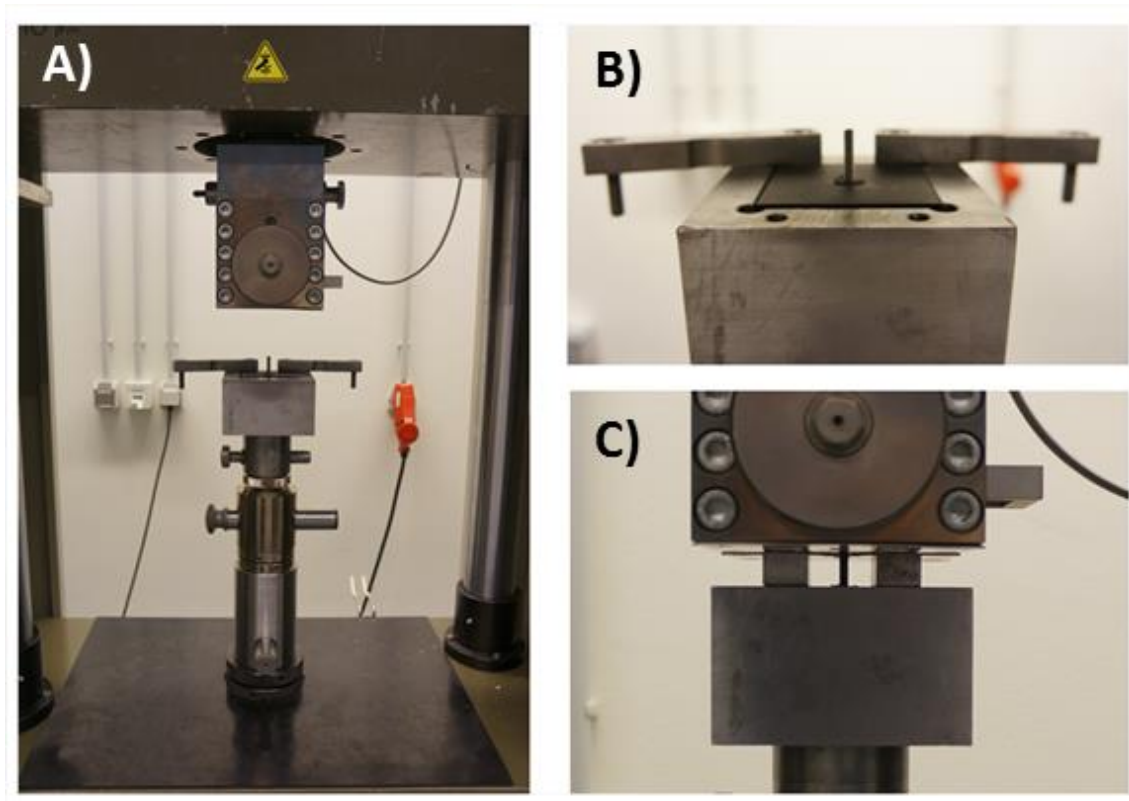


Figura 4.11 Máquina de tração Zwick-Roell montada para realização de ensaios de tração para avaliação da ancoragem. a) Visão geral; b) Porta amostra com corpo de prova de tração e c) Garra mecânica fixada ao rebite.

#### 4.15. Ensaio de cisalhamento sob tração em juntas sobrepostas

Para a determinação do desempenho mecânico da junta, ensaios de cisalhamento sob tração foram realizados em juntas sobrepostas mostradas na Figura 4.12. A resistência ao cisalhamento de juntas monorrebitadas (com as quatro geometrias de rebite, todas com de 5 mm diâmetro nominal) foi avaliada segundo a norma ASTM D5961, com uma taxa de deslocamento de 2 mm/minuto, temperatura ambiente de 21 °C, em uma máquina de tração Zwick-Roell 1484 (com capacidade de 200 kN). Para garantir que não houve esforços de torção em torno do eixo médio do rebite, o alinhamento das amostras foi verificado antes e depois dos ensaios.

A fixação das amostras na máquina foi realizada através da utilização de duas garras mecânicas, sendo uma fixa na placa de compósito e a outra na placa de alumínio. Estas garras possuem um sistema, próprio para ensaios em placas sobrepostas, que permite o deslocamento

do centro de fixação tanto para um lado quanto para o outro, possibilitando a linha de interface entre as duas placas ser posicionada no centro de carga da máquina.

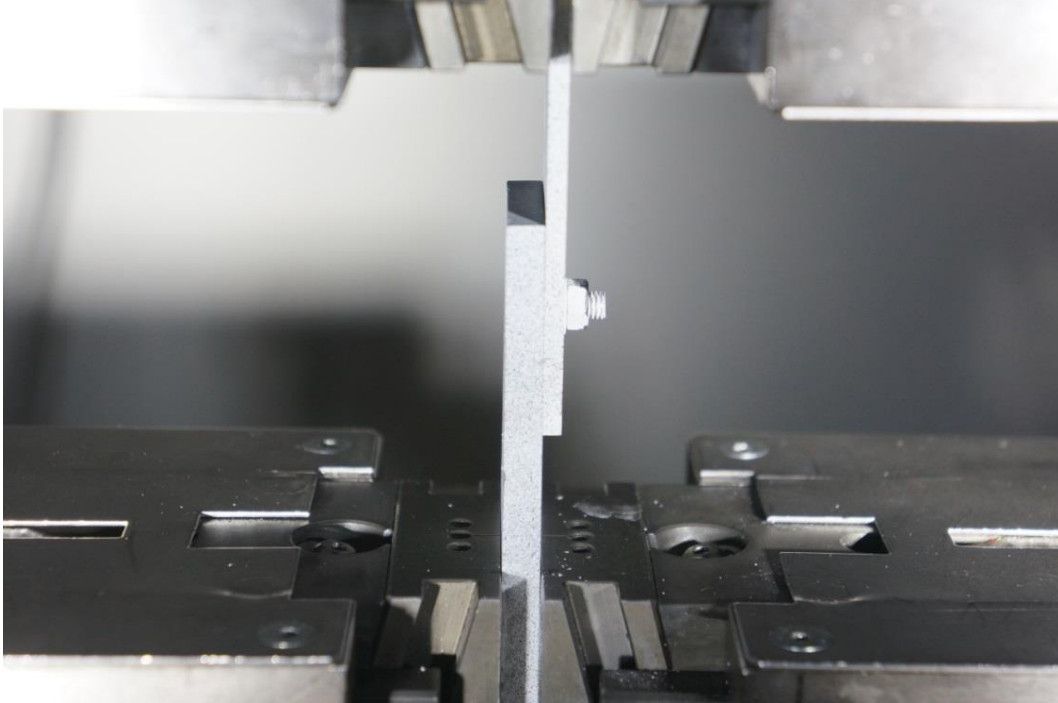


Figura 4.12 Máquina de ensaio Zwick-Roell, configurada com duas garras mecânicas para ensaios de cisalhamento. Amostra preparada (pintada) para a medição de deformação via sistema de correlação de imagem digital (ARAMIS), placa de compósito fixa na garra inferior e placa de alumínio fixa na garra superior.

Aliado ao sensor de deslocamento e a célula de carga da máquina de tração, um sistema de medição de deformação ótico via correlação de imagem digital, foi usado para complementar a análise dos ensaios e melhorar a calibração dos modelos de elementos finitos. Esse será descrito na seção seguinte.

#### 4.16. Sistema ótico de medição de deformação

O sistema ARAMIS®, Figura 4.13, é um sistema de medição ótico de deformação fornecido pela GOM (Gesellschaft fuer Optische Messtechnik, GmbH, Alemanha) é composto por duas câmeras de alta resolução, dois sistemas de iluminação LED, um servidor e um gatilho (“*trigger*”) externo. Seu princípio de funcionamento é baseado na medição de deslocamento através do mapeamento de pequenos pontos pretos pintados sobre um fundo

branco. Ambas as tintas são especiais para a função, seu aspecto é de um pó, o que permite a movimentação dos pontos quando a peça em análise é solicitada. Os canhões de LED auxiliam na iluminação evitando sombras e melhorando o desempenho das câmeras quando utilizadas com pequenos tempos de abertura. As câmeras posicionadas em ângulo permitem medições em 2D e 3D após uma calibração.

Durante o ensaio, o sistema inicia a captura de imagens. A taxa de atualização utilizada foi de 30 quadros por segundo. Após a finalização do ensaio, as imagens são pós-processadas gerando os espectros de deformação e deslocamento sobrepostos a cada imagem capturada. Tais dados podem ser cruzados com os resultados de deslocamento e carga monitorados no ensaio, gerando um conjunto completo de informações do teste mecânico.

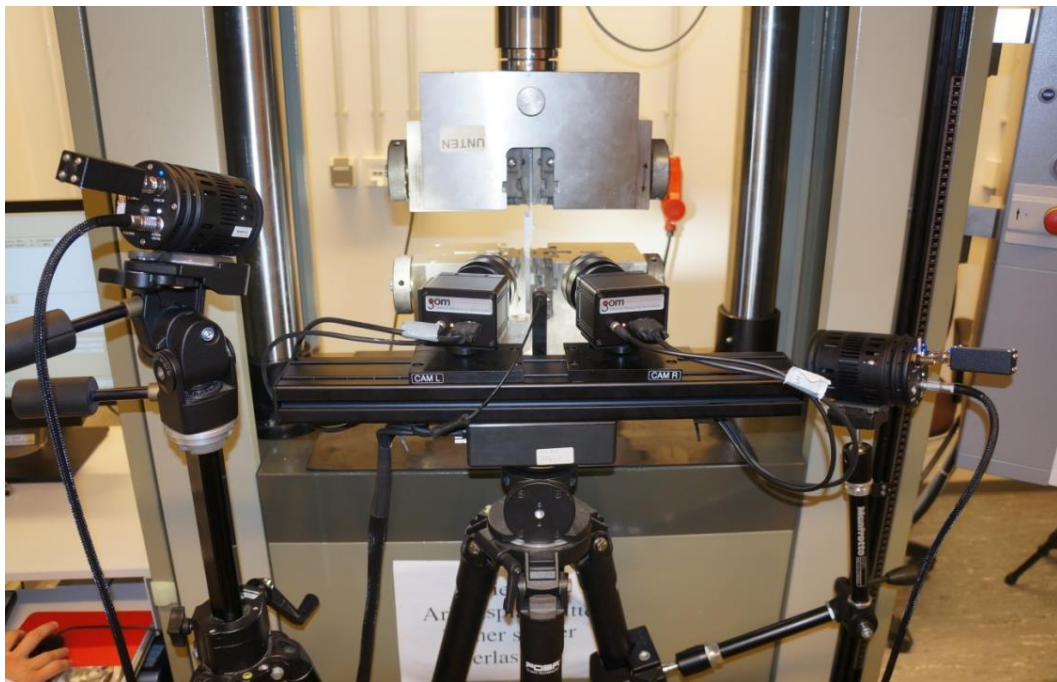


Figura 4.13 Sistema ARAMIS montado em sua configuração 3D, com duas câmeras e dois canhões LED para iluminação auxiliar.

#### 4.16.1. Calibração

Para a obtenção de resultados confiáveis a cada início de batelada de ensaios foi realizada a calibração do sistema. Tal procedimento consiste na medição ótica de um padrão de pontos conhecidos pelo sistema. Para realização da calibração a placa de padrão de

calibração, evidenciada na Figura 4.14, foi posicionada na mesma distância que a amostra, e rotacionada quatro vezes conforme procedimento de calibração fornecido pelo fabricante. Depois de calibrado, nenhum dos componentes do sistema pode ser movido. O posicionamento dos corpos de prova no porta-amostra da máquina de ensaios mecânicos foi realizado pela parte posterior da máquina, para evitar o deslocamento do sistema ótico calibrado.

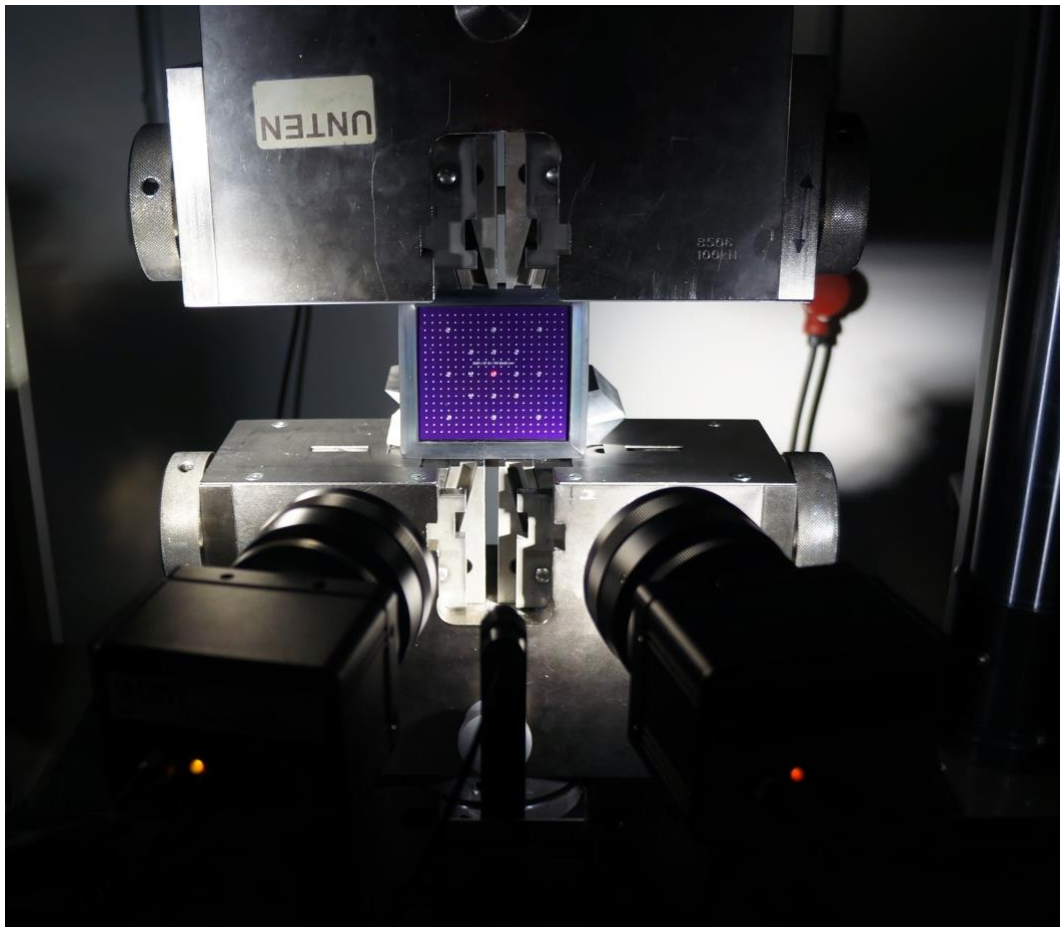


Figura 4.14 Detalhe da placa de calibração montada entre as duas garras mecânicas da máquina de tração Zwick-Roell.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Avaliação da composição química dos rebites

Para a verificação da especificação do titânio, a fim de viabilizar a comparação com os resultados obtidos por BLAGA (2011), foram realizadas análises químicas do material em um espectrômetro de massa. Os resultados são apresentados na Tabela 5.1. O relatório completo é apresentado no APÊNDICE A.

Tabela 5.1 Composição química medida do titânio Ti-Gr2 (APÊNDICE A).

<b>Queima</b>	<b>C (%)</b>	<b>H (%)</b>	<b>Fe (%)</b>	<b>N (%)</b>	<b>O (%)</b>	<b>Ti (%)</b>
<b>1</b>	0,013	<0,015	<0,010	<0,0050	0,108	99,79
<b>2</b>	0,014	<0,015	<0,010	0,016	0,126	99,75
<b>3</b>	0,022	<0,015	0,025	0,016	0,160	99,69
<b>Média</b>	0,016	<0,015	0,015	0,012	0,131	99,74

Comparando a média dos resultados acima com valores nominais presentes na Tabela 4.6 é possível afirmar que o material utilizado está de acordo com o especificado.

### 5.2. Produção das amostras de referência

BLAGA (2011) constatou em seu estudo que para rebites sólidos de Ti-Gr2 com rosca externa M5, os parâmetros que resultaram na melhor ancoragem em placas de GRF-PEI foram: VR de 12000 rpm; TU de 3200 ms (TF de 700 ms; TFo de 2500 ms), PF de 6 bar e PFo de 7 bar. Evidenciou ainda, que para a PFo abaixo de 6 bar não era formada zona de ancoragem devido a baixa inserção do rebite na matriz, e que acima de 9 bar as amostras

produzidas apresentavam degradação da matriz do compósito e em extremos 10 bar flambagem do rebite.

Para avaliar o desempenho das novas geometrias propostas foram preparadas amostras de referência com os parâmetros sugeridos por BLAGA (2011). Ao todo foram preparadas 11 amostras por geometria de referência (sólido e sólido roscado M5) sendo; três amostras para corte e caracterização metalográfica, quatro amostras para ensaios de tração e quatro amostras para ensaio de cisalhamento. A Figura 5.1 apresenta as seções transversais das amostras produzidas para servir de referência. As amostras de tração e cisalhamento foram ensaiadas e seus resultados serão apresentados nas seções subseqüentes sempre como referência.

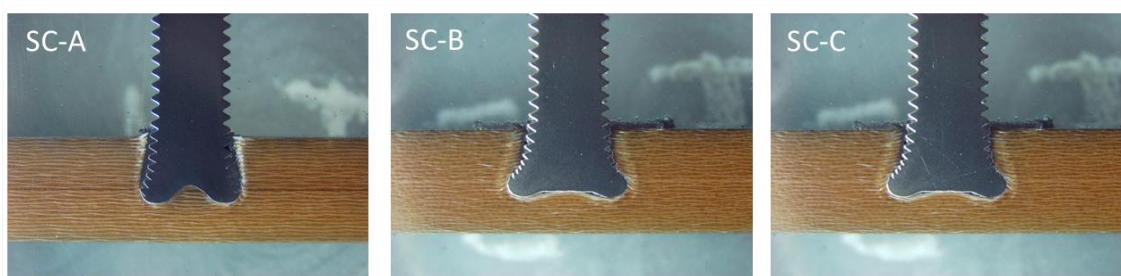


Figura 5.1 Seção transversal das três amostras produzidas com os parâmetros de união sugeridos por BLAGA (2011) para a configuração de sólido roscado M5.

### 5.3. Pré-análise de parâmetros de união para a fabricação das amostras com as novas geometrias de rebites propostas e seleção da melhor geometria para análise quantitativa

Seguindo a metodologia proposta, foram realizadas avaliações qualitativas de parâmetros, a fim de definir os limites superiores e inferiores que foram posteriormente utilizados na construção da matriz para o PdE Taguchi L4 ( $2^3$ ). Esta análise foi iniciada com a produção de quatro amostras, uma de cada geometria, com os mesmos parâmetros utilizados para produzir as amostras de referência (Seção 5.2). Em seguida, baseado na observação da variação de área (calculadas para juntas parafusadas usando a metodologia proposta por SHIGLEY (2005)) entre as quatro seções transversais, ilustradas na Figura 5.2, os parâmetros do processo foram reduzidos proporcionalmente. Assume-se que a remoção de material no caso dos rebites com geometria vazada venha a aumentar a geração de calor, por esta redução da área elevar a pressão de contato. Com isso o aporte térmico tem que ser ajustado para não ocorrer um superaquecimento da junta, o que acarretaria a formação de juntas defeituosas.

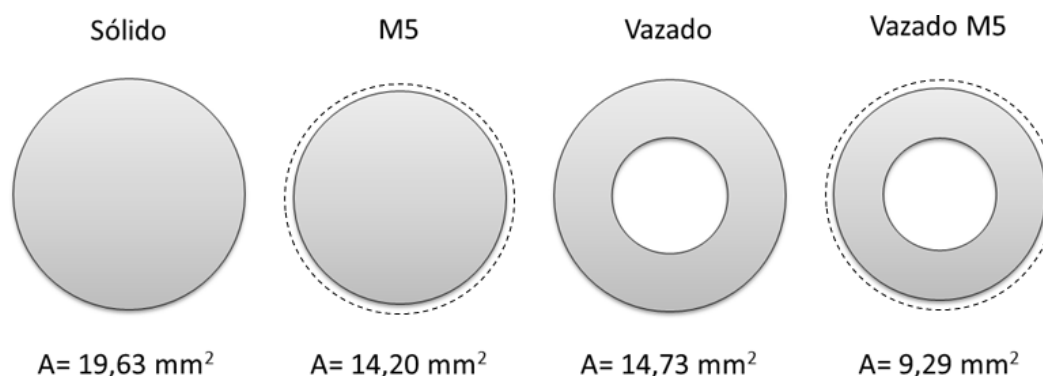


Figura 5.2 Comparação esquemática da área da seção transversal das quatro geometrias de rebite propostas calculadas de acordo com SHIGLEY (2005) para seções transversais de juntas parafusadas.

Devido à área da seção transversal do rebite com a configuração sólido M5 ser muito próxima à do vazado para fins de análise estes foram considerados iguais, gerando apenas dois fatores de depreciação de aporte térmico baseados na parametrização das áreas, um de 0,7 (FD1) para as juntas M5 e vazado e um de 0,5 (FD2) para as juntas com rebite vazado M5. Para a análise qualitativa, baseado nos fatores FD1 e FD2, foram geradas amostras com os parâmetros apresentados na Tabela 5.2 e Figura 5.3.

Tabela 5.2 Parâmetros usados na pré-análise baseadas no fatores de depreciação da área da seção transversal.

Amostra	Velocidade de rotação (VR) (rpm)	Tempo de fricção (TF) (ms)	Tempo de forjamento (TFo) (ms)	Pressão de fricção (PF) (bar)	Pressão de forjamento (PFo) (bar)
A01 - Sólido Liso	10000	1200	1850	6	7
A02 - Sólido M5	10000	1200	1850	6	7
A03 - Sólido M5	12000	700	2500	6	7
A04 - Vazado Liso	12000	700	2500	6	7
A05 - Vazado M5	12000	700	2500	6	7
A06 - Sólido Liso	6000	350	1250	3	3,5
A07 - Vazado Liso	6000	350	1250	3	3,5
A08 - Vazado M5	6000	350	1250	3	3,5
A09 - Vazado M5	6000	500	1800	3	4,5
A10 - Sólido Liso	12000	700	2500	6	7
A11 - Sólido Liso	12000	700	2500	6	7
A12 - Vazado M5	8000	500	1800	3	4,5

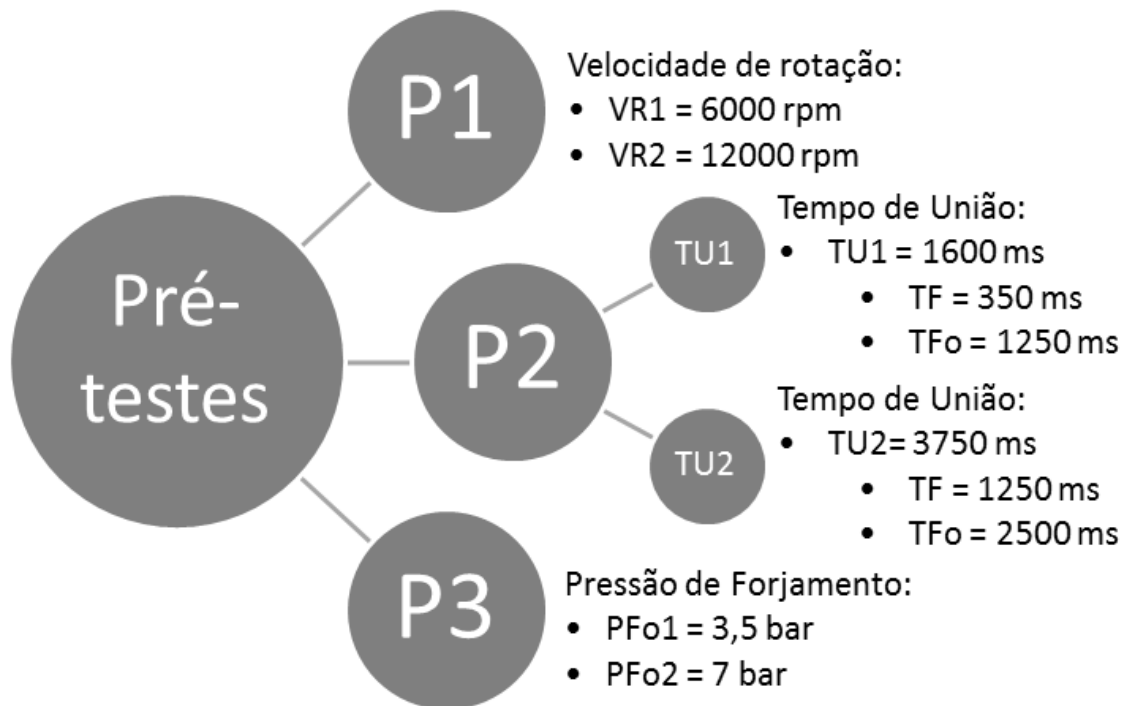


Figura 5.3 Intervalo de parâmetros de união escolhidos para os pré-testes de parâmetros.

Durante as avaliações qualitativas, quatro fatores foram observados e a cada um deles foi atribuída uma nota. Para um resultado bom foi atribuída a nota 3, para um resultado razoável a nota 2 e para ruim a nota 1. Estes fatores foram:

- Profundidade de inserção na matriz (Q1): referente ao nível de inserção do rebite no compósito;
- Formação zona de ancoragem (Q2): referente ao aspecto geométrico da zona de ancoragem;
- Degradação da matriz (Q3): a respeito do volume da área degradada e do grau de degradação;
- Formação de rebarba (Q4): referente ao volume de material expulso durante o processo.



A Figura 5.4 apresenta as macrografias das seções transversais produzidas para as amostras da Tabela 5.2 para a análise qualitativa de qualidade das juntas produzidas.

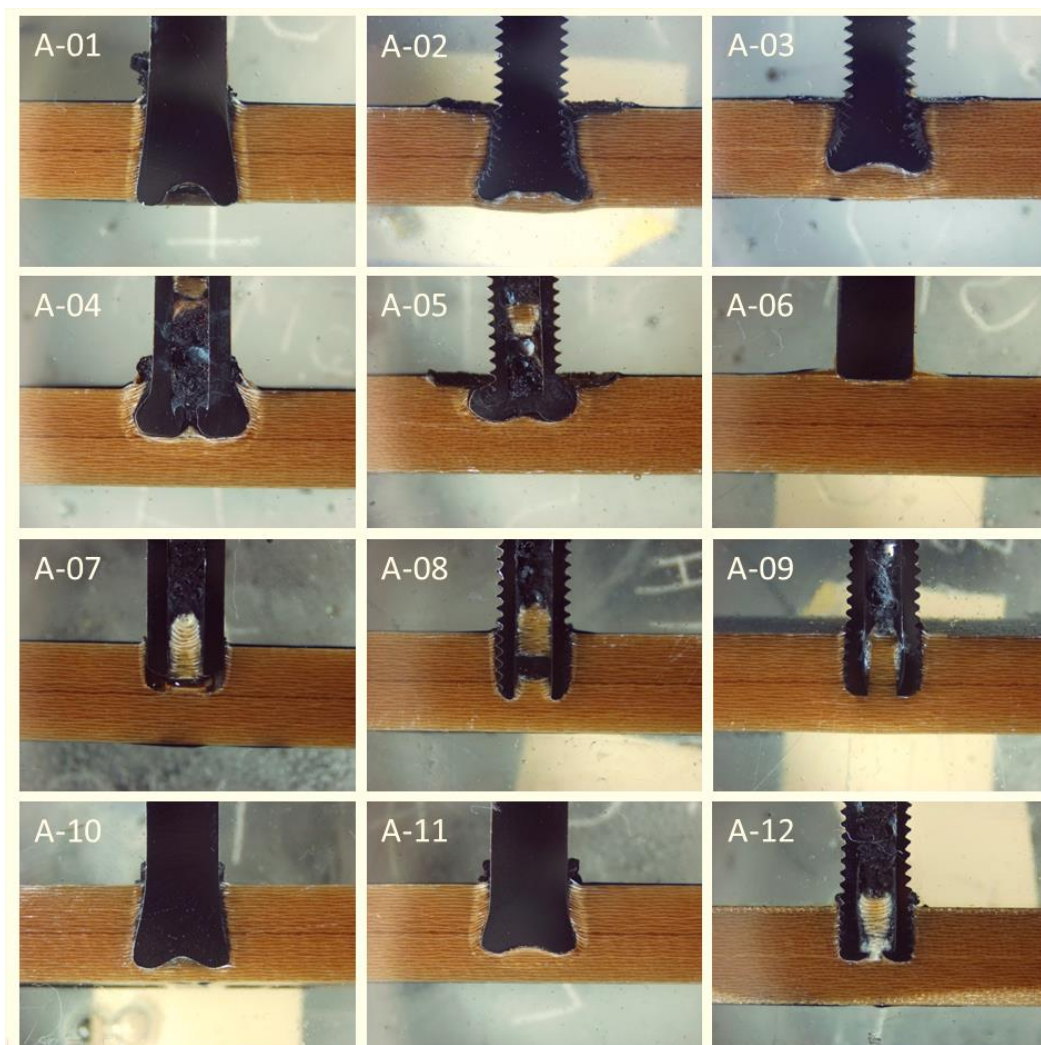


Figura 5.4 Seção transversal das amostras da Tabela 5.2 para análise qualitativa dos parâmetros a serem utilizados no PdE.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados da análise qualitativa, onde no fator Q1 (profundidade de inserção na matriz), somente os rebites sólidos A01, A02 e A06 apresentaram baixo desempenho. Sendo que os rebites lisos são justificados pelo fato de necessitarem de alto aporte térmico para ter penetração adequada e de não possuírem rosca para ajudar na retirada de material da matriz. Já no quesito Q2 (formação zona de ancoragem), as amostras que não se apresentaram satisfatórias foram as A05, A06 e A07, sendo a primeira

causada pela VR muito elevada (excesso de energia) e as duas últimas pela VR muito baixa (falta de energia).

Tabela 5.3 Quadro de resultados da análise qualitativa.

	Inserção (Q1)	Ancoragem (Q2)	Matriz (Q3)	Rebarba (Q4)	Soma
<b>A01 - Sólido Liso</b>	1 (ruim)	2 (bom)	2 (bom)	1 (ruim)	6
<b>A02 - Sólido M5</b>	1 (ruim)	3 (ótimo)	1 (ruim)	1 (ruim)	6
<b>A03 - Sólido M5</b>	3 (ótimo)	3 (ótimo)	1 (ruim)	1 (ruim)	8
<b>A04 - Vazado Liso</b>	2 (bom)	2 (bom)	1 (ruim)	2 (bom)	7
<b>A05 - Vazado M5</b>	2 (bom)	1 (ruim)	1 (ruim)	3(ótimo)	7
<b>A06 - Sólido Liso</b>	1 (ruim)	1 (ruim)	2 (bom)	1 (ruim)	5
<b>A07 - Vazado Liso</b>	2 (bom)	1 (ruim)	2 (bom)	2 (bom)	7
<b>A08 - Vazado M5</b>	3 (ótimo)	3 (ótimo)	3 (ótimo)	3 (ótimo)	12
<b>A09 - Vazado M5</b>	3 (ótimo)	2 (bom)	3 (ótimo)	3(ótimo)	11
<b>A10 - Sólido Liso</b>	3 (ótimo)	2 (bom)	3 (ótimo)	1 (ruim)	9
<b>A11 - Sólido Liso</b>	3 (ótimo)	2 (bom)	3 (ótimo)	1 (ruim)	9
<b>A12 - Vazado M5</b>	3 (ótimo)	2(bom)	3 (ótimo)	3 (ótimo)	11

\*onde Q1 - Profundidade de inserção na matriz, Q2 - Formação zona de ancoragem, Q3 - Degradação da matriz e Q4 - Formação de rebarba.

Ainda sobre o quesito Q2 (formação da zona de ancoragem), ficou evidente que a VR de 12000 rpm foi excessiva e prejudicou o resultado geral da amostra A05, tanto nesse, quanto no quesito Q3 (degradação da matriz). A principal evidência que leva a essa conclusão é a formação da zona de ancoragem antes da inserção do pino na matriz (ver Figura 5.3).

No quesito Q3 (degradação da matriz), ficaram com nota mínima as amostras A2, A3, A4 e A5, onde em geral a degradação da matriz de compósito pode ser relacionada a um aporte térmico muito alto. No último quesito, Q4 (formação de rebarba), todas as amostras produzidas com rebites sólidos apresentam piores notas. Tal fato comprova o resultado pretendido de redução da formação de rebarba com o uso de rebites vazados. Esse fenômeno é justificável devido ao material expelido com a entrada do rebite sólido ser obrigatoriamente expulso pelo lado externo do rebite. Já nos rebites vazados, a maior parte ou toda a rebarba flui para o interior do rebite, não necessitando ser removida e ainda ajudando na distribuição de carga quando a junta é submetida a carregamentos cisalhantes. Os mecanismos de formação da rebarba são apresentados na Figura 5.5. Na avaliação geral, quando avaliada a

soma das notas individuais dos quatro quesitos, os melhores resultados foram obtidos com rebites vazados M5.

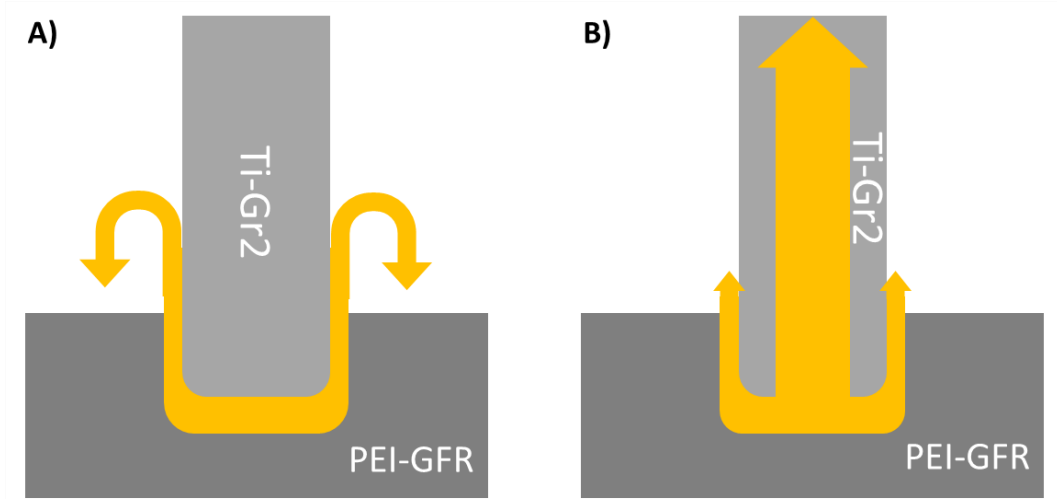


Figura 5.5 Mecanismo de formação da rebarba nas duas classes de rebites, (A) sólido e (B) vazado.

Das quatro geometrias de rebite estudadas para serem aplicadas pelo processo de rebiteamento por fricção, as duas com superfície exterior lisa foram descartadas nas análises qualitativas, devido a sua baixa capacidade de ancoragem quando comparadas com as com rosca externa M5. Com base nesses resultados, a geometria vazada com rosca externa, que obteve nota somatória total dos quatro quesitos entre 11 e 12, foi selecionada para o estudo de quantitativo dos melhores parâmetros de processo.

#### 5.4. Planejamento de experimentos (PdE) numérico

Com base nos resultados da análise qualitativa foram definidos os intervalos de parâmetros a serem usados para a montagem do modelo estatístico. A primeira variável selecionada (P1 – parâmetro 1) foi a velocidade de rotação (VR), seu intervalo foi definido entre 6000 e 8000 rpm, pois os resultados acima deste intervalo apresentaram baixo desempenho nos quesitos formação zona de ancoragem (Q2) e degradação da matriz (Q3) na análise qualitativa. A segunda variável de estudo selecionada (P2 – parâmetro 2) foi o tempo de união (TU), que segundo apresentado por AMANCIO (2007a) é a soma dos tempos de fricção (TF) e forjamento (TFo), com o intervalo de estudo escolhido de 1600 a 2300 ms,

baseado nos resultados obtidos por BLAGA (2011). A terceira e última variável de estudo (P3 – parâmetro 3) foi a pressão de forjamento (PFo), que foi variada entre 3,5 bar (0,35 MPa) e 4 bar (0,4 MPa). A pressão de fricção (PF) não foi variada, tendo em vista que em seu estudo, BLAGA (2011) não verificou bons resultados com a alteração deste parâmetro.

Dentre os possíveis modelos de experimentos propostos por TAGUCHI (1991), foi escolhido o PdE L4 ( $2^3$ ) que compreende dois níveis, um máximo (2) e um mínimo (1), para três parâmetros (P1, P2 e P3). A Figura 5.6 explicita a construção do modelo e os intervalos escolhidos.

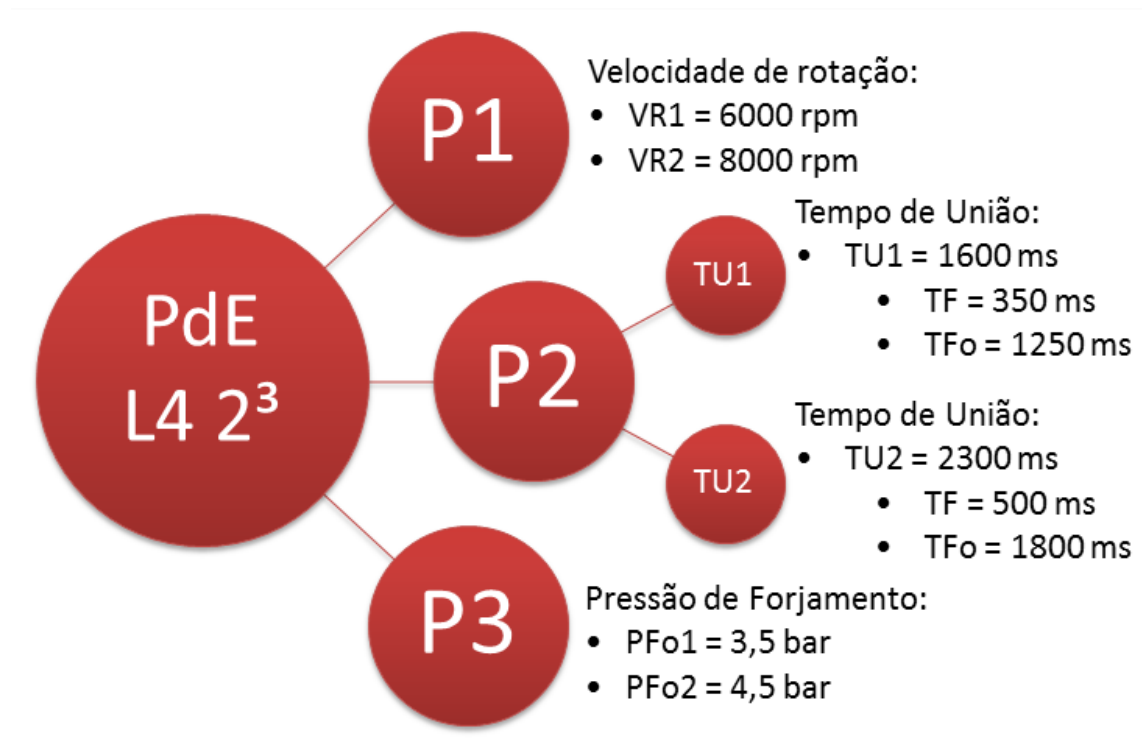


Figura 5.6 Intervalo de parâmetros de união escolhidos para o planejamento de experimentos de Taguchi L4 ( $2^3$ ).

Com o modelo definido, o software MINITAB v.14.0 foi utilizado para a montagem da combinação de parâmetros, dentro dos intervalos acima definidos, a serem utilizadas nos quatro experimentos (E1-E4) propostos. A Tabela 5.4 apresenta a combinação de parâmetros com base nos quais foram produzidas as amostras para os experimentos 1 a 4.

Tabela 5.4 Combinações da parâmetros para o DOE segundo a matriz ortogonal para o modelo de Taguchi.

	Parâmetro 1 (P1) Velocidade de rotação (VR) (rpm)	Parâmetro 2 (P2) Tempo de união (TU) (ms)	Parâmetro 3 (P3) Pressão de forj. (PFo) (bar)
<b>Experimento 1 (E1)</b>	6000 (1)	1600 (1)	3,5 (1)
<b>Experimento 2 (E2)</b>	6000 (1)	2300 (2)	4,5 (2)
<b>Experimento 3 (E3)</b>	8000 (2)	1600 (1)	4,5 (2)
<b>Experimento 4 (E4)</b>	8000 (2)	2300 (2)	3,5 (1)

### 5.5. Histórico térmico das juntas rebitadas

As medidas de temperatura obtidas por termometria infravermelha foram realizadas na rebarba expelida, vide esquema exemplificando o alvo da medição termográfica na Figura 5.7. Estas apresentam como resultado o mapa de temperaturas no momento onde a temperatura máxima no processo foi medida, os resultados são apresentados na Figura 5.8. Os resultados de cada réplica mais suas médias e desvios padrão estão compilados na Tabela 5.5.

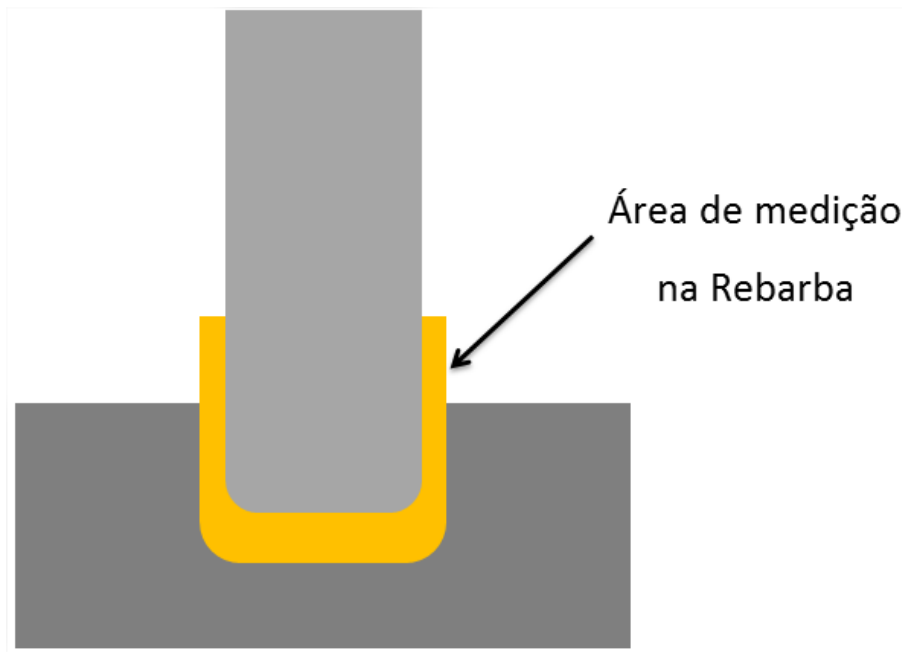


Figura 5.7 Esquema da posição onde foram medidas as temperaturas máximas de processo.

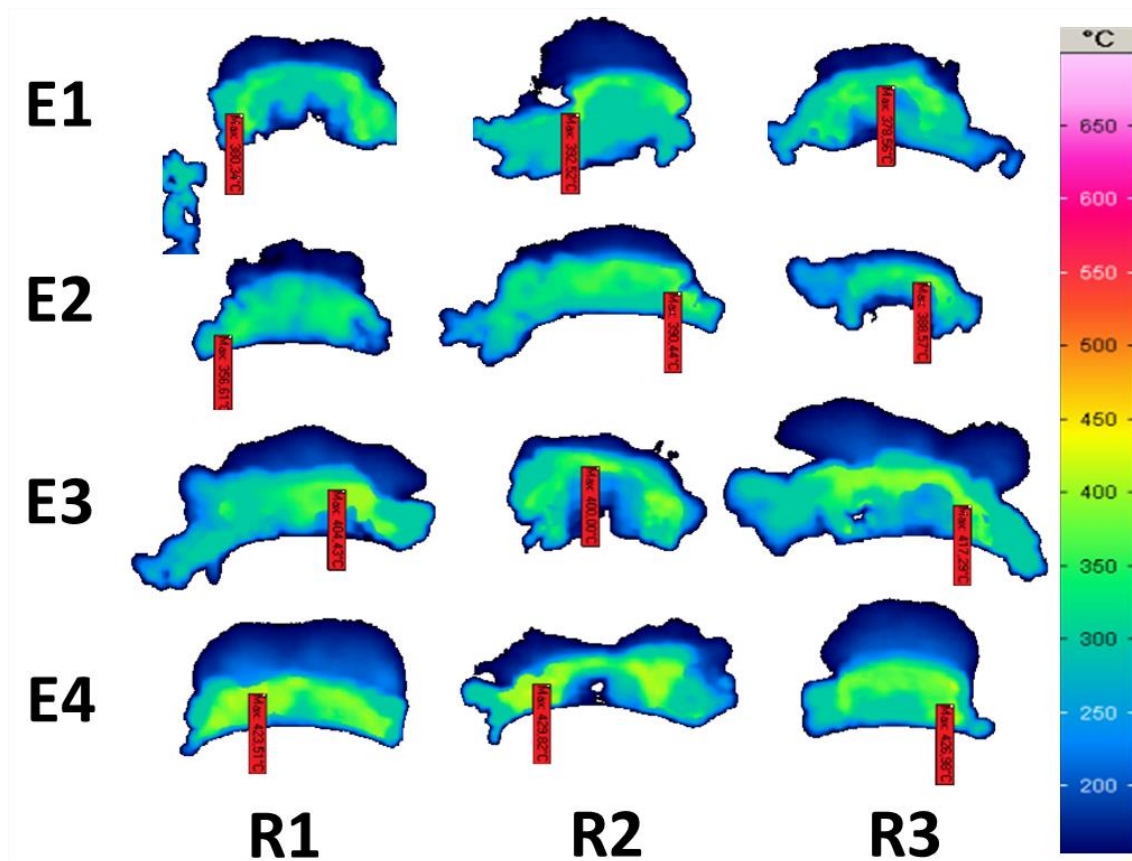


Figura 5.8 Mapa de termografias das amostras do PdE Taguchi L4 ( $2^3$ ), onde E(x) representam os experimentos e R(x) as repetições.

Tabela 5.5 Temperatura máxima de processo para as amostras do PdE Taguchi L4 ( $2^3$ ), medidas na rebarba expelida.

Amostra	Temperatura máxima de processo (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)
DOE_E1_01	330,34		
DOE_E1_02	392,52	367,14	32,63
DOE_E1_03	378,56		
DOE_E2_01	356,61		
DOE_E2_02	390,64	378,61	19,08
DOE_E2_03	388,57		
DOE_E3_01	404,43		
DOE_E3_02	400,01	407,24	8,98
DOE_E3_03	417,29		
DOE_E4_01	423,51		
DOE_E4_02	429,82	426,77	3,16
DOE_E4_03	426,98		

A partir das termografias e dos resultados da Tabela 5.5 fica claro que o aporte térmico foi menor nos experimentos E1, com temperatura máxima média de  $367,14 \pm 32,23$  °C, aumentando aproximadamente 5% nas repetições dos experimentos E2 (temperatura máxima média de  $378,61 \pm 19,08$  °C. Isso pode ser explicado pelo fato da condição E2 usar maior tempo de união (TU) em relação ao E1. Quanto à comparação dos experimentos E2 e E3, este último que apresentou temperatura máxima média de  $407,24 \pm 8,98$  °C, o aumento se manteve em 5%. Sendo assim, neste caso o aumento do calor gerado deve-se ao fato do experimento E3 utilizar uma velocidade de rotação (VR) maior em relação ao E2. Por fim, os maiores aportes foram registrados nas condições E4 (temperatura média máxima de  $426,77 \pm 3,16$  °C). Com isso confirmando a relação de aumento de aproximadamente 5% entre os experimentos do PdE Taguchi L4 ( $2^3$ ) e ainda que a velocidade de rotação (VR) e o tempo de união (TU) são diretamente proporcionais ao calor gerado (maior aporte térmico no processo).

#### 5.6. Microestrutura e propriedades geométricas da zona de ancoragem

Para cada experimento foram produzidas quatro amostras a fim de se obter uma amostragem suficiente. Das quatro amostras, três foram caracterizadas e uma preservada como testemunha. As amostras foram cortadas e sua seção transversal, fotografadas e medidas no microscópio ótico. As medidas principais; altura de ancoragem (H), raio de ancoragem (R) e número de fios de rosca inseridos na matriz (n), estão esquematicamente apresentadas na Figura 5.9 sobre a macrografia da amostra E1-01. Além das medidas principais ainda foram registrados o raio da zona termomecanicamente afetada do polímero (Rmm) e altura mínima do rebite inserido (h).

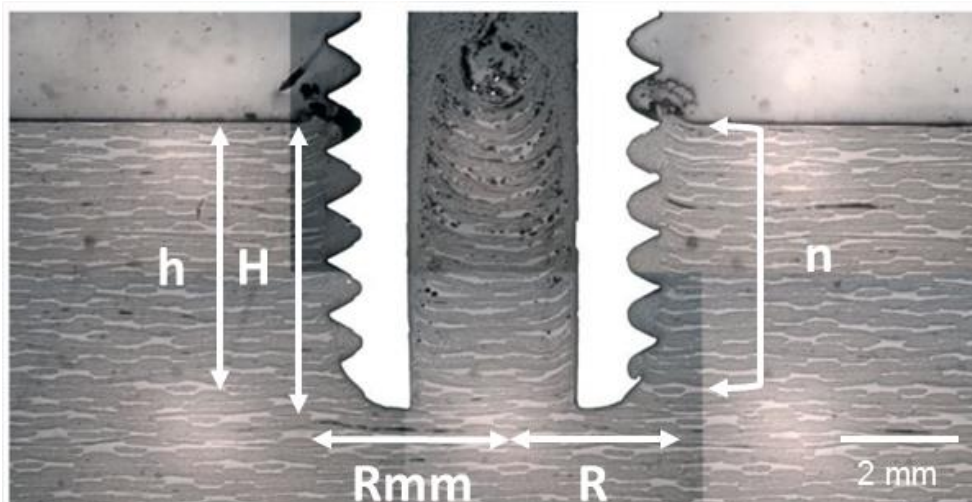


Figura 5.9 Macrografia do experimento E1 amostra 01 (E1-01) exemplificando as medidas realizadas em cada amostra.

Os resultados das macrografias estão apresentados em forma de quadro comparativo na Figura 5.10 e os resultados dimensionais são apresentados na Tabela 5.6. Tais macrografias apresentam, além da geometria da seção transversal da zona de ancoragem (ZA), o grau de inserção do rebite no material compósito. Podendo ser observado um aumento gradual de inserção, sendo o menor nos experimentos 1 (E1) e maior nos experimentos 4 (E4).

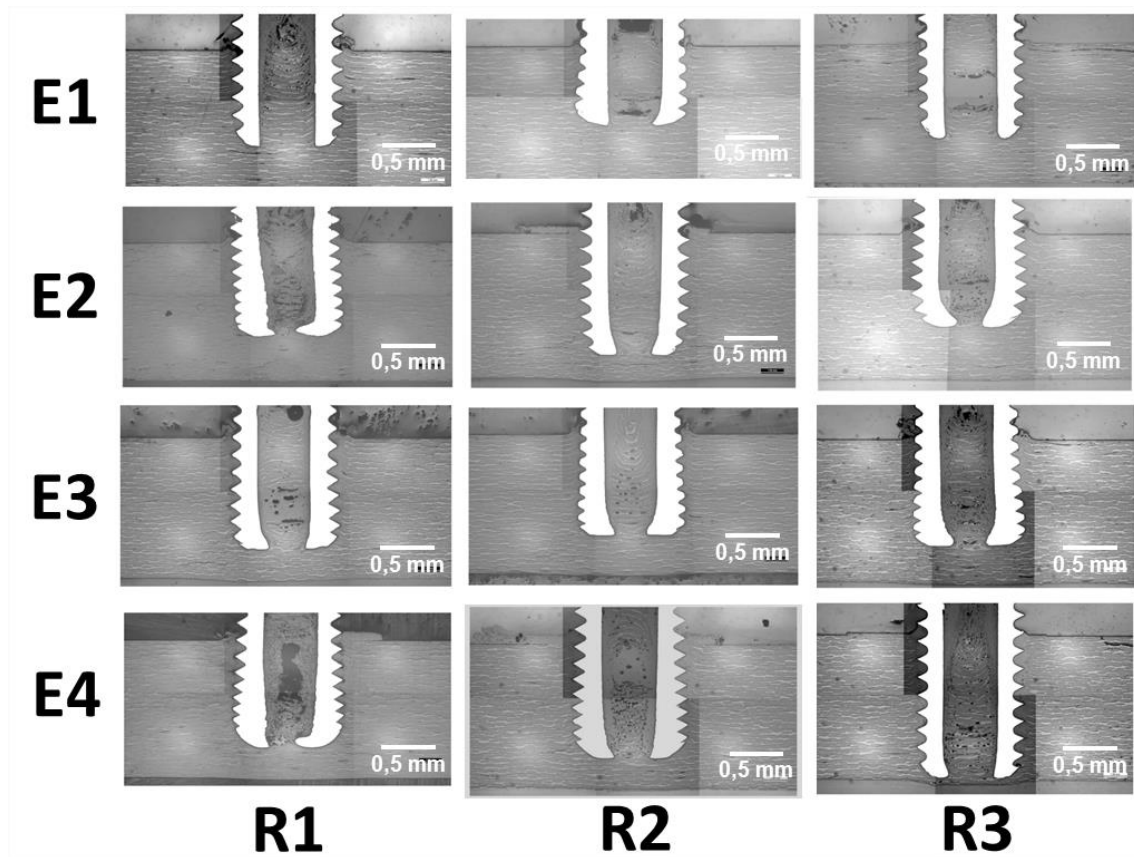


Figura 5.10 Quadro de macrografias do PdE Taguchi L4 ( $2^3$ ), onde E(x) representam os experimentos e R(x) as repetições.



Tabela 5.6 Resultados dimensionais da zona de ancoragem (ZA) das amostras apresentadas na Figura 5.10.

Amostra	R (mm)	Rmm (mm)	H (mm)	h (mm)	n
PdE_E1_01	2,45	2,52	4,15	-	5,0
PdE_E1_02	2,31	2,39	3,49	3,12	4,2
PdE_E1_03	2,27	2,37	3,53	3,32	4,5
PdE_E2_01	2,33	2,49	2,39	2,21	3,5
PdE_E2_02	2,48	2,72	5,46	5,32	7,0
PdE_E2_03	2,62	2,77	4,06	3,84	6,0
PdE_E3_01	2,5	2,67	4,92	4,67	6,5
PdE_E3_02	2,49	2,65	4,54	4,32	7,0
PdE_E3_03	2,58	2,74	4,62	4,39	7,0
PdE_E4_01	2,4	2,55	4,9	4,63	7,0
PdE_E4_02	2,53	2,65	4,98	4,76	7,0
PdE_E4_03	2,31	2,47	6,16	5,76	7,5

#### 5.6.1. Propriedades locais mecânicas dos materiais: análise de microdureza Vickers

Para a determinação das propriedades mecânicas a serem usadas como dados de entrada nos modelos numéricos foram realizadas medidas localizadas de microdureza. A Figura 5.11 apresenta os pontos medidos.

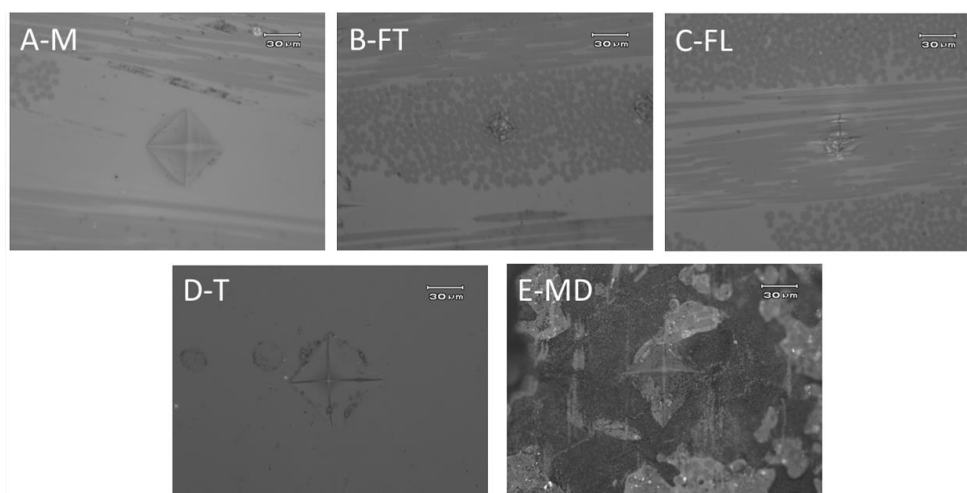


Figura 5.11 Exemplo da localização das micro endentações geradas pelo ensaio de microdureza Vickers: a) Matriz polimérica do compósito; b) Conglomerado de fibras na direção transversal; c) Conglomerado de fibras na direção longitudinal; d) rebite de Titânio vazado com rosca M5 e e) Matriz polimérica termomecanicamente afetada (ZTMA).

Os resultados de microdureza obtidos são apresentados na Tabela 5.7. Com base neles, foi proposta neste trabalho uma abordagem alternativa para estimar a dureza média do compósito. Tal método utiliza a média aritmética dos resultados multiplicados por sua proporção em volume do compósito. Vale salientar que esta é uma estimativa sem fins de caracterização, apenas para servir de referência para o modelamento numérico das juntas. Desta forma, o valor obtido para a dureza média do compósito foi de 94 HV.

Tabela 5.7 Resultados dos ensaios de dureza.

	<b>Titânio Ti-Gr2 (HV)</b>	<b>Matriz (HV)</b>	<b>Matriz Degradada (HV)</b>	<b>Fibra Longitudinal (HV)</b>	<b>Fibra Transversal (HV)</b>	<b>Compósito (HV)</b>
1	135	46	67	159	438	n/a
2	142	31	49	165	429	n/a
3	137	47	50	156	478	n/a
Média	138	41	55	160	448	94

Relacionando estes valores com os valores medidos nas outras regiões da junta analisada foi possível montar a Tabela 5.8, que correlaciona as durezas com as propriedades mecânicas estimadas para os materiais. Tais propriedades foram usadas como entrada nos modelos numéricos (MEF). Analisando os dados, a única região da junta com alteração significativa das propriedades foi a matriz alterada pelo calor e deformação na ZTMA do compósito, com 59% da resistência do material base. Essa redução pode estar relacionada com uma possível degradação via cisão de cadeias da matriz do compósito (PEI). Isso considerando que as temperaturas máximas médias são próximas as observadas por AMANCIO et al. (2008) para juntas de PEI não reforçado com rebites de alumínio. Porém, não se deve descartar que a ZTMA sofre a quebra local do reforço fibroso, além de uma reorientação de cadeias da matriz polimérica consolidada. Portanto, há uma redução da resistência mecânica local. O estudo aprofundado de degradação e mudanças nas propriedades mecânicas locais está fora do escopo desse trabalho.

Tabela 5.8 Propriedades utilizadas nas diferentes regiões da junta (percentagem em relação ao material base) para uso posterior nos modelos numéricos de elementos finitos.

Material	Material Base (MB)	ZAC	ZTMA
Ti-Gr2	100%	100% do MB	95% do MB
GFR-PEI	100%	100% do MB	59% do MB

### 5.6.2. Uso de modelos numéricos pelo método dos elementos finitos (MEF) para predição da resistência à tração como resposta no PdE Taguchi L4 (2<sup>3</sup>)

A combinação da metodologia estatística de planejamento de experimentos e da capacidade de previsão numérica do comportamento mecânico pelo método dos elementos finitos permitiu uma análise rápida e eficiente da contribuição de cada parâmetro de processo no desempenho mecânico da junta. Ambos necessitam ser calibrados e validados com experimentos físicos, mas corretamente calibrados, tem grau de confiabilidade equivalente ao de ensaios mecânicos.

Com base nas imagens geradas das seções transversais das amostras de referência da Figura 5.10, três modelos numéricos (MEF) foram montados. Para a resistência ao cisalhamento da interface entre o material polimérico termomecanicamente afetado (ZTMA) e a zona afetada pelo calor (ZAC) do compósito foi usado o valor de 34 MPa, devido ao melhor ajuste. Junto com a tensão de cisalhamento da interface, os coeficientes de atrito entre as diferentes regiões do modelo foram usados como fator de calibração. Apresentando melhor resposta os valores de 0,5 para o par tribológico da interface compósito-material degradado e de 0,35 para o par tribológico da interface compósito-metal.

A capacidade de previsão do modelo estatístico Taguchi L4 (2<sup>3</sup>) foi validada com base na realização de ensaios mecânicos de tração nas amostras definidas na Tabela 5.9. A escolha foi baseada nos extremos do PdE Taguchi L4 (2<sup>3</sup>), duas repetições dos parâmetros mínimos (E1) e duas repetições dos parâmetros máximos (E4) para os rebites vazados. As amostras foram ensaiadas sob carregamento de tração, conforme procedimento apresentado na Seção 4.14. Os resultados dos ensaios mecânicos de validação são apresentados na Figura 5.12.

Tabela 5.9 Combinações de parâmetros para validação do modelo estatístico Taguchi L4 ( $2^3$ ).

	Parâmetro 1 (P1) Velocidade de rotação (VR) (rpm)	Parâmetro 2 (P2) Tempo de união (TU) (ms)	Parâmetro 3 (P3) Pressão de forj. (PFo) (bar)
Validação 1 - V1 (E1)	6000 (1)	1600 (1)	3,5 (1)
Validação 2 - V2 (E1)	6000 (1)	1600 (1)	3,5 (1)
Validação 3 - V3 (E4)	8000 (2)	2300 (2)	4,5 (1)
Validação 4 - V4 (E4)	8000 (2)	2300 (2)	4,5 (1)

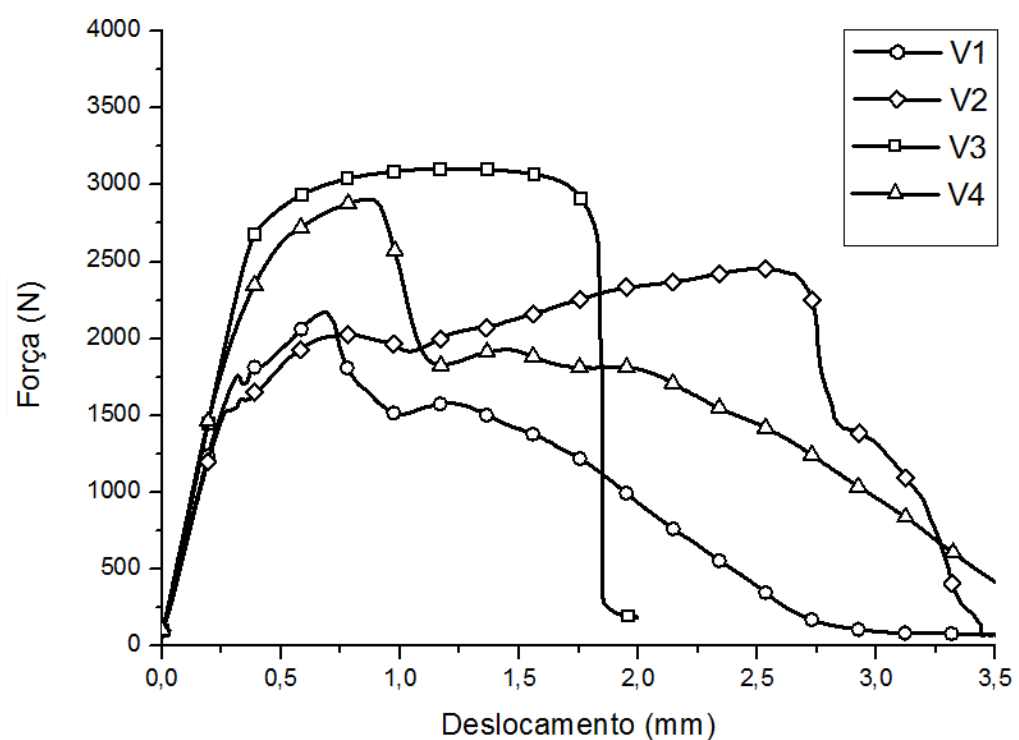


Figura 5.12 Resultados dos quatro ensaios mecânicos com a configuração de parâmetros de validação.

As amostras produzidas com os parâmetros do experimento quatro (E4) apresentaram desempenho superior, cerca de uma vez e meio, ao das produzidas com os parâmetros do experimento 1 (E1). Tal resultado é condizente com os fatores geométricos da zona de ancoragem apresentados anteriormente, uma vez que estas tiveram maior inserção (H) no compósito. O melhor resultado foi obtido com a amostra V3, que apresentou falha por ruptura do rebite, ao passo que todas as outras três falharam por cisalhamento da interface ZTMA-ZAC do compósito. A Figura 5.13 evidencia o modo de falha das quatro amostras testadas para validação do modelo estatístico com pino vazado após os ensaios de ancoragem.

Os resultados foram comparados com os modelos produzidos pelo MEF. Estes são apresentados de forma gráfica na Figura 5.14.

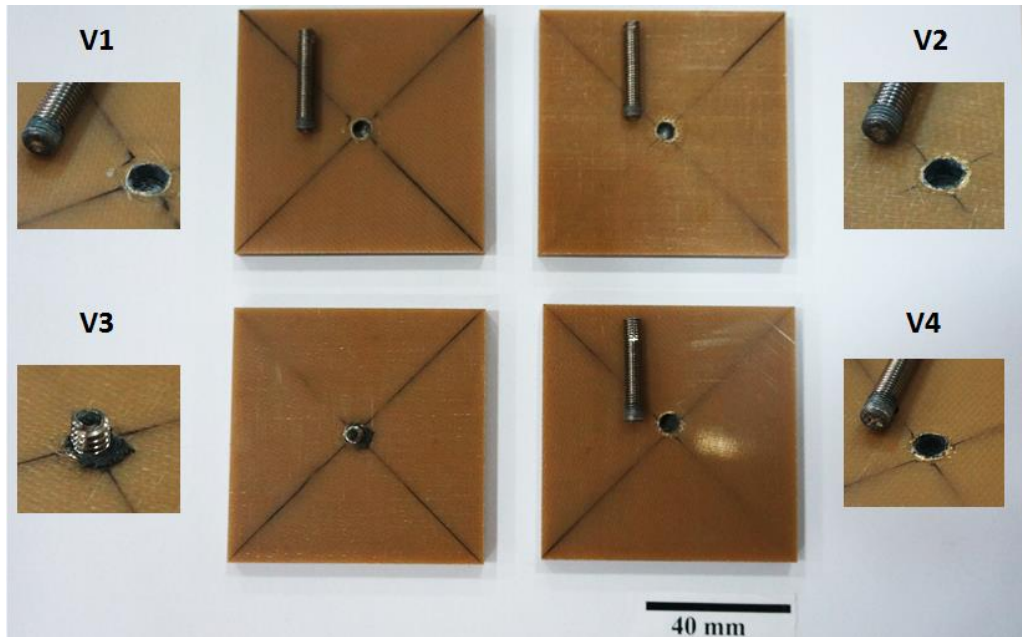


Figura 5.13 Amostras de validação do modelo estatístico com pino vazado após os ensaios de ancoragem evidenciando os modos de falha.

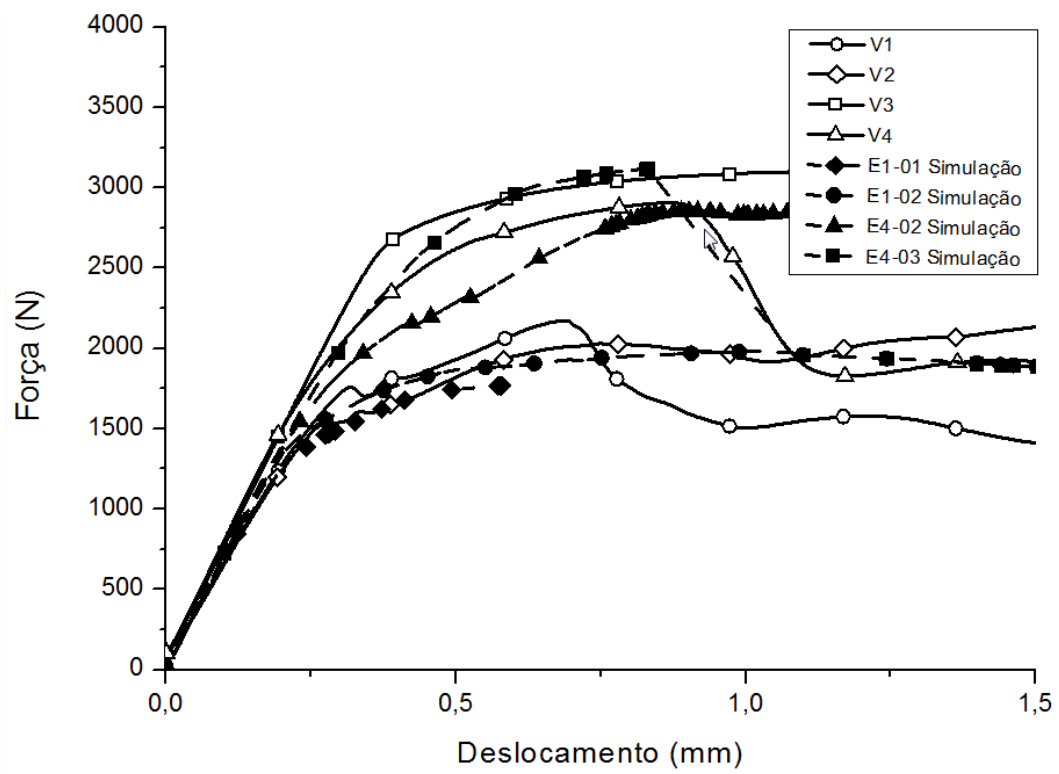


Figura 5.14 Resultados de Força x Deslocamento obtidos com os modelos numéricos via MEF e dados experimentais obtidos do teste de tração.

Quanto à força máxima suportada pela união, os modelos numéricos e os ensaios de validação não apresentaram diferença estatística significativa. Considerando que entre todos os fatores avaliados a força à tração máxima é a que efetivamente será utilizada para avaliar o desempenho da junta em aplicações industriais, pode-se considerar que os modelos numéricos desenvolvidos utilizando o método dos elementos finitos atendem as necessidades do estudo.

Com a confirmação da boa capacidade de previsão dos modelos de referência, as propriedades obtidas foram utilizadas para os modelos das doze juntas produzidas dentro do PdE Taguchi L4 ( $2^3$ ). Todos os modelos numéricos gerados apresentaram comportamento esperado como reportado por BORGES (2012). A Figura 5.15 apresenta a sobreposição dos resultados de tensão pelo critério de von Mises (lado esquerdo da figura) e da macrografia (lado direito da figura) para todos os modelos de elementos finitos do PdE Taguchi L4.

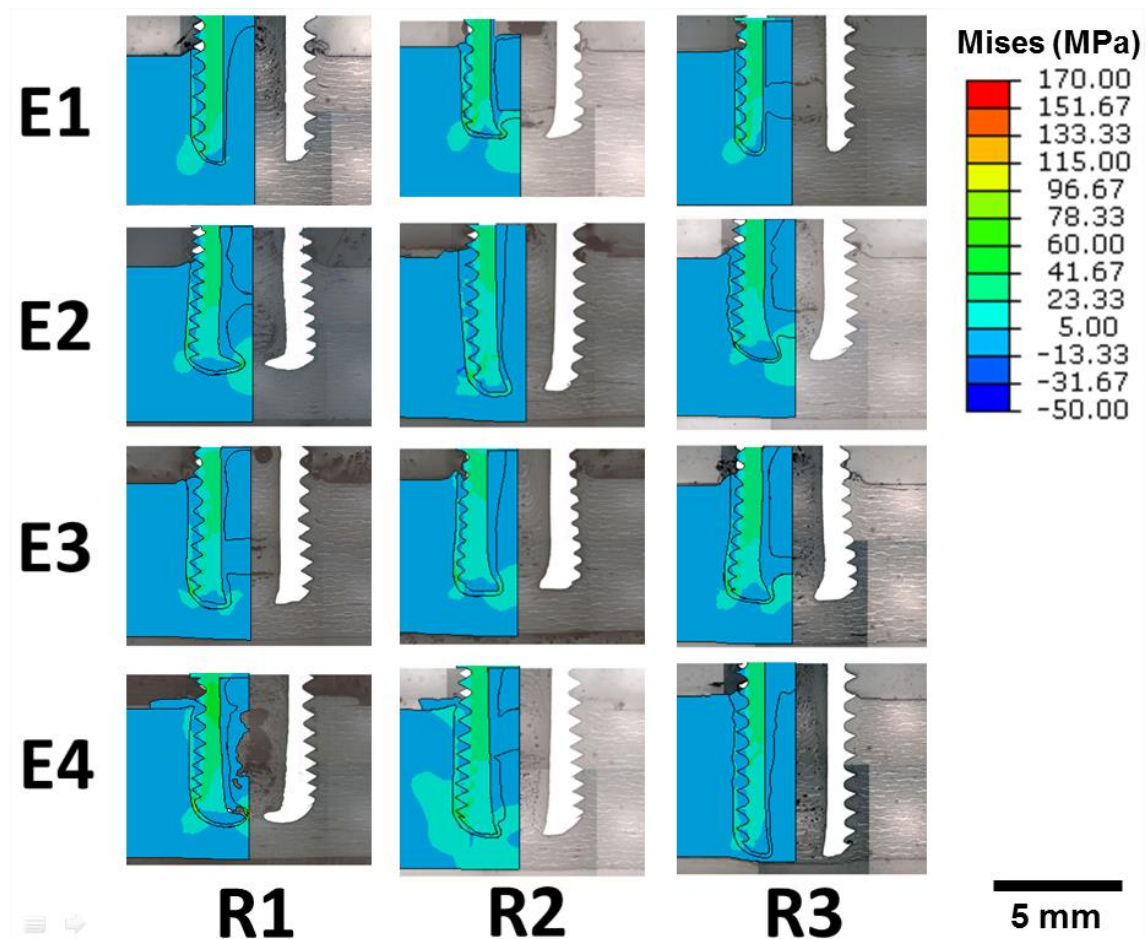


Figura 5.15 Mapa de resultados dos modelos de elementos finitos das amostras do Taguchi L4 ( $2^3$ ) mostrando a tensão pelo critério de von Mises (lado esquerdo das figuras) sobrepostas as macrografias das amostras (lado direito das figuras).

As variáveis selecionadas como resposta para os modelos foram força máxima de ancoragem e deslocamento no pico de força. Os resultados dos modelos para estas variáveis e o local da falha estão apresentados na Tabela 5.10 juntamente com o número de elementos, tipo de elemento e o tempo computacional utilizados em cada modelo.

Tabela 5.10 Força máxima de ancoragem (Fa) obtida com as simulações numéricas.

Amostra	Força max. de ancoragem (Fa) (N)	Número de elementos	Tipo elemento	Tempo computacional (min.)	Modo de falha (localização da Falha)
E1-01	2018,94	18794	CAX6M	~2	Interface
E1-02	1877,25	19395	CAX6M	~2	Interface
E1-03	1677,58	19372	CAX6M	~2	Interface
E2-01	2576,68	19140	CAX6M	~2	Interface
E2-02	2499,65	23677	CAX6M	~2	Interface
E2-03	2236,28	23076	CAX6M	~2	Interface
E3-01	2601,35	20095	CAX6M	~2	Interface
E3-02	2221,78	19396	CAX6M	~2	Interface
E3-03	2928,31	23579	CAX6M	~2	Interface
E4-01	2361,53	25978	CAX6M	~2	Interface
E4-02	2772,34	29583	CAX6M	~2	Interface
E4-03	3100,65	19765	CAX6M	~2	Interface

O melhor resultado de força máxima de ancoragem (Fa) foi obtido com a amostra E4-03, vide Figura 5.16. Foi observado que esta foi a amostra que apresentou a maior profundidade de inserção (H) do rebite no compósito, com 6,16 mm. Tal amostra apresentou desempenho um pouco superior à amostra E3-03, que apresentou a zona de ancoragem (ZA) com maior raio (R), 2,58 mm, porém com uma menor inserção (H), de 4,62 mm.

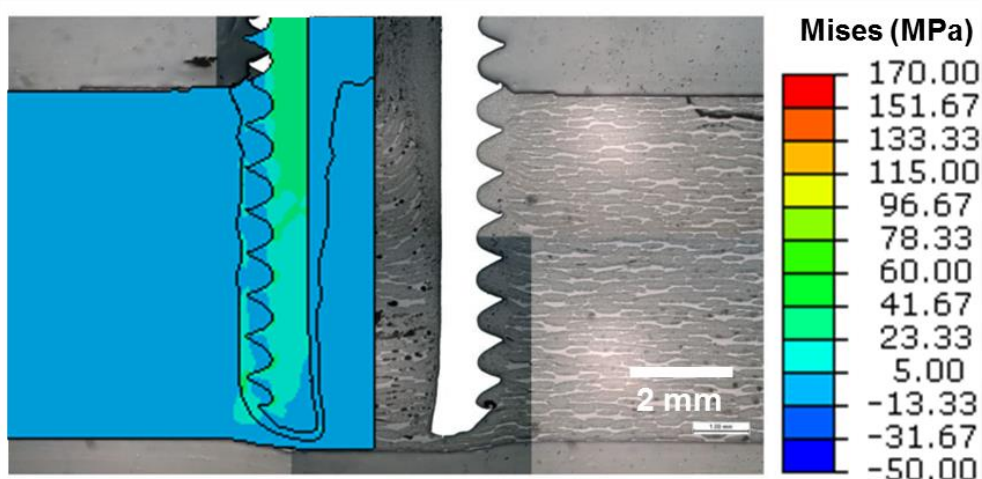


Figura 5.16 Sobreposição do modelo numérico (tensão de von Mises) e da macrografia para a amostra E4-03.

### 5.6.3. Modelos analíticos para predição da resistência à tração como resposta no PdE Taguchi L4 (23)

Com base nos resultados obtidos nos modelos numéricos, foram observadas relações entre a resposta mecânica e as medidas geométricas das juntas. A partir desta observação foi elaborado um modelo analítico simplificado para prever o modo de falha nos ensaios de ancoragem (tração). O modelo foi baseado na avaliação do modo falha previsto pelos modelos numéricos. Para tal, o perímetro máximo da interface foi calculado com base no diâmetro do rebite ( $D_r$ ). O valor obtido foi então multiplicado pela altura de inserção ( $H$ ) dando como resposta a área máxima do invólucro. Com base nesse resultado e com o limite de cisalhamento da interface foi calculada a força de ancoragem ( $F_a$ ), através da Equação 5.1:

$$F_a = \left( 2\pi \frac{D_r}{2} * H \right) * \sigma_{cm} \quad (5.1)$$

A Tabela 5.11 apresenta os resultados obtidos com a aplicação da Equação 5.1, em todas as amostras do PdE. A tabela compara esses resultados com a resistência à tração do rebite. Para efeito de comparação, a resistência estimada de cisalhamento da interface foi dividida pela resistência calculada analiticamente, pelas equações de resistência dos materiais,



para a falha em tração do rebite. Esses resultados estão apresentados na última coluna da Tabela 5.11 em forma de taxa (MF). Sendo estes obtidos através da equação (5.2) abaixo:

$$MF = \frac{\sigma_{CM}}{\sigma_{mTi}} \sigma_{Cm} \quad (5.2)$$

Quando este valor for maior que um, indica que a tensão máxima no rebite alcançou a tensão de ruptura do mesmo antes do cisalhamento da interface, indicando o modo de falha por ruptura do rebite, a Figura 5.17 exemplifica graficamente esta relação. Quando for menor que um indica que a tensão na interface alcançou seu limite antes da falha do rebite, indicando o modo de falha de cisalhamento de interface. Analisando os resultados fica claro que dentre as condições testadas todas falhariam na interface, sendo a que ficou mais próximo da falha por tração no rebite foi a condição E4-03 com proporção de 0,95.

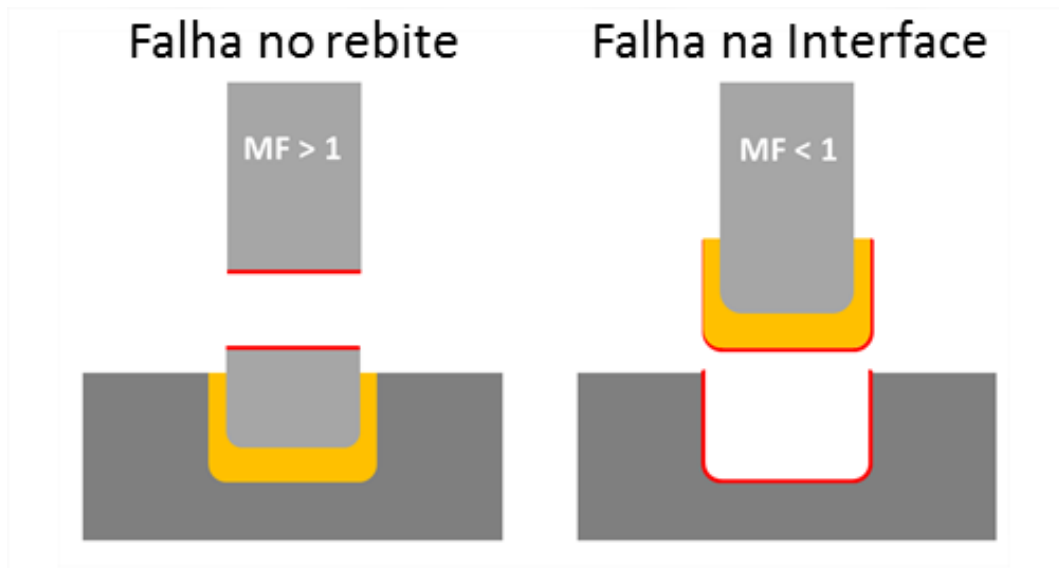


Figura 5.17 Modos de falha identificados e relação com a MF, sendo apresentado a esquerda o modo de falha no rebite ( $MF > 1$ ) e a direita o modo de falha na interface ( $MF < 1$ ).

O modelo analítico apresentado permitiu de forma simples a avaliação do modo de falha esperado para as condições testadas, antes mesmo de qualquer ensaio ser realizado. Tal

modelo apresentou alta aderência quando comparado com as simulações via MEF. Esta avaliação prévia foi muito importante, pois, ajudaram a confirmar que as simulações estavam representando o comportamento esperado para as juntas ensaiadas sob tração.

Tabela 5.11 Previsão de força máxima dos modelos analíticos para o desempenho de ancoragem das amostras do PdE Taguchi L4 ( $2^3$ ).

Amostra	Área do envoltório (mm <sup>2</sup> )	Tensão de Cisalhamento da interface ( $\sigma_c$ ) (MPa)	Força Fa máx. (N)	Média (N)	Desvio padrão (N)	Área do rebite (mm <sup>2</sup> )	Tensão no rebite ( $\sigma_{rebite}$ ) (MPa)	Tensão de ruptura Ti-Gr2 (MPa)	MF
E1-01	63,85	34	2170,9			9,29	233,65	344	0,68
E1-02	50,65	34	1722,25	1722,2	262,09	9,29	185,36	344	0,54
E1-03	50,35	34	1711,82			9,29	184,24	344	0,54
E2-01	85,08	34	2892,7			9,29	257,97	344	0,75
E2-02	70,5	34	2396,91	2396,9	328,14	9,29	311,34	344	0,91
E2-03	66,84	34	2272,41			9,29	244,57	344	0,71
E3-01	77,28	34	2627,63			9,29	282,81	344	0,82
E3-02	71,03	34	2414,98	2546,3	107,30	9,29	259,92	344	0,76
E3-03	74,89	34	2546,36			9,29	274,06	344	0,8
E4-01	73,89	34	2512,27			9,29	270,39	344	0,79
E4-02	79,16	34	2691,59	2691,5	268,26	9,29	289,69	344	0,84
E4-03	89,41	34	3039,85			9,29	327,17	344	0,95

\*onde  $\sigma_c$  – Tensão de cisalhamento da interface ZTMA-ZAC do compósito, Fa máx – Força máxima de ancoragem prevista com o modelo analítico,  $\sigma_{rebite}$  – Tensão no rebite Ti-Gr2, Tensão de ruptura. – Tensão de ruptura do material base titânio graduação dois e MF - relação adimensional da tensão no rebite dividida pela tensão de ruptura do mesmo que indica o modo de falha esperado, baseado na Equação 5.2.

#### 5.6.4. Avaliação estatística dos resultados do PdE Taguchi L4 ( $2^3$ ) através de análise de variância

Os resultados de força máxima de ancoragem obtidos com os modelos numéricos foram analisados estatisticamente através de análise de variância (ANOVA) com o auxílio do software MINITAB v.14.0, dentro dos intervalos estabelecidos. Como resultados foram obtidos a influência de cada um dos três parâmetros de processo analisados; velocidade de rotação (P1), tempo de união (P2) e força de forjamento (P3), sobre a variável de saída (S) força máxima de ancoragem. A Figura 5.18 apresenta o efeito sobre a média das médias e a Figura 5.19 da média das variâncias, ambas utilizando o critério “quanto maior a relação sinal-ruído melhor” usado normalmente para PdE Taguchi (TAGUCHI 1991). Os modelos

gerados foram avaliados com um intervalo de confiança de 95% (que condiz com um erro  $\alpha = 5\%$ ).

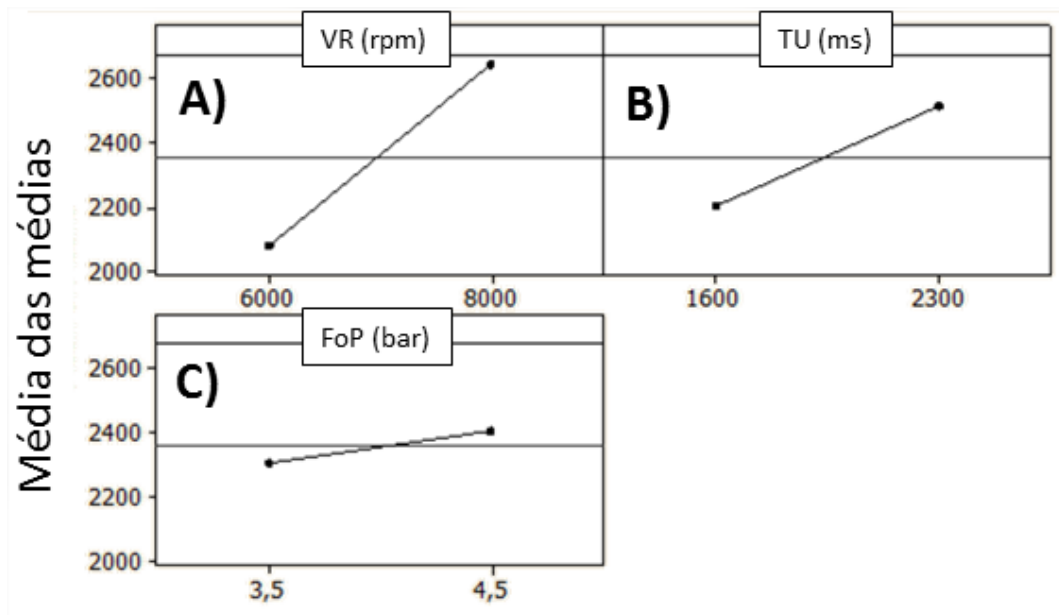


Figura 5.18 Resultados do modelo estatístico sobre a média das médias para a resposta em relação a variável: a) velocidade de rotação (P1), b) tempo de união (P2) e c) força de forjamento (P3) com o critério “quanto maior a relação sinal-ruído melhor”.

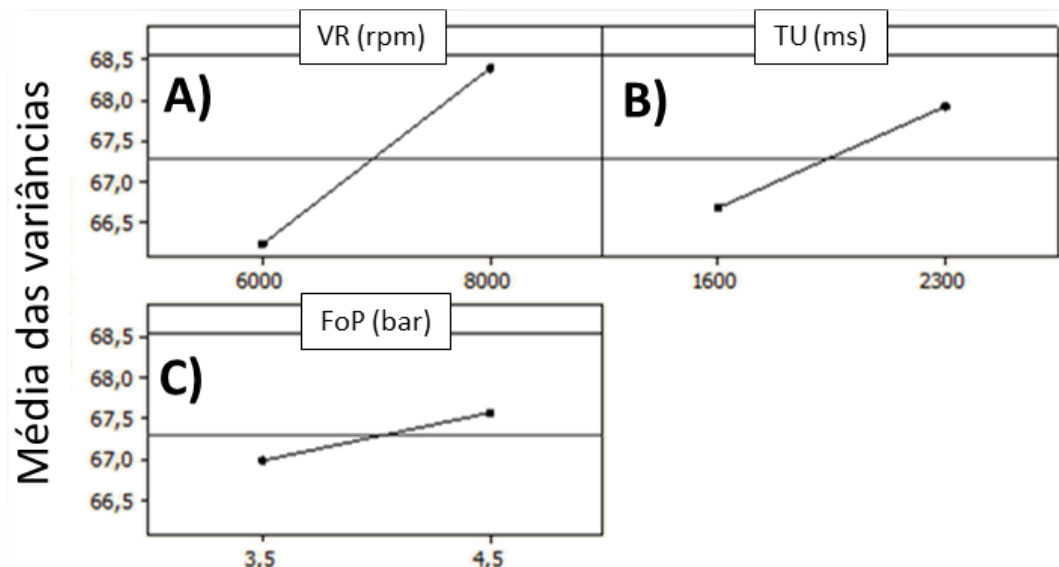


Figura 5.19 Resultados do modelo estatístico sobre a média das variâncias sinal-ruído para a resposta em relação a variável: a) velocidade de rotação (P1), b) tempo de união (P2) e c) força de forjamento (P3) com o critério “quanto maior a relação sinal-ruído melhor”.

Dentre as três variáveis, a que apresentou a maior influência sobre a saída foi a velocidade de rotação, o que pode ser visto no gráfico como a maior inclinação da reta em comparação com a média total. O tempo de união foi o segundo fator de maior influência, e o de menor impacto foi a força de forjamento. Para todas as variáveis analisadas o resultado foi superior sempre para os níveis mais altos testados (Figura 5.18 e Figura 5.19).

Como evidenciado nos gráficos apresentados (Figura 5.18 e Figura 5.19) e considerando o critério “quanto maior a relação sinal-ruído melhor” pode-se afirmar que os parâmetros que proporcionam o melhor desempenho da junta em tração dentro dos intervalos estudados são:

- Velocidade de rotação (VR): 8000 rpm
- Tempo de união (TU): 2300 ms
  - Tempo de fricção (TF): 500 ms
  - Tempo de forjamento (TFo): 1800 ms
- Pressão de forjamento (PFo): 4,5 bar
- Pressão de fricção (PF): 3 bar

Esta combinação de parâmetros não foi utilizada em nenhum dos quatro experimentos inicialmente propostos, logo, tal conjunto de parâmetros foi nomeado como experimento 5 (E5) para ser avaliado posteriormente (resultados apresentados na Seção 5.7).

#### 5.6.5. Validação dos modelos

A capacidade de previsão do modelo estatístico foi validada com base nos resultados dos mesmos quatro ensaios mecânicos usados para a validação dos modelos de ensaios via método dos elementos finitos (MEF) e nas previsões do modelo analítico apresentados anteriormente na Seção 5.6.2. A Tabela 5.12 compila os resultados comparativos modelados e experimentais e avalia o erro para cada condição.

Tabela 5.12 Resultados da validação do modelo Taguchi L4 ( $2^3$ ) com base nos ensaios mecânicos.

Amostra	Velocidade de rotação (VR) (rpm)	Tempo de união (TU) (ms)	Pressão de forjamento (PFo) (bar)	Ensaio - Força máx. ancoragem (FA) (N)	Valores preditos Taguchi L4 (N)	Diferença (%)
V1	6000	1600	3,5	1758	1868	6
V2	6000	1600	3,5	2173	1868	15
V3	8000	2300	3,5	3104	2748	12
V4	8000	2300	3,5	2905	2748	5

Quando comparados com as previsões do modelo estatístico, os ensaios mecânicos apresentaram diferença variando entre 5% e 15%. Esta diferença está de acordo com o esperado, pois é de comum acordo entre vários autores, que divergências de 10% são normalmente encontradas em análises estatísticas baseadas em ensaios mecânicos bem como em soldagem de polímeros devido às variações das propriedades do material associada com diversas bateladas e grades. Visto que o presente estudo foi conduzido sobre a utilização de modelos de elementos finitos para simplificação, economia de material e tempo experimental, diferenças maiores são esperadas devido à associação de incertezas. Na média o erro encontrado foi de 9,5 %. Sendo assim, o modelo estatístico foi aceito como validado.

Para efeito de validação adicional, foram comparadas as previsões do modelo analítico com as do modelo estatístico. Esses resultados são apresentados na Tabela 5.13. Essa comparação corrobora para a aceitação do modelo estatístico usado no planejamento de experimentos, considerando que as diferenças foram de menos de 10%, com exceção da condição E1-01 em que a diferença foi de 16%.

Tabela 5.13 Resultados da validação do modelo Taguchi L4 ( $2^3$ ) com base nos modelos analíticos.

Exp.	Vel. de rotação VR (rpm)	Tempo de união TU (ms)	Press. Forj. PFo (bar)	01		02		03	
				Analítico Fa (N)	Taguchi Fa (N)	Analítico Fa (N)	Taguchi Fa (N)	Analítico Fa (N)	Taguchi Fa (N)
E1	6000	1600	3,5	2171	1868,33	1722	1868,33	1712	1868,33
E2	6000	2300	4,5	2397	2280	2272	2280	2171	2280
E3	8000	1600	4,5	2628	2529,67	2415	2529,67	2546	2529,67
E4	8000	2300	3,5	2512	2748	2692	2748	3040	2748

Os dados das duas validações apresentadas nas Tabela 5.12 e Tabela 5.13 foram condensados em um único gráfico na Figura 5.20 onde a comparação dos ensaios mecânicos foi apresentada como triângulos e a comparação com os resultados analíticos como círculos. A previsão exata do modelo é representada por uma linha sólida a 45° (valor previsto igual ao valor obtido). Além destas foram plotadas linhas adjacentes de controle de erro de 10% e 20%. Como já ressaltado anteriormente, os resultados plotados na Figura 5.20 mostram a boa qualidade dos modelos estatísticos. Devido à natureza deste ser baseado em simulações e não em experimentos, todas as etapas de validação foram ainda mais importantes para garantir a consistência dos resultados finais esperados. A análise visual permite identificar que quatorze dos dezesseis pontos de validação estão posicionados dentro do envelope de 10% de erro máximo, restando apenas dois pontos entre este e o envelope de 20%.

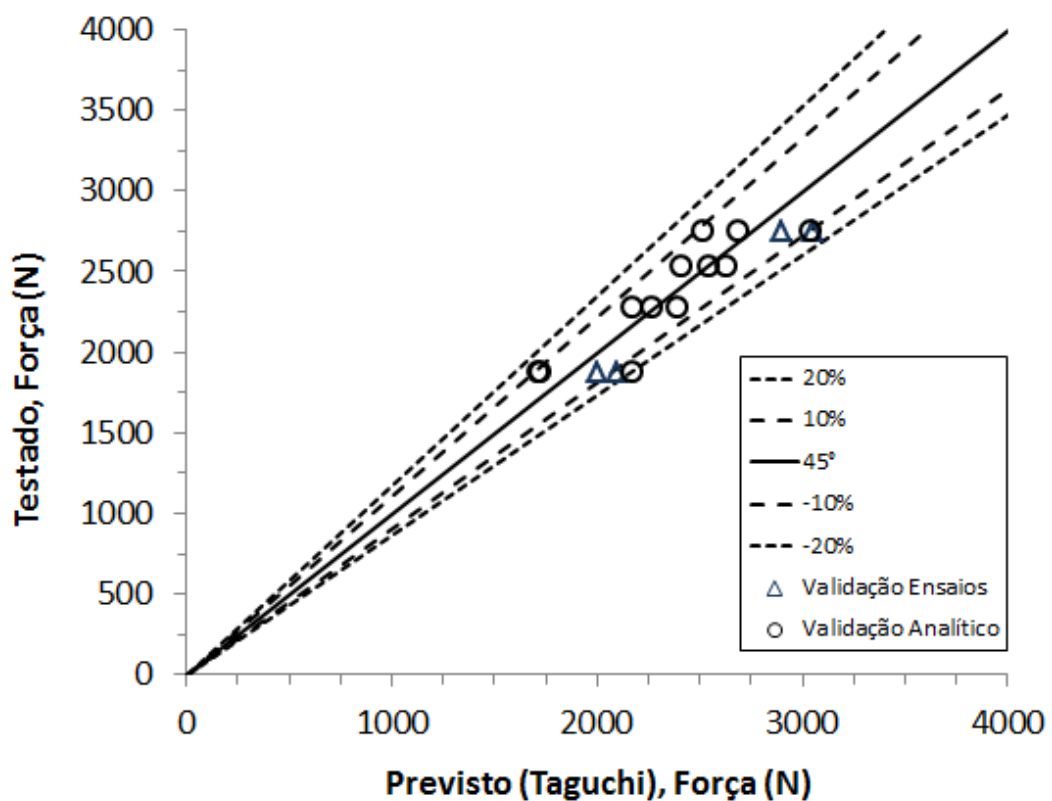


Figura 5.20 Validação do modelo de Taguchi com base nos resultados dos ensaios mecânico e do modelo analítico.

A Figura 5.21 apresenta o mesmo comparativo, porém, em forma de gráfico de barras comparando diretamente os valores obtidos com os modelos analíticos, simulações

numéricas e os ensaios de validação. Pode-se observar que para os ensaios de validação V1 e V2 o modelo que apresentou melhor correlação foi o modelo analítico, já para os ensaios V3 e V4 a melhor correlação foi obtida com as simulações numéricas. Mesmo assim ambas apresentaram bom concordância, evidenciando a aplicabilidade e validade de ambos os modelos para os casos de carga e geometrias estudadas.

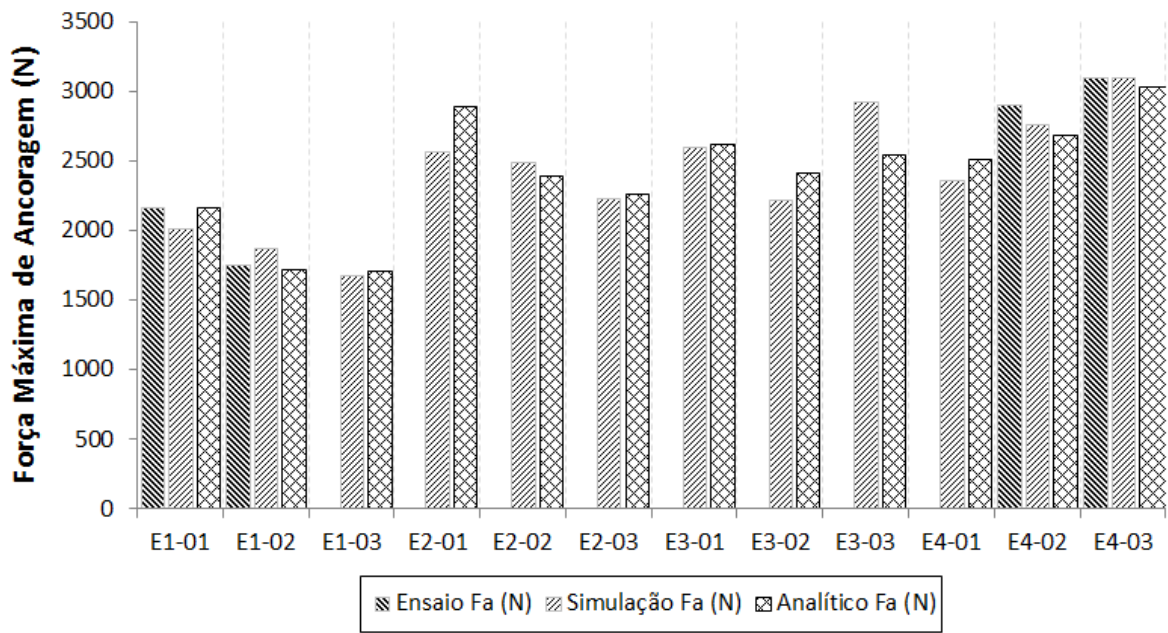


Figura 5.21 Comparativo dos modelos analíticos e simulação com os ensaios mecânicos de validação.

### 5.7. Avaliação mecânica da condição de saída otimizada pelo modelo Taguchi L4 ( $2^3$ ) (Resultado do PdE)

Esta combinação de parâmetros não foi utilizada em nenhum dos quatro experimentos inicialmente propostos para o Taguchi L4 ( $2^3$ ), logo, três amostras foram produzidas com os parâmetros ótimos obtidos como saída (S) do modelo estatístico. As seções longitudinais ao rebite obtidas são apresentadas na Figura 5.22.

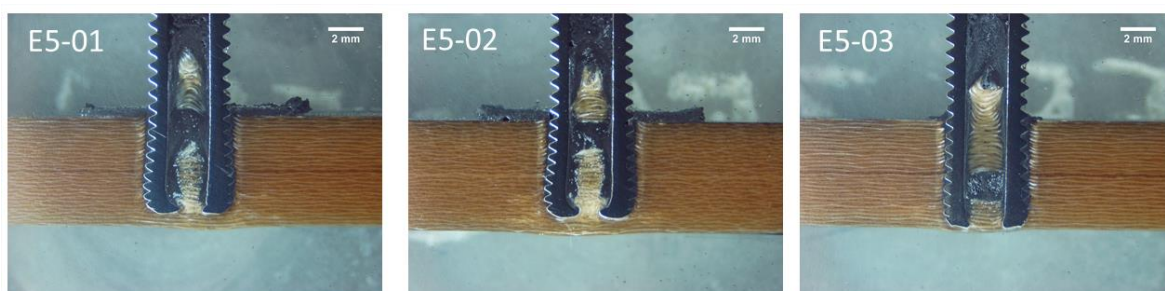


Figura 5.22 Seção longitudinal das amostras do experimento 5 (E5), da esquerda para direita E5-01, E5-02 e E5-03 respectivamente.

Na avaliação qualitativa das amostras, apresentada na Tabela 5.14, apenas a amostra E5-03 não apresentou nota máxima. Para essa amostra no quesito profundidade de inserção na matriz (Q1) a nota recebida foi 2 com base no fato da inserção do rebite na matriz ter sido tal que ficou próximo a superfície inferior do compósito. Mesmo não atravessando o compósito, a nota intermediária foi dada, pois a pequena seção remanescente pode prejudicar o desempenho da junta sob carregamentos cíclicos. Os resultados da análise dimensional das amostras do experimento cinco (E5) estão apresentados na Tabela 5.15. Os cortes longitudinais ao rebite apresentaram maior penetração e que os visualizados nos experimentos um a quatro (E1-E4) com penetração (H) de 5,72 a 6,01 mm.

Tabela 5.14 Resultados da análise qualitativa das amostras do experimento 5 (E5).

Amostra	Inserção (Q1)	Ancoragem (Q2)	Matriz (Q3)	Rebarba (Q4)	Soma
E5-01	3 (ótimo)	3 (ótimo)	3 (ótimo)	3 (ótimo)	12
E5-02	3 (ótimo)	3 (ótimo)	3 (ótimo)	3 (ótimo)	12
E5-03	2 (bom)	3 (ótimo)	3 (ótimo)	3 (ótimo)	11

\*onde Q1 - Profundidade de inserção na matriz, Q2 - Formação zona de ancoragem, Q3 - Degradação da matriz e Q4 - Formação de rebarba.

Tabela 5.15 Análise dimensional da zona de ancoragem das amostras E5.

Amostra	R (mm)	Rmm (mm)	H (mm)	n
E5-01	2,81	2,93	5,72	9,0
E5-02	2,75	2,82	5,79	8,5
E5-03	2,63	2,76	6,01	8,5



Seguindo a caracterização, três perfis de dureza foram realizados de acordo com o procedimento proposto. Os resultados foram consistentes para o rebite e para o material degradado, todavia, para o compósito os resultados foram aquém do esperado. Tal comportamento pode ser explicado devido ao maior indentador utilizado nestas medidas. Os resultados para as três amostras podem ser observados na Figura 5.23.

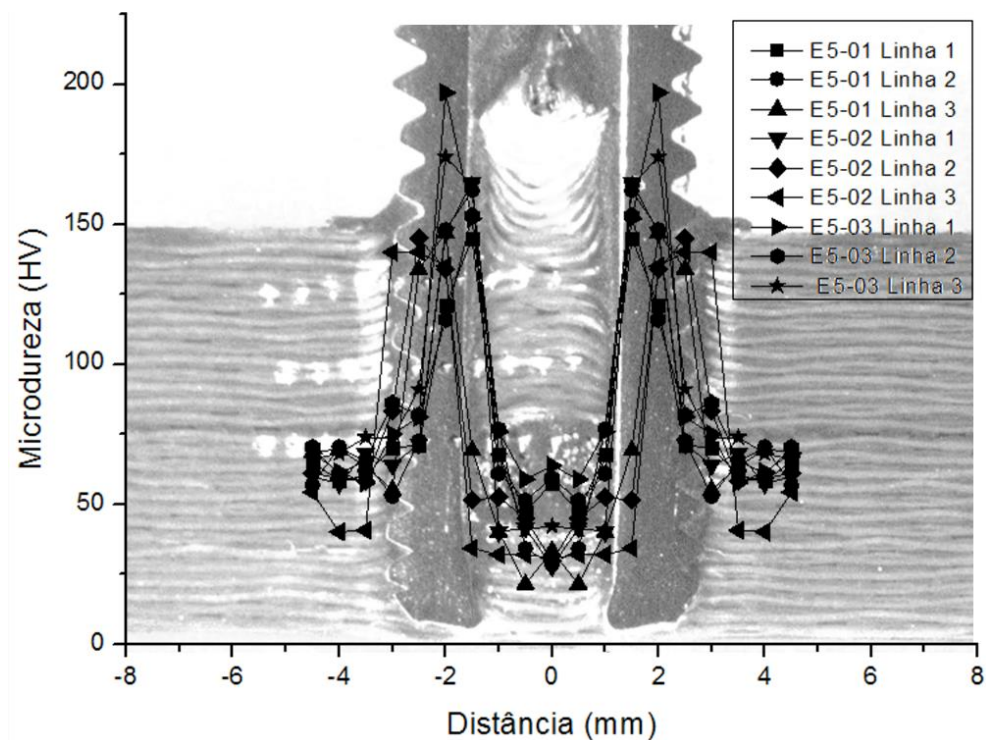


Figura 5.23 Perfis de dureza produzidos nas três linhas das três amostras.

Finalizada a caracterização das amostras e confirmado o bom desempenho das mesmas na análise qualitativa, foram produzidas as amostras para ensaios de ancoragem e cisalhamento.

#### 5.7.1. Ensaio de ancoragem da amostra de saída (E5)

O modelo analítico foi aplicado para as medidas tomadas nas três amostras apresentadas acima. Os valores obtidos podem ser visualizados na Tabela 5.16. A avaliação destes dados indica que, devido às porcentagens serem todas acima de 100%, o modo de falha esperado para os ensaios subsequentes é a ruptura da seção transversal do rebite.

Tabela 5.16 Resultados analíticos calculados para as mostras E5-XX.

Amostra	Área do envoltório (mm <sup>2</sup> )	Tensão de Cisalhamento da interface (σ <sub>c</sub> ) (MPa)	Força Fa máx. (N)	Média (N)	Desvio padrão (N)	Área do rebite (mm <sup>2</sup> )	Tensão no rebite (σ <sub>rebite</sub> ) (MPa)	Tensão de ruptura Ti-Gr2 (MPa)	MF
E5-01	100,99	34	3433,69			9,29	369,56	344	1,07
E5-02	100,04	34	3401,50	3403,95	28,59	9,29	366,10	344	1,06
E5-03	99,31	34	3376,67			9,29	363,42	344	1,06

O modelo analítico ainda apresenta uma estimativa de força máxima média de  $3403,95 \pm 28,59$  N. Para confirmar esta previsão foram ensaiadas as quatro amostras produzidas com os parâmetros do experimento cinco (E5). A Figura 5.24 apresenta os gráficos plotados de força por deslocamento, obtidos nos ensaios mecânicos de tração. A dispersão obtida foi baixa tanto para força máxima de ancoragem (Fa) quanto para os deslocamentos. Como previsto pelo modelo analítico, todas as quatro amostras falharam na seção transversal do rebite; o detalhamento das falhas pode ser visto no APÊNDICE B.

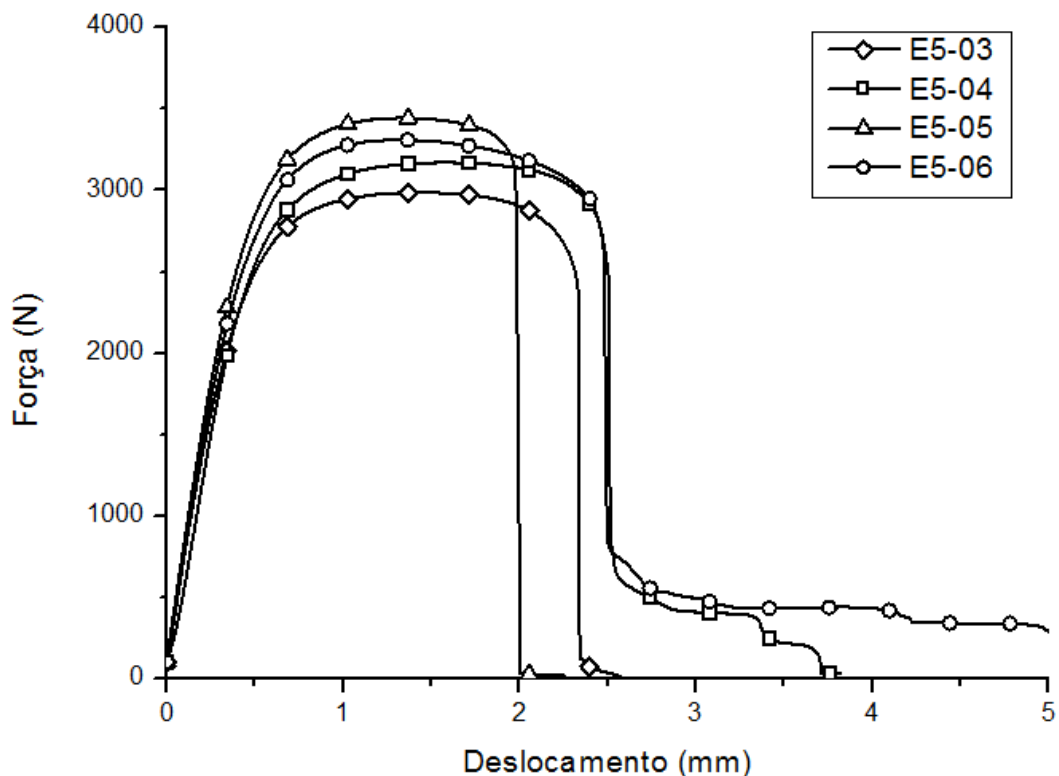


Figura 5.24 Ensaios mecânicos com a configuração de parâmetros proposta pelo modelo estatístico (E5).

Para a comparação do desempenho mecânico dos rebites sólidos M5 e vazados M5, foram usadas duas abordagens. A primeira foi a comparação direta entre as duas geometrias, conforme apresentado na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 Ensaio mecânicos de ancoragem.

<b>Amostra</b>	<b>Força Máxima (Fa) (N)</b>	<b>Deslocamento na Força Máxima (DFa) (mm)</b>
<b>SC-01</b>	4567,84	3,30
<b>SC-02</b>	4250,02	1,92
<b>SC-03</b>	4361,9	1,22
<b>SC-04</b>	4594,11	3,32
<b>Média SC</b>	4464,87	2,61
<b>Desvio padrão SC</b>	165,57	1,05
<b>E5-03</b>	2987,82	1,44
<b>E5-04</b>	3171,52	1,57
<b>E5-05</b>	3444,26	1,35
<b>E5-06</b>	3309,87	1,32
<b>Média E5</b>	3240,69	1,39
<b>Desvio padrão E5</b>	195,23	0,11

Nesta comparação, as amostras com rebite sólido apresentaram resistência média de  $4464,87 \pm 165,57$  N, resultado 27% superior quando comparadas com os vazados, onde a média obtida foi de  $3240,69 \pm 195,23$  N. A respeito dos deslocamentos na força máxima, a resposta dos rebites sólidos também foi melhor, neste caso 41%,  $2,44 \pm 1,05$  mm contra  $1,41 \pm 0,11$  mm dos vazados.

Visto que a diferença nas seções dificulta a comparação dos resultados, na segunda abordagem, foram produzidos gráficos de carga e deslocamento parametrizados em relação à área do rebite. Desta forma, ficou claro o ganho em resistência específica da junta com rebite vazado M5 (E5) sendo esse de 11% em relação ao rebite sólido M5 (SC), vide Figura 5.25. Em contraponto o deslocamento parametrizado na força máxima foi prejudicado em 12% (Figura 5.26). Os gráficos comparativos estão apresentados nas Figura 5.25 e Figura 5.26.

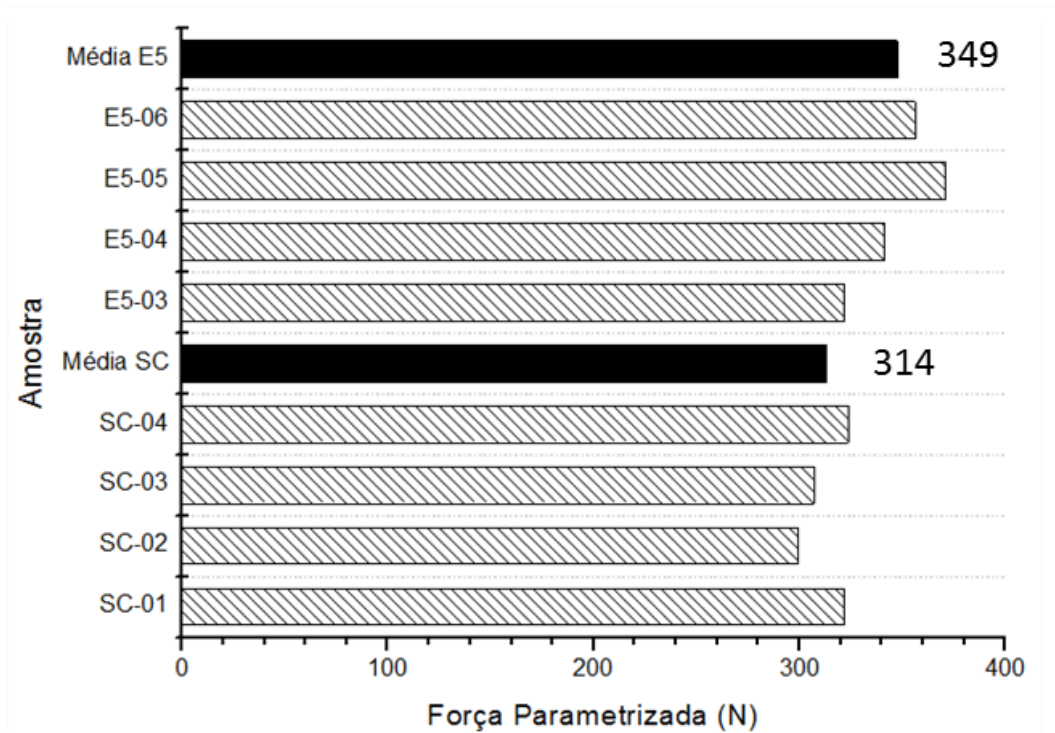


Figura 5.25 Força máxima para os rebites sólidos M5 e vazados M5 representando a resistência específica das juntas rebitadas.

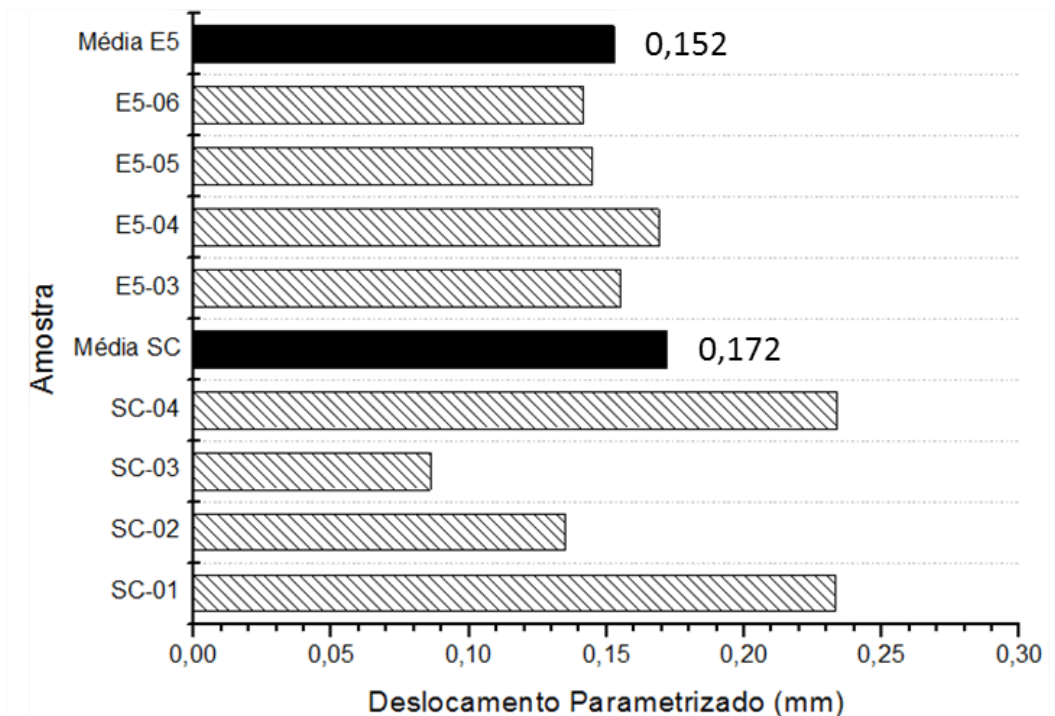


Figura 5.26 Deslocamento na força máxima para os rebites sólidos M5 e vazados M5 representando a ductilidade específica das juntas rebitadas.

Tal detrimento do deslocamento pode ser explicado pela redução de material na seção do rebite. Mesmo assim não foi considerado prejudicial, apenas indica uma junta menos dúctil.

Os valores obtidos foram excelentes tendo em vista que para a produção das juntas com rebite vazado os parâmetros de processo foram reduzidos em 50% e a área da seção transversal do rebite foi reduzida em 36%, reduzindo o peso final da junta. A disparidade entre a relação de redução de área do rebite com o ganho em resistência mecânica se dá pelo fato do material antes expulso como rebarba, ser deslocado para o interior do rebite vazado. Com isso, formando um rebite híbrido onde a seção interna, mesmo com resistência mais baixa, contribui para a resistência do conjunto.

#### 5.8. Ensaio de cisalhamento

Após a etapa de otimização do processo para as juntas rebitadas por fricção com rebite vazado M5, foi avaliada a resistência de juntas sobrepostas produzidas com os parâmetros otimizados de saída. Para a avaliação do desempenho sob carregamentos cisalhantes, foram ensaiadas quatro amostras produzidas com os parâmetros do experimento de saída (E5). A Figura 5.27 apresenta a evolução dos deslocamentos durante o tempo de ensaio de cisalhamento da amostra E5-01, obtido com o sistema de medição ótico, mostrando os deslocamentos na direção Y durante o ensaio de tração e indicando que a amostra com rebite sólido M5 é maior que a com rebite vazado M5.

A Figura 5.28 apresenta os gráficos de força de cisalhamento por deslocamento, obtidos nos ensaios mecânicos de cisalhamento sob tração. A dispersão obtida foi alta tanto para força máxima de ancoragem ( $F_a$ ) quanto para os deslocamentos. Todas as amostras falharam por cisalhamento da seção transversal do rebite; o detalhamento das falhas foi apresentado no APÊNDICE C.

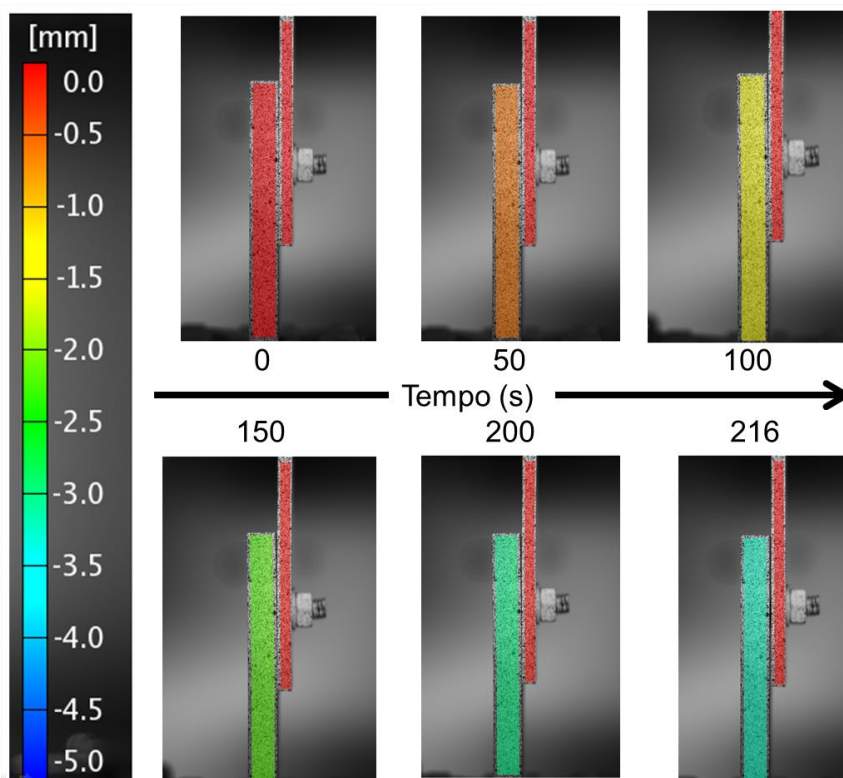


Figura 5.27 Evolução dos deslocamentos na direção Y em função do tempo de ensaio da amostra LS\_E5\_01.

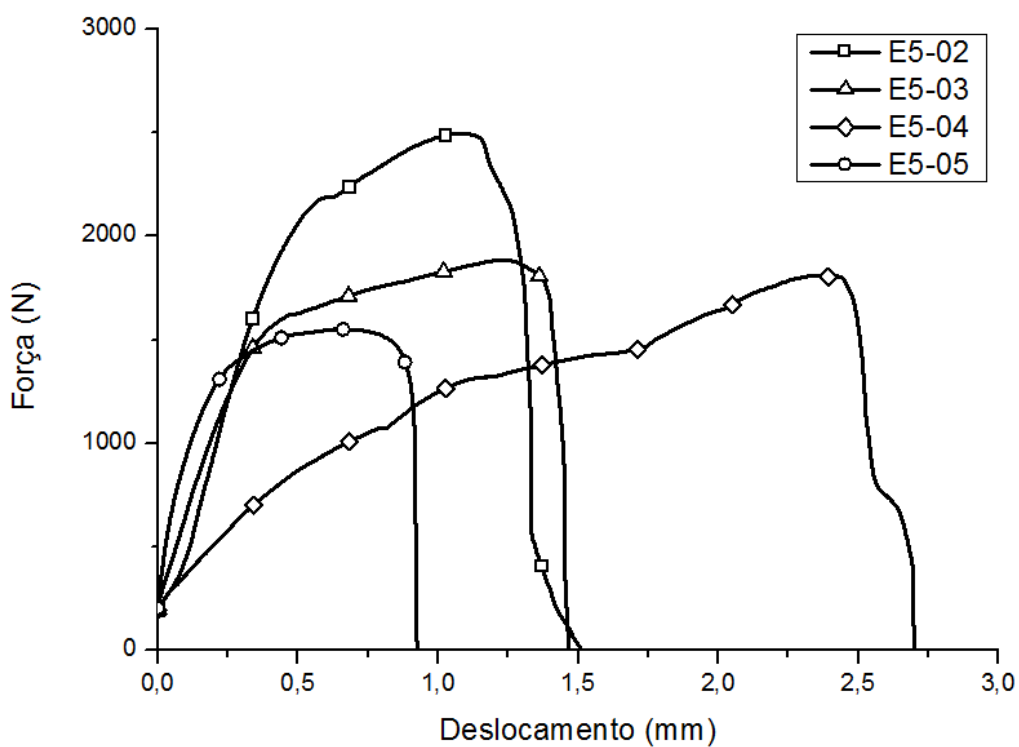


Figura 5.28 Resultados dos quatro ensaios mecânicos com a configuração de parâmetros proposta pelo modelo estatístico (E5).

Para a comparação do desempenho mecânico sob carregamento cisalhante dos rebites sólidos M5 e vazados M5, foram usadas as mesmas duas abordagens que nos resultados de ancoragem. A comparação direta entre as duas geometrias, conforme apresentado na Tabela 5.18, mostrou que as amostras com rebite sólido apresentaram resistência média de  $4142,78 \pm 433,55$  N, um resultado 124% superior quando comparadas com os vazados, onde a média obtida foi de  $1846,18 \pm 398,64$  N. A respeito dos deslocamentos na força máxima, a resposta dos rebites sólidos também foi superior, neste caso 134%,  $2,71 \pm 0,28$  mm contra  $1,16 \pm 0,72$  mm dos vazados.

Tabela 5.18 Ensaio mecânicos de cisalhamento sob tração para rebites sólidos M5 e vazados M5.

<b>Amostra</b>	<b>Força Máxima (Fa) (N)</b>	<b>Deslocamento na Força Máxima (DFa) (mm)</b>
<b>SC-06</b>	4003,59	2,79
<b>SC-07</b>	4281,98	2,62
<b>SC-08</b>	3442,19	3,06
<b>SC-09</b>	4422,97	2,39
<b>Média SC</b>	4142,78	2,71
<b>Desvio padrão SC</b>	433,55	0,28
<b>E5-02</b>	2492,90	1,07
<b>E5-03</b>	1883,87	1,23
<b>E5-04</b>	1808,50	2,34
<b>E5-05</b>	1551,77	0,64
<b>Média E5</b>	1846,18	1,16
<b>Desvio Padrão E5</b>	398,64	0,72

O decréscimo foi mais acentuado que o esperado, podendo ser explicado pelo fato de que o torque aplicado, na porca usada na montagem, de 0,5 Nm, foi o mesmo para as duas geometrias de rebite. Tal valor foi selecionado para favorecer a comparação entre o presente estudo e o conduzido por BLAGA (2011), uma vez que este foi o valor utilizado pelo autor. Quando feita a verificação de acordo com a norma DIN ISO 898/1 o torque máximo recomendado para um parafuso com rosca M5 de passo normal com propriedades semelhantes ao usado neste trabalho (classe 3.6) é de 1,6 Nm. Levando em conta que o rebite vazado tem uma seção resistente equivalente a um parafuso M3 (SHIGLEY 2005), o valor limite sugerido pela mesma norma passa para 0,35 Nm. Estes dados sugerem que durante o

torqueamento para consolidação da junta sobreposta o torque excessivo gerou um dano prévio ao ensaio no rebite, resultando no baixo desempenho e grande dispersão dos resultados obtidos.

Visto que as diferenças nas seções também dificultaram a análise neste caso, os resultados foram comparados na segunda abordagem em gráficos de carga e deslocamento parametrizados em relação à área do rebite. Desta forma, ficou claro mais uma vez a redução da resistência específica da junta vazada M5 sendo esse de 58% menor do que o valor das juntas unidas por rebite sólido M5. Do mesmo modo o deslocamento parametrizado na força máxima foi prejudicado em 53%. Os gráficos comparativos estão apresentados na Figura 5.29 e na Figura 5.30.

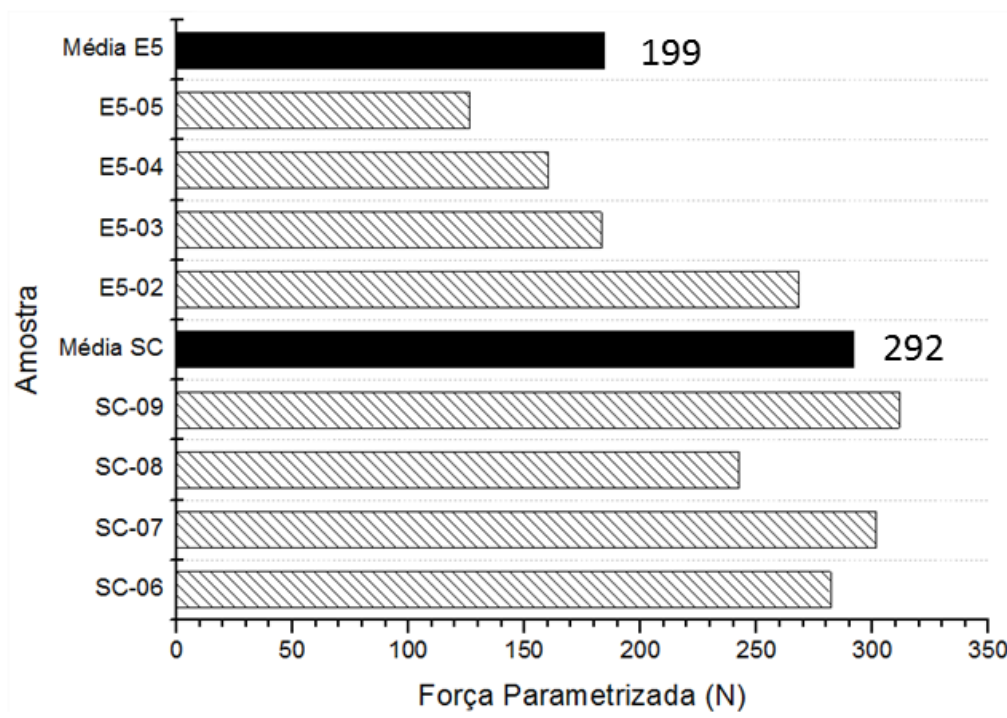


Figura 5.29 Resultados parametrizados de força máxima para os rebites sólidos M5 e vazados M5 representando a resistência específica em cisalhamento das juntas rebitadas.



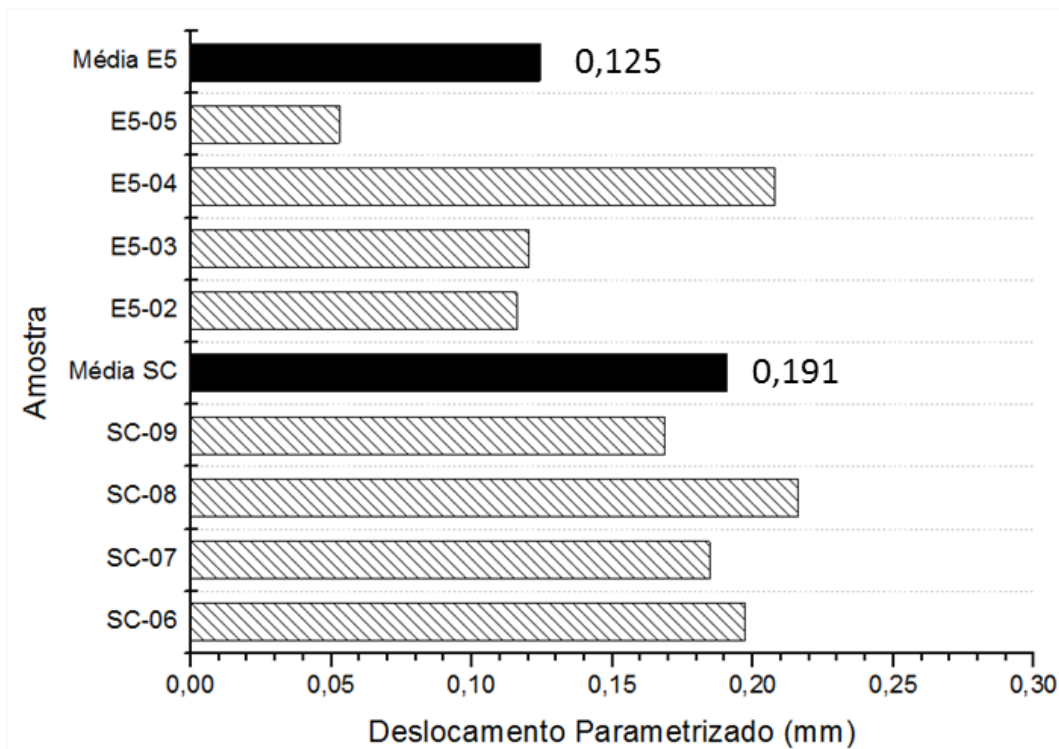


Figura 5.30 Resultados parametrizados de deslocamento máximo para os rebites sólidos M5 e vazados M5 representando a resistência específica em cisalhamento das juntas rebitadas.

Mesmo não obtendo os valores máximos possíveis no desempenho em cisalhamento da junta proposta com o rebite vazado, pode-se considerar que os resultados obtidos foram satisfatórios. Isto porque o uso de rebites vazados permitirá o uso da rebiteagem por fricção em estruturas que exigem um tamanho de maquinário inferior ou que priorizem a redução de peso. Além disso, deve-se considerar que o presente estudo não prevê aplicação da nova geometria em cisalhamento direto, mas sim em tração para os clips aeronáuticos.

Contudo, espera-se que o ajuste do torque possa vir a reproduzir a mesma ou até melhorar resposta do que o obtido nos ensaio de ancoragem entre a relação de redução de área do rebite e ganho em resistência mecânica. Isso é esperado pelo fato do material antes expulso como rebarba, ser deslocado para o interior do rebite vazado, com isso dando forma a um rebite híbrido onde a seção interna, mesmo tendo resistência mais baixa, contribui para a resistência do conjunto. A avaliação da influência do torque de fechamento do rebite não fez parte do escopo desse estudo.

## 6. CONCLUSÕES

A combinação de técnicas de simulação numérica computacional pelo método dos elementos finitos com o planejamento de experimentos e a subsequente análise estatística dos resultados permitiu a redução significativa do número de ensaios mecânicos realizados. Tal metodologia foi fundamental para viabilizar o presente estudo. Devido à essa natureza numérica, a concordância entre os resultados numéricos e experimentais, na faixa de 5 a 15%, mostra a coerência das simplificações e hipóteses aplicadas nos modelos.

Dentre as apreciações realizadas, a comparação visual das zonas de ancoragem obtidas com cada conjunto de parâmetros permitiu uma análise qualitativa do seu desempenho. Porém, a análise baseada na sobreposição das curvas de força x deslocamento foi determinante para a validação dos modelos propostos.

Das quatro geometrias de rebite estudadas para serem aplicadas pelo processo de rebiteamento por fricção, as duas com superfície exterior lisa foram descartadas ainda nas análises qualitativas, devido à sua baixa capacidade de ancoragem quando comparadas com as com rosca externa M5.

Quanto à força máxima suportada pela união, os modelos numéricos e analíticos não apresentaram diferença estatística. Considerando que entre todos os fatores avaliados a força máxima é a que efetivamente será utilizada para avaliar o desempenho da junta em aplicações industriais, pode-se considerar que a geometria desenvolvida atende as necessidades do estudo. A calibração através do ajuste do coeficiente de atrito foi fundamental para a obtenção destes resultados.

A nova geometria de rebite, vazado com rosca externa M5, superou as estimativas iniciais uma vez que era esperado um valor proporcional à redução da área, apresentando resistência específica de ancoragem 11% superior quando comparada com sua equivalente sólida. Além da melhora no desempenho mecânico em tração, foram obtidos ganhos de

processo direto devido à nova geometria minimizar a produção de rebarbas e da redução dos parâmetros de processo em 50%.

Os ganhos de processo irão refletir diretamente na produtividade, uma vez que a etapa de remoção de rebarba não se faz mais presente e que o equipamento de rebiteamento por fricção pode ter seu tamanho reduzido, alcançando áreas menores e de difícil acesso.

Em contraponto, a resistência específica da junta em cisalhamento apresentou resultados aquém do esperado, devido ao torque utilizado para a consolidação da junta ter sido o mesmo utilizado nos modelos já existente e que para a nova geometria proposta pode-se considerar excessivo. Mesmo assim, o desempenho foi satisfatório para a aplicação pretendida que tem seu principal carregamento em tração.

Em linhas gerais, o estudo em questão apresentou como principal contribuição a comprovação da viabilidade da aplicação de rebites vazados com rosca externa M5 na rebiteamento por fricção de materiais usados em aplicações estruturais aeronáuticas. Foram obtidos ganhos de resistência específica (no quesito resistência à tração), minimização da rebarba e redução significativa dos parâmetros de processo. Porém, o processo tem o potencial de ser melhorado para o uso de rebite vazado M5 em aplicações sob carregamentos principais cisalhantes, principalmente pelo fato que o torque de fechamento adequado deve ser otimizado.

Portanto, as geometrias de rebites vazados puderam ser introduzidas como uma geometria alternativa para a rebiteamento por fricção. Estas foram consideradas adequadas para aplicações que requerem alta resistência à tração. Com os valores de resistência ao cisalhamento atuais, obtidas através de testes com juntas produzidas com torque de fechamento não ideal, o rebite é adequado a aplicações de menor requerimento mecânico (força máxima cisalhante menor que 1846,18 N por rebite), que priorizem a redução de peso do conjunto pela redução da área transversal do rebite.

## **7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Em vista dos resultados obtidos, ficam como sugestões para trabalhos futuros os seguintes tópicos:

- Avaliação da influência do diâmetro interno do rebite nas respostas de ancoragem e cisalhamento;
- Determinação da relação do torque de fechamento na resistência ao cisalhamento sob tração das juntas rebitas com rebite vazado M5;
- Avaliação numérica pelo método dos elementos finitos das distribuições de tensões nos rebites vazados em uma estrutura completa;
- Estudo do desempenho em fadiga dos rebites vazados.

## 8. REFERÊNCIAS

ABIBE A. B., AMANCIO-FILHO S. T., dos SANTOS J. F., HAGE JR E., “**Development and Analysis of a New Joining Method for Polymer–Metal Hybrid Structures**”, Journal of Thermoplastic Composite Materials 0892705710381469, doi:10.1177/0892705710381469, first published on November 9, 2010.

ABIBE A. B., AMANCIO-FILHO S. T., DOS SANTOS J. F., HAGE JR. E., ”**Mechanical and failure behaviour of hybrid polymer–metal staked joints**”, Materials and Design 46 (2013) 338–347, ISSN 0261-3069, 2013.

AeroMagazine, junho 2012, “**Airbus consagra o compósito**”, [http://www.aeromagazine.com.br/ seção Indústria \(/artigo/?secao=30\)](http://www.aeromagazine.com.br/seção%20Indústria/(artigo/?secao=30)), por Giuliano Agmont, De Toulouse e Robert Zwerdling em 14 de Junho de 2012.

AIRBUS, <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/out-of-production/a300-600/>, acessado em 12/02/2013.

ALTMAYER J., “**Fundamental characteristics of fricriveted multimaterial joints: effect of process parameters on joint formation and performance**”, Airbus PhD Day 2012, Madrid, 2012.

ALTMAYER J., DOS SANTOS J.F., AMANCIO-FILHO S.T., “**Effect of Friction Riveting Process Parameters on Joint Formation and Performance of Ti alloy /Short-fibre reinforced PEEK joints**”, HZG, Alemanha, 2013.

AMANCIO FILHO S. T., “**Friction Riveting: development and analysis of a new joining technique for polymer-metal multi-materials structures**”, PhD thesis at the Hamburg-Harburg University of Technology, GKSS 2007a, ISSN 0344-9629.

AMANCIO FILHO S.T.; BEYER M.; DOS SANTOS J.F.; “**US 2007.575.149: Method of connecting a metallic bolt to a plastic piece (Verfahren zum Verbinden eines metallischen Bolzens mit einem Kunststoff-Werkstück)**”, US Patent, 2007b.

AMANCIO S.T.; DOS SANTOS J.F.; “**FRICRIVETING: A new technique for joining thermoplastics to lightweight alloy**”, Antec 841; 845, 2008a.

AMANCIO-FILHO S.T.; DOS SANTOS J.F.; “**Development of FricRiveting as a new joining technique for polymer and lightweight alloys**”, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 39, No. 11-12, 2008b.

AMANCIO S.T.; DOS SANTOS J.F.; VENTZKE V.; “**Determination of fracture mechanisms under tensile loading in a commercial available engineering thermoplastic material joined by FricRiveting**”, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Fracture of Polymers, Composites and Adhesives, 7-11 September, 2008c.

AMANCIO-FILHO S.T., ROEDER J., NUNES S.P., DOS SANTOS J.F., BECKMANN F., “**Thermal degradation of polyetherimide joined by friction riveting (FricRiveting). Part I: Influence of rotation speed**”, Polymer Degradation and Stability, 93 (2008d), 1529–1538.

AMANCIO S.T.; DOS SANTOS J.F.; “**Rebitagem por Fricção (“FricRiveting”): Desenvolvimento de uma nova técnica de união para juntas híbridas do tipo polímero-metal**”, XXXV Consolda, ABS, out. 2009b.

AMANCIO-FILHO S.T., DOS SANTOS J.F., “**Joining of Polymers and Polymer–Metal Hybrid Structures: Recent Developments and Trends**”, POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE, 2009c.

AMANCIO-FILHO S.T., “**Henry Granjon Prize Competition 2009 Winner Category A: “Joining and Fabrication Technology” Friction Riveting: development and analysis of a new joining technique for polymer-metal multi-material structures**”, Welding in the World, January 2011, Volume 55, Issue 1-2, pp 13-24

AMANCIO-FILHO S.T., BUENO C., DOS SANTOS J.F., HUBER N., HAGE JR. E., “**On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures**”, Materials Science and Engineering: A, Volume 528, Issues 10–11, 25 April 2012, Pages 3841-3848, ISSN 0921-5093.

ANAWA E.M., OLABI A.G., “**Using Taguchi method to optimize welding pool of dissimilar laser-welded components**”, Optics & Laser Technology, Volume 40, Issue 2, March 2008, Pages 379-388, ISSN 0030-3992.

ANDRADE L.V., ”**Projeto e construção de máquina de solda por atrito e análise das soldas dissimilares**”, Dissertação de mestrado - PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2011.

ATSB, “**Transport safety investigation report**”, Aviation Research and Analysis Report – AR-2007-021 Final.

ASM, “**ASM MATERIALS HANDBOOK METALS**”, ASM INTERNATIONAL, USA, 2006.

AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY, “**Welding Handbook Vol. 2 – Welding Processes**”, 8. ed., USA, 1997.

BILICI M. K., “**Application of Taguchi approach to optimize friction stir spot welding parameters of polypropylene**”, Materials & Design, Volume 35, March 2012, Pages 113-119, ISSN 0261-3069.

BILLMEYER JR. F.W.; “**Textbook of polymer science**”, 2nd ed., Willey-Interscience, 1971.

BLAGA L. A., “**Innovating materials in bridge construction**”, Universitatea “Politehnica” din Timișoara în domeniul inginerie civilă de către, tese de doutorado, Romênia, 2012.

BLAGA L., BANCILĂ R., DOS SANTOS J.F., AMANCIO-FILHO S.T., “**Friction Riveting of glass–fibre-reinforced polyetherimide composite and titanium grade 2 hybrid joints**”, Materials & Design, Volume 50, September 2013, Pages 825-829, ISSN 0261-3069.

BLANCHOT V., DAIDIE A., “**Study and numerical characterisation of a riveting process**”, International Journal of Material Forming, April 2008, Volume 1, Issue 1 Supplement, pp 1275-1278, 2008.

BOEING, <http://www.boeing.com/boeing/history/boeing/m247>, acessado em 21/08/2013.

BORDESOULES, I. et al., “**Trends in developments of Aluminium solutions for aerospace applications**”, In: Proceedings of the European Workshop on Short Distance Welding Concepts for Airframes frames .–WEL-AIR, Hamburg, 13-15 june 2007.

BORGES M.F., “**Análise numérica e experimental do comportamento mecânico de juntas híbridas polímero-metal obtidas através de processo de união por fricção**”, Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, dezembro de 2009.

BORGES M.F., S.T. AMANCIO-FILHO, J.F. DOS SANTOS, T.R. STROHAECKER, J.A.E. MAZZAFERRO, “**Development of computational models to predict the mechanical behavior of Friction Riveting joints**”, Computational Materials Science, Volume 54, March 2012, Pages 7-15, ISSN 0927-0256.

CALLISTER, JR. W. D., “**MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING An Introduction**”, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1991.

CASTRO, P. M., “**Método de Taguchi: Apresentação e caso prático com utilização do SAS**”, Tese de Mestrado em Estatística e Gestão de Informação, Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 1990.

D 5961/D 5961 M-05; “**Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates**”, ASTM International, USA, 2005.

DIN 50125; “**Testing of Metallic Materials - Tensile Test Pieces**”, DIN – Deutsches Institut für Normung E.V. (German National Standard), 2004.

DIN 53455; “**Prüfung von Kunststoffen**”, Zugversuch. DIN – Deutsches Institute für Normung E. V. (German National Standard), 1981.

FISHER, R.A. **The Design of Experiments**, Hafner Press, A Division of Macmillan Publishing Co. Inc., New York, USA, 1971.

GE – General Electric®, “**PEI ULTEM® 1000 data sheet, unreinforced 392F (200C) DTUL at 264 psi, UL94 V-0/5V rated. In 1000-1000 ONLY--USP Class VI, FDA food contact and tripartite (modified ISO 10993-1)**”, GE Plastics, USA, 2006.

GHANI J. A., JAMALUDDIN H., RAMLI R., AB RAHMAN M. N., “**DOE in Solving Industrial Problem: Case Study of the Application of Taguchi Method in Riveting Process**”, Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Istanbul, Turkey, July 3 – 6, 2012



GARDSTAN J., **“Simulation of mechanical joining for automotive applications”**, Licentiate thesis from RIT, Department of Mechanics, Sweden, 2006.

GRUJICIC M.; SELLAPPANV.; KOTRIKA S.; ARAKERE G.; OBIEGLO A.; ERDMANN M.; HOLZLEITNER J.; **“Suitability analysis of a polymer–metal hybrid technologybased on high-strength steels and direct polymer-to-metal adhesion for use in load-bearing automotive body-in-white applications”**, Journal of Materials Processing Technology, Nro 209, 2009.

GOUSHEGIR S.M., DOS SANTOS J.F., AMANCIO-FILHO S.T., **“Friction Spot Joining of aluminum AA2024/carbon-fiber reinforced poly(phenylene sulfide) composite single lap joints: Microstructure and mechanical performance”**, Materials & Design, Volume 54, February 2014, Pages 196-206, ISSN 0261-3069

HARPER C.A., **“Modern Plastics Handbook”**, McGraw Hill, Vol. 1, 1999.

HIGASHI, A.L.C., LIMA, M.S.F., **“Occurrence of defects in laser beam welded Al-Cu-Li sheets with T-Joint configuration“**, Journ. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos, Vol.4, No 4, pp. 421-429, Oct.-Dec., 2012

HIGH-PERFORMANCE COMPOSITES, **“Paris, Oshkosh airshow highlights”**, Vol. 19, Nro 5, pag. 35-40, setembro de 2011.

HOLLOWAY L., **“Polymer Composites for Civil and Structural Engineering”**, London, Blackie Academic & Professional, 1993.

HZG,[http://www.hzg.de/institute/materials\\_research/structure/materials\\_mechanics/solid\\_state\\_joining\\_processes/techniques/index.html.en](http://www.hzg.de/institute/materials_research/structure/materials_mechanics/solid_state_joining_processes/techniques/index.html.en), acessado em 18/07/2013.

KING, D. et al., 2009, **“Advanced aerospace materials: past, present and future”**, Aviation and the environment, Vol. 3,pp. 22-27.

KINLOCH, A.J., **“Adhesion and Adhesives Science and Technology”**, 1ed.London, Chapman and Hall, 1987.

LAGE Y.E., **“Análise Estrutural à Asa da aeronave Lockheed Martin C-130H”**, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Aeroespacial, Universidade técnica de Lisboa, 2009.

LYON R., **“Fire Safety Highlights Report”**, FAA – Federal Aviation Administration/Fire Safety, 1998.

MARQUES P.J.; MODENESI P.J.; BRACARENSE A.Q, **“Soldagem: Fundamentos e Tecnologia”**, Editora UFMG, 2005.

MANGALGIRI, P.D., 1999, **“Composite materials for aerospace applications”**, Bulletin of Materials Science, Vol. 22, pp.657-664.

MAZZAFERRO J.A., STROHAECKER T.R., DOS SANTOS J.F., ROSENDO T.S., MAZZAFERRO C.C., RAMOS F.D., TIER M.D., **“Preliminary Study on the Mechanical Behavior of Friction Spot Welds”**, IIW, Germany, 2008.

MIDDLETON, D., **“Composite Materials in Aircraft Structures”**, Longman Scientific & Technical, Harlow, Essex, p. 228-343. 1990

MORETO J. A., **“Estudo da corrosão e corrosão-fadiga em ligas de Al e Al-Li de alta resistência para aplicação aeronáutica”**, tese de doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, USP – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, **“Fastener Design Manual”**, NASA Reference Publication 1228, Washington, USA, 1990.

NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, **“Celebrating a Century of Flight”**, NASA Publication SP-2002-09-511-HQ, ISBN 0-16-067541-3, US, 2002.

NASCIMENTO A. N. S., **“Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos”**, Dissertação realizado no âmbito do mestrado integrado em engenharia mecânica ramo de produção, desenvolvimento e engenharia automóvel , FEUP - Universidade do Porto, Portugal, janeiro de 2013.

NETO J. A. B. P., **“Estudo Paramétrico de Juntas Adesivas em Material Compósito”**, Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de mestre em engenharia mecânica, FEUP – Universidade do Porto, Portugal, 2011.

PETZOW G., **Metallographic etching, techniques for metallography, ceramography and plastography**, 2<sup>nd</sup> ed,ASM International, USA, 1999.

PHADKE, S., **“Quality Engineering Using Robust Design”**, AT&T. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, capítulo 3 p. 41-66., USA, 1989.

PIETA G. D., DOS SANTOS J. F., **“Friction Spot Welding of a 2198-T8 aluminium alloy: process optimization and parameters”**, ECAA 2011, 5-7 outubro 2011, Bremen, 2011.

REZENDE M. C., **“Fractografia de Compósitos Estruturais”**, Divisão de Materiais/IAE/CTA, São José dos Campos/SPPolímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 17, nº 3, 2007

RECKTENWALD D., **“Advanced adhesives foster hybrid structures”**, Machine Des. 77 (21), pp. 124-126, 2005.

RODRIGUES C.F., BLAGA L.A., DOS SANTOS J. F., CANTO L. B., HAGE JR. E., AMANCIO-FILHO S.T., **“Fricriveting of aluminum 2024-t351 and polycarbonate: temperature evolution, microstructure and mechanical performance”**, Journal of Materials Processing Technology, Special Issue “Joining by Forming”, 2013.

SIMULIA – DassaultSystèmes, **“ABAQUS Documentation v.12.1-1”**, under licence for GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Germany, 2012-2013.

da SILVA L.F.M; OCHSNER A.; **“Modeling of Adhesively Bonded Joints”**, Springer Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-79055-6, 1ª edição, 2008.

da SILVA L.F.M; MAGALHÃES A.G; MOURA M.F.S.F.; **“Juntas Adesivas Estruturais”**, Publindústria, ISBN 978-972-8953-21-8, 1ª edição, 2007.

SHIGLEY J. E., MISCHKE C. R., **“Projeto de Engenharia Mecânica”**, Bookman, 2005.

SOUZA, R. J., **“Desenvolvimento, Projeto e Construção de um Equipamento de Reparo de Trincas por Atrito”**, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2006.

SPITTLE P., **“SPECIAL FEATURE: FLIGHT, Gas turbine technology”**, ROLLS-ROYCE Ansty, Coventry CV7 9JR, UK504 PHYSICS EDUCATION 38(6), 0031-9120/03/060504+08, IOP Publishing Ltd, 2003.

STRUERS COMPANY, [www.struers.com](http://www.struers.com), acessado em 11/01/2012

TAGUCHI, G., **“System of Experimental Design”**, Vol 1. American Supplier Institute, Inc., Dearborn, Michigan, USA, 1991.

TAVARES S. M. O., **“Design and Advanced Manufacturing of Aircraft Structures using Friction Stir Welding”**, July 2011

TABORD., **“The hardness of metals”**, Oxford University Press, New York, 1951.

THE WALL STREET JOURNAL, **“Novos materiais revolucionam aviões”**, [www.wsj.com](http://www.wsj.com), por D. MICHAELS, edição de segunda-feira, 17 de Junho, 2013.

Van der LINDEN, F.R., **“The Boeing 247: The First Modern Airliner”**, 1991

ZOELLNER O.J.; EVANS J.A.; **“Plastic-metal hybrid: A new development in the injection molding technology”**, ANTEC 2002 Annual Technical Conference, San Francisco, CA, pp. 1–4, 2002.

## APÊNDICE A

Neste apêndice estão apresentados na Figura 8.1 os resultados das três análises químicas realizadas no material utilizado para a confecção dos rebites de titânio.

30/05/2012 17:23:16

### QMatrix Analysis Results

Sample Identification										
SI/Protocolo	TempC			Operador			IDAmostra			
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Fe	V
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.013	<0.0050	<0.00010	<0.0010	0.0034	<0.0050	0.016	0.0024	<0.010	<0.010
2.	0.014	<0.0050	<0.00010	<0.0010	0.0045	<0.0050	0.022	<0.0020	<0.010	<0.010
3.	0.022	<0.0050	<0.00010	<0.0010	0.0085	<0.0050	0.020	<0.0020	0.025	0.010
□										
↑										
→	<b>0.016</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>&lt;0.00010</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>0.0055</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.019</b>	<b>0.0021</b>	<b>0.015</b>	<b>&lt;0.010</b>
∩										
♣										
	W	N	Nb	O	Ti					
	%	%	%	%	%					
1.	<0.025	<0.0050	<0.010	0.108	99.79					
2.	<0.025	0.016	<0.010	0.126	99.75					
3.	<0.025	0.016	<0.010	0.160	99.69					
□										
↑										
→	<b>&lt;0.025</b>	<b>0.012</b>	<b>&lt;0.010</b>	<b>0.131</b>	<b>99.74</b>					
∩										
♣										

Figura 8.1 Folha de resultado das análises químicas do Titânio-Gr2.

## APÊNDICE B

Nesta seção estão apresentados imagens e gráficos complementares para o melhor entendimento e visualização dos resultados dos ensaios de ancoragem (tração) discutidos neste trabalho. Na Figura 8.2, podem ser observados os resultados dos quatro ensaios mecânicos de ancoragem dos rebites vazados M5 com a configuração de parâmetros (E5) proposta pelo modelo estatístico de Taguchi, em comparação com os rebites sólidos M5.

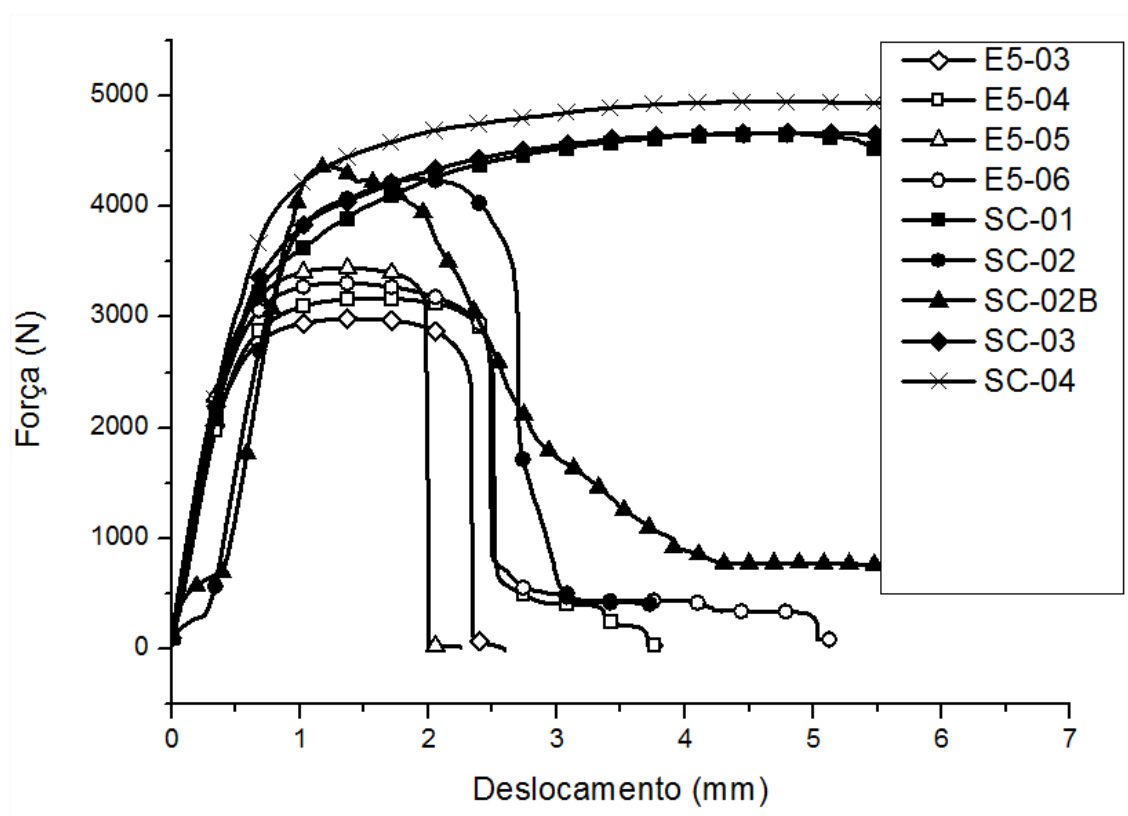


Figura 8.2 Gráfico com os resultados dos quatro ensaios mecânicos de ancoragem dos rebites vazados M5 com a configuração de parâmetros (E5) proposta pelo modelo estatístico de Taguchi, em comparação com os rebites sólidos M5.

Os modos de falha das amostras de ancoragem (tração) ensaiadas, as quais os resultados foram apresentados acima na Figura 8.2, estão nas figuras Figura 8.3 e Figura 8.4, para os rebites sólidos M5 (SC) e vazados M5 (E5), respectivamente.

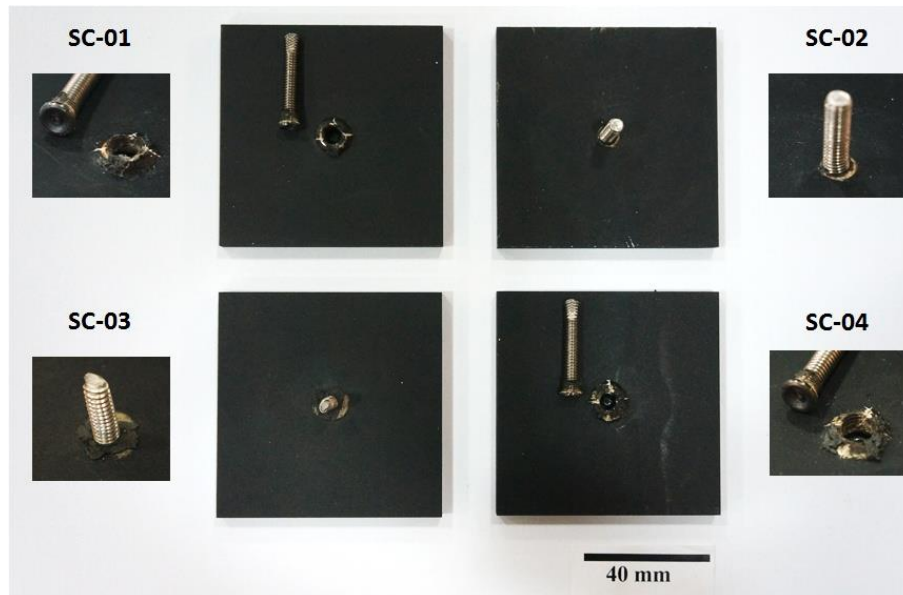


Figura 8.3 Amostras com rebite sólido M5 após os ensaios de ancoragem, evidenciando o modo de falha na interface do rebite.

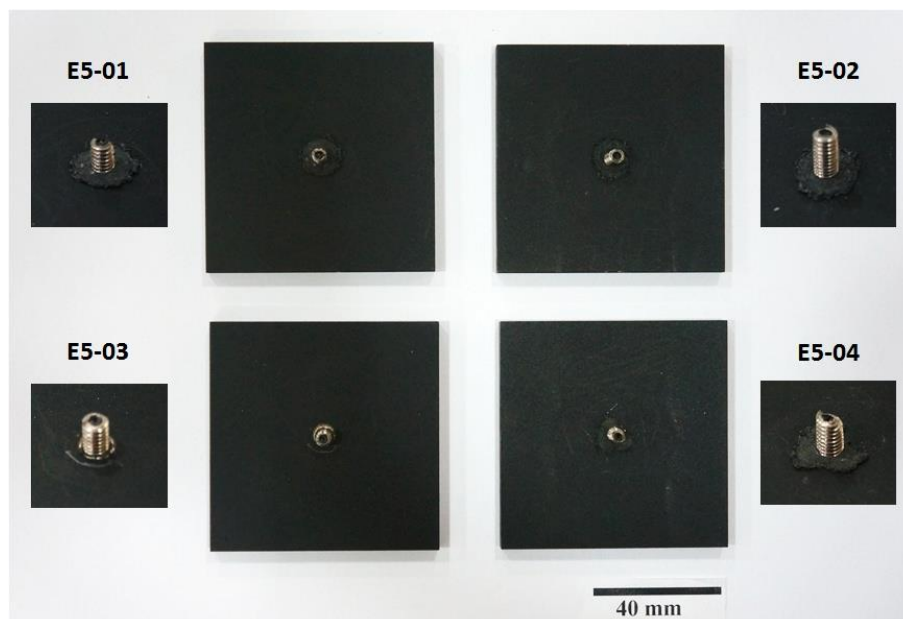


Figura 8.4 Amostras com rebite vazado M5 após os ensaios de ancoragem evidenciando, o modo de falha na seção transversal do rebite.

## APÊNDICE C

Nesta seção estão apresentados imagens e gráficos complementares para o melhor entendimento e visualização dos resultados dos ensaios de cisalhamento sob tração. Na Figura 8.5 podem ser observados e comparados os resultados dos quatro ensaios mecânicos de cisalhamento sob tração dos rebites vazados M5 com a configuração de parâmetros (E5) proposta pelo modelo estatístico de Taguchi, em comparação com os rebites sólidos M5.

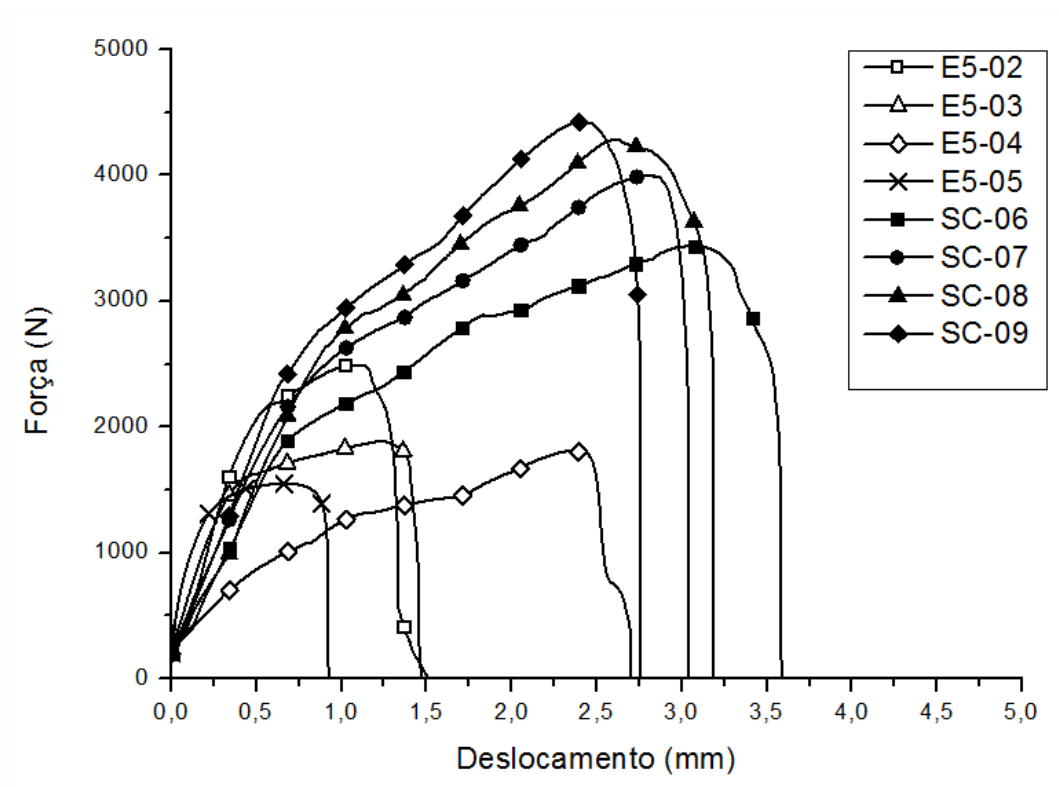


Figura 8.5 Gráfico com os resultados dos quatro ensaios mecânicos de cisalhamento sob tração dos rebites vazados M5 com a configuração de parâmetros (E5) proposta pelo modelo estatístico de Taguchi, em comparação com os rebites sólidos M5.



Os modos de falha das amostras ensaiadas em cisalhamento sob tração, as quais os resultados foram apresentados na Figura 8.5, estão expostos nas figuras Figura 8.6 e Figura 8.7, para os rebites sólidos M5 (SC) e vazados M5 (E5), respectivamente.

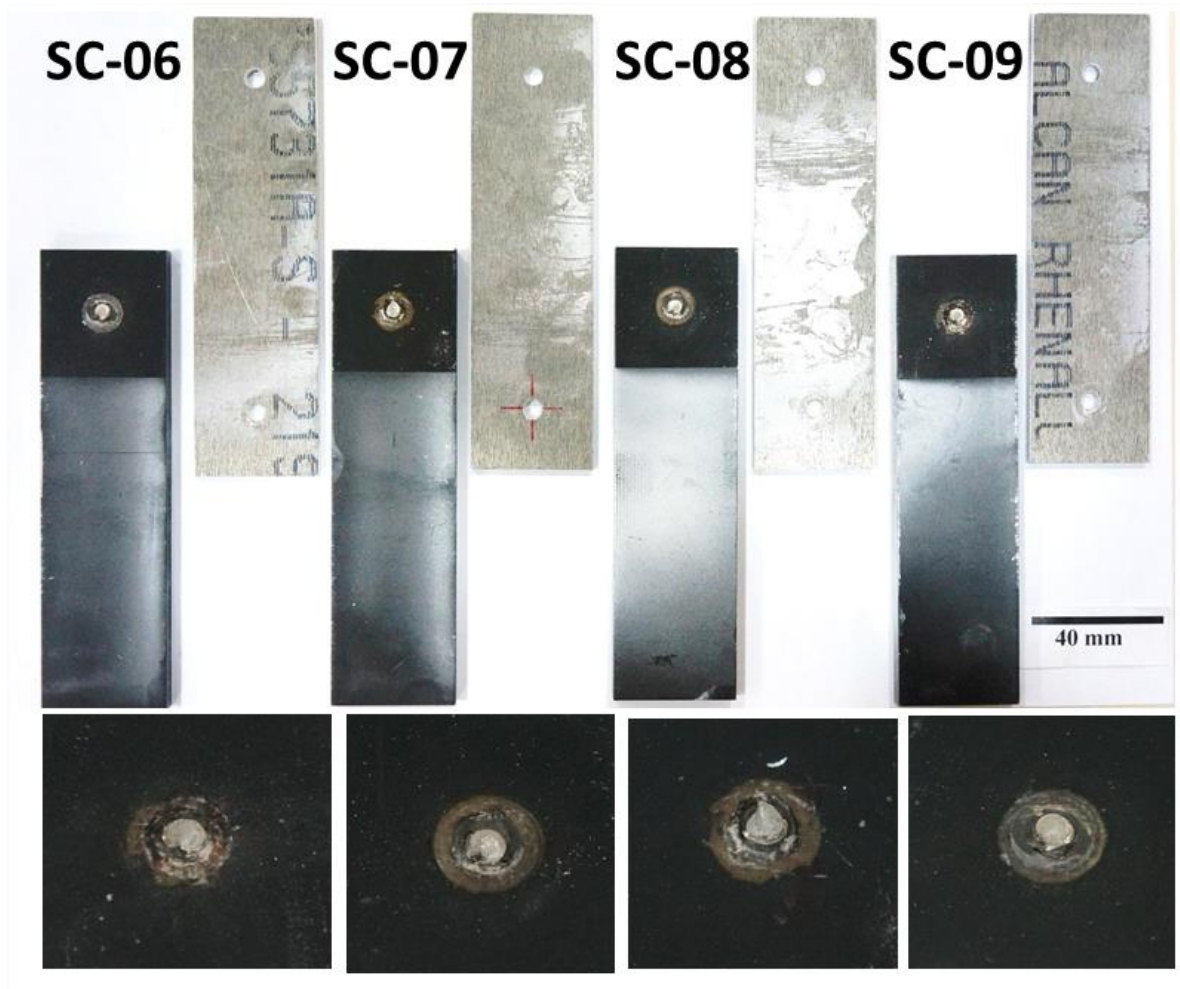


Figura 8.6 Amostras com rebite vazados M5 após os ensaios de cisalhamento sob tração, evidenciando o modo de falha de cisalhamento da seção transversal do rebite.

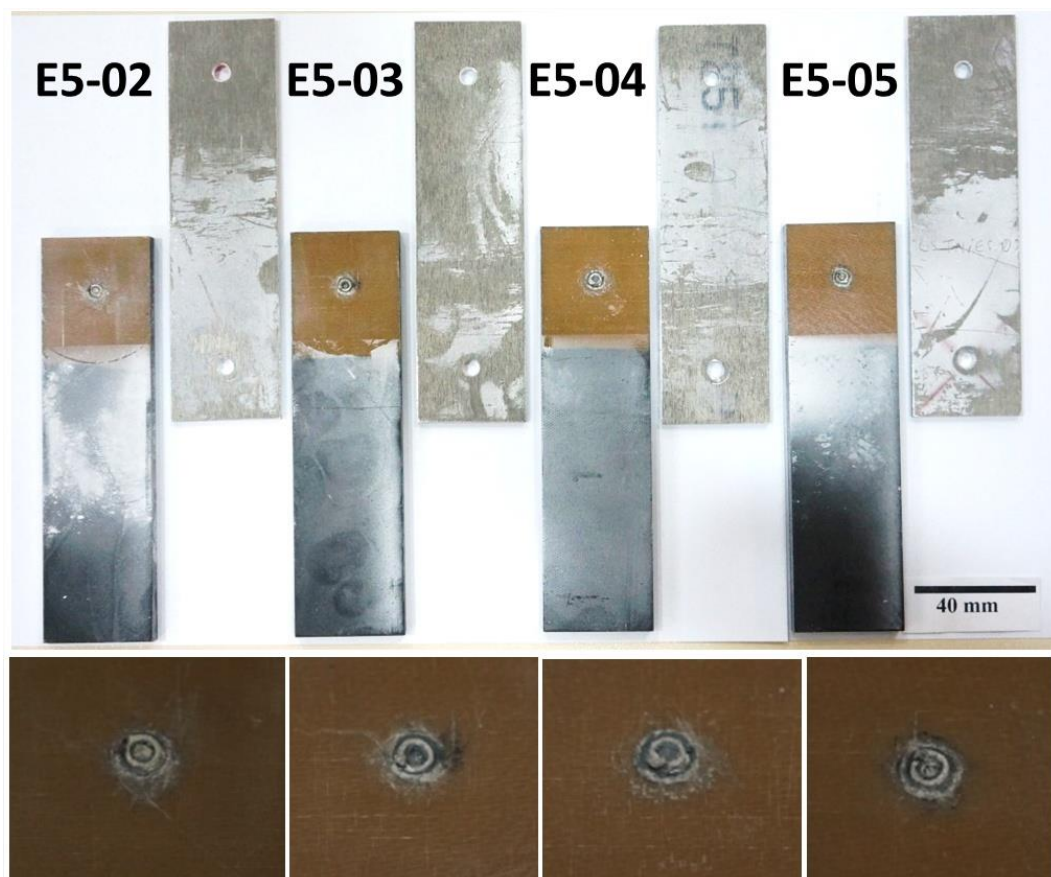


Figura 8.7 Amostras com rebite sólido M5 após os ensaios de cisalhamento sob tração, evidenciando o modo de falha de cisalhamento da seção transversal do rebite.