

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS HÍBRIDAS
POLÍMERO-METAL OBTIDAS ATRAVÉS DE PROCESSO DE UNIÃO POR FRICÇÃO

por

Marcelo Favaro Borges

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2009



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS HÍBRIDAS
POLÍMERO-METAL OBTIDAS ATRAVÉS DE PROCESSO DE UNIÃO POR FRICÇÃO**

por

Marcelo Favaro Borges

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Walter Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Prof.^a Dra. Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Dr. Rafael Antônio Comparsi Laranja

Porto Alegre, Dezembro de 2009.

Dedico este trabalho aos familiares e amigos que sempre estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente 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. A minha namorada Fabiane, pelo apoio, compreensão, companheirismo e carinho. Ao meu orientador Prof. Dr. José A. E. Mazzaferro pelo suporte e auxílio na elaboração deste trabalho. Ao Dr. Sergio de Traglia Amancio Filho pela ajuda e por disponibilizar os dados de sua pesquisa que serviram de base para este trabalho. A UFRGS em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica e seus professores pelo esforço para oferecer ensino de qualidade e apoio dentro e fora de sala de aula. Aos colegas e amigos pelas longas noites de estudo e momentos de lazer.

BORGES, M. F. **ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS HÍBRIDAS POLÍMERO-METAL OBTIDAS ATRAVÉS DE PROCESSO DE UNIÃO POR FRICÇÃO**. 2009. 25 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

RESUMO

O processo de rebiteamento por fricção permite unir componentes de materiais diferentes, com agilidade e robustez. Isto se dá através de um processo de união por fricção, do qual se obtém juntas híbridas polímero-metal. Durante o desenvolvimento desse processo uma completa análise metalúrgica foi realizada, porém o campo computacional não foi contemplado. Sendo assim, o presente trabalho visa obter um modelo que represente, com precisão aceitável, o comportamento da junta em questão. Para isso foi iniciado um estudo numérico computacional, utilizando o software ABAQUS CAE 6.8-1 como ferramenta auxiliar, sobre o comportamento mecânico de uniões multi-materiais de placas sobrepostas monorrebitadas submetidas a carregamento cisalhante. Juntamente foram realizados ensaios mecânicos com o intuito de fornecer dados para a validação dos resultados gerados. Como resultados foram obtidos modelos numéricos que representam com erro entre 5 e 10% o comportamento mecânico da junta híbrida estudada.

PALAVRAS-CHAVE: Juntas Híbridas Polímero-Metal, Rebiteamento por Atrito, União por Fricção, Método dos Elementos Finitos.

BORGES, M. F. NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF POLYMER-METAL HYBRID JOINTS OBTAINED THROUGH FRICTION BASED PROCESS. 2009. 25 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ABSTRACT

Friction Riveting process was developed allowing built dissimilar materials joints, faster and easily. This is possible through a friction based process which combine polymer and metal into a hybrid joint. During the development of this new technique a complete metallurgical study was performed, however a computational model has not been taken into consideration. Therefore, the main objective of this work is creating a Finite Elements Method model to represent the mechanical behavior, with acceptable accuracy, of the studied joint. To reach this goal, a numerical study will be conducted, using the software ABAQUS CAE 6.8-1 as an auxiliary tool, about the static mechanical behavior of spot multi-materials overlapped joints subjected to shear loading. Along the work, mechanical tests will be performed in order to provide data to validate the model results. The results obtained in the numerical models represents, with an error between 5 and 10%, the mechanical behavior of the studied hybrid joint.

KEYWORDS: Polymer-Metal Hybrid Joints, FricRiveting, Friction Joining, Finite Elements Method.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. SOLDAGEM POR FRICÇÃO	1
1.2. REBITAGEM POR FRICÇÃO	2
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1. POLÍMEROS	3
3.2. TERMOPLÁSTICOS	3
3.3. LIGAS DE ALUMÍNIO	4
3.4. UNIÃO DE MATERIAIS DISSIMILARES	4
3.4.1. MEF: APLICADO A UNIÕES HÍBRIDAS	4
3.5. PROPRIEDADES DO PROCESSO E DA UNIÃO	4
3.5.1. POTENCIAL DE APLICAÇÃO	4
3.5.2. VANTAGENS E LIMITAÇÕES	5
3.5.3. PARÂMETROS DE PROCESSO	5
3.5.4. GEOMETRIA E PROPRIEDADES DA JUNTA	6
4. MATERIAIS E MÉTODOS	7
4.1. POLIETERIMIDA (PEI)	7
4.2. AA2024-T351	8
4.3. JUNTAS HÍBRIDAS SOBREPOSTAS	8
4.4. MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS	9
4.4.1. MODELOS DE MATERIAL	9
4.4.2. MODELOS DA JUNTA DE PLACAS SOBREPOSTAS	10
4.5. ENSAIOS MECÂNICOS	12
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
6. CONCLUSÕES	19
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20
APÊNDICE A	22
ANEXO A	24

1. INTRODUÇÃO

Diante da pressão global para o cumprimento das novas metas de redução de emissões de gases poluentes e do constante aumento dos preços dos combustíveis nos últimos 10 anos, a indústria da mobilidade busca reduzir o peso e aumentar a eficiência de seus produtos [Volkswagen AG, 2004; Barsoum, 2003]. Tendo em vista que estruturas compostas exclusivamente por materiais metálicos não são capazes de atingir estes novos níveis, a busca por alternativas passa a ser necessária [Gavine, 2005].

Como resultado, o uso de componentes fabricados a partir de materiais não metálicos, como polímeros, compósitos e cerâmicos, se intensifica a cada novo modelo lançado pelo setor da mobilidade. A utilização destes traz consigo uma redução considerável no peso final dos componentes, porém gera uma elevação significativa nos custos, como observado por Grujicic et al., 2009. Por hora, estas novas opções não são capazes de substituir completamente os materiais metálicos e com isso se apresenta um novo tipo de construção híbrida obtida a partir da combinação de dois ou mais materiais, como por exemplo, polímeros e metais (PMH) [Grujicic et al., 2008]. Tal combinação resulta em estruturas com alto desempenho mecânico, dos metais, aliado a leveza dos materiais poliméricos [Goral et al., 2005]. Essa alternativa aos métodos convencionais permite alcançar novos patamares no que se diz respeito à relação peso/potência, como relatado por Mavel, 1999 a importância dessa melhora se apresenta diretamente na redução do consumo de combustíveis fósseis. Atrelado a estes benefícios passa a existir o desafio de unir materiais dissimilares de forma rápida e eficiente a fim de se obter uma estrutura única e coesa.

Dentre as novas técnicas de união de materiais se apresenta a soldagem por fricção, processo que tem se destacado quando o objetivo é a soldagem de materiais de baixo peso. Isto decorre principalmente do fato de se evitar a fusão do material, fator diferencial quando o objetivo é a união de ligas de alumínio de alta resistência e difícil soldabilidade.

1.1. Soldagem por fricção

A soldagem por fricção (do inglês "*Friction Welding*"), em sua configuração básica, é um processo de união de materiais fundamentado no aquecimento local gerado pelo atrito entre dois componentes: o primeiro em rotação e o segundo fixo.

O processo é composto por quatro estágios distintos, representados esquematicamente na Figura 1.1: início da rotação (I), avanço/contato (II), aquecimento/deformação plástica (III) e caldeamento/forjamento (IV) [Marques et al., 2005].

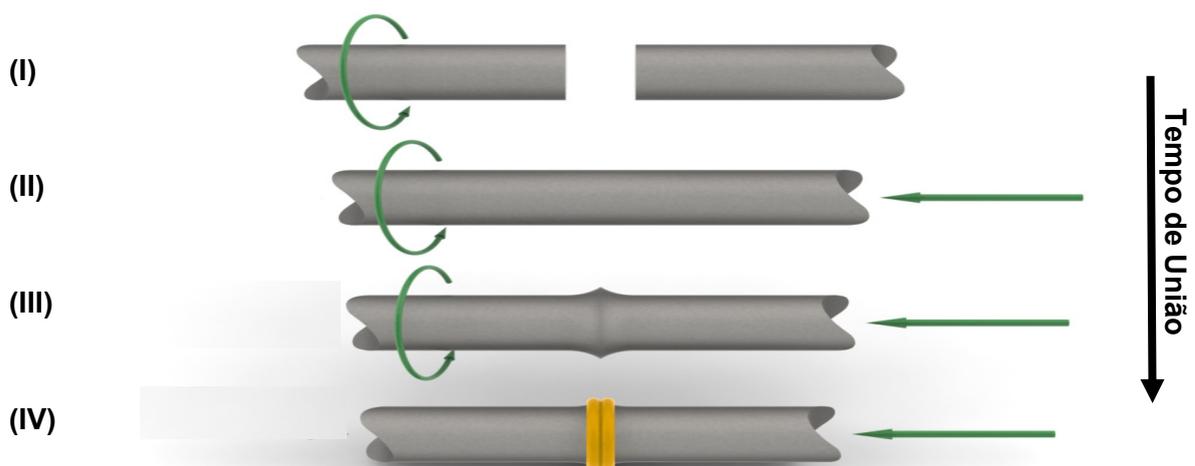


Figura 1.1 – Representação esquemática do processo de soldagem por fricção (FW). Adaptado de [Marques et al., 2005]

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

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.

Recentemente foram desenvolvidos outros processos baseados em fricção, dos quais se destacam a soldagem por fricção e 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). Derivado dos processos de soldagem a ponto por atrito, a rebiteagem por fricção (“FricRiveting” do inglês “*Friction Riveting*”) 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 [Marques et al., 2005].

1.2. Rebiteagem por Fricção

A rebiteagem por fricção, representada esquematicamente na Figura 1.2, se apresenta como um processo de união por fricção entre materiais dissimilares que dispensa grandes preparações prévias ao processo, o mesmo foi patenteado pela GKSS Forschungszentrum (Alemanha) em 2007 [Amancio et al., 2007]. Em sua configuração principal um pino sólido de material metálico (rebite) 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 uma deformação plástica na ponta do pino. Isto se dá pela alta aceleração centrípeta combinada com a pressão aplicada. Por fim a rotação é desacelerada enquanto 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 que corresponde a uma âncora parabólica (rebite) com aproximadamente o dobro do diâmetro inicial do pino. Após um breve intervalo de tempo a junta consolida.

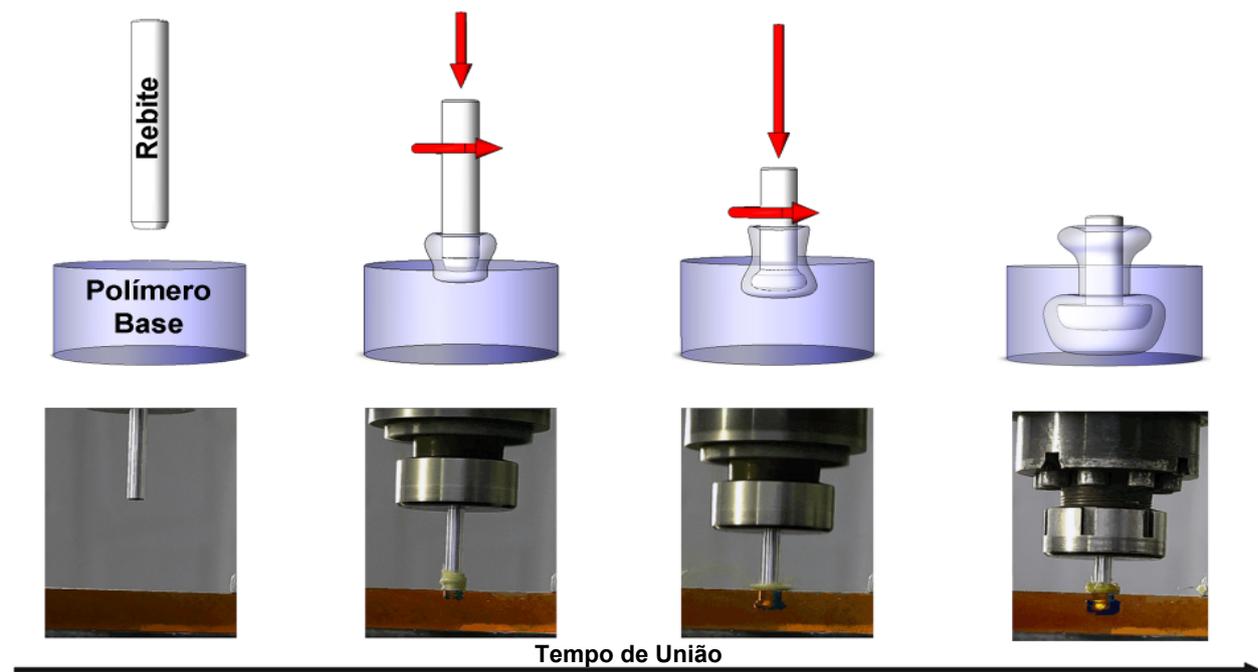


Figura 1.2 – Representação esquemática do processo de rebiteagem por fricção (“FricRiveting”).

Adaptado de Amancio e dos Santos, 2009.

Quando comparado ao uso de rebites, o mesmo dispensa a necessidade de pré-furos, já na comparação ao uso de adesivos químicos, dispensa a preparação superficial e o tempo de cura dos mesmos. Em linhas gerais 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 valor para sua aplicação.

Como produtos finais do processo apresentam-se juntas híbridas polímero-metal as quais possuem baixa densidade e elevada resistência mecânica. Durante o desenvolvimento deste, uma completa análise metalúrgica foi realizada por Amancio, 2007, porém o campo computacional não foi contemplado.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho visa obter um modelo numérico computacional que represente com erro aceitável (até 15%) o comportamento da junta, híbrida de placas sobrepostas monorrebitada por fricção, em comparação com os resultados obtidos em ensaios mecânicos. Para tal será iniciado um estudo baseado no método dos elementos finitos (FEM), utilizando o software ABAQUS CAE 6.8-1 como ferramenta auxiliar, no qual serão modelados inicialmente os materiais envolvidos e em seguida as uniões produzidas a partir do processo em questão, submetidas a carregamento cisalhante estático. Serão analisadas duas situações de carregamento na forma de deslocamentos prescritos aplicados, as quais serão repetidas em ensaios experimentais a fim de fornecer dados para validação dos modelos gerados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Polímeros

A matéria prima da qual se obtém os polímeros chama-se monômero, este é obtido em sua maioria a partir do petróleo ou do gás natural. O mesmo também pode ser processado 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].

Há diversas possíveis classificações para os polímeros dentre as quais 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) [Billmeyer, 1971].

3.2. Termoplásticos

São os chamados plásticos, estes compõem a maior parcela dos polímeros comerciais, sua principal característica é a capacidade serem fundidos diversas vezes. Logo, sua reciclagem é possível, característica bastante desejável na conjuntura atual que privilegia o uso de produtos ecologicamente corretos. As propriedades mecânicas variam conforme o plástico: sob temperatura ambiente podem ser maleáveis, rígidos ou mesmo frágeis. Através da adição de cargas ou fibras durante seu processamento é possível a alterar suas propriedades mecânicas e químicas [Billmeyer, 1971].

Quanto a sua estrutura são compostos por moléculas lineares 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 politereftalato de etileno (PET), o policloreto de vinila (PVC), o polimetilmetacrilato (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 diversos tipos de aplicação. 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: excelente estabilidade dimensional, boa rigidez a temperaturas elevadas, comportamento mecânico bem definido, boa resistência mecânica, baixa inflamabilidade e reduzida emissão de fumaça quando incinerado, devido a isso é amplamente aplicado em reforços estruturais aeronáuticos, componentes automotivos e itens de acabamento de interiores [Lyon, 1998]. Adicionalmente, apresenta elevada temperatura de transição vítrea que varia entre 215 e 220 °C.

3.3. 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 a corrosão e elevada resistência mecânica. A resistência a corrosão deve-se a formação de um fino filme de Al_2O_3 , muito aderente e não permeável. Algumas ligas chegam a possuir propriedades mecânicas superiores aos aços estruturais.

Dentre as ligas de alumínio mais utilizadas pelo setor da mobilidade as séries AA2XXX, AA6XXX, AA7XXX e AA8XXX se destacam, pois apresentam a possibilidade de receber tratamento térmico (solubilização, envelhecimento e recozimento) através do qual se obtém significativa elevação nas suas propriedades mecânicas.

A liga AA2024-T351 (liga com tratamento térmico de tempera, solubilização e posterior encruamento a frio seguidos de alívio de tensões residuais por deformação) é encontrada em grande parte das aplicações automotivas e aeronáuticas devido à baixa sensibilidade aos efeitos de fadiga [Lage, 2009].

3.4. União de Materiais Dissimilares

A união de materiais dissimilares apresenta como maior entropia 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 consequente falha da união por fadiga.

Em meio às opções tradicionais de união a utilização de elementos de fixação (parafusos e rebites) e o uso de adesivos estruturais como resinas epóxi e fenólicas se destacam [da Silva et al., 2007; Recktenwald, 2005]. Entretanto estes necessitam de várias etapas de preparação resultando em um aumento nos tempos e nos custos de produção. Dentre as técnicas recentes se destacam a injeção direta de nervuras plásticas em chapas (IMA/PMA) [Zoellner e Evans, 2002] e a rebiteagem auto-perfurante (SPR) [J. Gardstan, 2006].

Como alternativa a essas, se apresenta a rebiteagem por fricção ("FricRiveting") [Amancio e dos Santos, 2008a], um novo processo de união multi-material baseado no conceito da soldagem por fricção (FW). Apresentando como diferencial o reduzido tempo de produção e boa resistência mecânica. O processo ainda agrega como vantagem uma baixa produção de resíduos, sendo os mesmos passíveis de reciclagem e não agressivos ao meio-ambiente. Mostrando-se como uma alternativa atrativa frente às técnicas disponíveis.

3.4.1. MEF: Aplicado a Uniões Híbridas

A aplicação de ferramentas numéricas computacionais possibilita análise de modelos físicos complexos em ambiente virtual, reduzindo o número de testes experimentais a serem realizados e consequentemente os custos de desenvolvimento. A utilização do método dos elementos finitos, 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 deformações é importante quando o intuito é aprimorar a geometria da junta e complementar o entendimento de seus mecanismos de falha. Nenhum trabalho anterior foi realizado visando analisar o processo de rebiteagem por fricção sob a abordagem numérico computacional.

3.5. Propriedades do Processo e da União

3.5.1. Potencial de Aplicação

As principais aplicações visadas para o processo de rebiteagem por fricção são unir peças sobrepostas e ater insertos de alumínio em termoplásticos de alto desempenho, que

posteriormente podem ser anexados a outros materiais/estruturas através de elementos de fixação convencionais ou até mesmo por conformação. Este tipo de união é encontrada em sua maioria nos setores: automotivo, Figura 3.1, aeronáutico e aeroespacial [Wright e Lutz, 2005], os quais foram os pioneiros na adoção de componentes híbridos como soluções estruturais.

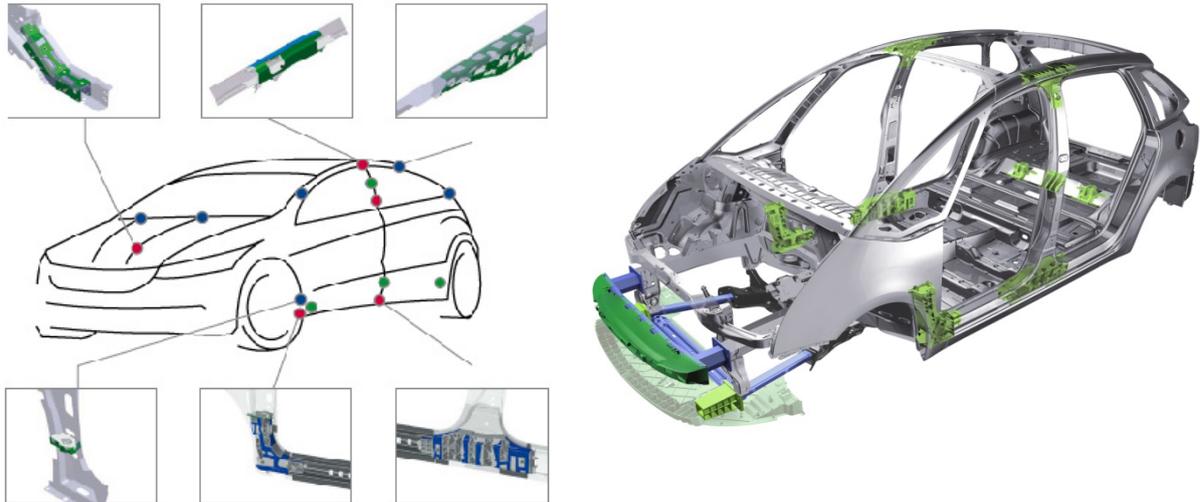


Figura 3.1 – Exemplos de reforços (insertos) estruturais poliméricos em componentes metálicos aplicados em automóveis (Estruturas Híbridas Polímero-Metal). [Fink, 2007]

3.5.2. Vantagens e Limitações

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

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

3.5.3. Parâmetros de Processo

Após a união consolidada, a porção do pino de alumínio inserida na matriz polimérica assume a forma de uma âncora com geometria característica do processo. A sua forma varia de acordo com os parâmetros usados para a obtenção da mesma. Como principais variáveis se apresentam: a rotação do pino, o tempo de aquecimento, a pressão de fricção, a razão de penetração e pressão de forjamento (Figura 3.2 A). O processo pode ser decomposto em cinco etapas (Figura 3.2 B) [Amancio, 2007]:

- 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 polimérica.
- A Etapa II (avanço) tem início após a fusão/amolecimento do polímero, enquanto o rebite avança no sentido axial o desentrelaçamento das cadeias do polímero (cisalhamento interno) continua a elevar o aporte térmico.

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

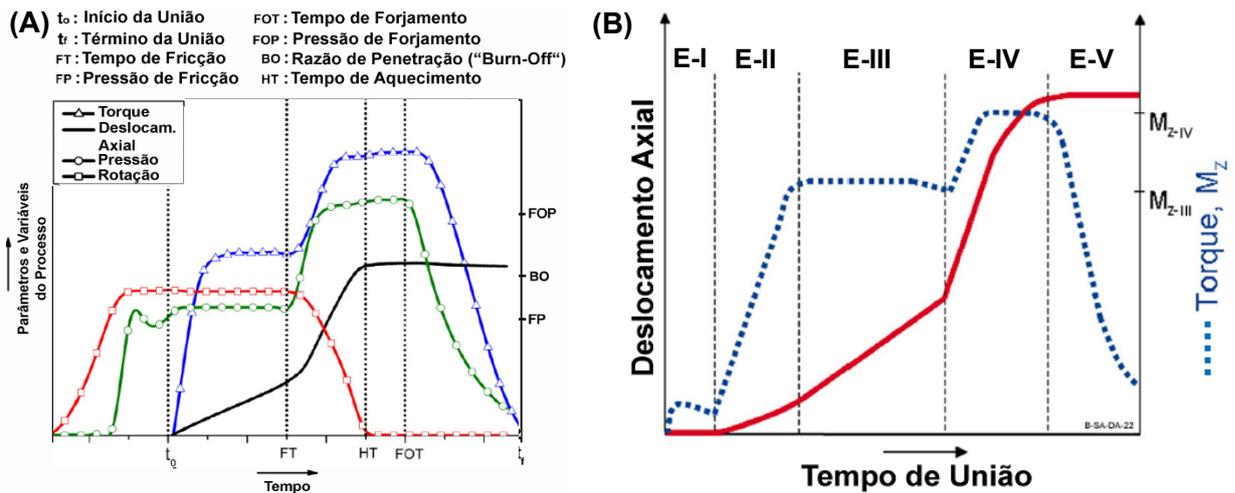


Figura 3.2 – Rebitagem por fricção: A) Gráfico das variáveis e parâmetros de processo, B) Fases do processo em função do tempo. Adaptado de Amancio, 2007.

3.5.4. Geometria e Propriedades da Junta

Como visto anteriormente a geometria final da zona de ancoramento é diretamente dependente dos parâmetros utilizados durante o processo. Através do uso de ferramentas de design de experimentos realizados por Amancio, 2007 (ANEXO A) foi possível aperfeiçoar a geometria da zona de ancoramento a fim de se obter as combinações de penetração e diâmetro final que geram as melhores condições de ancoragem, na Figura 3.3 (A, B, C) são apresentadas as macrografias de três geometrias consideradas de boa qualidade de ancoragem. Dentre as três, a representada na Figura 3.3 A (grifada) possui 9,5 mm de diâmetro e 6,6 mm de penetração e apresenta o melhor desempenho mecânico conforme resultados obtidos por Amancio, 2007.

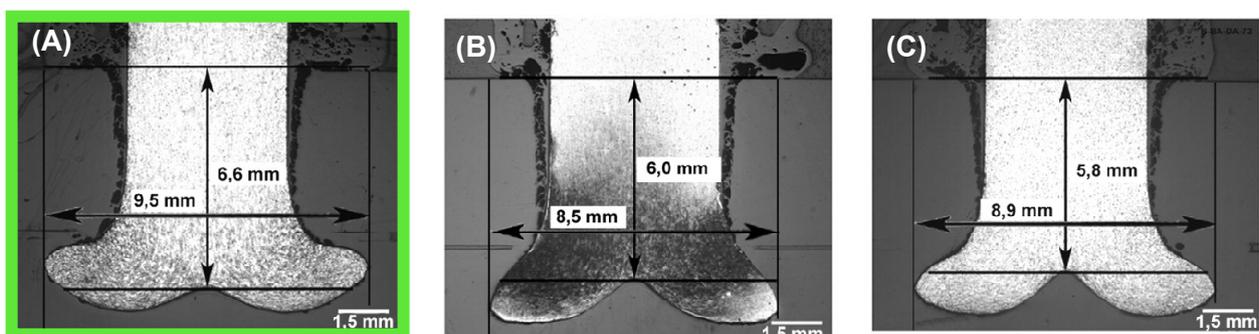


Figura 3.3 – Geometrias da zona de ancoramento obtidas com a variação dos parâmetros de processo [Amancio, 2007].

Um estudo sobre as propriedades dos materiais pré e pós-consolidação da junta foi realizado por Amancio, 2007. Estas juntas apresentam características distintas principalmente no que se 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 esta é removida na última etapa do processo.

As três primeiras (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 3.4. A, e sua classificação melhor compreendida através dos mapas de microdureza e micrografias apresentadas na Figura 3.4 B [Amancio e dos Santos, 2008b].

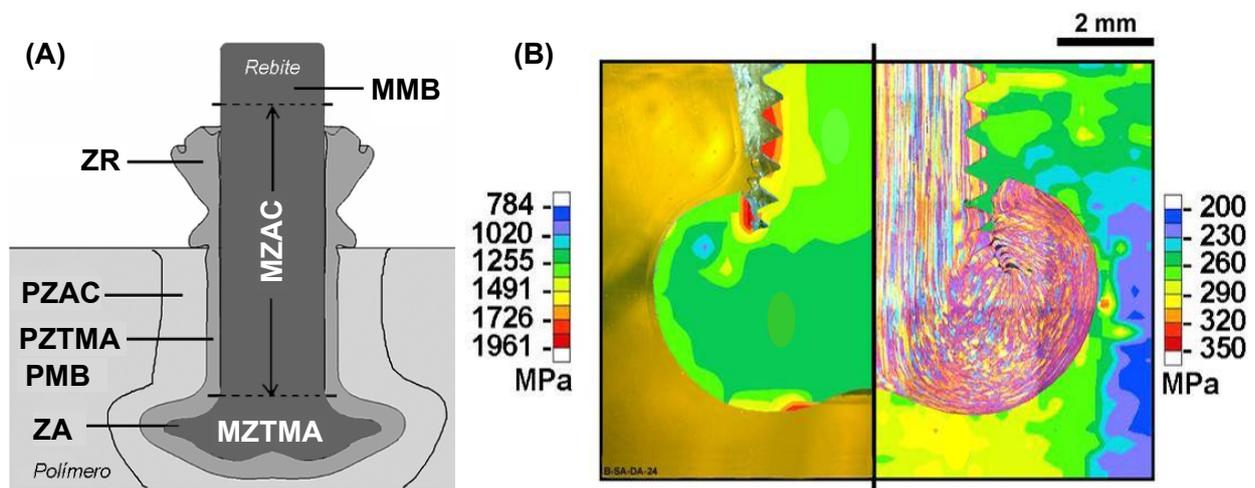


Figura 3.4 – A) Regiões com propriedades distintas presentes na junta, B) Esquerda: Macrografia do polímero (PEI) e mapa de microdureza do metal (AA 2024-T351), Direita: configuração oposta. Adaptado de Amancio e dos Santos, 2008b.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Polieterimida (PEI)

As placas poliméricas utilizadas para a confecção dos corpos de prova utilizados neste trabalho foram retiradas de chapas de 13,4mm de PEI, (GE ULTEM-1000). As propriedades mecânicas do plástico PEI, na direção de extrusão, estão apresentadas na

Tabela 4.1, juntamente com a microdureza Vickers, média experimental calculada por Amancio, 2007. Os ensaios para determinar estas propriedades foram realizados de acordo com a Norma DIN 53455.

Tabela 4.1 – Propriedades Mecânicas do polímero PEI.

Tensão de Escoamento, σ_e (MPa)	Tensão de Ruptura, σ_r (MPa)	Módulo de Elasticidade, E (GPa)	Coefficiente de Poisson, ν	Microdureza HV
69	120	2,88	0,39	28,96 \pm 0,41

4.2. AA2024-T351

Tarugos de alumínio AA2024-T351, com diâmetro inicial de 10 mm foram utilizados como base para a produção de pinos de 5 mm (através de processo de usinagem), a partir dos quais posteriormente as juntas sobrepostas foram produzidas. A Tabela 4.2 apresenta as propriedades mecânicas desta liga, obtidas por Amancio et al., 2008 em ensaios mecânicos segundo a norma DIN 50125. Na mesma tabela está presente a média de microdureza Vickers (HV).

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas do alumínio AA 2024-T351.

Tensão de Escoamento, σ_e (MPa)	Tensão de Ruptura, σ_r (MPa)	Módulo de Elasticidade, E (GPa)	Coefficiente de Poisson, ν	Microdureza HV
327	451	73,1	0,33	141,5 \pm 6,57

4.3. Juntas Híbridas Sobrepostas

A máquina comercial de soldagem por atrito RSM 400 (Harms & Wende, Alemanha), que está apresentada na Figura 4.1, foi utilizada para produzir as juntas de placas sobrepostas estudadas neste trabalho. As juntas foram produzidas a partir de duas placas de PEI com dimensões 190x36x5 mm sobrepostas 36 mm, como rebite foi utilizado um pino solido (AA 2024-T351) de diâmetro 5 mm e comprimento 50 mm. Durante o processo, foram utilizados como parâmetros: pressão axial de 8 bar, rotação de 21000 RPM e tempo de processo de 3s.

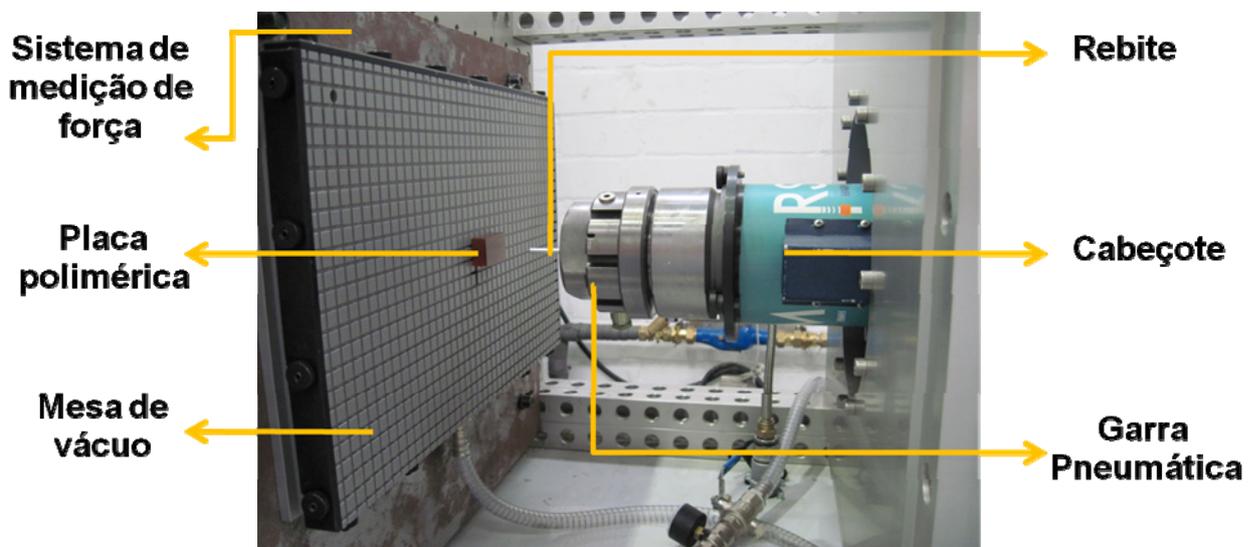


Figura 4.1 – Máquina RSM 400, utilizada para a produção das juntas estudadas.

As propriedades mecânicas das diferentes regiões da junta, Tabela 4.2, são de difícil determinação devido às reduzidas dimensões das mesmas. Por este motivo a Tabela 4.3 apresenta 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.

A metodologia usada para relacionar estes valores, já foi aplicada por outros autores, como Mazzaferro et al., 2008, durante estudos desta natureza.

Tabela 4.3 – Propriedades utilizadas nas diferentes regiões da junta (% em relação ao material base).

Material	Material Base (MB)	ZAC	ZTMA
AA2024-T351	100%	95% do MB	85% do MB
PEI ULTEM-1000	100%	110% do MB	90% do MB

4.4. Modelos de Elementos Finitos

Modelos 3D gerados no programa de CAD, SOLIDWORKS versão 2009 (Dassault Systèmes, França), foram exportados para o pacote CAE, ABAQUS 6.8-1 (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, 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 na tabela acima.

4.4.1. Modelos de Material

Uma vez observado que ambos os materiais apresentam deformações plásticas significativas, modelos simplesmente Elástico-Lineares não iriam descrever o comportamento físico esperado. Logo, o modelo de material selecionado foi o Elástico-Plástico, para ambos os materiais, isto foi possível devido aos dois possuírem curvas tensão x deformação com o mesmo comportamento característico. A escolha deste apresenta como revés a não detecção de efeitos de relaxação que ocorrem no polímero em situações de carregamento constante. Porém traz como vantagem menor tempo computacional e reduz o número de ensaios mecânicos a serem realizados para a entrada de dados. Com o intuito de analisar os esforços máximos e a distribuição de tensões e deformações, o modelo escolhido atende plenamente as expectativas, não sendo esperada grande perda de precisão devido a estas considerações.

Foram geradas geometrias virtuais (CAD 3D), vide Figura 4.2, com a mesma geometria, deslocamentos prescritos e condições de contorno das amostras utilizadas nos ensaios de tração a fim de validar os modelos de material e só então iniciar a construção do modelo da junta completa. A malha foi gerada com cinco mil elementos hexaédricos (C3D8R) [ABAQUS Documentation v6.8-1, 2008-2009].

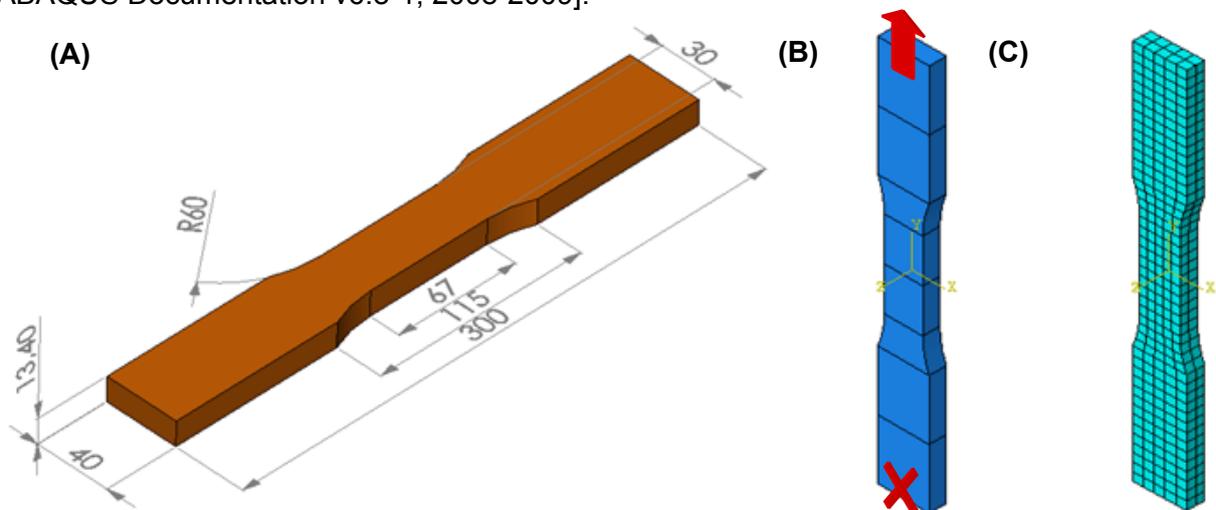


Figura 4.2 – A) Geometria do corpo de prova (mm), B) Modelo CAE, C) Malha gerada.

4.4.2. Modelos da Junta de Placas Sobrepostas

A superfície da zona de ancoramento apresenta elevada rugosidade, devido às transformações termo-mecânicas decorrentes do processo de união. Com o objetivo de simplificar a análise e reduzir o custo computacional, esta foi aproximada por uma superfície sem rugosidade. Como pode ser observado na Figura 4.3 a junta de placas sobrepostas apresenta simetria em relação ao seu plano médio, que permitiu a realização da simulação com propriedades de simetria planar. Como resultado, o tempo de processamento foi reduzido a um patamar aceitável sem necessidade de mais alguma simplificação geométrica. Deslocamentos prescritos, de 7 mm, foram aplicados em duas condições: a primeira com carregamento aplicado na placa inferior (DI) e a segunda na placa superior (DS).

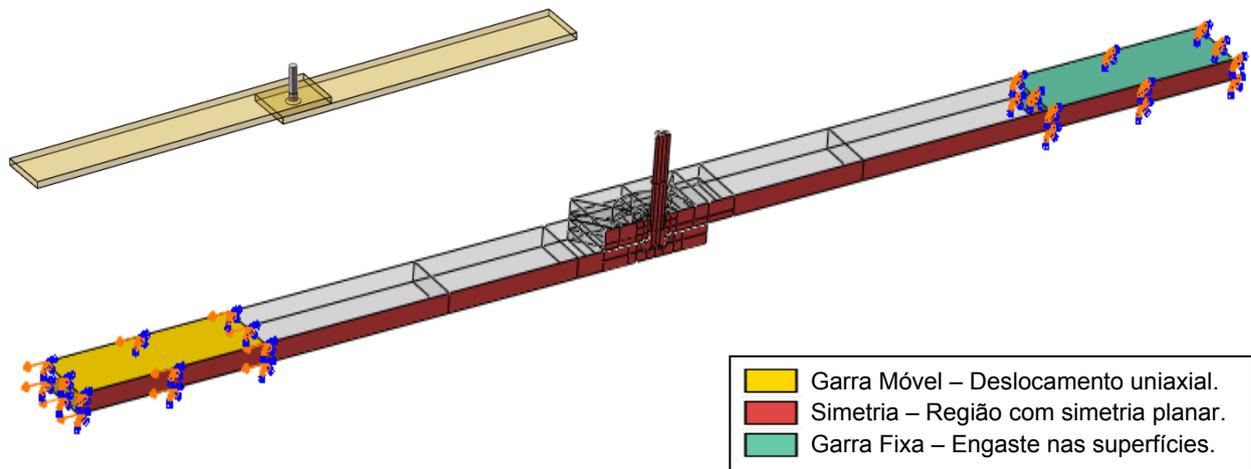


Figura 4.3 – Condições de contorno (DI) aplicadas ao modelo da junta sobreposta.

As propriedades dos materiais foram aplicadas de acordo com a metodologia apresentada anteriormente, como mostra a Figura 4.4 (detalhe da zona de ancoramento, ZA)

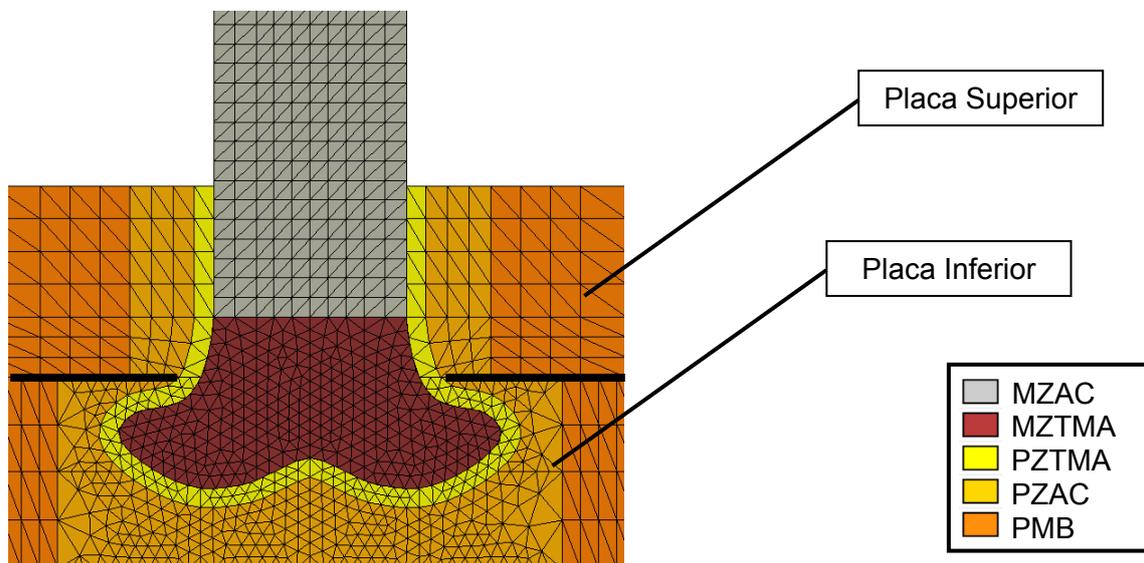


Figura 4.4 – Propriedades de material aplicadas nas diferentes regiões do modelo.

As propriedades de contato em simulações numéricas definem a forma com a qual os diferentes corpos irão interagir. Em situações onde a interação química entre os materiais é muito baixa ou inexistente, estas se apresentam como fator determinante no modelo [Chaturvedi e Chitteti, 2006]. No caso da junta sobreposta, quando a chapa superior é tracionada na direção oposta à inferior, os deslocamentos relativos entre os componentes

desencadeiam uma complexa sequência de deformações. Estas por sua vez geram situações de contato e separação pós-contato entre as superfícies. A fim de capturar estas complexas sequências de contatos e separações foram utilizadas técnicas de geração de malha, Figura 4.5 A, e seleção de superfícies. A Figura 4.5 B mostra as três interfaces de contato presentes no modelo, sendo a “Região A” de contato entre o rebite e a placa inferior, a “Região B” de contato entre o rebite e a placa superior e a “Região C” de contato entre as placas superior e inferior.

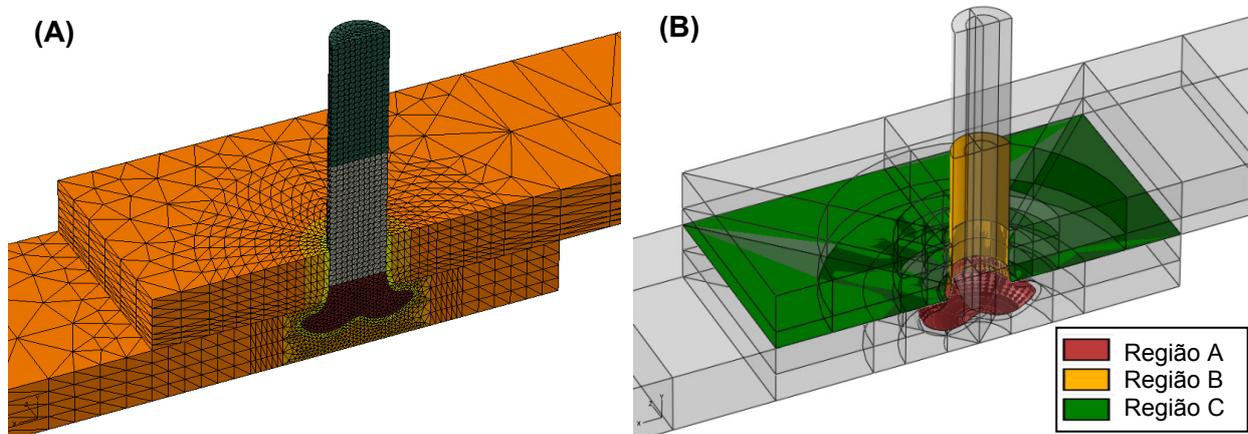


Figura 4.5 – A) Visão geral da malha gerada, B) Regiões de contato entre superfícies.

Do ponto de vista geral o corpo constituído do material de maior dureza deve ter suas superfícies (candidatas a entrar em contato) definidas como primárias e seu par de contato, de menor dureza, como secundária. Já nas interações entre componentes de mesmo material foram priorizadas como primárias as que se esperam as menores deformações, a fim de minimizar a perda de pontos de contato devido à deformação dos mesmos. Dentre as possíveis interações de contato, mostradas na Figura 4.6, a primeira permite a superfície primária penetrar a secundária (A), na segunda não existe penetração (B), já a última combina as anteriores permitindo pequenas penetrações (C), porém apresenta como desvantagem resolver as equações de contato duas vezes e apresentar como resultado a média dos dois valores obtidos, aumentando o custo computacional da análise [Gardstand, 2006].

A formulação escolhida (penalidade) foi a que permite penetração da superfície primária na secundária com o intuito de reduzir os tempos de simulação, devido à grande quantidade de superfícies em contato.

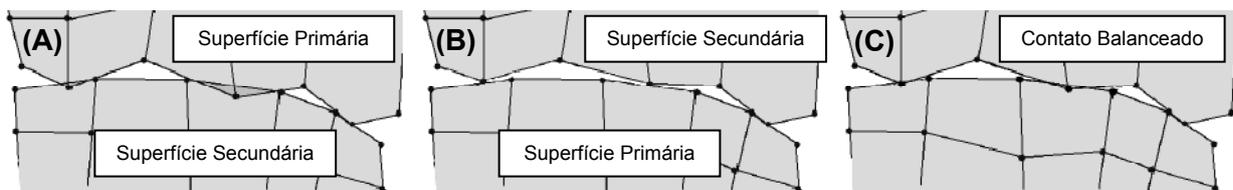


Figura 4.6 – Representação das formulações de contato [ABAQUS Documentation v6.8-1, 2008-2009].

Por fim após a definição das condições de contato, apresentadas na Tabela 4.4, o coeficiente de atrito aproximado foi definido utilizado como parâmetro inicial o valor obtido no estudo realizado por Mens e Gee, 1991 como 0,41 no caso PEI vs. aço carbono. Uma vez que o polímero sofreu modificações térmicas e material utilizado na confecção do rebite foi o alumínio, o coeficiente de atrito foi variado em 0,1 para mais e para menos a fim de se calibrar o mesmo de acordo com as condições da aplicação analisada.

Tabela 4.4 – Modelo de contato utilizado.

Contato Normal	Contato Tangencial	Coeficiente de Atrito	Limite de Cisalhamento (MPa)
Penalidade Contato “Duro”	Formulação de Penalidade	0,31 - 0,51	109

Os elementos utilizados para gerar a malha foram tetraédricos modificados de 10 nós com formulação quadrática modificada (elemento da biblioteca C3D10M) [ABAQUS Documentation v6.8-1, 2008-2009]. A malha que pode ser vista em detalhes na Figura 4.7 (A, B, C) foi gerada em separado para cada uma das peças que compõem a junta, o maior refino foi aplicado na região crítica para o contato (zona de ancoramento, ZA). A quantidade de elementos gerados em cada componente bem como o número total, pode ser observada na Tabela 4.5.

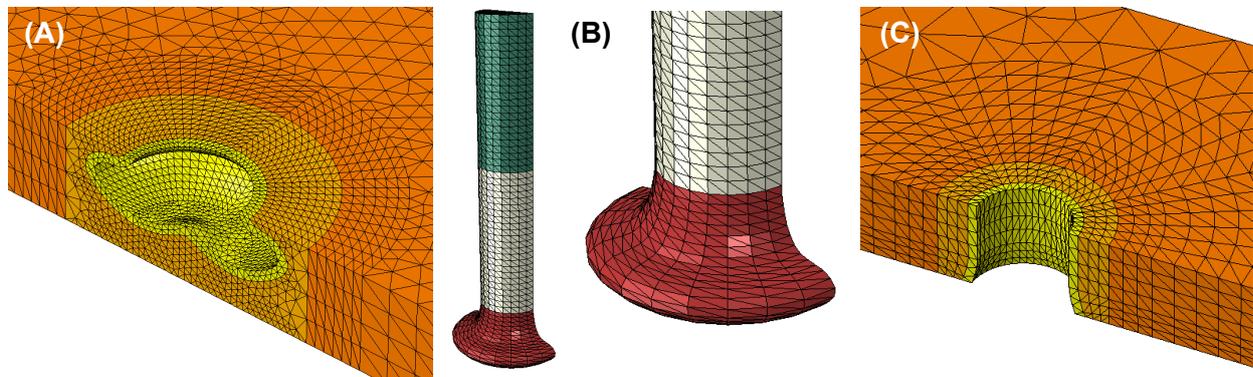


Figura 4.7 – Detalhe da malha de elementos finitos: A) placa inferior, B) Rebite, C) Placa superior.

Tabela 4.5 – Número de elementos gerados por componente e total.

Placa Superior	Placa Inferior	Rebite	Total
17862	88215	17750	123827

4.5. Ensaios Mecânicos

Ensaio de cisalhamento foram realizados em juntas sobrepostas mostradas na Figura 4.8 (configuração DS). A resistência ao cisalhamento de juntas monorrebitadas (com rebite de 5 mm diâmetro, sem rosca) foi avaliada segundo a norma ASTM D5961, com uma taxa de deslocamento de 2 mm/minuto, sala a 21 °C, em uma máquina de tração Zwick-Roell 1484 (200 kN). Para garantir que não houve esforços de torção em torno do eixo médio do rebite, extensômetros a laser foram instalados nas duas extremidades laterais. Após os ensaios os dados gerados foram verificados, e os ensaios que apresentaram pouca ou nenhuma diferença entre os resultados dos dois extensômetros foram validados.



Figura 4.8 – Ensaio estático de cisalhamento em juntas sobrepostas monorrebitadas: A) Corpos de prova, B) Máquina de ensaio Zwick-Roell C) Representação esquemática da configuração (DS).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Devido à complexidade do modelo que conta com: grande número de interações de contato, elevado número de elementos (150 mil) e materiais com propriedades de plasticidade, um computador de alta capacidade foi utilizado para o processamento dos mesmos. A máquina empregada foi uma estação de trabalho, Dell-Workstation, provida de dois processadores Intel XEON-5130 (resultando em 4x 2,0GHz), 8Gb de memória de acesso aleatório (RAM) rodando com sistema operacional 64 bits e placa gráfica 3D ATI de 1Gb. A rotina de cálculo e pós-processamento para o modelo final com malha refinada foi de aproximadamente 5 horas, utilizando a capacidade do software CAE de gerenciar a paralelização de múltiplos processadores (4x) e disponibilizando 85% da memória (RAM). Para fins visualização todos os resultados serão mostrados com fator de deformação igual a 1, assim sendo está apresentada a deformada real da estrutura.

A primeira observação feita dos resultados foi acerca dos modelos de material a fim de se obter sua validação quando comparados com os dados dos ensaios experimentais. A validação é de extrema importância, pois revela qual a exatidão que se irá perder no modelo de junta completa devido às simplificações consideradas durante a escolha dos modelos de material. A Figura 5.1 apresenta a evolução do modelo de material do polímero em função do tempo (segundos) sendo o comportamento deste bem definido e apresentando como característica pouca estricção, comportamento com tendência a fragilidade na região central do corpo de prova antes da fratura (momento onde a tensão de von Mises atinge o valor máximo de 120 MPa). O modelo comprova a elevada resistência mecânica (120 MPa) do plástico de engenharia PEI.

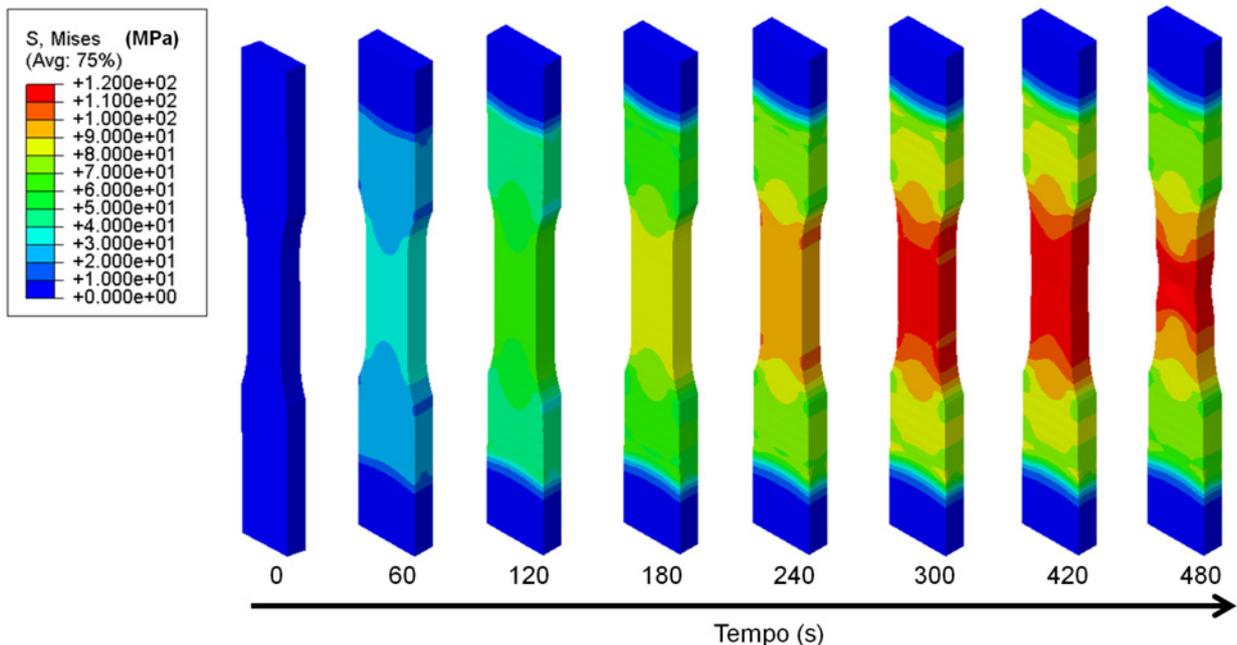


Figura 5.1 – Evolução das tensões de von Mises no polímero (PEI) em função do tempo decorrido no ensaio.

Como pode ser observado na Figura 5.2, o modelo de material apresentou concordância entre os resultados numéricos e experimentais, mostrando as maiores discrepâncias durante a transição entre os regimes elástico e plástico e no instante onde as deformações ultrapassam $0,1 \mu\text{m/m}$ devido às grades deformações sofridas nos elementos. Vale salientar que o modelo escolhido para o polímero não contempla efeitos de relaxamento, efeito conhecido e presente nesta família de material. Este resulta em uma queda significativa nas tensões quando o deslocamento prescrito aplicado é mantido constante. Não se espera perda de exatidão no modelo em questão, pois o mesmo visa representar as tensões e deformações decorrentes da aplicação da carga, tendo como objetivo aumentar o entendimento dos fenômenos que levam a falha (estática) da junta.

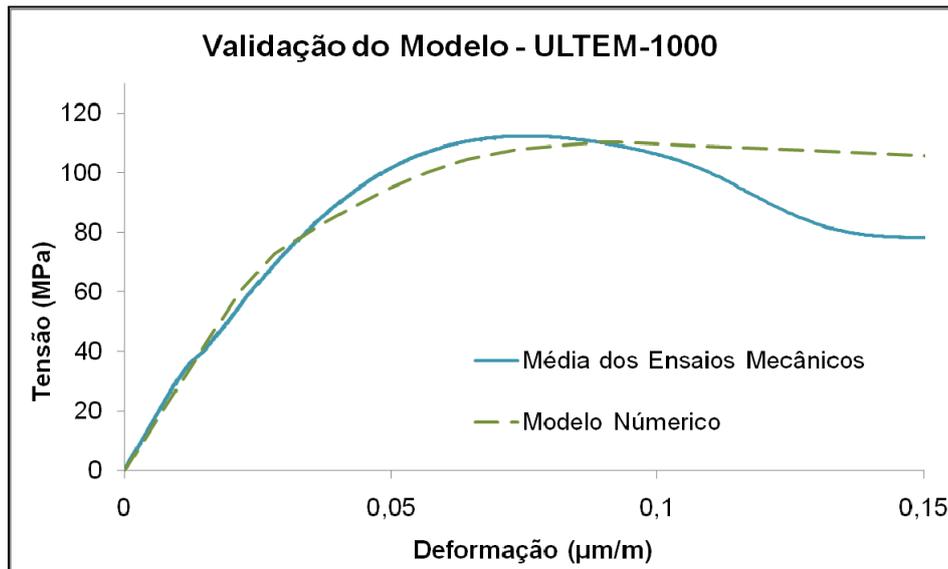


Figura 5.2 – Comparativo entre as curvas numérica e experimental para o polímero (ULTEM-1000).

Finalizada a análise do modelo do polímero (PEI), a Figura 5.3, apresenta a evolução do modelo do alumínio (AA2024-T351) o qual possui comportamento mais tenaz que o material polimérico, apresentando maior estricção na seção média do corpo de prova, como pode ser observado no instante 600s. A distribuição de tensões se mostrou coerente com o esperado e o início da estricção foi constatado no instante 340s o qual concorda com o resultado experimental.

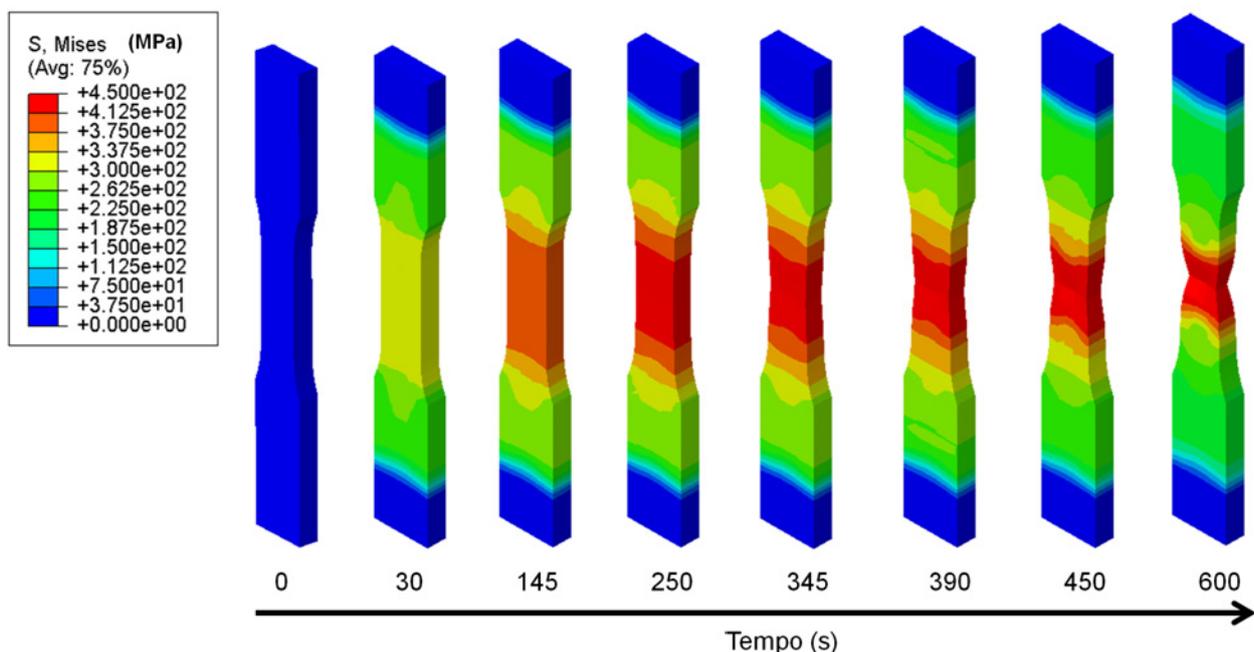


Figura 5.3 – Evolução das tensões de von Mises no alumínio (AA2024-T351) em função do tempo decorrido no ensaio.

A validação do modelo foi realizada através da comparação com a curva obtida no ensaio experimental a qual pode ser vista na Figura 5.4, neste caso as duas concordaram em quase toda sua extensão com um erro aceitável. Este resultado já era esperado devido ao modelo escolhido obter seus melhores resultados em materiais de matriz metálica.

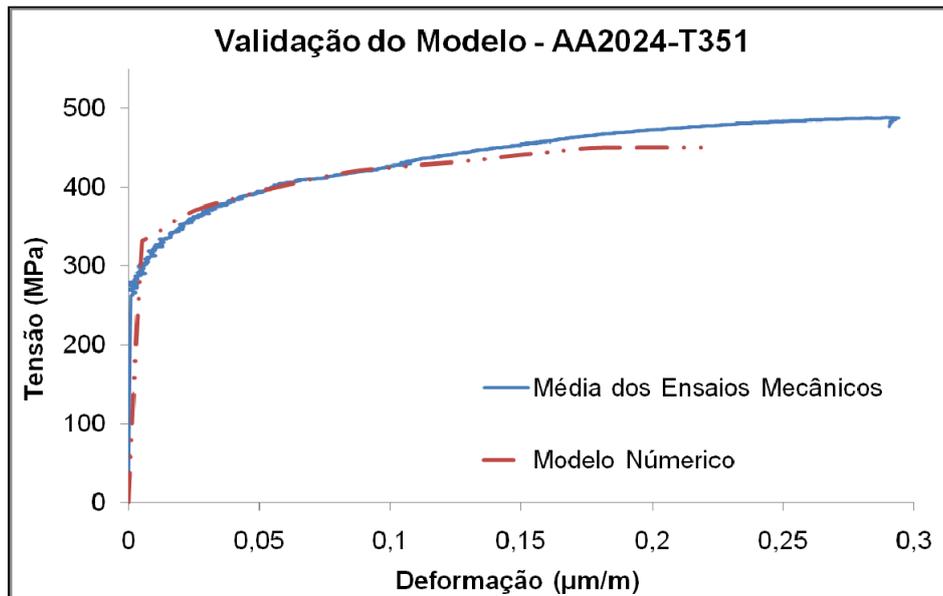


Figura 5.4 – Comparativo entre as curvas numérica e experimental para o alumínio (AA2024-T351).

De posse dos resultados pós-processados do modelo de junta, teve início a etapa de análise dos dados com a definição de um critério de falha, visto que o modelo computacional utilizado não prevê a este tipo de consideração. A não inclusão desse acarreta na não interrupção do processamento computacional, consequentemente os resultados não podem ser considerados em sua totalidade. As possibilidades de modelos de falha aplicáveis nesta situação são basicamente quatro:

- Modelo de falha com critério baseado nos níveis de tensão;
- Modelo de falha baseado em deslocamentos;
- Modelo de falha baseado em deformação;
- Modelo de falha por ruptura do componente.

A segunda opção foi selecionada devido à principal característica desejável na união ser sua integridade estrutural. Logo foi considerada como falha a situação na qual a separação entre as placas superior e inferior atinge o valor de 2 mm (todos os pontos da placa inferior estão distantes por 2 mm ou mais da placa superior, vide Apêndice A). Este critério por sua vez permite que a junta sofra deformações plásticas localizadas contanto que as placas permaneçam coesas, que é o intuito quando se trata de juntas sobrepostas submetidas a carregamentos cisalhantes. Uma vez definido o critério de falha a ser aplicado, este pode ser empregado na análise dos resultados obtidos com os modelos da junta completa.

Foram gerados modelos com duas configurações diferentes quanto aos deslocamentos prescritos aplicados, na primeira condição este foi aplicado na placa inferior (DI) e na segunda condição este foi aplicado na placa superior (DS), ambas podem ser vistas na Figura 5.5. O coeficiente de atrito foi utilizado para calibrar os modelos, diferentes valores foram testados variando de 0,32 a 0,52, os valores que apresentaram os melhores resultados foram: 0,39 para a condição polímero vs. metal e 0,47 para o caso polímero vs. polímero.

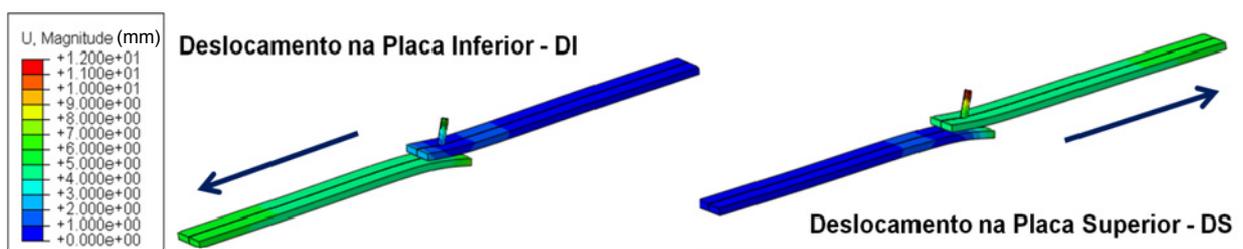


Figura 5.5 – Configurações de carregamento analisadas, esquerda: deslocamento aplicado na placa inferior (DI); direita: deslocamento aplicado na placa superior (DS).

As configurações DI e DS apresentaram diferenças em relação aos campos de deslocamentos na junta, como pode ser observado na Figura 5.6 (esquerda). Quando o deslocamento prescrito é aplicado na placa superior (DS) o ângulo de giro do pino é um pouco maior induzindo um campo de tensões, Figura 5.6 (direita), sutilmente mais elevado quando comparado com a situação onde o deslocamento é aplicado na placa inferior (DI). É importante observar que as duas placas se encontram com o mesmo deslocamento aplicado de 7 mm (verde claro) e que as diferenças se restringem apenas à região de sobreposição da junta. Logo é possível concluir que a configuração DI se mostra mais eficiente que a DS. Isto pode ser explicado devido ao centro de giro do rebite estar localizado na placa inferior, a aplicação do carregamento na placa superior gera maiores torques devido a sua maior distância do centro de giro. Estes efeitos apresentaram maior significância em relação aos deslocamentos e alterações sutis nas tensões encontradas.

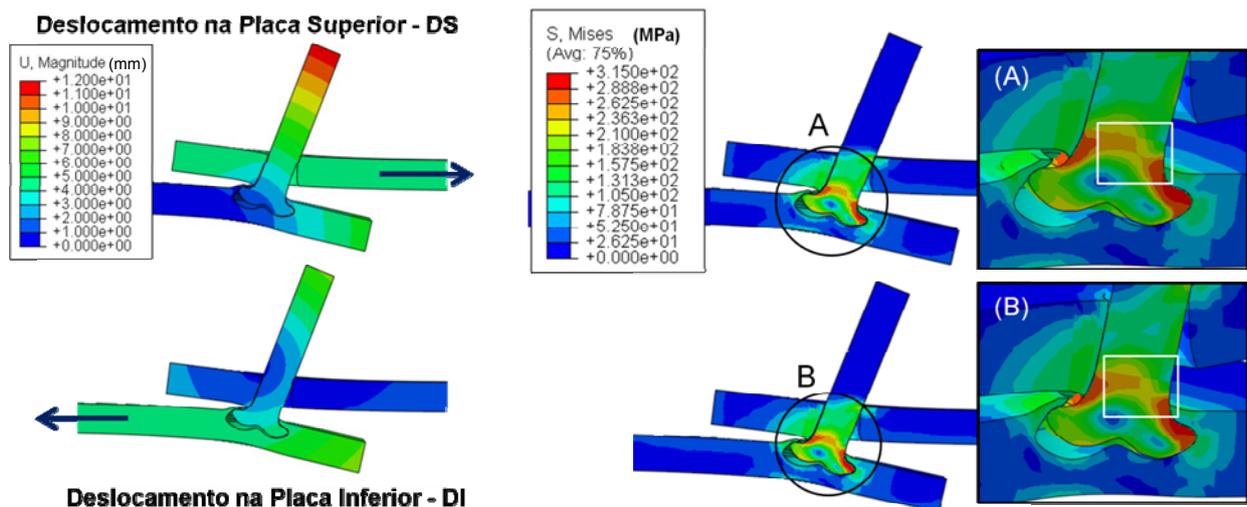


Figura 5.6 – Esquerda: Mapas de deslocamento; Direita: Mapas de tensão (von Mises).

Uma vez que as diferenças nas tensões são pequenas apenas a configuração DI será utilizada para a apresentação da evolução do campo de tensões (von Mises) em função do tempo de ensaio, Figura 5.7.

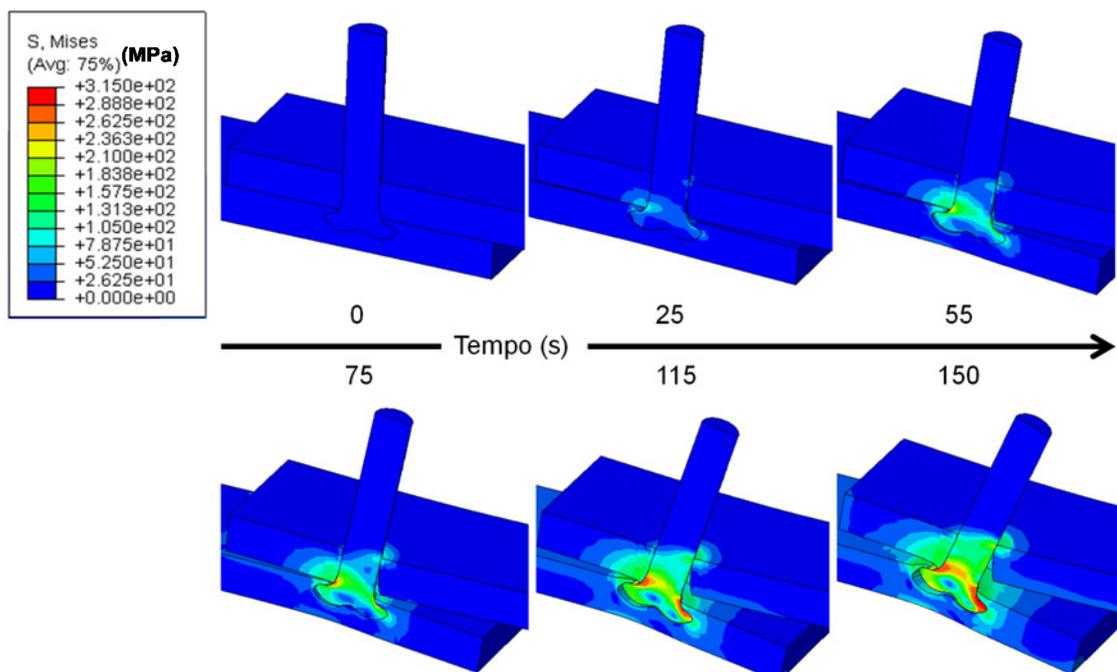


Figura 5.7 - Evolução das tensões de von Mises no modelo (DI) em função do tempo decorrido no ensaio.

Quanto às deformações plásticas severas, estas ficaram restritas ao polímero, como pode ser observado na Figura 5.8 vistas de detalhe A e B, sendo que a região mais castigada é a localizada à esquerda e acima da zona de ancoramento (Figura 5.8 detalhe A). Tal deformação ocorre devido à tendência de giro do rebite em relação ao ponto extremo direito da zona de ancoramento (Figura 5.8 detalhe B), ponto este que sofre deformação plástica devido ao movimento de giro relativo entre os dois componentes aliado a própria força normal aplicada.

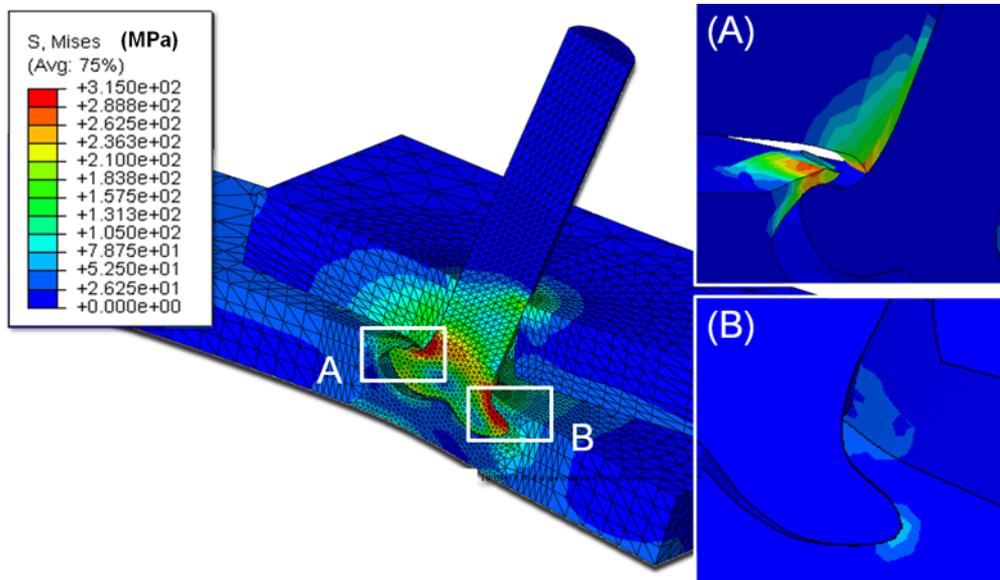


Figura 5.8 – Esquerda: Tensões de von Mises na união, Direita: Deformações plásticas severas no polímero.

Por fim, a validação do modelo foi obtida a partir da comparação com os ensaios mecânicos realizados. Ambas as condições apresentaram grande concordância com os resultados experimentais, onde a maior discrepância se encontra no valor da rigidez aparente (inclinação da curva no regime elástico) entre 5 e 10%, o que representa um valor aceitável, levando em consideração a complexidade do modelo proposto. A Figura 5.9 apresenta os resultados obtidos para a condição de carregamento aplicado na placa inferior (DI).

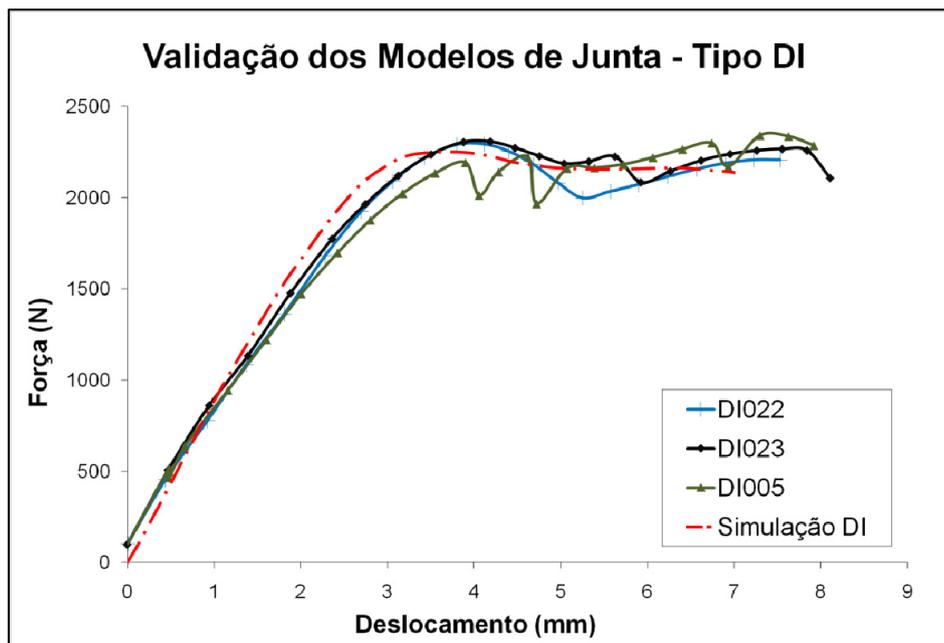


Figura 5.9 – Comparativo entre as curvas numérica e experimental para modelo de junta sob carregamento do tipo DI.

Já a Figura 5.10 apresenta as curvas relativas à condição de carregamento aplicada na placa superior, tipo DS. Estas em comparação com as do tipo DI apresentaram desempenho inferior como apontou a análise feita sobre os resultados de tensões e deslocamentos dos modelos.

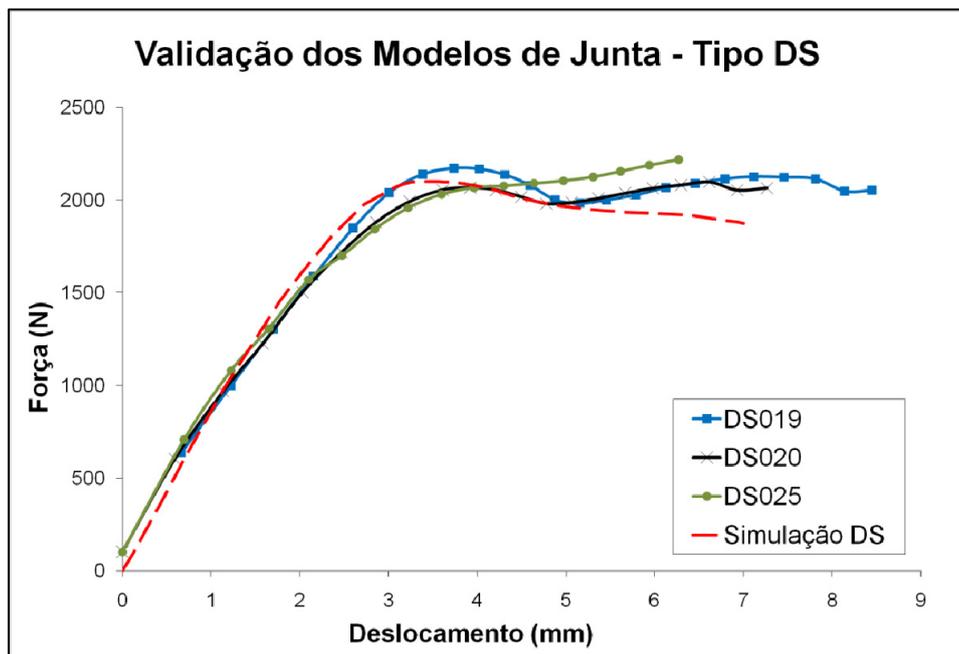


Figura 5.10 – Comparativo entre as curvas numérica e experimental para modelo de junta sob carregamento do tipo DS.

As curvas de força x deslocamento comprovam a concordância com erro aceitável (5 a 10%) dos modelos propostos com a realidade, porém é de suma importância apresentar de forma clara a comparação direta entre as forças máximas obtidas em cada situação, pois essa informação é a mais relevante quando o intuito é a aplicação da união ou comparação da mesma com outra técnica disponível. Estes resultados estão explicitados na Tabela 5.1 e representam valores médios de até 80% da resistência à tração do polímero.

Tabela 5.1 – Tabela comparativa de força máxima atingida (em N).

DS019	DS020	DS025	Média DS	Des.	Simulação DS	DI005	DI022	DI023	Média DI	Des.	Simulação DI
2172,4	2070,1	2188,9	2143,8	64,3	2100,5	2222,8	2292,7	2307,3	2274,2	45,1	2250,3

Por fim, uma comparação visual entre o modelo numérico (tipo DS) e o ensaio mecânico é ilustrada na Figura 5.11, na qual três estágios de deslocamento foram selecionados para um melhor entendimento dos mecanismos de separação e falha da junta (segundo a metodologia proposta). O estágio A (deslocamento de 1,2 mm) é o início da separação entre as placas superior e inferior, esta se dá na extremidade direita da sobreposição e avança em direção ao rebite. No estágio B (deslocamento de 3,1 mm) a deformação plástica na placa inferior, decorrente da rotação do rebite, empurra a placa superior e a afasta ainda mais. Já o estágio C (deslocamento de 6,3 mm) é marcado pela flexão da placa inferior e início da fase de escorregamento da placa superior em relação ao rebite. Para fins de engenharia a falha da união rebitada por fricção acontece quando a separação total de ambas as placas atinge um valor limite. No presente caso isto ocorre quando a separação entre as duas supera a marca de 2 mm, vide Apêndice A.

Mais uma vez a comparação entre o modelo numérico e os dados experimentais converge de forma a consolidar os resultados obtidos. A análise das imagens permite um melhor entendimento dos mecanismos atuantes durante a separação das placas, a qual pode ser amenizada com a utilização de um componente ou geometria que dificulte o deslocamento relativo entre a placa superior e o rebite.

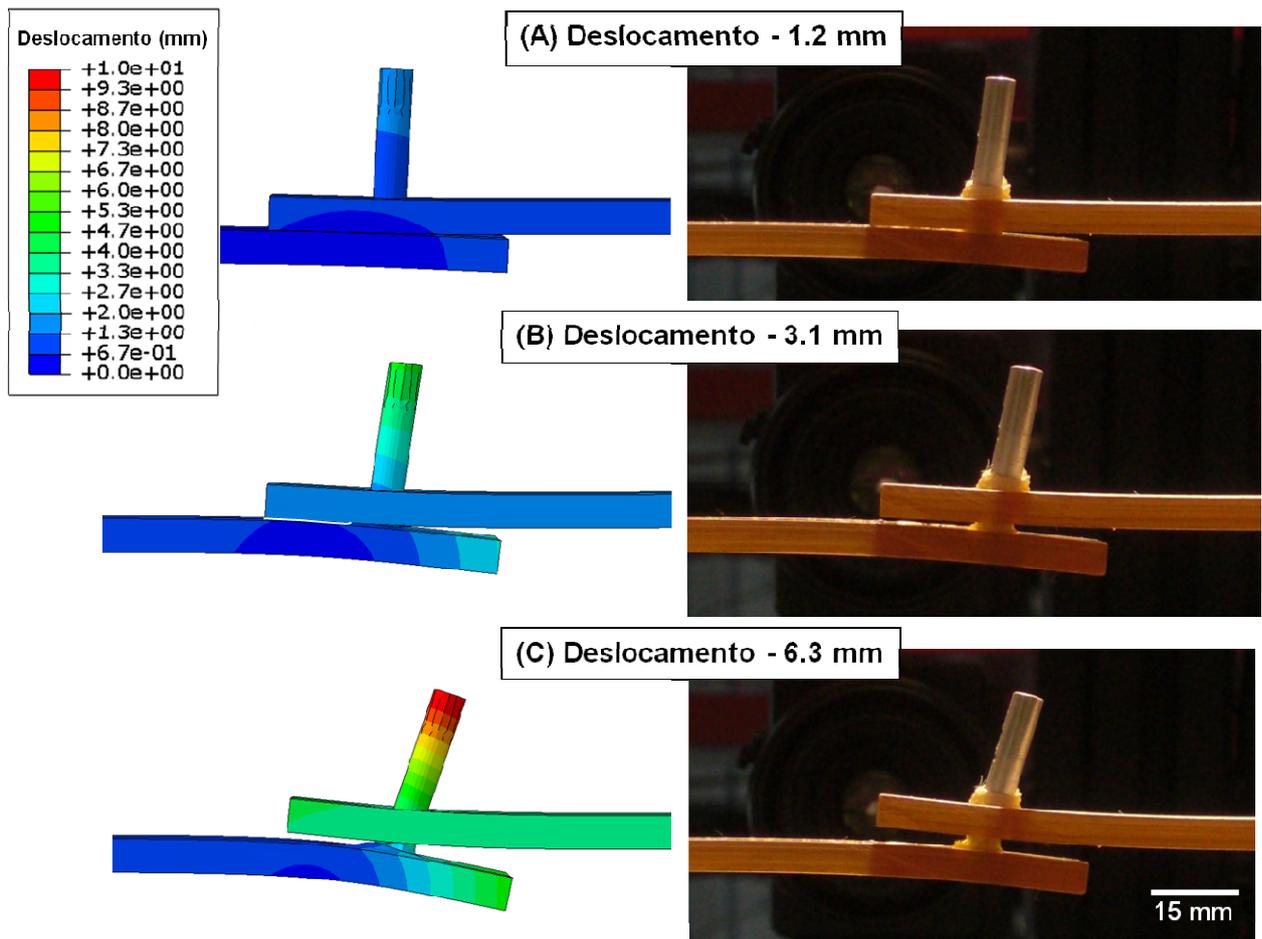


Figura 5.11 – Comparativo visual entre a evolução dos resultados numéricos (esquerda) e dos ensaio mecânicos (direita). Ambas para a condição DS.

6. CONCLUSÕES

A concordância entre os resultados numéricos e experimentais, na faixa de 5 a 10%, mostra a coerência das simplificações e hipóteses aplicadas nos modelos. Esta juntamente com a elaboração de um critério de falha plausível permitiu uma análise sobre o comportamento da junta durante uma situação de carregamento estático aplicado.

Dentre as apreciações realizadas, a comparação visual entre a evolução dos deslocamentos obtidos em ambiente virtual com as imagens capturadas durante o teste experimental permitiu avaliar o desempenho do modelo de uma forma qualitativa. Porém a análise baseada na sobreposição das curvas de força x deslocamento foi determinante para a validação do modelo proposto.

Quanto à força máxima suportada pela união, os modelos não apresentaram diferença estatística, dentre todas as frentes de análise esta é a que efetivamente será utilizada para avaliar o desempenho da junta em aplicações industriais. A calibração através do ajuste do coeficiente de atrito foi fundamental para a obtenção destes resultados.

Em linhas gerais, o estudo em questão (através dos mapas de tensão, deformações plásticas e deslocamentos) permitiu um melhor entendimento dos fenômenos que levam a falha estática (através do critério aplicado) da junta e dos motivos pelos quais a aplicação dos carregamentos na placa superior (tipo DS) gera resultados díspares dos obtidos com a situação onde os deslocamentos prescritos são aplicados na placa inferior (tipo DI).

Como sugestão para trabalhos futuros existe a construção de um modelo de material mais completo (por exemplo, hiperelástico) para o polímero que capture efeitos de relaxação mantendo sua precisão em situações de grandes deformações e um estudo numérico experimental destas uniões sob o efeito de carregamentos cíclicos (fadiga).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Simulia - Dassault Systèmes; **“ABAQUS Documentation v.6.8-1”**, under licence for GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Germany, 2008-2009.

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, 2007.

Amancio S.T.; **“Friction Riveting: development and analysis of a new joining technique for polymer-metal multi-materials structures”**, Vom Promotionausschuss der TUHH als Dissertation angenommene Arbeit, ISSN 0344-9629, Germany, 2007.

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

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. 2009.

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 5th International Conference on Fracture of Polymers, Composites and Adhesives, 7-11 September, 2008.

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.

Barsoum R.G.S.; **“The best of both worlds: hybrid ship hulls use composite and steel, Advanced Materials and Process Technology Information Analysis Center”**, AMPTIAC-Quarterly, pp. 7, p.55-65, 2003.

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

Chaturvedi M.; Chitteti R.K.; **“Multiple Impact Simulations on Automotive Energy Absorbers Using a Recovery Based Material Model”**, SAE World Congress, Detroit Michigan April 3-6, 2006.

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

da Silva L.F.M; Ochsner A.; **“Modeling of Adhesively Bonded Joints”**, Springer Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-79055-6, First Edition, 2008.

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

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.

Fink H.; **“Success with innovation: Semi-Crystalline Products LANXESS Deutschland GmbH”**, Press Conference "LANXESS at K 2007", June 18, Dusseldorf, 2007.

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

Gavine A.; **“Dream team: an efficient test program is underway to create an efficient aircraft”**, Aerospace Test International, Vol. March p.39-43, 2005.

Goral T.; Prasad P.S.; Brown M.; Panter K.; Klages J.; Longhouse B.; **“Automotive Front End Structures Constructed by Over Molding Hydroform Metal Tubes to Engineering Thermoplastic Structures”**, Advances in Plastic Components, Processes and Technologies (SAE Reprint), 2005.

Grujicic M.; Sellappan V.; Kotrika S.; Arakere G.; Obieglo A.; Erdmann M.; Holzleitner J.; **“Suitability analysis of a polymer–metal hybrid technology based 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.

Grujicic M.; Sellappan V.; Omar M.A.; Seyr N.; Obieglo A.; Erdmann M.; Holzleitner J.; **“An overview of the polymer-to-metal direct-adhesion hybrid technologies for load-bearing automotive components”**, Journal of Materials Processing Technology, Nro 197 363-373, 2008.

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

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.

Mavel A.; **“A material choice for the automotive industry”**, Insight into consumption and recovery in Western Europe, Brussels, 1999.

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.

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

Mens J.W.M.; Gee A.W.J de; **“Friction and wear behaviour of 18 polymers in contact with steel in environments of air and water”**, Wear, Vol. 149 pp.255, 1991.

VOLKSWAGEN AG.; **“Environmental Report 2003-2004”**, pp. 1-122, Wolfsburg, 2004.

Wright N.; Lutz M.; **“Bolt out of the Blue”**, Aerospace Testing International, pp. 76-78, Jun. 2005.

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

Nesta seção estão apresentadas imagens e gráficos para o melhor entendimento e visualização dos resultados deste trabalho. Na Figura 1 A, podem ser observadas as dimensões principais da junta de placas sobrepostas monorrebitada por fricção e na Figura 1 B a vista de detalhe da zona de ancoramento e suas dimensões.

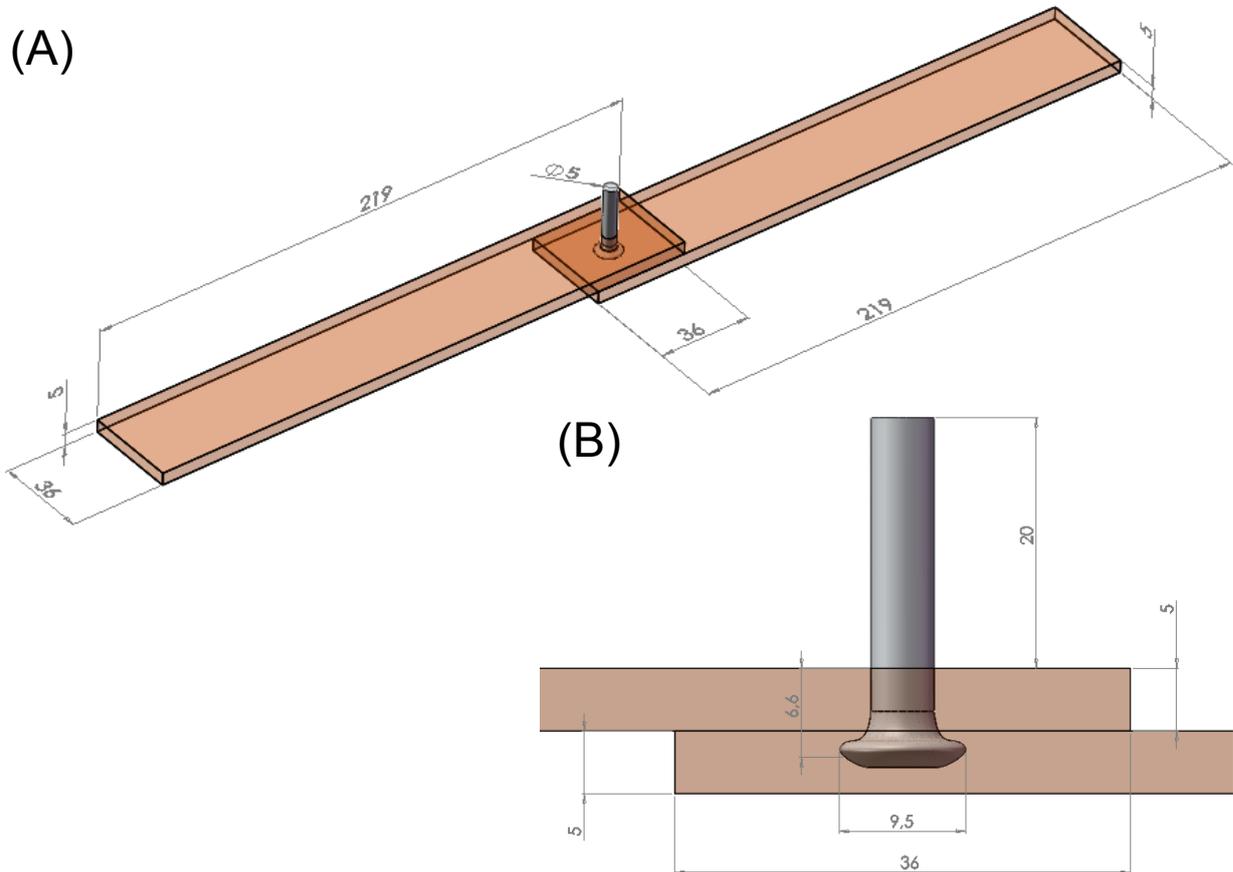


Figura 1 – Dimensões da junta rebitada por fricção utilizada neste estudo.

Os resultados foram mostrados anteriormente em função da condição de simetria aplicada (vista em corte da seção transversal média), os próximos resultados, ilustrados na Figura 2, mostram a geometria completa da junta estudada.

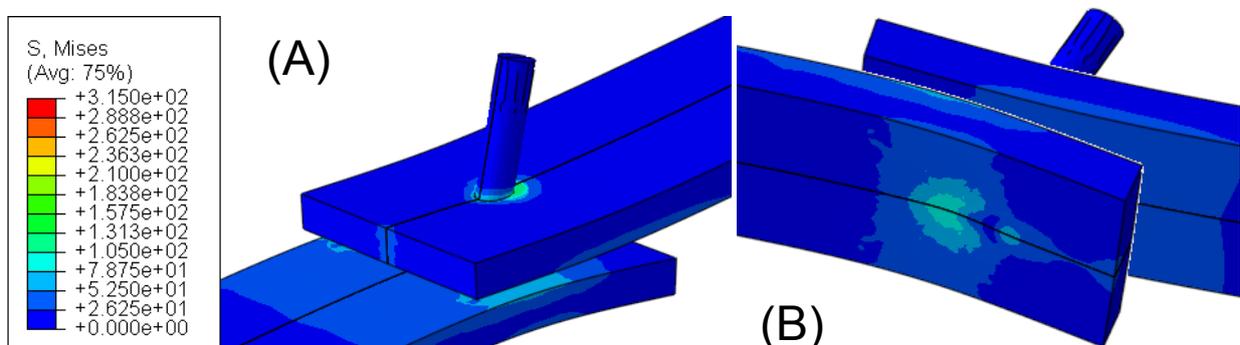


Figura 2 – Detalhe da seção central da junta estudada: A) Vista superior, B) Vista Inferior.

Durante a análise dos resultados foi definido um critério de falha para a junta, este considera falha quando a separação mínima entre as placas superior e inferior atinge um valor

superior a 2 mm. Com o intuito de permitir um melhor entendimento de como este critério foi aplicado, uma representação esquemática é apresentada na Figura 3.

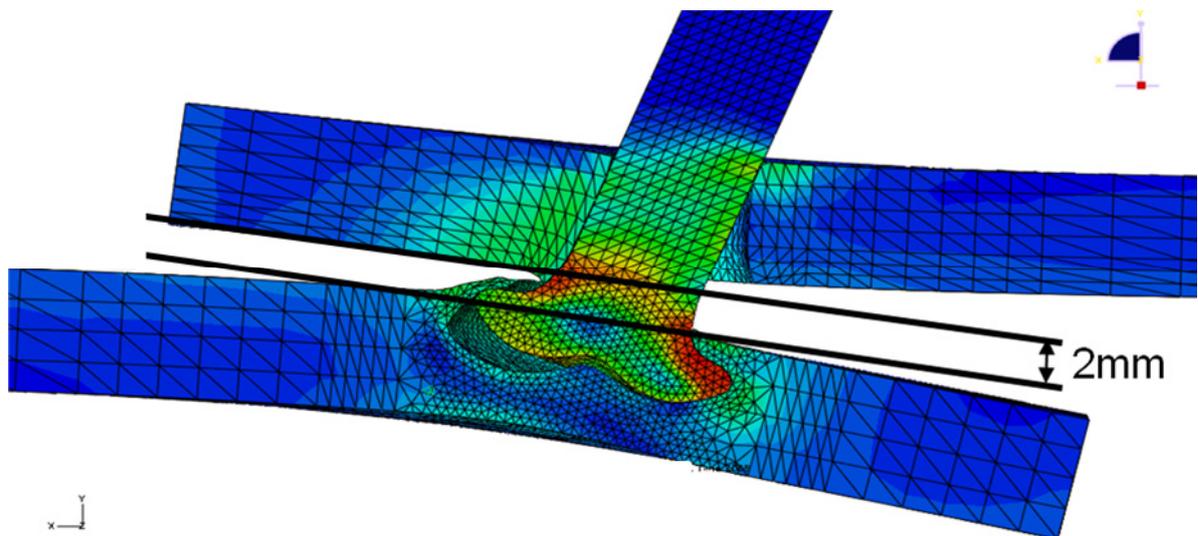


Figura 3 – Representação esquemática do modelo de falha proposto.

Com o intuito de permitir a comparação entre as condições DS e DI a Figura 4, apresenta os resultados dos ensaios mecânicos e resultados dos modelos numéricos plotados em um mesmo gráfico para as duas condições.

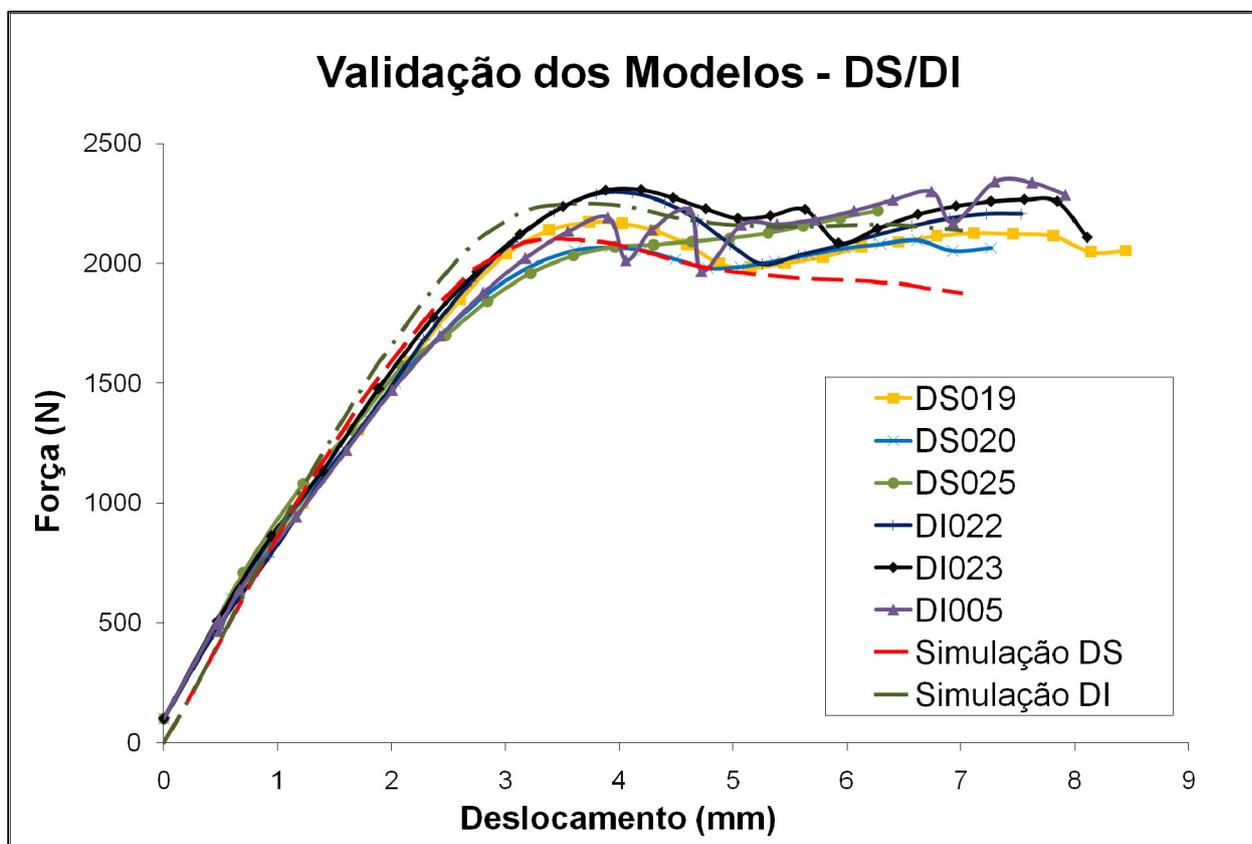


Figura 4 – Comparativo entre todas as curvas numéricas e experimentais geradas neste estudo.

ANEXO A

Este anexo contém informações complementares sobre a geometria da zona de ancoramento e o aporte de calor nas diferentes regiões da união, Figura 1, os qual foi obtido através da instalação de termopares nas posições H1 a H5 e termografia para a zona de rebarba (ZR).

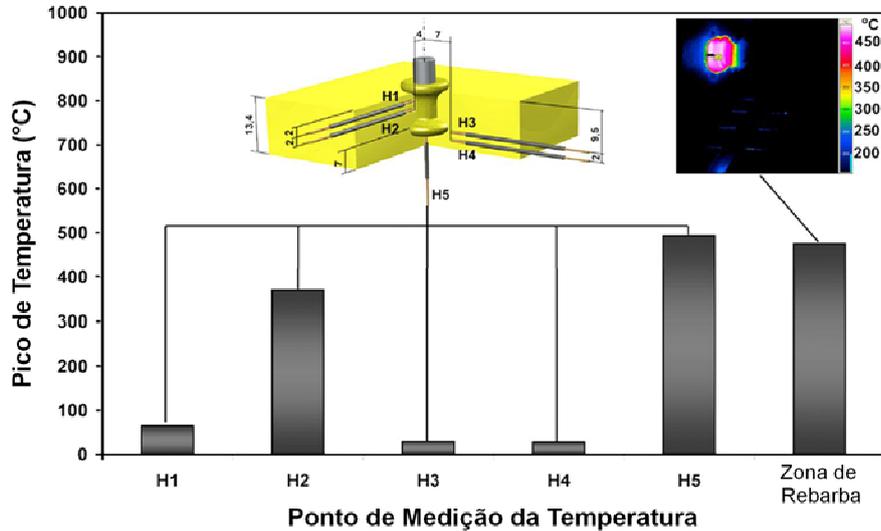


Figura 1 – Níveis de temperatura nas diferentes zonas da junta estudada. Adaptado de Amancio, 2007.

A Figura 2 demonstra a relação entre os parâmetros de processo e a geometria final da zona de ancoramento, obtida durante a aplicação do Planejamento de Experimentos (do inglês “*Design of Experiments*”, DOE) o qual foi aplicado por Amancio, 2007.

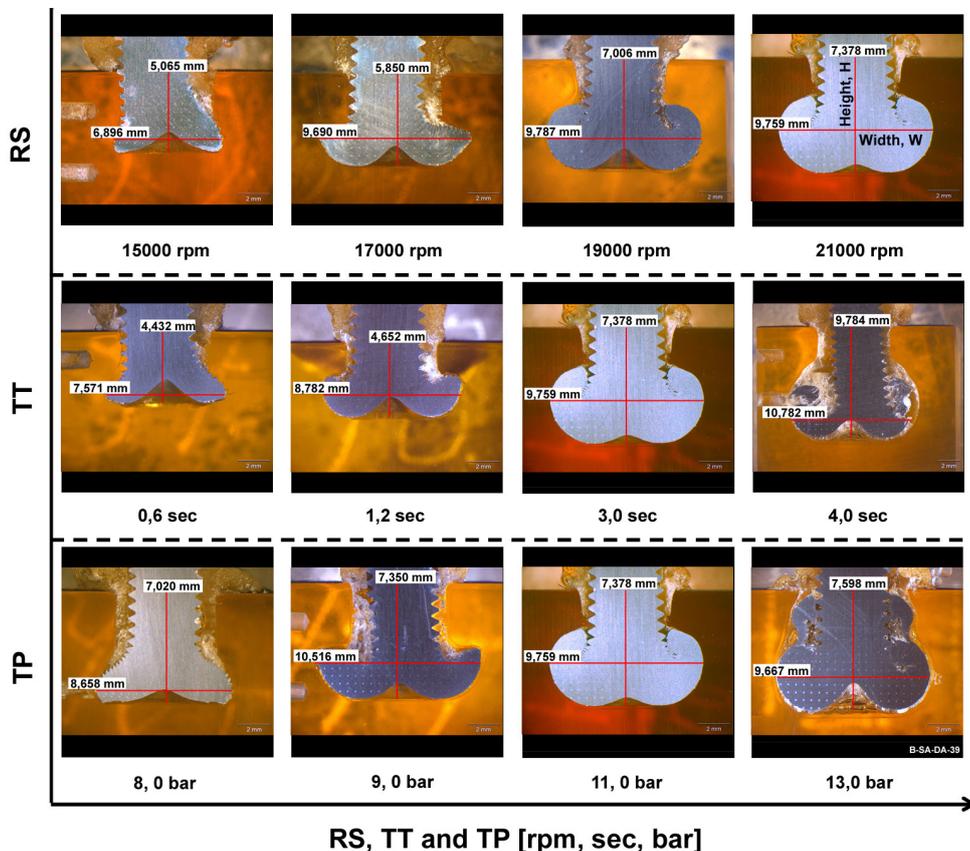


Figura 2 – Relação entre os parâmetros de processo e a geometria da zona de ancoramento, ZA [Amancio, 2007].

Por fim a Figura 3 exemplifica algumas macrografias de geometrias (zona de ancoramento, ZA) de possível obtenção através do processo de rebiteagem por fricção. Estas apresentam diferentes relações de aspecto (penetração x diâmetro final) consideradas de boa qualidade do ponto de vista mecânico.

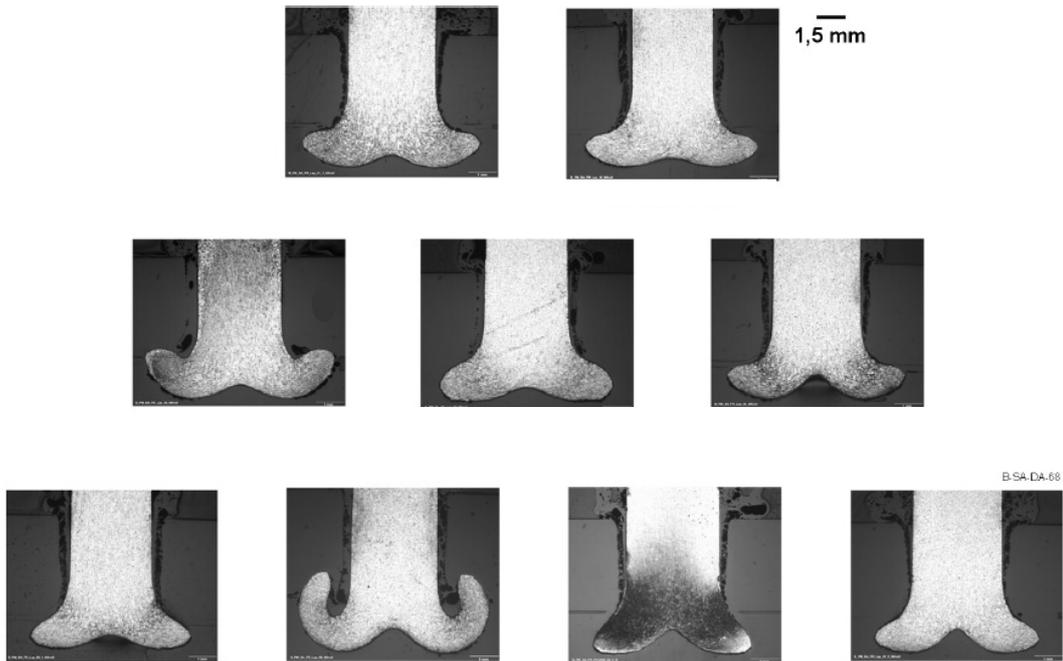


Figura 3 – Macrografias de algumas geometrias de possível obtenção através do processo de rebiteagem por fricção [Amancio, 2007].