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

Modelagem e Simulação do Comportamento Mecânico de Estruturas Macrocompósitas de Polímero-Metal Unidas por *Friction-based Injection Clinching Joining* (F-ICJ)

por

Eduardo Silva Tschoepke

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, Junho de 2018.

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

Modelagem e Simulação do Comportamento Mecânico de Estruturas Macrocompósitas de Polímero-Metal Unidas por Friction-based Injection Clinching Joining (F-ICJ)

por

Eduardo Silva Tschoepke

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. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Porto Alegre, 29 de junho de 2018.

Dedico este trabalho aos meus pais e aos meus irmãos pelo fundamental apoio prestado durante minha trajetória acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares e amigos por toda forma de apoio prestada, aos professores José Antônio Esmerio Mazzaferro e Sergio Traglia Amancio Filho pela oportunidade de desenvolver boa parte deste trabalho no Helmholtz-Zentrum Geesthacht, na Alemanha, e aos doutores André Bastos Abibe, Lucian-Atilla Blaga e Robson Cristiano Brzostek pelo auxílio teórico e técnico prestado.

TSCHOEPKE, E. S. **Modelagem e Simulação do Comportamento Mecânico de Estruturas Macrocompósitas de Polímero-Metal Unidas por Friction-based Injection Clinching Joining (F-ICJ)**. 2018.15 p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

A utilização de materiais compósitos para aplicações de engenharia vêm ganhando relevância nos últimos anos e, assim, gerando uma necessidade de desenvolvimento de métodos de união que sejam adequados para unir materiais dissimilares. Dentre os processos de união recentemente desenvolvidos, encontra-se o Friction-based Injection Clinching Joining (F-ICJ, patente europeia 14182938.2). Este método se destaca por ser simples, rápido e por ser ambientalmente menos danoso que processos que exigem a aplicação de agentes químicos para o tratamento das superfícies. O presente estudo tem por objetivo modelar e simular o comportamento de componentes mecânicos híbridos, compostos por polímero e metal, unidos pelo processo *Friction-based Injection Clinching Joining*, submetidos a ensaios mecânicos controlados em laboratório. Ou seja, objetiva-se reproduzir campos de deslocamentos, bem como tensões e deformações destes componentes através da utilização do programa de elementos finitos Abaqus®. Dados experimentais, obtidos em estudos anteriores, de ensaios de tração uniaxial são utilizados como entrada para os modelos numéricos enquanto resultados de ensaios de tração uniaxial, ensaio de cisalhamento sob tração de junta simples sobreposta e ensaio de flexão a quatro pontos de um componente composto por múltiplas juntas são utilizados para validar os modelos. Utiliza-se também um sistema de Correlação Digital de Imagem (DIC) para validar os modelos. Como resultados, obteve-se curvas de força por deslocamento do ensaio de tração uniaxial no regime elástico do material polimérico (PEI) dentro de uma faixa de mais ou menos 10%, com relação aos resultados experimentais, para oito dos nove modelos constitutivos hiperelásticos implementados. Com relação à modelagem da junta simples em ensaio de cisalhamento sob tração, três dos modelos apresentaram resposta de força por deslocamento dentro da faixa de mais ou menos 10%. Já com os modelos de múltiplas juntas em ensaio de flexão, não foi possível obter resultados de força por deslocamento dentro da faixa de mais ou menos 10% com relação aos resultados experimentais. Com relação aos resultados de campos de deformações e de deslocamentos, qualitativamente foram obtidos resultados que correspondem com o que foi observado experimentalmente e, quantitativamente, as deformações e deslocamentos de alguns modelos de junta simples geraram resultados com diferenças inferiores a 10% dos valores obtidos experimentalmente. Portanto, através da utilização de dados experimentais exclusivamente de ensaios de tração uniaxial, foi possível obter resultados com diferenças inferiores a 10% com relação aos resultados experimentais em termos de força por deslocamento, campos de deformação e deslocamentos enquanto que, os modelos aplicados à condição de flexão do componente de múltiplas juntas geraram apenas resultados qualitativos condizentes com o que foi observado experimentalmente.

PALAVRAS-CHAVE: F-ICJ, modelagem e simulação numérica, modelos constitutivos hiperelásticos, estruturas híbridas macrocompósitas.

TSCHOEPKE, E. S. **Modelling and Simulation of the Mechanical Behaviour of Polymer-Metal Macrocomposite Structures Joined by Friction-based Injection Clinching Joining (F-ICJ)**. 2018. 15 p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

The use of composite materials for engineering applications has been gaining relevance in recent years and thus generating a necessity of developing joining methods that are suitable for joining dissimilar materials. Among the state-of-the-art joining processes is the Friction-based Injection Clinching Joining (F-ICJ, European Patent 14182938.2). This method stands out for being simple, fast and less harmful to the environment than processes that require the application of chemical agents for the surfaces' treatment. The present study aims to model and simulate the mechanical behavior of polymer-metal hybrid joints, joined by the Friction-based Injection Clinching Joining process, subjected to mechanical tests performed in laboratory. That is, it aims to reproduce displacement fields, as well as stress and strain of these components through the usage of the finite element software Abaqus™ software. Experimental data, obtained from previous studies, from uniaxial tensile tests are used as input to the numerical models while results of uniaxial tensile tests, single joint lap-shear test and four point bending test results are used to validate the models. A digital image correlation system (DIC) is also used to validate the models. Eight of the nine constitutive implemented models presented force-displacement curves within 10% of the experimentally obtained values for the polymeric material (PEI) in the elastic regime under uniaxial tensile test. Regarding the single-joint under lap-shear model, three of the models presented force-displacement response within 10% of the experimental results. The force-displacement curves obtained from the multiple joint models under the bending test where not within 10% of the experimental results. With respect to strain field and displacement, the obtained results were qualitatively in accordance with the experimental observations and, quantitatively some models produced results within 10% of experimental results, whereas, the multiple-point joints model's results were in accordance with the experimental results only from the qualitative point of view.

KEYWORDS: F-ICJ, numerical modelling and simulation, hyperelastic constitutive models, macrocomposite hybrid structures.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO 1

2. OBJETIVOS 1

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 2

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....3

4.1. Friction-based Injection Clinching and Joining (F-ICJ)……..…… 3

4.2 Modelos constitutivos não-lineares elásticos.....4

5. METODOLOGIA 4

5.1 Modelagem da liga de alumínio AA6082-T6.....5

5.2 Modelagem da Polieterimida (PEI).....7

5.3 Modelagem da junta simples sobreposta submetida a cisalhamento sob tração.....8

5.4 Modelagem do componente de múltiplas juntas submetido à flexão 9

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....10

6.1 Materiais de base.....10

6.2 Junta simples sobreposta submetida a cisalhamento sob tração.....11

6.3 Componente de múltiplas juntas submetido à flexão.....12

7. CONCLUSÕES.....14

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....14

1. INTRODUÇÃO

Existe um crescente esforço em reduzir o peso dos veículos no setor de transportes devido a questões ambientais, como a exigência de reduzir as emissões de CO2, conforme afirmado por Koronis et al., 2013, e preocupações econômicas, como a tendência de aumento dos preços dos combustíveis, conforme Al-Oqla et al., 2014. De acordo com Staeves, 2013, a estratégia mais comumente empregada para reduzir de peso é o uso de materiais leves, como compósitos poliméricos, termoplásticos de elevada resistência mecânica e ligas leves. Esta seleção mais ampla de materiais leva ao uso de estruturas híbridas, onde a dissemelhança entre os materiais cria um desafio de projeto e de montagem para os engenheiros de desenvolvimento de produto. Assim, surge um novo nicho para novas técnicas de união, conforme Kah, 2014.

Devido ao recente aumento de interesse em juntas híbridas formadas por macrocompósitos, surgiram diversos métodos de união para juntas de polímero-metal. Segundo Sercer et al., 2007, estes métodos são genericamente divididos em três grupos: rebitagem, união por adesivos ou solventes e união por fusão. Existem ainda algumas técnicas de união que não se enquadram em nenhum dos três grupos anteriormente citados. Assim, formando novos grupos de processos, como os chamados métodos híbridos de união (que utilizam combinações dos três tipos de métodos anteriormente citados), como em Amancio, 2011, e moldagem de plásticos diretamente sobre partes metálicas pré-furadas, como em Rink, 1999.

Dentre os métodos alternativos de união de juntas híbridas, está o Injection Clinching Joining (patente US 7,780,432 B2), às vezes referido em português como Rebitagem por Injeção. Este método foi desenvolvido por Sergio Amancio-Filho em 2010 e é baseado na rebitagem por injeção, ligação adesiva e rebitagem mecânica. Através deste método busca-se unir partes de diferentes materiais através do aquecimento por resistência elétrica em uma câmara de aquecimento e posterior deformação de um termoplástico, formando a ancoragem mecânica com o outro componente metálico ou termofixo. Devido à fonte de calor deste processo ser por efeito Joule, o método foi rebatizado de Electrical-heating Injection Clinching Joining.

Dentre as variantes tecnológicas do método ICJ original destaca-se o método chamado de Friction-based Injection Clinching Joining (F-ICJ) (patente EP 14182938.2, 2014), às vezes traduzido como Rebitagem por Injeção baseada em Energia Friccional. Esta tecnologia é derivada do E-ICJ, mas utiliza calor gerado por fricção, em vez de efeito Joule, para aquecer o polímero. Comparado ao E-ICJ, o F-ICJ é mais rápido e mais eficiente energeticamente. O F-ICJ ainda apresenta como características elevada relação entre resistência mecânica e peso, baixo custo de maquinário e ferramental, baixos tempos de ciclo e versatilidade em termos de geometria da cabeça do rebite, conforme mencionado por Abibe, 2011.

Entender o comportamento mecânico de juntas e estruturas feitas pelo uso da tecnologia F-ICJ é um passo importante para alcançar a maturidade dessa nova tecnologia. O primeiro passo para uma compreensão completa do comportamento mecânico das juntas é avaliar o comportamento estático e quase-estático das mesmas. Para atingir esta compreensão, testes mecânicos e modelagem por elementos finitos são recursos de grande utilidade.

“A consideração ou seleção errônea de um modelo constitutivo tem como consequência simulações incorretas ou interpretações equivocadas de problemas reais de engenharia, o que tem se tornado muito comum.” [Hoss, 2009]. Portanto, é necessário considerar as limitações de cada modelo constitutivo para fazer uma seleção e posterior análise de resultados adequada.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo modelar mecanicamente juntas simples e juntas de múltiplos pontos formadas pela união de polieterimida (PEI) com a liga de alumínio AA6082-T6. Esta primeira análise é feita dentro das limitações que seguem: apenas uma geometria de

rebite é considerada, não são considerados efeitos visco-elásticos e efeitos devido à temperatura.

A fim de se obter resultados suficientemente representativos, o material polimérico amorfo é modelado através de diferentes modelos constitutivos hiperelásticos, enquanto o alumínio é modelado através de um simples modelo linear elasto-plástico. Estes modelos são implementados no programa de elementos finitos Abaqus® para simular ensaios de tração uniaxial dos materiais de base, cisalhamento sob tração de junta simples sobreposta e flexão a quatro pontos de um componente formado por múltiplas juntas.

Com o objetivo de validar os resultados obtidos, as respostas mecânicas dos modelos são comparadas com resultados experimentais obtidos por André Abibe durante a elaboração de sua dissertação de doutorado (Abibe, 2015). Estes resultados consistem em curvas de força por deslocamento e campos de deslocamentos, obtidos através da utilização de um Sistema de Correlação Digital de Imagem (DIC).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Paz, 2015, analisou o comportamento mecânico global de juntas simples de PEI e AA6082-T6 unidas por F-ICJ. Na ocasião, Paz modelou os dois materiais utilizando modelos elasto-plásticos lineares, obtendo como resultado modelos que apresentavam resposta de força por deslocamento representativa apenas no regime elástico dos materiais. No trabalho de Paz não foram comparados resultados de tensão e deformação e também não foi feito nenhum estudo envolvendo juntas compostas por mais de um rebite.

Abibe et al., 2002, fizeram uma análise detalhada do comportamento mecânico e dos mecanismos de falha de juntas simples sobrepostas unidas por E-ICJ. Porém, devido às diferenças entre os processos E-ICJ e F-ICJ, e devido às diferenças do comportamento mecânico entre o polímero reforçado que foi utilizado naquela ocasião e o polímero amorfo utilizado no presente estudo, não se pode estender os resultados obtidos naquele estudo para o presente estudo.

Lambiase, 2015, analisa o comportamento mecânico de juntas macrocompósitas de AA5053 e poliestireno unidas por rebitagem utilizando diferentes geometrias de ferramenta. No mencionado estudo, o processo de união das juntas consiste na deformação plástica de placas sobrepostas dos dois materiais, formando uma indentação responsável pela ancoragem mecânica. Devido às características do processo, o componente metálico sofre considerável deformação, sendo assim fragilizado. As falhas observadas no trabalho de Lambiase são por fratura do alumínio ou por esmagamento do polímero.

Zuanetti, 2013, caracteriza mecanicamente a polieterimida (PEI) em seu estudo. Para isto, foram realizados testes de tração uniaxial, compressão uniaxial, torção e teste de impacto. Na ocasião, foi identificado que o material polimérico apresenta a mesma resposta mecânica característica de outros termoplásticos amorfos em condições quase-estáticas. Esta resposta mecânica é marcada por quatro diferentes regimes antes de ocorrer a fratura: linear elástico, não-linear elástico, amolecimento por deformação (strain softening) e enrijecimento por deformação (strain hardening).

Zuanetti, 2013, ainda comparou os resultados experimentais com os obtidos através da implementação em MATLAB® do modelo de Ramberg-Osgood e de um modelo modificado de Ramberg-Osgood. Zuanetti relatou que o modelo original de Ramberg-Osgood previu com precisão o comportamento do material no regime elástico enquanto o modelo modificado foi capaz de prever o comportamento do material nos regimes elásticos e plásticos para alongamentos de até 40% para os ensaios mencionados no parágrafo anterior. Apesar destes resultados, não foi feita nenhuma análise referente ao comportamento da polieterimida submetida a cisalhamento, torção biaxial, ou ainda, sob carregamentos que gerem diferentes modos de deformação simultaneamente.

Muito embora o modelo de Ramberg-Osgood modificado pareça ser a melhor opção atualmente disponível na literatura para simular o comportamento mecânico do PEI sob tração uniaxial, não se conhece a capacidade deste modelo em prever o comportamento do material

sob esforços que gerem diferentes modos de deformação. Além disso, a implementação e utilização deste modelo em softwares multifísicos, como o Abaqus®, não é trivial. Pois o modelo constitutivo de Ramberg-Osgood já implementado no Abaqus® é o modelo original, formulado para modelar a deformação plástica de metais, que considera comportamento elástico exclusivamente linear.

Não é possível utilizar o modelo de Ramberg-Osgood já implementado no software juntamente com outro modelo constitutivo para modelar o regime elástico, conforme Abaqus Analysis User's Manual. A implementação do modelo de Ramberg-Osgood modificado seria possível apenas através da utilização de uma sub-rotina em FORTRAN específica para este fim. Deste modo, se torna interessante a utilização de modelos constitutivos hiperelásticos (já implementados no software) para modelar o comportamento mecânico da polieterimida.

Pascon, 2008 e Hoss, 2009, descrevem, analisam e comparam o desempenho de diversos modelos constitutivos hiperelásticos na modelagem de alguns polímeros altamente deformáveis (elastômeros) sob diferentes modos de carregamento. Hoss concluiu que a adequada modelagem do material hiperelástico deve ser feita utilizando dados obtidos através de diferentes ensaios mecânicos, de acordo com a aplicação. Segundo o autor, é recomendável que se disponha de resultados experimentais de, pelo menos, dois ensaios mecânicos distintos (mesmo que apenas um dos ensaios seja utilizado para o ajuste das constantes constitutivas enquanto e o outro seja utilizado como referência para verificação da qualidade das predições). Ainda segundo Hoss, recomenda-se que testes capazes de excitar o segundo invariante de deformação sejam priorizados. Ou seja, os ensaios mecânicos devem ser priorizados na seguinte ordem: tração biaxial, cisalhamento, tração uniaxial e/ou compressão.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Friction-based Injection Clinching and Joining (F-ICJ)

O processo F-ICJ utiliza calor gerado através de fricção para formar juntas híbridas de polímero-metal. Este método é uma variante do processo chamado de E-ICJ, que utilizava energia elétrica para aquecer resistores e assim aquecer o material polimérico a ser unido com o material metálico.

Por utilizar calor gerado através da fricção de uma simples ferramenta rotativa em contato com um pino de material termoplástico, este método é considerado como sendo bastante eficiente e de baixo custo. Outras vantagens do método são o baixo tempo de ciclo, reduzido dano ao ambiente por não necessitar de preparações da superfície com componentes químicos, e ainda, elevada relação entre resistência mecânica e peso, conforme Abibe, 2015.

O processo de união entre os materiais ocorre em seis diferentes etapas, conforme ilustrado na Figura 4.1.1. Na Figura 4.1.2 é mostrada a foto de uma junta consolidada.

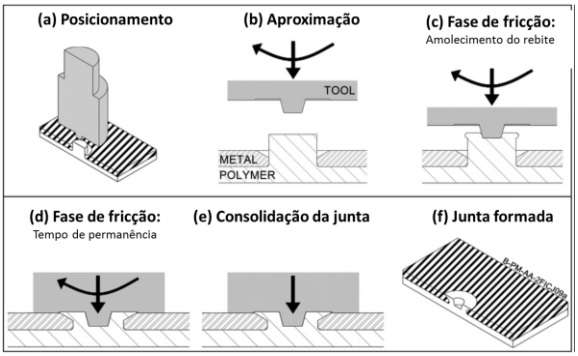


Figura 4.1.1 – Ilustração das etapas presentes no processo F-ICJ. Adaptada de "Friction-based Injection Clinching Joining (F-ICJ): a new joining method for hybrid lightweight structures, Abibe, 2015".

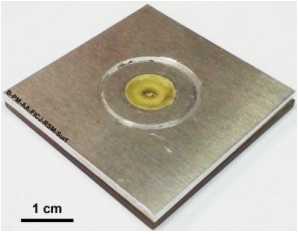


Figura 4.1.2 – Foto de uma junta simples formada por F-ICJ.

4.2 Modelos constitutivos não-lineares elásticos

Devido ao presente trabalho utilizar resultados de juntas constituídas por elementos metálicos e poliméricos, é importante compreender o comportamento mecânico dos dois diferentes materiais individualmente. Como o comportamento mecânico da liga de alumínio AA6082-T6 apresenta regime elástico linear, o modelo de Hooke pode ser aplicado sem maiores limitações ou prejuízos. Devido a esta simplicidade na modelagem do material metálico, será dada ênfase na modelagem do material polimérico.

Conforme observado por Zuanetti, 2013, em regime quase-estático, o PEI apresenta comportamento similar a outros termoplásticos amorfos. Isto é, a resposta de tensão por deformação pode ser dividida em quatro diferentes regimes: linear elástico, não-linear elástico, amolecimento (*strain softening*) e enrijecimento (*strain hardening)*. Portanto, a relação entre tensão e deformação não é linear e a Lei de Hooke não é aplicável. Nestes casos, a forma mais utilizada para se obter uma relação entre tensão e deformação é através de uma função de energia de deformação (MSC, 2000). Os modelos compatíveis com este tipo de comportamento não-linear elástico que são comumente referenciados na bibliografia são os modelos hiperelásticos e o modelo de Ramberg-Osgood modificado. Devido às restrições já mencionadas na seção 3, o foco deste trabalho será mantido nos modelos hiperelásticos.

Existem atualmente dezenas de modelos constitutivos hiperelásticos que apresentam diferentes equações para a energia de deformação, estando muitos deles incluídos em bibliotecas de programas de simulação por elementos finitos. Para o estudo realizado neste trabalho iremos utilizar os modelos constitutivos hiperelásticos já disponíveis na biblioteca do Abaqus®: Arruda-Boyce, Marlow, Mooney-Rivlin, neo-Hookean, Ogden, polynomial, reduced polynomial, Yeoh e Van der Waals.

5. METODOLOGIA

A fim de modelar o comportamento mecânico das juntas híbridas unidas pelo processo F-ICJ, a metodologia deste estudo é dividida em três etapas. A primeira etapa é a modelagem dos materiais de base (AA6082-T6 e PEI), a segunda etapa é a modelagem de uma junta simples sobreposta submetida a um ensaio de cisalhamento sob tração e a terceira etapa consiste na modelagem de um componente composto por múltiplas uniões submetido a uma flexão a quatro pontos. Esta metodologia é representada através da Figura 5.1.

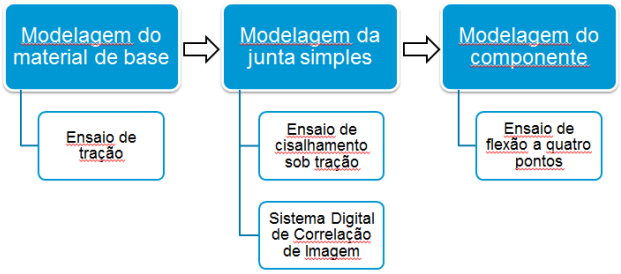


Figura 5.1 – Representação da metodologia empregada no presente estudo.

Todos os resultados experimentais apresentados foram obtidos através de ensaios realizados por André Abibe durante o desenvolvimento de sua dissertação de doutorado (Abibe, 2015) no centro de pesquisas Helmholtz-Zentrum Geesthacht, na Alemanha. Os ensaios de tração uniaxial da liga de alumínio AA6082-T6 e da Polieterimida (PEI) foram realizados em uma máquina universal de testes (modelo 1478, Zwick Roell, Alemanha) de acordo com as normas ISO 6892 e DIN EN ISO 527, respectivamente. O ensaio de cisalhamento sob tração de junta simples sobreposta foi realizado na mesma máquina universal de testes com base na norma ASTM D5961-10 a uma taxa de deslocamento de 2 $mm.min^{-1}$. Já o teste de flexão a quatro pontos do componente foi realizado em uma máquina universal de testes de outro modelo (modelo 1484, Zwick Roell, Alemanha) a uma taxa de deslocamento de 40 $mm.min^{-1}$.

5.1 Modelagem da liga de alumínio AA6082-T6

A liga de alumínio AA6082-T6 é modelada a partir da utilização das respostas de força por deslocamento, obtidas durante o ensaio de tração uniaxial. Foram produzidos 20 corpos de prova divididos em dois grupos, um grupo de 10 amostras extraídas na mesma direção da laminação da chapa de alumínio fornecida pelo fabricante e outro grupo extraído da direção transversal à direção de laminação. As cotas e também uma foto do corpo de prova utilizado são apresentadas na Figura 5.1.1.

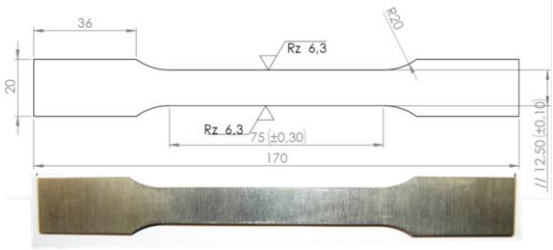


Figura 5.1.1 – Desenho e foto do corpo de prova para ensaio de tração uniaxial da liga AA6082-T6.

A fim de simplificar a modelagem do material, as diferenças mecânicas observadas entre os corpos de prova orientados paralelamente e transversalmente à direção de laminação serão desconsideradas. Ou seja, o comportamento ortotrópico do material será desconsiderado e será utilizado um modelo isotrópico gerado a partir do comportamento médio de todas as amostras extraídas nas diferentes direções. Na Figura 5.1.2 está representado o comportamento médio de todos os corpos de prova ensaiados em termos de força por deslocamento.

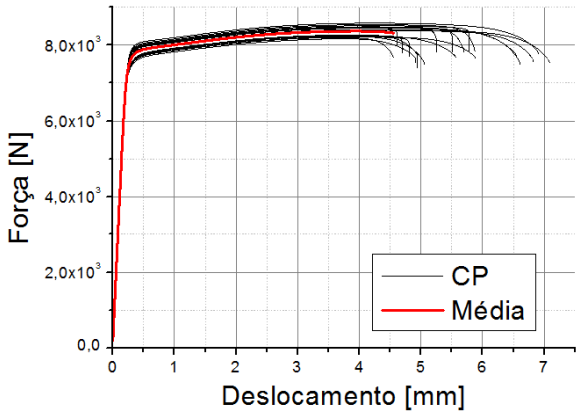


Figura 5.1.2 – Curva de força por deslocamento gerada através do ensaio de tração uniaxial dos corpos de prova da liga AA6082-T6.

Através da análise da Figura 5.1.2, pode-se identificar que o material apresenta inicialmente comportamento linear (região elástica) e, posteriormente, apresenta relação não-linear entre força e deslocamento (região plástica com enrijecimento). Afim de representar este comportamento adequadamente, é utilizado um modelo constitutivo elasto-plástico com região elástica linear e região plástica com enrijecimento não-linear. Os dados de entrada do modelo constitutivo do material utilizados estão representados na Tabela 5.1.1. Para modelar o enrijecimento por plastificação foi inserida no modelo uma tabela de pontos da curva de tensão por deformação plástica.

Tabela 5.1.1 – Dados de entrada utilizados para modelar a liga AA6082-T6.

Propriedade	**Valor atribuído**
Módulo de elasticidade	69,6 GPa
Tensão de escoamento	316,5 MPa
Tensão de ruptura	343,4 MPa
Densidade	2700 kg/m^3

O modelo geométrico foi criado diretamente com o programa Abaqus®/CAE utilizando as cotas indicadas na Figura 5.1.1. As condições de contorno aplicadas foram engaste em duas superfícies (representando a fixação do corpo de prova pelas garras fixas) e deslocamento prescrito nas duas superfícies planas do outro lado do corpo (representando o movimento aplicado pelas garras móveis) área indicada na Figura 5.1.3 e engaste das superfícies do outro lado do corpo. As condições de contorno acima descritas estão ilustradas na Figura 5.1.3.

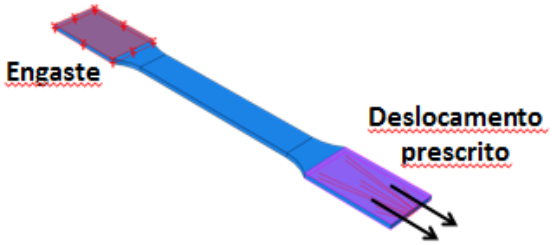


Figura 5.1.3 – Representação das condições de contorno aplicada no modelo ensaio de tração uniaxial.

Foram criados diferentes modelos de malha com diferentes níveis de refinamento até que fossem obtidos resultados idênticos para os diferentes modelos. Deste modo, foi considerado que a malha utilizada era adequada para o problema. Na Figura 5.1.4 está representada uma das malhas criadas para o modelo.

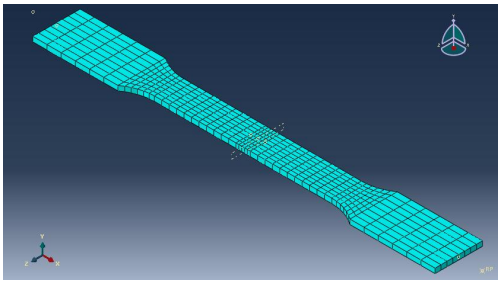


Figura 5.1.4 – Representação da malha de um dos modelos utilizados para simular o ensaio de tração uniaxial para a liga de alumínio AA6082-T6.

5.2 Modelagem da Polieterimida (PEI)

Devido à polieterimida ser um material termoplástico amorfo, seu comportamento mecânico é diferente daquele apresentado por um material metálico. Na Figura 5.2.1 é apresentado o gráfico de força por deslocamento obtido experimental durante o ensaio de tração uniaxial, onde as curvas indicadas como “CP” correspondem ao comportamento de cada corpo de prova ensaiado. Em vermelho está representada a curva média obtida.

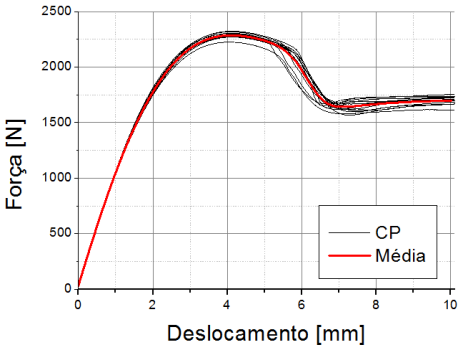


Figura 5.2.1 – Gráfico de força por deslocamento obtido durante ensaio de tração uniaxial de corpos de prova de polieterimida.

É possível identificar na Figura 5.2.1 que o regime elástico da polieterimida (definido de zero até o máximo de força alcançado) é inicialmente linear e, após determinado deslocamento, torna-se não-linear. Devido a este comportamento, serão utilizados modelos constitutivos hiperelásticos não-lineares para modelar o material.

O primeiro passo para a modelagem do material é fornecer, ao programa de simulação, tabelas de tensão por deformação obtidas experimentalmente para cada tipo de ensaio mecânico. Estas tabelas são utilizadas como referência para o ajuste de curva que o programa realiza para cada um dos diferentes modelos constitutivos hiperelásticos disponíveis em sua biblioteca (citados anteriormente no final da seção 4.2).

Apesar de recomendado por Hoss, 2009, que sejam utilizados dados experimentais de pelo menos dois diferentes ensaios mecânicos para os resultados obtidos durante o ajuste das constantes constitutivas, não se dispõe de resultados experimentais de tração biaxial ou de cisalhamento puro. Portanto, é fornecido ao programa apenas uma tabela com os resultados exclusivamente obtidos do ensaio de tração uniaxial.

Após a determinação das constantes constitutivas de cada modelo hiperelástico, estes modelos de material são implementados em um modelo numérico no Abaqus®/CAE, considerando as geometrias dos corpos de prova ensaiados (representados na Figura 5.2.2) e as condições de contorno similares àquelas indicadas na Figura 5.1.3. As respostas de força por deslocamento geradas pelos modelos numéricos são então comparadas com os resultados experimentais.

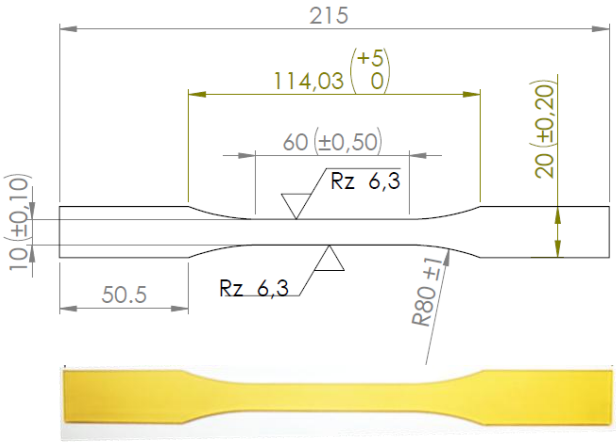


Figura 5.2.2 – Desenho e foto do corpo de prova para ensaio de tração uniaxial da polieterimida (PEI).

5.3 Modelagem da junta simples sobreposta submetida a cisalhamento sob tração

A modelagem da junta simples sobreposta submetida ao ensaio de cisalhamento sob tração é realizada através da implementação de modelos no programa de simulação numérica Abaqus®. Previamente à definição da malha, das condições de contorno e das configurações de contato entre os dois materiais, foram criados alguns modelos preliminares cujas respostas foram analisadas até que fossem obtidos resultados similares (em termos de distribuição de tensões e deslocamento global) entre os diferentes modelos. Na Figura 5.3.1 estão apresentadas as condições de contorno e a malha que foram selecionadas para os modelos. Na tabela 5.3.1 estão indicados os elementos de malha utilizados nos modelos.

Figura 5.3.1 – Representação das condiçoes de contorno empregadas no modelo de cisalhamento sob tração.

Tabela 5.3.1 – Elementos de malha utilizados nos modelos de cisalhamento sob tração.

Nome do elemento	Número de elementos	Corpo
Tetraédrico híbrido (C3D4H)	27.539	AA6082
Tetraédrico híbrido (C3D4H)	61.607	Polieterimida

A análise do desempenho de cada modelo constitutivo hiperelástico é feita através da comparação entre os resultados experimentais do ensaio com os resultados dos modelos numéricos. Porém, nesta etapa são utilizadas não apenas as respostas de força por deslocamento, mas também, campos de deslocamentos e de deformações obtidos por um Sistema Digital de Correlação de Imagem (DIC) durante os ensaios, conforme ilustrado na Figura 5.3.2.

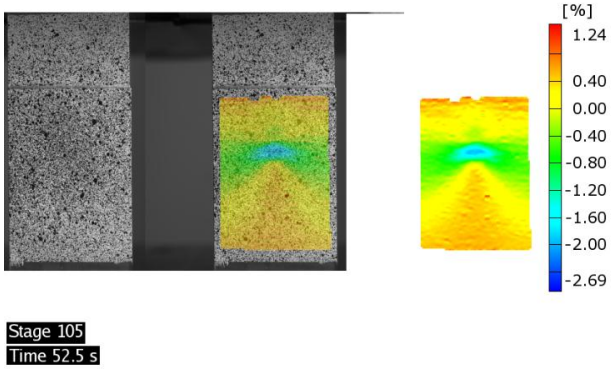


Figura 5.3.2 – Campo de deformações indicado pelo Sistema Digital de Correlação de Imagem durante um dos ensaios de cisalhamento sob tração da junta simples sobreposta.

5.4 Modelagem do componente de múltiplas juntas submetido à flexão

Devido à complexidade geométrica do modelo, ao elevado número de elementos de malha, à não-linearidade do problema e ainda à considerável região em contato entre os diferentes corpos, a modelagem do componente é dividida em duas etapas. Na primeira etapa é feita uma análise preliminar de um modelo simplificado, que é formado apenas pelo perfil metálico, lado esquerdo da Figura 5.4.1. Já na segunda etapa, um modelo do componente completo (formado pelo perfil metálico e pela placa polimérica com os pinos) é avaliado.

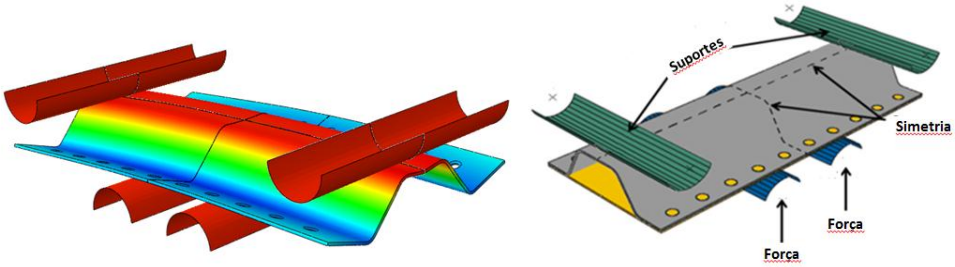


Figura 5.4.1 – Representação do modelo simplificado (à esquerda) e do modelo completo (à direita) do componente submetido à flexão.

Para validar o modelo simplificado, foram criados diversos modelos preliminares compostos por diferentes elementos de malha, diferentes graus de refinamento da malha, diferentes condições de contorno e diferentes configurações de contato. Como critério de seleção, foi analisado o comportamento do modelo com relação às distribuições de tensões e deformações, bem como, a curva de força por deslocamento obtida.

A implementação do modelo completo, considerando também o corpo polimérico, é feita utilizando-se as mesmas condições de contorno aplicadas ao modelo simplificado, conforme representado no lado direito da Figura 5.4.1. Atribui-se também à parte polimérica, os mesmos modelos constitutivos já utilizados nos modelos de tração e de cisalhamento sob tração. Através da Figura 5.4.2 e da Tabela 5.4.1 pode-se verificar a malha utilizada para modelar o componente sob flexão.

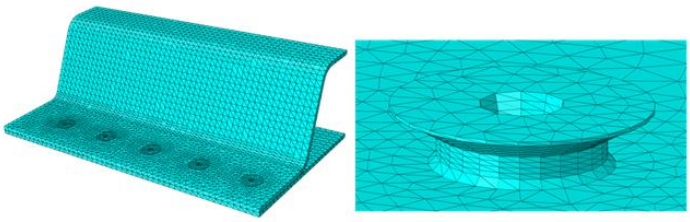


Figura 5.4.2 – Malha utilizada no modelo do componente sob flexão.

Tabela 5.4.1 – Elementos de malha utilizados no modelo do componente sob flexão.

Nome do elemento	Número de elementos	Corpo
Tetraédrico híbrido (C3D4H)	22.971	Polieterimida
Tetraédrico híbrido (C3D4H)	23.838	AA6082

Como não foi utilizado um Sistema Digital de Correlação de Imagem durante os testes de flexão (devido à restrição de espaço para instalar o sistema adequadamente), não se dispõe de resultados experimentais referentes a campos de deslocamentos e deformações. Deste modo, a análise dos resultados dos modelos é realizada através de comparação entre as curvas de força por deslocamento experimental e a curva gerada pelo modelo numérico. São também realizadas análises com relação à distribuição das tensões e das regiões plastificadas no modelo em comparação com as fraturas e deformações plásticas apresentadas pelos corpos de prova ensaiados.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Materiais de base

A seguir, são apresentados os resultados e análises referentes à modelagem da liga de alumínio AA6082-T6. Na figura 6.1.1 estão representadas a curva de força por deslocamento experimental e a curva gerada pelo modelo numérico. Como pode ser observado na Figura 6.1.1, a curva resultante do modelo sobrepõe-se à curva experimental. Este resultado tão próximo ao que foi observado experimentalmente se justifica devido à modelagem do material ter sido realizada a partir dos dados deste mesmo ensaio. Ainda com relação aos resultados apresentados na Figura 6.1.1, pode-se inferir que as condições de contorno e à malha aplicada ao modelo foram adequadas.

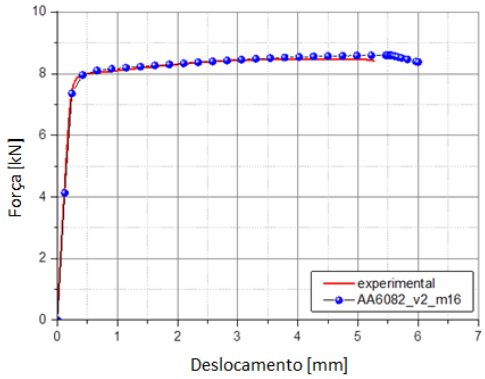
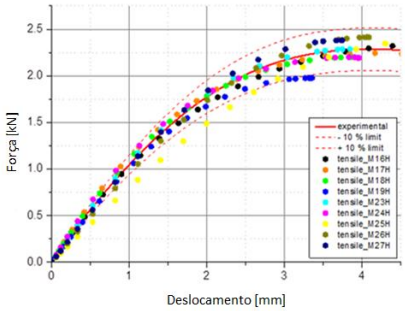


Figura 6.1.1 – Gráfico de força por deslocamento experimental e numérico do ensaio de tração uniaxial da liga AA6082-T6.

Com relação à modelagem da polieterimida, estão apresentadas na Figura 6.1.2 as curvas de força por deslocamento obtidas para os diferentes modelos constitutivos hiperelásticos implementados. Dentre todos os modelos implementados, os que aparecem representados na Figura 6.1.2 são aqueles que apresentaram estabilidade na faixa de deformações considerada. Pode-se perceber que dentre os modelos apresentados, apenas o modelo Polinomial Reduzido N=4 afasta-se em mais de 10% da curva experimental para a faixa de deformações considerada.



Modelo	Material
tensile_M16H	Ogden N=3
tensile_M17H	Ogden N=4
tensile_M18H	Ogden N=5
tensile_M19H	Ogden N=6
tensile_M23H	Marlow
tensile_M24H	Polynomial N=2
tensile_M25H	Reduced Polynomial N=4
tensile_M26H	Reduced Polynomial N=5
tensile_M27H	Reduced Polynomial N=6

Figura 6.1.2 – Curvas de força por deslocamento experimental juntamente com as respostas dos modelos numéricos à esquerda e, à direita, uma tabela relacionando os modelos constitutivos com os modelos numéricos apresentados.

6.2 Junta simples sobreposta submetida a cisalhamento sob tração

Na figura 6.2.1, à esquerda, são apresentados os resultados de todos os modelos hiperelásticos implementados enquanto na Figura 6.2.1, à direita, são mostrados apenas os modelos que apresentaram respostas dentro de uma faixa de erro de 10% com relação à curva média experimental.

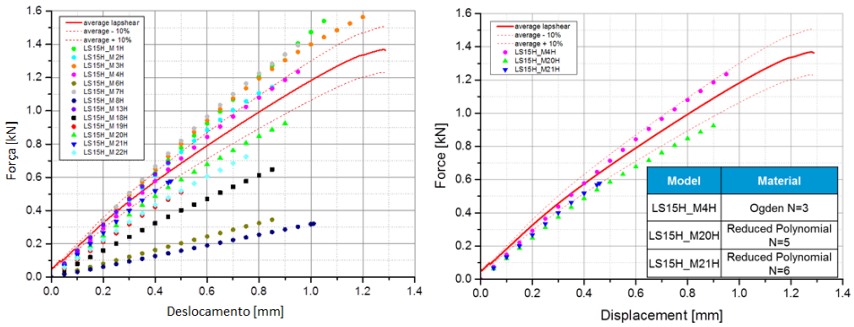


Figura 6.2.1 – Resultados de força por deslocamento dos modelos de junta simples.

Analisando as curvas dos modelos, pode-se perceber que muitos não apresentaram convergência a partir de determinado valor de deslocamento. Isto pode ser explicado pelas elevadas deformações que ocorrem na região da cabeça do rebite na medida em que o deslocamento e as deformações aumentam. Além das elevadas deformações nestes elementos com certa distorção (devido à geometria complexa) ainda existe a dificuldade de convergência devida à grande região de contato entre os dois corpos.

Pode-se observar também que diversos modelos apresentaram respostas com afastamento da curva experimental maiores que 10%. Uma das causas deste distanciamento de alguns modelos com relação aos resultados experimentais é que a determinação das constantes constitutivas foi realizada levando-se em conta apenas resultados de tração uniaxial. No caso do ensaio de cisalhamento sob tração, alguns elementos ficam submetidos a outros tipos de esforços, como cisalhamento, por exemplo.

Dentre os modelos implementados, os modelos Ogden N=3, Polinomial Reduzido N=5 e Polinomial Reduzido N=6 foram os que geraram resultados mais próximos aos gerados durantes os ensaios mecânicos. Durante todo o intervalo de deslocamentos considerado, estes modelos constitutivos apresentaram resultados dentro de uma faixa de afastamento dos resultados experimentais inferior a 10%.

Na Figura 6.2.2 é mostrada uma comparação entre o campo de deformações gerado com auxílio do Sistema Digital de Correlação de Imagem (lado esquerdo da figura) e a resposta do modelo numérico, lado direito da figura. As deformações visíveis na Figura 6.2.3 se devem a

força resistente ao movimento que a chapa metálica aplica no rebite. As deformações resultantes do modelo numérico apresentam erro relativo inferior a 15% quando comparadas às medidas pelo Sistema Digital de Correlação de Imagem.

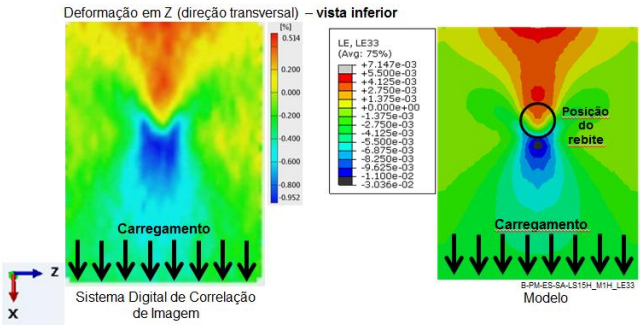


Figura 6.2.3 – À esquerda é mostrado o campo de deformações pelo Sistema Digital de Correlação de Imagens em comparação com o resultado do modelo, à direita.

Na Figura 6.2.4 são mostrados os deslocamentos transversais ao plano da junta oriundos de um momento secundário gerado pelo desalinhamento das forças aplicadas no corpo de prova. Desta vez, os resultados do modelo numérico não apresentaram erro relativo superior a 10%.

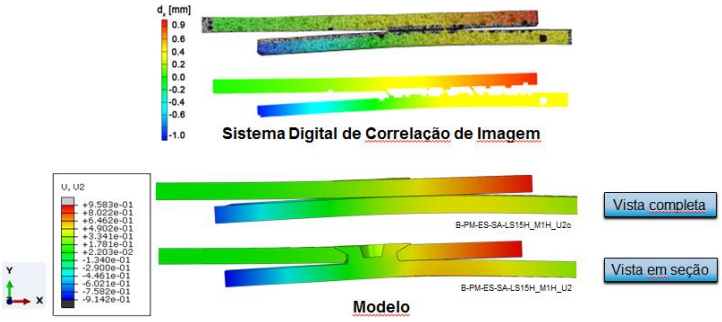
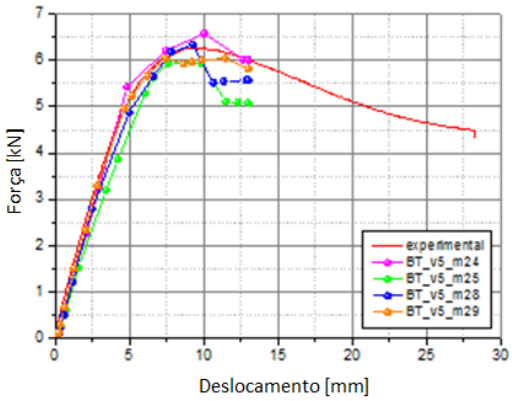


Figura 6.2.4 – Comparação entre os resultados experimentais obtidos pelo Sistema Digital de Correlação de Image (parte superior) com os resultados do modelo (parte inferior) no plano vertical.

6.3 Componente de múltiplas juntas submetido à flexão

Conforme descrito na seção 5.3, a modelagem do componente foi iniciada através de um modelo simplificado, considerando apenas o perfil de alumínio. Na Figura 6.3.1 estão representadas curvas de força por deslocamento geradas por estes modelos numéricos e os elementos de malha de cada um dos modelos. Pode-se observar que os quatro modelos implementados apresentaram resultados próximos ao resultado experimental até a ocorrência do início da plastificação. A partir da plastificação do material, ocorre aumento da dispersão entre os modelos. Também nesta região, os modelos numéricos começam a apresentar dificuldade de convergência.



Modelo	Descrição
BT_v5_m24	Tetraédrico quadrático (C3D10)
BT_v5_m25	Hexaédrico com integração reduzida (C3D8R)
BT_v5_m28	Hexaédrico com formulação híbrida (C3D8IH)
BT_v5_m29	Hexaédrico quadrático (C3D20R)

Figura 6.3.1 – Comparativo entre modelos com diferentes elementos de malha para flexão a quatro pontos (apenas componente metálico).

Após determinado deslocamento, os modelos gerados para o componente completo apresentaram dificuldades em gerar resultados convergentes em tempo hábil com os recursos computacionais disponíveis. Deste modo, a análise das curvas de força por deslocamento foi inviabilizada. Porém, os modelos foram capazes de gerar distribuições de tensão e deformações plásticas qualitativamente similares ao que foi observado experimentalmente. Na Figura 6.3.2 está mostrada a distribuição de tensões ao longo do perfil de AA6082-T6. Já na Figura 6.3.3 aparece uma comparação entre as regiões do modelo que se deformaram plasticamente com uma foto de um dos corpos de prova com marcas de deformação plástica.

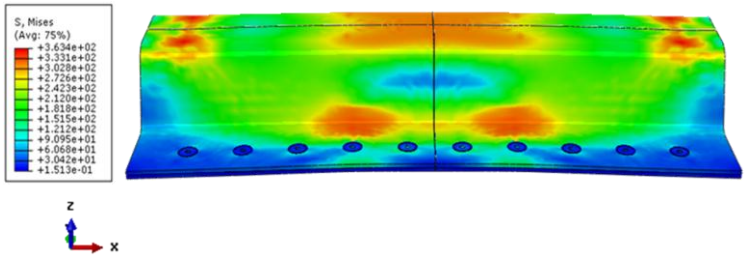


Figura 6.3.2 – Distribuição de tensões no modelo de componente com múltiplos rebites submetido à flexão a quatro pontos.

Através da observação da Figura 6.3.2, pode-se perceber que as regiões mais solicitadas são aquelas em contato com os apoios e a região superior central, que sofre maior tensão trativa devido à flexão do corpo.

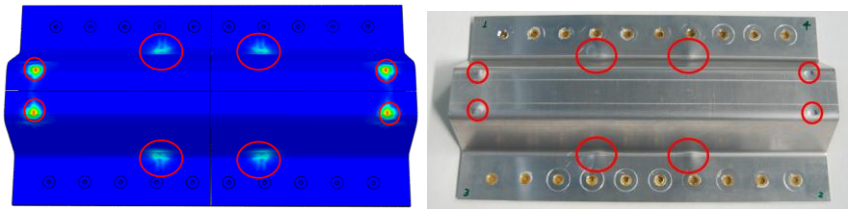


Figura 6.3.3 – Comparativo entre as regiões plastificadas no modelo numérico (lado esquerdo) com as regiões visivelmente plastificadas no corpo de prova (lado direito).

Na Figura 6.3.4, lado esquerdo, é mostrada a distribuição de tensões em detalhe nos rebites centrais. Pode-se observar que existe considerável acúmulo de tensões na região da base do rebite. Já no lado direito da Figura 6.3.4, é apresentada uma foto de um corpo de prova após a ocorrência da fratura. As setas vermelhas na Figura 6.3.4 indicam o início de uma trinca na mesma região em que o modelo indica elevada concentração de tensões.

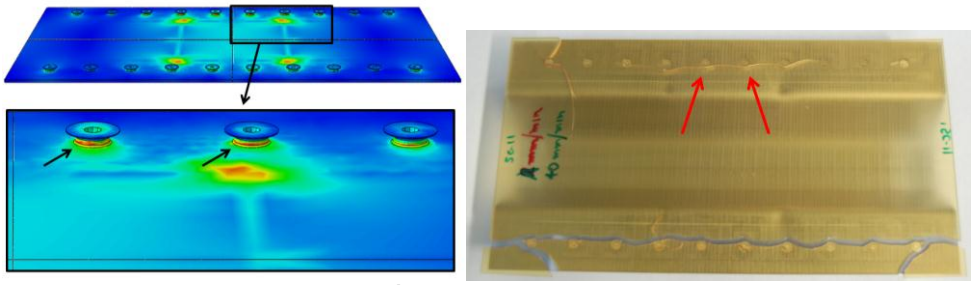


Figura 6.3.4 – Detalhamento do acúmulo de tensões na base dos rebites centrais do componente (lado esquerdo) e foto de um corpo de prova após a fratura (lado direito).

7. CONCLUSÕES

Os modelos constitutivos hiperelásticos implementados foram capazes de gerar resultados de força por deslocamento e de deslocamento transversal com erro relativo inferior a 10%, no caso das juntas simples sobrepostas submetidas a cisalhamento por tração. Em termos de deformação, os resultados gerados pelos modelos apresentaram erro relativo de até 15%.

No caso de componentes submetidos à flexão, os modelos forneceram resultados de campos de tensão e deformação qualitativamente representativos. Porém, não foi possível obter convergência para nenhum dos materiais implementados até um valor de deslocamento considerado adequado para examinar a resposta de força por deslocamento dos mencionados modelos em condição de flexão.

Frente aos modelos constitutivos hiperelásticos implementados, os modelos Ogden N=3, Polinomial Reduzido N=5 e Polinomial Reduzido N=6 foram os que geraram resultados mais próximos aos obtidos experimentalmente durante o ensaio de cisalhamento sob tração da junta simples.

O ajuste dos parâmetros constitutivos dos materiais hiperelásticos através da utilização de resultados experimentais de ensaios de cisalhamento ou tração biaxial pode gerar modelos capazes de apresentar comportamento mecânico mais semelhante ao observado experimentalmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS, **“Abaqus Analysis User's Manual”**, Abaqus 6.13 Documentation.

ABAQUS, **“Abaqus Theroy Manual”**, Abaqus 6.13 Documentation.

ABIBE, A. B., “**Desenvolvimento de união de multimateriais através de rebitagem por injeção (Injection Clinching Joining)”**. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos: [s.n.]. 2011.

ABIBE, A. B. et al., “**Mechanical and failure behaviour of hybrid polymer-metal staked joints”**. Materials & Design, 46, Abril 2013. 338-347.

ABIBE, A. B., “**Friction-based Injection Clinching Joining (F-ICJ): a new joining method for hybrid lightweight structures”**. TUHH. Hamburg. 2015.

AL-OQLA; FARIS, M.; SAPUAN, S. M., “**Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry**”. Journal of Cleaner Production, 66, 2014. 347-354.

AMANCIO-FILHO, S. T., "**Rebitagem por Fricção ("FricRiveting"). Desenvolvimento de uma Nova Técnica de União para Juntas Híbridas do Tipo Polímero-Metal. Parte I: Processo e Microestrutura**". Soldagem e Inspeção, São Paulo, 16, n. 4, Out/Dez 2011. 387-395.

HOSS, L., "**Modelos constitutivos hiperlelásticos para elastômeros incompressíveis: ajuste, comparação de desempenho e proposta de um novo modelo"**. UFRGS. [S.l.]. 2009.

International Organization for Standardization. ISO 527: "**Plastics – Determination of tensile properties"**. 2012

International Organization for Standardization. ISO 6892: "**Metallic materials – Tensile testing"**. 2009

KAH, P. E. A., "**Techniques for joining dissimilar materials: metals and polymers**". Reviews on Advanced Materials Science, 36, n. 2, 2014.

KORONIS, G.; SILVA, A.; FONTUL, M., "**Green composites: a review of adequate materials for automotive applications**". Composites Part B: Engineering, 44, 2013. 120-127.

MSC SOFTWARE., "**Nonlinear Finite Element Analysis of Elastomers"**. [S.l.]. 2000.

PASCON, J. P., "**Modelos constitutivos para materiais hiperelásticos: estudo e implementação computacional"**. Universidade de São Paulo. [S.l.]. 2009.

RINK, M., "**Device for producing bonded parts"**. US 005940949:1999, 1999.

SERCER, M.; RAOS, P., "**Joining of plastics and composites".** Universidade de Zagreb. [S.l.]. 2007.

STAEVES, J., "**The right material at the right place (BMW Group)**". Global Automotive Lightweight, Londres, 2013.

ZUANETTI, B., "**Characterization of Polyetherimide Under Static, Dynamic, and Multiple Impact Conditions"**, 2013.