

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

MODELAGEM NUMÉRICA DE UNIÃO DE MATERIAIS DISSIMILARES ATRAVÉS DE
REBITAGEM POR INJEÇÃO BASEADA EM ENERGIA FRICCIONAL

por

Guilherme Paz

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, julho de 2015

MODELAGEM NUMÉRICA DE UNIÃO DE MATERIAIS DISSIMILARES ATRAVÉS DE
REBITAGEM POR INJEÇÃO BASEADA EM ENERGIA FRICCIÓNAL

por

Guilherme Paz

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. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. José Antonio Esmerio Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Patric Daniel Neis

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Tiago Becker

Porto Alegre, 12, junho de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador Prof. Dr. José Antonio Esmerio Mazzaferro, pelos anos de apoio e instrução como bolsista do LS&TC e pela oportunidade de trabalhar com tecnologias inovadoras na Alemanha, além de me apoiar no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Sérgio Amancio-Filho pela oportunidade de integrar seu grupo de pesquisa e em especial ao Mestre André Abibe por todo suporte e incentivo em me ensinar sobre polímeros e uniões híbridas.

Aos meus pais por sempre estarem presentes em minha vida, apoiando minhas decisões.

À minha família e amigos que estão sempre juntos, suportando em todos os momentos.

DEDICATÓRIA

Decido este trabalho a todos que sempre me apoiaram, em especial à minha família e meus pais, por todo o apoio durante a longa jornada de estudo e trabalho.

PAZ, G. **Modelagem Numérica de União de Materiais Dissimilares Através de Rebitagem Por Injeção baseada em Energia Friccional**. 2015. 21 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

O crescente uso de estruturas híbridas requer habilidades em unir partes sem a utilização de produtos químicos, e também a habilidade de compreender os comportamentos destas uniões. Este trabalho de graduação apresenta uma técnica de modelagem para desenvolver modelos mecânicos que predizem o comportamento de juntas híbridas unidas por tecnologias baseadas em fricção. A técnica apresentada é rebitagem por injeção baseado em energia friccional (F-ICJ) e os resultados da simulação são comparados com os resultados dos ensaios mecânicos das juntas, mostrando-se adequados na comparação entre resultados numéricos e experimentais.

PALAVRAS-CHAVE: modelagem numérica, comportamento mecânico, estruturas híbridas

PAZ, G. **Numerical Modelling of Hybrid Joint using Friction based Injection Clinching Joining**. 2015. 21 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

The growing use of hybrid structures requires skills to join parts without using chemical products, but also the skills to understand the behavior of the joints. This graduation work present a modelling technique to develop mechanical models to predict the behavior of hybrid joints joined using friction technologies. The technique presented is called Friction based Injection Clinching Joining (F-ICJ) and the results of the simulation are compared with the results of the mechanical testing of the joints showing agreement between numerical and experimental data.

KEYWORDS: *numerical modelling; mechanical behavior; hybrid structures.*

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	1
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3.1 Uniões Polímero-Metal	1
3.2 Rebitagem por Injeção Baseada em Energia Friccional (F-ICJ)	2
3.3 Modelagem Computacional	2
3.3.1 Modelagem de Uniões/Soldagem de Estruturas Híbridas	3
3.3.2 Contatos	3
3.3.3 Restrições	3
4 METODOLOGIA	3
5 DESENVOLVIMENTO	5
6. CONCLUSÃO..	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
Anexo I	14
Apêndice I	15

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional criou a necessidade de transportes intensos nos últimos 20 anos. Este crescimento é verificado tanto no transporte de passageiros como no de cargas, e este efeito causa um impacto na natureza, resultando em uma mudança de pensamento na sociedade. A redução nos gases de efeito estufa e responsabilidades ambientais são atualmente metas de muitas empresas no mundo. Para que as metas de redução sejam atingidas é necessária uma modificação nas estratégias de manufaturas [1].

Reduzir emissões implica na indústria do transporte reduzir o consumo de combustível, o que resulta em estruturas novas e com peso reduzido, utilizando materiais como ligas leves de aço e plásticos de engenharia. Traçando estes novos objetivos, a indústria do transporte iniciou pesquisas por novos processos para produzir materiais leves com elevada relação resistência-peso [2]. Com isso, a presença de materiais variados torna o processo de união de estruturas complexo, e as tecnologias atuais de união não são adequadas para atingir um bom desempenho mecânico com diferentes tipos de carga.

Para estruturas híbridas, o uso do método de elementos finitos (MEF) é uma importante ferramenta para estimar o comportamento mecânico de juntas [3 - 5]. Utilizando MEF é possível prever e caracterizar o comportamento mecânico de diferentes tipos de juntas sujeitas a diversos carregamentos. Com o crescente número de juntas híbridas em estruturas, uma lacuna de conhecimento é identificada, devido a microestrutura e comportamento mecânico destas montagens. MEF é uma importante ferramenta para desenvolver ciclos dos processos de união híbrida e compreender o comportamento das juntas híbridas.

Este trabalho mostra o modelamento de juntas híbridas produzidas por um inovador processo de união de materiais dissimilares através do processo de rebiteagem por injeção baseado em energia friccional (F-ICJ) [6]. O estudo é baseado na criação de um modelo mecânico representativo.

A principal motivação deste trabalho é o desafio de modelar técnicas novas de união de estruturas híbridas, além de buscar suprir a lacuna de conhecimento do comportamento mecânico do processo de união por F-ICJ.

2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é modelar juntas sobrepostas unidas por processo de rebiteagem por injeção baseada em energia friccional e prever o comportamento mecânico das juntas. Com este propósito, propriedades mecânicas locais e microestrutura das juntas foram avaliadas e implementadas como parâmetros de entrada em um modelo numérico desenvolvido para representar o comportamento mecânico global da junta.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Uniões Polímero-Metal

Devido ao aumento do uso conjunto de polímeros e metais em muitas aplicações, processos de união adequados são necessários para montar estruturas híbridas. Com mostrado por Niu [7], Grewell e Benatar [8] e Messler [9, 10], os processos de união utilizando adesivos e por ancoramentos mecânicos (parafusos, rebites, etc.) são frequentemente utilizados.

A obtenção de juntas híbridas confiáveis é um desafio para a indústria, visto que muitos fatores podem influenciar as propriedades finais da união. O fator principal que desempenha um importante papel na união é a diferença das propriedades físico-químicas entre os diferentes materiais. Usualmente processos de uniões polímero-metal podem ser críticos pois há muitas questões relativas a dissimilaridade físico-química, diferentes coeficientes de

expansão térmica, possibilidade de degradação dos diversos materiais devido às temperaturas de processo e susceptibilidade à degradação e danos nas fibras dos compósitos [11].

Uma vez que as tecnologias atuais enfrentam desafios neste novo cenário, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para a obtenção de uniões híbridas mais fortes e resistentes [12].

3.2 Rebitagem por Injeção Baseada em Energia Friccional (F-ICJ)

A rebitagem por injeção baseada em energia friccional (F-ICJ) é um processo novo de união estruturas híbridas de polímero-metal. O F-ICJ é um processo de rebitagem a quente, que utiliza calor friccional como fonte de energia [6].

F-ICJ é baseado no estaqueamento e no processo de rebitagem por injeção (ICJ), esta técnica foi desenvolvida por Amancio et al. no Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) em Geesthacht na Alemanha [13], conforme patente em anexo. A técnica original utiliza fonte de energia elétrica para aquecimento (ICJ Elétrico - E-ICJ). F-ICJ foi desenvolvido para suprir limitações do ciclo de união do E-ICJ. F-ICJ é mais rápido que o E-ICJ e possui um melhor estaqueamento, além de ser energeticamente mais eficiente devido a fonte de calor friccional [14].

Os passos do processo de F-ICJ são mostrados na Figura 1 e explanados abaixo:

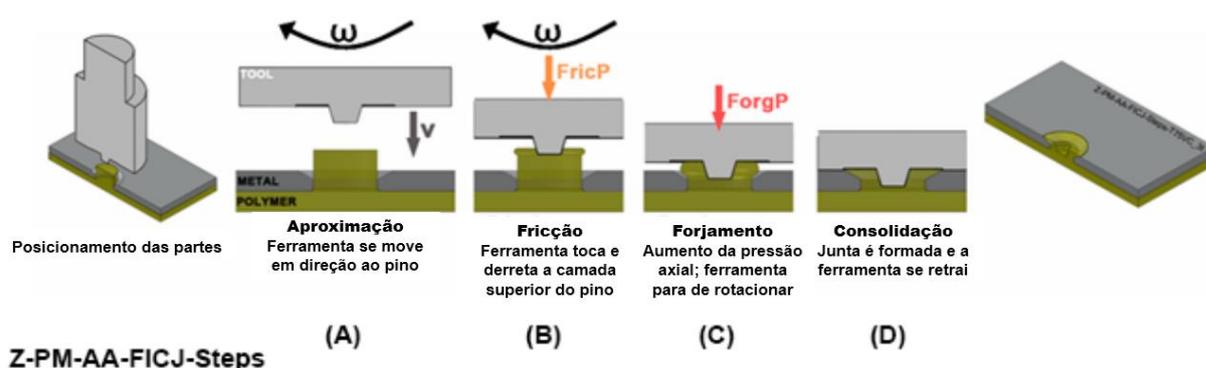


Figura 1. Passos do processo F-ICJ: (A) Aproximação ferramenta, (B) Etapa de fricção, (C) Etapa de forjamento, (D) Consolidação da junta.

Primeiramente, os componentes são pre-montados e fixados alinhados com a ferramenta. Após, a ferramenta inicia seu movimento de rotação e move-se em direção ao conjunto a ser unido.

Na etapa de fricção, a ferramenta toca o topo do pino polimérico, gerando assim calor friccional, portanto plastificando e deformando as camadas superficiais do componente polimérico.

Na etapa de forjamento a ferramenta rotativa desacelera e aumenta a pressão axial, conformando o formato final da junção.

A etapa final de consolidação é onde a união resfria sobre pressão e quando a ferramenta retrai e o ciclo de união é finalizado.

Esta técnica foi aplicada com sucesso a juntas de alumínio com polieteramida. A união por F-ICJ obteve bom desempenho mecânico, produzindo juntas de boa qualidade com ciclos entre 3 e 20 segundos [6].

3.3 Modelagem Computacional

O método de elementos finitos (MEF) é uma das usualmente utilizadas técnicas de mecânica computacional. A origem do método matemático pode ser relacionada a uma

publicação de Courant (1943) [15] e também posteriormente referenciada por um artigo de Babuska (1994) [16] sobre a história do método de elementos finitos.

3.3.1 Modelagem de Uniões/Soldagem de Estruturas Híbridas

A modelagem de estruturas híbridas é um desafio para os engenheiros do mundo todo. Os diferentes materiais utilizados podem possuir propriedades muito diferenciadas, e suas interfaces são um desafio para modelagem. Muitos dos softwares comerciais não possuem módulos específicos para este tipo de estruturas.

Konchakova et al. [4,5] desenvolveu um modelo para prever o comportamento mecânico de interfaces de juntas de PA66-CF e Alumínio 5754 soldadas por ultrassom. Para ser capaz de criar o modelo numérico representativo até a ruptura, um modelo matemático foi desenvolvido para prever a evolução do dano na junta [4]. No mesmo escopo, Utzinger et al. [17] desenvolveu um modelo matemático de dano baseado no modelo de Lemaitre e foi possível simular as propriedades mecânicas de uma junta sobreposta soldada por impacto térmico (PEEK/Aço). Um modelo de juntas de Alumínio 2024/PEI unidas por FricRiveting foi desenvolvido por Borges [3] utilizando um software comercial. O modelo pode prever a falha localizada em um rebite nos ensaios de cisalhamento e arrancamento. As interfaces dos componentes foram descritas como contatos de interação e nenhum material de interface foi utilizado.

3.3.2 Contatos

Os principais tipos de contatos utilizados no MEF são superfície-superfície, auto-contato e penetração por pressão. Interações de contatos superfície-superfície descrevem contatos entre duas superfícies deformáveis ou entre uma superfície deformável e uma rígida. Interações de auto-contato descrevem o contato entre diferentes áreas ou em uma superfície simples, enquanto que interações de penetração por pressão simulam a penetração de fluidos por pressão entre superfícies relacionadas por interações de contato superfície-superfície.

3.3.3 Restrições

As restrições podem ser aplicadas em diversos módulos de softwares comerciais. Restrições definidas em modos de interação definem limitações no número de graus de liberdade da análise, enquanto que restrições definidas em modo de montagem definem limitações somente nas posições iniciais das partes envolvidas.

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho segue o organograma apresentado na Figura 2. Inicialmente foi realizado um estudo prévio da tecnologia empregada para compreender como funciona a técnica de união de materiais dissimilares através de rebiteamento por injeção baseada em energia friccional.

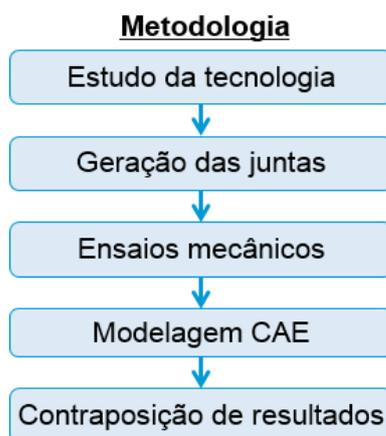


Figura 2. Organograma da metodologia utilizada no trabalho.

Os conhecimentos adquiridos com a revisão do processo de união e ensaios mecânicos foi utilizado para a definir as condições de contorno no processo de modelagem numérica do ensaio mecânico.

A partir do conhecimento da técnica, a união das partes foi realizada utilizando a máquina da fabricante Harms & Wende modelo RSM 200 conforme Figura 3, gerando assim uma junta. Os parâmetros de união foram definidos previamente de acordo com o trabalho de doutorado do M. Eng. André Abibe [6] e o conjunto de polímero-metal unido foi avaliado a fim de obter suas características mecânicas, utilizadas como entrada para modelagem numérica.



Figura 3. Exemplo de máquina RSM200, preparada para soldagem de rebites por fricção.

Visando obter as características mecânicas globais da junta, as uniões polímero-metal foram submetidas a ensaio de tração utilizando uma máquina universal de testes Zwick/Roell 1478 (Figura 4 - A) utilizando como embasamento a norma ASTM D5961-10. As características locais da junta foram obtidas através do ensaio de microdureza realizado em uma máquina Zwick/Roell ZHV (Figura 4 - B).

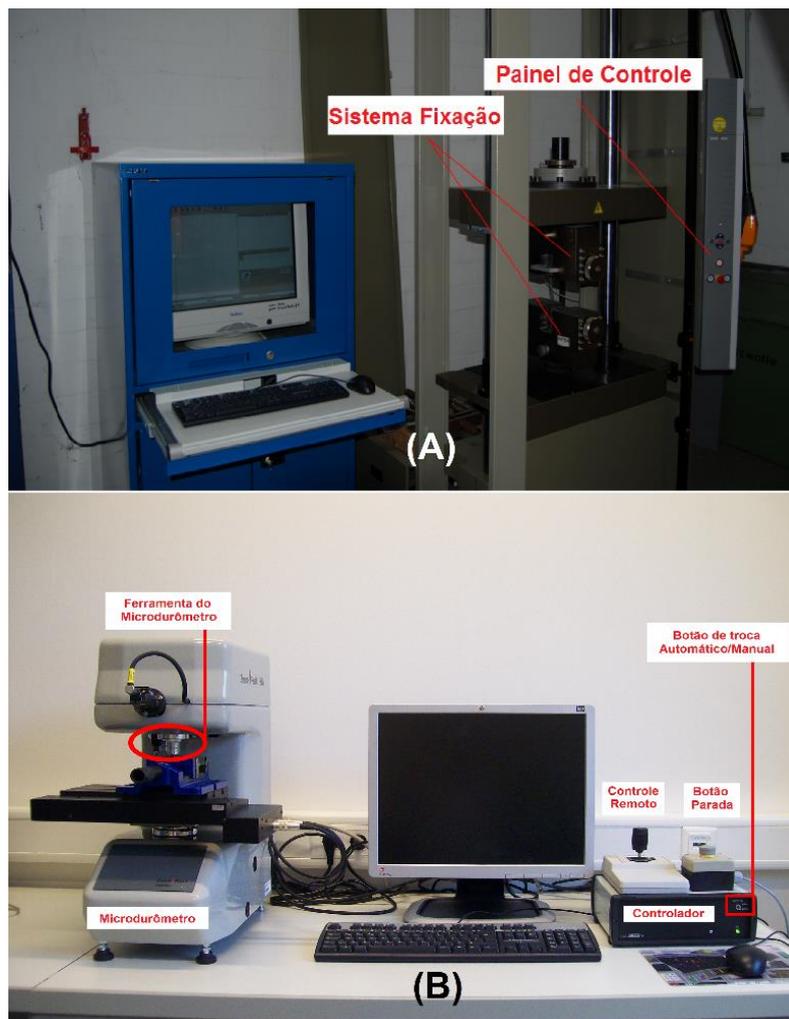


Figura 4. (A) Visão geral da máquina de ensaios universais Zwick/Roell 1478, (B) Visão geral da máquina de ensaio de microdureza Zwick/Roell ZHV.

Com os dados dos ensaios de tração e microdureza, iniciou-se o processo de modelagem numérica da união híbrida. Nesta etapa a geometria da junta foi modelada utilizando software CAD comercial Solidworks® 2012 (Dassault Systèmes Corporation, França) e posteriormente esta geometria foi adicionada ao software CAE Simulia Abaqus 6.11-1 (Dassault Systèmes Corporation, França) para realização dos estudos numéricos.

Após a finalização do modelamento numérico, os dados dos ensaios mecânicos foram comparados com os resultados da modelagem utilizando o software OriginPro 8 (OriginLab Corporation, EUA), para análise de resultados e validação do modelo criado.

5. DESENVOLVIMENTO

O trabalho iniciou-se com a revisão geral dos conceitos relacionados aos processos de soldagem por fricção, baseando-se no processo de solda ponto por fricção foi evoluindo o conhecimento para processos de união de materiais dissimilares que utilizam fricção como fonte de calor. Após a revisão inicial dos processos, a etapa de estudo da técnica de união de materiais dissimilares através de rebiteamento baseada em energia friccional (F-ICJ).

Com a etapa de revisão dos conceitos completa, foram realizados ensaios de tração nos materiais base a serem utilizados no processo de união.

Como componente metálico foram utilizadas chapas de alumínio 6082-T6 laminadas com 2 mm de espessura, fornecidas pela Novelis (Alemanha). Este material é uma liga de Al-Mg-Si endurecida por precipitação utilizado em aplicações estruturais [18].

Como componente polimérico foram utilizadas placas extrudadas de polieterimida (PEI, nome comercial ULTEM1000) fornecidas pela Sabic (Arábia Saudita) com 6,75 mm de espessura, usinadas para 2 mm de espessura com um pino de 4 mm de altura e 6 mm de diâmetro. Polieterimida é um termoplástico de alta performance, amorfo e transparente [19].

Foram ensaiadas 10 amostras de cada material. Na Figura 5 é possível visualizar exemplos das amostras testadas, Alumínio 6082 – T6 (AA6082) na Figura 5 – A e Polieterimida (PEI) na Figura 5 – B.

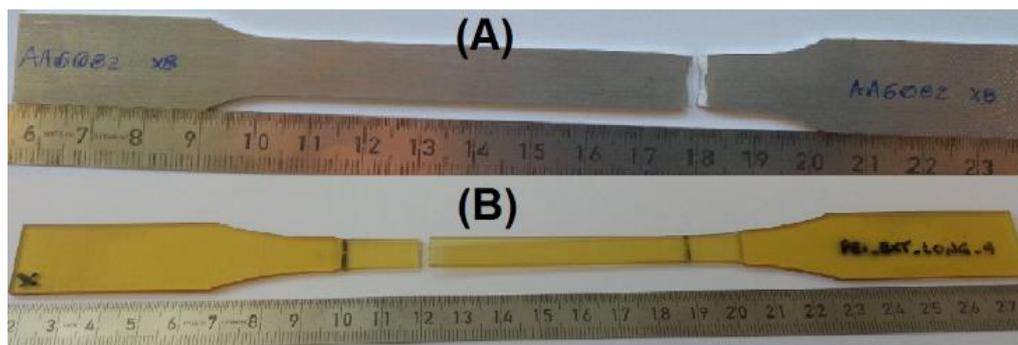


Figura 5. Material base testado sob carregamento trativo (A) AA6082, (B) PEI.

Com os ensaios mecânicos em material base realizados, iniciou-se o processo de união das placas pelo processo de F-ICJ. Os parâmetros de união utilizados para a condição utilizada neste trabalho podem ser verificados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros utilizados na geração das juntas para ensaio sob carregamento trativo.

Processo de União	Parâmetros de processo
F-ICJ	Velocidade rotacional 8000 rpm
	Tempo de fricção 2500 ms
	Tempo de forjamento 5000 ms
	Pressão de fricção 3 bar
	Pressão de forjamento 7 bar

Utilizando os parâmetros da Tabela 1 foram geradas juntas sobrepostas para ensaios de carregamento uniaxial (Figura 6) e juntas para ensaios de microdureza.

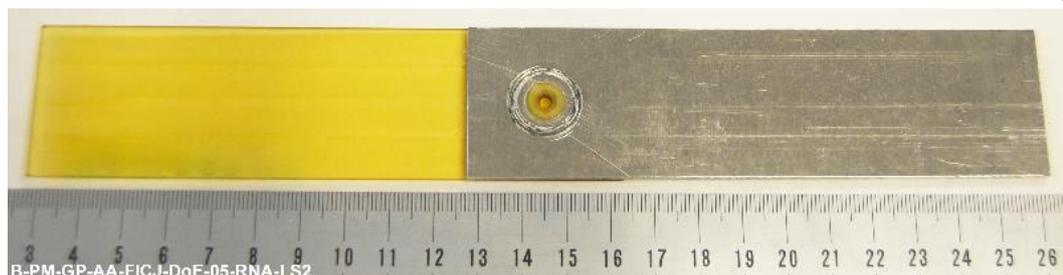


Figura 6. Amostra obtida pela união de AA6082 e PEI, utilizando o processo de F-ICJ.

A partir das amostras obtidas pela união dos materiais, conforme medidas mostradas no apêndice, foram realizados os ensaios mecânicos de tração conforme norma ASTM D5961-10 utilizando velocidade de 2 mm/min obtendo assim dados para serem utilizados no modelamento do comportamento mecânico da junta. É possível visualizar na Figura 7 as curvas obtidas através do ensaio de cisalhamento na junta.

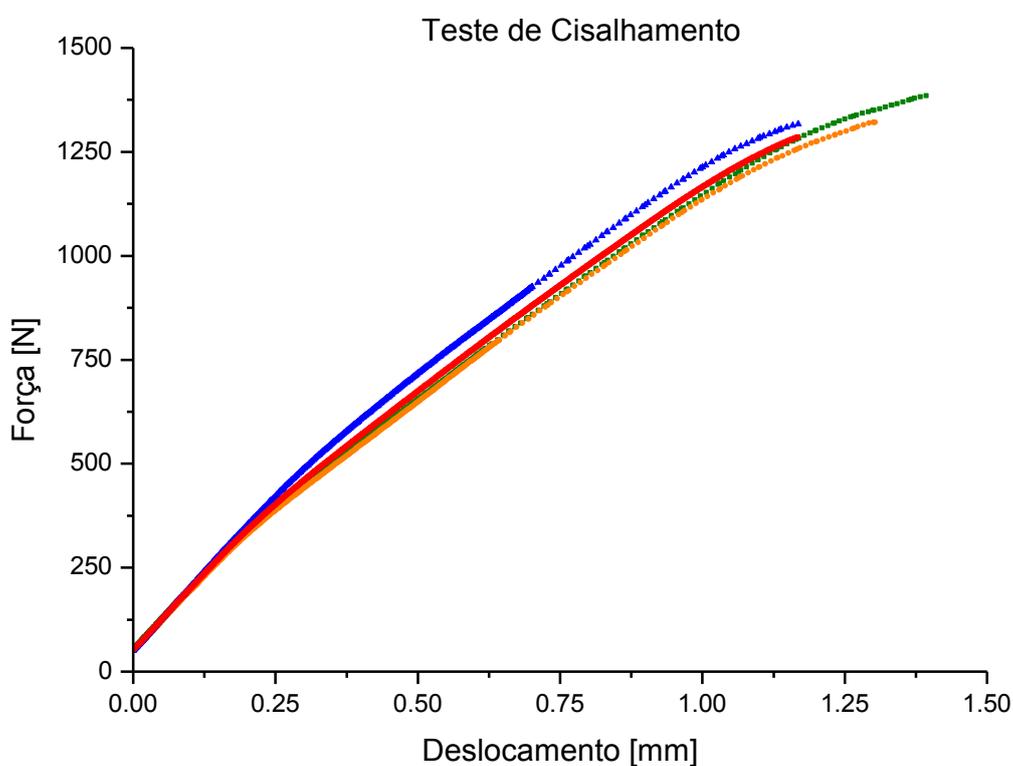


Figura 7. Ensaio de cisalhamento na junta sobreposta unida por F-ICJ.

Seguindo os passos descritos na metodologia, o modelo de junta sobreposta de F-ICJ foi desenhado em software CAD e posteriormente adicionado ao software CAE. Após a criação do modelo CAE, as condições de contorno foram adicionadas ao sistema de forma a representar o ensaio de cisalhamento ao qual as amostras foram submetidas.

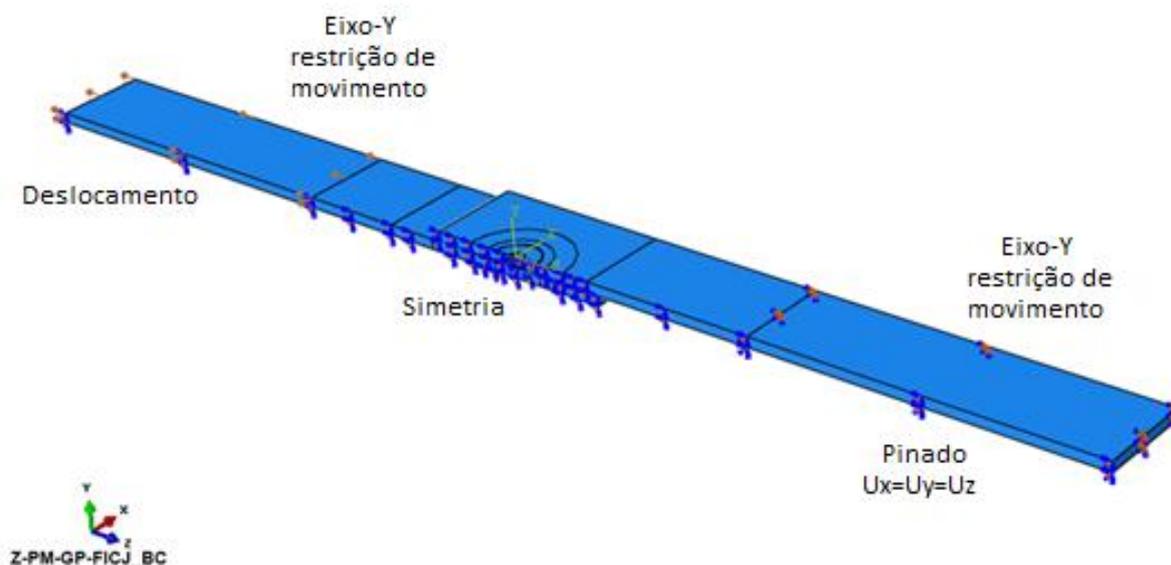


Figura 8. Condições de contorno utilizadas no modelo de F-ICJ.

Após as definições das condições de contorno (Figura 8), as propriedades dos materiais foram adicionadas ao modelo, criando zonas com diferentes propriedades internamente ao polímero, de acordo com os resultados de microdureza realizado com uma carga de 0,4916 N, aplicada durante um período de 15 segundos. O mapeamento pode ser visualizado na Figura 9.

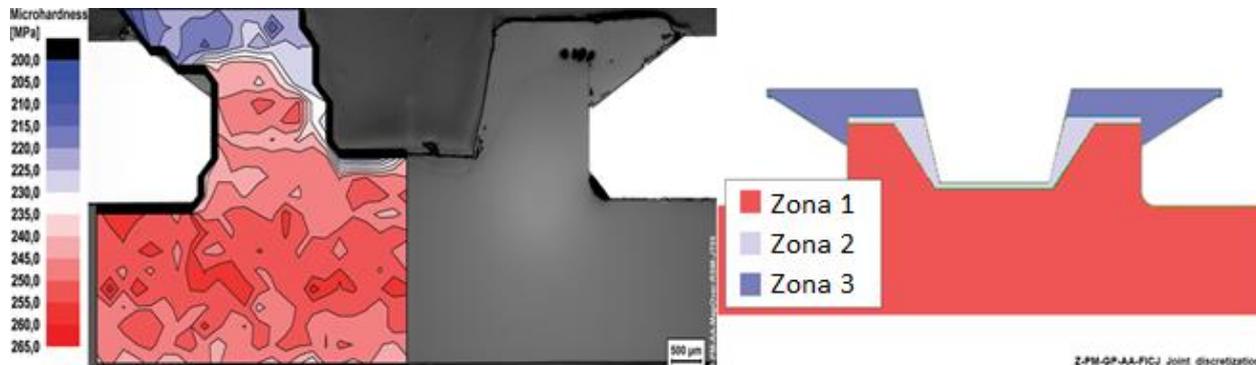


Figura 9. À esquerda, mapa de microdureza gerado com os valores obtidos; à direita, e zonas definidas para discretização das propriedades microestruturais no modelo numérico.

Os valores de microdureza são convertidos em valores de resistência a tração utilizando a relação de Tabor (Equação 1) [20].

$$Y = H/3 \quad (1)$$

Onde Y é a tensão de escoamento em MPa e H é a dureza transformada em MPa. Os valores calculados para as zonas da Figura 9 podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores obtidos através da relação de Tabor para o Polímero.

Zonas definidas na junta F-ICJ	Densidade [kg/m ³]	E [GPa]	Coefficiente de Poisson ν	Parâmetros de plasticidade de J-C				Propriedades do Material Base [%]
				A [MPa]	B [MPa]	n	m	
Zona 1	1280	1,64	0,39	83,3	100	0,42	1	100
Zona 2	1280	1,33	0,39	75	92	0,42	1	90
Zona 3	1280	1,19	0,39	73	83	0,42	1	87,6

Iniciando a etapa de modelagem, um primeiro modelo piloto foi gerado para garantir que todas as condições de contorno e interações estavam corretamente adicionadas ao modelo. Assim, no modelo inicial utilizou-se apenas as propriedades mecânicas do material de base. O primeiro resultado obtido pode ser verificado na Figura 10.

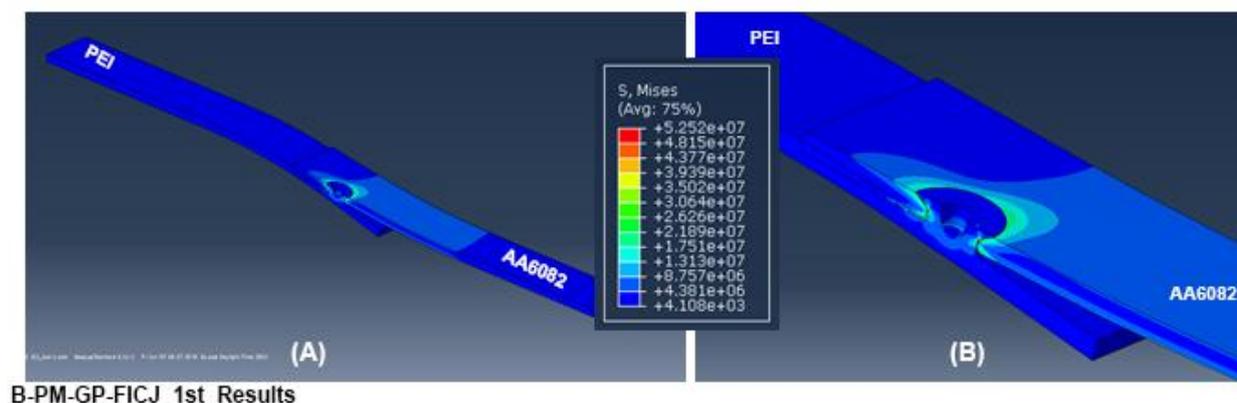


Figura 10. (A) Resultado do primeiro modelo de F-ICJ, (B) Interação entre as placas apareceu devido à falta de contato entre elas.

Com a aplicação da interação de contato superfície-superfície entre as placas, e após realizada nova simulação do modelo, foi possível identificar o efeito de flexão secundário (Figura 11 - A). Este fenômeno aparece pois as placas não se encontram no mesmo plano e possuem tendência de rotacionar fora do plano quando puxadas separadamente [11]. Adicionalmente, observando os contatos internos à junta F-ICJ, uma superposição entre as superfícies do furo e do pino aparecem (Figura 11 - B), para resolver isso, uma alteração na condição de união das placas foi adicionada às propriedades dos contatos internos à junta.

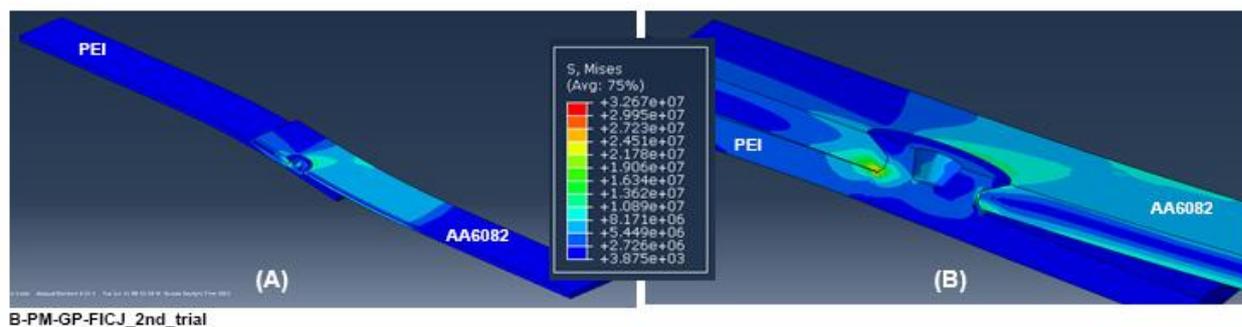


Figura 11. (A) Resultado do segundo modelo testado para o processo de F-ICJ, (B) Detalhe da interação interna à junta.

Com os contatos do modelo ajustados, a verificação da convergência de malha foi realizada. Nesta etapa foram realizados testes com diversos tipos de malhas para verificar a convergência do modelo. Na Tabela 3 mostra-se as propriedades de três testes realizados e a Figura 12 mostra as imagens das malhas referentes na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades das malhas utilizadas para convergência do modelo.

Teste	Tipo de Elemento	Malha	Converge?
A	Hexagonal	Fina	Não
B	Hexagonal	Grosseira	Não
C	Tetraédrica + hexagonal	Grosseira	Sim

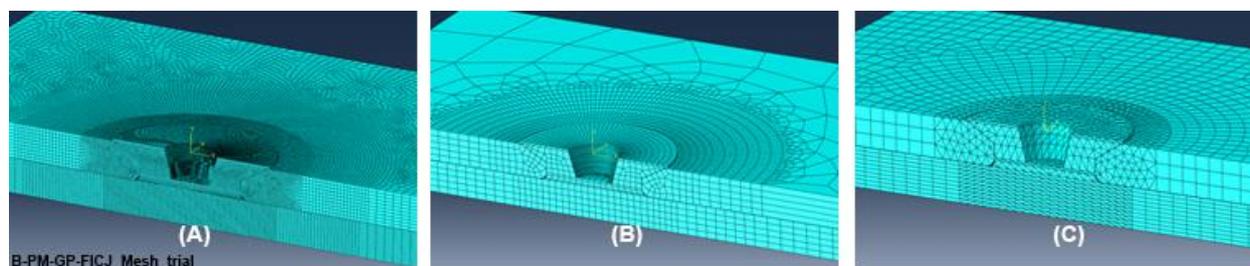


Figura 12. Testes de melhoria de malha descritos na tabela 3.

Como o teste (C) obteve um bom resultado mesmo utilizado uma malha grosseira, foi selecionado este tipo de malha para modelagem para reduzir o uso computacional, e assim realizar futuras comparações de resultados com os experimentos mecânicos.

Após ajustados os contatos e malha, o modelo foi com a aplicação das características microestruturais mostradas na Tabela 2, obtidas através dos ensaios de microdureza.

O resultado das solicitações obtidas no modelo numérico completamente alimentado, foi comparado com a macrografia de uma junta testada após a ruptura. Assim foi possível verificar visualmente a concentração de tensão nos pontos onde houve a ruptura da amostra (Figura 13).

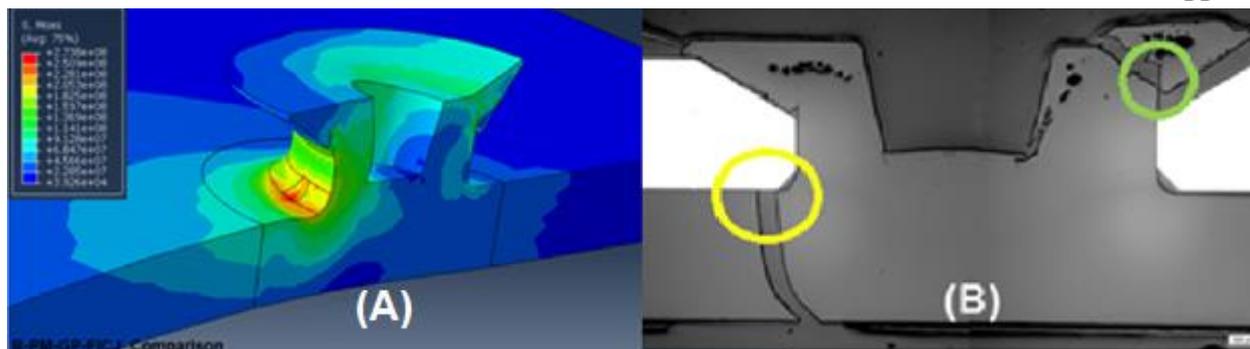


Figura 13. Comparação entre a concentração de tensão na junta modelada (A) e locais da falhas ocorridas na junta testada (B).

Comparando a Figura 13 – A com a Figura 13 – B pode-se visualizar que, os pontos onde ocorreram a falha da junta (círculos na imagem) condizem com os pontos de concentração de tensões resultantes do modelamento numérico, dessa mesma forma a propagação da falha também mostrou-se de acordo com a concentração interna de tensão.

A partir da análise visual do modelamento, as curvas força x deslocamento foram plotadas e comparadas. A curva experimental representa a média dos valores observados nos ensaios de cisalhamento, assim comparando a média com a resposta do software de modelamento, conforme pode ser visualizado na Figura 14.

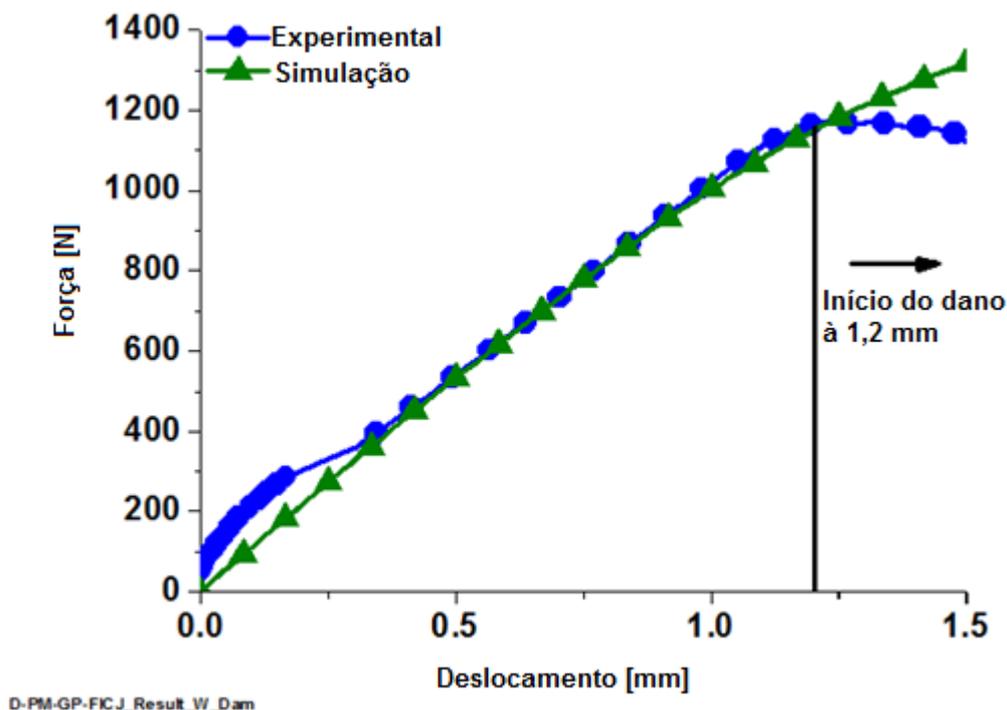


Figura 14. Gráfico comparativo entre resultado da simulação e média dos ensaios mecânicos.

6. CONCLUSÃO

O modelo numérico proposto de F-ICJ mostrou-se capaz de representar a condição ensaiada. A utilização das discretizações microestruturais em três zonas internas ao polímero mostrou-se efetiva.

A divergência encontrada entre o modelo e o experimento aos 1,2 mm foi verificada devido o modelo atual de união por F-ICJ não empregar critérios de dano, ou seja o mesmo não é capaz de representar o falha do polímero causado no fim do experimento pouco antes da ruptura da amostra.

No entanto, o trabalho foi capaz de representar de forma efetiva o ensaio mecânico utilizando um modelo numérico elasto-plástico, sendo assim, o mesmo pode ser utilizado para compreender o comportamento mecânico da junta unida por F-ICJ quando comparado os gráficos de força x deslocamento, o que nos permite comparar os resultados futuramente com outros processos.

Como forma de aprimorar esta representatividade, um critério de dano poderá ser aplicado no modelo atual, simulando assim os mecanismos de falha presentes na amostra. No entanto, para aplicar um critério de dano no modelo, é necessário ampliar o conhecimento do comportamento mecânico durante a ocorrência da falha. Neste caso o modelo atual poderá servir como fonte de estudo e base para aprimorar o conhecimento nos modos de falha para este tipo de tecnologia de união.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ØYVIND, E., *Emission from international sea transportation and environmental impact*. 2003.
2. HECHT, J.L., *Polymer Composites*, 1986. p. 186 - 190.
3. Borges, M.F., S.T. Amancio-Filho, and e. al., *Development of computational models to predict the mechanical behavior of Friction Riveting joints.*, in *Computational Materials Science*2012.
4. Konchakova, N., R. Mueller, and F.-J. Barth, *Numerical analysis of a damage evolution in adhesive overpalling metaleinforced polymer structures*. Computer Methods in Mechanics, 2011.
5. Konchakova, N., et al., *Finite element analysis of an interface in ultrasonic welded metal/fibre-reinforced polymer joints*. Computational Materials Science, 2010: p. 184-190.
6. Sônego, M., 2012, HZG, UFSCar.
9. Niu, M.C.-Y., *Composite Airframe Structures, Practical Design Information and Data*. Hong Kong Conmilit Press, 2000. **2nd ed.**
10. D.Grewell and A.Benatar, *Int. Polym. Process*. 2007. **1**: p. 43.
11. Messler, R.W., *Assem. Autom.* 2000. **20**: p. 118.
12. Messler, R.W., *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 2004. **17**: p. 51.
13. AMANCIO Filho, S.T., *Lecture notes*, in *Joining of Polymer-Metal Lightweight Structures*2014.
14. Amancio-Filho, S.T. and J.F.d. Santos, *Joining of Polymers and Polymer-Metal Hybrid Structures: Recent Developments and Trends*. Polym. Eng. Sci., 2009. **49**: p. 1461-1476.
15. Amancio-Filho, S.A., J.F. Dos Santos, and M. Beyer, *Method and device for connecting a plastic workpiece to a further workpiece*, 2010.
16. Schaefer, R., *Beitrag zum Reibschweissen von Metallen unter besonderer Berücksichtigung der Energieumwandlung während des Schweissprozesses*, 1971, RWTH-Aachen: Germany.
29. Courant, R., *Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations*. Bull. Amer. Math. Soc., 1943(49): p. 1-23.
30. Babuska, I., *Courant element: before and after*, in *Finite Element Methods: fifty years of Courant element*1994, Marcel Decker Inc.
31. Utzinger, J., et al., *Computacinal modelling of thermal impact welded PEEK/steel single lap tensile specimens*. Computational Materials Science, 2007: p. 287-296.
37. Europe, N., *AA6082-T6 datasheet*
38. (SABIC), S.B.I.C., *ULTEM 1000 datasheet*.
44. Mazzaferro, J.A.E. and e. al, *Preliminary study on the mechanical behavior of friction spot welds*, in *Soldagem & Inspeção*2009.

ANEXO I

Patente da tecnologia de rebiteagem por injeção baseada em energia friccional.



US008518198B2

(12) **United States Patent**
de Traglia Amancio Filho et al.

(10) **Patent No.:** **US 8,518,198 B2**

(45) **Date of Patent:** **Aug. 27, 2013**

(54) **METHOD FOR CONNECTING A PLASTIC WORKPIECE TO A FURTHER WORKPIECE**

(56) **References Cited**

(71) Applicant: **Helmholtz-Zentrum Geesthacht Zentrum für Material-und Küstenforschung GmbH**, Geesthacht (DE)

U.S. PATENT DOCUMENTS

4,427,471	A *	1/1984	Chierici	156/73.5
5,153,978	A	10/1992	Simmons	
5,298,098	A *	3/1994	Hoedl	156/73.1
7,497,917	B2	3/2009	Chen et al.	
2007/0044901	A1	3/2007	Chen et al.	
2011/0164945	A1*	7/2011	Lathabai et al.	411/501

(72) Inventors: **Sergio de Traglia Amancio Filho**, Börsen (DE); **Jorge F. dos Santos**, Tespe (DE); **André Bastos Abibe**, Geesthacht (DE)

FOREIGN PATENT DOCUMENTS

DE	3109500	A1	10/1982
DE	3543105	A1	6/1987
EP	1949999	A1	7/2008
FR	2854606	A1	11/2004
JP	53000266	A	1/1978
JP	53075280	A	7/1978
JP	61189925	A	8/1986
JP	62087323	A	4/1987
JP	1278331	A	11/1989
JP	H02 27317		2/1990
JP	4142919	A	5/1992
WO	WO-9111309	A2	8/1991

(73) Assignee: **Helmholtz-Zentrum Geesthacht Zentrum für Material-und Küstenforschung GmbH**, Geesthacht (DE)

(*) Notice: Subject to any disclaimer, the term of this patent is extended or adjusted under 35 U.S.C. 154(b) by 0 days.

* cited by examiner

(21) Appl. No.: **13/659,193**

Primary Examiner — James Sells

(22) Filed: **Oct. 24, 2012**

(74) Attorney, Agent, or Firm — Harness, Dickey & Pierce, P.L.C.

(65) **Prior Publication Data**

US 2013/0098534 A1 Apr. 25, 2013

(51) **Int. Cl.**
B32B 37/00 (2006.01)

(52) **U.S. Cl.**
USPC **156/73.5**; 156/293; 156/308.2

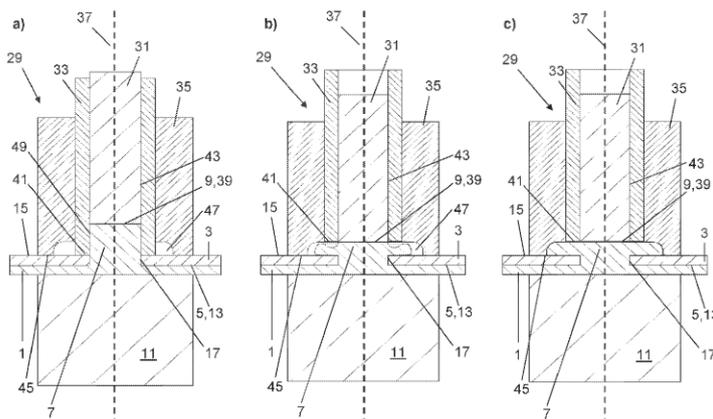
(58) **Field of Classification Search**
USPC 156/73.5, 73.6, 293, 308.2, 309.6, 156/580; 264/68

See application file for complete search history.

(57) **ABSTRACT**

A method for connecting a plastic workpiece to a further workpiece. The method includes inserting a pin on the plastic workpiece through a through-opening in the further workpiece and abutting the first and second workpieces against one another. A friction tool, which has a clamping ring and a friction pin, is engaged to the pin and the friction pin is rotated so that frictional heat produced by friction between the friction pin and the pin brings the pin into a plastic state. The rotating friction pin is moved parallel to the axis of rotation toward the working surface so that the pin is plastically deformed.

16 Claims, 3 Drawing Sheets



APÊNDICE I

