CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO -DIPPG

ANÁLISE DA ENERGIA DE PROPAGAÇÃO DE FISSURA EM JUNTAS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA COLADAS A UM SUBSTRATO DE ALUMÍNIO

Paula Samara Fabiano de Oliveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientadores:
Silvio Romero de Barros
Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2016

ANÁLISE DA ENERGIA DE PROPAGAÇÃO DE FISSURA EM JUNTAS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA COLADAS A UM SUBSTRATO DE ALUMÍNIO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Paula Samara Fabiano de Oliveira

Aprovada por:

Presidente, Prof. Silvio Romero de Barros, D.Sc.

Prof. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, D.Sc.

Prof. Hector Reynaldo Meneses Costa, D.Sc.

Prof. João Marciano Laredo dos Reis, PhD.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2016

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

O48 Oliveira, Paula Samara Fabiano de
Análise da energia de propagação de fissura em juntas de liga com memória de forma coladas a um substrato de alumínio / Paula Samara Fabiano de Oliveira.—2016.
x, 45f. + anexo : il. (algumas color.) , grafs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2016.
Bibliografia : f. 42-45
Orientadores : Silvio Romero de Barros
Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

1. Engenharia mecânica - Materiais. 2. Ligas com memória de forma. 3. Ligas de alumínio. 4. Adesivos. 5. Adesivos – Ensaios e provas. I. Barros, Silvio Romero de (Orient.). II. Aguiar, Ricardo Alexandre Amar de (Orient.). III. Título.

CDD 620.16

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo. Agradeço aos meus orientadores pelo auxílio. Agradeço a todos que colaboraram de alguma forma para realização deste trabalho. E agradeço aos meus pais pelo apoio.

RESUMO

ANÁLISE DA ENERGIA DE PROPAGAÇÃO DE FISSURA EM JUNTAS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA COLADAS A UM SUBSTRATO DE ALUMÍNIO

Paula Samara Fabiano de Oliveira

Orientadores: Silvio Romero de Barros
Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

As ligas com efeito de memória de forma (LMF) exibem uma propriedade única de recuperar a sua forma original após ter sofrido uma deformação. Esse tipo de material tem a capacidade de absorver e dissipar energia mecânica por sofrer uma mudança de forma reversível sob condições de carregamento cíclico. Uma das limitações do emprego desse material são os métodos de união utilizados. O uso de soldagem normalmente afeta as propriedades da liga. Uniões mecânicas com rebites e parafusos são mais usadas, porém trazem o problema da concentração de tensões. A colagem se apresenta como uma alternativa a ser investigada. Este trabalho apresenta uma análise numérico-experimental da união colada entre uma placa de LMF e um substrato de alumínio. Ensaios de flexão em 3 pontos foram realizados para identificar a energia crítica de propagação de fissura nos modos I e II, além do modo misto. O software de elementos finitos CAST3M foi utilizado para avaliar a energia crítica comparando simulações numérica aos resultados experimentais.

Palavras-chave: Liga com memória de forma; adesivo; ensaios.

Rio de Janeiro
Fevereiro, 2016

ABSTRACT

ENERGY DISSIPATION ANALYSIS ON A BOARD ALLOY STUCK WITH FASHION MEMORY

Paula Samara Fabiano de Oliveira

Advisors:

Silvio Romero de Barros

Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

Abstract of dissertation submitted to Postgraduate program in Mechanics Engineering and Technology of Materials – Federal Center of Technological Education Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Mechanics Engineering and Technology of Materials.

Alloys with shape memory effect (LMF) exhibit a unique property to recover its original shape after having undergone a deformation. This type of material has the ability to absorb and dissipate mechanical energy by undergoing a reversible change of shape under cyclic loading conditions. One of the limitations of the use of this material are the joining methods used. The use of welding usually affects alloy properties. mechanical joints with rivets and screws are commonly used, but bring the problem of stress concentration. The collage is presented as an alternative to be investigated. This work presents a numerical and experimental analysis of union sandwiched between an LMF plate and an aluminum substrate. Test 3 point bending were conducted to identify the critical energy for crack propagation modes I and II, in addition to mixed mode. The finite element software CAST3M was used to evaluate the critical energy numerical simulations comparing the experimental results.

Keywords: Shape memory alloy, adhesive, and assays.

Rio de Janeiro

February, 2015

LISTA DE SIGLAS

CID	Correlação de Imagens Digitais
Co	Cobalto
CO_2	Dióxido de carbono
Cu	Cobre
CuZnAl	Liga de cobre, zinco e alumínio
CuAlNi	Liga de cobre, alumínio e níquel
EBSD	Electron backscatter diffraction
ENF	End Notched Flexure
Fe	Ferro
Hf	Háfnio
LMF	Liga com Memória de Forma
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MMF	Mixed Mode Flexure
Nb	Nióbio
NiTi	Liga de níquel e titânio
NiTiCu	Liga de níquel, titânio e cobre
Pt	Platina
SMA	Shape Memory Alloy
Ti	Titânio
TiAu	Liga de titânio e ouro
TiPd	Liga de titânio e paládio
TiPt	Liga de titânio e platina
TWSME	Two-Way Shape Memory Effect
XPS	X-Ray Photo electron Spectroscopy

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Tipos de materiais com memória de forma. 05
Figura 2.2: Estrutura cristalina das fases martensita e austenita. 07
Figura 2.3: Microfotografia de uma liga com memória de forma, martensita sob uma matriz austenítica. 08
Figura 2.4: Estruturas cristalinas da LMF. 09
Figura 2.5: Transformação da estrutura martensítica sob carregamento mecânico. 09
Figura 2.6: O efeito da memória de forma 10
Figura 2.7: Estruturas cristalinas das LMF. 11
Figura 2.8: Matriz epóxi com fibras com memória de forma. 13
Figura 2.9: Tipos de rotura. 16
Figura 2.10: Ângulo de contato do líquido com o sólido. 18
Figura 2.11: Contato por translação e por basculamento. 19
Figura 2.12: Vazios em camada adesiva de uma ligação por translação. 19
Figura 2.13: Ensaio MMF. 22
Figura 2.14: Ensaio ENF. 22
Figura 2.15: Ensaio DCB. 23
Figura 3.1: Ensaio MMF. 25
Figura 3.2: Ensaio ENF. 25
Figura 3.3: Ensaio DCB. 26
Figura 3.4: MMF 1. 26
Figura 3.5: MMF 2. 27
Figura 3.6: MMF 3. 27
Figura 3.7: MMF 4. 27
Figura 3.8: MMF 5. 28
Figura 3.9: ENF 1. 28
Figura 3.10: ENF 2. 29
Figura 3.11: ENF 3. 29
Figura 3.12: ENF 4. 30
Figura 3.13: DCB 1. 30
Figura 3.14: DCB 2. 30

Figura 3.15: DCB 3. 31
Figura 3.16: DCB 4. 31
Figura 3.17: DCB 5. 31
Figura 3.18: Esquema de propagação da fissura. 33
Figura 3.19: Curvas de propagação a G constante. 34
Figura 4.1: ENF força x deslocamento. 35
Figura 4.2: MMF força x deslocamento. 36
Figura 4.3: DCB força x deslocamento. 36
Figura 4.4: Ensaio ENF. 37
Figura 4.5: Detalhe do ensaio. 37
Figura 4.6: Liga com memória de forma com resíduos de cola e atrás a liga de alumínio. 38
Figura 4.7: Comparação entre resultados numéricos e o experimental. 39
Figura 4.8: Comparação entre resultados numéricos e o experimental. 39
Figura 4.9: Comparação entre resultados numéricos e o experimental. 40

SUMÁRIO

1. **INTRODUÇÃO** 01

1.1. APRESENTAÇÃO 01

1.2. OBJETIVO 01

1.3. JUSTIFICATIVA 02

1.4. METODOLOGIA 03

1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 04

2. REVISÃO BLIBLIOGRÁFICA 05

2.1. LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA 05

2.1.1. Estruturas cristalinas das ligas com memória de forma 06

2.1.2. Transformações de fases nas ligas com memória de forma 08

2.1.3. Comportamento Termomecânico 10

2.1.4. Treinamento das Ligas Memória de Forma 10

2.1.5. Fase R 11

2.2. APLICAÇÕES 12

2.3 ADESIVOS 14

2.3.1 Cianoacrilato 15

2.3.2 Preparação da superfície dos substratos 16

2.3.3 Colagem dos Substratos 19

2.3.4 Adesão entre polímeros e ligas com memória de forma 20

2.4 ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO DE FISSURA 20

2.4.1 Mixed Mode Flexure (MMF) 21

2.4.2 End Notched Flexure (ENF) 22

2.4.3 Double Cantilever Beam (DCB) 22

3. MATERIAIS E MÉTODOS 24

3.1 ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO DE FISSURA 24

3.2 ANÁLISE NUMÉRICA 26

4. RESULTADOS 29
4.1. ENSAIOS 29
4.2 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS 32

5. CONCLUSÃO 35

REFERÊNCIAS 36
ANEXO 1 40

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO

Nos últimos anos, tem crescido a utilização de juntas coladas, como método de união em componentes estruturais, devido às vantagens deste tipo de junta comparada às alternativas habituais. Neste contexto, tornou-se necessário conhecer seu comportamento para as diversas aplicações industriais.

A junta colada é um método comum de união de dois ou mais componentes, que permite uma distribuição da carga sobre uma área maior e de forma mais uniforme, reduzindo assim as concentrações de tensões localizadas como ocorre em juntas soldadas. A distribuição mais uniforme de carga não torna as tensões uniformes ou a distribuição de tensão mais simples em juntas coladas. As propriedades mecânicas diferenciadas dos adesivos produzidos na indústria estão cada vez mais sendo considerados relevantes como método de união entre componentes.

Diversos testes para avaliar adesivos podem ser realizados, como: ensaios de tração de juntas sobrepostas (cisalhamento), de arrancamento e outros ensaios baseados na mecânica da fratura. Neste trabalho, foram realizados ensaios relacionados à abertura de trinca para a determinação das características e comportamento do adesivo escolhido (CALDEIRA, 2013).

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo estudar a união por adesivo de Ligas com memória com outros materiais, bem como o comportamento da fratura no adesivo, com a finalidade de testar a eficácia deste tipo de união. Esta união pode ser usada em robótica, próteses, atenuadores de vibrações e atuadores.

1.3. JUSTIFICATIVA

O grande potencial de aplicação da tecnologia dos adesivos estruturais vem da sua capacidade de transformar diferentes materiais de estruturas complexas em montagens sólidas unitárias e homogêneas. Assim junções têm seu peso reduzido e um aumento considerável da resistência mecânica e rigidez.

A utilização de adesivos oferece vantagens como a distribuição das cargas dinâmicas e estáticas atuantes pela área total, permitindo um menor custo de produção e manutenção em relação aos sistemas de fixação mecânicos.

Outra vantagem é uma melhor vedação entre as partes unidas, sem necessidade de impermeabilização. Além disso, oferece isolamento elétrico, redução da corrosão e dos níveis de vibração causados por parafusos e rebites (QUINI, 2011). Nos últimos anos o uso do adesivo tem crescido graças às vantagens de sua aplicação. Os adesivos permitem uma maior liberdade em projetos para concepção de produtos. Importante para as indústrias aeronáutica e espacial, que apresentam problemas com ligas não soldáveis e concentração de tensões em rebites (CARDOSO, 2011).

O material escolhido, devido a suas características especiais, foi à liga com memória de forma (LMF). A LMF foi acoplada junto à liga de alumínio ou a liga de aço. Para unir as ligas foi utilizado um adesivo. Neste trabalho foi testada a resistência de um adesivo e sua propagação de fendas.

A Tabela 1.1 mostra as vantagens e desvantagens do uso de adesivo.

Tabela 1.1: Vantagens e desvantagens da utilização de adesivos (CARDOSO, 2011).

Vantagens	**Limitações**
Capacidade de obter estruturas mais leves e rígidas	As peças não podem ser separadas posteriormente
Capacidade de unir materiais distintos (por exemplo, metais com compósitos)	Podem ocorrer tensões residuais resultantes dos diferentes coeficientes de expansão térmica
Capacidade de unir eficientemente materiais de espessuras finas	Sensibilidade a tensão de tração segundo a espessura
Melhor distribuição das tensões	Fraca resistência à temperatura e à umidade
Melhores propriedades à fadiga devido à melhor distribuição de tensões	Susceptíveis a degradação ambiental e incerteza relativamente à sua durabilidade a longo prazo em condições de serviço severas
Melhor resistência a corrosão	Problemas de toxidade e inflamabilidade
Melhor aparência superficial (sem cabeças de parafusos, sem marcas de soldadura, etc)	Dificuldade ao nível das inspeções
Fabrico de formas complexas	
Boa capacidade de vedação	

1.4. METODOLOGIA

Primeiramente foi feita uma revisão bibliográfica sobre as ligas com memória de forma e juntas coladas. Em seguida, foram realizados testes experimentais para a análise da resistência de juntas coladas. Para isso foram realizados os testes *Mixed Mode Flexure* (MMF), o *End Notched Flexure* (ENF) e o *Double Cantilever Beam* (DCB). Com os dados obtidos dos ensaios foi feita uma comparação com os dados obtidos através de um modelo numérico simples.

1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No capítulo dois foi feita uma revisão bibliográfica da liga com memória de forma e suas aplicações, descreveu-se sobre adesivos e sobre os tipos de ensaios escolhidos para as análises realizadas.

O capítulo três mostra como os materiais, os testes utilizados e descreve a metodologia numérica adotada pra gerar as curvas de propagação de fissura a energia constante.

No capítulo quatro são apresentados os resultados dos ensaios bem como a sua comparação com as curvas obtidas numericamente. São apresentados os valores obtidos para a energia crítica de propagação da fissura.

No capítulo cinco é apresentado um resumo das conclusões do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Materiais com memória de forma são materiais inteligentes que respondem a estímulos tais como o calor, campo magnético e luz e recuperam sua forma original depois de sofrerem deformações. Podem ter a sua deformação pré-programada, o que os tornam ideais para sistemas inteligentes integrados.

Os materiais capazes de responderem a um estímulo funcionam por meio da alteração de suas propriedades físicas ou/e químicas, como o caso do polímero eletro-ativo e de alguns cristais líquidos. Diferentes tipos de materiais podem responder a estímulos e mudar de forma, são eles: ligas metálicas, polímeros, materiais híbridos, cerâmicos e géis. Os materiais com memória de forma estão classificados na Figura 2.1 (SUN, 2011).

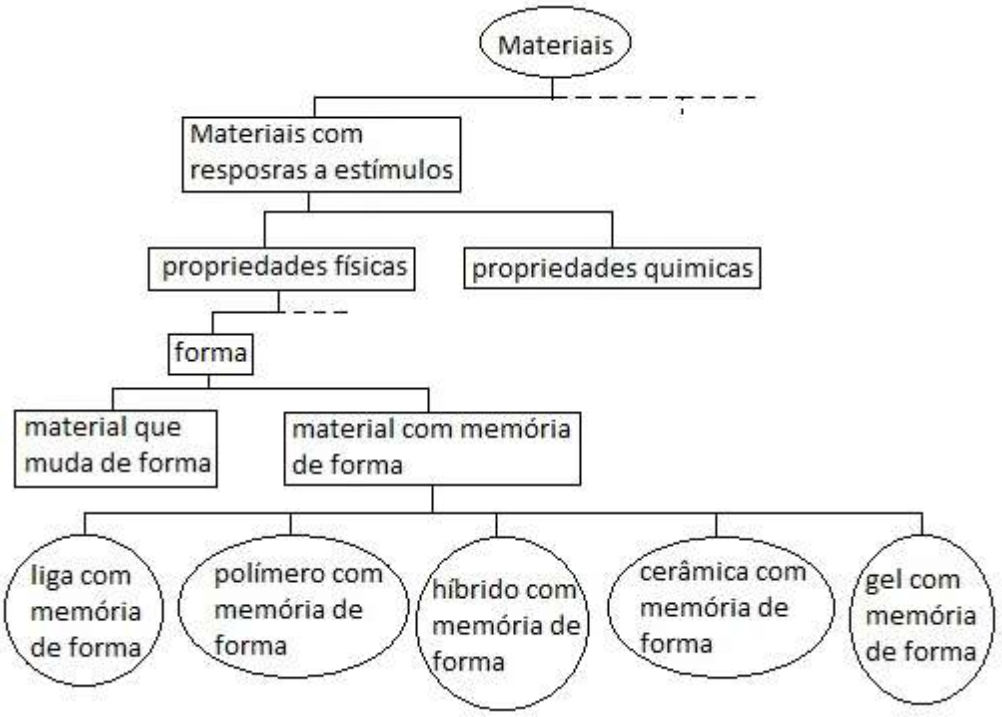


Figura 2.1: Tipos de materiais com memória de forma.

Fonte: Elaboração própria com base em SUN, 2011.

Com base no estímulo recebido, as LMF são divididas em duas categorias: as termo-sensíveis, ativadas termicamente por aquecimento e as magneto-sensíveis, ativadas por um campo magnético estático ou alternado (SUN, 2011).

As ligas com efeito memória de forma submetidas a uma deformação plástica retornam a forma original através da aplicação de uma energia térmica ou magnética (ANSELMO, 2011).

A descoberta da transformação martensita foi muito importante para a descoberta das ligas com memória de forma. Com observações experimentais da estrutura da martensita, observou-se sua capacidade termo elástica reversível. Somente após 1962, quando BUEHLER e colaboradores descobriram o efeito numa liga equiatômica de níquel – titânio, começaram a ser realizadas pesquisas na área de metalurgia e começou-se a identificar o potencial de sua utilização. Esta liga é conhecida como “Nitinol” devido ao material níquel e titânio (NiTi) e “nol” em homenagem ao laboratório em que foi descoberta, o Naval Ordinance Laboratory (NOL). Esta uma das LMF mais usadas e estudas.

A adição de outros materiais a liga, como Fe e Co, altera (diminui muito) a temperatura de transformação, então foram desenvolvidas ligas com memória de forma com transformações a altas temperaturas (acima de 100^{o}C), como TiPd, TiPt e TiAu.

Mais tarde em estudos sobre as propriedades de fadiga foi descoberto que a adição de cobre ao material não afeta consideravelmente as temperaturas de transformações e melhora a resistência a fadiga. As ligas de NiTiCu são adequadas para variadas aplicações de engenharia devido sua resistência a fadiga e baixo custo (AQUINO, 2011).

As ligas de níquel - titânio (NiTi) e ligas a base de cobre, tais como CuZnAl e CuAlNi são as mais utilizadas comercialmente por produzirem significativa força de restituição durante a mudança de forma e grande capacidade de recuperação de deformação (LA CAVA, 2000)

2.1.1. Estruturas cristalinas das ligas com memória de forma

As ligas com memória de forma ("Shape Memory Alloy" - SMA) possuem pelo menos duas estruturas cristalinas diferentes ou fases, a martensita em baixas temperaturas e a austenita em temperaturas mais elevadas. Essas ligas realizam uma transformação martensítica quando submetidas à temperatura adequada ou tensão, na qual eliminam as deformações residuais.

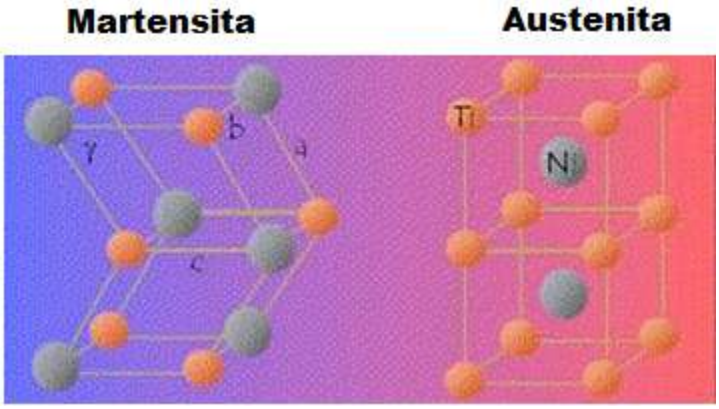


Figura 2.2: Estrutura cristalina das fases martensita e austenita.

Fonte: LA CAVA, 2000.

Para compensar o aumento da tensão as arestas a, b e c da estrutura da martensita, mostrada na figura acima, alteram seu comprimento, o ângulo γ também pode ser alterado em função da carga aplicada. A variação desses parâmetros permite uma fácil deformação da liga memória de forma na fase martensítica, sem quebrar as ligações moleculares, permitindo assim a recuperação de sua forma anterior na fase austenítica.

A transformação para a fase martensítica ocorre à baixa temperatura, em uma faixa de temperatura que é determinada pelo material de composição da liga. A estrutura martensítica possui forma de agulhas alternadas (LA CAVA, 2000).

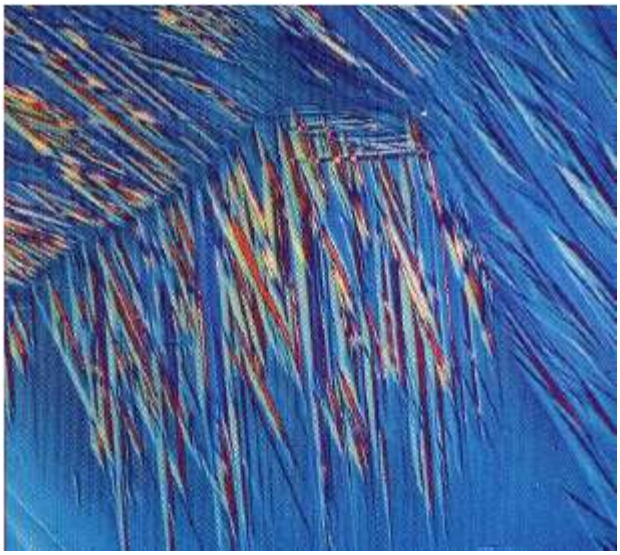


Figura 2.3: Microfotografia de uma liga com memória de forma, martensita sob uma matriz austenítica.
Fonte: LA CAVA, 2000.

2.1.2. Transformações de fases nas ligas com memória de forma

Na LMF acontecem duas fases, as duas apresentam estrutura cristalina, uma a alta temperatura, Austenita, que apresenta uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado; a outra fase acontece a baixa temperatura, Martensita que possui uma estrutura ortorrômbica ou monoclínica. A transformação de uma fase para outra (transformação martensitica) ocorre através de distorção por cisalhamento. Os cristais formados de martensíta podem ter diferentes direções de orientação.

A martensita pode ter duas formas a maclada (fig. 2.4. b) e declamada ou reorientada (fig 2.4. c). O comportamento das LMF é caracterizado pela reversibilidade das transformações de fase (austenita para martensita).

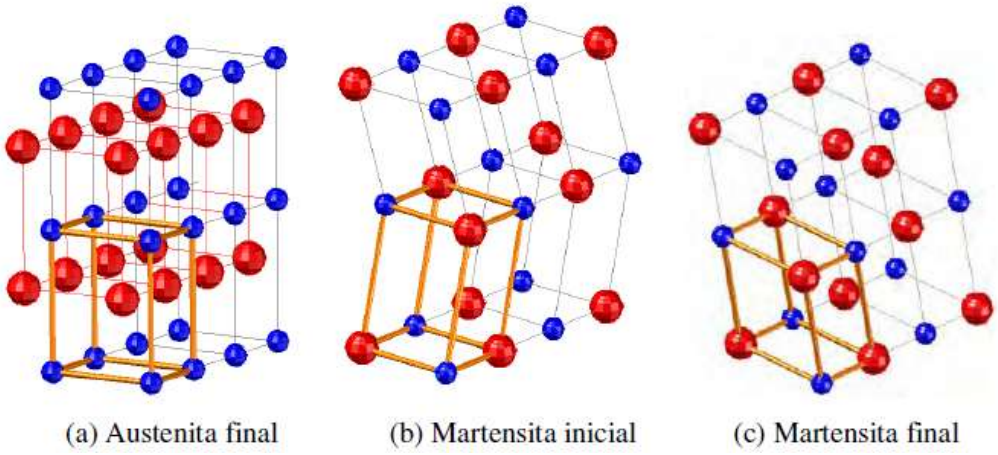


Figura 2.4: Estruturas cristalinas da LMF.

Fonte: Aquino, 2011.

Quando uma carga mecânico é aplicada na fase de martensita maclada (fig. 2.5), reorientando a martensita e resultando em uma mudança de forma macroscópica. Quando a carga é retirada a deformação permanece. Isso ocorre a uma certa temperatura (Mf). Após sofrer uma aquecimento acima de Af a LMF, se transforma em austenita na sua forma original, em seguida com a temperatura abaixo de Mf o material forma a martensita maclada sem a mudança de forma, este é o efeito de memória de forma simples (AQUINO, 2011).

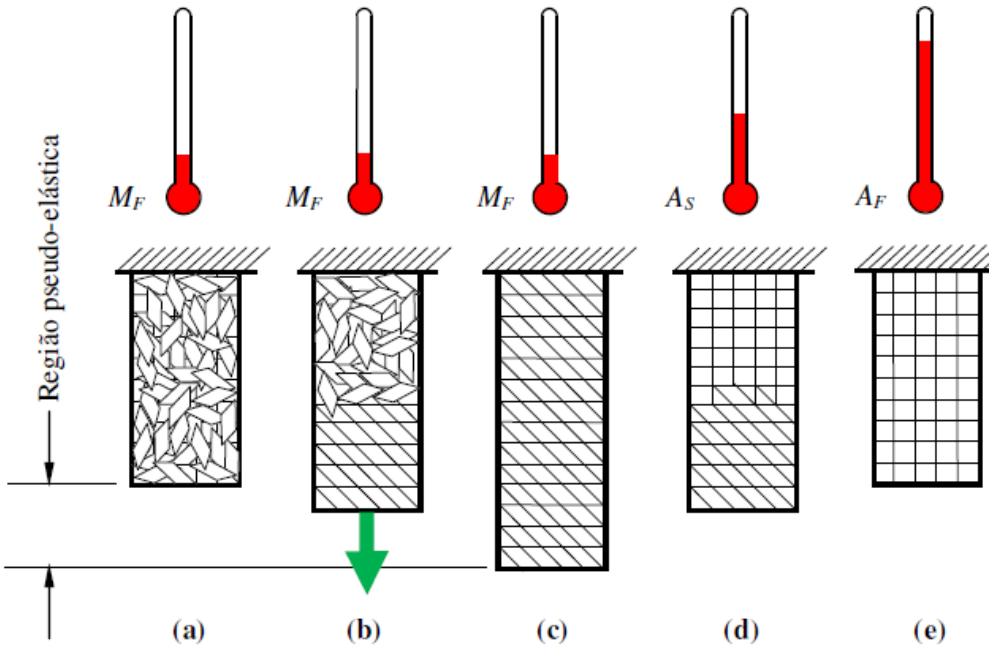


Figura 2.5: Transformação da estrutura martensítica sob carregamento mecânico.

Fonte: Aquino, 2011.

2.1.3. Comportamento Termomecânico

As propriedades mecânicas da liga variam de acordo com a faixa de transformação.

A martensita é facilmente deformável até para uma tensão bastante baixa, já na fase a alta temperatura, austenita, necessita de uma tensão muito maior. A fase austenita apresenta um comportamento elástico (conhecido como pseudoelasticidade) até seu limite de tensão, onde se transforma em martensita.

A transformação reversa da martensita, formação da austenita ocorre com a redução de tensão e uma recuperação da forma. Com o restabelecimento da fase austenítica elimina-se as deformações residuais através de um aumento da temperatura (fig. 2.6).

A deformação sofrida no estado martensita é conservada até o material ser aquecido novamente. Sob resfriamento o material precisa ser deformado para que volte à configuração deformada (LA CAVA, 2000).

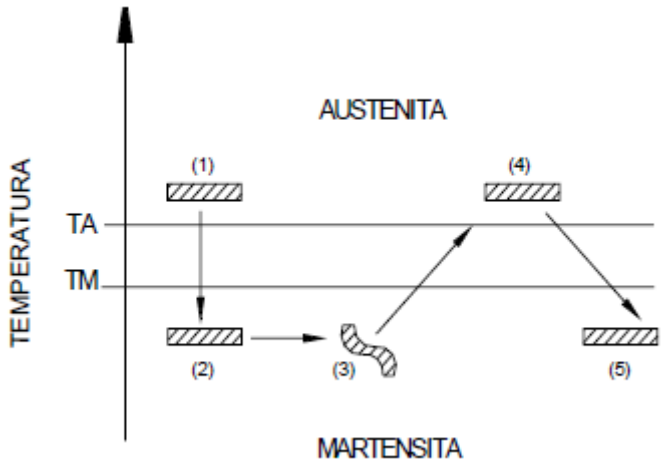


Figura 2.6: O efeito da memória de forma

Fonte: LA CAVA, 2000.

2.1.4. Treinamento das Ligas Memória de Forma

No efeito memória de forma simples a recuperação da forma ocorre por aquecimento. Já no efeito memória de forma duplo (*Two-Way Shape Memory*

Effect – TWSME) a LMF é submetida a repetidos ciclos termomecânicos (constante deformação), realizando um treinamento. Isso irá induzir mudanças microestruturais, causando mudanças macroscópicas permanentes no comportamento do material.

Defeitos induzidos durante o treinamento proporcionam o efeito memória de forma duplo. Os defeitos facilitam a formação de variantes de martensita (no resfriamento e sem carga), pois criam um estado permanente de tensão residual interna (AQUINO, 2011).

Dessa forma, quando resfriada a liga irá alongar-se sem nenhuma tensão aplicada. Recuperando sua forma original na fase austenítica (LA CAVA, 2000).

2.1.5. Fase R

A fase romboédrica ou fase R ocorre antes da fase martensítica (M). Com determinado tratamento a fase R pode ser completamente suprimida. Esse tratamento gera estruturas mais rígidas.

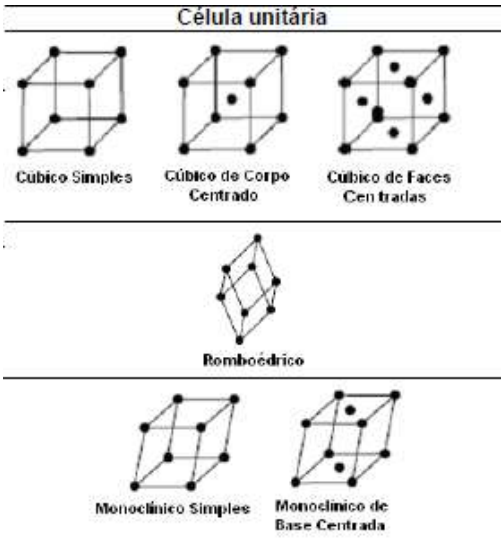


Figura 2.7: Estruturas cristalinas das LMF.
Fonte: CARDOSO; GONZALEZ, 2009.

Pode ser observada a propagação ou superação da fase R no efeito memória de forma com a ciclagem térmica e termomecânica, que permitem o treinamento da fase R ou da fase R junto com a fase M.

O tratamento de homogeneização é eficaz na superação da fase romboédrica, realizado a temperatura de 500° C com envelhecimento de 24 horas. O envelhecimento inibe a formação da fase R (CARDOSO e GONZALEZ, 2009).

Na fase R ocorre uma transformação martensítica mais rápida. Nas ligas de NiTi a fase R é retardada pela concentração do titânio (Ti), podendo desaparecer completamente ou ser suprimido.

No processo de fabricação das LMF em que ocorre uma solidificação mais rápida do material são gerados grãos bem mais finos. A diminuição do tamanho dos grãos induz na redução da temperatura de transformação, devido maior quantidade de contorno de grão e de tensões residuais (ANSELMO, 2011).

2.2. APLICAÇÕES

As LMF permitem uma ampla gama de aplicações, pois suas propriedades podem variar de acordo com a temperatura, aplicação de tensão ou histórico de carga.

Existem as diversas áreas para a aplicação da LMF, pois elas são leves e pode-se controlar as deformações e as cargas despertando o interesse para o desenvolvimento de atuadores. Na área do controle de vibrações podem ser usadas em atenuadores e absorvedores dinâmicos de vibrações adaptativos.

As propriedades das LMF estão atraindo grande interesse tecnológico e motivando várias aplicações nos mais diversos campos da ciência e da engenharia. Aeroespacial, biomédica e robótica são algumas das áreas onde as LMFs têm sido usadas. A literatura apresenta inúmeros estudos envolvendo o projeto, a modelagem e a simulação de sistemas usando atuadores de SMA para diferentes dispositivos e diferentes propósitos.

Uma aplicação recente de SMA é apresentada por HARTL *et al.* (2010a, b), estes artigos mostram a utilização de elementos de SMA como atuadores

cíclicos, na forma de vigas com geometria variável, visando reduzir o ruído de motores a jato na decolagem e a sua eficiência em regime de cruzeiro.

A matriz dos compósitos é normalmente feita de materiais como resina epóxi, cerâmica, metal ou reforçado com fibras laminadas. A interface entre a LMF e a matriz do compósito é importante para a resposta eficaz da estrutura, pois lá ocorre a transferência de stress (fig 2.8). A variação das propriedades superficiais afeta o comportamento do compósito. A resistência interfacial ao cisalhamento é medida para avaliar o comportamento macroscópico. O volume que as fibras ocupam é levado em conta na análise do efeito de descolagem interfacial. A distribuição das fibras de SMA na matriz de epóxi é aleatória (LEI *et al.,* 2012).

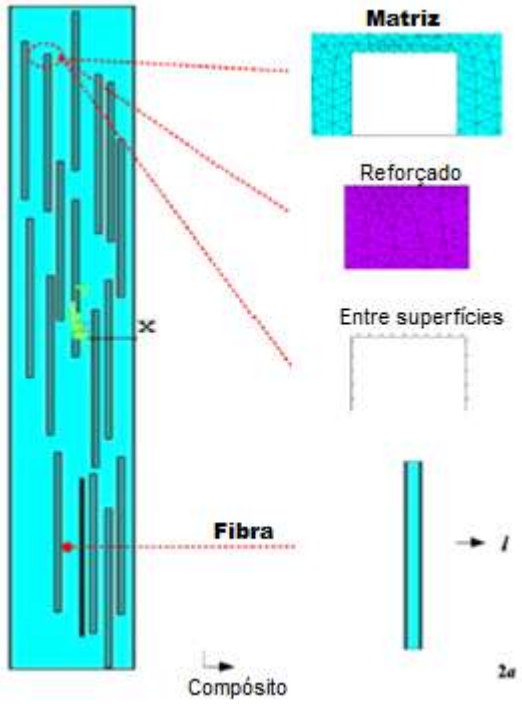


Figura 2.8: Matriz epóxi com fibras com memória de forma.
Fonte: LEI *et al*., 2012.

O protótipo de um dedo artificial foi desenvolvido para contribuir com a solução de problemas na reabilitação robótica, que trata pessoas que sofreram alguma amputação ou que necessitam melhorar a capacidade motora. Feito com plástico ABS, o dedo artificial, funciona com o aquecimento resistivo das ligas com memória de forma (com diâmetro de 0,3 mm) que se contraem e alongam realizando a flexão do dedo.

A reabilitação robótica é uma área que está sempre em busca de materiais inteligentes capazes de funcionarem como atuadores, para o desenvolvimento, projetos e construção de sistemas, equipamentos e dispositivos para recuperação de alguma habilidade motora perdida.

Os principais problemas enfrentados pelos usuários das próteses, que acabam gerando rejeição das próteses, são a não reprodução das características antropomórficas como aspecto estético, movimento e sensibilidade, além da grande dificuldade do controle e treinamento para utilização, ruídos de acionamentos e pesos elevados.

As próteses podem ser ativas (possuem mobilidade e movimento) ou passivas (não realizam movimentos). As ativas são acionadas por uma força externa, própria ou são híbridas. As acionadas com força externa podem ser pneumáticas (utilizam gás comprimido ou CO_2) ou elétricas (utilizam energia elétrica).

As próteses ativas precisam de um atuador para realizar os movimentos da mão. As ligas com memória de forma vêm se destacando como atuadores na área da reabilitação robótica.

As ligas com memória de forma são termicamente ativas (deformam ou tencionam com o calor). Funcionam com atuadores termomecânicos, ou seja, geram forças de recuperação intensas quando sofrem deslocamento (trabalho mecânico). Ideais para serem usadas na reabilitação robótica (em próteses) por possuírem leveza, pouco ruído de acionamento e força/trabalho mecânico.

As desvantagens dos fios de LMF são o lento resfriamento e a necessidade de grandes comprimentos de fio para realizar um movimento considerável (SILVA, 2012).

2.3 ADESIVOS

O desenvolvimento da tecnologia química criou novas formulas adesivas. Os modernos adesivos abriram maiores possibilidades de aplicações e criaram produtos e serviços de excelente qualidade.

O crescimento da ciência e da tecnologia de adesão fez com que vários métodos de fixação mecânica fossem substituídos, onde tradicionalmente eram

usados rebites, parafusos, grampos, costuras, suturas e soldas. A substituição dessas técnicas de fixação por adesivos deve aumentar ainda mais nos próximos anos. Isso devido à durabilidade e confiabilidade das juntas adesivas (QUINI, 2015).

Os adesivos podem ser sintéticos, produzidos a partir de materiais feitos pelo homem; ou naturais, materiais naturais, subprodutos animais ou de agricultura. Eles podem ser classificados de acordo com a função, composição química, modo de aplicação ou reação, forma física, custo e aplicação.

Os adesivos modernos, usados em exigentes aplicações estruturais, são feitos de polímeros sintéticos. Geralmente o produto mais usado para ligar aplicações estruturais são os adesivos estruturais. Grande parte desses adesivos são termoendurecíveis e funcionam através de reação química com adição de calor ou de um endurecedor (SILVA, 2007).

2.3.1 Cianoacrilato

O tipo de adesivo escolhido para a realização dos ensaios foi o cianoacrilato, da marca superbonder, por ser um adesivo com alto desempenho e com a capacidade de colar metais (LOCTITE, 2014).

O cianoacrilato é uma resina acrílica conhecida como supercola, é um líquido de baixa viscosidade. Quando entra em contato com a umidade do ar este adesivo cura em poucos segundos a temperatura ambiente. Apesar de curarem têm muitas características dos termoplásticos (SILVA, 2007 e UOL, 2014).

Para colar materiais rígidos, como os metais, a fórmula tem apenas um componente a base de cianoacrilato de metilo. Os cianoacrilatos de metilo são mais fortes e mais resistentes ao impacto do que os cianoacrilatos de etilo, que são mais usados para colar borrachas e superfícies plásticas.

Possuem excelente resistência ao corte, baixa resistência ao calor e a umidade, baixa resistência ao arrancamento e ao impacto. A resina base do adesivo reage com a umidade do meio ambiente. A reação forma uma estrutura sólida, por isso é importante que o adesivo entre em contato com o ar. Quando usados em substratos não porosos, os adesivos só curam nas bordas da junta que ficam expostas ao ar. No centro, sem umidade suficiente,

não curam completamente. Com a cura das bordas forma-se uma barreira que impede o acesso da umidade para o centro da junta (SILVA, 2007).

2.3.2 Preparação da superfície dos substratos

A resistência final da colagem depende diretamente do acabamento superficial do substrato. Logo, com a finalidade de promover uma boa colagem os substratos são submetidos a operações para preparação de superfície.

Em uma junta ideal o elo mais fraco seria o substrato, mas geralmente o adesivo é o elo mais fraco da ligação, pois sua força de adesão costuma ser mais forte que a força de coesão do interior do adesivo. Quando a interface é o elo mais fraco a força de rotura requerida é menor, caracterizando uma colagem de baixa qualidade. Por isso, as características superficiais devem ser levadas em conta.

A preparação da superfície visa evitar a rotura adesiva (na interface) em consequência de uma ligação fraca ou molhagem insuficiente. A Figura 2.9 mostra os tipos de rotura.

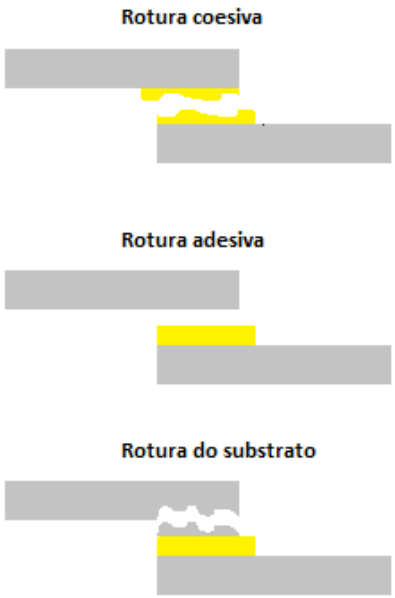


Figura 2.9: Tipos de rotura.

Fonte: Elaboração própria com base em SILVA, 2007.

O modo de rotura pode ser avaliado com os ensaios destrutivos. Caso a rotura ocorra no substrato ou no adesivo o tratamento superficial foi apropriado. Caso a rotura ocorra na interface do adesivo e do substrato e o objetivo seja ter mais resistência é preciso rever a preparação superficial.

A preparação da superfície pode ser feita com a (a) remoção de material, (b) modificação química da superfície ou/e (c) alteração da topografia superficial.

(a) remoção de material

A preparação da superfície do substrato tem por finalidade a remoção de contaminantes, que impedem a total molhagem do substrato pelo adesivo. Como os contaminantes estão fracamente ligados a superfície forma-se um elo de ligação fraco.Com a retirada dos contaminantes consegue-se uma melhor ligação interfacial.

Os contaminantes, que reduzem a resistência da junta, podem ser: incrustações, agentes desmoldantes, óleos, gorduras, impressões digitais, ferrugem, partículas soltas etc.

As substâncias podem ser removidas através de tratamentos mecânicos, desengordurantes, decapagem ou com a aplicação de vários tratamentos.

(b) modificação química da superfície

Em superfícies metálicas existe uma camada de óxidos hidratados. O adesivo precisa ser compatível com a camada de água. Os óxidos que tem ligações fracas com o metal base devem ser removidos. Porém existem óxidos que possuem ligações fortes com a superfície é não precisam ser removidos. Como no caso do alumínio, que o óxido protege o metal da corrosão.

O óxido pode ser removido ou substituído por um óxido protetor com uma ligação firme e mais resistente com o metal de base.

(c) alteração da topografia superficial

Para alterar a topografia superficial os metais passam por um ataque químico ou anodização. Criando assim uma estrutura mais rugosa e capilar.

Uma das operações para preparação de superfície é a utilização de solventes, para cada caso específico existe um solvente indicado.

A preparação da superfície afeta a resistência inicial da junta e também sua permanência. O envelhecimento das juntas é outro fator que pode alterar os resultados dos ensaios, pois pode haver formação de uma camada fraca.

Não existe uma norma para avaliar se a superfície está limpa. Todavia, para ter uma idéia do estado superficial de superfícies não porosas pode ser usado o teste de quebra de água. Em que é aplicada água destilada através de um spray na superfície.

Com o jateamento da água destilada, caso haja formação de gotas esféricas sem molhar a superfície, então a preparação superficial deve ser refeita. Caso a água forme um filme uniforme que se espalha, então a preparação superficial foi eficaz.

Para uma análise mais aprofundada pode ser medido o ângulo que a água destilada (ou um líquido com tensão superficial similar ao adesivo) forma com a superfície do substrato. Como ilustrado na Figura 2.10.

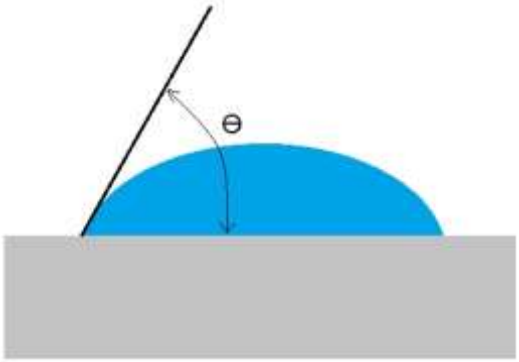


Figura 2.10: Ângulo de contato do líquido com o sólido.
Fonte: Elaboração própria com base em SILVA, 2007.

O ângulo de contato Θ mostra a capacidade que o líquido tem de espalhar em uma superfície, ou seja, sua molhagem. Θ varia de 0° à 180°, e 0° representa o espalhamento total do líquido enquanto que 180° representa a não molhagem total (SILVA, 2007).

Método não destrutivo de caracterização da superfície que analisa o ângulo entre o líquido e o sólido para investigar a distribuição dos elementos na superfície da amostra, ou seja, a forma que a gota de um líquido faz sobre a superfície do sólido. Quanto menor o ângulo encontrado maior é a

molhabilidade do material. Dessa forma, a energia interfacial é pequena e permite uma melhor adesão do líquido com a liga.

2.3.3 Colagem dos substratos

Em colagens de substratos planos é seguida uma regra para o estabelecimento do contato entre as chapas. Podem ser usadas duas formas de contato: o contato por translação e o contato por basculamento, que podem ser observados na Figura 2.11.

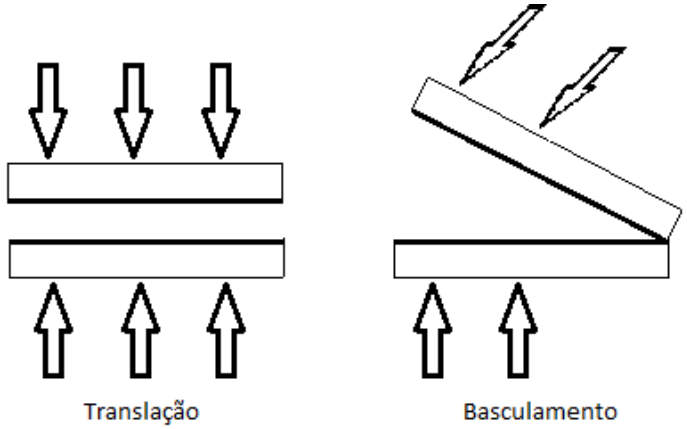


Figura 2.11: Contato por translação e por basculamento.
Fonte: Elaboração própria de acordo com SILVA, 2007.

O contato por basculamento é o mais adequado. Caso seja possível ele deve ser escolhido, pois é mais fácil de evitar formações de vazios ou porosidades no interior do adesivo como ilustrado na Figura 2.12 (SILVA, 2007).

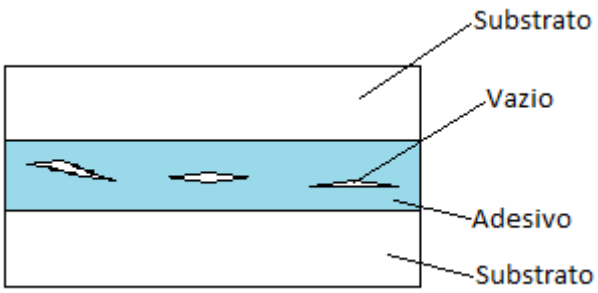


Figura 2.12: Vazios em camada adesiva de uma ligação por translação.
Fonte: Elaboração própria de acordo com SILVA, 2007.

2.3.4 Adesão entre polímeros e ligas com memória de forma

As ligas com memória de forma de NiTi vem recebendo considerável atenção no campo médico no desenvolvimento de dispositivos médicos e implantes. Pode ser vantajoso o uso de materiais híbridos, metais com memória de forma com revestimento polimérico.

Usados na medicina em stent-grafts e fios-guia, as ligas de NiTi superam outros sistemas em termos de força estrutural e intensidade das propriedades funcionais. Porém, há uma preocupação em relação ao seu teor de Ni, por poder causar alergias.

As reações alérgicas a Ni são um problema para as aplicações médicas com ligas de NiTi. Por isso, incrementa-se uma camada de polímero na liga. A boa adesão do polímero com o NiTi é fundamental para a potencial aplicação desse sistema híbrido. A qualidade da superfície afeta significativamente a força de adesão entre o polímero e o metal. O aumento dessas forças adesivas pode aumentar com o uso de agentes de acoplamento.

2.4 ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO DE FISSURA

O comportamento das juntas adesivas é estudado através da teoria da mecânica da fratura. Os métodos de medição das características dos adesivos são muito importantes para ter uma previsão de sua rotura (CARDOSO, 2011).

Os parâmetros da adesão entre dois materiais são normalmente analisados através de ensaios de propagação de fratura. Dessa forma, para avaliar a qualidade das juntas coladas do caso em estudo foram realizados três tipos de ensaios, o *End notched flexure* (ENF), o *Mixed Mode Flexure* (MMF) e o *Double Cantilever Beam* (DCB).

Os ensaios escolhidos são similares e permitem acompanhar a propagação da fissura do adesivo entre duas ligas e fornecem a curva de propagação das fendas. Com os ensaios ENF em modo II, MMF em modo misto e DCB em modo I são identificadas as taxas críticas de libertação de energia (G_c) (BARROS, 2012 e CASTRO, 1996).

Esses métodos de ensaios utilizam uma pré-fenda, pois seguem a teoria da mecânica da fratura, que considera as estruturas não homogêneas, com

defeitos. E para simular a existência dos defeitos uma pré-fenda é introduzida artificialmente (CARDOSO, 2011).

Ensaios de tenacidade à fratura permitem conhecer o comportamento dos materiais com trincas e outros defeitos internos submetidos à máxima tensão. As curvas obtidas com os ensaios podem determinar a intensidade da tensão capaz de aumentar a trinca e fraturar o material.

No caso dos metais, os principais parâmetros que influenciam a tenacidade a fratura são as propriedades do material, a configuração geométrica e o fator de intensidade de tensão.

Os principais fatores considerados nos metais foram resistência à tensão que o material precisa suportar e máximo tamanho de trinca admissível. Conhecendo essas variáveis e a tensão a ser aplicada determina-se o comprimento máximo tolerável da trinca evitando assim a fratura (GARCIA, 1999).

Os testes foram realizados na máquina de ensaio de tração da marca Instron, modelo 5966, com capacidade para 10 KN e espaço vertical para teste de 1.256 mm. Os testes foram realizados no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES) do CEFET/RJ.

2.4.1 *Mixed Mode Flexure* (MMF)

O MMF é um ensaio para determinar a tenacidade em modo misto (I + II), ou seja, as juntas são sujeitas a esforços de tração e de cisalhamento (GOMES, 2008).

As placas possuem diferentes comprimentos e são coladas de forma que nas extremidades as placas se encontrem de um dos lados e do outro não (Fig. 2.13). Do lado em que as placas não se encontram tem-se a chamada pré-fenda (sem cola adesiva). Aplica-se uma força vertical no ponto médio da amostra que fica apoiada pelas extremidades. Como em um dos lados a amostra está apoiada apenas na placa superior, a junta sofre tensão de abertura (modo I) e tensão de corte (modo II) (SILVA, 2007).

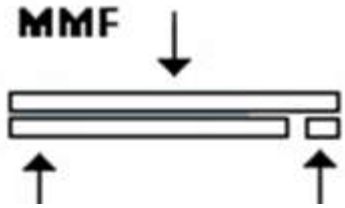


Figura 2.13: Ensaio MMF.

Fonte: Elaboração própria com base em SILVA, 2007.

2.4.2 *End Notched Flexure* (ENF)

O ENF é um ensaio para determinar a tenacidade em modo II, ou seja, as juntas são sujeitas a tensão de corte. A grande dificuldade deste ensaio é realizar a medição do comprimento de fenda durante sua propagação (SILVA, 2007).

As placas possuem medidas iguais e são coladas exatamente uma acima da outra. Em uma das extremidades tem-se a chamada pré-fenda, onde não é colocada nenhuma cola adesiva (Fig. 2.14). Aplica-se uma força vertical no ponto médio da amostra que fica apoiada pelas extremidades (CARDOSO, 2011).

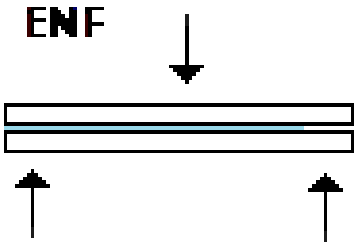


Figura 2.14: Ensaio ENF.

Fonte: Elaboração própria com base em CARDOSO, 2011.

2.4.3 *Double Cantilever Beam* (DCB)

Ensaio de fratura que avalia a resistência mecânica das juntas coladas em modo I, devido à presença de tensões normais. Mede a G_{Ic} considerando uma pré-fenda inicial. Neste ensaio duas placas metálicas são coladas

deixando uma pré-fenda em uma das extremidades. Nesta extremidade as placas sofrem forças opostas caracterizando um arrancamento (Fig. 2.15).

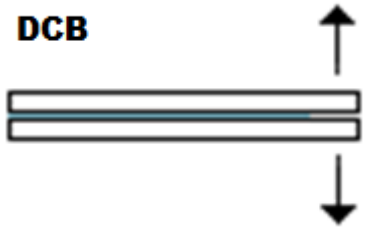


Figura 2.15: Ensaio DCB.

Fonte: Elaboração própria com base em SILVA, 2007.

Este é o único dos três ensaios realizados que possui uma norma, a ASTM D3433-99. A norma estabelece a velocidade para induzir a propagação da pré-fenda, que deve ser entre 0,5 e 3 mm/min. Porém esta norma não é aplicável ao caso, pois no método da norma as placas são parafusadas nas extremidades e foi utilizada a colagem de dobradiças para forçar a separação das ligas.

As dobradiças permitem a movimentação de abertura das juntas concentrando a força apenas no descolamento das placas. As dobradiças foram coladas com a supercola e envolvidas com durex na extremidade das placas, onde se encontra a pré-fenda.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO DE FISSURA

Nos ensaios de propagação de fissura descritos neste capítulo foi utilizada a liga com memória de forma NiTi SE508, fabricada pela NDC – *Nitinol Devices & Components* (Fremont, CA, USA) e placas de alumínio.

As ligas são fornecidas em placas de 305 x 126 mm e precisaram ser cortadas com a ajuda de uma guilhotina para obter o comprimento e a largura desejada. As dimensões dos substratos usados na colagem foram126mm de comprimento, 20 mm de largura e 1,5 mm de espessura.

O adesivo usado neste trabalho foi um cianoacrilato de cura rápida (Loctite® 430™SuperBonder®, Henkel LoctiteLtd., São Paulo, Brazil). Este adesivo é bastante usado para substratos metálicos.

As placas foram limpas com álcool antes de serem coladas. Nenhum tipo de tratamento superficial foi aplicado. Na preparação dos corpos de prova é deixada uma parte sem cola que tem a função de uma fissura inicial que irá se propagar durante os ensaios. Para os testes ENF e MMF a fissura inicial deixada foi de 10 mm de comprimento em relação ao apoio mais próximo. No teste DCB a fissura inicial tinha 25 mm de comprimento a partir do ponto de aplicação da força.

Apesar de o cianoacrilato ser conhecido por colar instantaneamente, os testes foram realizados pelo menos um dia após a colagem, assegurando assim a secagem total e endurecimento do adesivo.

As amostras após serem coladas foram lixadas lateralmente com o auxílio de uma lixa e uma lima fina, a fim de eliminar os resíduos de cola para não falsear os resultados.

Os testes foram desenvolvidos na máquina Instron 5966 (Norwood, EUA). Equipada com uma célula de carga de 10 kN para os ensaios MMF e ENF e com uma célula de carga de 5 kN para o ensaio DCB. A velocidade de deslocamento da carga aplicada sobre as amostras foi de 5 mm/min nos três tipos de ensaios

As amostras foram alinhadas e fixadas na máquina de maneira que durante a realização dos ensaios a liga com memória de forma ficasse por cima

da placa de alumínio. Nos ensaios MMF e DCB foram colocadas placas do mesmo material para servirem de apoio e manter o alinhamento dos corpos de prova.

Nos ensaios a distância entre os suportes de apoio foi de 100 mm para os ensaios ENF e MMF e uma distância de 80 mm para o ensaio DCB.

Nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 podem ser observadas as configurações dos ensaios MMF, ENF e DCB respectivamente.

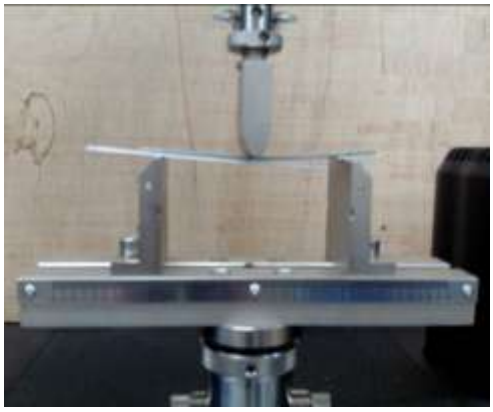


Figura 3.1: Ensaio MMF.



Figura 3.2: Ensaio ENF.



Figura 3.3: Ensaio DCB.

Durante o ensaio foram registrados os valores da carga (P) e do deslocamento (δ). Para cada um dos ensaios foi uma taxa de aquisição de 100 Hz.

Foram realizados cinco testes para cada tipo de ensaio. As Figuras 3.4 à 3.17 demonstram os ensaios MMF, ENF e DCB realizados.

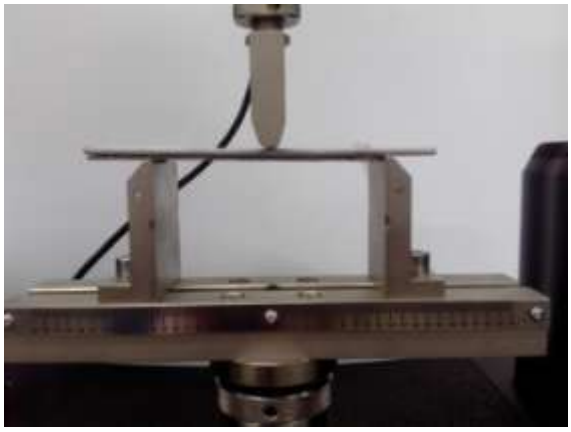


Figura 3.4: MMF 1.

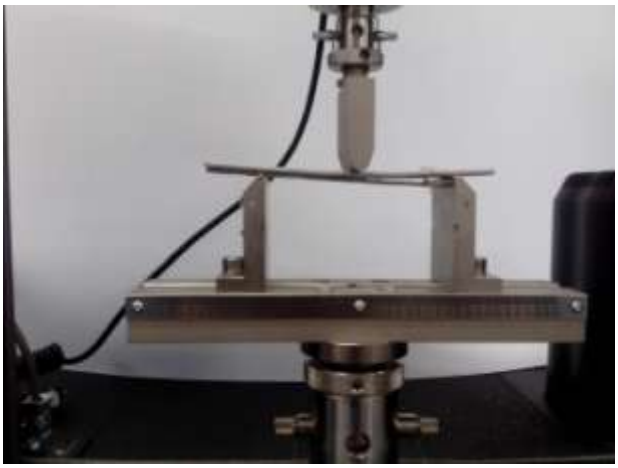


Figura 3.5: MMF 2.

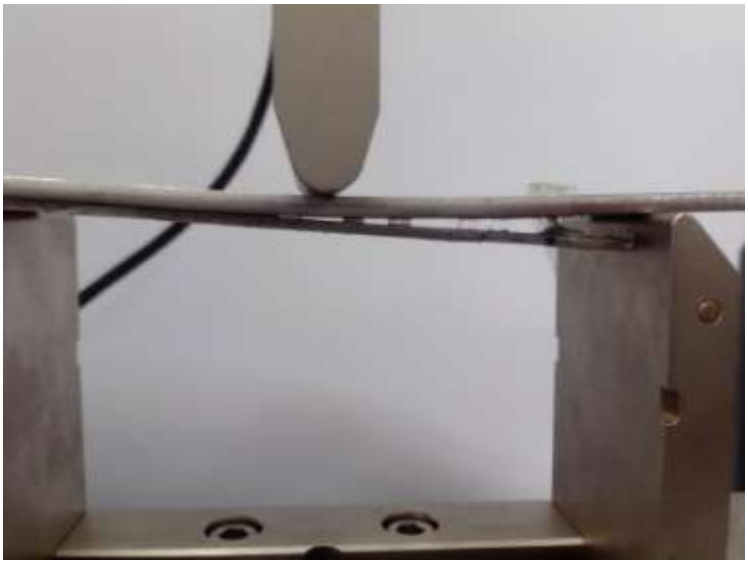


Figura 3.6: MMF 3.

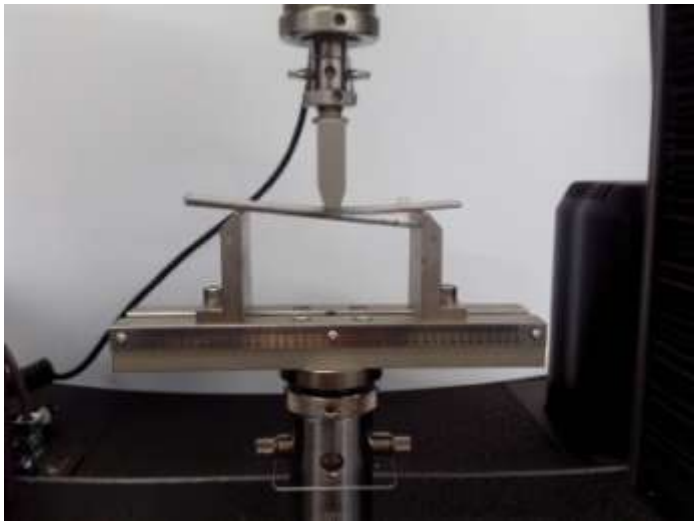


Figura 3.7: MMF 4.



Figura 3.8: MMF 5.



Figura 3.9: ENF 1.



Figura 3.10: ENF 2.

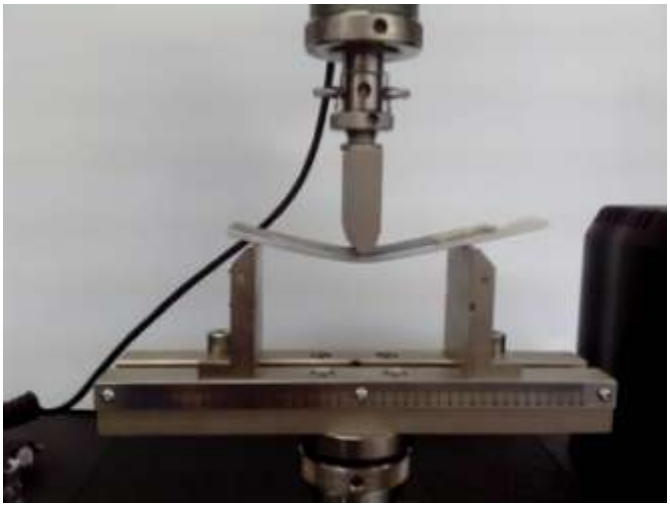


Figura 3.11: ENF 3.

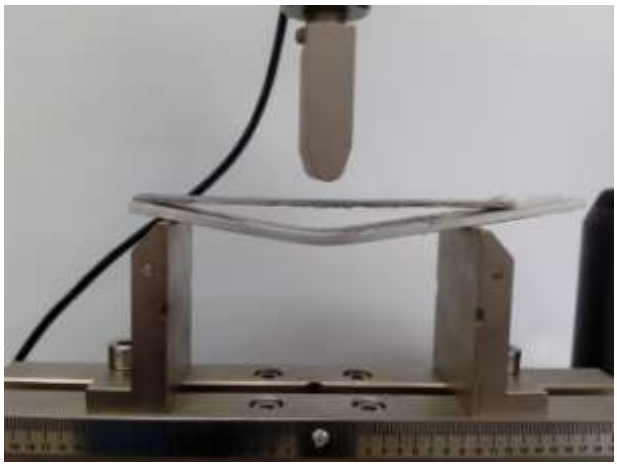


Figura 3.12: ENF 4.



Figura 3.13: DCB 1.



Figura 3.14: DCB 2.

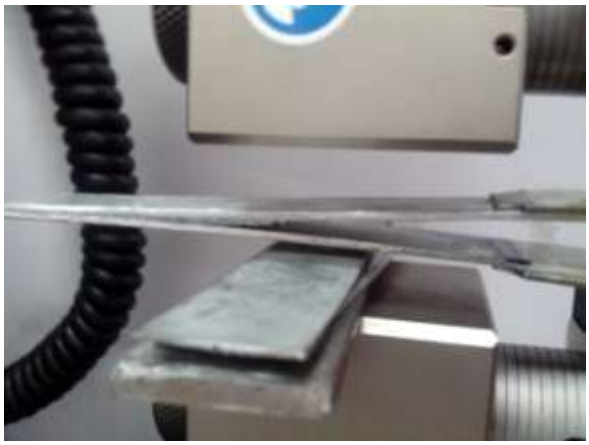


Figura 3.15: DCB 3.



Figura 3.16: DCB 4.



Figura 3.17: DCB 5.

3.2 ANÁLISE NUMÉRICA

O estudo dos ensaios de flexão em placas coladas também pode ser feito através de simulações numéricas (ALFANO, 2005; CORIGLIANO, 1993). A maneira mais simples de simular numericamente um ensaio de flexão em placas coladas e utilizar um modelo em elementos finitos com uma interface elástica representando a cola. Os ensaios foram modelados no software CAST3M desenvolvido pelo CEA - *Commissariat à l'Energie Atomique en France*. O comportamento de uma interface elástica já é previsto no software utilizado, que define k_i (*i = 1,2* ou *3*) como a rigidez elástica de interface numa dada direção. A utilização de uma interface elástica simples não permite, no entanto, a observação da evolução da fissura de forma automática. O comportamento da estrutura colada é observado para um determinado valor de fissura inicial de cada vez. A Figura 3.18 é um esquema que representa a evolução da fissura e mostra como é calculada a energia *G*, representada pela área cinza. A equação 1 apresenta este cálculo.

$$G = \frac{FLE(i)}{2}(FS(i-1) - FI(i)) \quad (1)$$

O índice *i* representa o instante observado em relação ao comprimento da fissura. Por exemplo, FLE(2) e FS(1) representam a flecha e a força no instante em que ocorre o avanço da fissura de *1mm* para *2mm*, e FI(2) é a força no momento no qual a energia recomeça a ser acumulada para fazer a fissura avançar de *2mm* para *3mm*. O avanço de fissura de *1mm* é utilizado como referência para simplificar a analise, porém, do ponto de vista numérico pode-se adotar avanços menores.

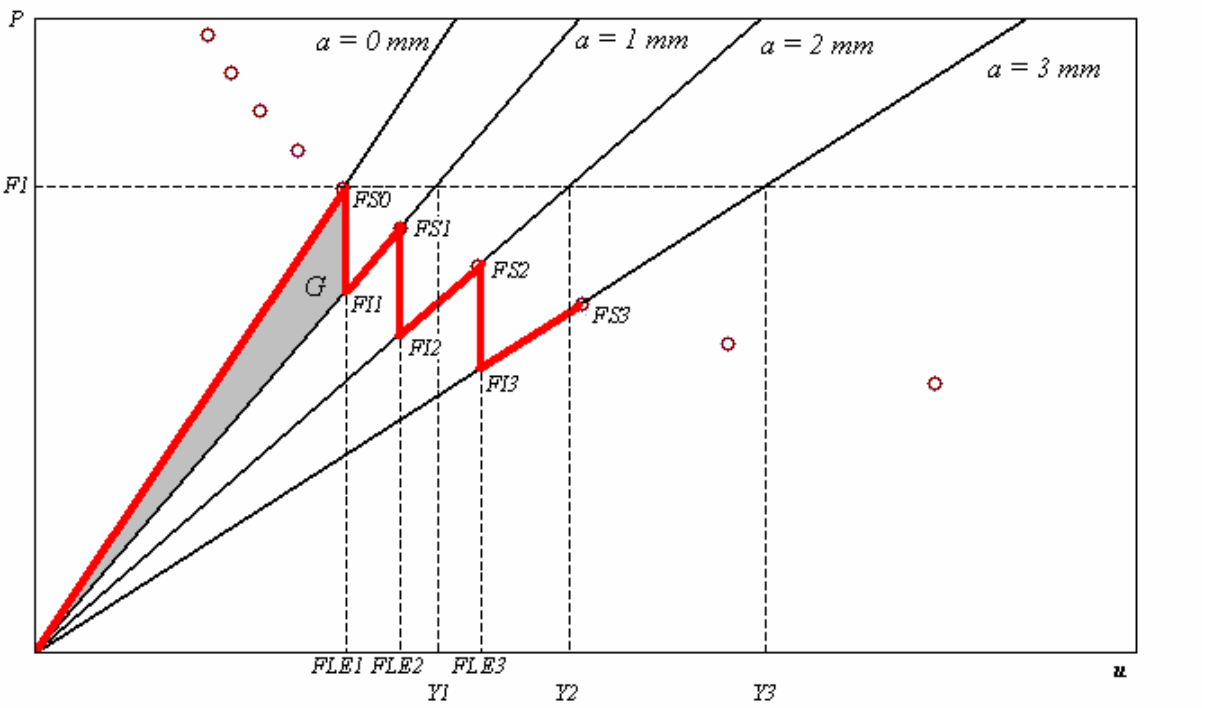


Figura 3.18: Esquema de propagação da fissura.

Fonte: De Barros, 2006.

Com o modelo em elementos finitos é possível obter a flecha Y(i) correspondente a uma força F1 aplicada, para um dado comprimento *a*. A curva de propagação a G constante é a curva que contém todos os pontos FS(i) para esse valor de energia. A partir da Fig. 3.4, pode-se escrever as seguintes equações:

$$\frac{F1}{Y(i)} = \frac{FS(i)}{FLE(i+1)} = \frac{FI(I)}{FLE(I)} \tag{2}$$

$$R(i) = \frac{F1}{Yi} \tag{3}$$

$$\begin{cases} FS(i-1) = FLE(i) * R(i-1) \\ FI(i) = FLE(i) * R(i) \end{cases} \tag{4}$$

$$\mathrm{FLE(i)} = \sqrt{\frac{2\mathrm{G}}{\mathrm{R(i-1)-R(i)}}} \tag{5}$$

Uma rotina foi implementada no CAST3M para calcular as forças FS(i) e FI(i) e as flechas FLE(i) a partir de uma força F1 dada e das flechas Y(i) que essa força impõe na estrutura. A Figura 3.19 mostra algumas curvas obtidas num ensaio ENF para diversos valores de G.

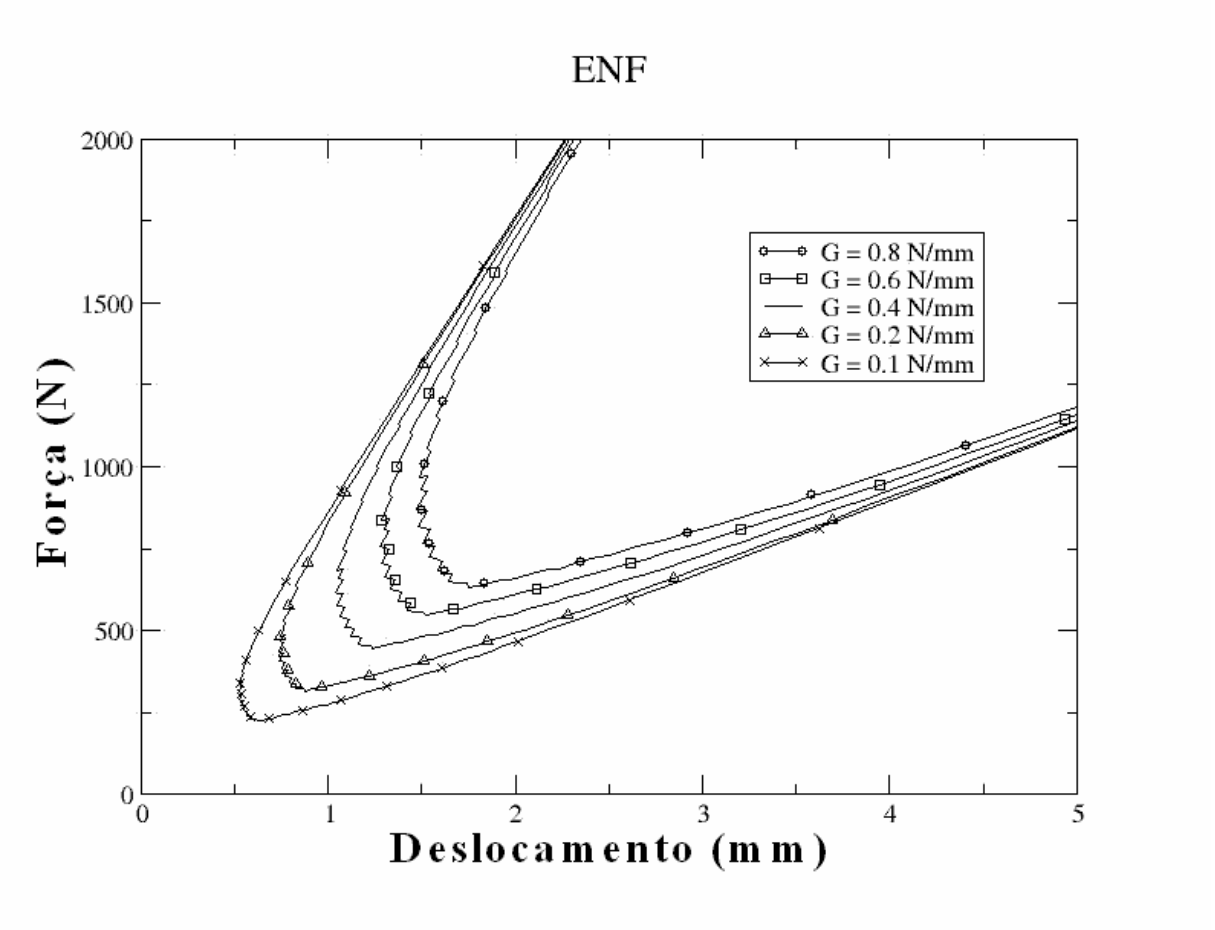


Figura 3.19: Curvas de propagação a G constante.

Fonte: De Barros, 2006.

4. RESULTADOS

4.1 ENSAIOS

As curvas obtidas através do deslocamento causado pela força aplicada na junta, dos ensaios de ENF, MMF e DCB podem ser observados nos gráficos das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3.

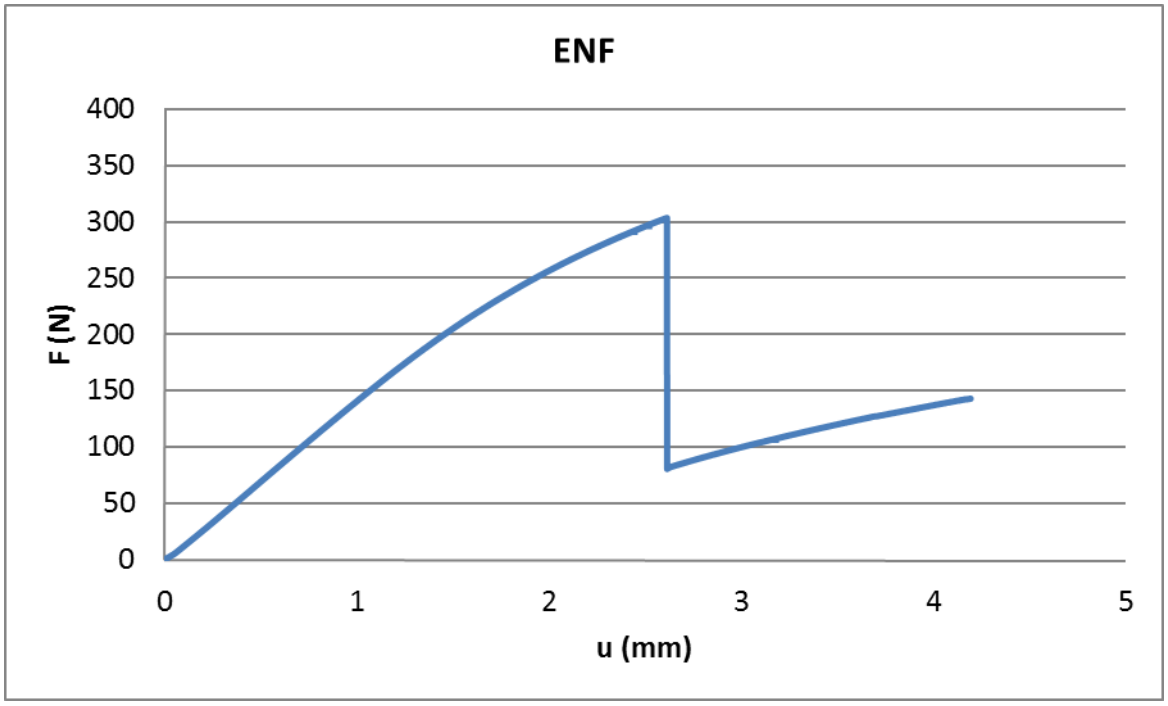


Figura 4.1: ENF força x deslocamento.

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados dos ensaios.

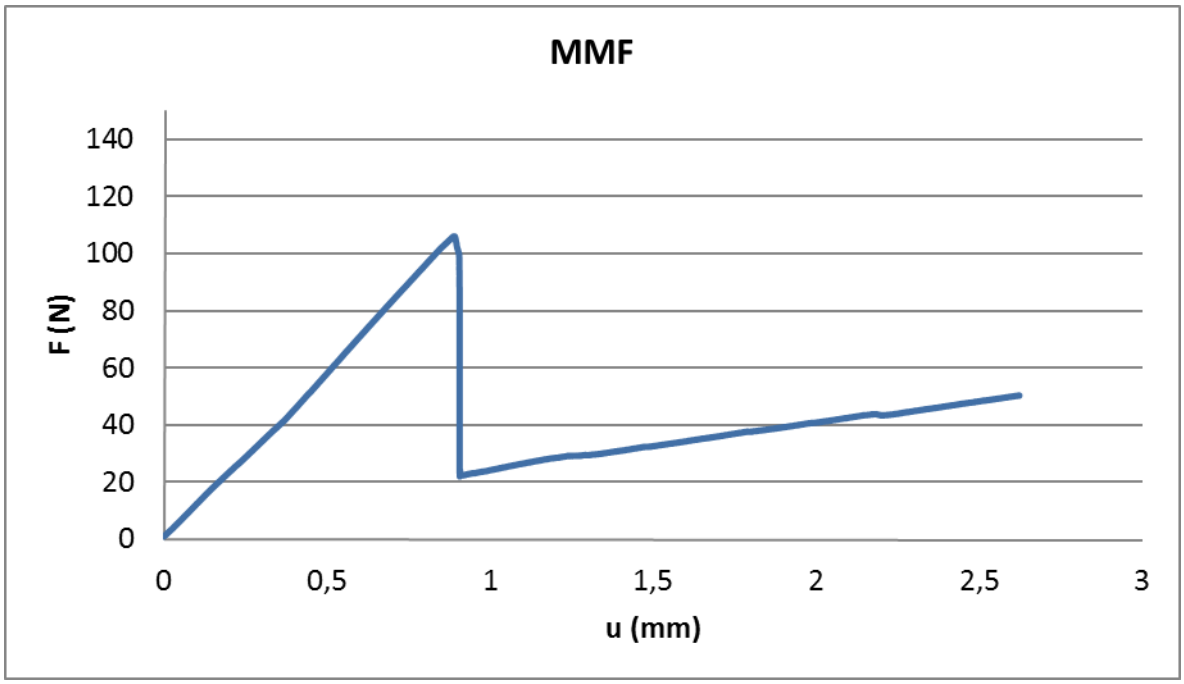


Figura 4.2: MMF força x deslocamento.

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados dos ensaios.

O ensaio DCB também foi realizado com LMF e alumínio. O resultado é apresentado no gráfico da Figura 4.3.

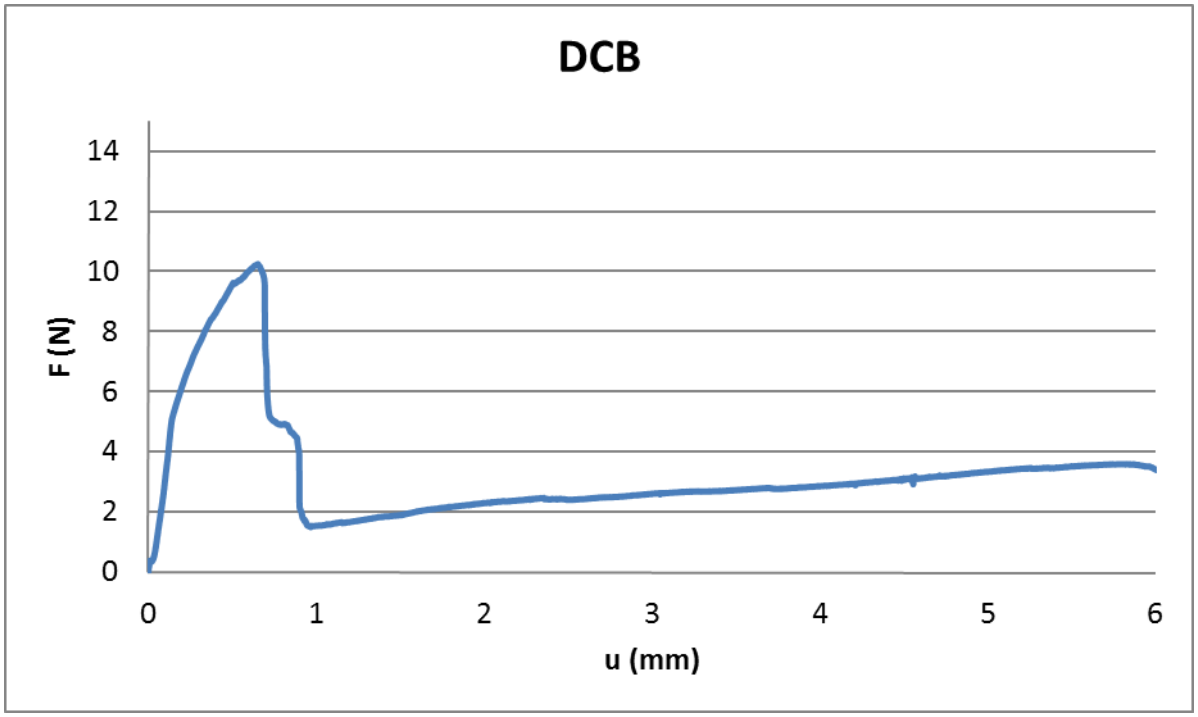


Figura 4.3: DCB força x deslocamento.

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados dos ensaios.

A resiliência da liga com memória de forma pode ser observada no ensaio ENF mostrado na fig. 4.4. Após a deformação, com a aplicação de uma força de 80N, a liga voltou a sua forma original, sem sofrer qualquer dano, enquanto que a liga de alumínio foi deformada plasticamente.

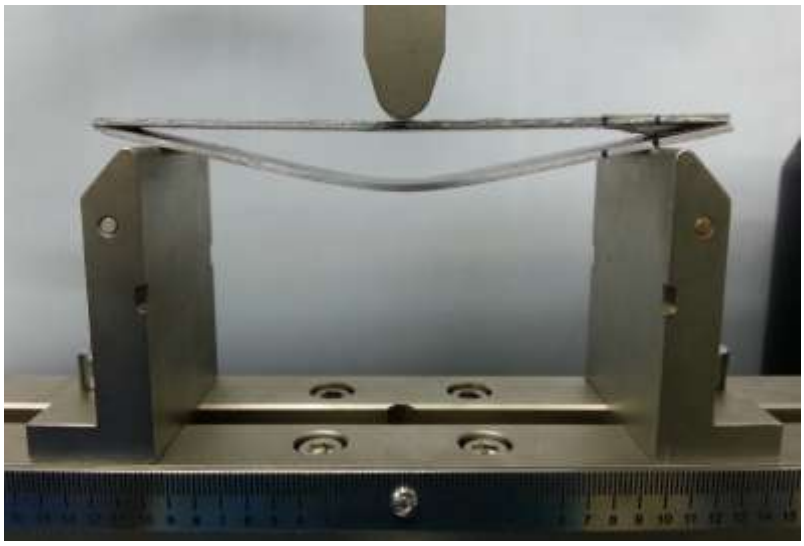


Figura 4.4: Ensaio ENF.

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados dos ensaios.

Na Figura 4.5 pode ser observado em detalhe o deslocamento livre na extremidade da placa de alumínio durante a flexão que leva a propagação da fissura em modo misto.

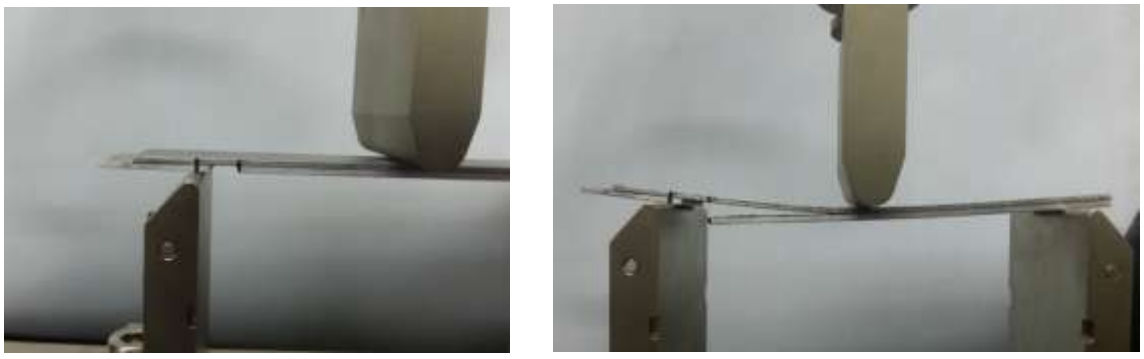


Figura 4.5: Detalhe do ensaio.

Fonte: Autora.

Após o descolamento das ligas foi observado que a cola ficou concentrada quase completamente em apenas uma das placas (na interface do substrato com o adesivo) em alguns ensaios na LMF e em outros na liga de

alumínio, como pode ser observado na figura 4.6. Isto caracteriza uma ruptura adesiva, que pode ocorrer quando há uma má preparação da superfície do substrato.



Figura 4.6: Liga com memória de forma com resíduos de cola e atrás a liga de alumínio.
Fonte: Autora.

4.2 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Usando o modelo de elementos finitos no CAST3M pode-se encontrar a curva de propagação da fissura a G constante, que mais se aproxima dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos. O valor de energia crítica que gera a curva que melhor se ajusta ao resultado prático é, portanto, o valor correspondente a junta colada ensaiada.

A figura 4.7 apresenta o ajuste entre modelo numérico e resultado experimental realizado para os ensaios em modo misto MMF. Nesse caso, o valor de energia que mais se ajustou a curva obtida experimentalmente foi G=0,05.

O mesmo procedimento foi adotado no ajuste das curvas de propagação a energia constante em ensaios em modo cisalhante e de abertura.

O resultado para o modo II é mostrado na figura 4.8, onde pode-se ver que o valor de energia crítica que melhor se ajustou foi de G = 0,3.

A figura 4.9 mostra o ajuste para o modo I, a energia crítica de propagação de fissura na abertura foi de G = 0,012.

Esses resultados estão coerentes com o esperado, pois a energia crítica em modo II é sempre superior àquela obtida em modo I, principalmente em juntas com baixa preparação superficial, como foi o caso das juntas produzidas nesse trabalho.

Na literatura, a energia crítica em modo I é definida como G_{cI}. Do mesmo modo chamamos G_{cII} a energia crítica em modo 2. A energia crítica em modo misto, no entanto, não foi definida diretamente e nem como uma função entre as duas energias em modo puro (De Barros, 2012).

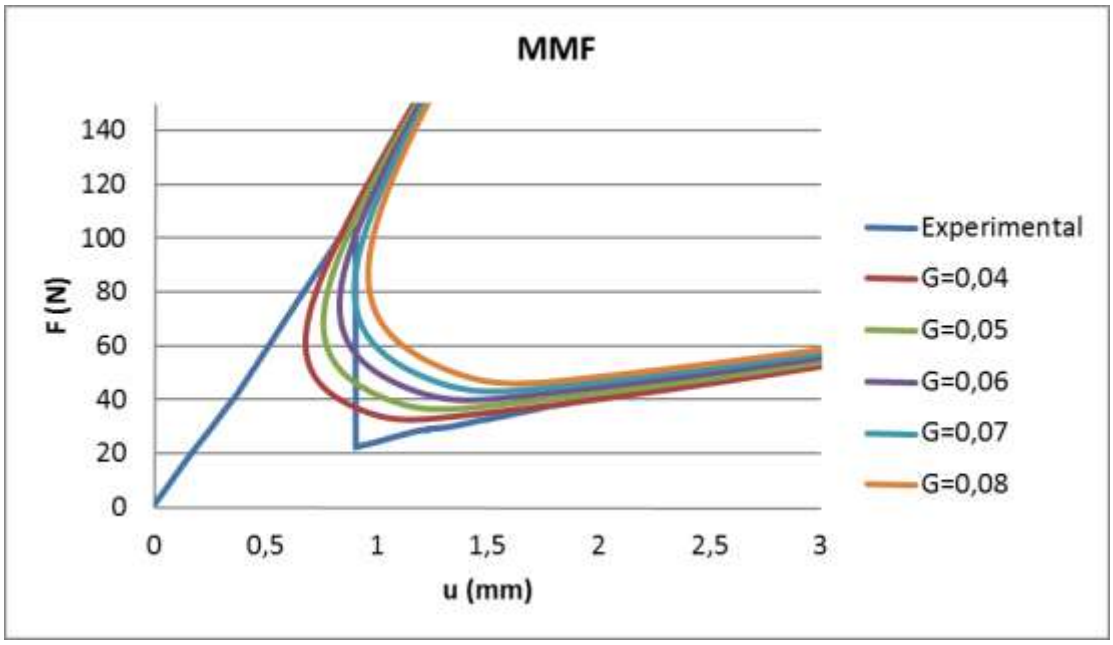


Figura 4.7: Comparação entre resultados numéricos e o experimental.

Fonte: Autora.

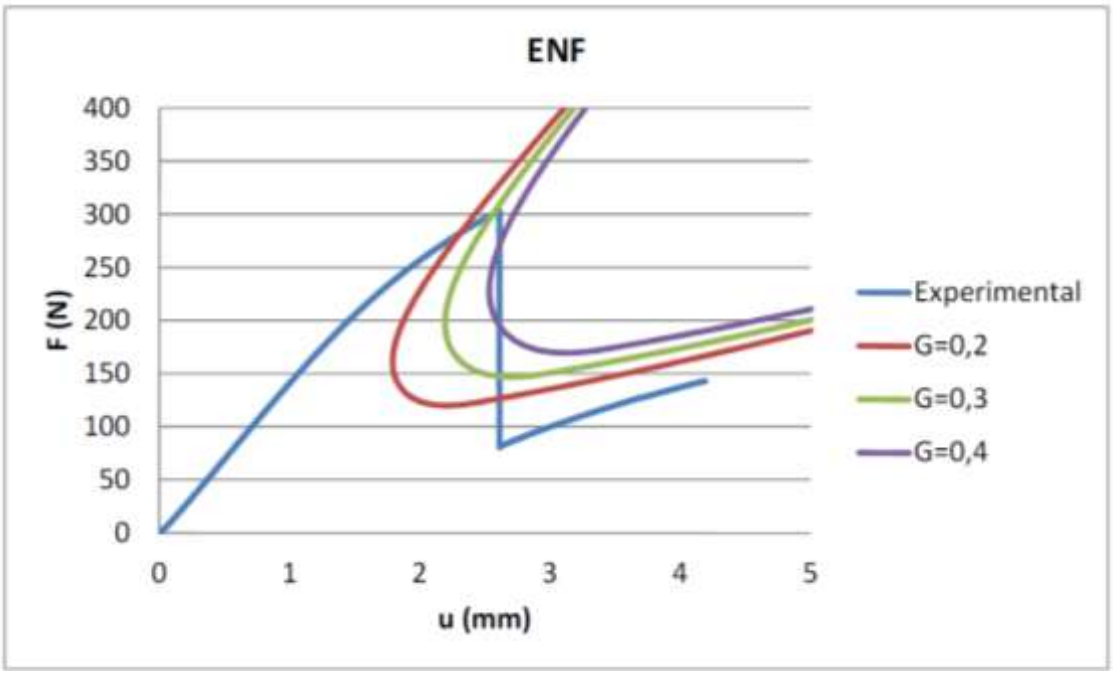


Figura 4.8: Comparação entre resultados numéricos e o experimental.

Fonte: Autora.

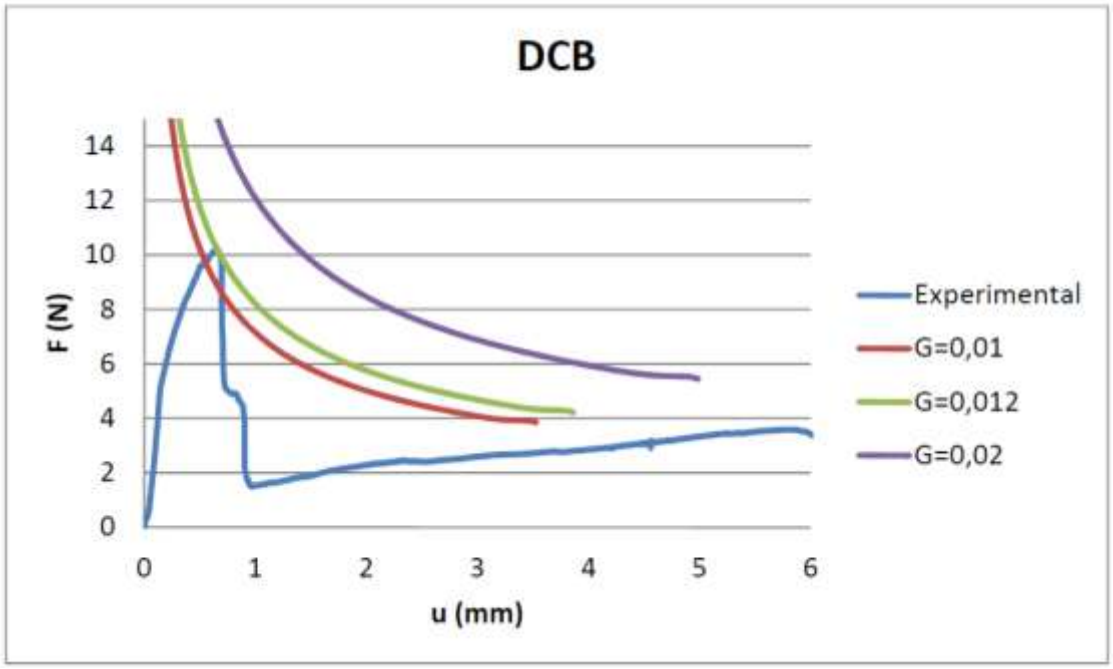


Figura 4.9: Comparação entre resultados numéricos e o experimental.

Fonte: Autora.

Os valores encontrados de G_{cI} = 0,012 e de G_{cII} = 0,3 podem ser usados em modelagens numérica mais complexas para simular o comportamento da união entre a liga de memória de forma e o alumínio. Um exemplo desse tipo de simulação é mostrado no artigo publicado durante a preparação dessa dissertação, apresentado no anexo 1. O valor de G em modo misto encontrado aqui foi usado para validar o modelo numérico usado no artigo.

5. CONCLUSÃO

A liga com memória de forma foi escolhida devido as suas características. Quando a LMF é deformada na fase martensítica ela mantém as ligações moleculares e isso permite que ela recupere sua forma na fase austenítica, há altas temperaturas. Essa capacidade torna possível sua utilização como atuador.

A crescente utilização de estruturas mais complexas, a grande variedade de materiais e a demanda por sistemas de união mais rápidos e resistentes implica na utilização dos adesivos. O uso dos adesivos permite uma maior distribuição das cargas e tensões. E uma maior liberdade na concepção de produtos. Com a aplicação do adesivo as junções têm seu peso reduzido e aumento da resistência mecânica em comparação a soldagem. Juntas adesivas são duráveis e confiáveis por isso sua utilização vem se expandindo. Para os ensaios foi escolhido como adesivo o cianoacrilato pela capacidade de atingir alta resistência em poucos segundos.

Os ensaios escolhidos permitem observar a propagação da fissura na interface entre as ligas. A fratura só se propaga quando atinge a energia crítica (G), que foi obtida através das curvas de propagação de fissura.

As equações de u representam as curvas de propagação da fenda e foram encontradas através dos ensaios e dos cálculos do modelo numérico simples. Os gráficos gerados através do modelo numérico foram comparados com os gráficos obtidos nos ensaios MMF, ENF e DCB.

Os valores de energia crítica em modo I e modo II encontrados possibilitam a simulação de situações mais complexas de união entre as duas ligas preparadas em condições semelhantes as juntas aqui ensaiadas.

REFERÊNCIAS

ANSELMO, W. B. C., ARAÚJO, C. J., LACERDA, T. M. E. DE, SILVA, A. C. S..**Caracterização de uma fita Ni-Ti com efeito de memória de forma obtida por solidificação rápida**. Revista eletrônica de materiais e processos. Campina Grande, Pb: Universidade Federal de Campina Grande, 2011.

AQUINO, A. S. . **Controle de vibração de um sistema sob desbalanceamento rotativo utilizando atuador de liga com memória de forma**. Tese (Doutorado em Pós graduação em engenharia mecânica) - Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa.2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10520: informação e documentação: citações em documentos - apresentação. Rio de Janeiro. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023: informação e documentação: referências – elaboração. Rio de Janeiro. 2002.

CALDEIRA, L. NUNES, L**. Estudo de fratura em um adesivo flexível usando teste DCB através do método de Correlação de Imagens Digitais**. Universidade Federal Fluminense. Niterói. 2013.

CARDOSO, M. M. T.; GONZALEZ, C. H. **Propriedades termomecânicas de atuadores de ti-ni com efeito memória de forma.** In: Congresso de iniciação em desenvolvimento tecnológico e inovação, XVII, CTG – UFPE.2009.

CARDOSO, R. **Desenvolvimento de um dispositivo para a determinação da tenacidade de adesivos em modo misto**. (Dissertação do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal. 2011.

CASTRO, P., MARQUES, A., MORAIS, A. **Fractura de materiais compósitos: uma revisão de alguns resultados**. Anales de mecânica de la fractura.Vol.13. 1996.

DE BARROS, S. **Comportamento de placas coladas em ensaios mecânicos**. IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2006.

DE BARROS, S., CHAMPANEY, L. **Crack propagation curves on flexure adhesion tests**. International Journal of Structural Integrity. 2012.

DE BARROS, S., OLIVEIRA, P.S. PACHECO, P.M.C., AGUIAR, R.A.A. **Modelling Bonded Shape Memory Alloy Vibration Attenuators Element susing the Finite Element Method**. The Journal of Adhesion, v.91, pp.883-908, 2014.

FURST, S.. SEELECKE, S. **Modeling and experimental characterization of the stress, strain, and resistance of shape memory alloy actuator wires with controlled power input.** Journal of Intelligent Material Systems and Structures. p.1233-1248. 2012.

GARCIA, A., DOS SANTOS, C. Ensaios dos materiais. Editora (Ed.). Campinas. 1999.

GOMES, K.C., REGO, S.R., FELIX, J.; TORRES, S.M.; DE BARROS, S. **Aderência de sistemas cerâmicos: uso de material alcalinamente ativado**. 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECIMAT. Porto de Galinhas, PE. 2008.

HARTL, D. J., LAGOUDAS, D. C., CALKINS, F. T., MABE, J. H., 2010, **Use of a Ni60Ti Shape Memory Alloy for Active Jet Engine Chevron Application: I. Thermomechanical Characterization**, Smart Materials and Structures, v. 19, n. 20, pp. 1-14, 2010.

HARTL, D.J., LAGOUDAS, D.C., CALKINS, F.T., MABE, J.H., 2010, **Use of a Ni60Ti Shape Memory Alloy for Active Jet Engine Chevron Application: II. Experimentally Validated Numerical Analysis**, Smart Materials and Structures, v. 19, n. 21, pp. 1-18, 2010

KIMIECIK, M.; JONES, J.W.; DALY, S**. Quantitative Analysis of Phase Transformation in Ni-Ti Shape Memory Alloys**. Advanced Materials &Processes. University of Michigan .Ann Arbor, p. 21-24. abr. 2013.

KOTTNER, R., HYNEK, R., KROUPA, T. **Identification of parameters of cohesive elements for modeling of adhesively bonded joints of epoxy composites**. Applied and Computational Mechanics 7.p.137–144. Plzen, CzechRepublic. 2013.

LA CAVA, C., SILVA, E., MACHADO, L. **Modelagem de dispositivos mecânicos fabricados de ligas com memória de forma**. Monografia (graduação em ENGENHARIA MECÂNICA) - CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA. Rio de Janeiro.2000.

LEI, Hongshuai *et al.* **Simulation and analysis of shape memory alloy fiber reinforced composite based on cohesive zone model**. Elsevier: Materials and Design. Austrália, p. 138-147. mar. 2012.

LOCTITE. Super Bonder disponível em: <http://www.loctite-consumo.com.br/pt/produtos/super-bonder/liquidos/original.html>. Acesso dia 18 de julho de 2014.

NEUKING, K., ABU-ZARIFA, A., EGGELER, G. **Surface engineering of shape memory alloy/polymer-composites: Improvement of the adhesion between polymers and pseudoelastic shape memory alloys**. Elsevier. Bochum, p. 606-611. 2008.

NUNES, A., BASTOS, C., MENEZES, N. **Colagem de atuadores de liga com memória de forma**. Monografia do curso de Engenharia Mecânica. CEFET/RJ. Rio de Janeiro. 2014.

QUINI, J. **Adesivos estruturais uretânicos aplicados a combinações de compósitos, plásticos e metais**. Instituto de pesquisas energéticas e nucleares. São Paulo. 2011.

QUINI, J. **Histórico e conceitos básicos dos adesivos**. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA-VUAK/historico-conceitos-basicos-dos-adesivos?part=5>. Acesso em: 9 de fevereiro de 2015.

SILVA, A., SOUTO, C., ARAÚJO, C. **Dedo biométrico artificial acionado por liga com memória de forma**. In: COLAOB, Natal. Brasil, 2012.

SILVA, L., MAGALHÃES, A., MOURA, M. **Juntas adesivas estruturais**. Publindústria (Ed.). Porto. 2007.

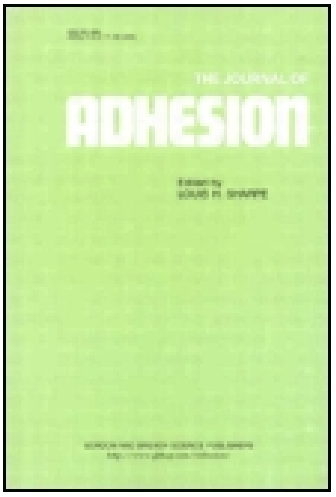
SUN, L., HUANG, W.M., DING, Z. **Materials and design: Stimulus-responsive shape memory materials: A review**. Elsevier. Singapura, p.577-640. 2012.

UOL. **Como tudo funciona: O que faz a supercola ser tão super?** Disponível em: <http://ciencia.hsw.uol.com.br/questao695.htm>. Acesso dia 23 de agosto de 2014.

VAZ, L. **Método dos elementos finitos em análise de estruturas**.Editora Campus. Elsevier. Rio de Janeiro. 2011.

ANEXO I

This article was downloaded by: [Professor Silvio De Barros]
On: 15 June 2015, At: 10:22
Publisher: Taylor & Francis
Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



The Journal of Adhesion
Publication details, including instructions for authors and subscription information:
http://www.tandfonline.com/loi/gadh20

Modelling Bonded Shape Memory Alloy Vibration Attenuators Elements Using the Finite-Element Method

Pedro M. C. L. Pacheco[a], Paula S. F. Oliveira[a], Ricardo A. A. Aguiar[a] & Silvio De Barros[a]

[a] Department of Mechanical Engineering, CEFET/RJ - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, Brazil

Published online: 15 Jun 2015.

CrossMark
Click for updates

To cite this article: Pedro M. C. L. Pacheco, Paula S. F. Oliveira, Ricardo A. A. Aguiar & Silvio De Barros (2015) Modelling Bonded Shape Memory Alloy Vibration Attenuators Elements Using the Finite-Element Method, The Journal of Adhesion, 91:10-11, 883-908, DOI: 10.1080/00218464.2014.1002916

To link to this article: http://dx.doi.org/10.1080/00218464.2014.1002916

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Taylor & Francis makes every effort to ensure the accuracy of all the information (the "Content") contained in the publications on our platform. However, Taylor & Francis, our agents, and our licensors make no representations or warranties whatsoever as to the accuracy, completeness, or suitability for any purpose of the Content. Any opinions and views expressed in this publication are the opinions and views of the authors, and are not the views of or endorsed by Taylor & Francis. The accuracy of the Content should not be relied upon and should be independently verified with primary sources of information. Taylor and Francis shall not be liable for any losses, actions, claims, proceedings, demands, costs, expenses, damages, and other liabilities whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with, in relation to or arising out of the use of the Content.

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. Terms &

Conditions of access and use can be found at http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

The Journal of Adhesion, 91:883–908, 2015
Copyright © Taylor & Francis Group, LLC
ISSN: 0021-8464 print/1545-5823 online
DOI: 10.1080/00218464.2014.1002916

Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

Modelling Bonded Shape Memory Alloy Vibration Attenuators Elements Using the Finite-Element Method

PEDRO M. C. L. PACHECO, PAULA S. F. OLIVEIRA, RICARDO A. A. AGUIAR, and SILVIO DE BARROS

Department of Mechanical Engineering, CEFET/RJ – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, Brazil

Shape memory alloys (SMAs) present the capability to develop large forces and displacements with low power consumption. Due their special characteristics, SMAs have been used in many different applications. Pseudoelastic hysteresis loop observed in austenitic SMAs is associated with energy dissipation. Therefore, pseudoelastic SMA elements can be used as vibration attenuators. Joining methods present some technological challenges for the use of these elements. Welding can strongly affect the properties of the alloy. Mechanical joints using rivets and screws are commonly used but promote stress concentration effects. The use of adhesives offers some benefits, being an alternative to be investigated. This work presents a numerical model based on the finite-element method and experimental procedures to study the behaviour of bonded vibration attenuators with SMA elements. The proposed model considers the pseudoelastic behaviour of SMA elements, and a cohesive zone model was used to study the union between absorber and an aluminium plate. Finally, several loading conditions were analysed with the proposed models to assess the capability of bonded pseudoelastic SMA elements to dissipate energy. The proposed geometry allows the elements to actuate as an efficient vibration attenuator, in particular when submitted to axial loading.

Received 25 September 2014; in final form 23 December 2014.

Address correspondence to Pedro M. C. L. Pacheco, Department of Mechanical Engineering, CEFET/RJ – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, RJ, 20271-110, Brazil. E-mail: calas@cefet-rj.br

Color versions of one or more of the figures in the article can be found online at www.tandfonline.com/gadh.

KEYWORDS Cyanoacrylate; Damage mechanics; Finite-element analysis; Modelling; Pseudoelasticity; Shape memory alloys

1. INTRODUCTION

Shape memory alloys (SMAs) present complex thermomechanical behaviours related to different physical processes. The most common phenomena presented by this class of material are the pseudoelasticity, the shape memory effect, which may be one way (SME) or two way (TWSME), and the phase transformation due to temperature variation. Besides these phenomena, there are more complicated effects that have significant influence over its overall thermomechanical behaviour—for instance, plastic behaviour, tension–compression asymmetry, plastic-phase transformation coupling, transformation-induced plasticity, and thermomechanical coupling, among others [1–4]. The remarkable properties of SMAs are attracting much technological interest, motivating different applications in several fields of sciences and engineering. Aerospace, biomedical, and robotics are some areas where SMAs have been applied [5–13].

SMAs have the capability to generate large strains associated to phase transformation induced by stress and/or temperature variations [14,15]. During the phase transformation process of an SMA component, large loads and/or displacements can be generated in a relatively short period of time, making this component an interesting mechanical actuator. Two phases are present: martensite and austenite [16]. For lower temperatures, below a critical temperature (M_F), twined martensite phase is the only stable phase in a stress-free state, whereas detwined martensite is associated to the presence of a stress field above a critical stress. Several alloys can develop strains associated to phase transformation, but only those that can develop large strains are of commercial interest, as nickel-titanium (NiTi) and copper base alloys (CuZnAl and CuAlNi).

The pseudoelastic effect occurs at higher temperatures, above a critical temperature (A_F) where the austenite phase is the only stable phase in a stress-free state. Figure 1(a) presents a stress–strain curve (σ versus ε) for the pseudoelastic effect at a constant temperature. In the loading process, a linear behaviour (OA) is first observed followed by a non-linear behaviour (AB) associated to phase transformation (austenite → martensite). After point B, the presence of 100% of martensitic phase reveals a linear behaviour. In the unloading process, a linear behaviour is observed until point C is reached. After that, a non-linear behaviour (CD) associated to phase transformation (martensite → austenite) is observed followed by a linear behaviour associated to the presence of 100% of austenite. Figure 1(b) presents a diagram that illustrates the pseudoelastic behaviour. A_S and A_F are the temperatures at which the formation of austenite starts and ends,

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

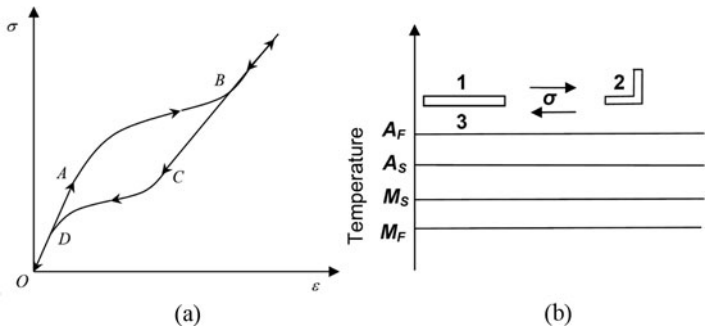


FIGURE 1 Pseudoelastic effect. Stress–strain curve (a) and a diagram to illustrate the pseudoelastic effect (b).

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

respectively. M_S and M_F are the temperatures at which the formation of martensite starts and ends, respectively.

The pseudoelastic effect observed in SMAs can be used to dissipate energy, making this material appropriate to be used in vibration attenuation applications [17–35]. This effect is associated to hysteretic behaviour that promotes mechanical energy dissipation during each cycle. Moreover, as austenite and martensite have different Young's modulus values, during phase transformation the stiffness of an SMA element varies affecting the system dynamical behaviour. Another remarkable feature of SMAs is their ability to change their centre point (recentering) through phase transformation induced by temperature or by a preloading [36]. Due this combined effects, SMA pseudoelastic elements are efficient vibration attenuation mechanical elements. Figure 2(a) shows a load–displacement curve for an SMA element

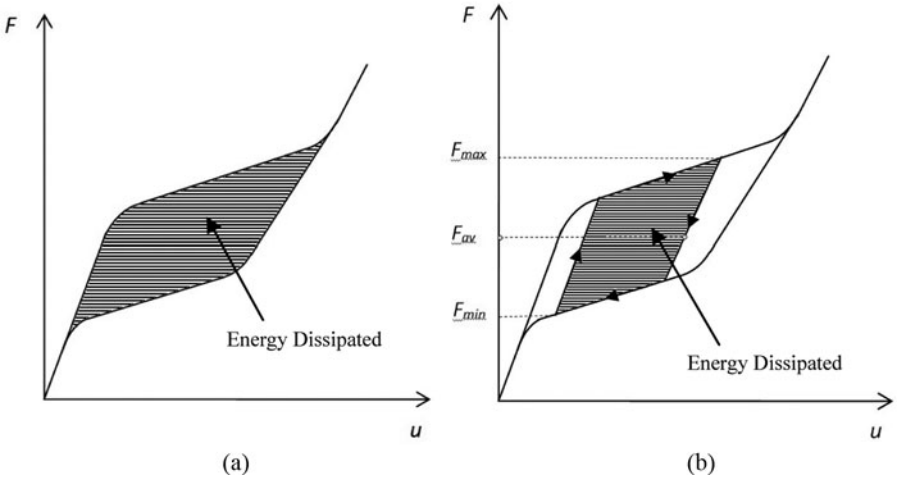


FIGURE 2 Energy dissipation on pseudoelastic elements (a). Dissipated energy for a vibration situation (b).

subjected to an axial loading where the area inside the hysteresis loop represents the maximum energy dissipated during a loading–unloading cycle. Figure 2(b) shows a cyclic loading where oscillations occur between maximum and minimum load values (F_{max} and F_{min}). The energy dissipated in each cycle is associated to the highlighted area.

The availability of existing numerical tools coupled with advanced constitutive models has permitted advances in the modelling of the complex behaviour of SMA pseudoelastic vibration attenuation mechanical elements. Joining methods for coupling these elements to a structure or equipment present some technological challenges. Usual joining methods as welding must be avoided with SMA parts as the temperature variation induced during the process can strongly affect the material capability to develop shape memory and pseudoelastic effects. The use of adhesive offers some benefits, affording a choice to join components that cannot be exposed to large thermal variation as SMA materials [37]. Mechanical joints using rivets and screws are commonly used; nevertheless, they promote stress concentration effects. Bonded joints present better stress distribution, being an alternative to be investigated for this type of element [38]. Indeed, several authors have studied the use of SMA bonded actuators [39–41]. This work presents a numerical model based on the finite-element method and experimental procedures to study the behaviour of bonded vibration attenuators with SMA elements. The proposed model considers the pseudoelastic behaviour of SMA elements, and a cohesive zone model was used to study the union between absorber and an aluminium plate.

2. EXPERIMENTAL ANALYSIS

Crack propagation tests were developed with austenitic NiTi SMA plates bonded to aluminium plates to identify the interface parameters and calibrate the proposed numerical model. These tests are normally used to identify the interface parameters of bonded joints [42,43]. Figure 3 presents the two classic flexure tests used in this work to assess the propagation modes observed in fracture mechanics. The end notched flexure (ENF) test is a pure mode II test and the mixed mode flexure (MMF) test combines pure modes I and II [44].

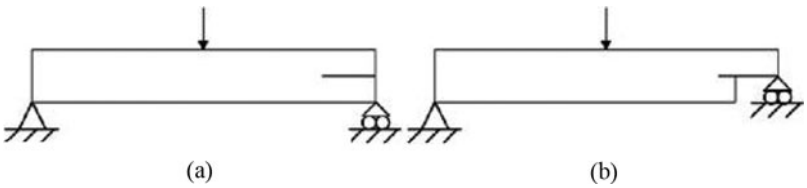


FIGURE 3 Flexure tests: end notched flexure (ENF) (a) and mixed mode flexure (MMF) (b) tests.

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

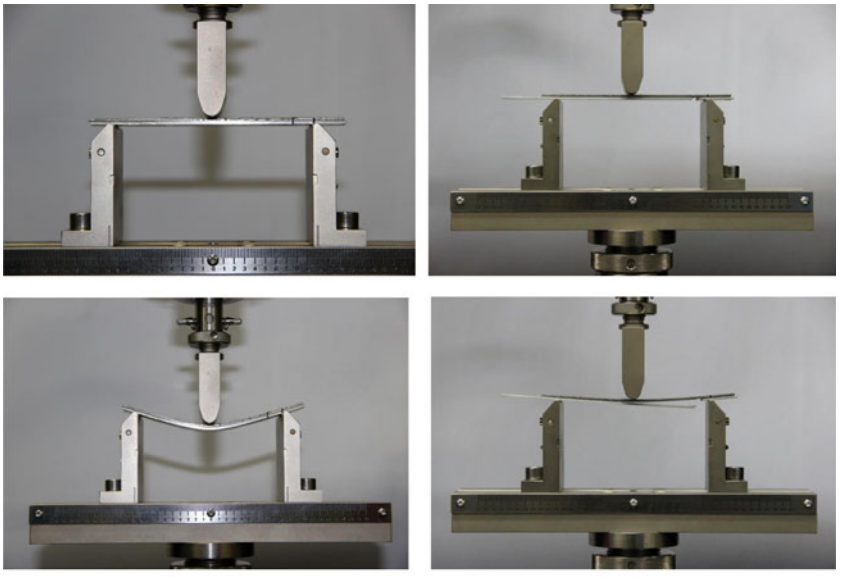


FIGURE 4 Initial and final configuration for ENF (a) and MMF (b) experimental tests.

Both SMA and aluminium plates used in the assemblage of the bonded specimens have the following dimensions: 126 mm × 20 mm × 1.5 mm. SMA plates were obtained from NiTi SE508 austenitic alloy plate with a length of 305 mm, a width of 126 mm, and a thickness of 1.5 mm, manufactured by NDC—Nitinol Devices & Components (Fremont, CA, USA). The adhesive used in this work was a fast-setting cyanoacrylate adhesive (Loctite® 430™ Super Bonder®, Henkel Loctite Ltd., São Paulo, Brazil). This general purpose adhesive is particularly suited to bonding of metal substrates.

The support span was fixed at 100 mm for both ENF and MMF tests. A 10-mm length region without adhesive is present at the right end representing the initial crack length. The SMA plate occupies the upper position. Tests were developed using a testing system Instron 5966 (Norwood, USA) equipped with a 10 kN load cell. A prescribed displacement loading was applied with a loading rate of 5 mm/min. Figure 4 shows the initial and final configuration for the ENF and MMF experimental tests.

3. FINITE-ELEMENT MODELS

Three-dimensional finite-element models were used to study the pseudoelastic behaviour of SMA plates bonded to aluminium plates. Large displacement hypothesis was considered in the analysis. Therefore, the problem involved the presence of two non-linearity effects: geometric (large displacements)

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

and constitutive (SMA pseudoelastic behaviour). Numerical simulations were performed with commercial finite-element code ANSYS [45], employing coupled thermal and mechanical field element SOLID186 for spatial discretization. This element is a three-dimensional element with 20 nodes and the capability to describe pseudoelastic behaviour through the incorporation of the Auricchio et al. [46] constitutive model. This three-dimensional model is capable of describing the pseudoelastic behaviour and considers the presence of two phases: austenite (*A*) and martensite (*M*). The internal variables ξ_A and ξ_M were introduced to represent, respectively, austenitic and martensitic volume fractions that satisfy the following relation: $\xi_A + \xi_M = 1$. The SMA plate was considered an isotropic material, and the phase transformation obeys a Drucker–Prager loading function. Elastic behaviour for austenite and martensite is related to the Young's modulus (E) and Poisson's ratio (ν). The process of phase transformation was controlled by four critical stresses σ_s^{AM}, σ_f^{AM}, σ_s^{MA}, σ_f^{MA}, where subscripts "*s*" and "*f*" denote "start" and "finish" and "AM" represents austenite to martensite transformation whereas "MA" represents martensite to austenite transformation. ε_L represents a parameter associate to recoverable strain resultant from martensitic phase transformation. Figure 5 presents an idealized one-dimensional stress–strain curve for the pseudoelastic behaviour for the model used.

The bonding behaviour was modelled with contact ANSYS elements, TARGE170 and CONTA174, positioned in the interface region between aluminium and SMA plates. To model interface debonding, the contact elements support the cohesive zone material model with bilinear behaviour proposed by Alfano and Crisfield [47]. This model considers four parameters: maximum normal contact stress (σ_{max}), tangential contact stress (τ_t), contact gap at

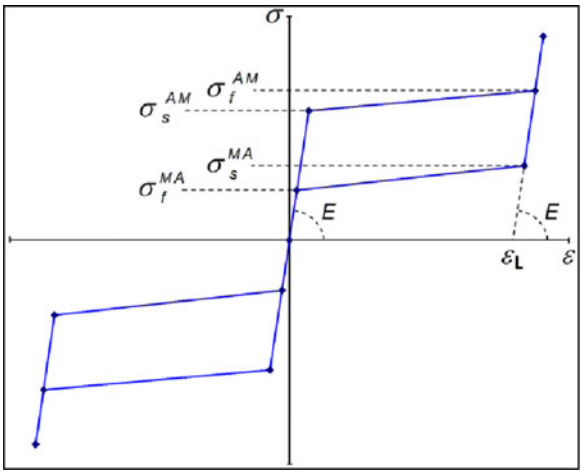


FIGURE 5 Idealized one-dimensional stress–strain curve for pseudoelastic behaviour. Auricchio model [46].

debonding (δ_n), and tangential slip at debonding (δ_t). Furthermore, tangential slip under compressive normal contact stress was considered in the analysis [42].

3.1. Parameter Calibration

First, numerical simulations of the two experimental tests described in Section 2 were developed to permit the determination of the interface parameters and the calibration of the model. Figures 6 and 7 present, respectively, the geometry with the prescribed boundary conditions and the mesh obtained after a convergence analysis for the ENF and MMF specimens. To simulate the support conditions observed in the experimental analysis, the two lower roller support regions were fixed, prescribing null vertical displacements at the corresponding nodes across the width (indicated in the figures by the blue triangles). The loading conditions promoted by the upper roller were modelled by prescribing downward vertical displacements at the beam middle span nodes across the width (indicated in the figures by the green triangles). The loading process was applied considering 30 equally spaced time subdivisions.

The presented numerical simulations consider SMA mechanical components with the material parameters represented in Table 1. The SMA parameters were determined from previous works. The following parameters were used for aluminium plate: $E = 64\,\text{GPa}$ and $v = 0.32$. The interface parameters were adjusted using the experimental data described in the prior section.

3.2. SMA Vibration Attenuator Element

The modelling of an SMA vibration attenuator element is now of concern. SMA elements can be used to attenuate vibration of structures or mechanical devices by energy dissipation associated with the hysteresis loop present in the SMA element. Bonding fixation methods of SMA elements to a structure offers several advantages. Usual joining methods as welding must be avoided with SMA parts as the temperature variation induced during the process can affect strongly the material capability to develop shape memory and pseudoelastic effects.

Table 1 shows that large values of phase transformation critical stresses are present, indicating that the SMA element must be subjected to large stress values in order to develop phase transformation and experiment hysteretic behaviour. As the joint can be subjected to large load values, its structural integrity is a critical point that must be considered. The proposed model deals with the two aspects: the phase transformation behaviour of the SMA element and the adhesive join integrity.

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

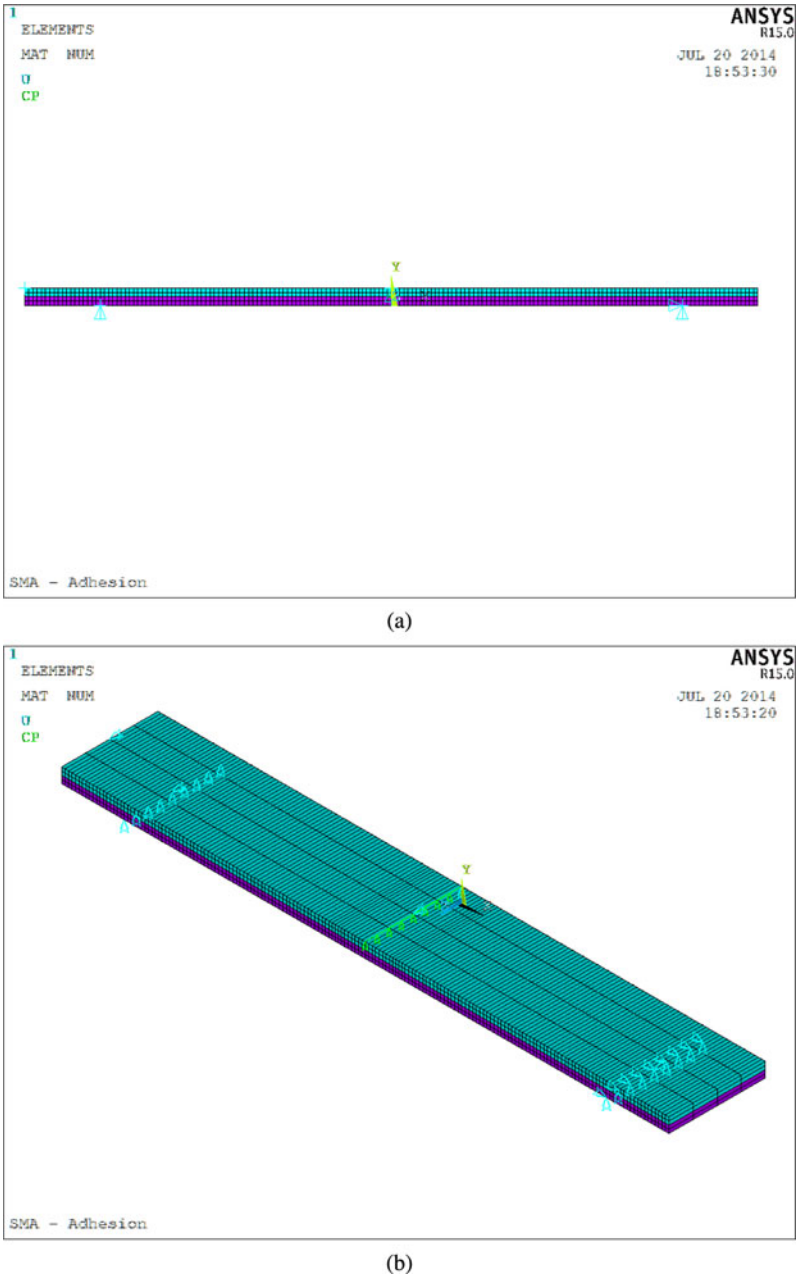
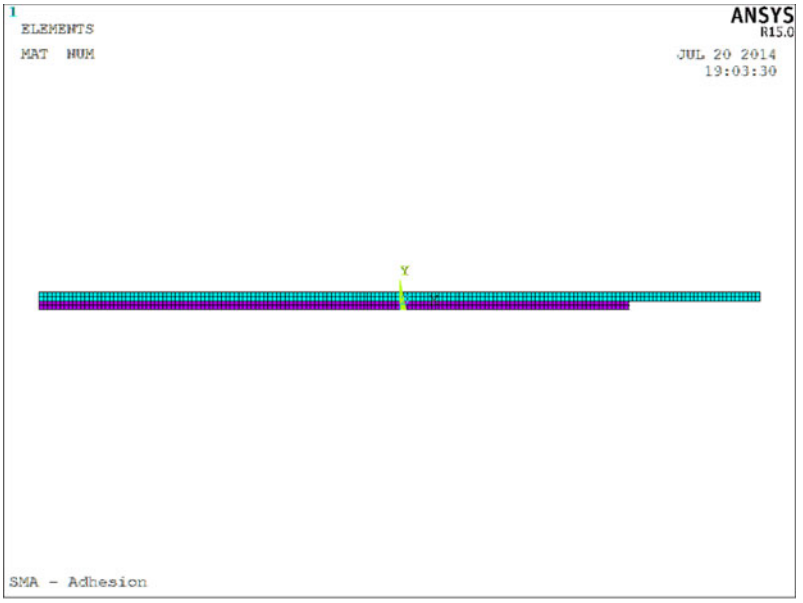


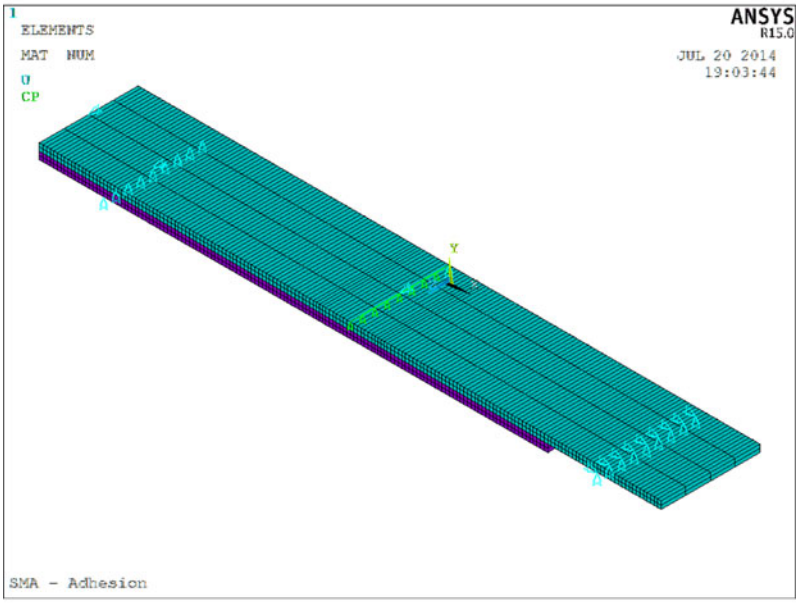
FIGURE 6 Adhesive parameter calibration: ENF model geometry with prescribed boundary conditions (a) and mesh (b).

The behaviour of a proposed SMA vibration attenuator with a simple geometry is analysed using a finite-element model through the application of a load–unload cycle. The amount of energy dissipation capability can

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015



(a)



(b)

FIGURE 7 Adhesive parameter calibration: MMF model geometry with prescribed boundary conditions (a) and mesh (b).

be estimated from the load–displacement hysteresis loop, as shown in Fig. 2. Figure 8 shows the geometry of the SMA vibration attenuator. Figure 9 shows the finite-element mesh with the boundary conditions and loading for the

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

TABLE 1 SMA Model Parameters

Parameter	Value
E (GPa)	53
ν	0.30
σ_s^{AM} (MPa)	297
σ_f^{AM} (MPa)	772
σ_s^{MA} (MPa)	306
σ_f^{MA} (MPa)	78
ε_L	0.07

assembled system composed of an SMA attenuator (blue/light element) joined to two aluminium plates (purple/dark elements) through an adhesive at the contact regions. The two aluminium plates represent the connection region with some structure or equipment subjected to vibrations. Several SMA elements can be positioned at different connection points with the structure or equipment to amplify the attenuation effects. The mesh was obtained after a convergence analysis. Blue and orange triangles at the left end side of the SMA element represent prescribed null displacements and rotations, indicating a region of rigid fixation. Green triangles at the right end side of the aluminium plates represent the load applied by non-null prescribed displacements. SMA element geometry was designed to have a large contact area with the aluminium plates, to guarantee a good adhesion, and a small cross section outside this region, to guarantee the presence of large stresses capable to promote phase transformation and the associated hysteretic behaviour. Two loading conditions were analysed: axial loading (prescribed displacement in the direction x) and in-plane loading (prescribed displacement in the direction z).

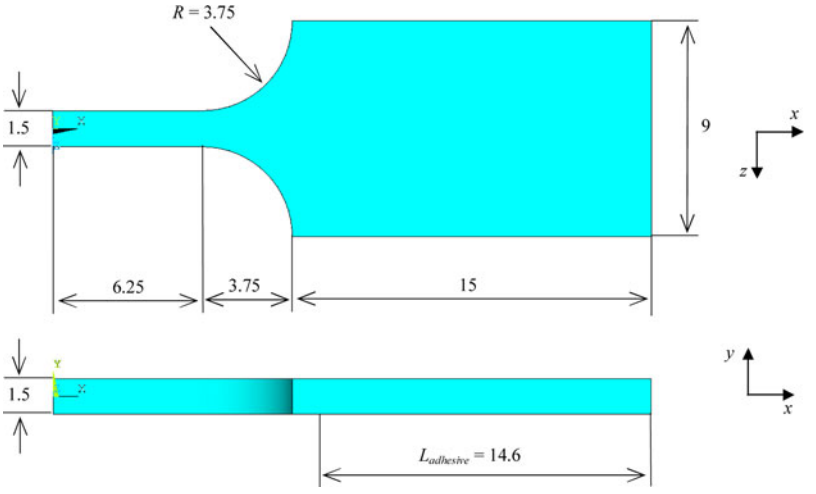


FIGURE 8 SMA vibration attenuator element geometry (dimensions in mm).

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

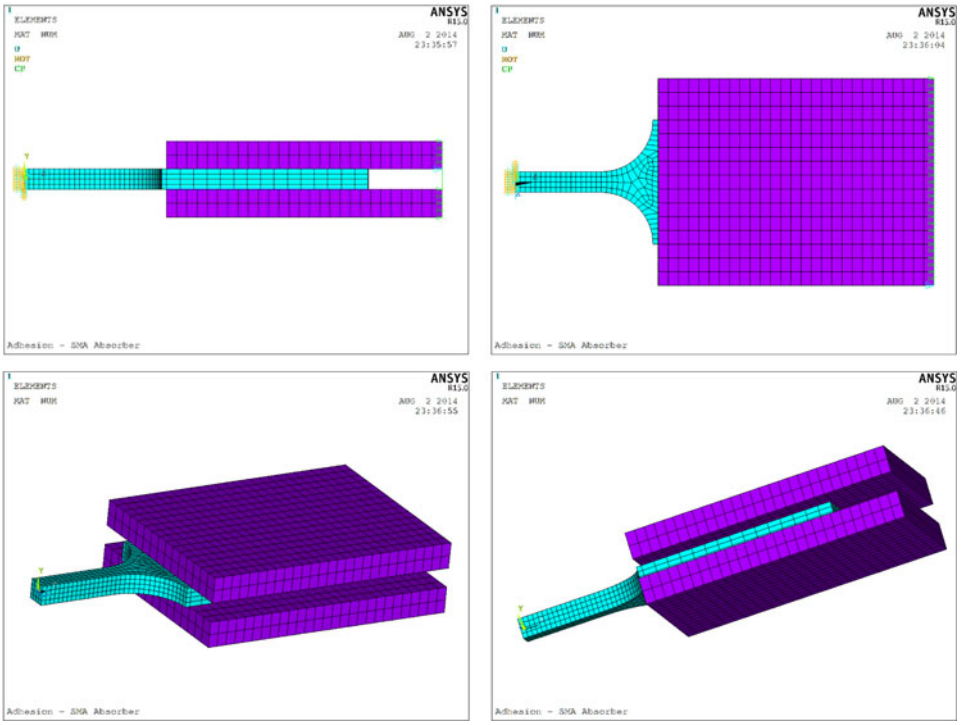


FIGURE 9 Assembled system finite-element mesh, boundary conditions, and loading. SMA vibration attenuator element (blue/light element) bonded between two aluminium plates (purple/dark elements).

4. NUMERICAL RESULTS

This section presents numerical results obtained with the finite-element models described in the previous section. Initially, numerical simulation results associated with the two ENF and MMF specimens are presented. These results are used to determine the interface parameters and to calibrate the proposed model.

4.1. ENF and MMF Specimens

Numerical simulations were developed with the finite-element models described for ENF and MMF test specimens in Section 3.1. A prescribed vertical displacement was applied in 30 steps to simulate the two experimental tests. A maximum value of 4.5 mm was used for ENF and 2.7 mm for MMF. Figure 10 shows, respectively, the axial stress and von Mises equivalent stress distribution present at the maximum applied load for ENF specimen. It can be observed that at this instant the two plates present similar

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

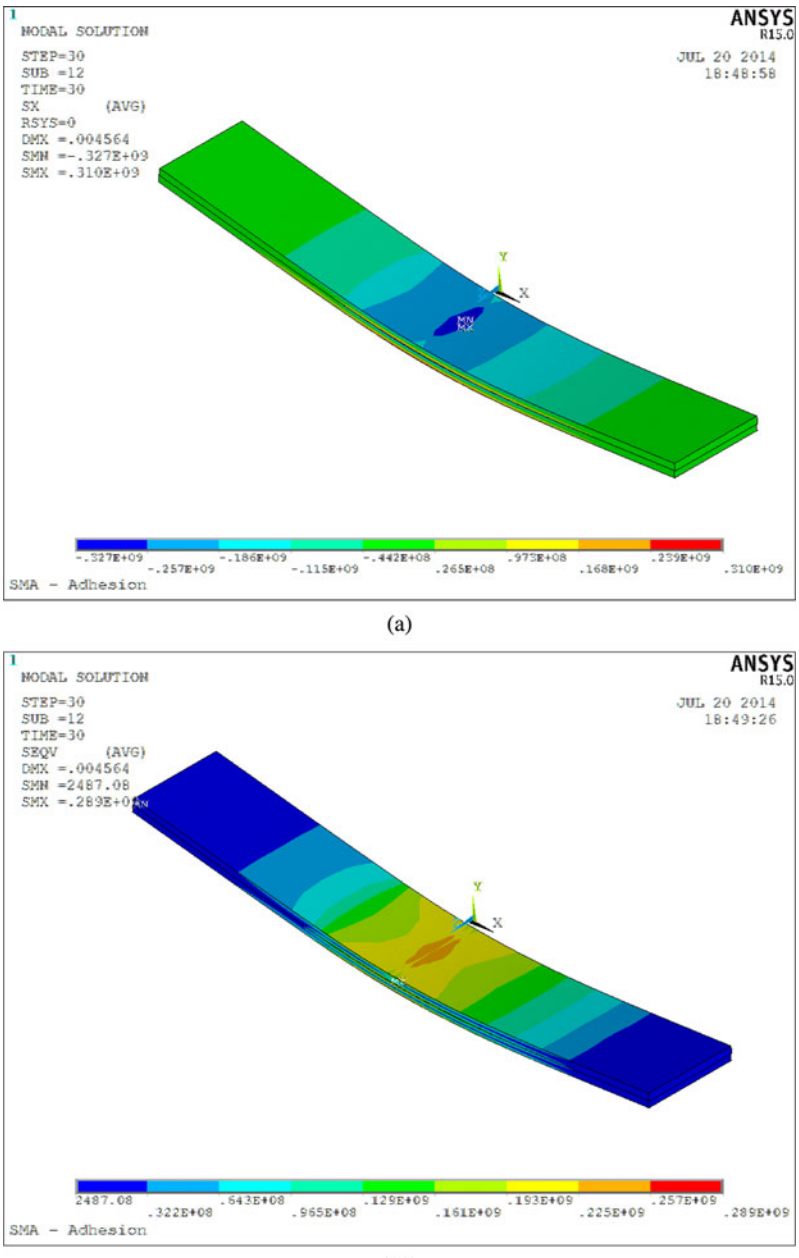


FIGURE 10 Axial stress (a) and von Mises equivalent stress distribution (b) present at the maximum applied load for ENF specimen.

behaviour of two separate beams in bending, indicating that the initial crack propagated and both plates are separated at the region at the centre. Figure 11 shows the same variable distribution for MMF specimen at the

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

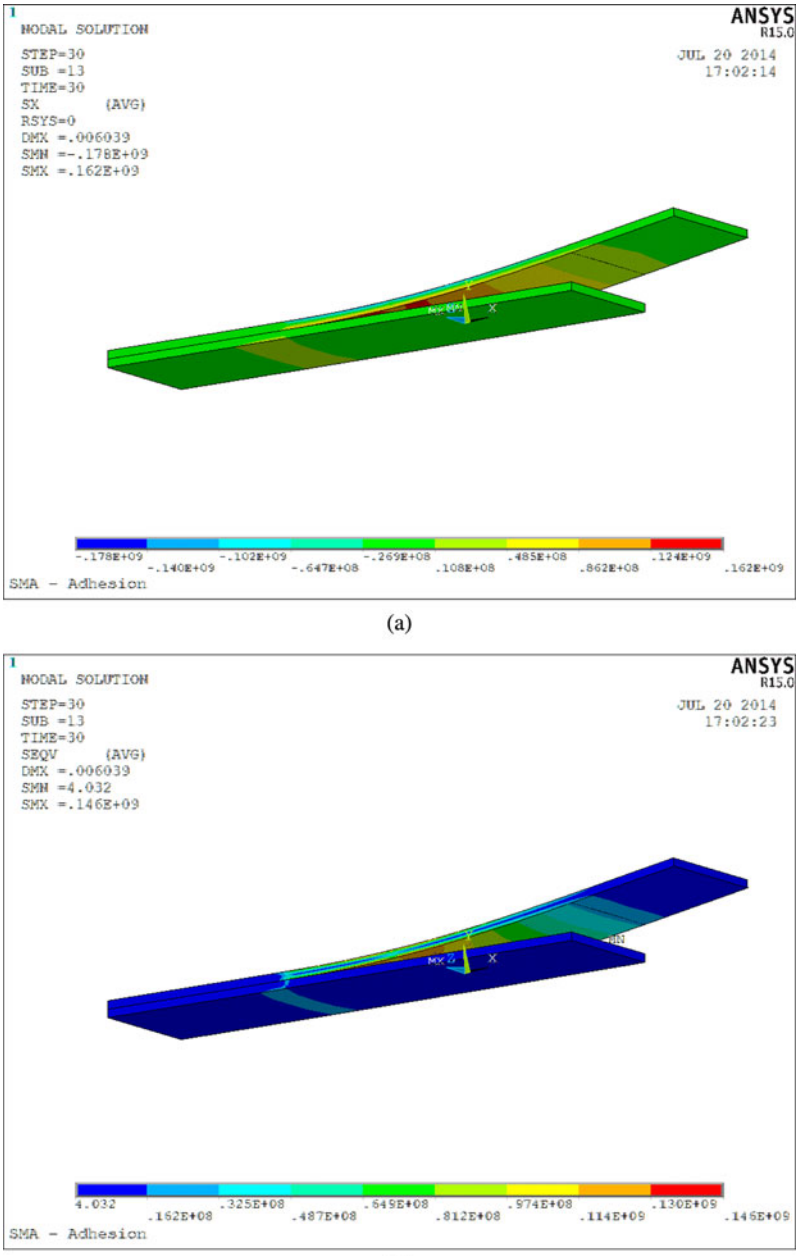
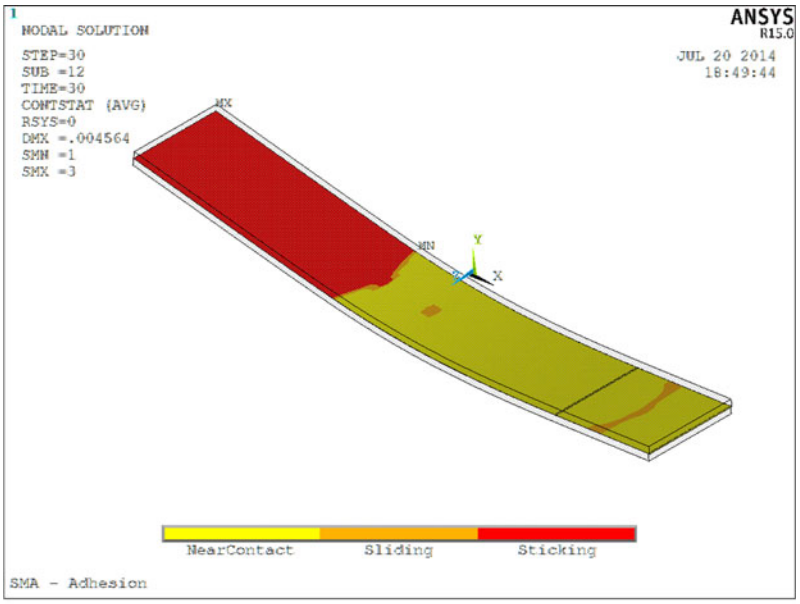


FIGURE 11 Axial stress (a) and von Mises equivalent stress distribution (b) present at the maximum applied load for MMF specimen.

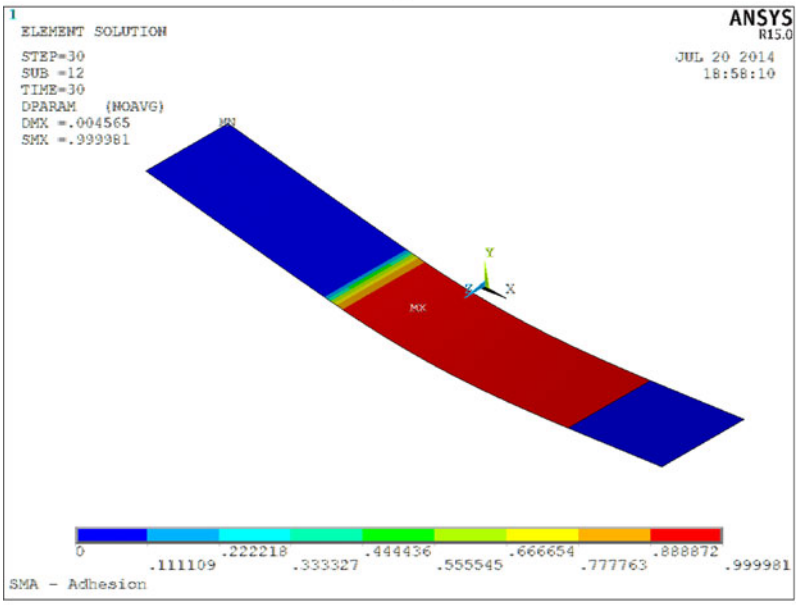
maximum applied load. This configuration has different support conditions, and only the upper plate remains subjected to the bending loading after debonding.

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

Figures 12 and 13 show, respectivelly, the behaviour of the joint for the ENF and MMF specimens. Figures 12(a) and 13(a) show the contact status of the joint, whereas Figs. 12(b) and 13(b) show the joint damage variable



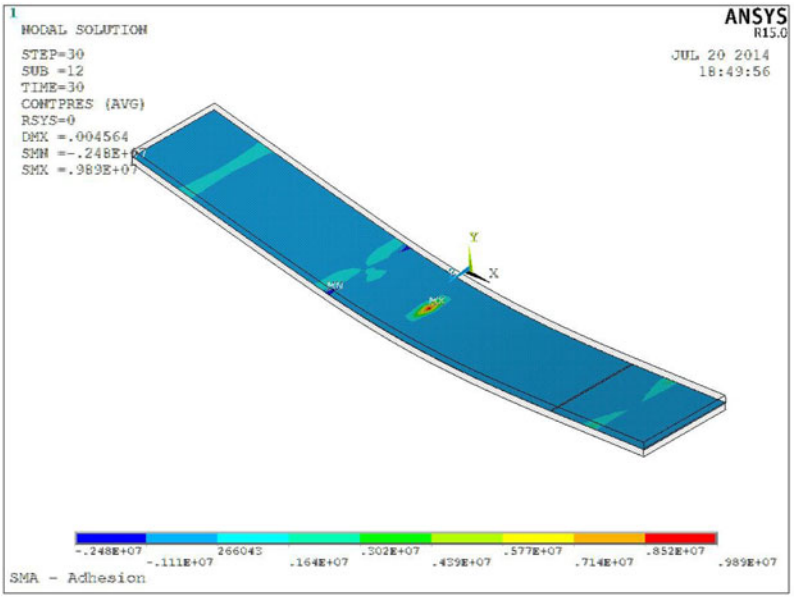
(a)



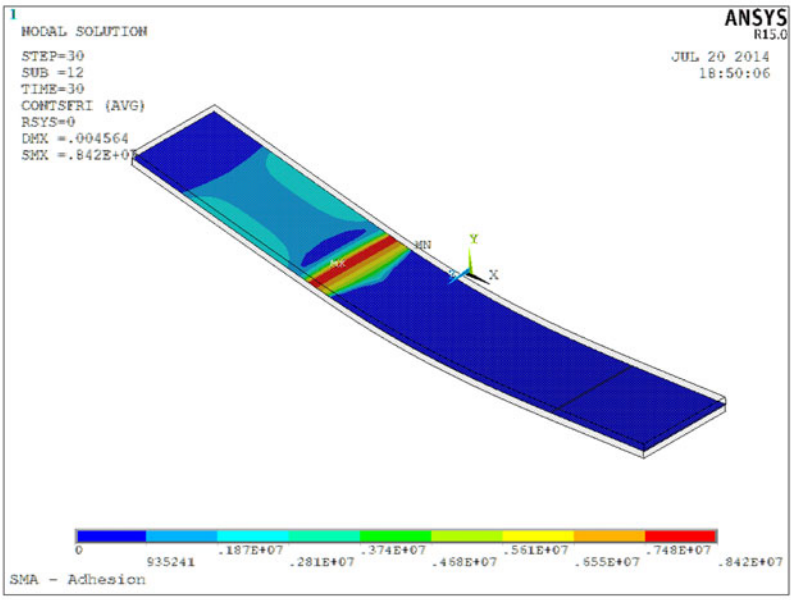
(b)

FIGURE 12 Behaviour of the bonded joint of the ENF specimen: contact status (a), damage (b), normal contact stress—σ_{max} (c) and tangential contact stress—τ_t (d).

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015



(c)



(d)

FIGURE 12 Continued

(DPARAM) distribution. This variable represents the joint damage: 0 represents a virgin state without any damage and 1 represents a total damage state. The red region in Figs. 13(b) and 14(b) is associated with the crack

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

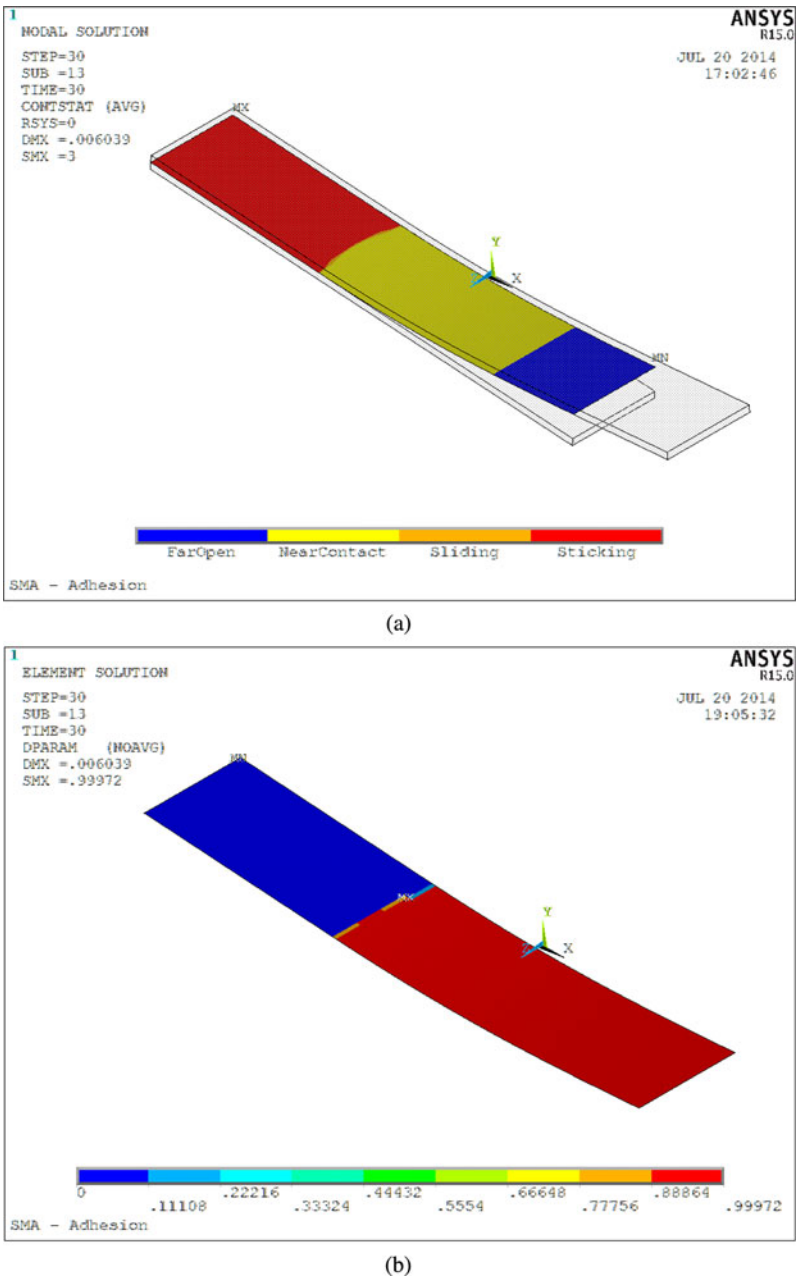
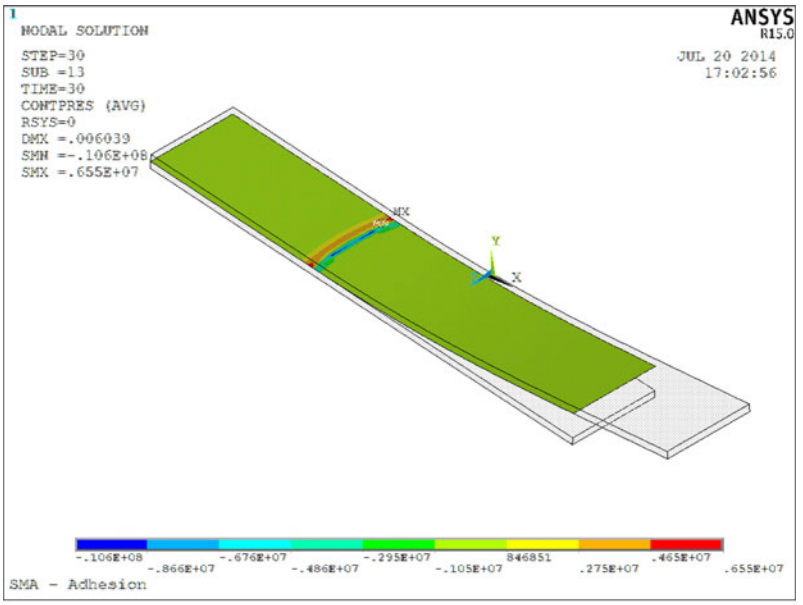


FIGURE 13 Behaviour of the bonded joint of the MMF specimen: contact status (a), damage (b), normal contact stress—σ_{max} (c) and tangential contact stress—τ_t (d).

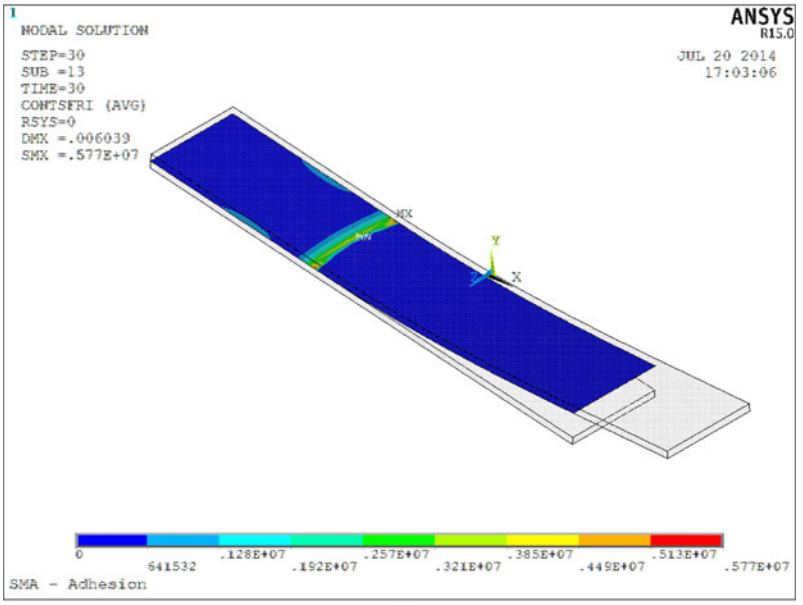
propagation during the loading. Figures 12(c) and 13(c) show the normal contact stress (σ_{max}) distribution, whereas Figs. 12(d) and 13(d) show the tangential contact stress (τ_t) distribution in the adhesive.

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015



(c)



(d)

FIGURE 13 Continued

Figure 14 shows a comparison between experimental and numerical load–displacement curves for ENF and MMF tests using the interface parameters of Table 2, obtained after a calibration process using the

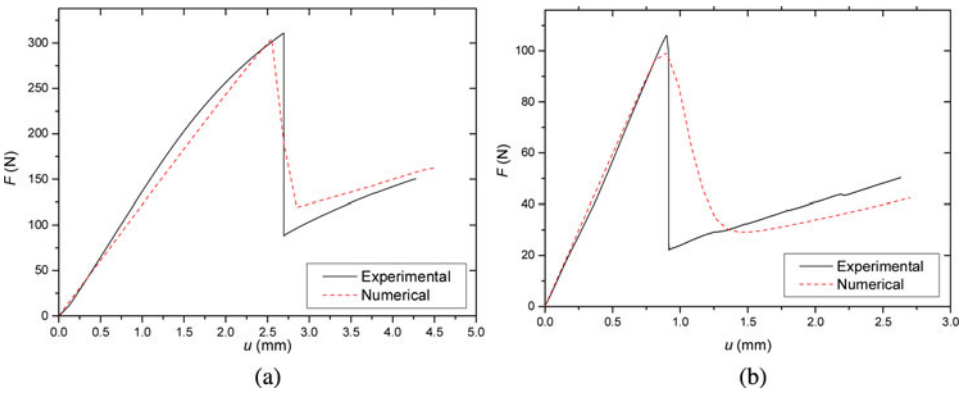


FIGURE 14 Load–displacement experimental and numerical results: ENF (a) and MMF (b) tests.

finite-element model proposed. A good agreement is observed between numerical and experimental results, indicating that the proposed model can be used to study the behaviour of SMA-aluminium bonded pieces.

4.2. SMA Vibration Attenuator Element

The proposed model based on the finite-element method described in Section 3.2 was applied to study the behaviour of an SMA vibration attenuator element bonded to a structure. As pointed previously, the model considers simultaneously two main critical aspects of the system: the hysteretic behaviour of the SMA element and the adhesive joint integrity. Two loading conditions were analysed: axial loading, involving a prescribed displacement of 0.4 mm in the direction x, and in-plane loading, involving a prescribed displacement of 0.8 mm in the direction z. Both loadings involve a load–unload cycle applied in 40 steps.

Figures 15(a) and 15(b) show, respectively, the von Mises equivalent stress and martensitic volumetric phase distribution present at the maximum applied load for the axial loading condition. The amount of martensitic volumetric phase is represented trough the variable NLEPEQ: 0 represents 100% of austenite and 1 represents 100% of martensite. Figures 15(a) and 15(b) show that the region with the small cross section of the SMA element is

TABLE 2 CZM Model Parameters

Parameter	Value
σ_{max} (MPa)	13
τ_t (MPa)	8.5
δ_n (μm)	2
δ_t (μm)	50

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

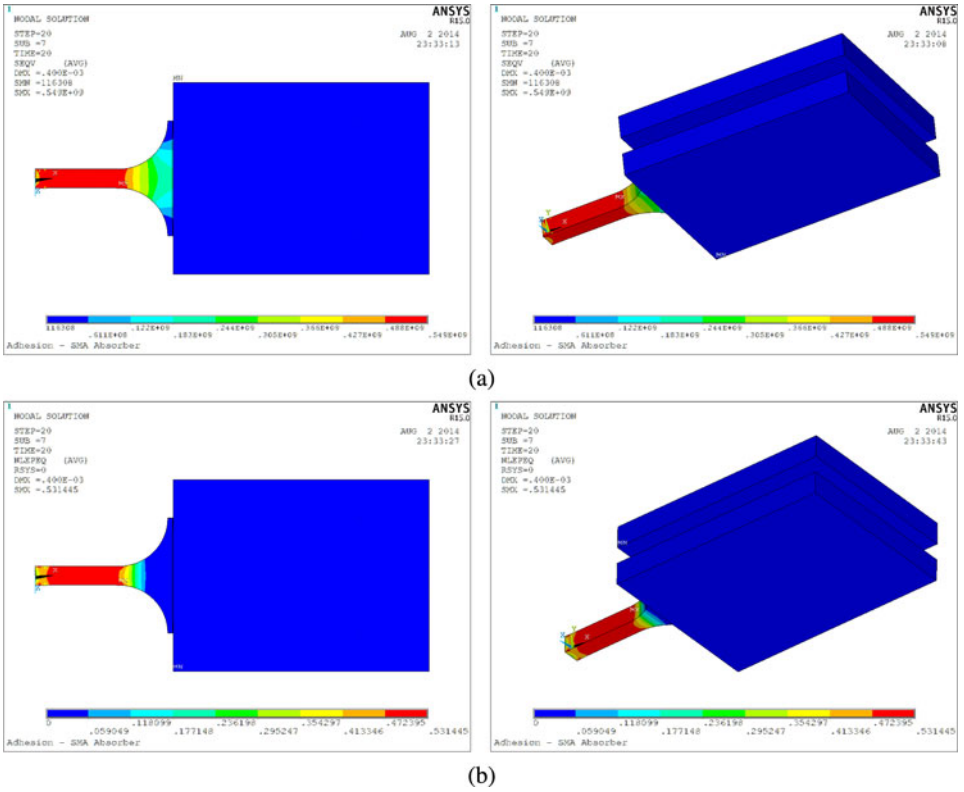


FIGURE 15 von Mises equivalent stress distribution (a) and volumetric phase transformation (b) present at the maximum applied load for axial loading.

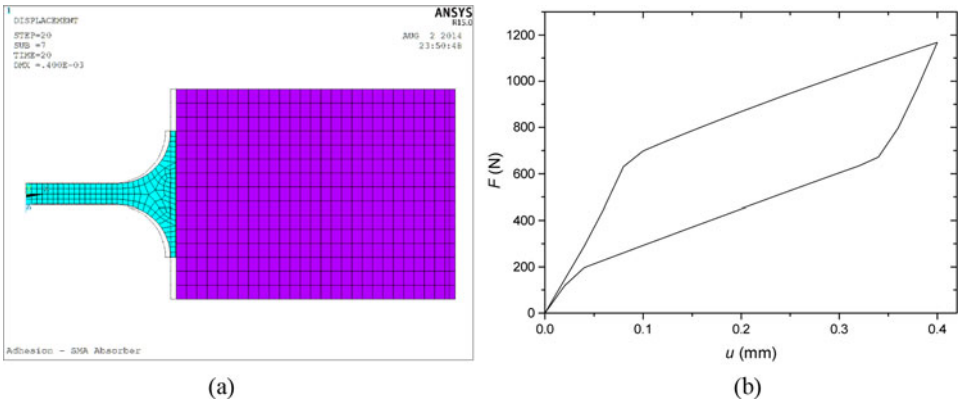
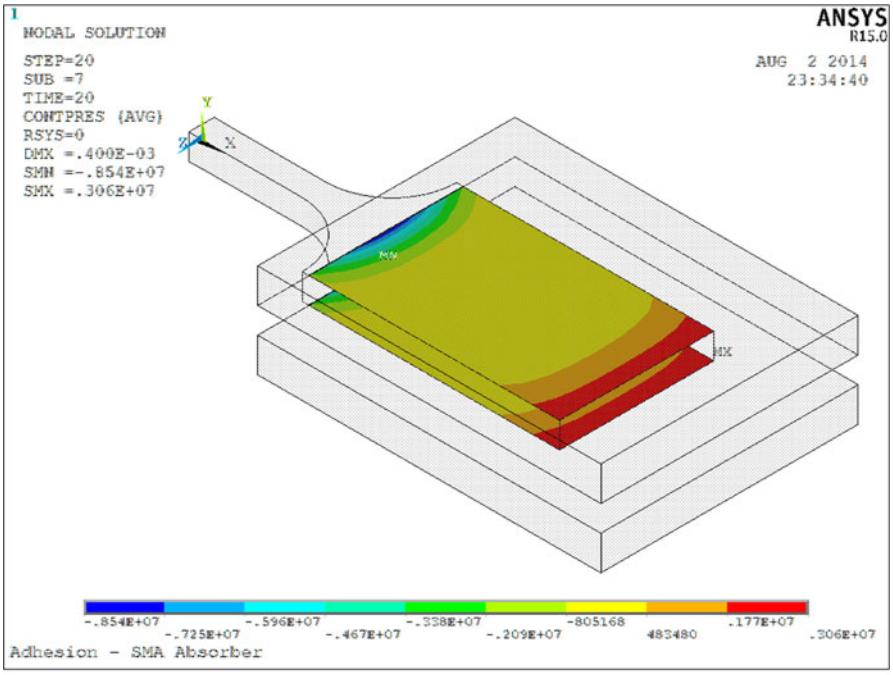
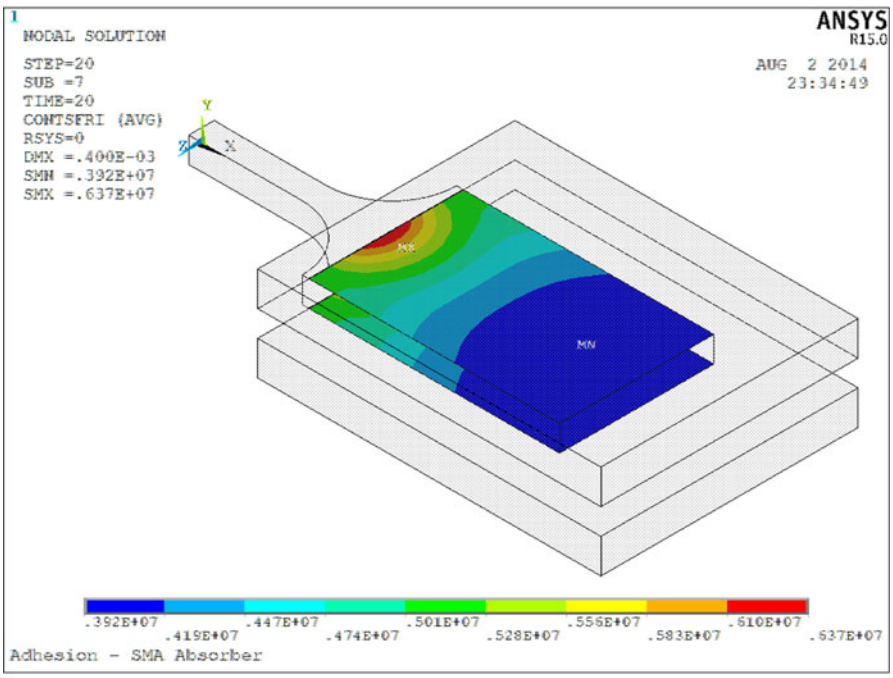


FIGURE 16 Deformed configuration (a) and hysteretic load–displacement curve (b) for axial loading.

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015



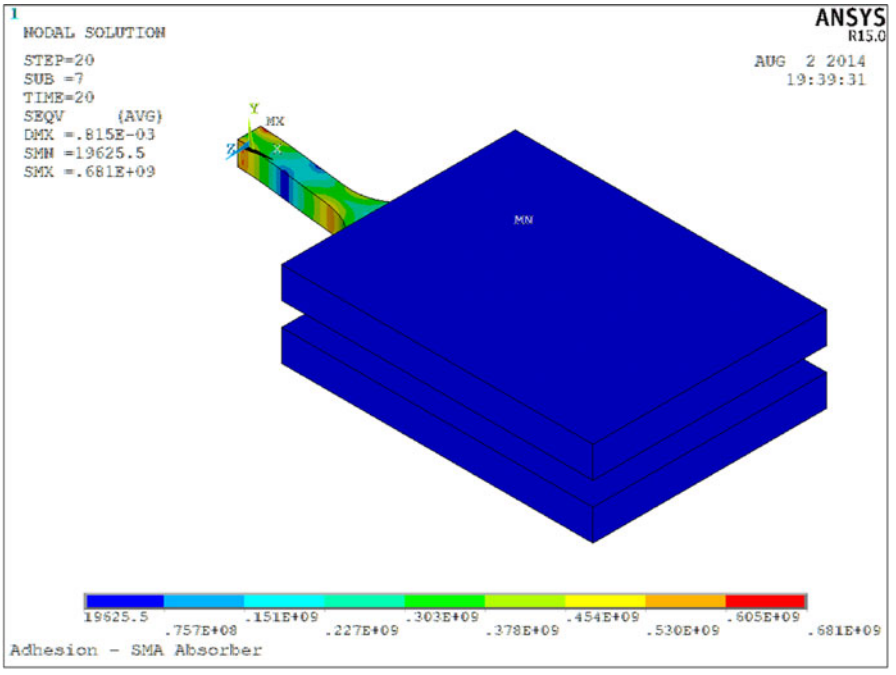
(a)



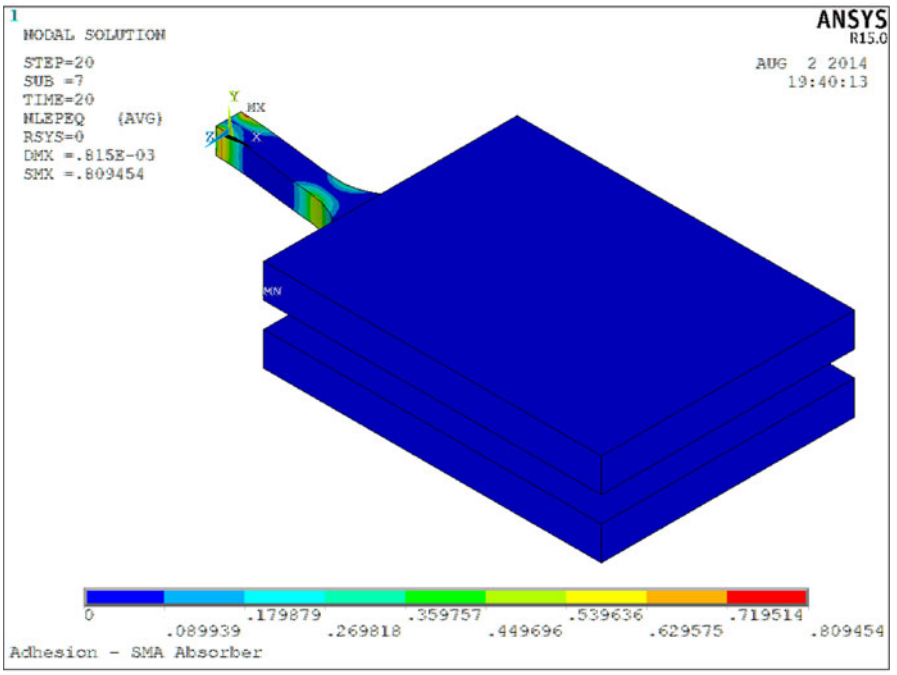
(b)

FIGURE 17 Behaviour of the bonded joint: normal contact stress—σ_{max} (a) and tangential contact stress—τ_t (b). Axial loading.

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015



(a)



(b)

FIGURE 18 von Mises equivalent stress distribution (a) and volumetric phase transformation (b) present at the maximum applied load for in-plane loading.

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

subjected to large stress values of approximately 550 MPa. Also that region experiments a near 100% phase transformation, indicating an efficient geometry in terms of energy dissipation as all the volume contributes to the hysteretic pseudoelastic behaviour.

Figure 16(a) shows the deformed configuration of the system, where the dot line represents the initial undeformed configuration. Figure 16(b) shows the hysteretic load–displacement curve. The load–displacement curve furnishes a hysteresis area of 1.168 J that is associated with the dissipation energy present in one load–unloading cycle. Considering the whole SMA element volume, an energy dissipation density of 5 MJ/m^3 per cycle is observed.

The integrity of the bonded joint for axial loading is now analysed. Figure 17(a) shows the normal contact stress (σ_{max}) distribution, whereas Fig. 17(b) shows the tangential contact stress (τ_t) distribution in the adhesive. Results show that the maximum values are inferior to the interface parameters of Table 2, indicating that the bonded joint will not fail.

Figures 18(a) and 18(b) show, respectively, the von Mises equivalent stress and martensitic volumetric phase distribution present at the maximum applied load for the in-plane loading condition. The figures show that the region with the small cross section of the SMA element is subjected to large stress values of approximately 680 MPa. Different from the axial loading condition, in this case only a small part of the region experiments phase transformation, and therefore the element is less efficient in terms of energy dissipation for this load condition.

Figure 19(a) shows the deformed configuration of the system, where the dot line represents the initial undeformed configuration. Figure 19(b) shows the hysteretic load–displacement curve. From the curve, it is possible to calculate a hysteresis area of 0.132 J associated with the dissipation energy present in one load–unloading cycle. For this loading condition, an energy dissipation density of 0.6 MJ/m^3 per cycle is observed.

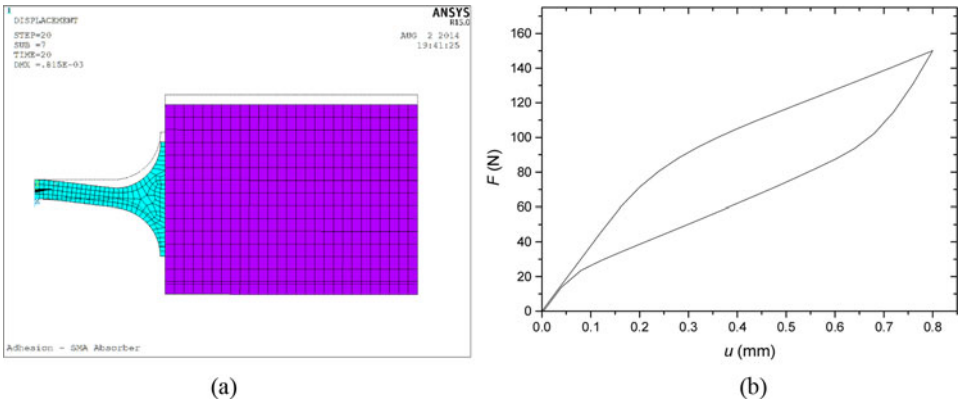
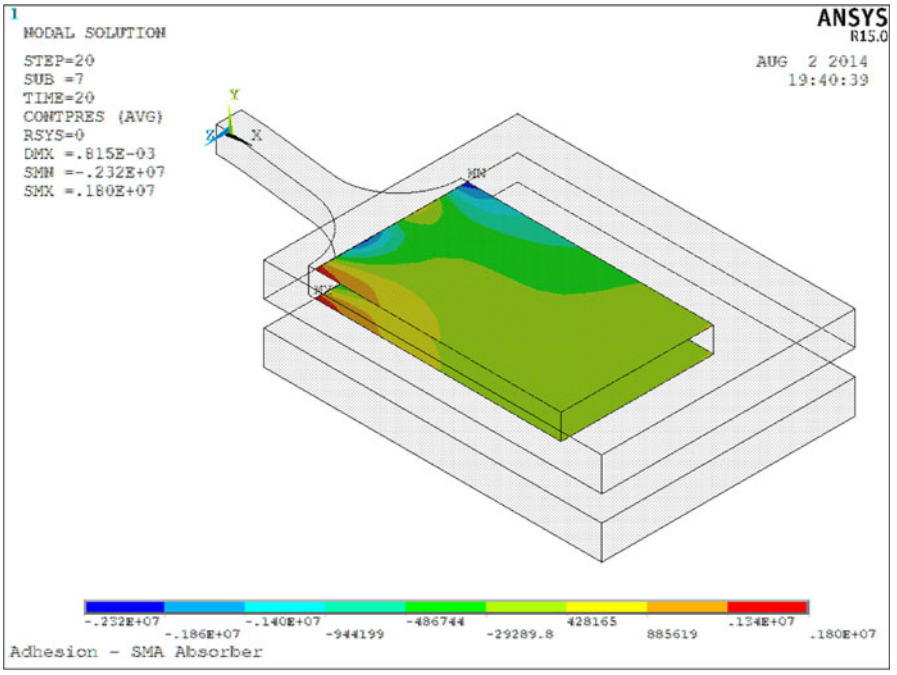
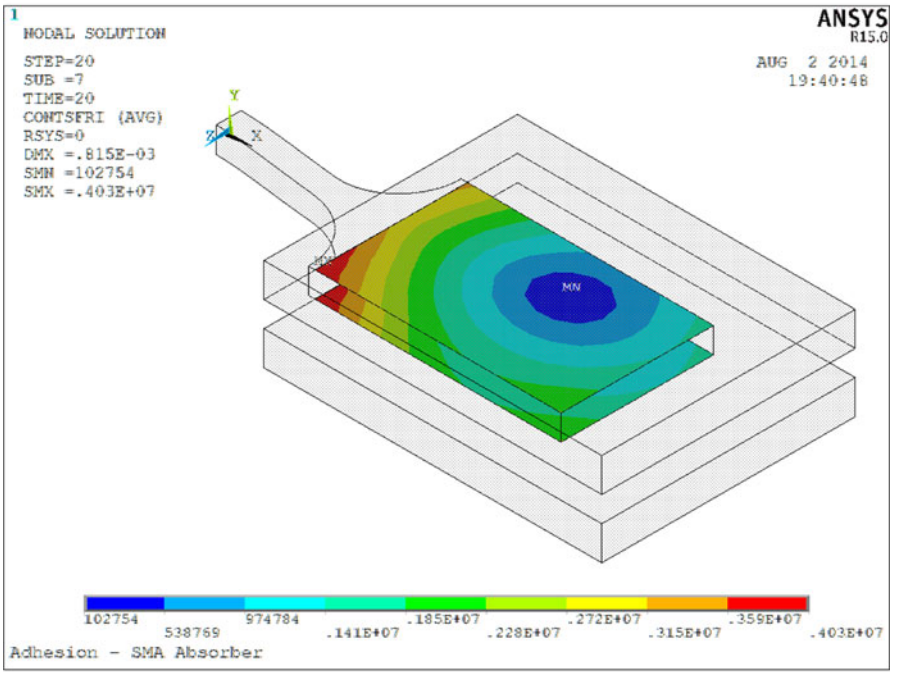


FIGURE 19 Deformed configuration (a) and hysteretic load–displacement curve (b) for in-plane loading.

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015



(a)



(b)

FIGURE 20 Behaviour of the bonded joint: normal contact stress—σ_{max} (a) and tangential contact stress—τ_t (b). In-plane loading.

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

The integrity of the bonded joint for axial loading is now analysed. Figure 20(a) shows the normal contact stress (σ_{max}) distribution, whereas Fig. 20(b) shows the tangential contact stress (τ_t) distribution in the adhesive. Results show that the maximum values are inferior to the interface parameters of Table 2, indicating that the bonded joint will not fail. As for axial loading, this is confirmed by the damage parameter value that presents a null value in the whole bonded region.

Uniform bars submitted to axial loads are efficient absorber elements as they experiment homogeneous uniaxial stress state, and therefore the whole bar experiments complete hysteresis loop cycles. This condition is associated with a maximum theoretical energy dissipation density that can be estimated through the integration of the material pseudoelastic stress–strain hysteresis curve. For the material used in the model, described by stress–strain curve of Fig. 7 with the material properties of Table 1, the stress–strain hysteresis curve gives an area equal to 17.2 MJ/m^3.

For the SMA element analysed, lower values of energy dissipation density are obtained (approximately 30% for the axial condition and 3.5% for the in-plane loading) as part of the element does not experiment 100% of phase transformation. Part of the SMA element volume presents a large cross section, necessary to promote a large contact area to guarantee the bonded joint integrity. In this region, the levels of stress are not sufficient to promote phase transformation. This is inherent in the problem that must satisfy two conditions: large enough stresses to promote phase transformation and stresses small enough to guarantee the bonded joint integrity.

5. CONCLUSIONS

The pseudoelastic hysteresis loop observed in austenitic SMAs during phase transformation is associated with energy dissipation. Therefore, pseudoelastic SMA elements can be used as vibration attenuators. Fixation methods of SMA elements to a structure involving bonding offer several advantages. Usual joining methods as welding must be avoided since the temperature variation induced during the process can strongly affect the characteristics, changing the expected behaviour.

This work investigates a non-linear numerical model based on the finite-element method to study the capability of energy dissipation of SMA elements bonded with adhesive to structures. Large values of phase transformation critical stresses are present, indicating that the SMA element must be subjected to large stress values in order to develop phase transformation and experiment hysteretic behaviour. As the joint can be subjected to large load values, its structural integrity is a critical point that must be considered in the design. The proposed model deals with the two aspects: the phase transformation behaviour of the SMA element and the adhesive join integrity.

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

Numerical results show that pseudoelastic SMA elements can develop very large recoverable displacements and can be used as efficient vibration attenuator elements. The proposed model can be used to adjust dynamical characteristics and study the performance of pseudoelasic SMA elements bonded to structures.

FUNDING

The authors would like to acknowledge the support of the Brazilian Research Agencies CNPq, CAPES, and FAPERJ.

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015

REFERENCES

[1] Tanaka, K., *J. Pressure Vessel Technol.* **112**, 158–163 (1990).
[2] Savi, M. A., Paiva, A., Baêta-Neves, A. P., and Pacheco, P. M. C. L., *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **13**, 261–273 (2002).
[3] Paiva, A., Savi, M. A., Braga, A. M., and Pacheco, P. M. C. L., *Int. J. Solids Struct.* **42**, 3439–3457 (2005).
[4] Paiva, A. and Savi, M. A., *Math. Prob. Eng.* **2006**, 1–30 (2006).
[5] Birman, V., *Int. J. Solids Struct.* **45**, 320–335 (2008).
[6] Denoyer, K. K., Scott Erwin, R., and Ninneman, R., *Acta Astronaut.* **47**, 389–397 (2000).
[7] Webb, G., Wilson, L., Lagoudas, D. C., and Rediniotis, D. C., *IAAA J.* **38**, 325–334 (2000).
[8] Machado, L. G. and Savi, M. A., *Braz. J. Med. Biol. Res.* **36**, 683–691 (2003).
[9] Bundhoo, V., Haslam, E., Birch, B., and Park, E. J., *Robotica* **27**, 131–146 (2009).
[10] Hartl, D., Lagoudas, D. C., Calkins, F. T., and Mabe, J. H., *Smart Mater. Struct.* **19** (20), 1–14 (2010).
[11] Hartl, D., Lagoudas, D. C., Calkins, F. T., and Mabe, J. H., *Smart Mater. Struct.* **19** (21), 1–18 (2010).
[12] Spinella, I. and Dragoni, E., *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **21**, 185–199 (2010).
[13] Min An, S., Ryu, J., Cho, M., and Cho, K. J., *Smart Mater. Struct.* **21**, 1–16 (2012).
[14] Hodgson, D. E., Wu, M. H., and Biermann, R. J., *ASM Handb.* **2**, 887–902 (1992).
[15] Rogers, C. A., Intelligent materials, *Scientific American*, September, 122–127 (1995).
[16] Zhang, X. D., Rogers, C. A., and Liang, C., *ASME - Smart Struct. Mater.* **24**, 79–90 (1991).
[17] Aguiar, R. A. A., Savi, M. A., and Pacheco, P. M. C. L., *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **24**, 247–261 (2013).
[18] Asgarian, B. and Moradi, S., *J. Constr. Steel Res.* **67**, 65–74 (2011).
[19] Casciati, F. and Faravelli, L., *Struct. Control Health Monit.* **16**, 751–765 (2009).
[20] Desroches, R. and Delemont, M., *Eng. Struct.* **24**, 325–332 (2002).
[21] Johnson, R., Padgett, J. E., Maragakis, M. E., Desroches, R., and Saiidi, M. S., *Smart Mater. Struct.* **17**, 1–10 (2008).

[22] Lagoudas, D. C., *Shape Memory Alloys – Modeling and Engineering Applications*, (Springer, New York, USA, 2008).
[23] Ozbulut, O. E., Mir, C., Moroni, M. O., Sarrazin, M., and Roschke, P. N., *Smart Mater. Struct.* **16**, 818–829 (2007).
[24] Ozbulut, O. E., Roschke, P. N., Lin, P. Y., and Loh, C. H., *Smart Mater. Struct.* **19**, 1–14 (2010).
[25] Ozbulut, O. E., Hurlebaus, S., and DesRoches, R., *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **22**, 1531–1549 (2011).
[26] Ozbulut, O. E. and Hurlebaus, S., *Smart Mater. Struct.* **20**, 1–12 (2011).
[27] Savi, M. A., De Paula, A. S., and Lagoudas, D. C., *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **22**, 67–80 (2011).
[28] Shook, D., Lin, P. Y., Lin, T. K., and Roschke, P. N., *Smart Mater. Struct.* **16**, 1433–1446 (2007).
[29] Youssef, M. A., Alam, M. S., and Nehdi, M., *J. Earthquake Eng.* **12**, 1205–1222 (2008).
[30] Zhang, Y., Camilleri, J. A., and Zhu, S., *Smart Mater. Struct.* **17**, 1–9 (2008).
[31] Zhang, Y., Camilleri, J. A., and Zhu, S., *Smart Mater. Struct.* **17**, 1–9 (2008).
[32] Zuo, X. B., Chang, W., Li, A. Q., and Chen, Q. F., *J. Mater. Sci. Eng. A* **438**, 1150–1153 (2006).
[33] Zuo, X. B., Li, A. Q., and Chen, Q. F., *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **19**, 631–639 (2008).
[34] Zuo, X., Li, A., Sun, W., and Sun, X., *J. Vib. Control* **15**, 897–921 (2009).
[35] Zuo, X. and Li, A., *Struct. Control Health Monit.* **18**, 20–39 (2011).
[36] Cardone, D., Perrone, G., and Sofia, S., *J. Mater. Eng. Perform.* **20**, 535–543 (2011).
[37] Queiroz, R. A., Sampaio, E. M., Cortines, V. J., and Rohem, N. R. F., *Appl. Adhes. Sci.* **2**, 8 (2014).
[38] Shishesaza, M. and Reza, A., *J. Adhes.* **89**, 859–880 (2013).
[39] Cheng, J., Wu, X., Li, G., Pang, S., and Taheri, F., *Sens. Actuators A* **88**, 256–262 (2001).
[40] Mohamed Ali, M. S. and Takahataa, K., *Sens. Actuators A* **163**, 363–372 (2010).
[41] Ghomshei, M. M., Khajepour, A., Tabandeh, N., and Behdinan, K., *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **12**, 761–773 (2001).
[42] Guillemenet, J. and Bistac, S., *Int. J. Adhes. Adhes.* **21**, 77–83 (2001).
[43] Pradhan, S. C., Iyengar, N. G. R., and Kishore, N. N., *Int. J. Adhes. Adhes.* **15**, 33–41 (1995).
[44] De Barros, S. and Champaney, L., *Int. J. Struct. Integr.* **4**, 396–406 (2013).
[45] ANSYS, *Structural Analysis Guide*, Release 14 (2012).
[46] Auricchio, F., Taylor, R. L., and Lubliner, J., *Comput. Method Appl. Mech.* **146**, 281–312 (1997).
[47] Alfano, G. and Crisfield, M. A., *Int. J. Numer. Meth. Eng.* **50**, 1701–1736 (2001).

Downloaded by [Professor Silvio De Barros] at 10:22 15 June 2015