

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA**

**COLAGEM DE PLACAS COM LIGA COM  
EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA**

Iury de Sena Mendes

Roberto Ferrari de Carvalho

Prof. Orientador: Silvio Romero de Barros

**Rio de Janeiro**

**Junho 2015**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA**

**COLAGEM DE PLACAS COM LIGA COM  
EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA**

Iury de Sena Mendes

Roberto Ferrari de Carvalho

Projeto Final II apresentado em cumprimento às  
normas do Departamento de Educação Superior do  
CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Orientador: Silvio Romero de Barros

**Rio de Janeiro**

**Junho 2015**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos aos nossos pais, que sempre nos incentivaram e nos ajudaram nos momentos mais difíceis.

Aos professores da cadeira de Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca que contribuíram não só na nossa formação acadêmica, mas também na nossa formação de caráter e na busca incessante por conhecimento.

Ao professor Silvio de Barros por nos orientar nesse projeto.

## RESUMO

Ligas com memória de forma (LMF) são materiais onde sua principal característica é a capacidade de sofrer deformações e voltar à forma original quando remove-se a carga a ele aplicada ou então quando se aquece o material. Possuem capacidade de desenvolver grandes forças e deslocamentos através de baixo consumo de energia. O laço de histerese pseudoelástico observado nas LMFs austeníticas está associado à dissipação de energia, assim, elementos de LMF pseudoelásticos podem ser utilizados como atenuadores de vibrações, sendo possível a construção de atuadores leves e silenciosos. O desenvolvimento de atuadores com as ligas de memória de forma é fundamental para muitas áreas: robótica, odontologia, engenharia civil, medicina, biomédica, vestuário, indústria aeroespacial, entre outras. Com o avanço da tecnologia os adesivos vêm sendo muito utilizados como forma para ligação de elementos mecânicos e como alternativa para união de ligas com memória de forma, tendo em vista que processos mecânicos como o uso de rebites e parafusos apresentam a necessidade de se fazer furos nas peças unidas. E já o processo de soldagem apresenta a desvantagem do aumento da temperatura na junção, o que pode acarretar mudanças nas propriedades das ligas com memória de forma. Este projeto apresenta um modelo numérico não linear baseado no Método de Elementos Finitos para estudar o comportamento do atenuador de vibração com elementos de LMF.

Palavras-chave: Atuadores, deformações, liga de memória de forma, adesivos, simulação numérica, método de elementos finitos.

## **ABSTRACT**

Alloys with shape memory are materials where the main quality is the ability to undergo deformation and return to the original shape when the load is removed or applied to it so when the material is heated. They have the capacity to develop large forces and displacements through low power consumption. The pseudoelastic hysteresis loop observed in the austenitic LMFs is associated power dissipation thus pseudoelastic LMF elements can be used as vibration attenuators, it is possible to build silent and light actuators. The development of actuators with memory alloy form is an attraction for many areas: robotics, dentistry, engineering, medicine, biomedical, apparel, aerospace, among others. With the advancement of technology adhesives have been widely used as a means for connecting mechanical elements and as an alternative to joining alloys with shape memory, considering that mechanical processes such as using rivets and bolts have the need to drill holes the united parts. And since the welding process has the disadvantage of increasing the temperature at the junction, which may cause changes in the properties of shape memory alloys. This project presents a nonlinear numerical model based on finite element method to study the vibration attenuator behavior with LMF elements.

**Keywords:** Adhesives, actuators, deformation, shape memory alloy, numerical simulation, finite element method.

# Sumário

<b>Capítulo 1- Introdução</b> .....	1
<b>1.1 - Motivação e Justificativa</b> .....	2
<b>1.2 – Objetivos</b> .....	2
<b>1.3 - Metodologia de Trabalho Realizado</b> .....	2
<b>1.4 - Organização do trabalho</b> .....	2
<b>Capítulo 2 – Adesivos</b> .....	3
<b>2.1 - Introdução</b> .....	3
<b>2.2 - Aplicações</b> .....	3
<b>2.3 - Vantagens e Desvantagens</b> .....	5
<b>2.4 - Classificação dos Adesivos</b> .....	6
<b>2.5 - Preparação da Superfície</b> .....	8
<b>Capitulo 3 – Ligas com Memória de Forma</b> .....	10
<b>3.1 - Introdução</b> .....	10
<b>3.2 - Transformações de Fase</b> .....	10
<b>3.3 - Pseudoelasticidade</b> .....	13
<b>3.4 - Efeito Memória de Forma</b> .....	13
<b>3.5 - Áreas de Aplicação</b> .....	15
<b>3.6 - Absorvedores</b> .....	19
<b>Capítulo 4 - Esforços mecânicos em juntas adesivas</b> .....	21
<b>4.1 - Juntas adesivas</b> .....	21
<b>4.2 - Tipos de Carregamento</b> .....	22
<b>4.2.1 - Clivagem e arranchamento</b> .....	22
<b>4.2.2 - Compressão</b> .....	23
<b>4.2.3 - Tração</b> .....	23
<b>4.2.4 - Cisalhamento</b> .....	23
<b>Capitulo 5 - Ensaio de propagação de fratura</b> .....	24
<b>5.1 - ENF</b> .....	24
<b>5.2 - MMF</b> .....	24
<b>5.3 - DCB</b> .....	25
<b>5.4 - Desenvolvimento e Resultados</b> .....	26

<b>CAPITULO 6 – Análise Numérica .....</b>	<b>28</b>
<b>6.1 - Introdução .....</b>	<b>28</b>
<b>6.2 - Cálculo Comportamento das Placas .....</b>	<b>28</b>
<b>6.3 - Análise dos ensaios .....</b>	<b>39</b>
<b>6.4 - Objeto de Estudo .....</b>	<b>40</b>
<b>CAPITULO 7 – Conclusão .....</b>	<b>55</b>
<b>Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>56</b>

## Lista de Figuras

FIGURA 1: Uso de adesivos na construção civil .....	3
FIGURA 2: Colagem para vedação de juntas de dilatação.....	4
FIGURA 3: Zonas de aplicação de adesivos na estrutura do veículo.....	4
FIGURA 4: Vedação de Carter usando silicone.....	4
FIGURA 5: Sistemas eletrônicos.....	5
FIGURA 6: Comparação de uma superfície rebitada com juntas unidas com adesivos .....	5
FIGURA 7: Resistência do adesivo Loctite 326 x temperatura de trabalho .....	8
FIGURA 8: Tipos de rotura .....	9
FIGURA 9: Falha adesiva por contaminação .....	9
FIGURA 10: Estruturas Cristalinas da LMF .....	11
FIGURA 11: Transformação da estrutura cristalina sob variação de temperatura .....	12
FIGURA 12: Transformação da estrutura martensítica sob carregamento mecânico.	12
FIGURA 13: Curva Tensão-Deformação pseudoelástica esquemática .....	13
FIGURA 14: Diagrama tensão-deformação-temperatura típico de uma LMF .....	14
FIGURA 15: Endoscopia utilizando LMF como atuador .....	15
FIGURA 16: Implante de placa óssea utilizada para reparar uma fratura na mandíbula. .....	16
FIGURA 17: Arcos ortodônticos de SMA .....	16
FIGURA 18: Modelo básico de uma asa de avião com flap .....	17
FIGURA 19: Avião da Boeing com turbina de geometria variável do elemento de descarga de gases .....	17
FIGURA 20: Dispositivos utilizados no telhado da Basílica de San Francesco .....	18
FIGURA 21: Modelos numéricos mostrando as distribuições de tensões antes e depois da intervenção, respectivamente. ....	18
FIGURA 22: Mola de LMF Ni-Ti .....	20
FIGURA 23: Tipos de juntas coladas .....	21
FIGURA 24: Representação do esforço de clivagem .....	22
FIGURA 25: Mola de LMF Ni-Ti .....	24
FIGURA 26: Representação do ensaio MMF .....	25
FIGURA 27: Ensaio DCB .....	25
FIGURA 28: Ensaio ENF .....	26
FIGURA 29: Ensaio MMF .....	26
FIGURA 30: Gráfico MMF .....	27
FIGURA 31: Gráfico ENF.....	27
FIGURA 32: Curvas de propagação da fissura ensaio ENF. ( $G=0,04\text{N/mm}$ ) .....	38
FIGURA 33: Curvas de propagação da fissura ensaio MMF. ( $G=0,95\text{N/mm}$ ) .....	38
FIGURA 34: Simulação no software Ansys do ensaio MMF .....	39
FIGURA 35: Comparação das curvas obtidas nos ensaios experimentais e numéricos .....	39
FIGURA 36: Esquematisação da estrutura de uma junta de dilatação .....	41
FIGURA 37: Corrosão devido a entrada de água pelas aberturas das juntas .....	41
FIGURA 38: Fissuras nas juntas de dilatação de uma ponte .....	42
FIGURA 39: Junta de Dilatação de solo sísmica, utilizável para junta de solo interior ou exterior até 100 mm .....	42
FIGURA 40: Dilatação da Junta .....	43
FIGURA 41: Vista em perspectiva da geometria no software Ansys .....	44
FIGURA 42: Vista frontal em detalhe evidenciando o absorvedor em forma de S .....	45
FIGURA 43: Elemento finito Elemento SOLID186 e suas formas possíveis .....	45
FIGURA 44: Malha aplicada à geometria do projeto .....	46

FIGURA 45: Gráfico Força x deslocamento .....	47
FIGURA 46: Tensão de Von Mises no final da simulação, após o descarregamento do deslocamento de 38 mm – Vista 1 .....	48
FIGURA 47: Tensão de Von Mises no final da simulação, após o descarregamento do deslocamento de 38 mm – Vista 2 .....	49
FIGURA 48: Tensão de Von Mises quando o deslocamento da base é igual a 38 mm Vista 1 .....	50
FIGURA 49: Tensão de Von Mises quando o deslocamento da base é igual a 38 mm Vista 2 .....	51
FIGURA 50: Tensão de Von Mises quando o deslocamento da base é igual a 38 mm Vista 3 .....	51
FIGURA 51: Status da zona de contato .....	52
FIGURA 52: Tensão normal na zona de contato com o deslocamento de 10 mm .....	53
FIGURA 53: Tensão de cisalhamento no adesivo, com o carregamento de 38 mm .....	54

## **Lista de Tabelas**

TABELA 1: Propriedades dos materiais utilizados na simulação .....	40
TABELA 2: Dimensões da junta modelo 432 do fabricante Veda Technik .....	43

# Capítulo 1

## 1.1 Introdução

A presença de vibrações em máquinas e equipamentos é normalmente caracterizada como um problema sério em diversas aplicações. Desta forma, existem diversas pesquisas interessadas em desenvolver opções para reduzir tais níveis de vibrações.

Uma possível alternativa a ser analisada nesse estudo é a utilização de atuadores de ligas de memória de forma, que são capazes de retornar a sua forma original após uma deformação mecânica.

As ligas com efeito de memória de forma apresentam elevado potencial na aplicação em diversas áreas, pois são caracterizadas principalmente pela pseudoelasticidade e o efeito da memória de forma, que podem ser utilizados para a dissipação de energia e tornam este material apropriado para a atenuação de vibrações.

O atuador de liga de memória de forma é muito usado em áreas como: robótica, odontologia, engenharia civil, medicina, biomédica, vestuário, indústria aeroespacial, entre outras. É utilizado, por exemplo, na medicina como atuador em endoscopias, utilizado também em aparelhos ortodônticos e de grande utilidade na indústria aeroespacial e robótica, deixando equipamentos mais leves sem afetar sua resistência mecânica.

Com o intuito de evitar alterações nas propriedades dos materiais e por possuir muitas vantagens em relação a outros métodos de uniões convencionais, a união por colagem tem sido bastante utilizada atualmente, embora ainda seja um pouco questionada quanto sua garantia em relação à resistência mecânica e durabilidade.

De forma a aprimorar o uso de atuadores de liga com memória de forma, este projeto procura caracterizar, através de experimentos práticos e análises numéricas utilizando o método dos elementos finitos, as vantagens das uniões de atuadores de ligas com memória de forma por meio de colagem.

## **1.2 Motivação e Justificativa**

Ligas com memória de forma apresentam características que tem motivado a sua utilização em diversas áreas como atuadores e atenuadores de vibração.

Mesmo tendo aumentado muito o uso de atuadores com ligas com memória de forma ultimamente e suas propriedades poderem ser usadas em inúmeras áreas da engenharia, uma das limitações do emprego desse tipo de atuador são os métodos de união mecânica utilizados. Neste contexto a colagem pode ser uma alternativa eficaz e prática para a realização dessa união.

## **1.3 Objetivo**

Buscando contribuir na evolução destes estudos este trabalho tem como objetivo mostrar que a união de atuadores de liga com memória de forma por meio de adesivos é altamente viável, comprovando através de estudos numéricos e experimentais, ressaltando as vantagens se comparado aos métodos de união mecânica tradicionais.

## **1.4 Metodologia de Trabalho Realizado**

Primeiramente foi realizada uma revisão bibliográfica, abordando as principais propriedades e características quanto ao uso dos adesivos e das ligas de memória de forma.

Posteriormente, foi realizado um ensaio destrutivo em uma chapa de LMF colada com adesivo em uma chapa de alumínio, sendo feito em seguida uma análise teórica experimental no Ansys, software de simulação que utiliza o método dos elementos finitos. Foi simulado um modelo proposto como exemplo da colagem de atuadores de liga de memória de forma em uma chapa de material, sob a influência de forças/cargas. Dessa análise podemos tirar uma noção do comportamento da liga com memória de forma e do adesivo em questão.

Com a análise dos resultados e propriedades obtidas, espera-se provar que a colagem de ligas com memória de forma apresenta grandes vantagens e fácil aplicabilidade se comparada as outras formas de união mecânica.

## **1.5 Organização**

O primeiro capítulo aborda a introdução do trabalho, motivação, justificativa e objetivo deste estudo. No segundo capítulo são apresentadas as principais características dos adesivos, classificações e áreas de atuação. O terceiro capítulo trata das propriedades das ligas com memória de forma e áreas de utilização. O quarto capítulo fala sobre os esforços mecânicos em junções adesivas. No quinto capítulo fala-se sobre ensaios de propagação de fraturas. O sexto capítulo trata da análise numérica e apresenta os resultados da mesma, além de trazer a conclusão do projeto e sugestões pra projetos futuro.

## Capítulo 2

### Adesivos

#### 2.1 Introdução

A união de metais, assim como de outros materiais, utilizando adesivos é importante para diversas finalidades na indústria nos últimos anos. Com a ascensão de novas tecnologias, houve um desenvolvimento muito grande nas propriedades dos adesivos, possibilitando uma satisfatória resistência mecânica e durabilidade de estruturas unidas por colagem.

O processo de colagem consiste na ligação de substratos através de um adesivo, cuja cura leva à criação de uma ligação rígida. O adesivo pode ser entendido como um material polimérico formulado à base de resina epóxi, substâncias endurecedoras e vários outros compostos que, misturados, transformam-se em um produto único com características irreversíveis. (SILVA, et al 2007)[21].

#### 2.2 Aplicações

A tecnologia de ligação por adesivos estruturais é uma tecnologia emergente que permite solucionar muitos problemas associados às técnicas tradicionais (parafusos, rebites, soldadura, etc.). A comunidade científica que investiga este tema está em expansão e contam-se inúmeras aplicações práticas, desde as indústrias de ponta até às indústrias mais tradicionais. (SILVA, et al 2007)[21].

Na construção civil a tecnologia de adesão é essencialmente aplicada no desenvolvimento de juntas metálicas estruturais fortes e em revestimentos protetores duradouros, conforme mostrado na figura 1. Na figura 2 a colagem é utilizada para a vedação de juntas de dilatação.

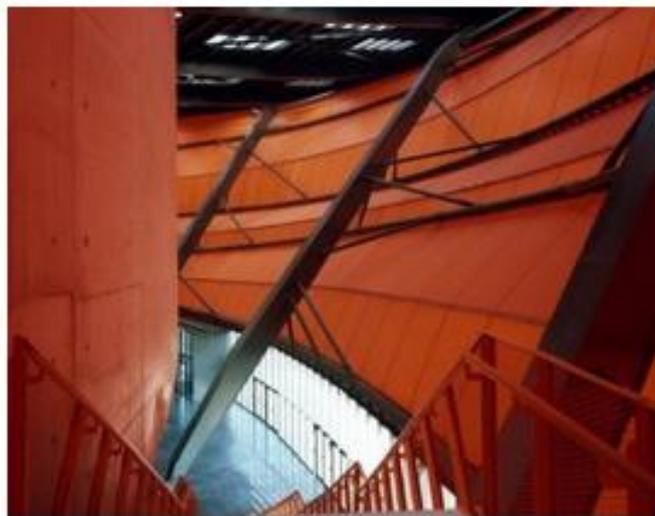


Figura 1 - Uso de adesivos na construção civil.[71].



Figura 2 - Colagem para vedação de juntas de dilatação verticais e horizontais.

Na fabricação de automóveis os adesivos são utilizados para a vedação, adesão, travamento e fixação de componentes estruturais e não estruturais dos veículos. A figura 3 e a figura 4 mostram algumas partes de um veículo onde são empregados diversos tipos de adesivos.

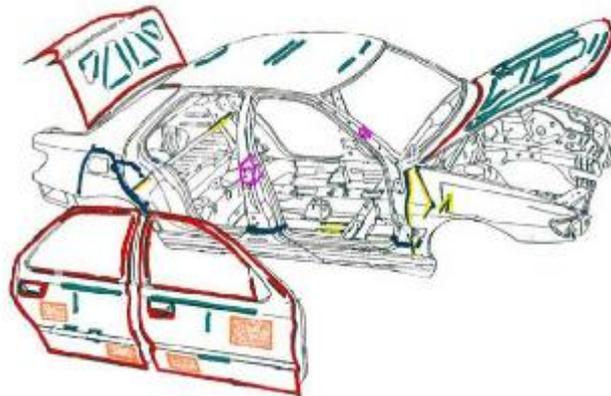


Figura 3 - Zonas de aplicação de adesivos na estrutura do veículo (TOLLIER et al, 2005)[63].

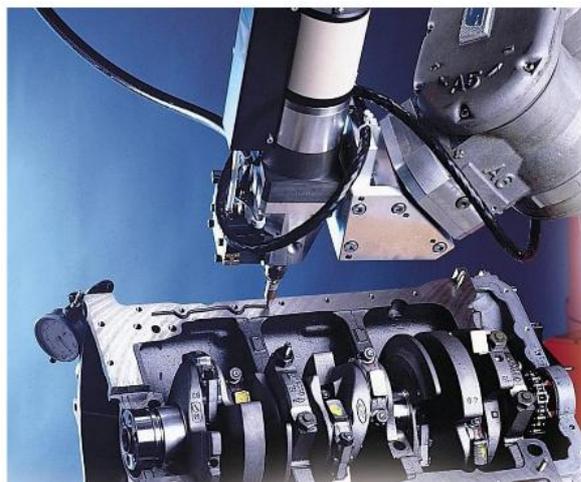


Figura 4 - Vedação de Carter usando silicone (LOCTITE, 1995)[37].

Outra aplicação bastante comum para os adesivos é a indústria eletroeletrônica, porque conseguem aliar um grande desempenho com um baixo custo de produção.

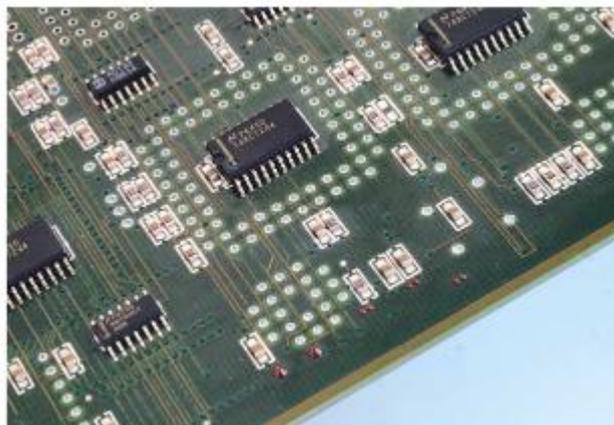


Figura 5 - Sistemas eletrônicos (COGNARD, et al 2005).[19].

Os adesivos já são utilizados há muito tempo na construção de aviões uma vez que são uma excelente alternativa aos fixadores mecânicos como os rebites.



Figura 6 - Comparação de uma superfície rebitada com juntas unidas com adesivos

### 2.3 Vantagens e Desvantagens

Dependendo dos adesivos utilizados, do projeto da junta, das técnicas de aplicação e da função pretendida para a montagem final, a união por colagem pode oferecer uma ou mais vantagens. (SHIELDS, 1974)[59].

As principais vantagens apontadas às ligações adesivas estruturais são:

- União de materiais com diferentes geometrias, composições, coeficientes de expansão térmica, módulos de elasticidade e espessuras.
- Melhor acabamento e aparência do produto final.
- Distribuição uniforme das tensões ao longo da área ligada, permitindo uma maior rigidez e transmissão de carga e possibilitando assim uma redução de peso, uma melhor resistência à fadiga e menor custo.

- Utilização como isolantes térmicos, elétricos e acústicos.
- Reduzir ou prevenir corrosão causada pelo contato entre diferentes materiais.
- As propriedades físicas do aderente são mantidas após a fabricação da estrutura colada, pois não são feitos furos ou trabalhos mecânicos ou térmicos no aderente.
- Boa capacidade de vedação.
- Amortecimento de vibrações, devido ao comportamento viscoelástico dos adesivos;

As principais desvantagens inerentes à ligação com adesivos são:

- Seleção de geometrias que garantam uma distribuição uniforme de tensões.
- Necessidade de uma preparação das superfícies.
- Não há um critério de dimensionamento universal que permita projetar qualquer estrutura
- Sensibilidade a cargas de clivagem e arrancamento, necessitando de um projeto de ligação que elimine ao máximo essas forças.
- Dificuldades na inspeção;
- Impossibilidade de desmontagem sem destruição da junta;
- Sensibilidade aos fatores ambientais (temperatura, humidade, radiação UV, etc.)
- Demora do tempo de cura. Após a aplicação do adesivo, o conjunto tem que ficar em repouso por um tempo e faz se necessário à utilização de ferramentas de fixação para manter as peças nas posições corretas
- Problemas de toxicidade e inflamabilidade;

## 2.4 Classificação dos Adesivos

### 2.4.1. Composição Química

Os adesivos podem ser classificados de acordo com a função, composição química, modo de aplicação ou reação, forma física, custo e aplicação.

Segundo a sua composição química, os adesivos classificam-se essencialmente em quatro grupos.

Adesivos Termoendurecíveis:

São polímeros largamente reticulados possuindo normalmente uma grande rigidez após sua polimerização. São constituídos por uma densa rede molecular tridimensional com um grau elevado de reticulação e quando sujeitos a calor excessivo são conduzidos a degradação em vez da fusão. Os termoendurecíveis são não fundíveis e insolúveis. (NUNES, 2014)[44].

#### Adesivos Termoplásticos:

São originalmente polímeros sólidos que podem ser fundidos e moldados após o processo de cura, pois amolecem ou fundem quando aquecidos. A exposição repetida a elevadas temperaturas requeridas para fundição podem causar degradação devido à oxidação, o que limita o número de ciclos térmicos.

Apesar de alguns termoplásticos possuírem excelente resistência ao cisalhamento a temperaturas moderadas, esses materiais não são reticulados e tendem a fluir quando submetidos a cargas baixas e a baixas temperaturas. (SILVA, et al 2007)[21].

Outra limitação é a baixa resistência a solventes e agentes químicos.

#### Elastômeros:

Possuem a capacidade de retomar o seu comprimento inicial após serem sujeitos a grandes deformações por intermédio de esforços de tração ou compressão. Isso é possível através da elevada tenacidade, do baixo módulo de elasticidade e ainda pela boa capacidade de deformação e de absorção de energia que estes materiais possuem. São descritos como materiais muito viscoelásticos, com elevada capacidade de resistir a forças de arrancamento, sendo bastante flexíveis, o que facilita a ligação de substratos com diferentes coeficientes de expansão térmica. (SILVA, et al 2007)[21].

#### Adesivos Híbridos:

Definem-se como adesivos compostos por combinações entre resinas termoendurecíveis, termoplásticas e/ou elastoméricas. A combinação destas resinas permite a estes adesivos conter na sua estrutura as propriedades mais relevantes de cada uma delas, como melhores valores de resistência ao arrancamento e melhor capacidade de absorção de energia.

### **2.4.2. Adesivos Industriais**

Em relação à utilização dos adesivos pela indústria de construção mecânica, surge a necessidade da separação dos adesivos em dois grupos: estruturais e não estruturais.

A adesão estrutural é uma junção capaz, enquanto parte integrante de uma estrutura, de apresentar um nível específico de resistência, quando submetida a ação de esforços por tempo específico. (VILLENAVE, 2005)[64].

Grande parte desses adesivos são termoendurecíveis e funcionam através de reação química com adição de calor ou de um endurecedor. (SILVA, et al 2007)[21].

Dentre vários tipos de adesivos temos Cianoacrilato, o qual será abordado e analisado neste projeto.

O cianoacrilato é uma resina acrílica conhecida como supercola, é um líquido de baixa viscosidade. Quando entra em contato com a humidade do ar este adesivo cura em poucos segundos a temperatura ambiente. Apesar de curarem têm muitas características dos

termoplásticos. (SILVA, et al 2007)[21].

Para colar materiais rígidos, como os metais, a fórmula tem apenas um componente a base de cianoacrilato de metila. O cianoacrilato de metila é mais forte e mais resistentes ao impacto do que o cianoacrilato de etila, que é mais usado para colar borrachas e superfícies plásticas.

Possuem excelente resistência ao corte, baixa resistência ao calor e a humidade, baixa resistência ao arrancamento e ao impacto.

Quando usados em substratos não porosos, os adesivos só curam nas bordas da junta que ficam expostas ao ar. No centro, sem humidade suficiente, não curam completamente. Com a cura das bordas forma-se uma barreira que impede o acesso da humidade para o centro da junta. (SILVA, et al 2007)[21].

Para a realização dos ensaios do projeto foi escolhido o cianoacrilato, da marca Super Bonder, por ser um adesivo com alto desempenho e com a capacidade de colar metais. (LOCTITE, 1995)[37].

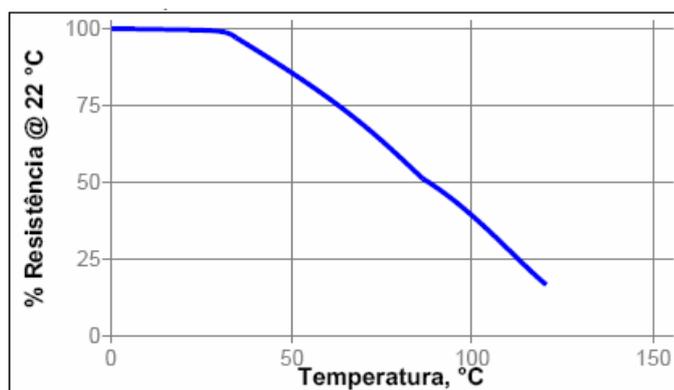


Figura 7 – Resistência adesivo Loctite 326 x temperatura de trabalho (LOCTITE, 1995)[37].

## 2.5 Preparação da Superfície

A primeira condição que deve ser verificada para que se tenha uma ligação adesiva é que o adesivo, que deve ser líquido na hora da aplicação molhe o substrato e que se espalhe espontaneamente sobre ele.

As superfícies devem ser uniformes e cuidadosamente limpas para que haja uma condição favorável para junção. Diversos tratamentos químicos visando a melhorar a adesão em substratos metálicos foram desenvolvidos nos últimos anos. (SAMPAIO, 2006)[54].

A escolha do tratamento será determinada pelos seguintes fatores: natureza dos adesivos e aderentes, tempo de exposição, temperatura, condições ambientais e fatores econômicos. Esses tratamentos alteram as dimensões dos poros superficiais e consequentemente aumentam a penetração do adesivo.

Além de tratamentos químicos podem ser feitos tratamentos mecânicos. Esses

tratamentos atuam alterando a rugosidade da superfície. De uma maneira geral, associa-se uma alta rugosidade a uma boa aderência, porém essa afirmação não é sempre verdadeira, em certos casos, granulometrias mais finas produzem juntas mais eficazes que aquelas onde a rugosidade é maior (SAMPAIO, 1998)[53].

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 8 mostra os tipos de rotura.

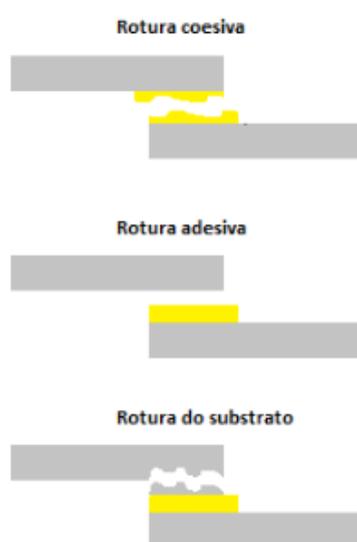


Figura 8 - Tipos de rotura. (SILVA, et al 2007)[21].

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.

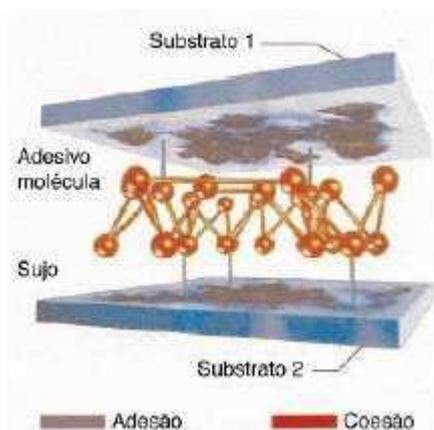


Figura 9 – Falha adesiva por contaminação (LOCTITE, 1955)[37].

## Capítulo 3

### Ligas com memória de forma

#### 3.1 Introdução

As ligas com memória de forma (LMF ou Shape Memory Alloy - SMA) consistem em materiais metálicos com a habilidade de retornar a um formato ou tamanho previamente definido, quando submetidos a um ciclo térmico adequado. Esse efeito de memória de forma ocorre devido a mudanças na estrutura cristalina do material, decorrentes da temperatura ou da tensão à qual está sujeita. A característica principal destes materiais é a habilidade de sofrer grandes deformações e, em seguida, recuperar sua forma original quando a carga é removida ou o material é aquecido.(CHEN, et al 2004)[17].

Embora uma grande variedade de materiais possa manifestar este efeito de memória de forma, só se têm interesse comercial nas ligas em que é possível obter uma quantidade significativa de recuperação da deformação ou nos casos em que é gerada uma força significativamente importante durante a mudança de forma. Isso acontece com as ligas Ni-Ti(Níquel-Titânio), assim como as ligas de Cu dos sistemas Cu-Al-Zn, Cu-Al-Ni (PUGLIESE et al 2012).[48].

Uma liga com memória de forma pode também ser definida como um material em que há formação de martensita termoelástica. A liga sofre uma transformação martensítica que lhe viabiliza a deformação por um mecanismo de maclagem, abaixo da temperatura de transformação. Esta deformação (reversível) sofre então um processo de reversão quando a estrutura maclada (martensítica) se transforma na fase mãe de alta temperatura, por aquecimento(PUGLIESE, et al 2012).[48].

Dispositivos construídos de LMF têm uma elevada capacidade de dissipar energia no processo de carregamento-descarregamento (histerese), tornando-os uma boa opção para aplicações como atenuadores de vibração (FUGAZZA, 2003)[27]. As ligas com memória de forma podem ser consideradas adaptativas no sentido de que mais energia é dissipada, através da histerese, como uma resposta ao aumento da amplitude. Os atenuadores de vibração de SMA são especialmente atrativos para os casos onde os carregamentos são de natureza randômica. Quando uma excitação inesperada causar excesso de vibração, mais energia será dissipada e a vibração será atenuada (AMARIEI, et al 2009)[6].

#### 3.2 Transformações de fase

Dentro de uma faixa de operação típica, uma LMF tem duas fases, cada uma com uma estrutura cristalina diferente e, portanto, diferentes propriedades. Uma fase acontece a alta temperatura, chamada de Austenita (A) e outra a baixa temperatura, chamada de Martensita (M). A austenita apresenta uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (Fig. 10-a),

diferentemente da estrutura martensítica (ortorrômbica ou monoclinica). A transformação de uma fase para outra não ocorre por difusão de átomos, mas através de distorção por cisalhamento. Tal transformação é conhecida como transformação martensítica. Cada cristal de Martensita formado pode ter diferentes direções de orientação, chamadas de variantes. Um conjunto de variantes martensíticas pode existir em duas formas: martensita maclada (MT), a qual é formada através de uma combinação de variantes de martensita “auto-acomodadas” (Fig. 10-b), e martensita demaclada ou reorientada em que há uma variante martensítica específica dominante (MD) mostrada na Fig. 10-c (após carregamento mecânico). (AQUINO, 2011)[7]. Essa reversibilidade entre as transformações da fase Austenita para Martensita ou de ordem contrária, forma a base para o comportamento das LMF. (LA CAVA et al, 2000)[34].

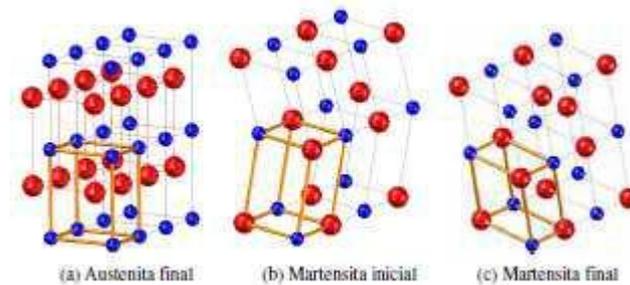


Figura 10 – Estruturas Cristalinas da LMF

As temperaturas que implicam nas transformações de fase das ligas com memória de forma, são estreitamente ligadas à composição da liga. Existem quatro temperaturas características e determinantes no fenômeno de mudança de fase. (LA CAVA et al, 2000)[34]. Considere uma liga com memória de forma sem carregamento mecânico e no estado completamente austenítico, onde a temperatura é indicada por AF, ou temperatura de austenita final (Fig. 11-a). (AQUINO, 2011)[7].

Nestas condições a liga é submetida a um resfriamento, onde as primeiras variantes de martensita começam a surgir quando a temperatura atinge o estado de martensita inicial indicada por MS (Fig. 11-b). Com a continuação do resfriamento, as variantes de martensita aumentam em número, chegando à totalidade na liga na temperatura de martensita final ou MF (Fig. 11-c). Neste estágio, a transformação é completa e o material está completamente na fase de martensita maclada. Similarmente, durante o aquecimento, a transformação reversa inicia na temperatura de austenita inicial AS (Fig. 11-d) e a transformação é completada na temperatura de austenita final AF (Fig. 11-e). (AQUINO, 2011)[7].

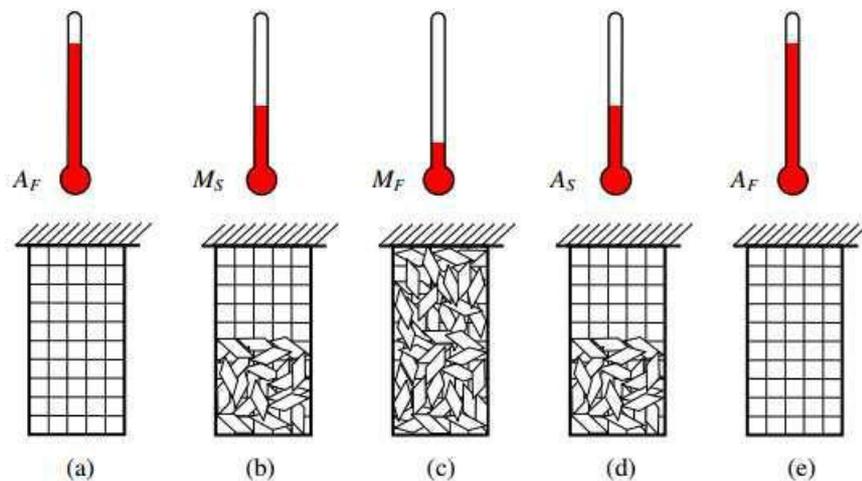


Figura 11 – Transformação da estrutura cristalina sob variação de temperatura

Se um carregamento mecânico é aplicado no material quando o mesmo se encontra na fase de martensita maclada ou na temperatura MF (Fig. 12-b), é possível demaclar

(reorientar) a martensita através da reorientação de certo número de variantes. O processo de demaclagem resulta em uma mudança de forma macroscópica, onde a deformação permanece quando o carregamento é retirado (Fig. 12-c). (AQUINO, 2011)[7].

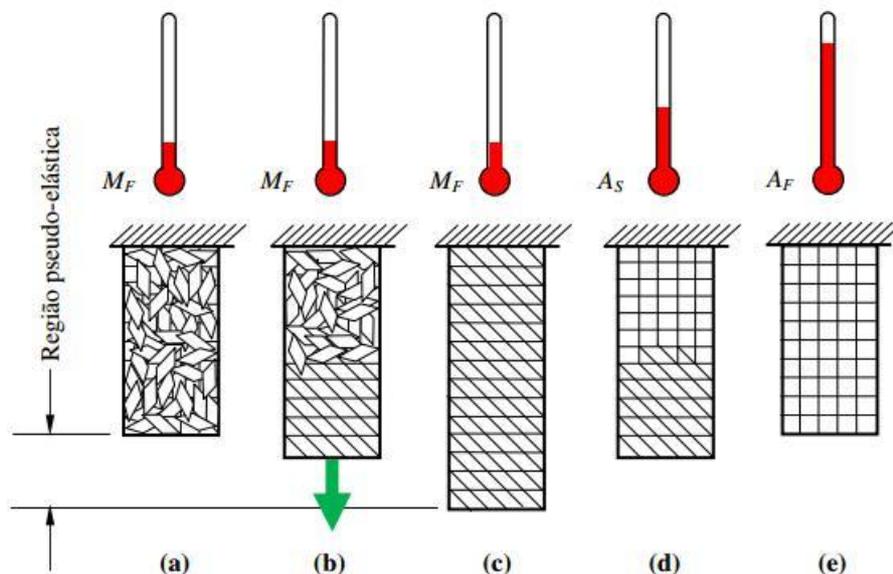


Figura 12 – Transformação da estrutura martensítica sob carregamento mecânico.

Um aquecimento subsequente na LMF para uma temperatura acima de AF irá resultar na transformação de fase reversa, ou seja, de martensita maclada para austenita (Fig. 12-e) e levará o material para forma original (Fig. 11-a). Resfriando de volta até uma temperatura abaixo de MF levará o material para formação de martensita maclada novamente sem mudança de forma observada. O processo descrito acima é denominado Efeito Memória de Forma Simples (Shape Memory Effect). (AQUINO, 2011)[7].

### 3.3 A pseudoelasticidade

A pseudoelasticidade é um comportamento caracterizado por uma recuperação da deformação após a retirada da carga, a temperaturas acima de  $A_f$  ( $T > A_f$ ). Essas deformações são oriundas de transformações martensíticas induzidas por tensão e por reorientação da estrutura cristalina (WARLIMONT, et al 1974)[64]. Em uma configuração sem tensões, apenas a austenita é estável termodinamicamente em uma temperatura acima de  $A_f$ , logo a martensita formada, nessa ausência de tensões, é instável. Essa característica das LMF tem dependência com relação às temperaturas características da transformação.

As deformações pseudoelásticas podem chegar a deformações reversíveis de até 10% em certas ligas, sendo 8% um valor típico para as ligas NiTi. Ao comparar estas deformações recuperáveis da SMA à deformação recuperável típica dos materiais convencionais de engenharia, que corresponde à deformação elástica destes materiais, pode-se ter uma idéia de como é excêntrico o comportamento das SMA (WAYMAN, et al 1990).[66].

Ao submeter o material a uma tração mecânica, observa-se um comportamento elástico até um determinado nível de tensão (Fig. 13).

A partir daí observa-se uma deformação relativamente grande com pequena variação da tensão. Ao retirar a carga da liga, retorna ao seu estado inicial, percorrendo uma histerese.

A área delimitada pela histerese expressa a energia absorvida durante o processo. A deformação produzida pela aplicação de tensão é recuperada com o descarregamento (WARLIMONT, et al 1974)[65].

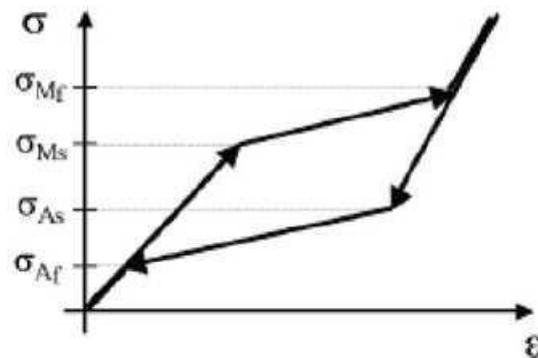


Figura 13 - Curva Tensão-Deformação pseudoelástica esquemática

### 3.4 Efeito memória de forma

Uma Liga com Memória de Forma apresenta Efeito de Memória de Forma (EMF) quando a mesma é deformada na fase martensita e depois retirada a força de deformação, em uma temperatura abaixo de  $M_s$ . Quando é aplicado um aquecimento subsequente acima de  $A_f$  a LMF irá retornar a forma original. A natureza do EMF pode ser melhor entendida através de um diagrama tri-axial de Tensão-Deformação-Temperatura, como mostrado na Figura 14. Esta figura representa os dados experimentais para uma amostra de Ni-Ti testada sob um carregamento axial. A tensão  $\sigma$  é a tensão axial aplicada na LMF. A deformação correspondente a esta tensão é representada pela sigla  $\epsilon$ . Partindo da fase em que o corpo se

encontra em baixa temperatura, ou na fase martensita maclada, (ponto B), é aplicada uma tensão para deformação a temperatura constante. Essa tensão chega ao nível de tensão inicial ( $\sigma_s$ ), que inicia o processo de reorientação, resultando no aparecimento de variantes martensíticas favoravelmente orientadas e outras variantes menos orientadas. O nível de tensão para reorientação é muito inferior a tensão de deformação plástica verdadeira da martensita. O processo de surgimento de martensita demaclada é completado quando o nível de tensão chega a  $\sigma_f$ , que é caracterizado pelo final do platô no diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$ . O material é então descarregado elasticamente de C para D, mantendo o estado de martensita demaclada. (AQUINO, 2011)[7].

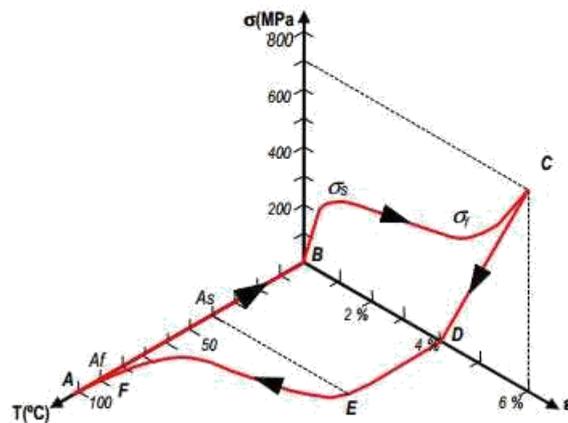


Figura 14 – Diagrama tensão-deformação-temperatura típico de uma LMF

Sob aquecimento e na ausência de tensão, a transformação reversa se inicia quando a temperatura atinge AS (ponto E) e é completada na temperatura AF (ponto F), onde acima deste o material está completamente austenítico. Na ausência de uma deformação plástica permanente gerada durante a demaclagem, a forma original da peça é obtida (ponto A). A deformação recuperada devido à transformação de fase da martensita para a austenita é denominada de deformação de transformação ( $\epsilon_t$ ). Um resfriamento subsequente irá resultar na formação de variantes de martensita maclada de auto-acomodação sem mudança de forma associada, e o ciclo completo pode ser repetido. O fenômeno descrito acima é chamado de efeito memória de forma simples, ou simplesmente EMF, porque a recuperação da forma é realizada somente durante o aquecimento, após o material ter sido deformado por uma carga mecânica aplicada. (AQUINO, 2011)[7].

### 3.5 Áreas de aplicação para LMF e suas limitações

De maneira geral, as LMF apresentam baixa resistência à fadiga quando comparadas a outras ligas. Porém vale ressaltar, que as LMF são capazes de gerar grandes forças de restituição com um consumo de energia consideravelmente baixo, o que é uma característica que as diferenciam em muitas aplicações. Muitas aplicações são possíveis com as LMF, e em diversas áreas têm-se desenvolvido tecnologias afins, que vão da medicina à engenharia aeroespacial.

Ligas com Memória de Forma são úteis em inúmeras situações quando trabalham como atuadores, alterando: rigidez, forma, frequência natural, posição e outras características mecânicas, em resposta a temperatura ou campos eletromagnéticos. O potencial dessas ligas na condição de atuadores vem sendo ampliado em diversas áreas científicas, como por exemplo, em sistemas eletromecânicos, controle de vibrações, aeronáutica, indústria civil, e até na medicina.

Na área médica, existem vários exemplos de atuadores com memória de forma, tais como o tubo intestinal longo (LIT) apresentado na Fig. 15, desenvolvido para utilização no tratamento não operativo de obstrução intestinal. O atuador desenvolvido por (HAGA, et al 2005)[30] é composto por um tubo de silicone, polímeros de ligação e uma mola helicoidal com memória de forma, onde o médico pode controlar a direção de flexão do eixo de rotação. Esse controle acontece com a passagem de uma corrente elétrica na mola de LMF.

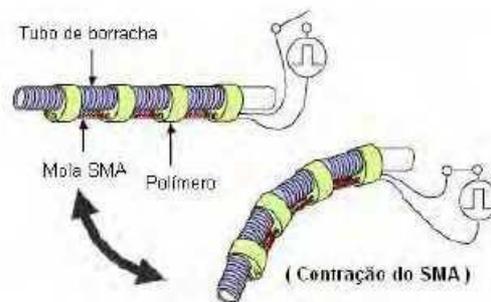


Figura 15 – Endoscopia utilizando LMF como atuador. (HAGA, et al 2005)[30].

Outra aplicação do uso das LMF consiste em um filtro de coágulos sanguíneos desenvolvido por Simon. É um fio de Ni-Ti que é previamente deformado para assumir uma forma que lhe permita fixar-se às paredes internas das veias. Esse filtro é deformado à baixa temperatura, de modo a poder ser inserido na veia pretendida junto com uma solução salina que o mantém resfriado; ao ser submetido ao calor do corpo humano, ele retoma a configuração original (SAVI, et al 2002)[57].

Também na área da medicina podemos citar os implantes de placas ósseas no regime pseudoelástico auxiliando na recuperação de um osso quebrado ou fraturado. Frequentemente são usadas em fraturas ocorridas na face, como nariz, mandíbulas e na região óssea ocular. (SMA/MEMS RESEARCH GROUP, 2001)[73].



Figura 16 - Implante de placa óssea utilizada para reparar uma fratura na mandíbula. (SMA/MEMS RESEARCH GROUP, 2001)[73].

Essa técnica é conhecida na medicina como síntese óssea. As placas facilitam a cura dos ossos fraturados que necessitam estar sob constante compressão. Essa compressão é obtida por implante ósseo, normalmente fabricado em titânio e aço inoxidável, que mantém os ossos juntos e acelera a recuperação do osso fraturado. Após alguns dias de recuperação, a compressão provida pelo implante sofre uma redução na intensidade, pois, conforme se dá a cura, as duas partes do osso fraturado tendem a ficar mais próximas. Com aumento da proximidade entre as partes, há um afrouxamento do implante previamente fixado, aumentando a velocidade de recuperação. (MANTOVANI, 2000)[39].

As aplicações na odontologia em implante de um dispositivo ortodôntico explorando a pseudoelasticidade de uma SMA para correção da posição dos dentes (HODGSON, et al 2000)[32]. Esta correção é imposta através de uma pequena variação de tensão quase constante que resulta em grande deformação, tomando como parâmetro os materiais convencionais. Conseqüentemente, o incômodo é mínimo para o paciente. A grande vantagem do NiTi é o fato de permitir deformações de cerca de 8 a 10% sem entrar no regime plástico, explorando o fenômeno da pseudoelasticidade (Figura 17). É possível ainda conciliar este efeito, com a transformação de fase imposta pela temperatura (SAVI, et al, 2002)[57].



Figura 17 - Arcos ortodônticos de SMA (FERNANDES, 2003)[74].

Na aeronáutica, ligas com memória de forma são incorporadas nas asas dos aviões, permitindo modificar a forma da asa do avião. Os flaps são estruturas móveis, inseridas nas asas, que promovem o ganho ou perda de altitude ou a mudança de direção de um avião. A manobra de aeronaves depende da eficiência dos flaps. Estas estruturas utilizam extensos sistemas hidráulicos que necessitam de bombas e atuadores, elevando custo e peso, dois pontos críticos no projeto de aeronaves.(LAGOUDAS, 2008)[35].

A Figura mostra as formas básicas dos flaps das asas, com o sistema hidráulico conectado ao atuador. Com o uso das LMF, as asas poderiam ter a configuração mostrada na Figura, o que possibilita o projeto de sistemas mais otimizados em relação ao custo, ao peso e à eficiência (ASUNDI, 1996)[75].



Figura 18: Modelo básico de uma asa de avião com flap (ASUNDI,1996)[75].

Os elevados níveis de ruído gerado por turbinas durante a decolagem e a aterrissagem são regulamentados em todo o mundo. Para reduzir este tipo de ruído, projetistas estão modificando a borda de saída da turbina dos aviões para uma forma em “V” ou triangular, com o intuito de misturar os gases de exaustão (Fig 19). Mais recentemente, componentes de LMF estão sendo utilizados para reduzir ainda mais os níveis de ruído em aviões conforme indica a Figura 19. Nesta aplicação as vigas de LMF dobram as bordas em “V” durante o voo a baixa altitude e baixa velocidade de voo, aumentando assim a mistura de gases, reduzindo o ruído gerado. Durante velocidades e altitudes de cruzeiro, os componentes de LMF esfriam, alinhado a forma de “V” que resulta no aumento do desempenho do motor. (MABE et al, 2006)[38].



Figura 19 – Avião da Boeing com turbina de geometria variável do elemento de descarga de gases (MABE et al, 2006)[38].

Um caso bastante conhecido foi à implementação de dispositivos de LMF na Basílica de San Francesco, em Assisi, na Itália. Houve um terremoto em 1997, que desconectou parte do telhado, após a restauração dispositivos de LMF foram incorporados à estrutura (CASTELLANO, 2000)[16]. Cada dispositivo foi dimensionado de modo a suportar as forças de tração e compressão, ele é constituído, internamente, por fios de NiTi(Níquel-Titânio) que trabalham sempre em tração no regime superelástico (MOTAVALLI, et AL 2009)[43]. O interessante do dispositivo é que caso haja um pequeno carregamento horizontal, provocado pelo vento, por exemplo, o dispositivo apresenta um comportamento linear e pequenos deslocamentos ocorrem, porém, caso ocorra um terremoto de magnitude significativa, a tensão crítica dos fios de LMF é excedida induzindo o início de transformação de fase. (FIP INDUSTRIALE, 2012)[25].



Figura 20: Dispositivos utilizados no telhado da Basílica de San Francesco (FIP INDUSTRIALE, 2012)[25].

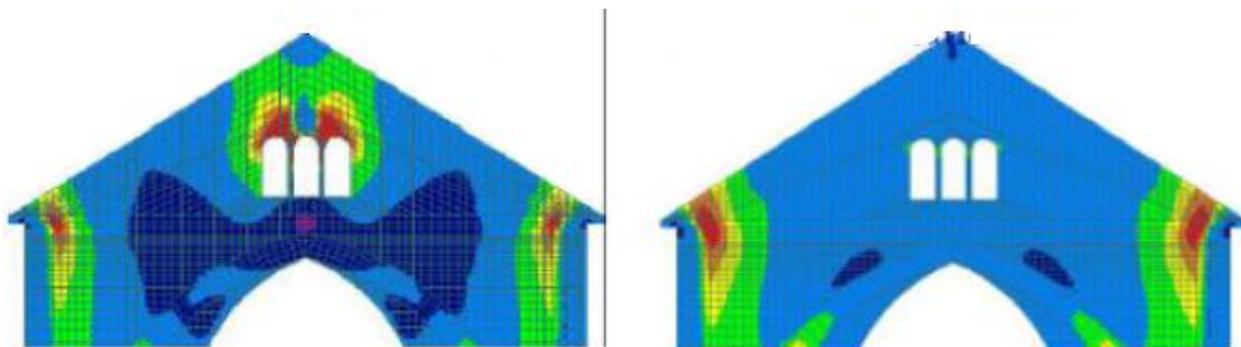


Figura 21: Modelos numéricos mostrando as distribuições de tensões antes e depois da intervenção, respectivamente.(BONCI, et al 2001)[76].

## **3.6 Absorvedores**

### **3.6.1 Introdução**

A maioria dos sistemas mecânicos está sujeito a excitações que induzem vibrações mecânicas. Geralmente, estas vibrações não são desejadas, pois podem provocar emissão de ruído, desgaste prematuro e falha por fadiga dos componentes.

Para proporcionar condições de operação adequadas para os equipamentos muitas vezes torna-se necessária a utilização de dispositivos para atenuar ou controlar as vibrações indesejáveis.

Uma solução bastante viável, relativamente fácil de empregar e de custo financeiro baixo, é o uso dos Absorvedores Dinâmicos de Vibração (ADVs).

### **3.6.2 Absorvedores Dinâmicos de Vibração**

Segundo RAO, o absorvedor dinâmico de vibração consiste em utilizar um incremento de massa e mola, com uma rigidez e amortecimento, afim com este sistema secundário (Absorvedor), atenuar as vibrações de um sistema primário.

A variedade de atuadores utilizados em sistemas de controle de vibração é muito grande, e o emprego do atuador depende principalmente do equipamento ou maquinário (variável de projeto) e das características do ambiente de instalação (umidade, atmosfera explosiva). Podem ser encontrados atuadores de movimento induzido por cilindros pneumático ou cilindros hidráulicos, motores elétricos, atuadores piezoeléticos, e mais recentemente atuadores de ligas com memória de forma.

### **3.6.3 Absorvedores com Liga de memória de forma**

As propriedades especiais das SMAs, pseudoelasticidade e quasiplasticidade, faz que esse tipo de material possua um enorme campo de aplicações e uma vasta área de pesquisas e desenvolvimento tecnológico. Ainda que em algumas áreas de conhecimento já existam diversas aplicações, como na área médica, segundo apresenta Machado & Savi (2002 e 2003), o estudo desses materiais carece de pesquisas, envolvendo, por exemplo, o desenvolvimento de modelos constitutivos representativos e a realização de simulações numéricas do comportamento estático e dinâmico das SMAs fiéis às observações experimentais.

Nos últimos anos, diversas aplicações têm explorado as características das SMAs seja por meio da capacidade dissipativa associada ao comportamento histerético no regime pseudoelástico, seja por meio das mudanças das propriedades mecânicas decorrentes das transformações de fase na memória de forma no regime quasiplástico.

### **3.6.4 Aplicação de ligas de memória de forma em molas helicoidais.**

Dentre os principais tipos de elementos em LMF disponíveis para fins de controle de vibrações, uma boa alternativa é a utilização de molas helicoidais confeccionadas em

material com memória de forma que apresenta variação de rigidez, quando há variação de temperatura. A relação entre a rigidez máxima e mínima nas molas de LMF pode chegar a 2,8 vezes (SRINIVASSAN, 2001)[59]. Diante deste quadro, uma possível alternativa de controle de vibrações é a utilização de dispositivos contendo molas helicoidais em LMF com o objetivo de mudar a frequência natural do sistema por meio de aquecimento/resfriamento das molas quando a frequência de excitação do equipamento estiver próxima da frequência natural.

Dentre as diversas aplicações dos materiais com memória de forma, o controle de vibrações em estruturas é um dos mais estudados (LAGOUDAS, 2008)[35].

A rigidez de uma mola helicoidal depende de parâmetros como geometria e do módulo de elasticidade do material envolvido na fabricação. No caso de molas feitas de LMF, o módulo de elasticidade depende das frações de martensita e austenita e podem variar com o aumento da temperatura. (KHAJEPOUR, et al 2011)[33].



Figura 22 – Mola de LMF Ni-Ti

## Capítulo 4

### 4. Esforços mecânicos em junções adesivas

#### 4.1 Juntas Adesivas

O estudo de juntas coladas é um assunto muito abordado, tendo na maioria das vezes como principais assuntos: as características geométricas, a resistência das juntas e os modelos analíticos ou numéricos.

Existem vários tipos de juntas coladas, podendo-se citar as juntas simples (single lap), juntas duplas (double lap) e juntas em ângulo (scarf joints) . (RIBEIRO, 2009)[51].

A Figura 22 apresenta diversos modelos de juntas. É através das juntas que cargas de diferentes partes do sistema são transferidas, por isso elas têm enorme importância. No caso de juntas adesivas, é preciso que uma meticulosa análise seja realizada, já que apresenta uma série de particularidades. Nessa análise é importante conhecer as formas como a junta pode falhar, é fundamental entender também as propriedades físico-químicas do adesivo.(HART-SMITH, 1987) [77].

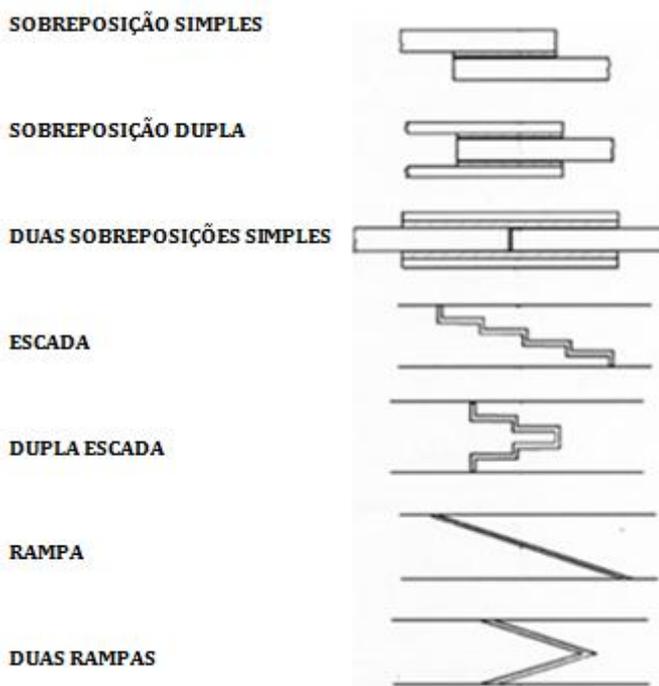


Figura 23: Tipos de juntas coladas.

## 4.2 Tipos de carregamentos em juntas unidas por adesão

Os tipos de esforços e distribuições de tensões no adesivo de uma junta adesiva estão diretamente correlacionados com o tipo de sollicitação a que as juntas estão sujeitas.

Os tipos de esforços mais comuns em camadas de adesivo são: tração; compressão; corte; arrancamento e clivagem.

### 4.2.1. Clivagem e Arrancamento

São esforços localizados, iniciados por falhas microscópicas, dando continuidade ao processo de ruptura. (VILLENAVE, 2005)[64].

A figura 24 descreve três modos possíveis de sollicitação por clivagem: abertura (modelo I), cisalhamento de acordo com comprimento (modelo II) e ruptura por cisalhamento de acordo com a amplitude do esforço (modelo III). (VILLENAVE, 2005)[64].

As tensões de arrancamento seguem o mesmo princípio, porém elas são geradas quando um ou ambos os substratos são flexíveis, podendo haver então ângulos de separação muito maiores que na clivagem.

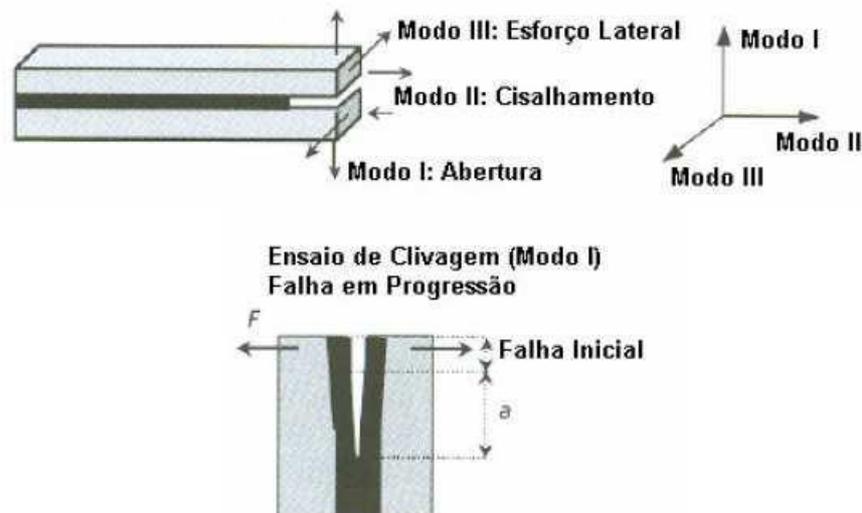


Figura 24 – Representação do esforço de clivagem.

As juntas apresentam diferentes comportamentos, em função das propriedades dos adesivos utilizados. Enquanto os adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis aos esforços de arrancamento, os adesivos dúcteis permitem uma plastificação do adesivo nas extremidades da ligação, transmitindo também os esforços para a zona interior do adesivo, o que leva a uma maior resistência da junta (SILVA, et al 2007)[21].

### 4.2.3. Compressão

Trata-se de aplicações com geometrias particularmente favoráveis, onde um substrato é forçado contra o outro, geralmente em aplicações de vedação. Embora muito utilizada, as junções que exigem este tipo de esforço raramente são modeladas ou testadas pelos seguintes motivos(SANTOS, 2007)[56]:

- Desenvolvimentos teóricos injustificáveis;
- Dificuldade em simular condições reais de aplicação;
- Dificuldade em analisar resultados devido à baixa amplitude das deformações e pelo esmagamento do substrato. (SANTOS, 2007)[56]:

### 4.2.4. Tração

Tensões de tração se desenvolvem quando as forças estão atuando perpendicularmente ao plano da junta e são uniformemente distribuídas ao longo da área colada. Na prática, a espessura da cola é de difícil controle e as forças quase nunca são exatamente axiais.

Dessa forma, as forças de tração são normalmente acompanhadas pelas de clivagem ou de arrancamento, que são geradas por essas imprecisões (SILVA, et al 2007)[21].

### 4.2.5. Cisalhamento

A força também é distribuída através da junção, de tal forma que todo o adesivo está trabalhando ao mesmo tempo, neste caso a força é paralela ao plano da linha de colagem. Assim a área colada é melhor usada, de forma econômica, e é mais resistente a falhas, devido as suas vantagens práticas, este tipo de junta é uma das mais usadas. Sob influência das tensões cisalhantes, o adesivo se deforma plasticamente; (RIBEIRO, 2009)[51].

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. (HART-SMITH, 1987)[77].

## Capítulo 5

### 5. Ensaio de propagação de fraturas

A análise dos parâmetros da adesão é feita através de ensaios de propagação da fratura, que permitem avaliar se os defeitos existentes serão suscetíveis para causar a ruptura nas juntas coladas.

Esses testes são classificados por três modos de propagação definidos na Teoria da Mecânica da Fratura. No modo I, a carga principal é a de tração aplicada normal ao plano de trinca, pelo qual tende a abrir a trinca. O modo II corresponde à carga de cisalhamento no plano e tende a deslocar uma face da trinca em relação à outra. E o modo III, no qual uma das extremidades da viga está apoiada no apoio superior, provocando uma abertura (modo I) e cisalhamento (modo II).

Para avaliar a qualidade das juntas coladas do caso em estudo foram realizados os ensaios, End notched flexure (ENF) e o Mixed Mode Flexure (MMF). Os ensaios escolhidos 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 e MMF em modo misto são identificadas as taxas críticas de liberação de energia ( $G_c$ ). (DE BARROS, 2009)[22].

#### 5.1 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, et al 2007)[21].

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.

Aplica-se uma força vertical no ponto médio da amostra que fica apoiada pelas extremidades. (CARDOSO, 2009)[13].

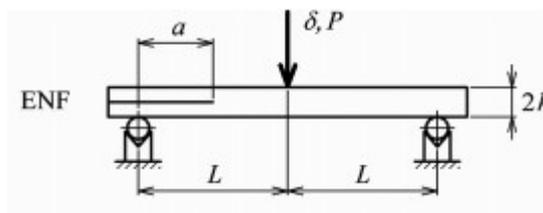


Figura 25 – Mola de LMF Ni-Ti

#### 5.2 Mixed-Mode Bending (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, et al 2008)[29].

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. 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, et al 2007)[21].

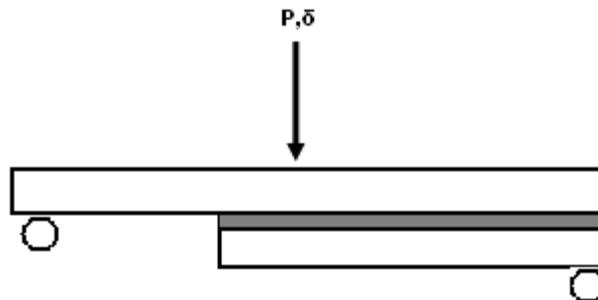


Figura 26 – Representação do ensaio MMF

### 5.3 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.

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 super cola e envolvidas com durex na extremidade das placas, onde se encontra a pré-fenda.

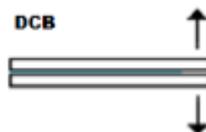


Figura 27: Ensaio DCB

## 5.4 Desenvolvimento dos ensaios e resultados

Para a realização dos ensaios de propagação de fissuras foram utilizadas chapas de LMF(NiTi SE 508) coladas a chapas de alumínio com adesivo Cianocrilato de metila (Superbonder, Henkel Loctite Ltd)). As amostras possuíam 126 mm de comprimento, 20 mm de largura e 1,5 mm de espessura. A distância entre os suportes foi de 100 mm nos ensaios ENF e MMF e as pré-fendas tinham 10 mm de comprimento.

Para os ensaios foi utilizada a máquina fabricada pela empresa “Instron”, modelo 5966, capacidade de 10 KN e espaço de teste vertical de 1256 mm. A velocidade de deslocamento da carga aplicada sobre as amostras foi de 5 mm / min.



Figura 28 – Ensaio ENF

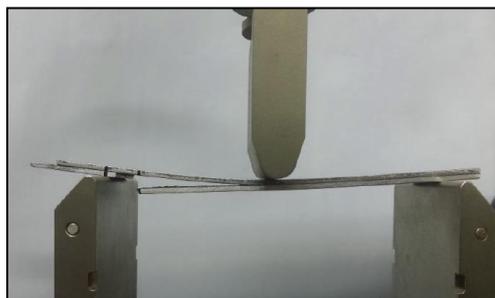


Figura 29 – Ensaio MMF

Através dos gráficos podemos observar as curvas de propagação da fissura obtidas, através do deslocamento causado pela força aplicada na junta, dos ensaios de ENF e MMF.

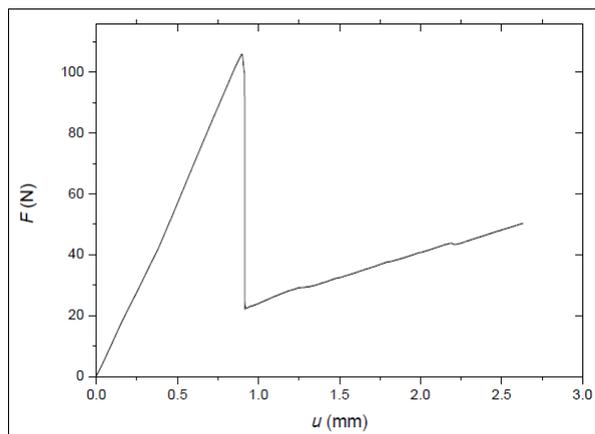


Figura 30 – Gráfico MMF: Força x Deslocamento

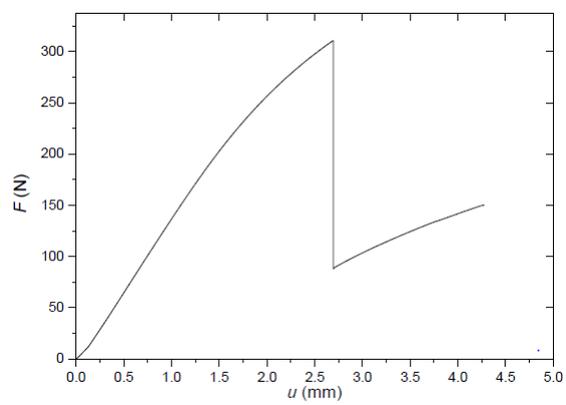


Figura 31 – Gráfico ENF: Força x Deslocamento

## Capítulo 6

### Análise Numérica

#### 6.1 Introdução

A análise numérica é o estudo que busca resultados numéricos de problemas das mais diferentes áreas, modelados matematicamente. Em geral, os algoritmos de métodos numéricos se dividem em diretos, recursivos e iterativos.

Esse projeto apresenta um estudo sobre a obtenção de curvas de propagação da fissura para prever o comportamento do conjunto colado durante os ensaios ENF e MMF. As curvas obtidas nesse trabalho são comparadas aos resultados dos ensaios feitos no laboratório.

Utilizou-se o método dos elementos finitos, para a análise de juntas coladas. Ele consiste na divisão do domínio de integração de um problema em um certo número de regiões pequenas de dimensões finitas, cujo conjunto é definido como “malha”. É feita a ligação dos elementos entre si por pontos nodais conhecidos como “nós”. Através do método dos elementos finitos é possível modelar qualquer geometria e condição de carregamento.

Com a utilização do Software “Ansys 15.0” foi possível fazer uma abordagem das condições de análise numérica impostas e também a determinação das propriedades coesivas dos adesivos considerados fundamentais para a modelação numérica.

Para simular determinadas situações aplicam-se as chamadas condições de contorno na estrutura, que são restrições, forças ou deslocamentos pré-estabelecidos na geometria. Através dessa análise podem ser calculadas as forças, as tensões, as deformações e os deslocamentos resultantes em toda a estrutura. As curvas força-deslocamento podem ser comparadas com valores experimentais obtidos através de ensaios destrutivos. As tensões e deformações podem ser usadas para prever a fratura da estrutura.

#### 6.2 Cálculo do comportamento de placas coladas em ensaios mecânicos

A Taxa Crítica de Libertação de Energia ( $G_c$ ) é responsável pela propagação de fenda e por simulação numérica podem ser obtidas as curvas de propagação de fissura, que permitem prever o comportamento da placa no ensaio.

Os cálculos algébricos serão realizados com os resultados encontrados nos ensaios MMF e ENF.

As placas coladas apresentam uma rigidez de interface infinita. Comportam-se como uma só placa na parte colada e como duas na parte da fissura. Com base na mecânica linear de ruptura, através da teoria clássica da resistência dos materiais, foram analisadas as expressões da flexibilidade e as curvas de propagação da fissura.

A teoria de flexão em vigas da mecânica linear da ruptura permite estudar o comportamento de duas placas coladas em um ensaio de flexão através de um cálculo analítico. A energia dissipada  $E_d$  é calculada em função do momento fletor  $M$ , do momento de inércia  $I$  e do módulo de Young  $E$ .

$$E_d = \frac{1}{2} * Pu = \frac{1}{2} \int M^2/EI \, dx$$

O comprimento inicial da fissura, representado por  $a$ , comina um estudo antes e depois da cabeça da fissura, considerando a junta como uma única placa de espessura dupla na parte colada. A energia  $G$  que faz a fissura avançar é a área entre duas curvas “força x deslocamento” do comprimento inicial  $a_1$  até o comprimento final  $a_2$ .

A largura das placas é representada por  $B$  e a espessura por  $h$ , ambas são consideradas iguais para as duas placas. O momento  $I$  é o momento de inércia de apenas uma das placas. As curvas são formadas com os pontos de propagação de fissura durante os ensaios.

$G$  é o valor da energia crítica necessária para a propagação da fissura, a energia também pode ser definida em função da flexibilidade da estrutura, representada por  $c$ .  $M$  é o momento fletor,  $B$  é a largura da placa, “ $a$ ” é a fissura,  $P$  a força, “ $u$ ” o deslocamento e  $L$  é a distância entre os apoios.

Com o cálculo analítico dos resultados encontrados nos ensaios mecânicos é possível fazer uma análise do comportamento das placas coladas através do modelo linear da ruptura. Com o conhecimento das zonas de estabilidade pode-se planejar uma propagação da fissura de forma estável, com a variação do comprimento da fissura inicial (BARROS, 2006).

### 6.2.1 Cálculos para o ensaio de MMF :

$$M = \left\{ -\frac{Px}{2} \text{ onde: } 0 \leq x \leq L/2 \text{ e } \frac{P(x-L)}{L} \text{ onde: } L/2 \leq x \leq L \right.$$

$$Ed = u = \int_0^L \frac{M^2}{2EI} dx$$

$$Ed = \frac{1}{2} \int_0^a \frac{M^2}{EI_1} dx + \frac{1}{2} \int_a^L \frac{M^2}{EI_2} dx$$

Para  $a \leq L/2$

$$Ed = \frac{1}{2EI_1} \int_0^a \frac{P^2 x^2}{4} dx + \frac{1}{2EI_2} \int_a^{L/2} \frac{P^2 x^2}{4} dx + \frac{1}{2EI_2} \int_{L/2}^L \frac{P^2 (x-L)^2}{4} dx$$

$$Ed = \frac{P^2 a^3}{24EI_1} + \frac{P^2}{8EI_2} \cdot \left[ \frac{\left(\frac{L}{2}\right)^3}{3} - \frac{a^3}{3} \right] + \frac{P^2}{8EI_2} \cdot \frac{L^3}{24}$$

$$Ed = \frac{P^2 a^3}{24EI_1} + \frac{P^2}{8EI_2} \cdot \left( \frac{3L^3}{72} - \frac{24a^3}{72} \right) + \frac{P^2 L^3}{192EI_2}$$

$$Ed = \frac{P^2}{192E} \left( \frac{8a^3}{I_1} + \frac{L^3}{I_2} - \frac{8a^3}{I_2} + \frac{L^3}{I_2} \right)$$

$$Ed = \frac{P^2}{96E} \left( \frac{4a^3}{I_1} + \frac{L^3}{I_2} - \frac{4a^3}{I_2} \right)$$

Igualando as equações para encontrar “u”

$$Ed = \frac{1}{2} Pu$$

$$\frac{P^2}{96E} \left( \frac{4a^3}{I_1} + \frac{L^3}{I_2} - \frac{4a^3}{I_2} \right) = \frac{1}{2} Pu$$

$$u = \frac{2P^2}{96EP} \left( \frac{4a^3}{I_1} + \frac{L^3}{I_2} - \frac{4a^3}{I_2} \right)$$

$$u = \frac{P}{48E} \left( \frac{4a^3}{I_1} + \frac{L^3}{I_2} - \frac{4a^3}{I_2} \right)$$

$$c = \frac{u}{P}$$

$$c = \frac{1}{48E} \left( \frac{4a^3}{I_1} + \frac{L^3}{I_2} - \frac{4a^3}{I_2} \right)$$

Derivando “c” em função de “a”

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dc}{da}$$

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{1}{48E} \left( \frac{12a^2}{I_1} + 0 + \frac{12a^2}{I_2} \right)$$

$$G = \frac{P^2}{96BE} \left( \frac{12a^2}{I_1} - \frac{12a^2}{I_2} \right)$$

$$G = \frac{P^2}{8BE} \left( \frac{a^2}{I_1} - \frac{a^2}{I_2} \right)$$

Isolando o “a”

$$a^2 = \frac{\left( \frac{G8BE}{P^2} \right)}{\left( \frac{1}{I_1} - \frac{1}{I_2} \right)} = \frac{\left( \frac{G8BE}{P^2} \right)}{\left[ \frac{I_2 - I_1}{I_1 I_2} \right]}$$

$$a = \sqrt{\left\{ \left( \frac{G8BE}{P^2} \right) \left[ \frac{I_2 - I_1}{I_1 I_2} \right] \right\}}$$

Substituindo “a” em “u”

$$a^3 = G \frac{8BE}{P^2} \left( \frac{I_1 I_2}{I_2 - I_1} \right) \sqrt{\left[ \frac{G8BE}{P^2} \left( \frac{I_1 I_2}{I_2 - I_1} \right) \right]}$$

$$a^3 = \frac{16GBE}{P^3} \left( \frac{I_1 I_2}{I_2 - I_1} \right) \sqrt{\left[ 2GBE \left( \frac{I_1 I_2}{I_2 - I_1} \right) \right]}$$

$$u = \frac{P}{48E} \left( \frac{4a^3}{I_1} + \frac{L^3}{I_2} - \frac{4a^3}{I_2} \right)$$

$$u = \frac{P}{48E} \left[ \left( \frac{4a^3 I_2 - 4a^3 I_1}{I_1 I_2} \right) + \left( \frac{L^3}{I_2} \right) \right]$$

$$u = \frac{P}{48E} \left[ 4a^3 \left( \frac{I_2 - I_1}{I_1 I_2} \right) + \left( \frac{L^3}{I_2} \right) \right]$$

Logo

$$u = \frac{P}{48E} \left[ 4 \left\{ \frac{16GBE}{P^3} \left( \frac{I_1 I_2}{I_2 - I_1} \right) \sqrt{\left[ 2GBE \left( \frac{I_1 I_2}{I_2 - I_1} \right) \right]} \right\} \left( \frac{I_2 - I_1}{I_1 I_2} \right) + \left( \frac{L^3}{I_2} \right) \right]$$

$$u = \frac{P}{12E} \frac{16GBE}{P^3} \sqrt{\left[ 2GBE \left( \frac{I_1 I_2}{I_2 - I_1} \right) \right]} + \frac{PL^3}{48EI_2}$$

Para  $a \geq L/2$

$$\begin{aligned}
 Ed &= 1/2EI_1 \int_0^L \frac{P^2 x^2}{4} dx + \frac{1}{2EI_1} \int_{L/2}^a P^2(x-L)^2/4 dx \\
 &\quad + 1/2EI_2 \int_a^L P^2(x-L)^2/4 dx \\
 Ed &= \frac{1}{2EI_1} \frac{P^2}{4} \left(\frac{L}{2}\right)^3 + \frac{1}{2EI_1} \frac{P^2}{4} \left[ \frac{a^3}{3} - a^2L + L^2a - \frac{7L^3}{24} \right] - \frac{1}{2EI_2} \frac{P^2}{4} \left[ \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{3} \right] \\
 Ed &= \frac{P^2}{8EI_1} \left[ \frac{L^3}{24} + \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + L^2a - \frac{7L^3}{24} \right) - \frac{P^2}{8EI_2} \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{3} \right) \right] \\
 Ed &= \frac{P^2}{8EI_1} \left[ -\frac{L^3}{24} + \frac{a^3}{3} - a^2L + L^2a \right] - \frac{P^2}{8EI_2} \left[ \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{3} \right] \\
 Ed &= \frac{P^2}{8E} \left[ \frac{1}{I_1} \left( -\frac{L^3}{4} + \frac{a^3}{3} - a^2L + L^2a \right) - \frac{1}{I_2} \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{3} \right) \right]
 \end{aligned}$$

Igualando as equações para encontrar “u”

$$Ed = \frac{1}{2}Pu$$

$$\frac{P^2}{8E} \left[ \frac{1}{I_1} \left( -\frac{L^3}{4} + \frac{a^3}{3} - a^2L + L^2a \right) - \frac{1}{I_2} \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{3} \right) \right] = \frac{1}{2}Pu$$

$$u = \frac{P}{4E} \left[ \left( \frac{1}{I_1} \right) \left( -\frac{L^3}{4} + \frac{a^3}{3} - a^2L + L^2a \right) - \left( \frac{1}{I_2} \right) \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{3} \right) \right]$$

$$c = \frac{u}{P}$$

$$c = \left( \frac{1}{4E} \right) \left[ \frac{1}{I_1} \left( -\frac{L^3}{4} + \frac{a^3}{3} - a^2L + L^2a \right) - \frac{1}{I_2} \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{3} \right) \right]$$

Derivando em função de “a”

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dc}{da}$$

$$G = \frac{P^2}{2B4E} \left[ \frac{1}{I_1} \left( -\frac{L^3}{4} + \frac{a^3}{3} - a^2L + L^2a \right) - \frac{1}{I_2} \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{3} \right) \right]$$

$$G = \frac{P^2}{8BE} \left[ \frac{1}{I_1} (a^2 - 2aL + L^2) - \frac{1}{I_2} (a^2 - 2aL + L^2) \right]$$

$$G = \frac{P^2}{8BE} \left[ \frac{1}{I_1} (a-L)^2 - \frac{1}{I_2} (a-L)^2 \right]$$

Isolando o “a”

$$(a - L) = \frac{\left(\frac{G8BE}{P^2}\right)}{\left(\frac{1}{I_1} - \frac{1}{I_2}\right)}$$

$$a = \sqrt{\left[\frac{G8BE}{P^2} \left(\frac{I_1 I_2}{I_1 - I_2}\right)\right]} + L$$

$$a = a' + L$$

Substituindo “a” em “u”

$$u = \frac{P}{4E} \left[ \frac{1}{I_1} \left( -\frac{L^3}{4} + \frac{(a'+L)^3}{3} - (a'+L)^2 L + L^2(a'+L) \right) - \frac{1}{I_2} \left( \frac{(a'+L)^3}{3} - (a'+L)L + (a'+L)L^2 - \frac{L^3}{3} \right) \right]$$

$$u = \frac{P}{4E} \left\{ \frac{1}{I_1} \left[ -\frac{L^3}{4} + \frac{a'^3 + 3a'^2 L + 3a' L^2 + L^3}{3} - (a'^2 + 2a' L + L^2)L + L^2(a' + L) \right] \right\}$$

$$- \frac{1}{I_2} \left[ \frac{a'^3 + 3a'^2 L + 3a' L^2 + L^3}{3} - (a' L + L^2) + a' L^2 + L^3 - \frac{L^3}{3} \right]$$

$$u = \left( \frac{P}{4E} \right) \left[ \frac{1}{I_1} \left( \frac{-\frac{L^3}{4} + a^3}{3} + \frac{L^3}{3} \right) - \frac{1}{I_2} \left( \frac{-\frac{L^3}{3} + a^3}{3} + \frac{L^3}{3} \right) \right]$$

$$u = \frac{P}{4E} \left[ \frac{1}{I_1} \left( \frac{L^3}{12} + a^3 \right) - \frac{1}{I_2} \left( \frac{a^3}{3} \right) \right]$$

$$u = \left( \frac{P}{4EI_1} \right) \left( \frac{L^3}{12} \right) + \left( \frac{P}{4EI_1} \right) \left( \frac{a^3}{3} \right) - \left( \frac{P}{4EI_2} \right) \left( \frac{a^3}{3} \right)$$

$$u = \left( \frac{PL^3}{48EI_1} \right) + \left( \frac{Pa^3}{12EI_1} \right) - \left( \frac{Pa^3}{12EI_2} \right)$$

$$u = \left( \frac{PL^3}{48EI_1} \right) + \left( \frac{P}{12E} \right) \left( \frac{a^3}{I_1} - \frac{a^3}{I_2} \right)$$

$$u = \frac{PL^3}{48EI_1} + \frac{P}{12E} \left\{ \left[ \sqrt{\frac{G8BE}{P^2} \left[ \frac{I_1 I_2}{I_1 - I_2} \right]} \right]^3 \left[ \frac{I_2 - I_1}{I_1 I_2} \right] \right\}$$

$$u = \frac{PL^3}{48EI_1} + \frac{P}{12E} \left\{ \left( \frac{G8BE}{P^2} \right) \frac{I_1 I_2}{I_1 - I_2} \sqrt{\left[ \left( \frac{G8BE}{P^2} \right) \left( \frac{I_1 I_2}{I_1 - I_2} \right) \right]} \left( \frac{I_2 - I_1}{I_1 I_2} \right) \right\}$$

$$u = \frac{PL^3}{48EI_1} + \left( \frac{G4B}{3P^2} \right) \sqrt{\left[ 2G8BE \left( \frac{I_1 I_2}{I_1 - I_2} \right) \right]}$$

### 6.2.2 Cálculo para o ensaio de ENF:

$$M = \left\{ -\frac{Px}{2} \text{ onde: } 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \text{ e } \frac{P(x-L)}{L} \text{ onde: } \frac{L}{2} \leq x \leq L \right.$$

$$Ed = u = \int_0^L \frac{M^2}{2EI} dx$$

$$Ed = \frac{1}{2} \int_0^a \frac{M^2}{E_1 I_1} dx + \frac{1}{2} \int_0^a \frac{M^2}{E_2 I_2} dx + \frac{1}{2} \int_a^L \frac{M^2}{E_1 I_2} dx$$

Para  $a \leq L/2$

$$Ed = \frac{1}{2E_1 I_1} \int_0^a \frac{P^2 x^2}{4} dx + \frac{1}{2E_2 I_2} \int_0^a \frac{P^2 x^2}{4} dx + \frac{1}{2E_1 I_2} \int_a^{\frac{L}{2}} \frac{P^2 x^2}{4} dx$$

$$+ \frac{1}{2E_1 I_2} \int_{L/2}^L \frac{P^2 (x-L)^2}{4} dx$$

$$Ed = \frac{1}{2E_1 I_1} \frac{P^2}{4} \left[ \frac{L^3}{3} - \frac{7L^3}{24} \right]$$

$$Ed = \frac{P^2 a^3}{24I_1} \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) + \frac{P^2}{8E_1 I_2} \left[ \left( \frac{L^3}{24} - \frac{a^3}{3} \right) + \frac{L^3}{24} \right]$$

$$Ed = \frac{P^2 a^3}{24I_1} \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) + \frac{P^2}{8E_1 I_2} \left( \frac{L^3}{12} - \frac{a^3}{3} \right)$$

Igualando as equações para encontrar “u”

$$Ed = \frac{1}{2} Pu$$

$$\left( \frac{P^2 a^3}{24I_1} \right) \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) + \frac{P^2}{8E_1 I_2} \left( \frac{L^3}{12} - \frac{a^3}{3} \right) = \frac{1}{2} Pu$$

$$u = \left( \frac{Pa^3}{12I_1} \right) \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) + \left( \frac{P}{4E_1 I_2} \right) \left( \frac{L^3}{12} - \frac{a^3}{3} \right)$$

$$c = \frac{u}{P}$$

$$c = \left( \frac{a^3}{12I_1} \right) \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) + \left( \frac{1}{4E_1 I_2} \right) \left( \frac{L^3}{12} - \frac{a^3}{3} \right)$$

Derivando “c” em função de “a”

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dc}{da}$$

$$G = \left( \frac{P^2}{2B} \right) \left( \frac{a^2}{4I_1} \right) \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) + \left( \frac{1}{4E_1 I_2} \right) (0 - a^2)$$

$$G = \left( \frac{P^2 a^2}{8BI_1} \right) \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) - \left( \frac{a^2}{4E_1 I_2} \right) \left( \frac{P^2}{2B} \right)$$

$$G = \frac{P^2 a^2}{8BI_1} \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) - \frac{P^2 a^2}{8BE_1 I_2}$$

$$G = \frac{a^2 P^2}{8B} \left[ \left( \frac{1}{I_1} \cdot \frac{E_2 + E_1}{E_1 E_2} \right) - \left( \frac{1}{E_1 I_2} \right) \right]$$

Isolando o “a”

$$a = \sqrt{\frac{\frac{8BG}{P^2}}{\left[ \left( \frac{1}{I_1} \cdot \frac{E_2 + E_1}{E_1 E_2} \right) - \left( \frac{1}{E_1 I_2} \right) \right]}}$$

$$a = \left( \frac{2}{P} \right) \sqrt{\left\{ \frac{2GB}{\left[ \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \frac{1}{I_1} - \left( \frac{1}{E_1 I_2} \right) \right]} \right\}}$$

$$a = \left( \frac{2}{P} \right) \sqrt{\left[ \frac{(2GBE_1 I_1 I_2 E_2)}{(E_2 I_2 + E_1 I_1 - E_2 I_1)} \right]}$$

Substituindo “a” em “u”

$$u = \frac{P}{12} \left\{ \left( \frac{8}{P^3} \right) 2GB \left[ \frac{E_1 I_1 I_2 E_2}{E_2 I_2 + E_1 I_1 - E_2 I_1} \right] \sqrt{\left[ \frac{2GBE_1 I_1 I_2 E_2}{E_2 I_2 + E_1 I_1 - E_2 I_1} \right]} \left[ \frac{E_2 I_2 + E_1 I_1 - E_2 I_1}{E_1 I_1 I_2 E_2} \right] + \frac{L^3}{4E_1 I_2} \right\}$$

$$u = \left( \frac{P}{12} \right) \left\{ \left( \frac{8}{P^3} \right) 2GB \sqrt{\left[ \frac{2GBE_1 I_1 I_2 E_2}{E_2 I_2 + E_1 I_1 - E_2 I_1} \right]} + \frac{L^3}{4E_1 I_2} \right\}$$

$$u = \left( \frac{4GB}{3P^2} \right) \sqrt{\left[ \frac{2GBE_1 I_1 I_2 E_2}{E_2 I_2 + E_1 I_1 - E_2 I_1} \right]} + \left( \frac{PL^3}{48E_1 I_2} \right)$$

Para  $a \geq L/2$

$$Ed = \frac{1}{2E_1 I_1} \int_0^{L/2} \frac{P^2 x^2}{4} dx + \frac{1}{2E_2 I_1} \int_0^{L/2} \frac{P^2 x^2}{4} dx + \frac{1}{2E_1 I_1} \int_{L/2}^a \frac{P^2 (x-L)^2}{4} dx$$

$$+ \frac{1}{2E_2 I_1} \int_{L/2}^a \frac{P^2 (x-L)^2}{4} dx + \frac{1}{2E_1 I_2} \int_a^L \frac{P^2 (x-L)^2}{4} dx$$

$$\begin{aligned}
Ed &= \frac{1}{2E_1I_1} \frac{P^2}{4} \frac{\left(\frac{L}{2}\right)^3}{3} + \frac{1}{2E_2I_1} \frac{P^2}{4} \frac{\left(\frac{L}{2}\right)^3}{3} + \frac{1}{2E_1I_1} \frac{P^2}{4} \left[ \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + L^2a \right) - \left( \frac{7L^3}{24} \right) \right] \\
&\quad + \frac{1}{2E_2I_1} \frac{P^2}{4} \left[ \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + L^2a \right) - \left( \frac{7L^3}{24} \right) \right] \\
&\quad + \frac{1}{2E_1I_2} \frac{P^2}{4} \left[ \left( \frac{L^3}{3} \right) - \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + L^2a \right) \right] \\
Ed &= \left( \frac{P^2}{8E_1I_1} \right) \left( \frac{L^3}{24} \right) + \left( \frac{P^2}{8E_2I_1} \right) \left( \frac{L^3}{24} \right) + \left( \frac{P^2}{8E_1I_1} \right) \left[ \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{24} + \frac{L^3}{4} - \frac{L^3}{2} \right] \\
&\quad + \left( \frac{P^2}{8E_2I_1} \right) \left[ \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{24} + \frac{L^3}{4} - \frac{L^3}{2} \right] \\
&\quad + \left( \frac{P^2}{8E_2I_2} \right) \left[ \frac{L^3}{3} - \frac{a^3}{3} + a^2L - aL^2 \right] \\
Ed &= \left( \frac{P^2}{8} \right) \left[ \frac{1}{E_1I_1 \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{4} \right)} \right. \\
&\quad \left. + \left( \frac{1}{E_2I_1} \right) \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{4} \right) - \left( \frac{1}{E_1I_2} \right) \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{3} \right) \right]
\end{aligned}$$

Igualando as equações para encontrar “u”

$$\begin{aligned}
Ed &= \frac{1}{2} Pu \\
u &= \left( \frac{P}{4} \right) \left[ \left( \frac{1}{E_1I_1} \right) \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{4} \right) \right. \\
&\quad \left. + \left( \frac{1}{E_2I_1} \right) \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{3} \right) - \left( \frac{1}{E_1I_2} \right) \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{3} \right) \right] \\
c &= \frac{u}{P} \\
c &= \left( \frac{1}{4} \right) \left[ \left( \frac{1}{E_1I_1} \right) \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{4} \right) \right. \\
&\quad \left. + \left( \frac{1}{E_2I_1} \right) \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{3} \right) - \left( \frac{1}{E_1I_2} \right) \left( \frac{a^3}{3} - a^2L + aL^2 - \frac{L^3}{3} \right) \right]
\end{aligned}$$

Derivando “c” em função de “a”

$$\begin{aligned}
G &= \frac{P^2}{2B} \frac{dc}{da} \\
G &= \left( \frac{P^2}{8B} \right) \left[ \left( \frac{1}{E_1I_1} \right) (a^2 - 2aL + L^2) + \left( \frac{1}{E_2I_1} \right) (a^2 - 2aL + L^2) - \left( \frac{1}{E_1I_2} \right) (a^2 - 2aL + L^2) \right]
\end{aligned}$$

Isolando o “a”

$$(a - L)^2 = \left(\frac{8GB}{P^2}\right) \left[\frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{E_2 I_2 + E_1 I_2 - E_2 I_1}\right]$$

$$a = a' + L$$

Substituindo “a” em “u”

$$u = \left(\frac{P}{4}\right) \left[\left(\frac{a'^3}{3}\right) + a'^2 L + a' L^2 + \left(\frac{L^3}{3}\right) - a'^2 L - 2a' L^2 - L^3 + a' L^2 +^3 - \frac{L^3}{4}\right] + \left(\frac{1}{E_2 I_1}\right) \left(\frac{a'^3}{3} + \frac{L^3}{12}\right) - \left(\frac{1}{E_1 I_2}\right) \left(\frac{a'^3}{3}\right)$$

$$u = \left(\frac{P}{12}\right) \left[ a'^3 \left( \frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_1} - \frac{1}{E_1 I_2} \right) \right] + \left( \frac{P L^3}{48 E_2 I_1} \right)$$

$$a' = \frac{2}{P} \sqrt{\left\{ 2GB \left[ \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{E_2 I_2 + E_1 I_2 - E_2 I_1} \right] \right\}}$$

$$u = \frac{P L^3}{48 E_2 I_1} + \left(\frac{P}{L}\right) \left(\frac{8}{P^3}\right) (2GB) \sqrt{\frac{2GB E_1 I_1 E_2 I_2}{E_2 I_2 + E_1 I_2 - E_2 I_1}}$$

$$u = \left(\frac{P L^3}{48 E_2 I_1}\right) + \left(\frac{4GB}{3P^2}\right) \sqrt{\frac{2GB E_1 I_1 E_2 I_2}{E_2 I_2 + E_1 I_2 - E_2 I_1}}$$

### 6.2.3 Energia Crítica

Valores a serem substituídos nas equações u:

Largura das placas = B = 20 mm

Espessura das placas = h = 1,5 mm

Módulo de elasticidade da LMF = E1 = 53

Módulo de elasticidade do alumínio = E2 = 64

Momento de inércia da LMF = I1

$$I_1 = B \cdot \frac{H^3}{12} = 20 \cdot \frac{(1,5)^3}{12} = 5,625 \text{ mm}^4$$

Momento de inércia do alumínio com a LMF = I2

Primeiro localiza-se a linha neutra onde a tensão é zero para o cálculo de  $\bar{Y}$ .

$\bar{Y}$  é a distância de uma linha base (o eixo neutro) ao centro da área A

$$\bar{Y} = \left(\frac{h}{2}\right) \cdot B \cdot h$$

$$\bar{Y} = \frac{\left[\left(\frac{1,5}{2}\right) \cdot 20,1,5 + 3 \cdot \left(\frac{1,5}{2}\right) \cdot 16,6,1,5\right]}{16,6,1,5 + 20,1,5}$$

$$\bar{Y} = \frac{1,5^2(10 + 24,9)}{36,6,1,5} = \frac{1,5 \cdot 34,9}{36,6} = 1,43$$

$$I_2 = \left(\frac{20,1,5^3}{12}\right) + 20,1,5 \cdot \left[1,43 - \left(\frac{1,5}{2}\right)\right]^2 + \frac{16,6,1,5^3}{12} + 16,6,1,5 \cdot \left[1,43 - \left(\frac{3,1,5}{2}\right)\right]^2$$

$$= 40,91 \text{ mm}^4$$

Pode-se encontrar o valor de G gerando gráficos com as equações de “u” calculadas. Onde os valores de P e G são variáveis, com os valores testados é verificada a aproximação com os resultados encontrados nos gráficos dos ensaios mecânicos.

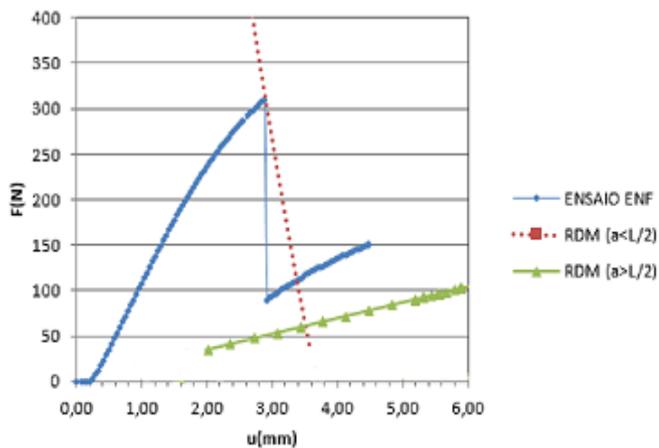


Figura 32: Curvas de propagação da fissura ensaio ENF. ( $G=0,04\text{N/mm}$ )

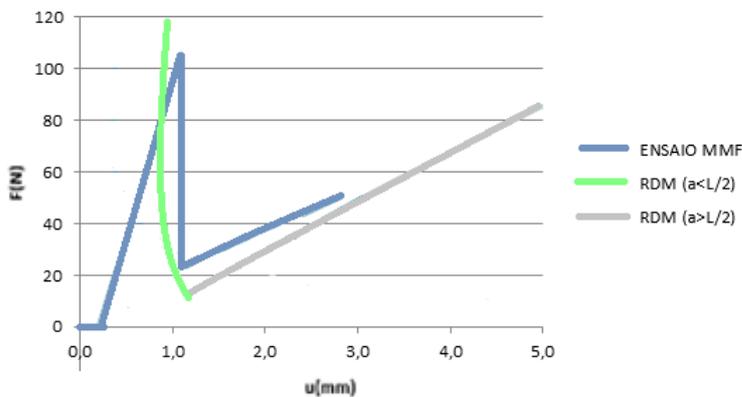


Figura 33: Curvas de propagação da fissura ensaio MMF. ( $G=0,95\text{N/mm}$ )

### 6.3 Análise dos ensaios de aderência

Ensaio de fratura foram realizados com objetivo de obter parâmetros da interface adesiva, para assim realizar uma comparação experimental e numérica.

No Software Ansys foi feita a simulação numérica dos ensaios experimentais, utilizando a mesma geometria e condições de contorno dos ensaios (Figura 30). O objetivo foi obter a curva força x deslocamento no programa o mais próximo possível da obtida no ensaio experimental, e dessa forma obter os valores das propriedades do adesivo necessárias para a representação da zona coesiva no Ansys.

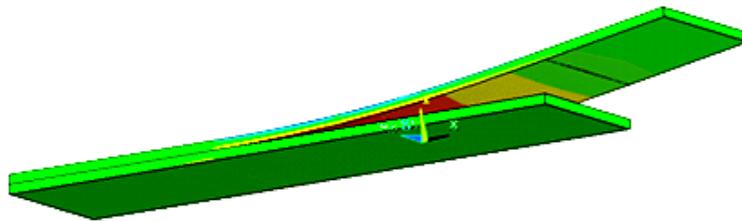


FIGURA 34: Simulação no software Ansys do ensaio MMF.

As curvas obtidas na simulação comparadas com as obtidas no ensaio seguem na Figura 31.

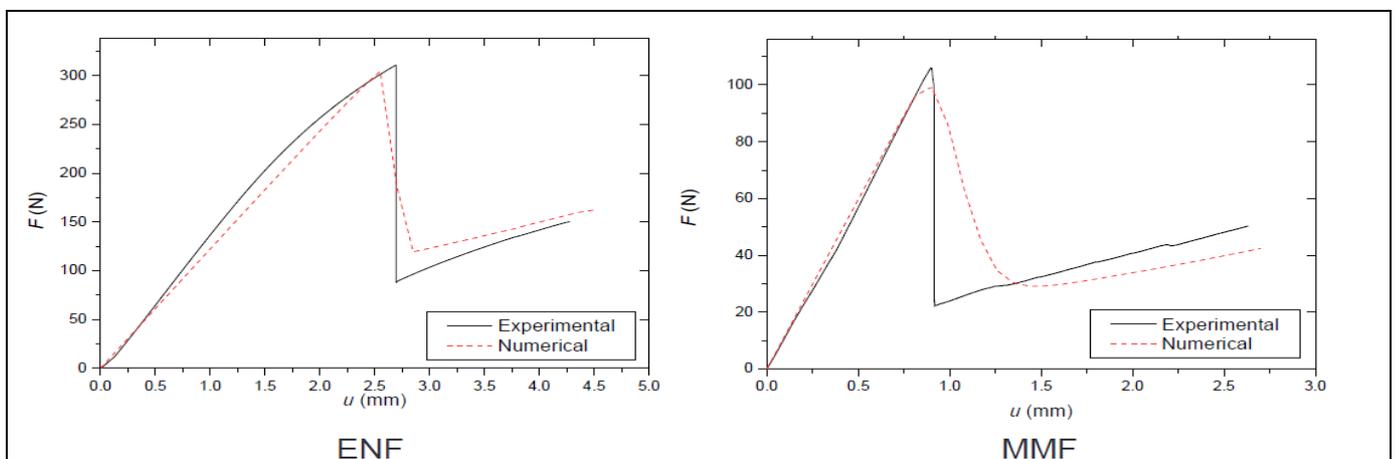


FIGURA 35: Comparação das curvas obtidas nos ensaios experimentais e numéricos.

É evidente que devido a diversos fatores inerentes à simulação numérica, as duas curvas não poderiam ser idênticas. Porém, os valores obtidos na simulação, especialmente os valores máximos de força atingida, estão próximos o suficiente da análise experimental, podendo ser utilizados para simular outras geometrias e possíveis aplicações envolvendo LMF e alumínio no software Ansys.

As propriedades atribuídas aos materiais utilizados e as propriedades do adesivo obtidas no ensaio numérico seguem conforme tabela abaixo:

As propriedades atribuídas aos materiais utilizados e as propriedades do adesivo obtidas no ensaio numérico seguem conforme tabela abaixo:

TABELA 1: Propriedades dos materiais utilizados na simulação.

Material	Propriedade	Valor :
Alumínio	Módulo de elasticidade	64 GPa
	Coefficiente de poisson	0.32
Liga com Memória de Forma	Tensão de início da transformação de fase	297 MPa
	Tensão final da transformação de fase	772 MPa
	Tensão de início da inversão da transformação de fase	306 MPa
	Tensão final da inversão da transformação de fase	78 MPa
Adesivo	Tensão normal máxima	13 MPa
	Distância do contato na conclusão da descolagem	$2.0e^{-6}m$
	Tensão máxima de cisalhamento	8.5 MPa
	Deslizamento tangencial na conclusão da descolagem	$5.0e^{-5}m$

## 6.4 Objeto de estudo

O projeto nesse trabalho aborda a análise numérica, através do Software Ansys, de um absorvedor de vibração, que é um atuador de liga de memória de forma colado a uma junta de expansão de alumínio da empresa Veda Technik, modelo 432.

O estudo consistiu em um levantamento sobre colagem e aplicações específicas de LMF, de forma a encontrar uma geometria ideal aonde a LMF pudesse ser colada continuando a exercer suas propriedades. Decidiu-se abordar juntas de dilatação no projeto, por ser algo que necessita de frequente manutenção, trata-se de um espaço entre duas partes de uma estrutura, de forma que ambas possam se movimentar sem transmitir esforços entre elas. Se esse espaçamento tiver presença de material rígido ou que tiver suas propriedades de elasticidade alteradas, o mesmo produzirá tensões não desejáveis na estrutura, impedindo ou restringindo o movimento decorrente da dilatação térmica previsto para a mesma, originando assim tensões superiores aquelas a serem absorvidas. Poderá então ocasionar fissuras nas lajes adjacentes à junta, ocasionando a possibilidade de se propagar às vigas e pilares próximos. Servem ainda, para promover a vedação contra a passagem de águas pluviais e materiais sólidos, que podem levar à deterioração de elementos da estrutura.



Figura 36: Esquemática da estrutura de uma junta de dilatação

As estruturas de concreto com grandes dimensões, sujeitas a variações de temperatura, necessitam de juntas de dilatação para absorverem os seus movimentos de dilatação e de contração. A separação entre blocos de edifícios, pontes, viadutos etc., são locais onde as juntas se fazem necessárias para acomodar movimentos diferenciados de assentamento de fundações, além dos movimentos térmicos de dilatação e de contração.

A dilatação, devida ao aumento de temperatura, opõe-se, às vezes, a contração, devida à perda de umidade e assim se produzem grandes tensões internas. As juntas de dilatação nas obras constituem, pois, um ponto crítico permanente, principalmente por não serem corretamente projetadas, pela falta de conhecimentos específicos de desempenho dos materiais em vedação das juntas.

Considerando que as juntas de dilatação são elementos mais frágeis do que as pontes e os viadutos, elas precisam ser inspecionadas com frequência evitando um custo maior com falta de manutenção e o risco de interdição das obras por algum acidente provocado.



FIGURA 37: Corrosão devido a entrada de água pelas aberturas das juntas.



FIGURA 38: Fissuras nas juntas de dilatação de uma ponte.

### 6.4.1 Geometria da simulação

Foi escolhida uma junta de dilatação de solo sísmica toda em alumínio para comprovar a eficácia da LMF, sendo utilizado adesivo para a união dos dois. Foi utilizado como base o modelo 423 do fabricante Veda Technik. Trata-se de uma junta de solo interior ou exterior até 100 mm adaptada para tráfego pesado de carros elevatórios de pneus, empilhadoras e tráfego intenso de veículos ligeiros. As dimensões seguem conforme tabela do fabricante e a referência utilizada no projeto foi a 6.08-110, com 138 mm de altura.



FIGURA 39: Junta de Dilatação de solo sísmica, utilizável para junta de solo interior ou exterior até 100 mm.

As duas peças superiores em alumínio deslizam entre elas permitindo assim absorver os movimentos de dilatação. Utilizável para todo o tipo de acabamento: betão, chapa, mosaico

É um composto perfilado com cantos em alumínio pré-perfurado.



FIGURA 40: Dilatação da Junta.

**TABELA 2:** Dimensões da junta modelo 432 do fabricante Veda Technik [69].

Referências	 Abertura junta (mm)	 Movimentos (mm)	 Largura visível (mm)	 Largura total (mm)	 Altura (mm)
6.08-030	30	± 5	55	150	15 / 20 / 25 / 35 / 43 / 48 / 58 / 63 / 68 / 88 / 108 / 138
6.08-050	50	± 10	75	170	15 / 20 / 25 / 35 / 43 / 48 / 58 / 63 / 68 / 88 / 108 / 138
6.08-070	70	± 12,5	95	190	15 / 20 / 25 / 35 / 43 / 48 / 58 / 63 / 68 / 88 / 108 / 138
6.08-090	90	± 20	115	210	25 / 35 / 43 / 48 / 58 / 63 / 68 / 88 / 108 / 138
6.08-110	110	± 30	135	230	25 / 35 / 43 / 48 / 58 / 63 / 68 / 88 / 108 / 138

A geometria do atuador de LMF foi projetada para ter uma área grande de contato com as chapas de alumínio, garantindo a colagem do adesivo, e para ter uma área propícia à deformação, capaz de promover a transformação de fase e o comportamento de histerese característico. Por isso, foi decidido por um atuador em formato de “S”, onde se tem duas

superfícies planas com área considerável para colagem, uma outra área plana e duas áreas arredondadas, em forma de arco, onde ocorrerá deformação.

O raio máximo dos arcos é dependente da geometria da junta, foi simulado no valor de 25 mm. A altura da área colada foi de 113 mm e após inúmeros testes, o comprimento, largura e espessura do atuador de LMF que melhor atendeu ao projeto foi de 170 mm, 75 mm e 0,75 mm respectivamente. Vale ressaltar que quanto maior a espessura da chapa de LMF, mais difícil será sua deformação e transformação de fase, aumentando assim, a carga que o adesivo deve suportar. O comprimento da chapa afeta diretamente a área colada, e consequentemente na resistência do adesivo. Também interfere na área de deformação, aumentando a área de resistência da LMF, deverá então ser projetada uma geometria que consiga atender melhor a esses requisitos sem prejudicar as propriedades da LMF e a zona de contato.

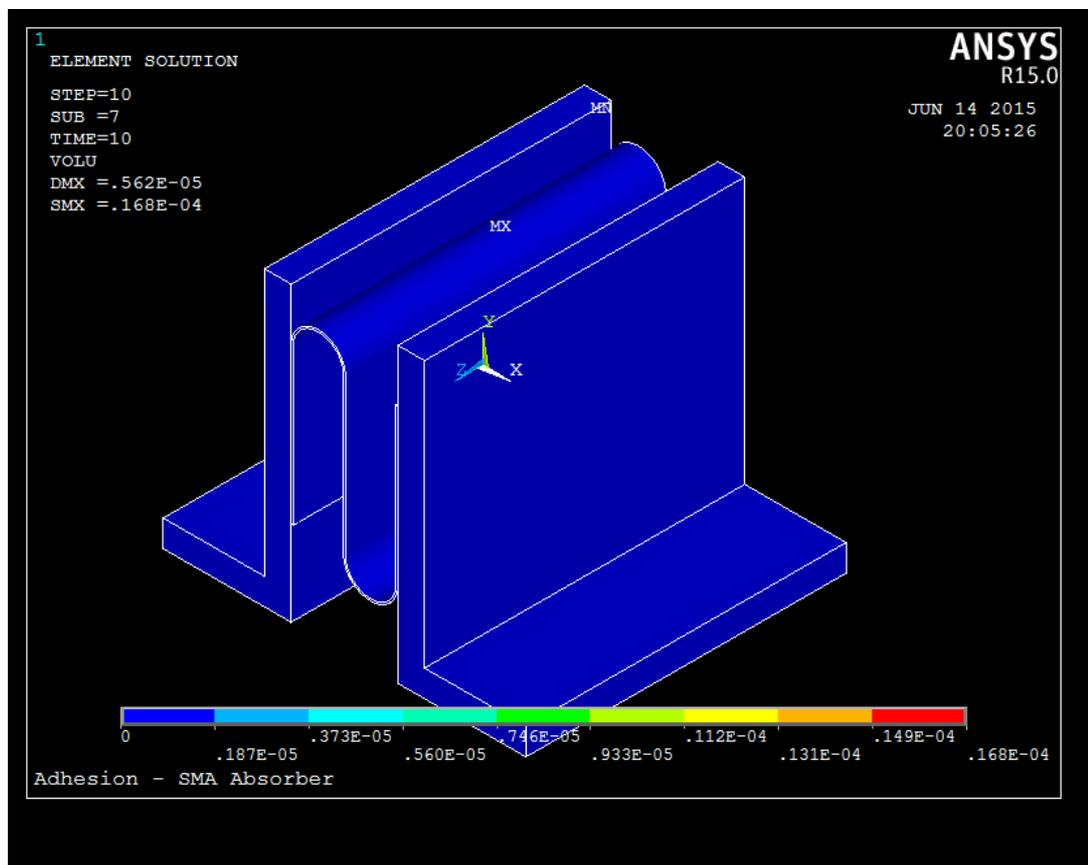


Figura 41: Vista em perspectiva da geometria no software Ansys.

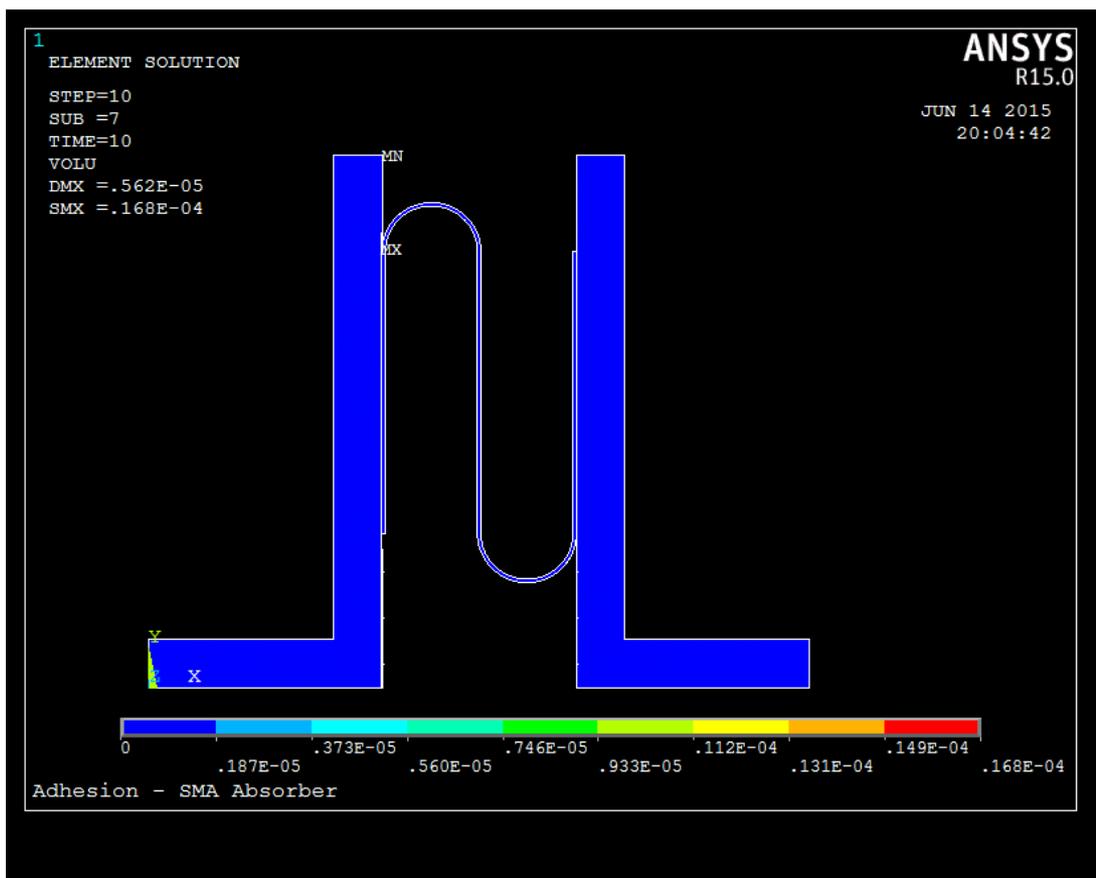


Figura 42: Vista frontal em detalhe evidenciando o absorvedor em forma de S.

### 6.4.2 Geometria da simulação

O elemento SOLID186 é um elemento tridimensional (3D) de segunda ordem e tem 20 nós com a capacidade de deslocamento quadrática. Este elemento possui em cada nó três graus de liberdade translacional e suporta o modelo de material de SMA, plasticidade, hiperelasticidade, fluência, grandes deflexões e deformações (ANSYS, 2012) [78].

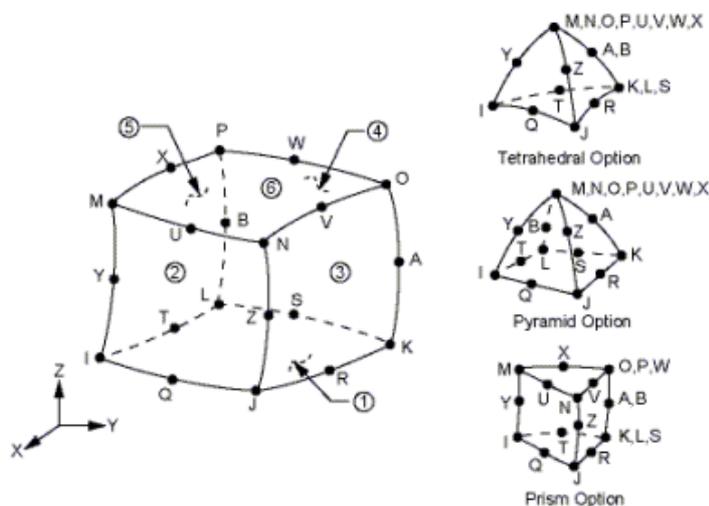


FIGURA 43: Elemento finito SOLID186 e suas formas possíveis (ANSYS, 2012)[78].

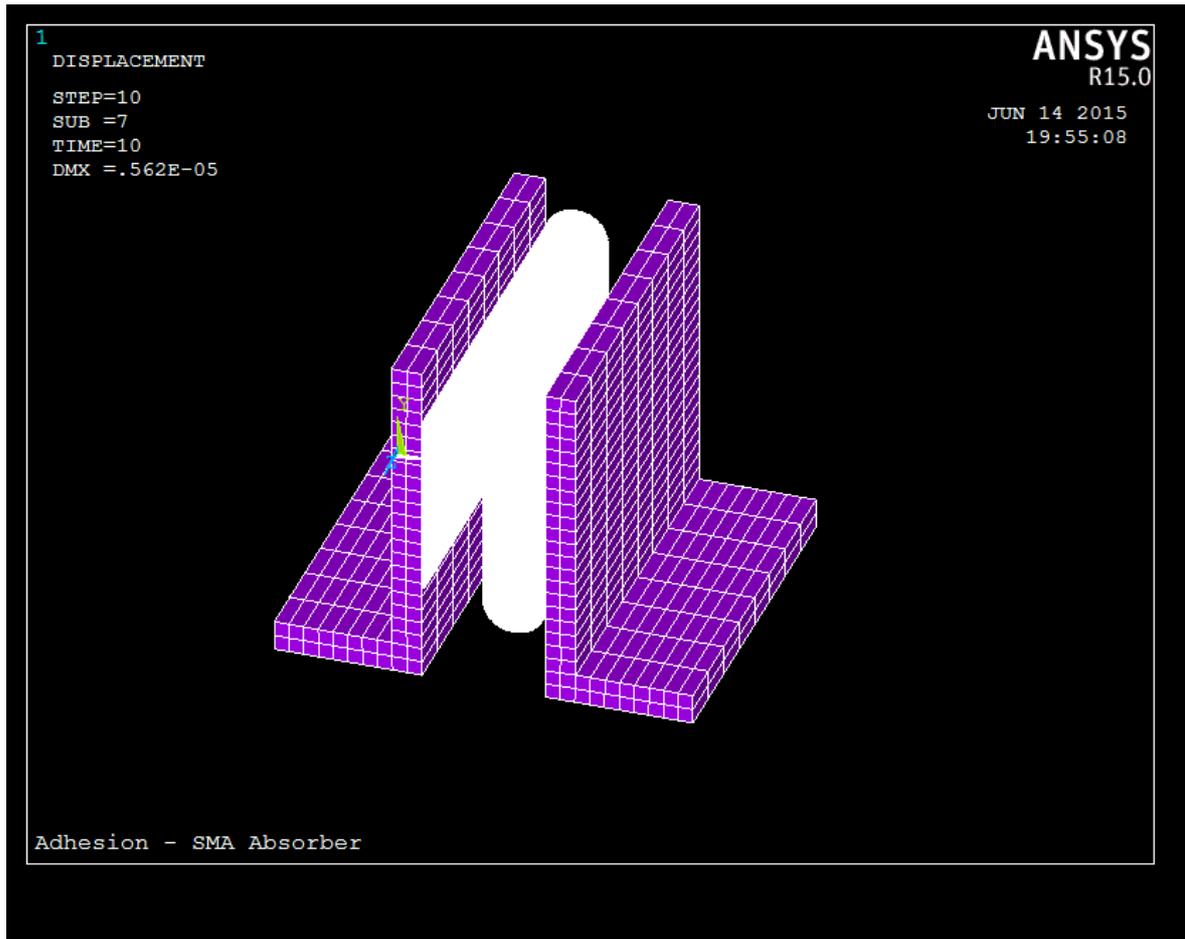


Figura 44: Malha aplicada à geometria do projeto.

#### 6.4.4 Zona de contato

Criou-se uma zona de contato entre a LMF e o alumínio para representar a união exercida pela cola. Foi utilizada a ferramenta Contact Manager, a área de Alumínio foi selecionada como a superfície, e a área de LMF como superfície de contato. O adesivo foi selecionado como material para a interface, e o comportamento da superfície de contato foi selecionado como “bonded”.

#### 6.4.5 Condições de contorno e carregamento

Para visualizar de forma mais evidente o efeito de histerese da LMF, o modelo ficou restringido de forma que houvesse movimento apenas no eixo x. Foram aplicadas estas condições de contorno e carregamento:

- Restrição do movimento nos eixos x, y e z, na área da base esquerda da junta de dilatação.

- Restrição do movimento nos eixos y e z, na área da base direita da junta de dilatação.
- Deslocamento de aproximadamente 30,0mm, podendo variar até 39,0 mm, (vide tabela do fornecedor) no eixo x, na área da base direita da junta de dilatação.

O deslocamento na área da base direita foi carregado e descarregado, sendo possível observar a curva de histerese.

#### 6.4.6 Resultados

No gráfico força versus deslocamento da base direita da junta de dilatação, pode-se observar o efeito da pseudoelasticidade da LMF, mostrado na Figura 41. Neste gráfico fica provado que a LMF sofreu transformação de fase devido à tensão a que foi submetida, dissipando energia no descarregamento da força. Assim, percebe-se que a LMF manteve suas propriedades mesmo utilizando o adesivo como forma de união.

Nas Figuras 42 e 43, observa-se uma tensão residual máxima de 386.99 KPa após o carregamento e descarregamento do deslocamento, essa tensão tem valores de ordem desprezível para esta simulação.

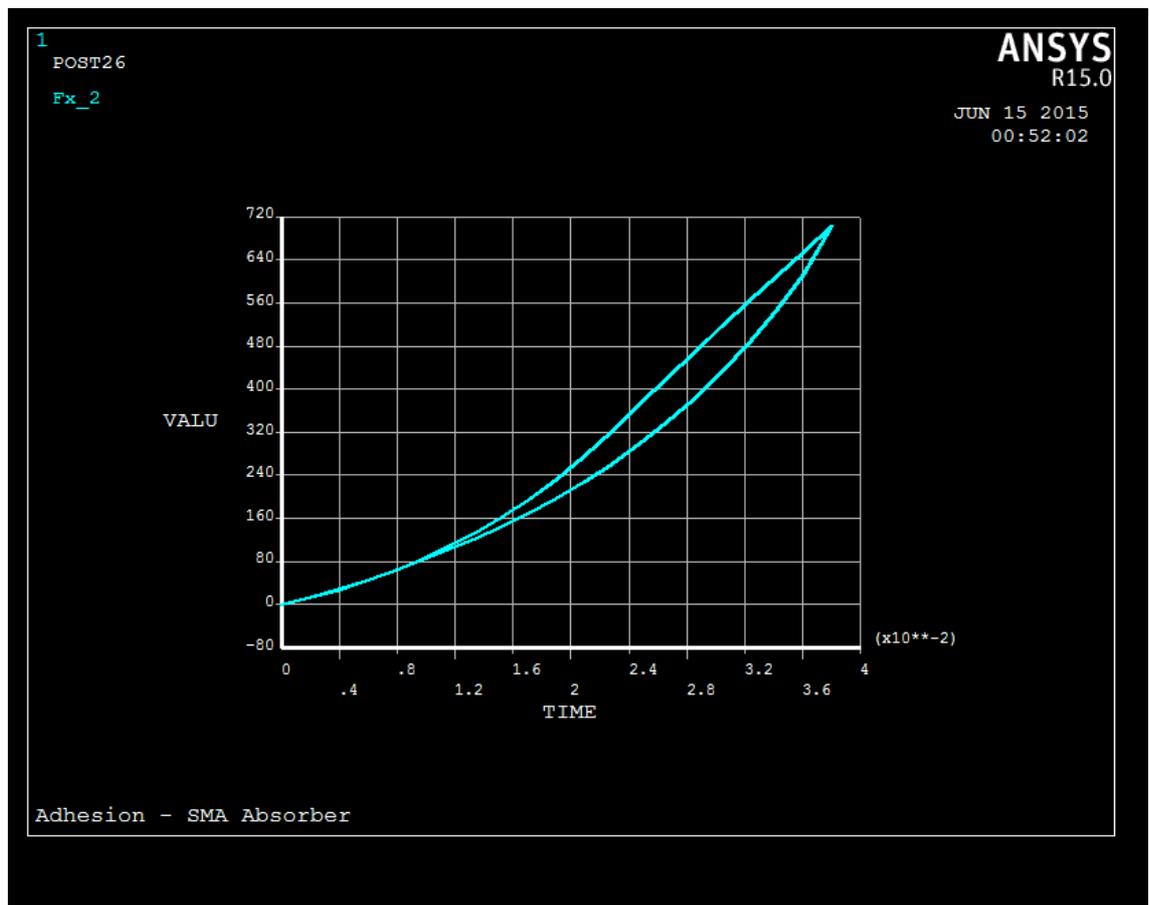


Figura 45: Gráfico Força x deslocamento

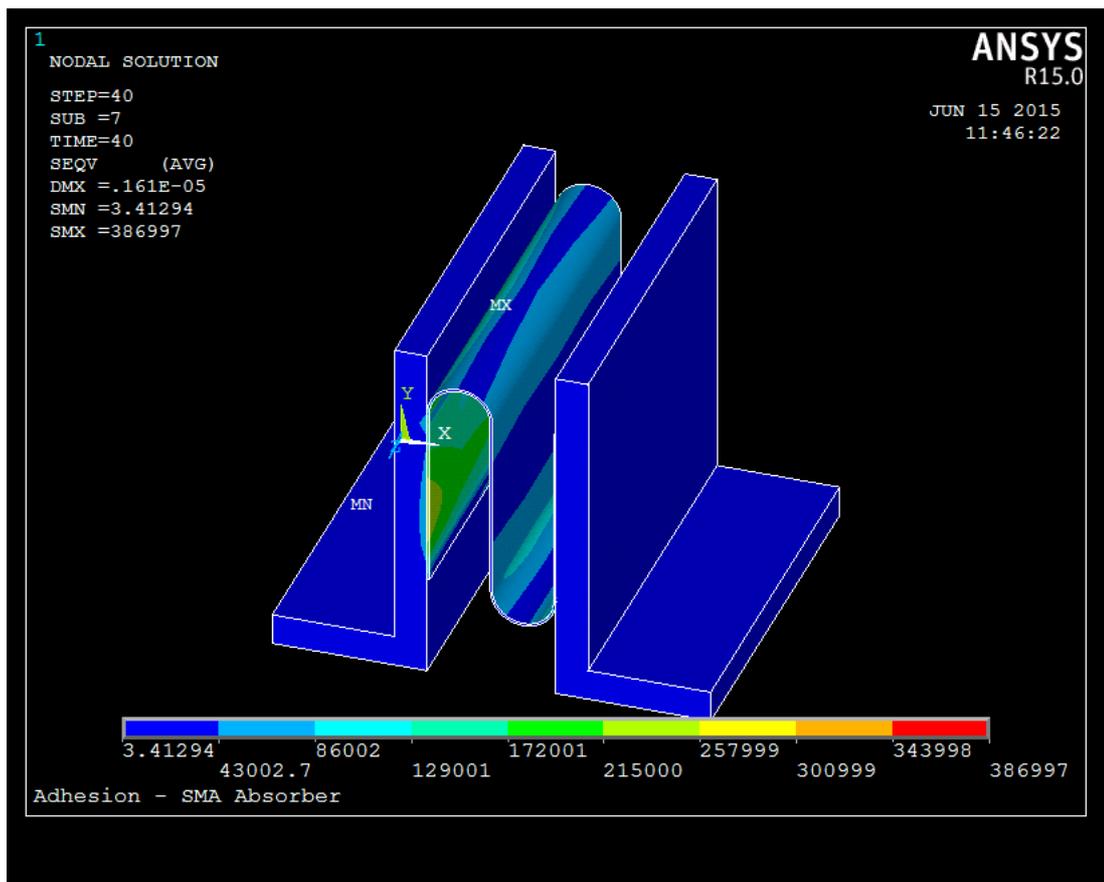


Figura 46: Tensão de Von Mises no final da simulação, após o descarregamento do deslocamento de 38 mm – Vista 1.

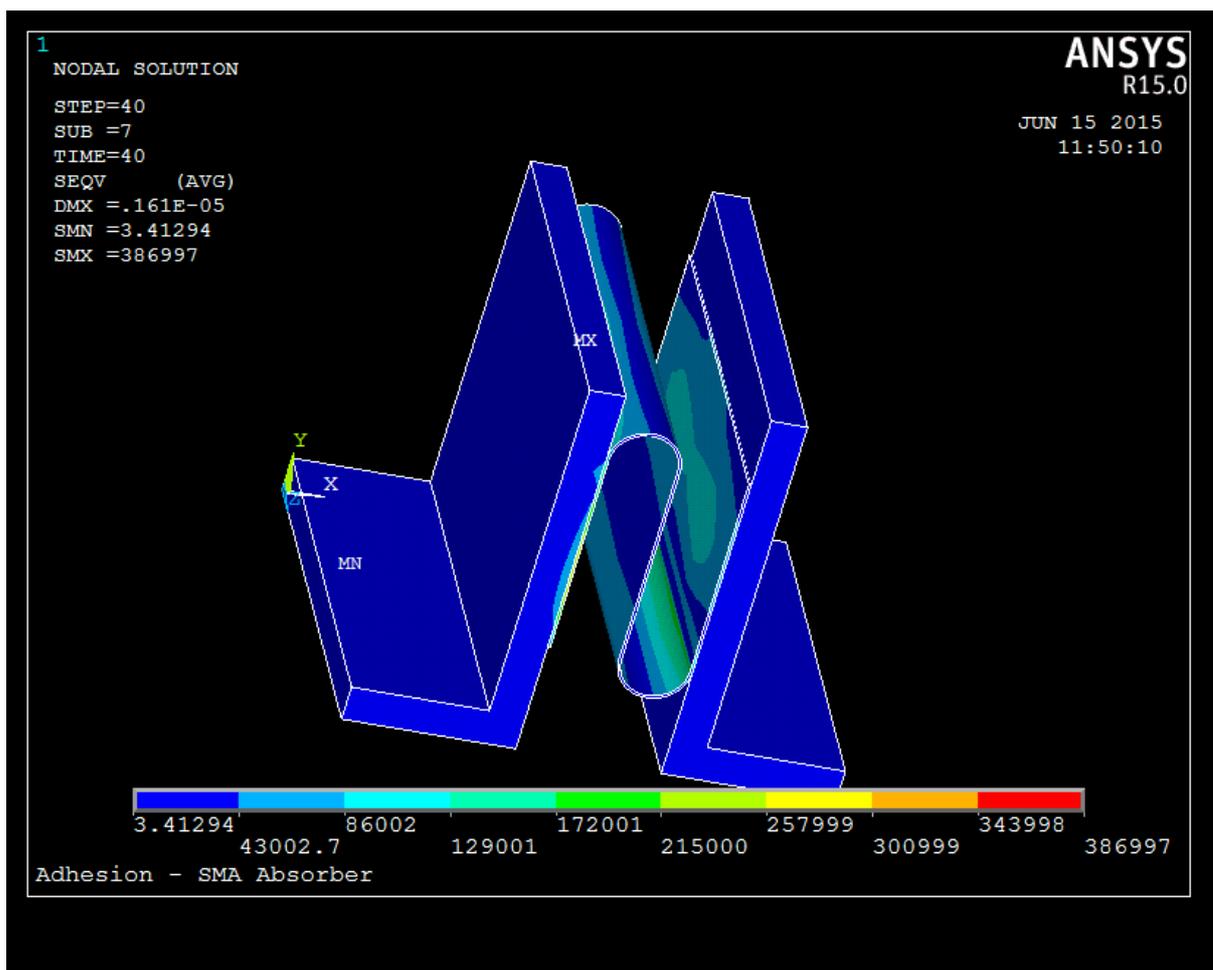


Figura 47: Tensão de Von Mises no final da simulação, após o descarregamento do deslocamento de 38 mm – Vista 2.

O modelo com o deslocamento de 38mm da base é mostrado nas Figuras 44, 45 e 46. Observa-se que a tensão se concentra nas extremidades do arco de LMF, evidenciando que este é o elemento que está sofrendo a deformação. A tensão máxima atingida está representada em vermelho, 393 MPa, estando acima da tensão de início de transformação de fase da LMF que é 297 MPa(vide tabela). Dessa forma, pode-se concluir que houve transformação de fase.

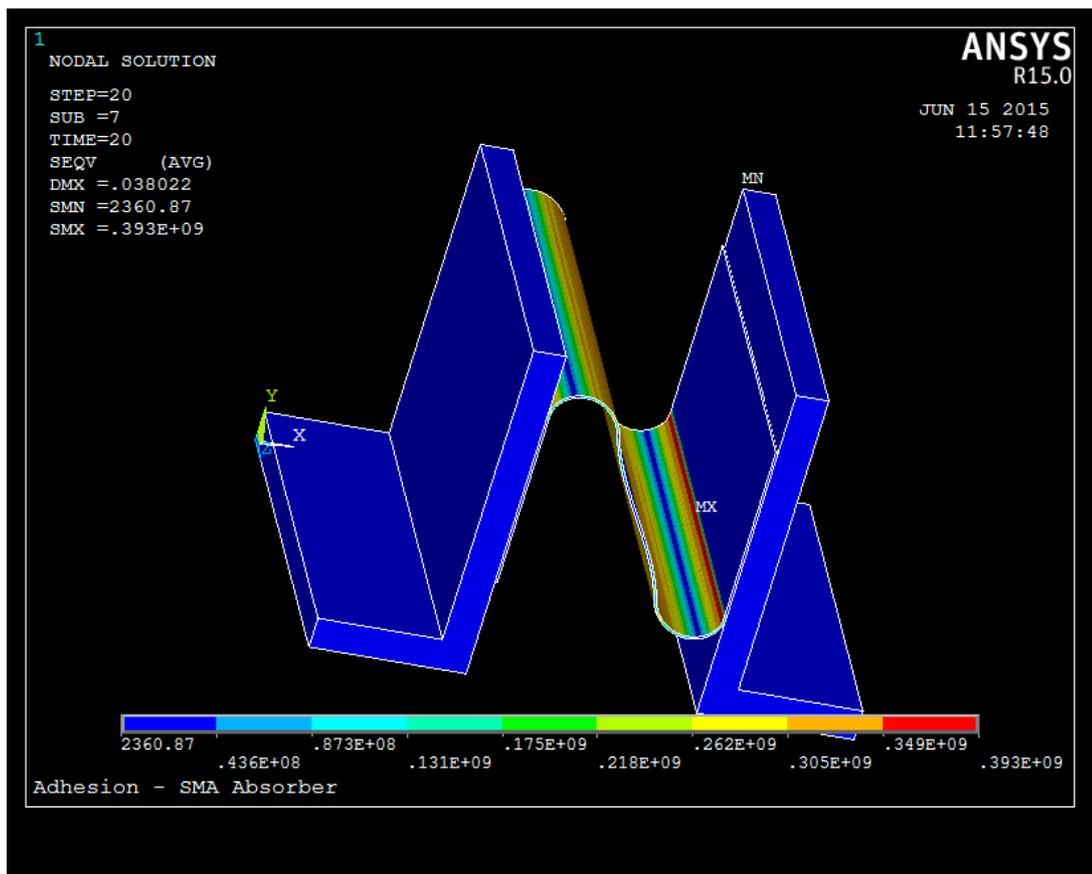


Figura 48: Tensão de Von Mises quando o deslocamento da base é igual a 38 mm Vista 1.

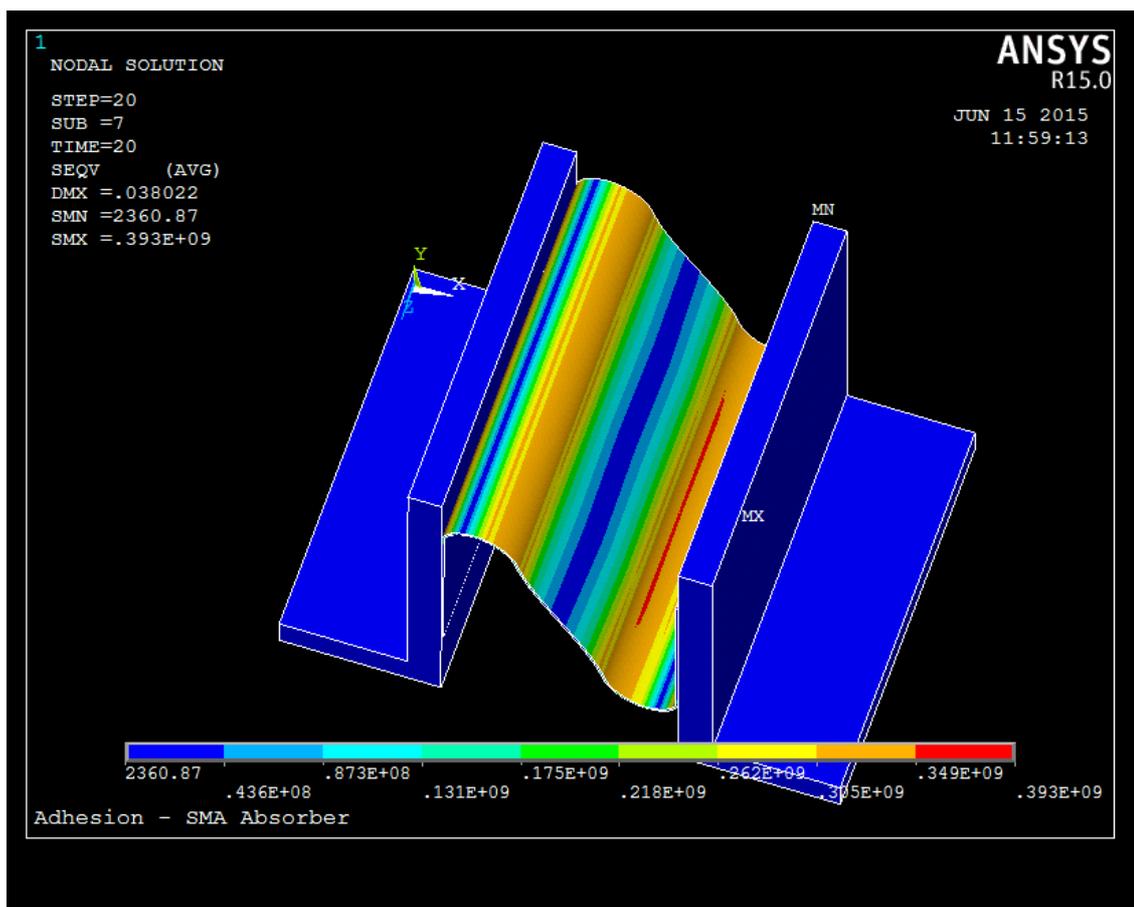


Figura 49: Tensão de Von Mises quando o deslocamento da base é igual a 38 mm Vista 2.

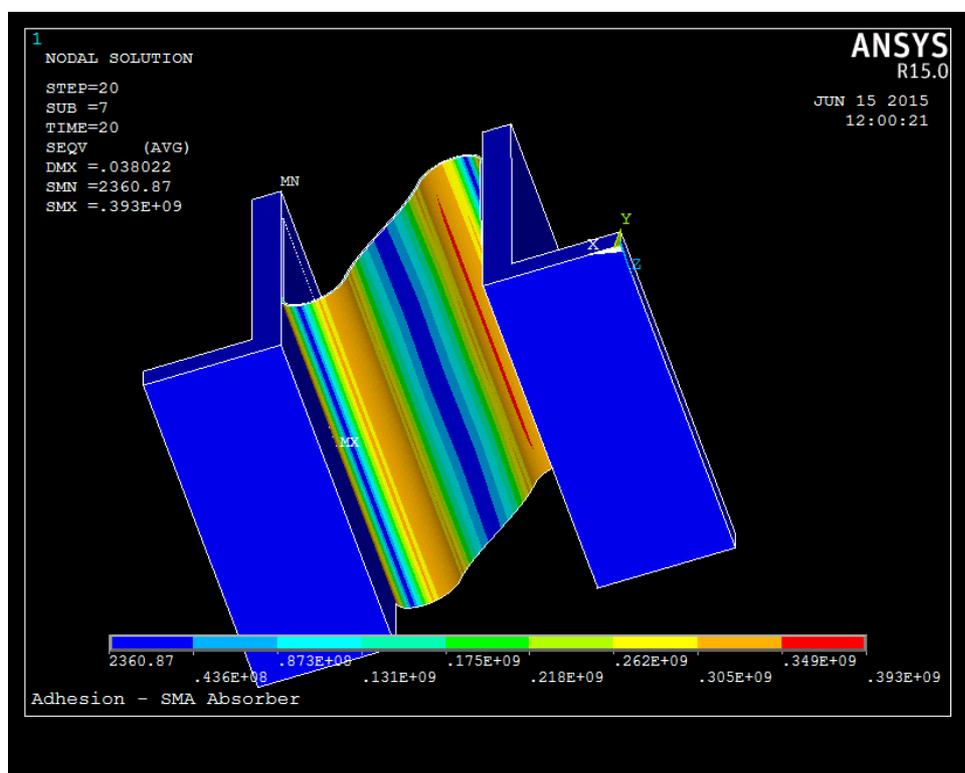


Figura 50: Tensão de Von Mises quando o deslocamento da base é igual a 38 mm Vista 3.

O status da zona de contato é mostrado na Figura 47. A cor vermelha representa o status “colado” e a cor laranja o status “deslizando”. Constata-se que o adesivo permanece colado em toda a sua extensão.

A Figura 48 mostra a tensão normal na zona de contato quando o deslocamento da base é igual a 38 mm. Nota-se que a tensão máxima atingida de 12.5 MPa está abaixo da tensão normal máxima suportada pelo adesivo de 13 MPa. Observa-se também que a tensão máxima atingida, representada pela cor vermelha, se concentra na parte superior da área colada, junto ao arco onde ocorreu a deformação, estendendo-se no comprimento da superfície colada e não na altura. A tensão de cisalhamento da zona de contato quando o deslocamento da base é igual a 38 mm pode ser observada na figura 49. Observa-se que a tensão atingida de 626.55 KPa é bem menor que a tensão máxima de cisalhamento suportada pelo adesivo de 8.5 MPa. A tensão de cisalhamento não chega a apresentar um valor expressivo devido às restrições e ao movimento aplicado, que praticamente só exercem força na direção normal a zona de contato.

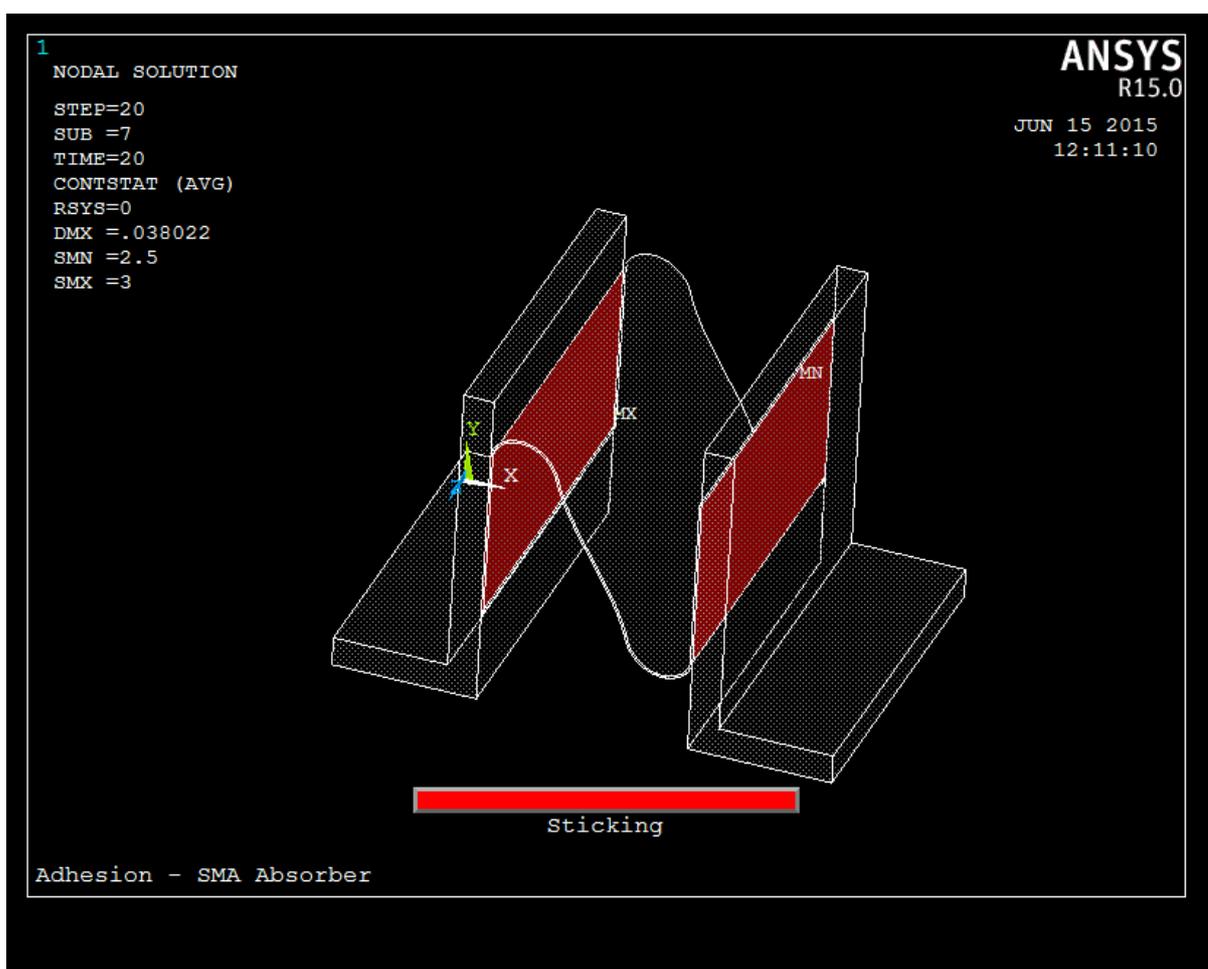


Figura 51: Status da zona de contato.

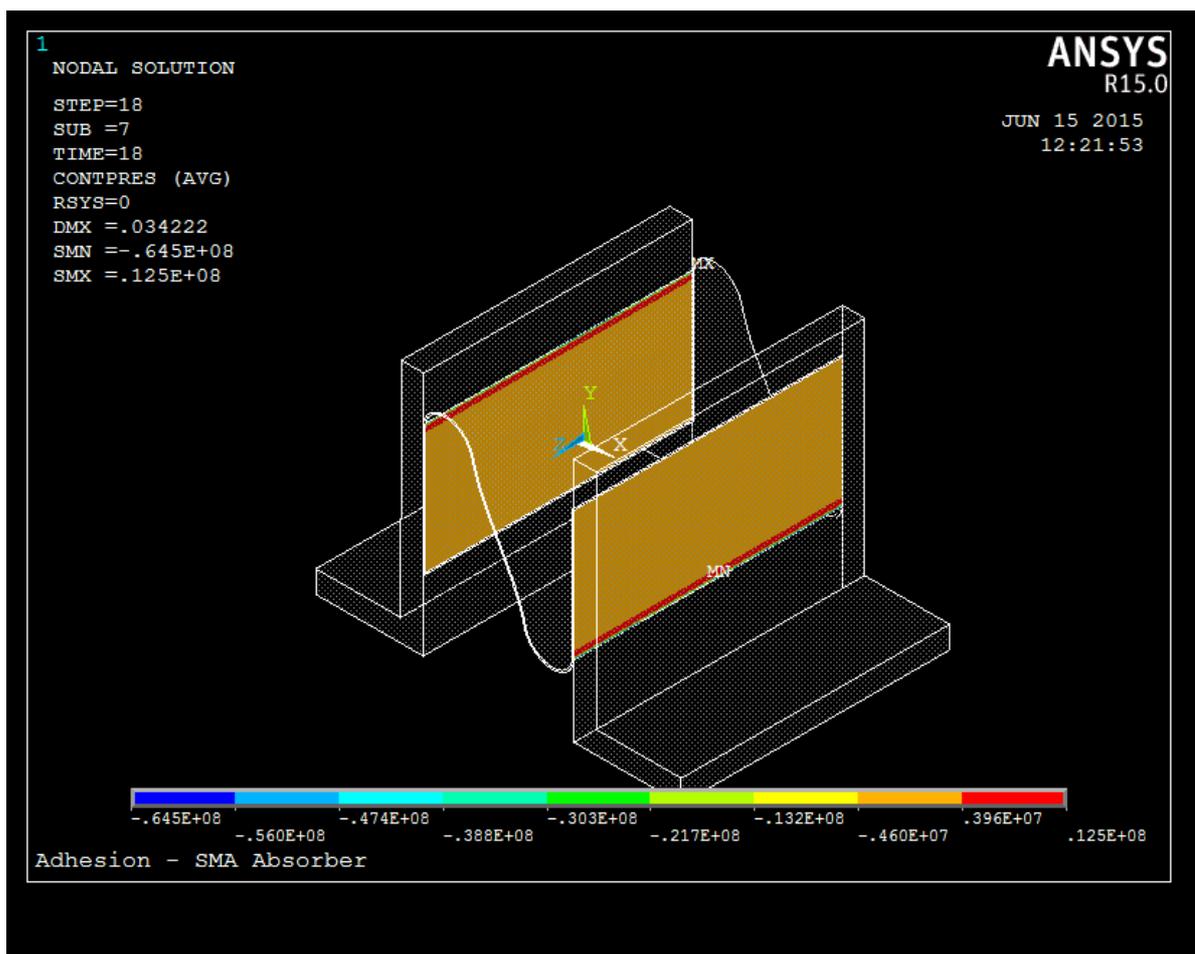


Figura 52: Tensão normal na zona de contato com o deslocamento de 10 mm.

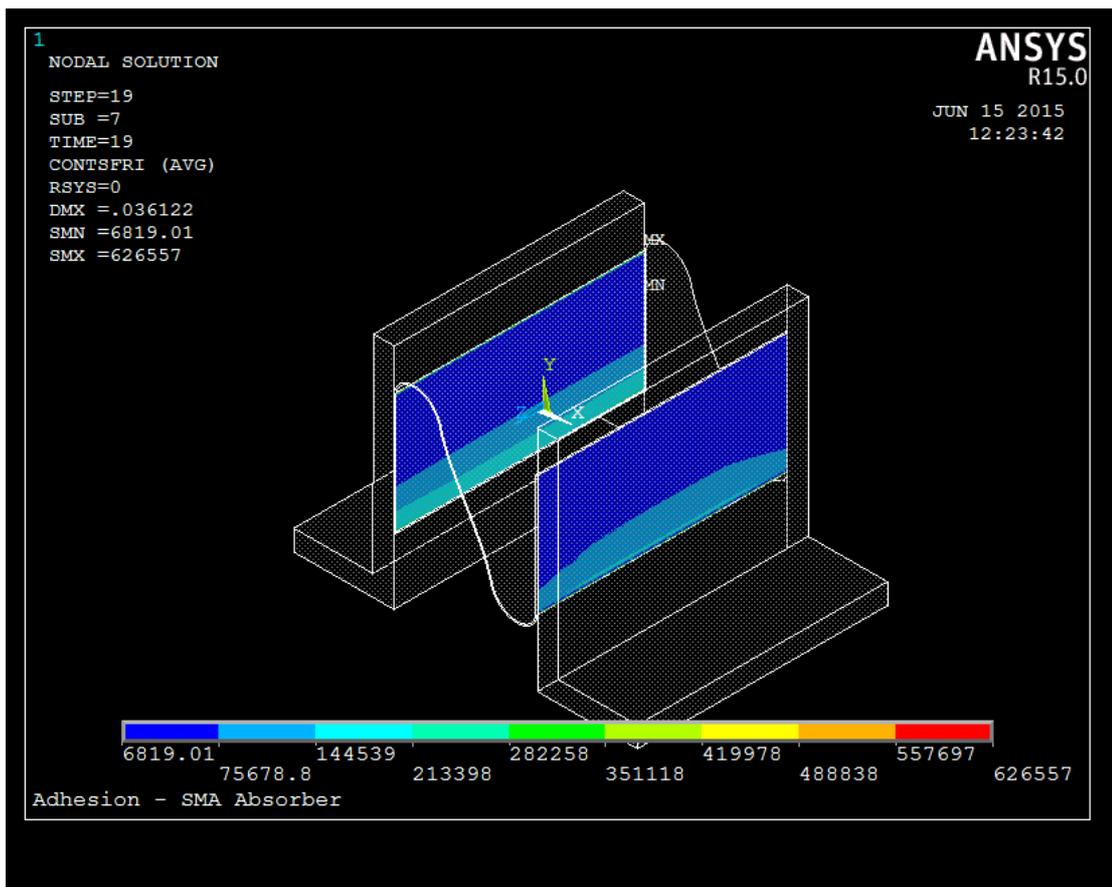


Figura 53: Tensão de cisalhamento no adesivo, com o carregamento de 38 mm.

## Capítulo 7

### 7. Conclusão

Concluiu-se por meio de simulação que o projeto pode apresentar característica pseudoelástica da liga de memória de forma, quando a ligação entre os componentes do sistema é feita por meio de colagem. Para isso, devem ser combinadas uma superfície de contato com um tamanho adequado para que não haja ruptura na junta, e uma geometria que esteja propícia a deformação, para que a LMF exerça suas características.

As propriedades da LMF não sofrem nenhuma alteração quando é utilizado adesivo como forma de ligação, tornando o uso do adesivo vantajoso se comparado à soldagem onde modificações no material podem ser causadas devido à alta temperatura. E diferente dos rebites não há necessidade de furar as peças.

Deve-se atentar que os resultados refletem o adesivo utilizado e a carga aplicada. Para adesivos que apresentem maior resistência, a área de colagem poderá ser menor, assim como para casos em que haja menor deslocamento.

O modelo proposto pode ser utilizado para ajustar as características dinâmicas e estudar o desempenho dos elementos LMF ligados por adesivos em estruturas de alumínio.

#### 7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Pode-se alterar ainda mais as condições de contorno, eliminando as restrições de movimento nos eixos X, Y e Z na área da base esquerda da junta de dilatação e eliminando também as restrições de movimento nos eixos Y e Z na área da base direita da junta de dilatação, para que se possa representar diferentes forças exercidas e submetidas ao projeto.

Pode ser analisada também, a influência da altura da área colada na tensão normal máxima atingida. Para se encontre a altura mínima necessária para a colagem sem que os resultados obtidos sejam afetados.

O atuador poderia ser colado a outros tipos materiais como cobre ao invés do alumínio por exemplo, para analisar os resultados e ver a qual material seria mais eficaz.

## Referência Bibliográfica

- [1] ADEODATO, Arthur, Redução de Vibrações em Eixo utilizando Elementos de Ligas com Memória de Forma, Projeto Final, CEFET- Maracaña, Maio 2014.
- [2] AGUIAR, R. A. Pacheco P. M. C. L., Savi, M. A., Absorvedores de Vibrações Utilizando Ligas com Memória de Forma- Resultados Experimentais, CEFET/RJ- PPEMM, COPPE/UFRJ-Departamento de Engenharia Mecânica, Agosto 2010, RJ, Brasil.
- [3] AHL´EN, A; STERNAD, M., 1994. Derivation and design of Wiener filters using polynomial equations. Control and Dynamic Systems, Vol. 64.
- [4] AHMAD, S.S; LEW, J. S; KEEL, L. H., 2000. Robust control of flexible structures against structural damage. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.8(1).
- [5] ALMEIDA, H.B.D.G., Análise via Método dos Elementos Finitos de Falhas em Placas Compósitas Utilizando Materiais Piezoelétricos, Projeto Final, DEM/POLI/UFRJ, 2011.
- [6] AMARIEI, D.; GILLICH, G.; NEGRU, I., “Researches Regarding the Effect of Nitinol Vibration Damper Applied to Infrastructures”, RJAV vol VI issue 1, 2009.
- [7] AQUINO, Alderban, Controle de vibração de um sistema sob desbalanceamento rotativo utilizando atuador de liga com memória de forma, Tese de doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Abril, 2011.
- [8] ASTM D6465 - 05. Standard Guide for Selecting Aerospace and General Purpose Adhesives and Sealants.
- [9] BANEJA, M.D; SILVA, L.F.M. Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. Journal of Materials Design and Applications. 2008. Disponível em <<http://pil.sagepub.com/content/223/1/1>>. Acesso em 15 outubro 2009.
- [10] BAUER, R.S.; CORLEY, S. Epoxy Resins. In: LEE, S.M. Reference Book for Composites Technology. Lancaster: Technomic, 1989. v.1, p.17-48.  
BROCKMANN, W. et al. Adhesive Bonding. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
- [11] CALLISTER – Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução, 5ª Edição
- [12] CAMPILHO R.D.S.G., Pinto A.M.G., Banea M.D., Silva R.F., Da Silva L.F.M., Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry. Journal of Adhesion Science and Technology, 25:2351-2368. 2011.

- [13] CARDOSO, Mirella Maria Trindade; GONZALEZ, Cezar Henrique. 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.
- [14] CARNEIRO, Ruth Pereira. Colagem de junta de madeira com adesivo epóxi. Universidade Federal do Pará. Belém, 2010.
- [15] CASAROTTI, C., Bridge Isolation and Dissipation Devices: state of the art review of seismic response and modelling of modern seismic isolation and dissipation devices, Master degree thesis, Università degli Studi di Pavia, 2004.
- [16] CASTELLANO, M.G., “Innovative Technologies for Earthquake Protection of Architectural Heritage”, International ICOMOS Congress, Bethlehem - Palestine, 2000.
- [17] CHEN, W.; BUEHLER, M.; PARKER, G.; BETTIG, B, 2004 Optimal sensor design and control of piezoelectric laminate beams. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 12(1).
- [18] CHOI, S. B.; Hwang, J. H. “Structural vibration control using shape memory actuators” J. Sound Vib.
- [19] COGNARD, J.Y.; Davies, P.; Gineste, B. & Sohier, L. - Development of an improved adhesive test method for composite assembly design – Composite Science and Technology, França, v.65, p. 359–368, mar. 2005.
- [20] DA SILVA, E. P. (2003). Aplicação de Ligas com Memória de Forma em Estruturas adaptativas. Anais do DINCON 2003 Série Arquimedes, v. 2.
- [21] DA SILVA, Lucas Filipe, de Magalhães, Antônio, demoura, Marcelo F.S.F. - Juntas adesivas estruturais. 2007
- [22] DE BARROS, Silvio. Crack Propagation: Analytical and Numerical Approaches, NEPEM/UFPB-João Pessoa, 2009.
- [23] DOLCE, M.; CARDONE, D., “Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications - 1 Martensite and austenite NiTi bars subjected to torsion”, International Journal of Mechanical Sciences, 2001.
- [24] DOLCE, M.; CARDONE, D., “Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications - 2 Austenite NiTi wires subjected to tension”, International Journal of Mechanical Sciences, 2001.
- [25] FIP INDUSTRIALE S.p.A., Via Scapacchio 41 - Selvazzano Dentro, 35030 Padova - Itália, 2012. Disponível em: <[http://www.fip-group.it/fip\\_ind\\_eng/prodotti.html](http://www.fip-group.it/fip_ind_eng/prodotti.html)>. Acessado em: 22 jul. 2012.

- [26] FRENZEL, J. et. al. High quality vacuuminduction melting of small quantities of NiTi shape memory alloys in grafite crucibles. *Materials science e engineering*, p. 299-310, 2004.
- [27] FUGAZZA, D., *Shape-Memory Alloy Devices in Earthquake Engineering: Mechanical Properties, Constitutive Modeling and Numerical Simulations*, Master degree thesis, Università degli Studi di Pavia, 2003.
- [28] FULLER, C. R.; GIBBS, G. P.; SILCOX, R. J., 1990. Simultaneous active control of flexural and extensional waves in beams. *Journal of Materials, Systems and Structure*, Vol. 1.
- [29] 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.
- [30] HAGA, Y.; MIZUSHIMA, M.; MATSUNAGA, T.; ESASHI, M., 2005. Medical and Welfare Applications of Shape Memory Alloy Microcoil Actuators. *Smart Materials and Structures*. N14.
- [31] HENKEL Ltd. – Nanoceramic Technology Bonderite NT1: Global Launch Manual Alemanha, jun, 2006.
- [32] HODGSON, D. E.; BROWN, J.W., 2000. *Using Nitinol Alloys (Shape Memory Applications, Inc., San Jose, CA)*.
- [33] KHAJEPOUR F, Hosseini SA (2011). Calcium and phosphorus status in juvenile Beluga (Huso huso) fed citric acid-supplemented diets. *J. Aquacult*.
- [34] LA CAVA, C.A.P.; MACHADO, L.G.; SILVA, E.P., *Modelagem de Dispositivos Mecânicos Fabricados com Ligas de Memória de Forma*, Projeto Final, DEPMC/CEFET-RJ, 1999.
- [35] LAGOUDAS, D.C., 2008. *Shape memory alloys*. Springer Science Business Media.
- [36] LAGOUDAS D. C.; KHAN, M. M.; MAYES, J. J.; HENDERSON, B. K., 2004. Pseudoelastic SMA Spring Elements for Passive Vibration Isolation. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 15.
- [37] LOCTITE Handbook - Second Edition – Loctite, 1995.
- [21] LUCAS F. M. SILVA, ANTONIO G. MAGALHAES, MARCELO F. S. MOURA; *Juntas Adesivas Estruturais*, 1ª edição, Editora Publindustria, FEUP Universidade do Porto, 2007.

- [38] MABE, J.H.; CALKINS, F.; BUTLER, G., 2006, Boeing's variable geometry chevron, morphing aerostructure for jet noise reduction, in: 47th AIAA/ ASME / ASCE / AHS / ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Newport, Rhode Island.
- [39] MANTOVANI D. Shape memory alloys: Properties and biomedical applications. Journal of the Minerals. Metals and Materials Society, 52: 36-44, 2000.
- [40] MEIROVITCH, L., Dynamics and Control of Structure, Wiley-Interscience, New York USA, 1990.
- [41] MONTEIRO, Delfim Ferreira. Análise do comportamento a fratura de juntas de aço efetuadas com adesivos estruturais. Universidade do Porto. Porto. 1995.
- [42] MONTEIRO JR, P.C.C., Análise do Acoplamento Termomecânico em Ligas com Memória de Forma, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2007.
- [43] MOTAVALLI, M.; CZADERSKI, C.; BERGAMINI, A.; JANKE, L., "Application of Shape Memory Alloys in Civil Engineering: Past, Present and Future", The Seventeenth Annual International Conference on Composites/Nano Engineering - ICCE-17, Hawaii - USA, 2009.
- [44] NUNES, Annelise, Colagem de atuadores de liga com memória de forma, Projeto Final, CEFET- Maracaña, Novembro 2014.
- [45] OLIVEIRA, H. S. (2014). Análise de um Absorvedor Dinâmico de Vibrações Pseudoelástico . Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF.
- [46] PAULA, A. S; SAVI, M. A., 2008. Análise de um Absorvedor de Vibrações Não-Lineares Utilizando Elementos com Memória de Forma.
- [47] PEREIRA A.M.B., Fractura de juntas coladas. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade de Aveiro. Aveiro. 2002.
- [48] PUGLIESE, G.; CASEY, D., "Analysis of Shape Memory Alloy and Their Application for Reducing Damage Due to Seismic Activity", University of Pittsburgh - Swanson School of Engineering, 2012.
- [49] RIAGUSOFF, Ivan, Estudo de dispositivos pseudoelásticos para aplicação em atenuadores de vibração, Mestrado, CEFET- Maracaña, Agosto 2012.
- [50] RIBEIRO, F.L.B., Introdução ao método dos elementos finitos, COPPE/UFRJ, 2004.
- [51] RIBEIRO, Marcelo, Programa para análise de juntas coladas: compósito/compósito e

metal/compósito,

Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.

[52] RIPPER NETO, A. P., *Vibrações Mecânicas*. 1ed. Rio de Janeiro, E-papers, 2007.

[53] SAMPAIO, E.M. UM MODELO DE DANO EM JUNTA COLADAS, 1998 – Tese (Doutorado Engenharia Mecânica) Coppe UFRJ Rio de Janeiro

[54] SAMPAIO, E.M; *Influência do Tratamento Superficial na Resistência Mecânica de Juntas de Cisalhamento coladas*. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4, 2006, Recife. Recife: UFPE, 2006.

[55] SANTOS, E.F., *Atenuadores Visco-Elásticos para Redução de Oscilações Aeroelásticas de Edifícios Altos*, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ , 2003.

[56] SANTOS, Demetrio Jackson dos *Estudo experimental da resistência mecânica de junções adesivas* / D.J. dos Santos. -- São Paulo, 2007. 140 p.

[57] SAVI, M.A.; MACHADO, L.G. *Aplicações odontológicas das ligas com memória de forma*. *Revista Brasileira de Odontologia*. vol. 59, n. 5, pp. 302-306, 2002.

[58] SILVA, J. A. B.; MESQUITA, A. L. A., 2009. *Adaptive vibration control in rotating machine using bearing with shape memory alloy springs*. 20th International Congress of Mechanical Engineering. COBEM 2009 – Porto Alegre – RS.

[59] SRINIVASSAN, A. V.; Mcfarland, D. M. *Smart Structures – Analysis and Design*. Cambridge University Press, 2001.

[60] SHIELDS, J. *ADHESIVES BONDINGS* OXFORD, UNIVERSITY PRESS, 1974

[61] SONG, G. *Applications of shape memory alloys in civil structures*. *Engineering Structures* (28), 1266-1274, 2006.

[62] TAO, TAO; Frampton, Kenneth D. *Experiments on distributed active vibration control of a simply supported beam*. *Smart Materials and Structures*. Vol.15, 2006.

[63] TOLLIER, L; AATILLA AH, M *Etude de la tenue en service des assemblages colles appliqué a la structure automobile*, Paris; 2005

[64] VILLENAVE, J. – *Assemblage par collage* – Paris: DUNOD, 2005. 319 p.

[65] WARLIMONT, H.; KRISHNAN, R.V.; DELAEY, L.; et al. *Thermoelasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations, Part. 1 Structural and microstructural changes*. *Journal of Materials Science*, vol. 9, p. 1521-1535, 1974.

- [66] WAYMAN, C. M.; DUERIG, T. W. Engineering Aspects of Shape Memory Alloys. org. DUERIG, T.W., MELTON, K. N., STOCKEL, D., WAYMAN, C. M. Butterworth-Heinemann. p. 3-20. 1990.
- [67] WIEBECK, Hélio. & Harada, J. – Plásticos de Engenharia – São Paulo: Editora Artiber. 2005.
- [68] WU, S. K.; Lin, H. C. Recent development of TiNi-based shape memory alloys in Twain.
- [69] <http://www.vedatechnik.com> – Acessado em abril de 2015.
- [70] [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br)- Acessado em Maio de 2015. Acessado em Junho de 2015.
- [71] <http://www.engenhariacivil.com> -Acessado em Maio de 2015.
- [72] [www.engenhariae.com.br](http://www.engenhariae.com.br)-Acessado em Abril de 2015.
- [73] [http://database.cs.ualberta.ca/MEMS/sma\\_mems](http://database.cs.ualberta.ca/MEMS/sma_mems) (SMA/MEMS RESEARCH GROUP, 2001). Acessado em abril de 2015.
- [74][http://www2.ifsp.edu.br/edu/prp/sinergia/complemento/sinergia\\_2011\\_n1/pdf\\_s/segmentos/artigo\\_11\\_v12\\_n1.pdf](http://www2.ifsp.edu.br/edu/prp/sinergia/complemento/sinergia_2011_n1/pdf_s/segmentos/artigo_11_v12_n1.pdf)- FERNANDES, F. M. B. Ligas com memória de forma. Departamento de Ciência dos Materiais / CENIMAT, Universidade Nova de Lisboa, 2003. Acessado em abril de 2015.
- [75][http://www2.ifsp.edu.br/edu/prp/sinergia/complemento/sinergia\\_2011\\_n1/pdf\\_s/segmentos/artigo\\_11\\_v12\\_n1.pdf](http://www2.ifsp.edu.br/edu/prp/sinergia/complemento/sinergia_2011_n1/pdf_s/segmentos/artigo_11_v12_n1.pdf)- ASUNDI, A. Polarimetric sensors for strain measurement and damage detection: smart structures. Materials and Mems: Bangalore, India 1996. Acessado em junho de 2015.
- [76] <http://www2.ifsp.edu.br/edu/prp>- BONCI, A. [et al.] – Use of shock transmission units and shape memory alloy devices for the seismic protection of monuments: the case of the Upper Basilica of San Francesco at Assisi. Em Proceedings of International ICOMOS Congress More than Two Thousand Years of Architecture, Paris, 2001. Acessado em Maio de 2015.
- [77][https://books.google.com.br/books?id=BGFK8wzSPiQC&pg=PA119&lpg=PA119&dq=HART+E+SMITH+1987&source=bl&ots=IZdeUXYx60&sig=nKu15hyyAyYaYbawQ22GnvL\\_ewM&hl=pt-BR&sa=X&ei=CISVVfGyOomLNr2BgZAE&ved=0CCYQ6AEwAg#v=onepage&q=HART%20E%20SMITH%201987&f=false](https://books.google.com.br/books?id=BGFK8wzSPiQC&pg=PA119&lpg=PA119&dq=HART+E+SMITH+1987&source=bl&ots=IZdeUXYx60&sig=nKu15hyyAyYaYbawQ22GnvL_ewM&hl=pt-BR&sa=X&ei=CISVVfGyOomLNr2BgZAE&ved=0CCYQ6AEwAg#v=onepage&q=HART%20E%20SMITH%201987&f=false)- HART-SMITH L.J., A radical proposal for In-plane shear of fibrous composite laminates, Anaheim, CA, April 1987. Acessado em Abril de 2015.
- [78][www.ansys.com](http://www.ansys.com)- Acessado em Março de 2015.