

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**COLAGEM DE ATENUADORES DE
VIBRAÇÕES DE LIGA COM MEMÓRIA DE
FORMA**

Annelise Leite Nunes
Caroline Bastos
Natália Rolim Menezes

Professor Orientador: Silvio de Barros
Professor Coorientador: Pedro Manuel Pacheco

**Rio de Janeiro
Novembro de 2014**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONCECA – CEFET/RJ**

**COLAGEM DE ATENUADORES DE
VIBRAÇÕES DE LIGA COM MEMÓRIA DE
FORMA**

Annelise Leite Nunes
Caroline Bastos
Natália Rolim Menezes

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

Prof. Orientador: Silvio de Barros
Professor Coorientador: Pedro Manuel Pacheco

**Rio de Janeiro
Novembro de 2014**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

N972 Nunes, Annelise Leite

Colagem de atenuadores de vibrações de liga com memória de forma / Annelise Leite Nunes, Caroline Bastos [e] Natália Rolim Menezes.—2014.

x, 57f. : il.color. , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2014.

Bibliografia : f. 56-57

Orientador : Silvio de Barros

Coorientador : Pedro Manuel Pacheco

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado aos nossos pais e irmãos, que desde sempre estiveram ao nosso lado e em momento algum mediram esforços para que fosse possível a realização do nosso sonho em trilhar uma carreira honesta e de sucesso.

Aos nossos colegas de classe, que foram nossos fiéis companheiros ao longo desses anos de engenharia, nos apoiando e contribuindo para o nosso desenvolvimento acadêmico e pessoal.

AGRADECIMENTOS

Registramos nosso agradecimento a todos os que compartilharam o trilhar de mais esse caminho percorrido, contribuindo direta ou indiretamente, para que nós realizássemos esse projeto, nos auxiliando e dando forças nos momentos em que mais precisamos.

Nossa gratidão, em primeiro lugar, a Deus, por estar conosco em todos os momentos, nos iluminando, sendo nosso refúgio e fortaleza nos momentos mais difíceis. A ele nossa eterna gratidão.

Agradecemos especialmente à nossa família que sempre acreditou em nossa capacidade e nos forneceu total apoio para que este sonho se realizasse.

Aos Grandes amigos, que nos entenderam nos momentos de ausência, dando-nos apoio e carinho.

Aos professores que tivemos ao longo do curso de Engenharia Mecânica do CEFET/RJ, que de forma grandiosa contribuíram para o nosso desenvolvimento intelectual e para nossa formação acadêmica.

Aos colegas do curso de engenharia do CEFET/RJ, por tudo o que com eles aprendemos e por partilharem a construção do nosso estudo.

Ao professor Silvio de Barros, nosso orientador que possibilitou aprendizagens únicas, por meio do grande incentivo e orientação que nos foram concedidos durante essa jornada.

Um agradecimento em especial ao Professor Pedro Manuel, pelo suporte e pelo tempo que nos foram cedidos.

A todos muito obrigada.

RESUMO

As ligas com memória de forma consistem em um grupo de materiais metálicos cuja principal característica é a habilidade de sofrer grandes deformações e, em seguida, recuperar sua forma original quando a carga é removida ou o material é aquecido. Assim, pode-se utilizar esse fenômeno para construir atuadores leves e silenciosos, como verdadeiros músculos metálicos. O desenvolvimento de atuadores com as ligas com memória de forma apresenta grande atrativo para diversos campos da engenharia, principalmente na área de robótica e estruturas, substituindo os atuadores convencionais de grande peso e ruidosos pela sua capacidade de amortecer vibrações. Processos mecânicos tradicionais como o uso de parafusos e rebites podem ser usados na união dos atuadores com LMF, contudo esse tipo de processo apresenta como desvantagem a necessidade de se fazer furos nas peças unidas. O Processo de soldagem também apresenta a desvantagem do aumento da temperatura na junção, o que pode acarretar mudanças nas propriedades das LMF. Com o avanço da tecnologia os adesivos têm sido muito utilizados como uma forma alternativa de ligação de elementos mecânicos e devem ser estudados como alternativa para união de LMF. Este projeto tem como principal objetivo o estudo da ligação de atuadores de liga com memória de forma por meio de adesivos.

Palavras-chave: Adesivos, liga de memória de forma, atuadores.

ABSTRACT

The Shape Memory Alloys - LMF consist of a group of metallic materials which the main feature is the ability to suffer large deformations and then recover its original shape when the load is removed or the material is heated. Thus, this phenomenon can be used to build lightweight and silent actuators, like a mechanical muscle. Developing actuators with LMF has great attraction for several fields of engineering, particularly in robotics and structures, replacing conventional, heavy weight, noisy actuators and your ability to dampen vibration. Traditional mechanical joining processes such as the use of screws and rivets may be used when joining actuators with LMF. However, this type of process has the disadvantage of needing to drill holes in the pieces. The welding process also has the disadvantage of increasing the junction temperature which can result in changes in the properties of the LMF. With the advancement of technology, the adhesives have been widely used as an alternative form of mechanical connection elements and should be studied as an alternative to joining LMF. This project had as main objective the study of joining shape memory alloy actuators by adhesives.

Keywords: Adhesives, shape memory alloy, actuators.

SUMÁRIO

Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1- Motivação e Justificativa	3
1.2- Objetivos	3
1.3- Metodologia de Trabalho Realizado	4
1.4- Organização do trabalho	4
Adesivos e suas aplicações	5
2.1- Área de atuação dos Adesivos	6
2.2- Classificação dos Adesivos	8
2.3- Adesivos na indústria	9
2.4- Mecanismo de Colagem	10
2.5- Preparação da Superfície	11
Capítulo 3	13
Ligas com Memória de Forma	13
3.1. Fundamentos das Ligas com Memória de Forma	13
3.2. Transformações martensíticas	14
3.3. Comportamentos Termomecânicos	15
3.4. Principais aplicações	18
3.4.1. Estruturas	18
3.4.2. Medicina	21
3.4.3. Aeronáutica	21
3.5. Atuadores	22
CAPÍTULO 4	24
Juntas coladas	24
4.1. Tipos de juntas	24
4.2. Modos de Carregamento	25
4.2.1. Tração	26
4.2.2. Cisalhamento	26
4.2.3. Clivagem e arrancamento	26
Capítulo 5	29
Ensaio de aderência	29

CAPÍTULO 6	34
Análise numérica	34
6.1. Análise dos ensaios de aderência	35
6.2. Objeto de estudo	37
6.2.1. Geometria da simulação	39
6.2.2. Malha	42
6.2.3. Análise de convergência	45
6.2.4. Zona de Contato	46
6.2.5. Condições de contorno e carregamento	46
6.2.6. Resultados	47
6.2.7. Conclusão	55
6.2.8. Sugestões para Trabalhos Futuros	56
Referência Bibliográfica	57

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Uso de adesivos na construção civil [2].	7
FIGURA 2: Colagem em motores elétricos [2].	7
FIGURA 3: Evolução da fração de martensita [6].	14
FIGURA 4: Transformação de fases na LMF [8].	15
FIGURA 5: Comportamento pseudoelástico [10].	16
FIGURA 6: (a) Dissipação de energia em pseudoelasticidade (b) Dissipação de energia para uma situação de vibração [11].	17
FIGURA 7: Efeito memória de forma com carregamento mecânico 3D [10].	18
FIGURA 8: Variação de temperatura numa estrutura em cedência [13].	19
FIGURA 9: Aplicação de fios LMF pseudoelásticos para recuperação de forma de uma estrutura civil de teste fissurado devido ao carregamento [14].	20
FIGURA 10: (a) Filtro de Simon na forma aberta, (b) Sequência de lançamentos do filtro [15].	21
FIGURA 11: Fios de LMF acionando os flaps [16].	22
FIGURA 12: Atuador com LMF [7].	23
FIGURA 13: Os tipos mais comuns de juntas coladas [1].	25
FIGURA 14: Principais tipos de esforços a que uma junta colada pode ser submetida [1].	25
FIGURA 15: Ensaio de propagação de fissura [17].	28
FIGURA 16: Máquina de ensaio de fratura.	29
FIGURA 17: Ensaio ENF.	30
FIGURA 18: Ensaio MMF.	31
FIGURA 19: Ensaio MMF após ruptura.	31
FIGURA 20: Gráfico força x deslocamento do ensaio ENF.	32
FIGURA 21: Gráfico força x deslocamento do ensaio MMF.	32
FIGURA 22: Simulação no software Ansys do ensaio MMF.	35
FIGURA 23: Comparação das curvas obtidas nos ensaios experimentais e numéricos.	36
FIGURA 24: Corrosão das armaduras decorrente das infiltrações de água pelas aberturas das juntas [20].	38
FIGURA 25: Fissuras no pavimento onde se encontram as juntas de dilatação [20].	38
FIGURA 26: Junta de Dilatação de solo sísmica, utilizável para junta de solo interior ou exterior até 100 mm [21].	39
FIGURA 27: Dilatação da Junta [21].	40
FIGURA 28: Vista em perspectiva da geometria no software Ansys.	41
FIGURA 29: Vista frontal em detalhe evidenciando o atuador em forma de arco.	42
FIGURA 30: Elemento finito denominado SOLID186.	43
FIGURA 31: Malha aplicada à geometria do projeto.	43
FIGURA 32: Detalhe da malha no arco da LMF.	44
FIGURA 33: Detalhe da malha na geometria.	44
FIGURA 34: Gráfico da análise de convergência.	45
FIGURA 35: Representação no Ansys para as condições de contorno e carregamento.	47
FIGURA 36: Gráfico Força x deslocamento.	48

FIGURA 37: Tensão de Von Mises no final da simulação, após o descarregamento do deslocamento de 10 mm – Vista 1.....	49
FIGURA 38: Tensão de Von Mises no final da simulação, após o descarregamento do deslocamento de 10 mm – Vista 2.....	49
FIGURA 39: Tensão de Von Mises quando o deslocamento da base é igual a 10 mm Vista 1.	50
FIGURA 40: Tensão de Von Mises quando o deslocamento da base é igual a 10 mm Vista 2.	51
FIGURA 41: Tensão de Von Mises quando o deslocamento da base é igual a 10 mm Vista 3.	51
FIGURA 42: Status da zona de contato.....	53
FIGURA 43: Tensão normal na zona de contato com o deslocamento de 10 mm.....	53
FIGURA 44: Tensão de cisalhamento no adesivo, com o carregamento de 10 mm.	54

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Propriedades de materiais poliméricos [2].	9
TABELA 2: Tratamentos superficiais comuns para metais [1].	12
TABELA 3: Propriedades dos materiais utilizados na simulação.....	36
TABELA 4: Dimensões da junta modelo 432 do fabricante Veda Technik [21].....	40

Capítulo 1

Introdução

Ainda que a união mecânica por colagem venha sendo realizada há alguns séculos, defeitos de operação e/ou insuficiência das características das colas existentes, criaram a percepção de que a união por colagem oferecia poucas garantias quanto à sua resistência mecânica e, sobretudo, quanto à sua durabilidade em longo prazo. Porém, com o advento de novas tecnologias, têm-se produzido significativos desenvolvimentos nas propriedades adesivas. Hoje a ligação adesiva tem diversas vantagens em relação a outros métodos de uniões tradicionais como: unir, proteger, vedar, além de reduzir o peso da peça, custos, ruídos, vibrações e tornarem o projeto mais flexível permitindo o uso de novos conceitos e materiais, especialmente em casos em que a ligação não é exposta ao calor ou a desgaste prolongado.

No setor industrial, os adesivos ganharam grande importância devido a sua gama de funções. Graças a sua eficácia e facilidade de aplicação, estes ganharam uso nas montagens de componentes mecânicos, elétricos e eletromecânicos, além de serem empregados na produção de diversos produtos e serem muito utilizados na indústria naval, civil, automobilística e aeronáutica.

Adesivos a base de resina epóxi, silicone ou poliuretano são muito eficazes devido suas propriedades. Esses adesivos não possuem chumbo e são menos vulneráveis ao calor, minimizando os danos térmicos tornando-os mais aplicáveis na indústria [1].

No início dos anos 70 foi introduzido um novo adesivo, o Cianocrilato, que foi designado como “supercola”, pela sua rápida cura, excelente resistência ao corte e por aderir a muitos substratos dentre eles o metal. Ele tem sido objeto de estudo em relação à aplicabilidade na indústria, pois se restringe aos casos quando o meio não é muito severo e quando é fundamental ter uma ligação rápida [1].

O controle de vibrações é um campo de estudo bastante relevante em toda engenharia, e é neste contexto que atuadores de Ligas com Memória de Forma, que auxiliam no controle ativo de estruturas devido à sua capacidade de variação da rigidez e amortecimento, serão analisados.

As Ligas com Memória de Forma (LMF) são capazes de retornar a sua forma original após uma deformação mecânica.

Novas tecnologias na área de atuadores tem sido desenvolvida e implementada. Dentro esses novos adventos, destaca-se o atuador de liga com memória de forma. Já muito usado em micro robótica, o atuador de liga com memória de forma se comparados a outros atuadores, como solenoides e motores elétricos, apresentam muitas vantagens como serem mais leves e menos ruidosos. Pode-se projetar um equipamento sensivelmente mais leve e flexível, tornando possíveis aqueles projetos que antes eram inviáveis devido ao acionamento de mecanismos hidráulicos e elétricos.

E a fim de aprimorar ainda mais o uso de atuadores de liga com memória de forma, este projeto procura provar através de experimentos práticos e análises numéricas utilizando o método dos elementos finitos, as vantagens das uniões de atuadores de LMF por meio da colagem.

1.1- Motivação e Justificativa

O uso de atenuadores de vibração de LMF tem crescido nos últimos anos, suas propriedades podem ser usadas de forma muito vantajosa em diversas áreas da engenharia, principalmente para o controle de vibração. Todavia, temos como limitações do emprego desse tipo de atuador os métodos de união. O uso de soldagem normalmente afeta as propriedades da LMF. Uniões mecânicas com rebites e parafusos são mais usadas, porém também trazem o problema da concentração de tensões. Com o constante avanço da tecnologia adesiva, a colagem se apresenta como uma alternativa a ser investigada.

1.2- Objetivos

O objetivo desse projeto é provar por meio de estudos numéricos e experimentais, que a união de atenuadores de liga com memória de forma por meio de adesivos é viável, apresentando vantagens e boas propriedades em comparação aos métodos tradicionais de ligação mecânica. O modelo proposto considera o comportamento pseudoelástico de elementos de LMF juntamente a um modelo coesivo para estudar a união entre o atenuador e uma placa de alumínio. Foram analisadas as condições de deslocamento e a carga com os modelos propostos para avaliar a capacidade pseudoelástica da LMF para absorção de energia. Após toda a análise do comportamento do adesivo na LMF com o alumínio, será aplicado em um modelo de junta de dilatação com intuito de comprovar a aderência do adesivo e seu comportamento pseudoelástico.

1.3- Metodologia de Trabalho Realizado

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

Em seguida foi realizado um ensaio destrutivo em uma chapa de LMF colada com adesivo em uma chapa de alumínio, assim como a simulação no Ansys desse ensaio. Os resultados do ensaio e da simulação foram comparados, analisados e interpretados.

As propriedades obtidas do ensaio foram utilizadas para a simulação de um modelo no Ansys, de um atuador de LMF colado em uma junta de expansão, com o objetivo de absorver parte da vibração das juntas.

1.4- Organização do trabalho

Para melhor compreensão do estudo, este trabalho foi dividido em seis capítulos. No primeiro capítulo é apresentada a introdução ao tema abordado no trabalho, motivação, justificativa e objetivo deste estudo.

No segundo capítulo serão abordadas as principais características dos adesivos, suas classificações e áreas de atuação.

No terceiro capítulo serão discutidas as propriedades das ligas de memória de forma e os campos onde podem ser utilizadas, inclusive sobre atuadores especiais e as grandes vantagens apresentadas pelos atuadores de LMF.

No quarto capítulo será demonstrada a análise teórica de adesivos, a fratura em juntas coladas, os tipos de juntas, o comportamento mecânico das juntas coladas e os ensaios de fratura.

No quinto capítulo, é apresentado o ensaio de aderência.

No sexto capítulo é então apresentado a análise numérica, explica-se o método de análise por elementos finitos, experimentos práticos, os resultados da sua análise realizada no programa Ansys, a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Adesivos e suas aplicações

Os adesivos têm sido usados há muitos séculos. No entanto, este método de ligação só evoluiu consideravelmente nos últimos 60 anos. A principal razão é que os adesivos utilizados na construção mecânica são baseados em polímeros sintéticos, cujo desenvolvimento ocorreu em meados dos anos 40. Os polímeros sintéticos possuem propriedades que lhes permitem aderir facilmente à maioria dos materiais e uma resistência capaz de transmitir esforços significantes. Portanto, um adesivo pode ser definido como um material polimérico que quando aplicado em superfícies pode ligá-las e resistir à sua separação.

Durante algum tempo o adesivo permanece fluido para “molhar” as superfícies sobrepostas e logo depois se solidifica devido às mudanças químicas e físicas. O adesivo deve molhar a superfície do material a ser unido e aderir a ele, de forma a permitir transferência de cargas, apresentando adesão e coesão adequadas. A adesão é atração entre duas substâncias resultantes das forças intermoleculares que se estabelecem entre elas, já a coesão é a força interna do adesivo. Boa adesão e coesão são provenientes de processos físicos e reações químicas durante a cura do adesivo.

Os adesivos líquidos, dependendo da sua viscosidade, são aplicados em forma de spray, escova ou espátula. As pastas são consideradas como de extrusão e são executadas por seringas, pistolas de mastique ou equipamento pneumático.

As principais vantagens apontadas às ligações adesivas estruturais são:

- Distribuição uniforme das tensões ao longo da área ligada; que permite uma maior rigidez e transmissão de carga, possibilitando assim uma redução de peso, uma melhor resistência à fadiga e menor custo.
- Amortecimento de vibrações; permitindo que as tensões sejam parcialmente absorvidas, melhorando assim, a resistência à fadiga dos próprios componentes ligados.

- Ligação de materiais diferentes em composição e com distintos coeficientes de expansão.
- Tornam o projeto mais flexível, permitindo o uso de novos conceitos e materiais.
- Permite ter estruturas com contornos regulares (evitam furos) e criam um contato contínuo [1].

As principais desvantagens inerentes à ligação com adesivos são:

- É necessário um projeto de ligação que elimine ao máximo as forças de arrancamento, que é o principal inimigo das ligações adesivas, clivagem e impacto.
- É importante usar geometrias que evitem tensões localizadas e que garantam uma distribuição uniforme de tensões.
- Apresentam resistência limitada a condições extremas, como calor e umidade devido à natureza polimérica do adesivo.
- A ligação não é normalmente realizada, necessitando de ferramentas de fixação para manter as peças na posição correta, já que as ligações não ocorrem instantaneamente.
- É necessária uma preparação das superfícies.
- O controle de qualidade e segurança é difícil, embora tenham sido desenvolvidas recentemente técnicas não destrutivas adequadas.
- Não há um critério de dimensionamento universal que permita projetar qualquer estrutura [1].

2.1- Área de atuação dos Adesivos

A área de aplicação dos adesivos é muito vasta, abrangendo praticamente todas as áreas de atuação industrial como exemplos têm a indústria automobilística, aeronáutica, de transportes em geral, na construção civil em fabricação, montagem e fechamento de embalagens na indústria eletroeletrônica, e grande aplicação na indústria médica entre outras aplicações, alguns exemplos estão nas Figuras 1 e 2.



FIGURA 1: Uso de adesivos na construção civil [2].

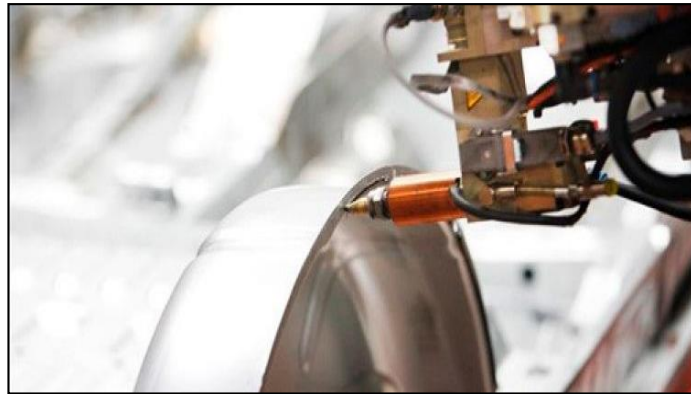


FIGURA 2: Colagem em motores elétricos [2].

2.2- Classificação dos Adesivos

Os adesivos podem ser classificados de maneiras distintas dependendo da natureza, tipo molecular, composição química, modo de apresentação, aplicação, endurecimento, custos e etc. Assim como em função dos tipos de aderentes em que podem ser utilizados [1].

A distinção entre um adesivo fabricado por produtos sintéticos ou naturais é considerada a mais ampla classificação. Todavia, a fim de englobar todas as variedades dos adesivos foram criadas separações em grupos, cujos adesivos tem propriedades semelhantes de estrutura molecular classificando os adesivos segundo as três famílias dos materiais poliméricos:

- Termoplásticas: acrílicas, celulósicas, vinílicas, poliamidas e etc.
- Termoendurecíveis: feolicas, epóxico, poliéster, polimiidas e etc.
- Elastômeros: poliuretanos, nitrilos, policloroprenos, silicones e etc.

Os adesivos termoplásticos são polímeros lineares ou ramificados que podem ser fundidos pela adição de calor, podendo ser moldados e remoldados usando técnicas convencionais, permitindo uma fácil deposição nas juntas a serem coladas. Mesmo tendo uma temperatura limitada de serviço, alguns termoplásticos originam uma excelente resistência ao corte a temperaturas moderadas. Os adesivos termoplásticos também não tem boa resistência à solventes ou agentes químicos [1].

Os 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 [1].

Os adesivos elastoméricos, dependendo de sua composição, podem ser termoendurecíveis ou termoplásticos, e são baseados em polímeros elastoméricos sintéticos ou naturais. Portanto, podem sofrer a ação de forças elevadas que recuperam rapidamente as suas dimensões iniciais quando a força é retirada, apresenta um elevado grau de tenacidade, capacidade de deformação e baixo módulo de elasticidade. Conseqüentemente estes adesivos apresentam uma boa resistência a forças de arrancamento e uma boa flexibilidade, o que permite

ligar substratos com coeficientes de expansão térmicas diferentes. São usados para vedantes, amortecimentos de vibrações e isolamento sonoro [1].

Comparando de acordo com suas propriedades, temos que:

TABELA 1: Propriedades de materiais poliméricos [2].

Material	Flexibilidade	Resistência mecânica	Resistência térmica	Resistência a agentes químicos
Adesivos termoendurecíveis	Ruim	Boa	Boa	Boa
Adesivos termoplásticos	Médio	Medíocre	Medíocre	Boa
Elastômeros	Muito boa	Ruim	Variável	Medíocre

2.3- Adesivos na indústria

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

O adesivo estrutural surgiu na indústria mecânica no momento em que começaram as colagens em que havia a necessidade de assegurar a transmissão de esforços de uma peça para a outra. Sua principal função é manter ligadas as estruturas e serem capazes de resistir às cargas elevadas sem grande deformação. Geralmente são definidos como aqueles que possuem resistência de cisalhamento superior a 5-10 MPa e uma boa resistência aos ambientes mais comuns. São geralmente termoendurecíveis modificadas por resinas termoplásticas ou elastoméricas, que necessitam de reticulação química com a adição de um endurecedor e/ou fornecimento de calor.

Os adesivos epóxicos são utilizados com maior frequência na colagem estrutural, por apresentarem uma elevada resistência mecânica, boa aderência em muitos substratos (exceto os

polímeros e os elastómeros que tem uma energia de superfície muito baixa) e podem ser facilmente modificados para atingir uma grande variedade de propriedades.

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

Conhecido no mercado como o “supercola”, são geralmente a base de Cianoacrilato de metilo ou etilo, são líquidos de um só componente e tem uma cura rápida, uma excelente resistência ao cisalhamento, uma boa *shelf life* e aderem bem a muitos substratos, quando se trata de metais ou outros materiais rígidos

Os Cianoacrilatos de metilo são os mais fortes e mais resistentes ao impacto do que os de etilo. No entanto os Cianoacrilato de etilo são preferidos para borracha ou superfícies plásticas. Todavia, eles tem normalmente uma baixa resistência ao calor e a humidade, a sua resistência ao arrancamento e ao impactotambém são baixas. Têm sido desenvolvidos novos Cianocrilatos com melhores resistências ao cisalhamento e ao meio ambiente e alguns estão agora disponíveis sob a forma de gel que permitem ligar substratos como madeira, couro e tecidos que eram particularmente difíceis de colar com os primeiros Cianocrilatos [1].

2.4- Mecanismo de Colagem

Como esclarecido, um adesivo é uma substância capaz de ligar duas superfícies, preenchendo o espaço entre elas, formando uma barreira ou camada protetora.

O substrato é o material a ser ligado. Após a ligação, o substrato é chamado de aderente.

A atração entre duas substâncias resultantes das forças intermoleculares é conhecida como Adesão, e os adesivos e os vedantes funcionam pela propriedade de adesão. Este conceito é diferente de coesão que somente envolve as forças intermoleculares dentro de uma substância.

Interfase é a região entre o adesivo e o aderente, é uma fina região na zona de contato adesivo-aderente.

Primer é a substância que se utiliza por aplicação direta na superfície dos substratos a fim de melhorar a adesão ou proteger as superfícies até a aplicação do adesivo [1].

2.5- Preparação da Superfície

Uma das etapas mais importantes do processo de colagem é a preparação superficial. O objetivo principal da preparação é garantir que a adesão seja tal que o ponto mais fraco da junta seja ou o adesivo ou o aderente.

Os tratamentos superficiais irão formar superfícies resistentes e fáceis de molhar. A resistência de uma junta adesiva e a permanência eleva-se quando depósitos soltos, como produtos de corrosão, pintura pouco aderente e outros contaminantes são retirados da superfície.

Juntas resistentes e com boa durabilidade, geralmente requerem uma preparação de superfície. Deverá ser considerado para a preparação superficial a resistência inicial, durabilidade, condições iniciais dos substratos, tipo de substrato e natureza da sua superfície, fatores de produção (custo, tempo, etc).

A eliminação das partes poluídas pode ser realizada por via mecânica, via química, ou por combinação desses dois tratamentos quando os desempenhos devem ser superiores [1].

TABELA 2: Tratamentos superficiais comuns para metais [1].

Tratamento	Efeitos possíveis do tratamento
Solvente	Remoção da maior parte da contaminação orgânica.
Mecânico	Remoção da maior parte da contaminação orgânica. Remoção das camadas inorgânicas fracamente ligadas, como por exemplo, calamina. Mudança na topografia da superfície (maior rugosidade).
Conversão	Mudança na topografia da superfície (maior rugosidade). Alteração química da superfície como, por exemplo, a incorporação de fosfato na camada superficial.
Químico (ataque, anodização)	Remoção da contaminação orgânica. Mudança na topografia da superfície (maior rugosidade). Alteração química da superfície, alteração da espessura e da morfologia do óxido metálico.

Capítulo 3

Ligas com Memória de Forma

As ligas com memória de forma – LMF são materiais que apresentam uma interessante propriedade. Elas têm a capacidade de após terem sido deformadas plasticamente, retornarem à sua geometria inicial quando submetidas a certos estímulos, em geral, a uma determinada temperatura. Esta característica pode ser usada de forma muito vantajosa, e representa grande avanço tecnológico em diversos campos da engenharia.

Os conceitos das propriedades desse material, e suas possíveis aplicações são descritos neste capítulo.

3.1. Fundamentos das Ligas com Memória de Forma

O efeito de memória de forma começou a ser estudado em 1938, quando foi descoberto que a martensita podia ser induzida por tensão mecânica e depois desaparecer com o aquecimento. Após alguns anos foram feitas pesquisas avançadas no campo das LMF. Foi observado que elas tinham boas propriedades mecânicas comparável com alguns metais comuns da engenharia, além de terem uma capacidade de recuperação da forma. Suas aplicações são bastante diversificadas sendo utilizadas em situações que vão desde estrutura adaptativa até implantes utilizados na medicina.

As ligas NiTi possuem boa combinação de propriedades como a alta resistência mecânica. A boa resistência à corrosão e aos efeitos memória de forma pode ser explorada de várias maneiras até que o limite de fadiga afete seu uso [3].

Essa tecnologia vem avançando pela demanda de controle e atuação nas condições de temperatura elevada, impulsionada pela indústria aeroespacial e de petróleo. Muito tem se

pesquisado no uso de LMF na atenuação de vibrações, e na construção civil, principalmente no desenvolvimento de estruturas capazes de suportar abalos sísmicos.

3.2. Transformações martensíticas

O fenômeno de transformação de fase é responsável pelas propriedades das LMF. Estas transformações são processos não-difusivos envolvendo fases sólidas que ocorrem a velocidades muito elevadas. Atribui-se a causa dessa transformação à diferença de energia livre entre as estruturas constituintes envolvidas no processo devido ao choque de discordâncias, o que induz modificações nas ligações químicas, tornando as transformações de fase de caráter essencialmente cristalográfico.

As principais fases nas LMF são Austenita (A) e Martensita (M). A primeira é estável em altas temperaturas e a segunda em baixas temperaturas e é induzida pela tensão ou pela temperatura, nela a liga é facilmente deformada. A Austenita apresenta estrutura cristalina cúbica de corpo centrado, enquanto a estrutura cristalina na fase martensita depende do tipo de transformação podendo ser monoclinica ou ortorrômbica. [4 e 5].

A Figura 3 mostra a relação da fração martensítica versus a temperatura no estado livre de tensões. Durante o aquecimento, o material percorre a curva superior. Quando a temperatura A_s é atingida, tem-se o início da formação da austenita. A transformação continua até atingir 100% de austenita em A_f . No resfriamento o material percorre a parte inferior da curva da Figura 3. Para temperaturas abaixo de M_s começa a formação de martensita até atingir a temperatura M_f , quando a constituição do material é 100% martensítica [6].

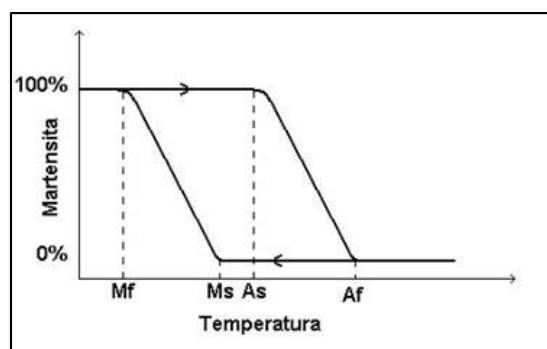


FIGURA 3: Evolução da fração de martensita [6].

A Martensita (M), que é estável à temperatura abaixo dessa fase, é induzida pela tensão ou pela temperatura, nela a liga é facilmente deformada [7].

Quando a martensita se forma somente através da variação da temperatura, ela é denominada martensita maclada. Este tipo de martensita é uma forma cristalina potencial, que se transforma em uma determinada estrutura cristalina que dependerá das tensões impostas sobre ela. Nesta fase ela apresenta 24 variantes, isto é, 24 subtipos com orientações cristalográficas diferentes. Por outro lado, quando a martensita é induzida por tensão, estas 24 variantes da martensita maclada se reorientam na direção mais favorável à tensão aplicada, ocorrendo à formação de martensita não-maclada como ilustra a Figura 4 [8].

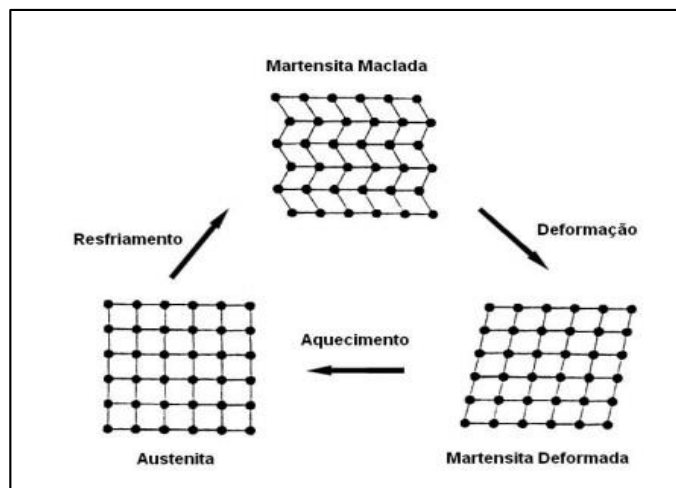


FIGURA 4: Transformação de fases na LMF [8].

3.3. Comportamentos Termomecânicos

As LMF possuem um comportamento termomecânico fortemente dependente da temperatura em que se encontram. Elas apresentam dois componentes marcantes: a pseudoelásticidade e o efeito memória de forma [9].

A pseudoelasticidade é um comportamento caracterizado por uma recuperação de deformação após a retirada da tensão, a temperatura A_f . Essas deformações são oriundas de uma transformação martensítica induzida por tensão [8].

Quando um carregamento mecânico é aplicado, a austenita sofre uma deformação elástica (A-B). Em um nível específico de tensão, a caminho do carregamento intersecciona a superfície inicial da transformação martensítica no diagrama de fase. Isso marca o nível de tensão (σ_{Ms}) da transformação para martensita. Nota-se que a transformação induzida por tensão de austenita para martensita é acompanhada pela geração de deformações inelásticas como é mostrando na Figura 5. A transformação prossegue (B-C) para o nível de tensão (σ_{Mf}) onde ocorre a interseção com a superfície de transformação M_f indicando o final da transformação.

O fim da transformação martensítica é indicado pela mudança distinta na curva σ - ϵ , que está associada ao carregamento elástico da fase martensítica. Um aumento subsequente do carregamento não causa nenhuma outra transformação e ocorre apenas deformação elástica da martensita não-maclada (C-D). Quando o carregamento é retirado gradualmente, a martensita é descarregada elasticamente (D-E). No ponto E, o caminho de descarregamento intersecciona o ponto de início da superfície austenítica em (σ_{As}), o que causa a reversão da martensita em austenita. O processo é acompanhado pela recuperação de forma devido à transformação de fase. O fim da transformação de volta à austenita é identificado quando a curva de descarregamento se junta à região elástica da austenita (ponto F, corresponde a tensão σ_{Af}). O material então retoma à posição A elasticamente. As transformações de fase inicial e reversa, durante um ciclo pseudoelástico completo, resultam em uma histerese, a qual, no diagrama σ - ϵ , representa uma energia dissipada no ciclo de transformação como visto na Figura 5. Os níveis de tensão de transformação e o tamanho da histerese dependem da LMF [10].

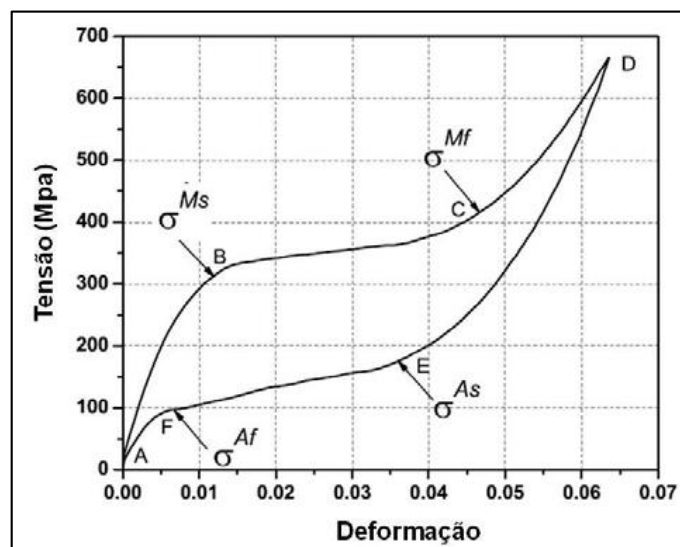


FIGURA 5: Comportamento pseudoelástico [10].

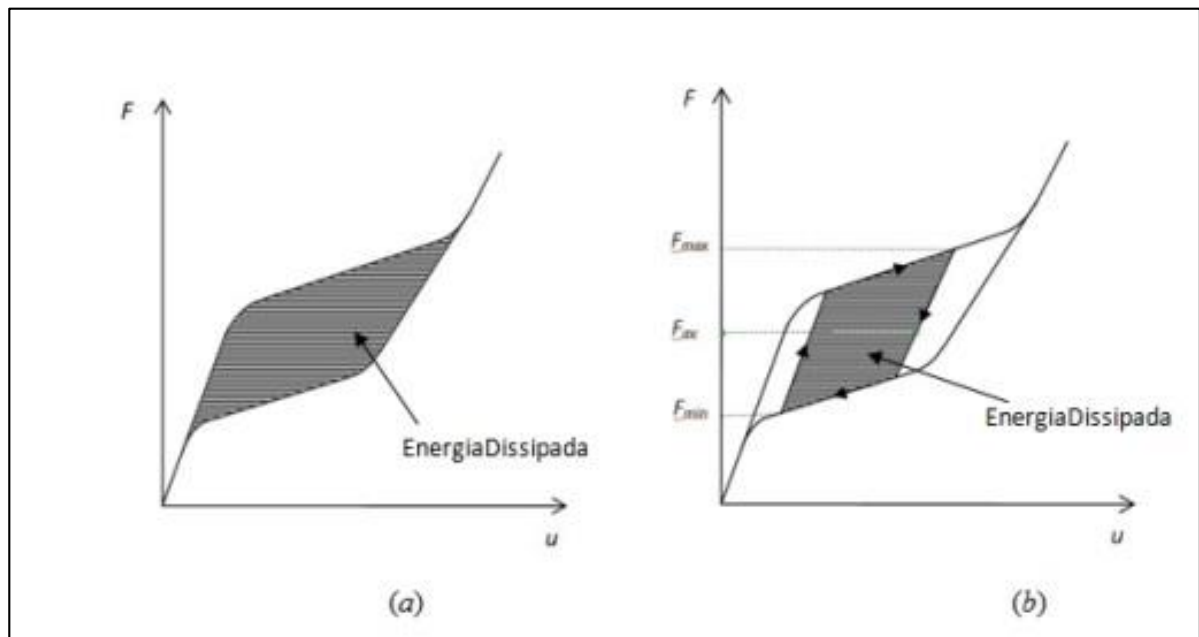


FIGURA 6: (a) Dissipação de energia em pseudoelasticidade (b) Dissipação de energia para uma situação de vibração [11].

Na Figura 7, o resfriamento, sem carregamento, da austenita até a temperatura abaixo da M_s e M_f resulta na formação de martensita maclada (ponto B). Quando a martensita maclada é submetida a uma tensão maior que a tensão inicial de deformação (σ_s), o processo de reorientação é iniciado, resultando no crescimento de algumas variantes martensíticas que estão sob uma orientação favorável. O nível de tensão necessário para que ocorra esta reorientação das variantes é bem menor que a tensão associada à deformação plástica permanente da martensita. O processo não-maclado se completa a um nível de tensão (σ_f) que é caracterizado pelo fim do patamar superior no diagrama σ - ϵ na. O material é então descarregado de C para D, e o estado da martensita não-maclada se mantém. Submetido a um aquecimento, na ausência de carregamento, a transformação reversa de inicia quando a temperatura alcança A_s e se completa quando chega a A_f . Caso não tenha ocorrido nenhuma deformação plástica permanente gerada na não-maclagem, a forma original da LMF será retomada. Esse fenômeno é conhecido como efeito de memória de forma.

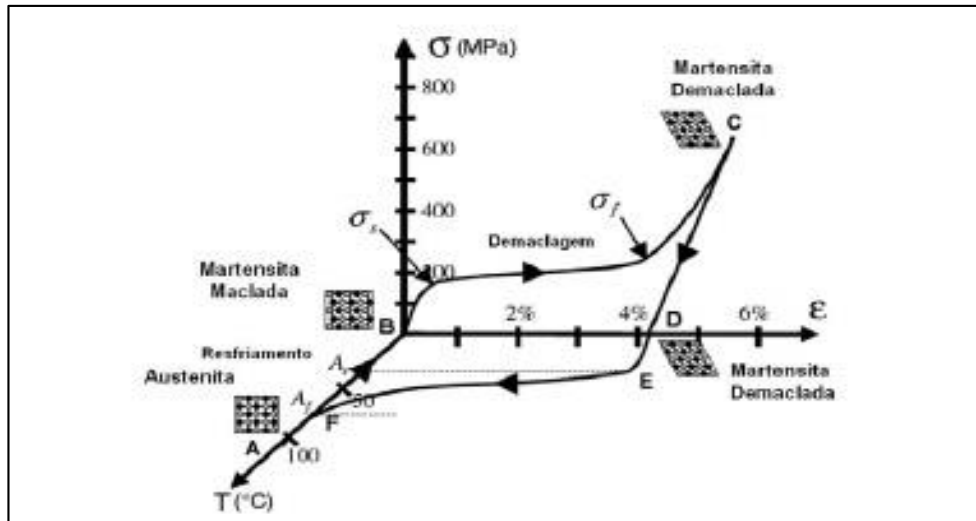


FIGURA 7: Efeito memória de forma com carregamento mecânico 3D [10].

3.4. Principais aplicações

3.4.1. Estruturas

Durante uma solicitação dinâmica, a estrutura é sujeita a vibrações que podem causar desde o mal-estar e desconforto aos utilizadores, até os danos estruturais que podem levar ao colapso da estrutura. O agravamento do problema é ampliado quanto maior for à proximidade entre a frequência natural da estrutura e a frequência da solicitação, podendo inclusive a estrutura entrar em ressonância.

Em função de sua capacidade de amortecimento, as LMF, são utilizadas como soluções para evitar danos estruturais.

Um bom exemplo dessa aplicação é encontrado na recuperação da torre dos sinos da Igreja de San Giorgio-Veneza, Itália. Após o abalo sísmico ocorrido em 15 de Outubro de 1996, a igreja ficou bastante danificada. A solução tradicional para a reabilitação de edifícios históricos como este passa normalmente pela introdução de reforços localizados de tirantes de

aço, que permitem aumentar a estabilidade e a ductilidade. No entanto este tipo de técnica nem sempre produz os resultados pretendidos, sendo que na Igreja de S. Giorgio optou-se por uma solução inovadora com o recurso a tirantes superplásticos LMF.

Depois da introdução de elementos LMF na sua estrutura foi possível a sua reabilitação total [12]. O procedimento aplicado neste caso está apresentado na Figura 8. À estrutura em cedência foram introduzidos cabos verticais de NiTi, devidamente ancorados. Em seguida foi introduzida uma variação de temperatura, provocando uma ação de restituição da posição inicial, fazendo com que a igreja regressasse praticamente à sua posição original.

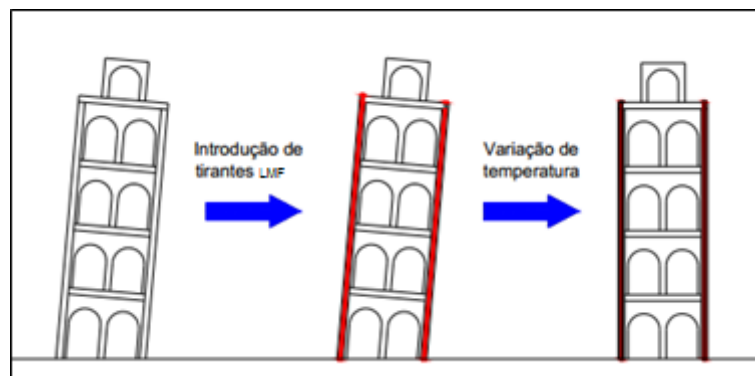


FIGURA 8: Variação de temperatura numa estrutura em cedência [13].

Em estudos recentes foi estudada uma maneira mais eficaz de se obter uma força de restituição maior usando arames de LMF pseudoelásticos para recuperar as posições iniciais de elementos estruturais após estes sofrerem deformações devido às mais diversas solicitações. Os ensaios foram realizados numa viga de concreto reforçado com catorze cabos com 3,0mm de diâmetro pré-esforçados. Cada cabo era constituído por sete fios e cada fio por sete arames de LMF superelásticos. Foram tomadas providências para evitar o escorregamento dos cabos. Posteriormente a viga foi sujeita a um carregamento que resultou na fenda da Figura 9(a). Após descarga da viga, devido à força elástica proveniente dos cabos de LMF, essa fenda foi praticamente fechada, como ilustrado na Figura 9(b). Estes resultados demonstraram a validade destes sistemas para aplicação em estruturas correntes, onde os cabos podem ser instalados recorrendo às mesmas técnicas de aplicação de cabos de pré-esforço [14].



FIGURA 9: Aplicação de fios LMF pseudoelásticos para recuperação de forma de uma estrutura civil de teste fissurado devido ao carregamento [14].

3.4.2. Medicina

Outra boa aplicação do uso das LMF consiste em um filtro de coágulos sanguíneos desenvolvido por Simon (Ryhaner, 1999). É um fio de NiTi 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 que 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, conforme a Figura 10 [15].

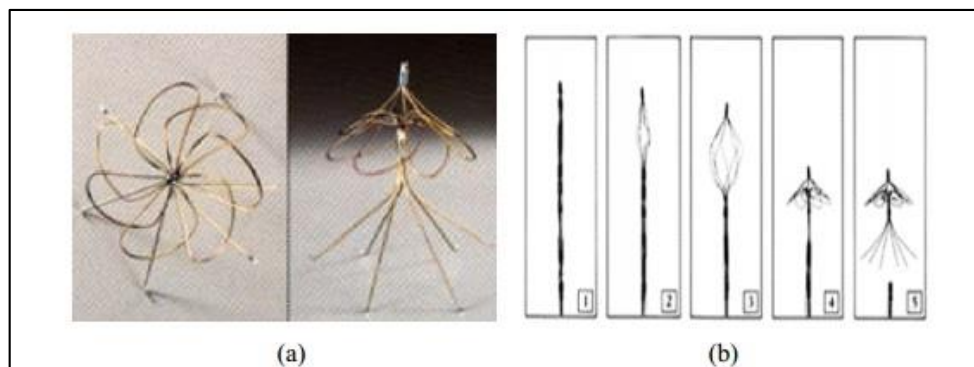


FIGURA 10: (a) Filtro de Simon na forma aberta, (b) Sequência de lançamentos do filtro [15].

3.4.3. Aeronáutica

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 o custo e o peso, dois pontos críticos do projeto de aeronaves. Muitas alternativas na indústria aeroespacial estão sendo pesquisadas para contornarem esse problema, e potenciais soluções são as LMF. Com o uso das LMF, as asas poderiam ter a configuração

mostrada na Figura 11, o que possibilita o projeto de sistemas mais otimizados em relação ao custo, ao peso e à eficiência [16].

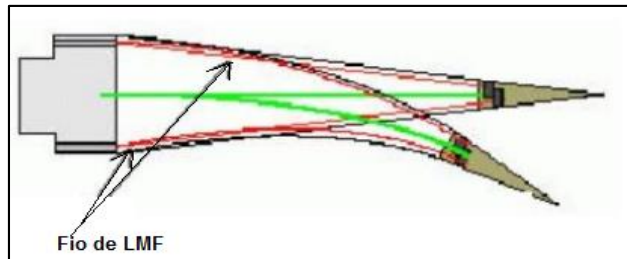


FIGURA 11: Fios de LMF acionando os flaps [16].

3.5. Atuadores

Atuadores são equipamentos capazes de converter energia hidráulica e/ou pneumática em movimento. Estão divididos principalmente em lineares e rotativos e são utilizados nas mais diversas aplicações e segmentos, como os exemplos abaixo:

- Robótica;
- Máquinas para conformação de metal;
- Máquinas da indústria de plásticos e borracha;
- Linhas de produção de automóveis e eletrônicos, entre outros.

Atuadores convencionais tais como motores hidráulicos e pneumáticos promovem grandes perdas de energia, têm um grande volume e pesadas massas para o sistema de atuação. Novas tecnologias e materiais estão atraindo atenção para que se desenvolvam sistemas mais leves e com grande poder de atuação.

Dois critérios são importantes na escolha do material do atuador: a densidade energética (capacidade de produção de trabalho por unidade de volume) e a faixa de frequência do material. O mais indicado seria um material ativo com uma elevada densidade energética e com uma alta resposta em frequência [10].

Os atuadores com LMF são vantajosos em comparação com outros materiais por apresentarem uma maior eficiência de produção de trabalho mecânica por volume de material. Além disso, eles têm a capacidade de recuperação da sua forma quando a temperatura é aumentada, mesmo sob altas cargas aplicadas, e absorvem e dissipam a energia mecânica quando acontecem mudanças reversíveis na forma. Essas mudanças podem induzir transformações de fase que vão modificar características de rigidez e amortecimento da liga [10].

Portanto são considerados como bons atuadores quando se trata de amortecer vibrações e absorver impactos.

No entanto, as LMF têm baixas frequências de resposta em relação à maioria dos outros materiais ativos, reduzindo assim seu uso às situações onde as faixas de frequência em análise são baixas. Para frequências acima de 10 Hz (10Hz-1000Hz), é mais viável o uso de LMF magnéticas [10].

Um exemplo de atuador com memória de forma (Figura 12) que tem sido usado em diversas aplicações, compõe-se em colocar uma mola de LMF balanceada contra uma mola de material convencional. Quando o dispositivo é aquecido, a mola LMF vence a resistência da outra mola, empurrando um pistão a uma determinada direção. Entretanto, quando o dispositivo é resfriado, a mola com memória de forma sofre uma transformação de fase, sendo comprimido pela ação da mola convencional, o que empurra o pistão na direção oposta.

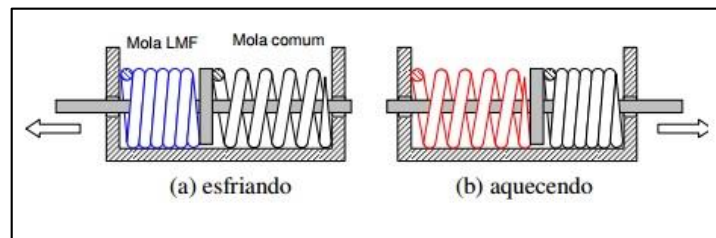


FIGURA 12: Atuador com LMF [7].

CAPÍTULO 4

Juntas coladas

A análise teórica de juntas adesivas já tem sido desenvolvida há décadas. O modelo inicialmente utilizado, de uma junta de sobreposição simples, foi sendo modificado e aprimorado por anos e hoje já existem métodos para uma análise teórica muito mais complexa.

Por ser uma análise não linear de grande complexidade, que envolve muitas variáveis e diferentes tipos de materiais, ela exige que sejam feitas muitas aproximações. Dessa forma, o uso dos dados obtidos acaba sendo limitado. Apesar de uma análise rigorosa ser de difícil alcance, existem métodos numéricos que permitem obter resultados bem aproximados e satisfatórios. Entre eles, o mais utilizado é o método dos elementos finitos.

4.1. Tipos de juntas

Existem diversos tipos de juntas coladas, como representado na Figura 13, sendo as juntas de sobreposição simples o tipo mais comum. Isso se deve à facilidade de sua fabricação e boas propriedades de transmissão de esforços. Sabe-se que devem ser evitadas as tensões de clivagem e arrancamento, e as juntas de sobreposição simples suportam a ação do cisalhamento, sendo mais utilizadas.

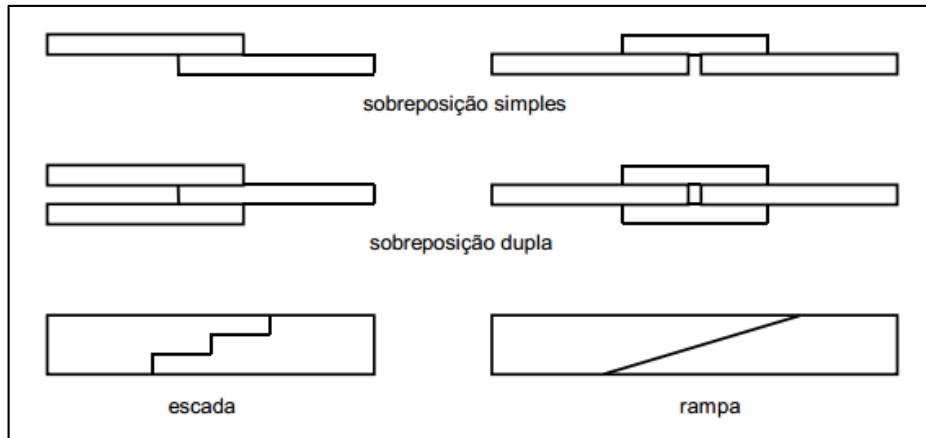


FIGURA 13: Os tipos mais comuns de juntas coladas [1].

4.2. Modos de Carregamento

É normal encontrar uma distribuição não uniforme de tensões nas juntas adesivas, mais normal do que se ter uma tensão uniformemente distribuída. Dessa forma, é muito comum que haja pontos concentradores de tensões, e são estes pontos que vão determinar a máxima resistência da junta colada.

Sendo assim, é de grande importância que o projeto da junta seja feito com essas considerações, e para tal é necessário que se saiba a quais modos de carregamentos essa junta estará submetida.

Existem basicamente quatro tipos diferentes de carregamentos em juntas coladas: cisalhamento, tração, arrancamento e clivagem (Figura 14).

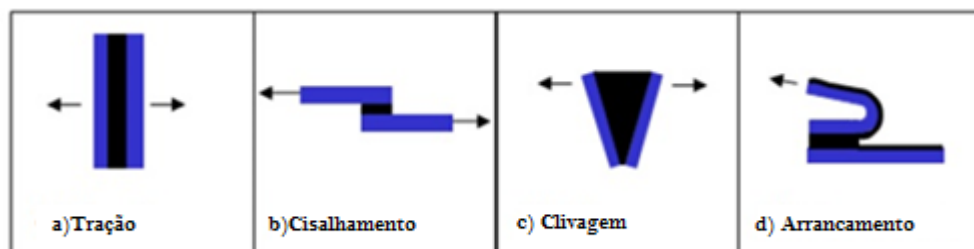


FIGURA 14: Principais tipos de esforços a que uma junta colada pode ser submetida [1].

4.2.1. 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 [1].

4.2.2. Cisalhamento

As tensões de cisalhamento são geradas por forças que tendem a separar os substratos. A tensão é paralela ao plano da junta, uniforme através de toda a zona colada. Esse é o tipo de tensão à qual a junta colada possui maior resistência, pois toda a área colada contribui para a resistência [1].

4.2.3. Clivagem e arrancamento

É o tipo de tensão que apresenta o maior perigo para as juntas coladas. A clivagem ocorre quando forças na extremidade de uma junta rígida atuam para a separação do substrato. 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.

Essa menor resistência comparada com o cisalhamento deve-se ao fato de a força ser aplicada na extremidade. Assim, toda a tensão fica concentrada na extremidade da junta, e o adesivo que está na outra extremidade contribui muito pouco na resistência.

Os adesivos frágeis e rígidos são extremamente sensíveis às forças de arrancamento. Já os adesivos mais dúcteis e flexíveis apresentam muito melhor distribuição de tensão, sendo assim mais resistentes a esse tipo de carregamento [1].

4.3. Comportamento Mecânico de juntas coladas

Como foi visto, as juntas mecânicas podem estar sujeitas aos quatro estados de tensões acima listados. Por isso, é necessário que se conheça o comportamento do adesivo quando submetido a estes diferentes estados de tensão.

A resistência mecânica dos adesivos a esses esforços é substancialmente menor do que a oferecida pelos metais. No caso do aço de construção a resistência à tração pode variar entre 200 MPa e 500MPa, enquanto os mais resistentes adesivos apresentam resistência à tração e ao corte de 40MPa até 50MPa.

As resistências das juntas coladas podem ser medidas através de ensaios destrutivos. Os principais são: ensaios de tração, cisalhamento, arrancamento, clivagem, impacto, fadiga e fluência.

Esses ensaios medem resistência à ruptura, limite de fadiga, de fluência e servem para o cálculo das tensões máximas admissíveis [1].

4.4. Ensaios de Fratura

Ensaio de fratura são usados para identificar os parâmetros dos adesivos, ajudando a avaliar se os defeitos existentes serão suscetíveis para causar a ruptura nas juntas coladas. Nos testes clássicos, as trincas iniciais entre duas chapas coladas propagam-se quando a carga é aplicada. Esses testes são classificados por três modos de propagação definidos na Teoria da Mecânica da Fratura. Na Figura 15, DCB (Double Cantilever Beam) e ENF (End Notched Flexure) são os modos I e II respectivamente. Também há testes que combinam os dois modos, o MMF (Mixed Mode Flexure) [17].

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 I + II, no qual uma das extremidades da viga está apoiada no apoio superior, provocando uma abertura (modo I) e cisalhamento (modo II).

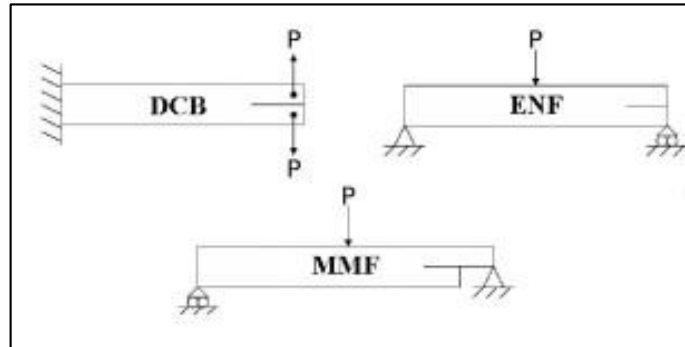


FIGURA 15: Ensaio de propagação de fissura [17].

A Taxa Crítica de Libertação de Energia (G_c) responsável pela propagação de fenda pode ser derivada da Teoria Linear da Viga considerando a equação de Irwin-Kies [17].

$$G_c = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (1)$$

Onde P é a carga aplicada, a é o comprimento da fenda e B a largura da chapa.

Tendo em conta que a flexibilidade C :

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (2)$$

δ é o deslocamento.

Capítulo 5

Ensaio de aderência

Ensaio de fratura foram realizados em uma chapa de LMF colada a uma chapa de alumínio no LADES - Laboratório de Compósitos e Adesivos do CEFET/RJ. Dois tipos de ensaio de flexão foram executados, o ensaio de modo II ENF, e o ensaio MMF que combina os modos I e II.

Para os ensaios foi utilizada a máquina de ensaio de fratura fabricada pela empresa “Instron” (Figura 16) e suas especificações são:

- Modelo: 5966
- Capacidade 10 KN;
- Espaço de teste vertical: 1256 mm



FIGURA 16: Máquina de ensaio de fratura.

As duas chapas possuíam as mesmas dimensões: 126 mm x 20 mm x 1,5 mm. A chapa de LMF era da composição NiTi SE508, e o adesivo utilizado para colagem foi a base de Cianocrilato (Superbond, Henkel Loctite Ltda., São Paulo, Brasil).

Os suportes foram separados a uma distância de 100 mm nos dois ensaios, e em cada extremidade uma região de 10 mm, sem adesivo, para representar a fratura inicial. Foi aplicado um deslocamento a uma velocidade de 5 mm/min.

Nas figuras 17,18 e 19 podemos observar os ensaios ENF e MMF.

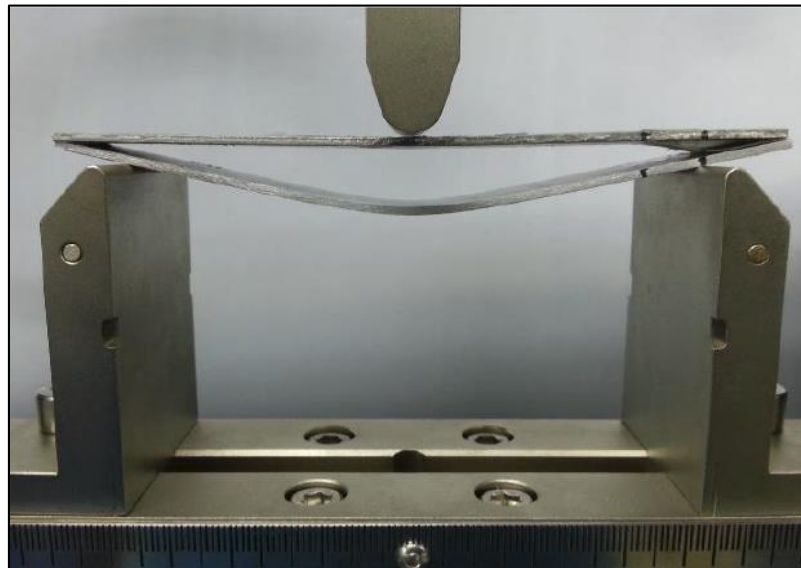


FIGURA 17: Ensaio ENF

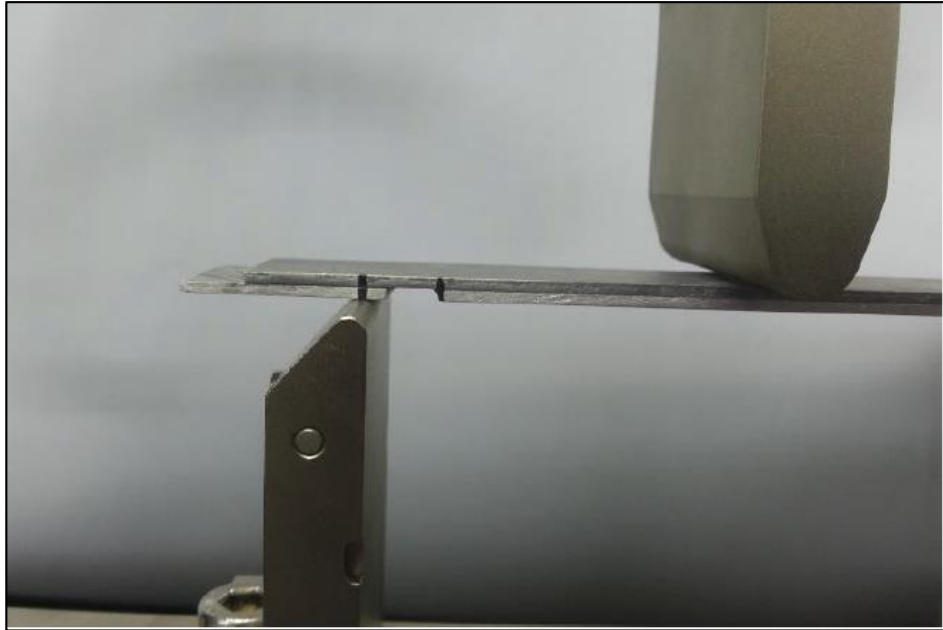


FIGURA 18: Ensaio MMF

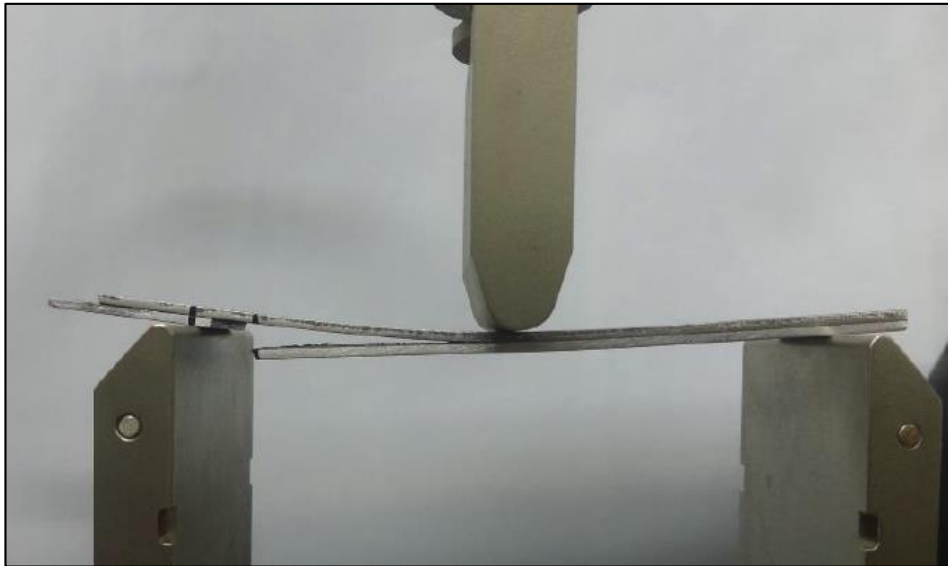


FIGURA 19: Ensaio MMF após ruptura

Os seguintes gráficos força x deslocamento foram obtidos através dos ensaios:

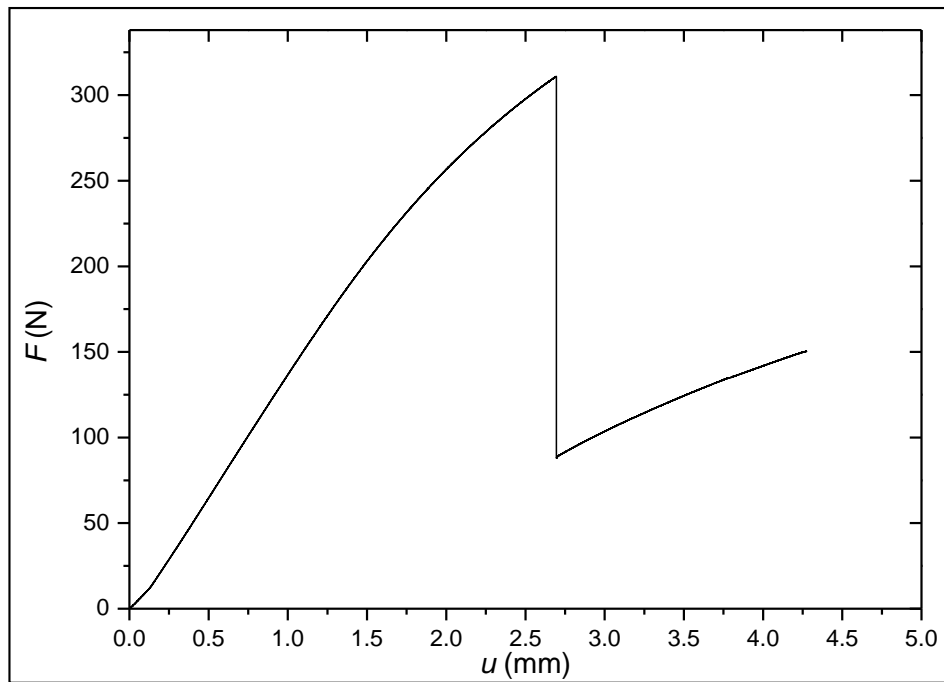


FIGURA 20: Gráfico força x deslocamento do ensaio ENF.

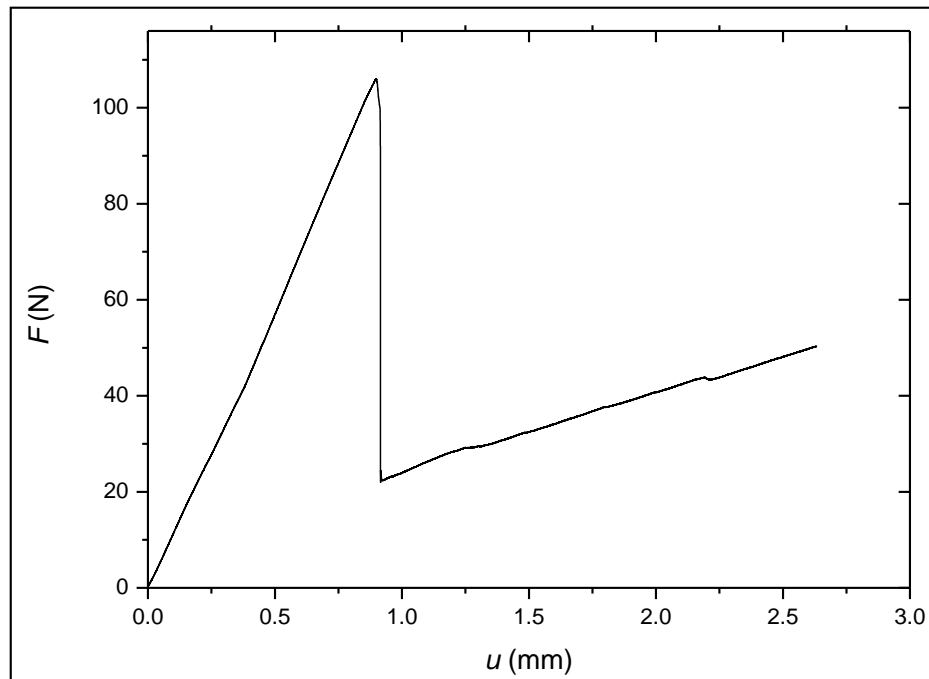


FIGURA 21: Gráfico força x deslocamento do ensaio MMF.

Observa-se que no gráfico do ensaio ENF a força máxima atingida chega a 300 N para um deslocamento de aproximadamente 2.5 mm, e no ensaio MMF a força máxima alcança 100 N para um deslocamento de quase 1.0 mm. Essa diferença na resistência acontece porque

no ensaio MMF o adesivo está resistindo simultaneamente a dois tipos de carregamentos, tração e cisalhamento, enquanto no ensaio ENF ele deve resistir somente ao cisalhamento.

CAPÍTULO 6

Análise numérica

Existem diversos modelos analíticos para a análise de tensões em uma junta adesiva, cada um apresentando níveis de precisão e limitações diferentes. Esses fatores e o objetivo da análise devem ser levados em consideração na escolha de um método a ser aplicado. Neste trabalho serão realizadas análises pelo método dos elementos finitos, atualmente, o mais aplicado para a análise de juntas coladas.

O método dos elementos finitos é um método aproximado e numérico, que pode ser aplicado em caráter geral na engenharia, apresentando como grande vantagem poder modelar qualquer geometria e condição de carregamento.

A análise de um corpo contínuo através do Método dos elementos Finitos consiste em dividir o domínio de integração do problema em um número discreto de regiões pequenas de dimensões finitas, denominado elementos finitos, cujo conjunto denomina-se malha de elementos finitos [18]. Os elementos são ligados entre si por pontos nodais chamados de nós. Cada elemento é analisado separadamente, o campo de deslocamento é interpolado a partir dos valores dos deslocamentos dos nós. Ligando os elementos pelos nós tem-se a quantidade de campo interpolado por toda a estrutura.

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

6.1. Análise dos ensaios de aderência

Como descrito no capítulo anterior, foram feitos ensaios de fratura com o objetivo de obter os parâmetros da interface adesiva para uma comparação experimental e numérica.

Foi feita uma simulação numérica dos ensaios experimentais no software Ansys, utilizando a mesma geometria e condições de contorno dos ensaios (Figura 22). 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.

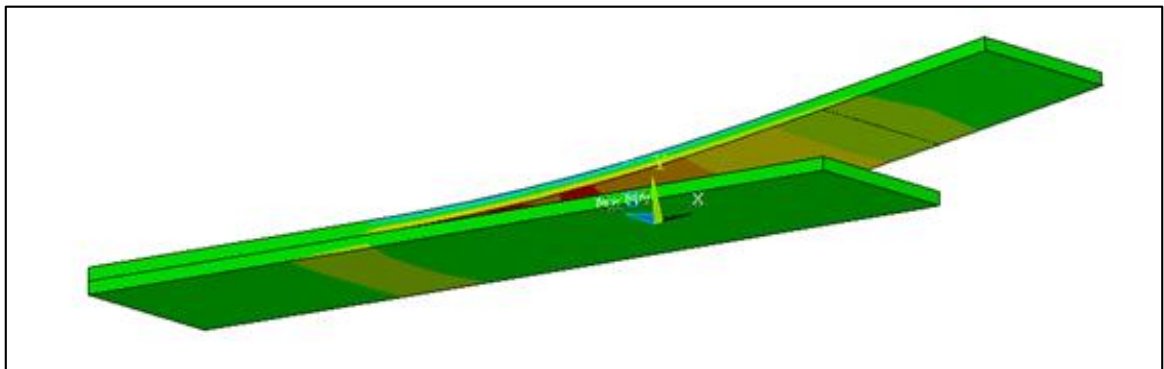


FIGURA 22: Simulação no software Ansys do ensaio MMF.

As curvas obtidas na simulação comparadas com as obtidas no ensaio seguem na Figura 23.

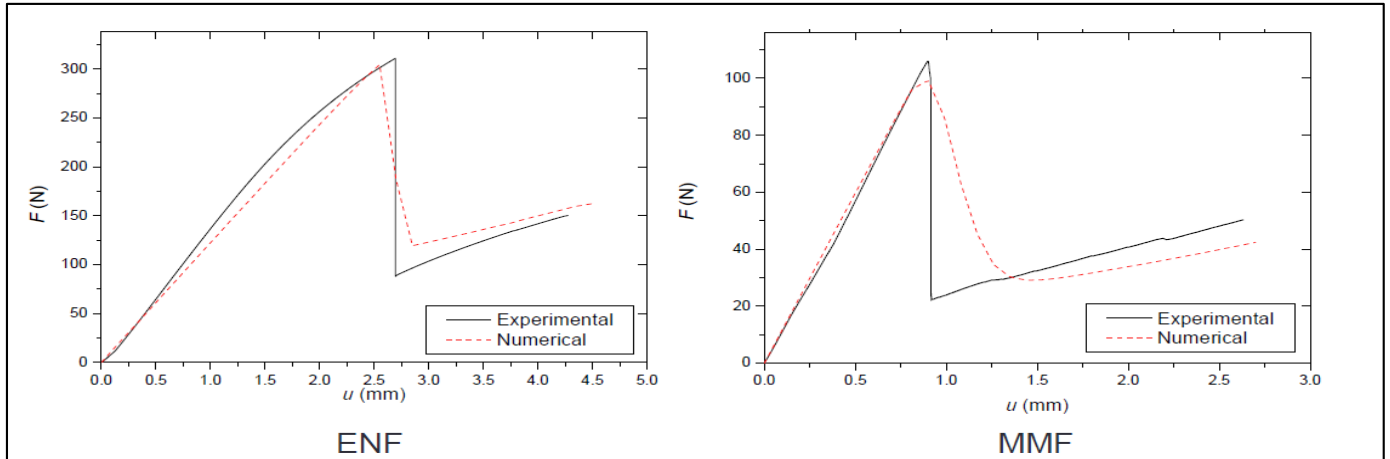


FIGURA 23: Comparação das curvas obtidas nos ensaios experimentais e numéricos.

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:

TABELA 3: Propriedades dos materiais utilizados na simulação.

Material	Propriedade	Valor
Alumínio	Módulo de elasticidade	64 GPa
	Coeficiente 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	$5.0e^{-5}m$

6.2. Objeto de estudo

O projeto abordado nesse trabalho trata da análise numérica de um absorvedor de vibração composto de um atuador de LMF colado em uma junta de expansão de alumínio. Para essa análise foi usado o Software Ansys 15.

Este trabalho consistiu em pesquisar aplicações de LMF e encontrar novas geometrias aonde a LMF poderia ser colada e continuar a exercer suas propriedades. Após algumas pesquisas foi decidido abordar no projeto juntas de dilatação, uma separação física entre duas partes de uma estrutura, para que estas possam se movimentar sem transmitir esforços entre si. Caso este espaçamento tenha presença de algum material rígido ou que tenha perdido suas propriedades de elasticidade, o mesmo produzirá tensões indesejáveis na estrutura, e assim impedir ou restringir o movimento decorrente da dilatação térmica previsto para a mesma, originando tensões superiores aquelas a serem absorvidas. Logo, poderá 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 [19].

Considerando que as juntas de dilatação são pela própria natureza 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 dessas obras por algum acidente provado pela situação limite de tais problemas.

Os estados de conservação das juntas são bastante precários, conforme evidenciados nas Figuras 24 e 25. Pensando em minimizar tais problemas, foi proposta juntas de dilatação, ligadas por um elemento de LMF.



FIGURA 24: Corrosão das armaduras decorrente das infiltrações de água pelas aberturas das juntas [20].



FIGURA 25: Fissuras no pavimento onde se encontram as juntas de dilatação [20].

6.2.1. Geometria da simulação

Como foi estudado nos capítulos anteriores, as LMF são de suma importância para amortecimento de vibrações pelo seu comportamento pseudoelástico. Foi escolhida uma junta de dilatação de solo sísmica em alumínio para comprovar a eficácia da LMF junto com a união por colagem. Foi utilizado como base o modelo 423 do fabricante Veda Technik representados nas Figuras 26 e 27 [21]. 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 (Tabela 4), e a referência utilizada no projeto foi a 6.90-050, com 138 mm de altura.



FIGURA 26: Junta de Dilatação de solo sísmica, utilizável para junta de solo interior ou exterior até 100 mm [21].

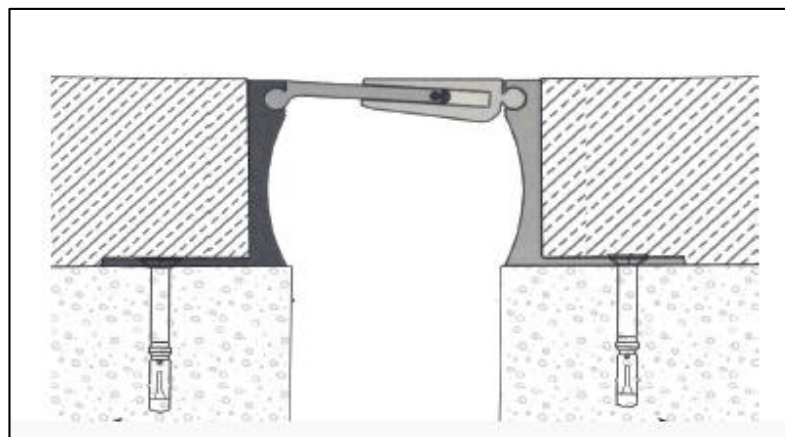














FIGURA 27: Dilatação da Junta [21].

TABELA 4: Dimensões da junta modelo 432 do fabricante Veda Technik [21].

Referências	 Abertura junta (mm)	 Movimentos (mm)	 Largura visível (mm)	 Largura total (mm)	 Altura (mm)	 Cargas	 Cores
6.90-030	30	± 5	55	150	15 / 20 / 25 / 35 / 43 / 48 / 58 / 63 / 68 / 88 / 108 / 138		
6.90-050	50	± 10	75	170	15 / 20 / 25 / 35 / 43 / 48 / 58 / 63 / 68 / 88 / 108 / 138		
6.90-070	70	± 12,5	95	190	15 / 20 / 25 / 35 / 43 / 48 / 58 / 63 / 68 / 88 / 108 / 138		
6.90-090	90	± 20	115	210	25 / 35 / 43 / 48 / 58 / 63 / 68 / 88 / 108 / 138		
6.90-110	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 grande área 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 histerético

associado. Dessa forma, foi decidido por um atuador em formato de arco, onde se tem uma grande superfície plana para colagem e uma área arredondada onde ocorrerá a deformação.

O raio máximo do arco é dependente da geometria da junta, e no caso simulado, foi de 25 mm. A altura da área colada foi de 113 mm e após alguns testes, o comprimento e espessura do atuador de LMF que melhor atendeu ao projeto foi respectivamente, 170 mm e 0,75 mm. 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 na área colada, e dessa forma, na resistência do adesivo. Ao mesmo tempo em que também interfere na área de deformação, aumentando a área de resistência da LMF, deverá ser então projetado uma geometria que consiga atender a esses requisitos sem prejudicar nas propriedades da LMF e na zona de contato.

As Figuras 28 e 29 mostram a geometria do projeto no software Ansys.

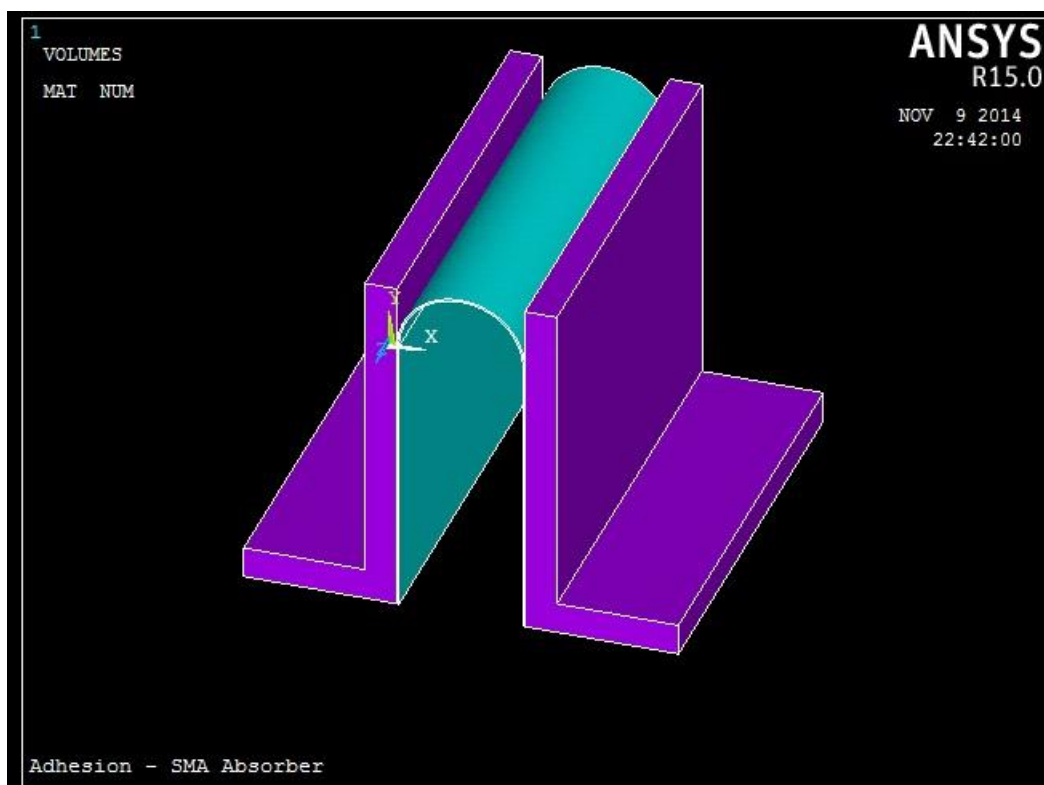


FIGURA 28: Vista em perspectiva da geometria no software Ansys.

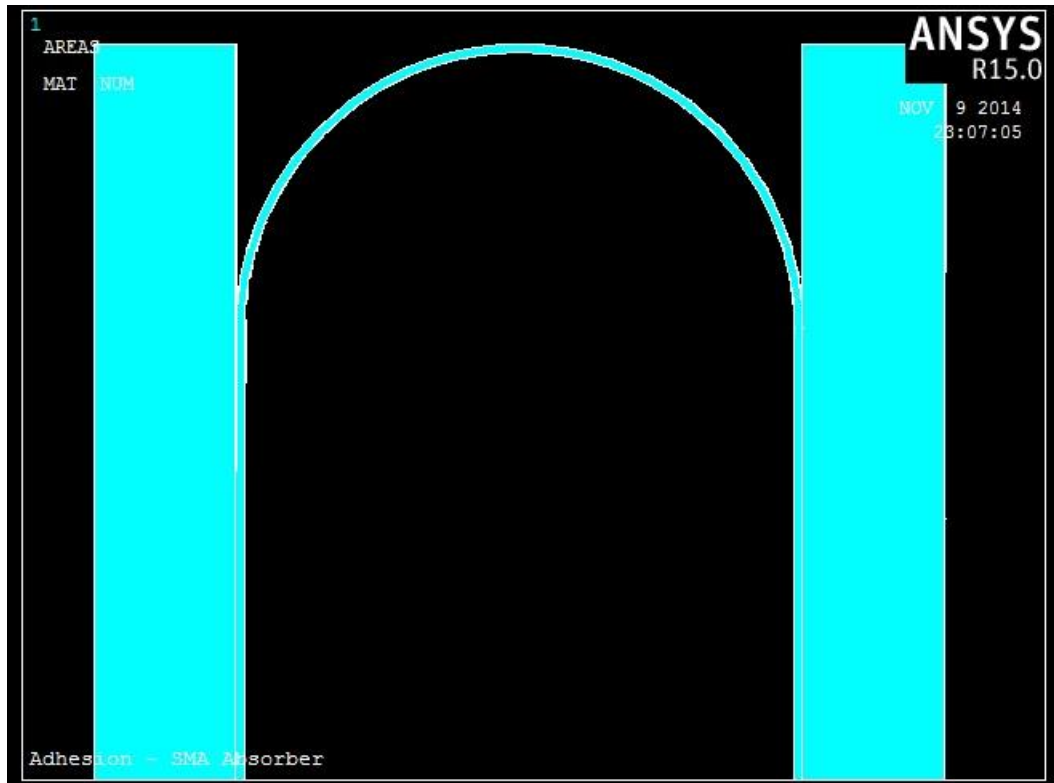


FIGURA 29: Vista frontal em detalhe evidenciando o atuador em forma de arco.

6.2.2. Malha

O elemento SOLID186 foi utilizado para malhar as juntas de alumínio e o atuador de LMF.

O elemento finito chamado SOLID186 é um elemento finito tridimensional que possui 20 nós e tem 3 graus de liberdade por nó referente às translações nas direções X, Y e Z (coordenadas globais). Esse elemento pode simular a plasticidade, hiperelasticidade, fluência, grande deflexão e grandes capacidades de deformação. Ele também tem a capacidade de formulação mista para simular deformações dos materiais elastoplásticos quase incompressíveis, e hiperelástico totalmente incompressível.

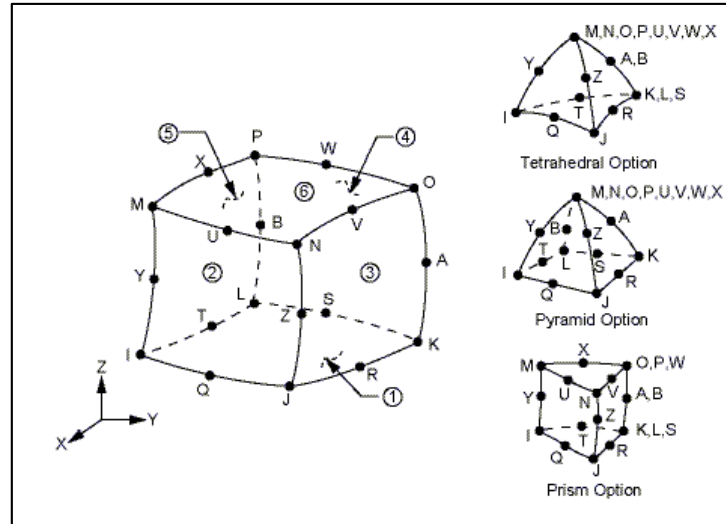


FIGURA 30: Elemento finito denominado SOLID186

As Figuras 31, 32e 33 ilustram a malha que foi aplicada à geometria no Ansys.

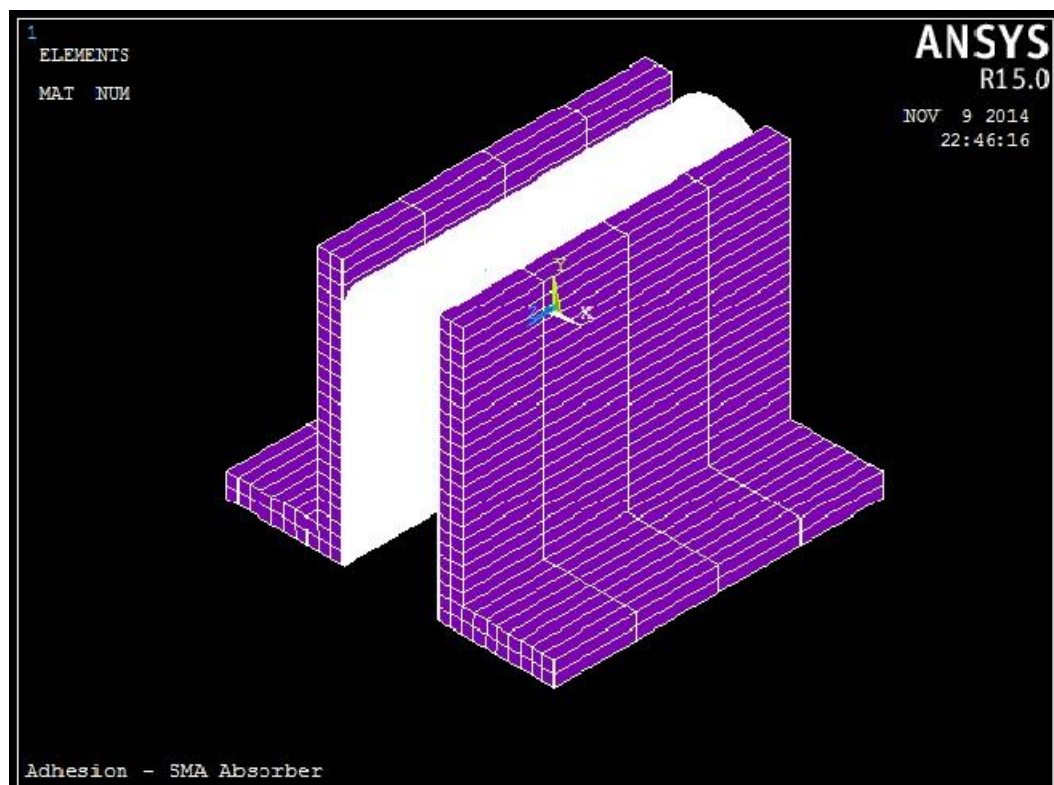


FIGURA 31: Malha aplicada à geometria do projeto.

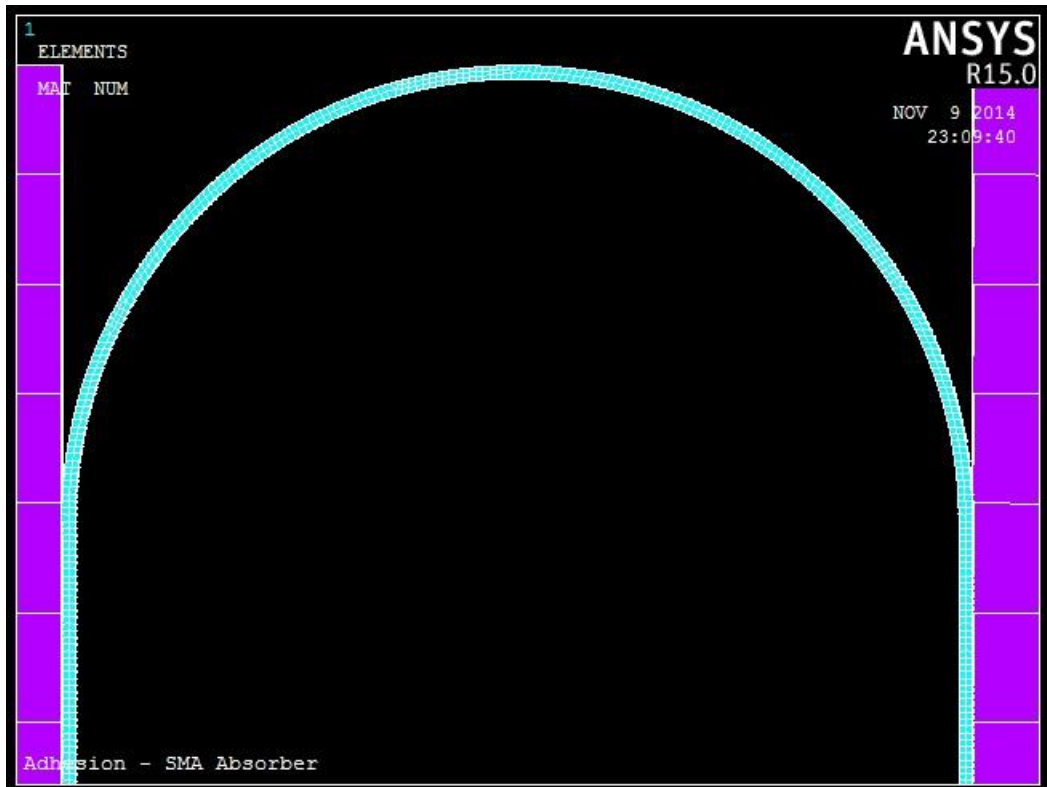


FIGURA 32: Detalhe da malha no arco da LMF.

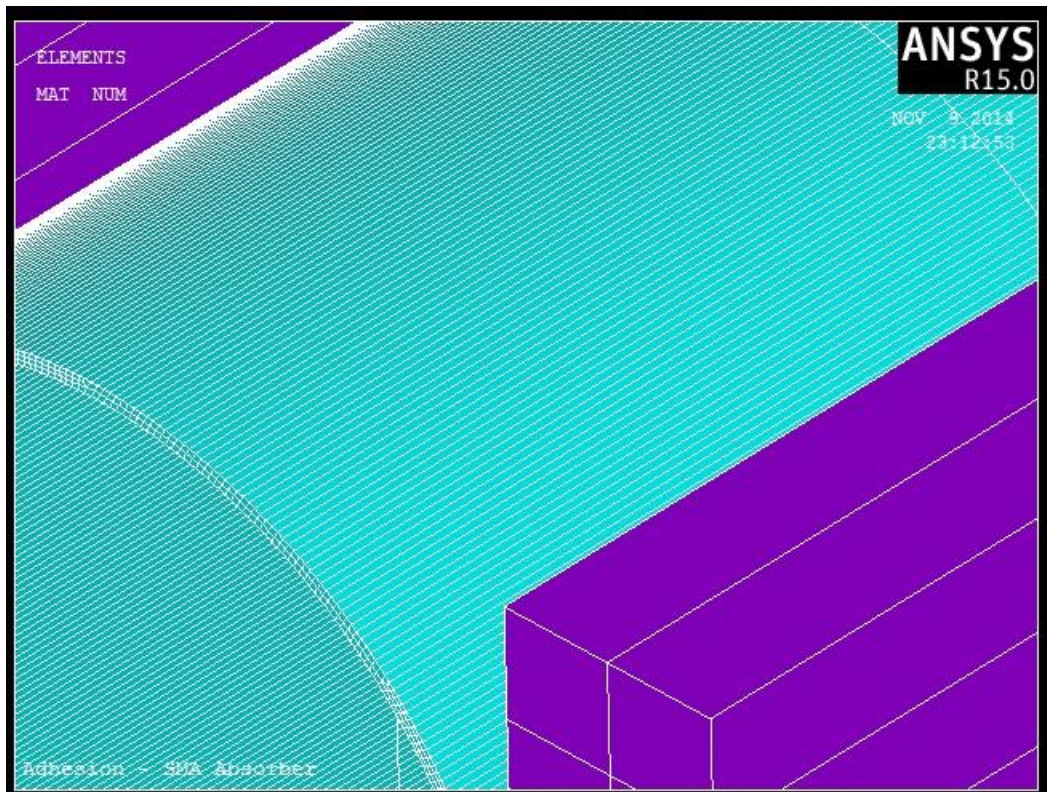


FIGURA 33: Detalhe da malha na geometria.

6.2.3. Análise de convergência

Para a definição da malha a ser usada é necessário que seja feita uma análise de convergência. Nesta análise podemos ver a variação da força máxima atingida de acordo com a quantidade de elementos em uma linha no comprimento da geometria. Quando os resultados começam a convergir temos o tamanho ideal de elemento. Dessa forma otimizamos o tempo de processamento, utilizando o maior tamanho de elemento possível para um resultado seguro. A figura 34 mostra o gráfico da análise de convergência.

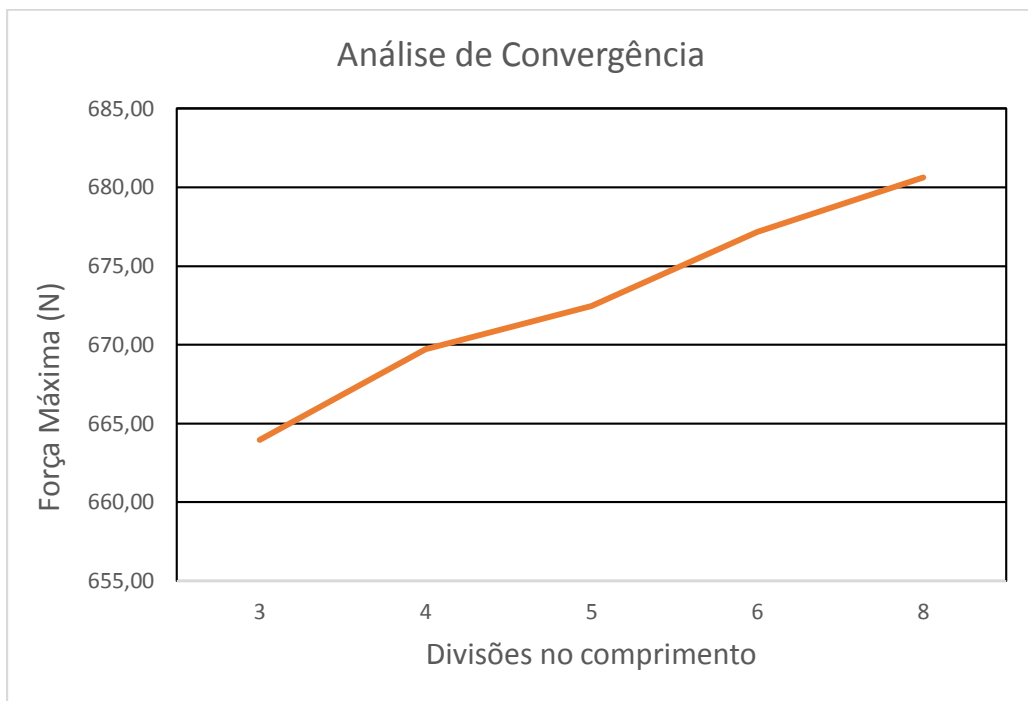


FIGURA 34: Gráfico da análise de convergência.

Observa-se que a variação dos resultados é menor que 3%. E sabendo que o tempo de cálculo do software aumenta consideravelmente com o aumento do número de elementos, não se torna vantajoso utilizar 8 divisões no comprimento. Assim sendo, foi optado por 4 divisões.

6.2.4. Zona de Contato

Para representar a união exercida pelo adesivo foi criada uma zona de contato entre o alumínio e a LMF. Foi utilizada a ferramenta Contact Manager, selecionada a área de Alumínio como superfície alvo, e a área de LMF como superfície de contato. Foi escolhido o adesivo como material para a interface, e selecionado como *Bonded* o comportamento da superfície de contato.

6.2.5. Condições de contorno e carregamento

Para melhor visualização do efeito de histerese da LMF, o modelo foi restringido para que houvesse movimento somente no eixo x. Ou seja, as seguintes condições de contorno e carregamento foram aplicadas:

- 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 10,0mm (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 desta forma, ser observada a curva de histerese.

A representação das condições de contorno e do carregamento no software Ansys pode ser observada na figura 35.

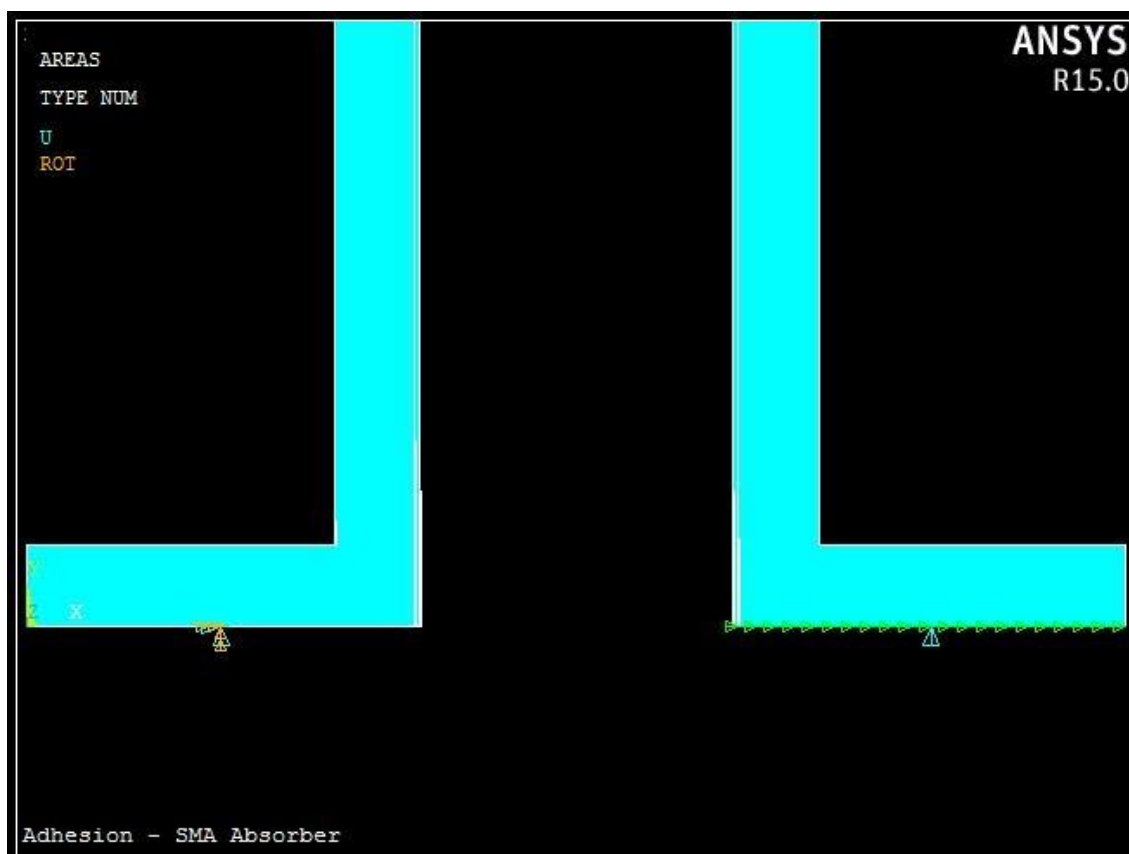


FIGURA 35: Representação no Ansys para as condições de contorno e carregamento.

6.2.6. Resultados

A seguir são apresentados os resultados da simulação executada.

O gráfico força x deslocamento da base direita da junta de dilatação, onde se pode observar o efeito da pseudoelasticidade da LMF, é mostrado na Figura 36. Com este gráfico fica provado que a LMF sofreu transformação de fase devido à tensão a que foi submetida, dissipando energia no descarregamento da força. Dessa forma, nota-se que a LMF manteve suas propriedades mesmo utilizando o adesivo como forma de união.

Nas Figuras 37 e 38, observa-se uma tensão residual máxima de 477.68 KPa após o carregamento e descarregamento do deslocamento, essa tensão, porém, tem valores de ordem desprezível para a simulação.

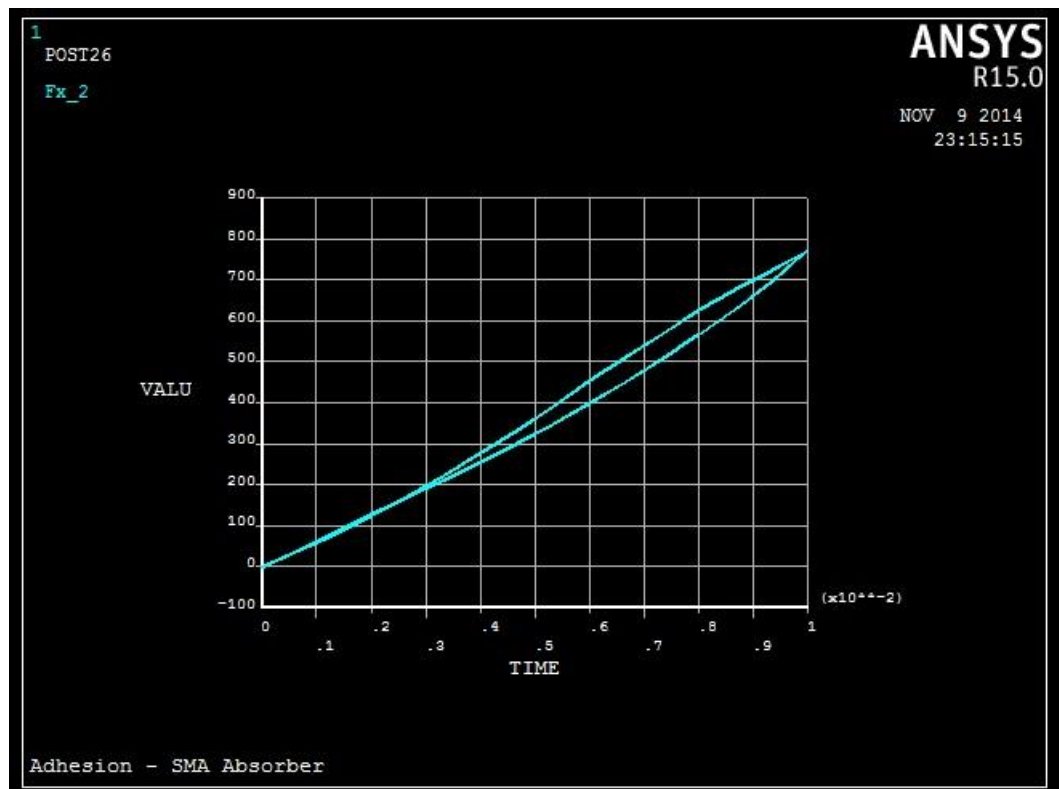


FIGURA 36: Gráfico Força x deslocamento

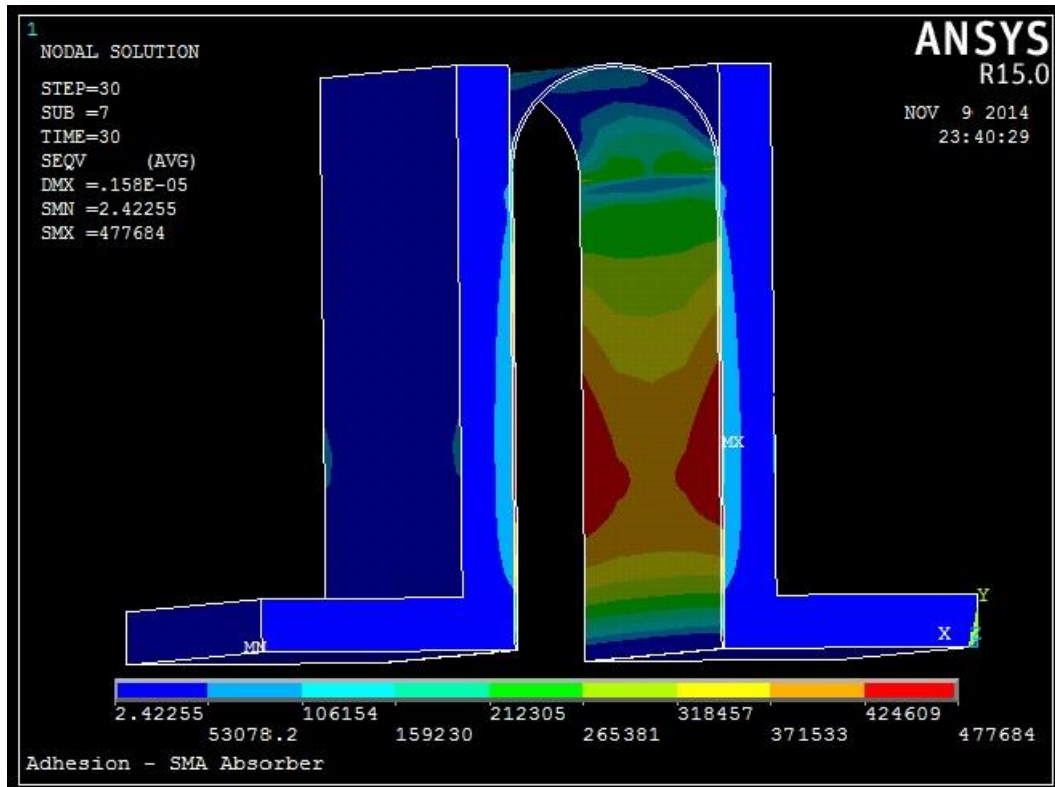


FIGURA 37: Tensão de Von Mises no final da simulação, após o descarregamento do deslocamento de 10 mm – Vista 1.

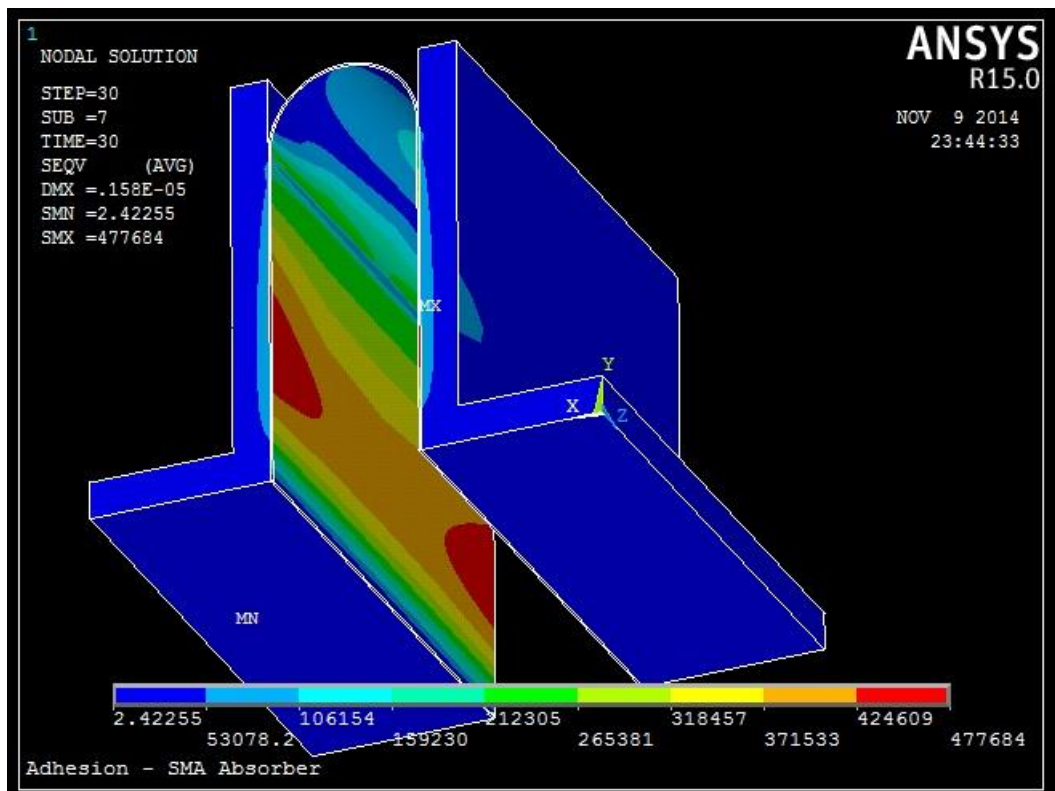


FIGURA 38: Tensão de Von Mises no final da simulação, após o descarregamento do deslocamento de 10 mm – Vista 2.

O modelo quando o deslocamento da base é igual a 10 mm é mostrado nas Figuras 39, 40 e 41. Observa-se que a tensão se concentra toda no arco de LMF, evidenciando que este é o elemento que está sofrendo a deformação. A tensão máxima atingida, representada em vermelho, é de 374 MPa, estando acima da tensão de início de transformação de fase da LMF de 297 MPa. Dessa forma, conclui-se novamente, que houve transformação de fase.

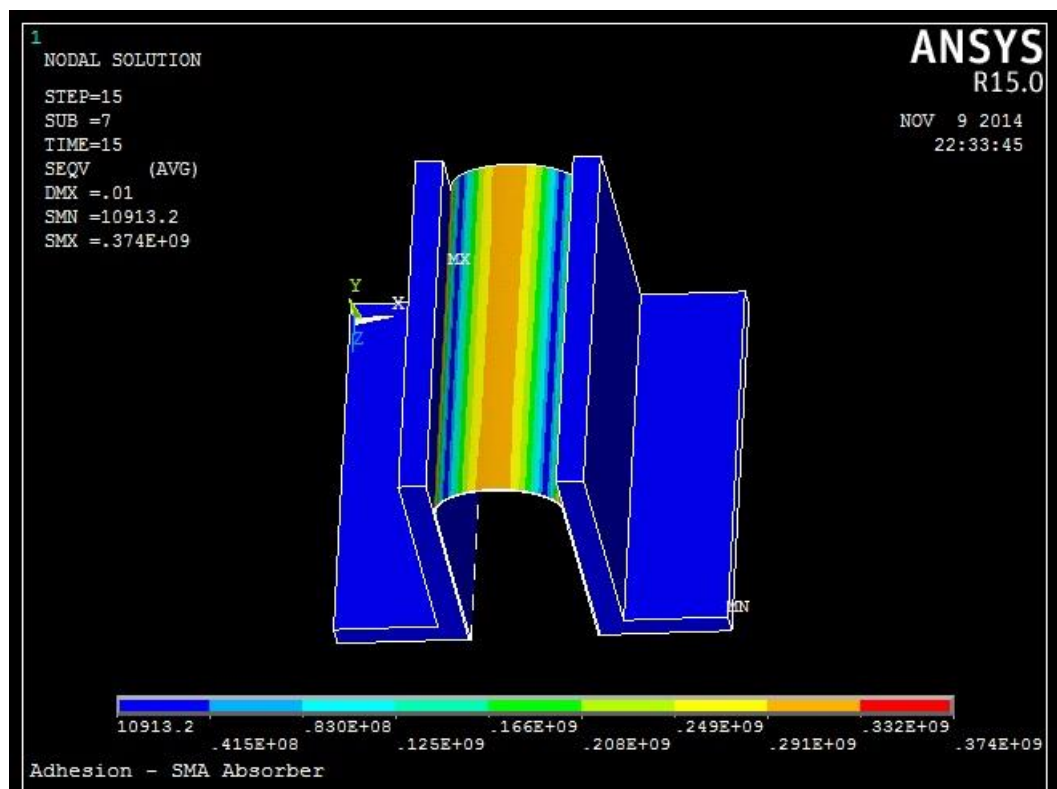


FIGURA 39: Tensão de Von Mises quando o deslocamento da base é igual a 10 mm Vista 1.

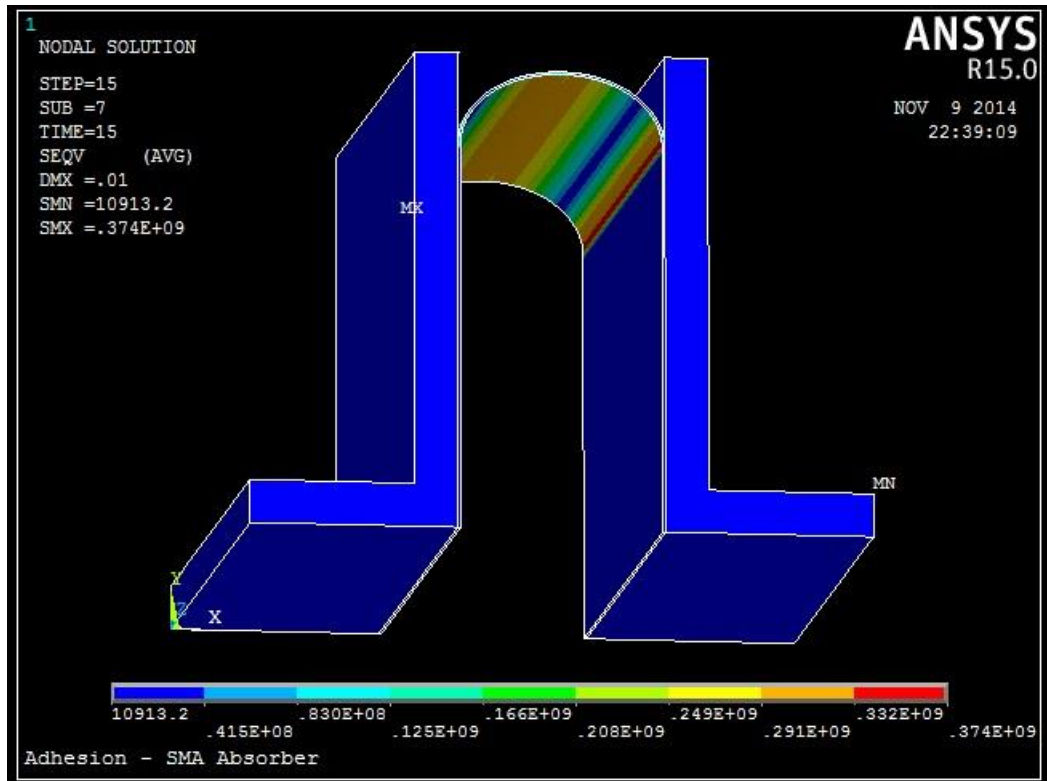


FIGURA 40: Tensão de Von Mises quando o deslocamento da base é igual a 10 mm Vista 2.

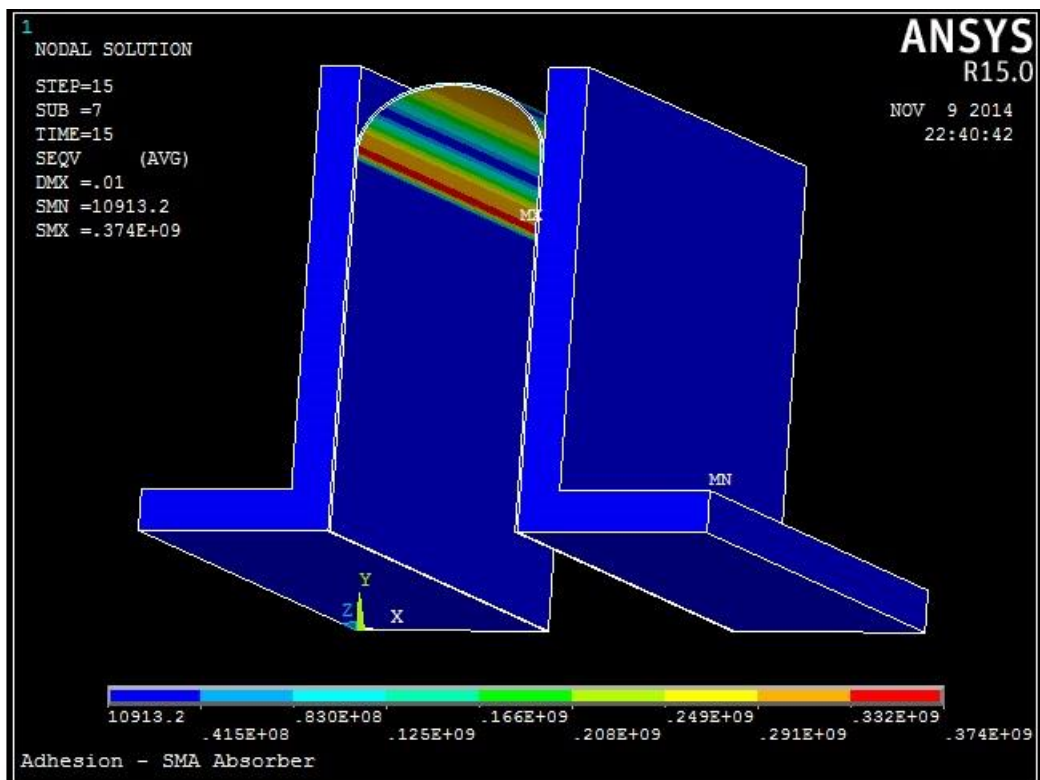


FIGURA 41: Tensão de Von Mises quando o deslocamento da base é igual a 10 mm Vista 3.

O status da zona de contato é apresentado na Figura 42. 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 43 mostra a tensão normal na zona de contato quando o deslocamento da base é igual a 10 mm. Nota-se que a tensão máxima atingida de 11.9 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. Dessa forma, conclui-se que para uma melhor distribuição de tensões o comprimento da área colada poderia ser aumentado, porém aumentar a altura não teria influência significativa na tensão máxima atingida.

Finalmente, a tensão de cisalhamento da zona de contato quando o deslocamento da base é igual a 10 mm pode ser observada na figura 44. Novamente observa-se que a tensão atingida de 646.49 KPa é menor que a tensão máxima de cisalhamento suportada pelo adesivo de 8.5 MPa. Neste caso, a tensão de cisalhamento não chega a apresentar um valor expressivo. Isto deve-se às restrições e ao movimento aplicado, que basicamente só exercem força na direção normal a zona de contato.

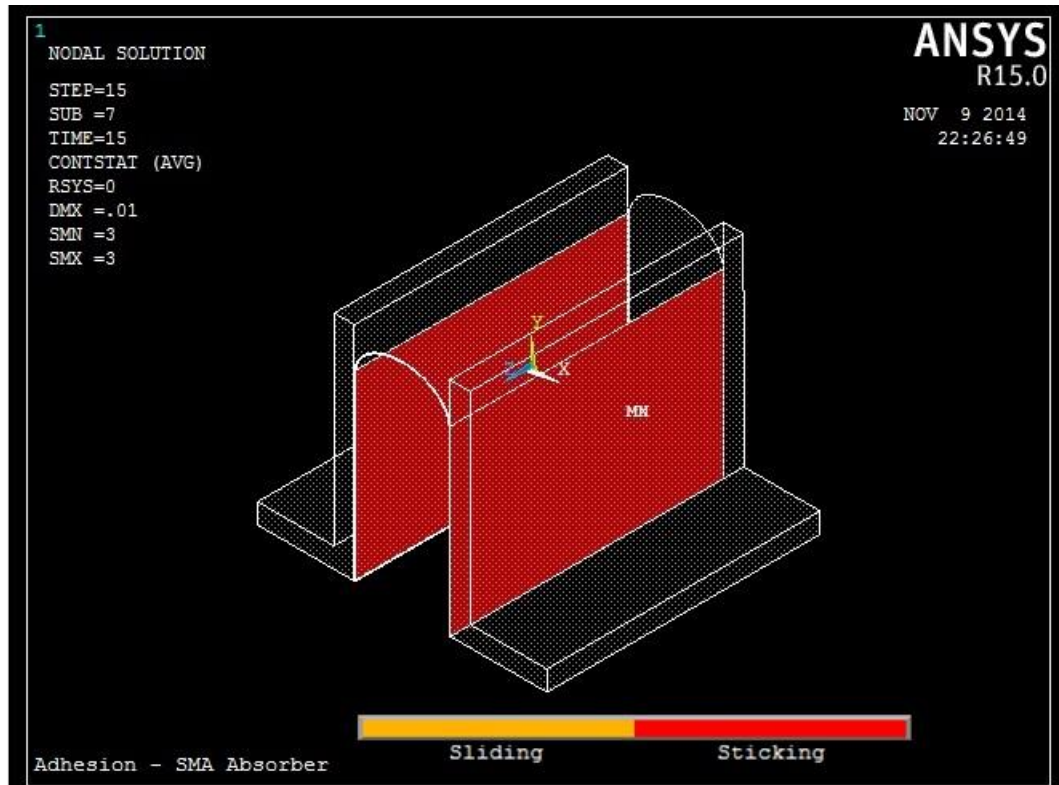


FIGURA 42: Status da zona de contato.

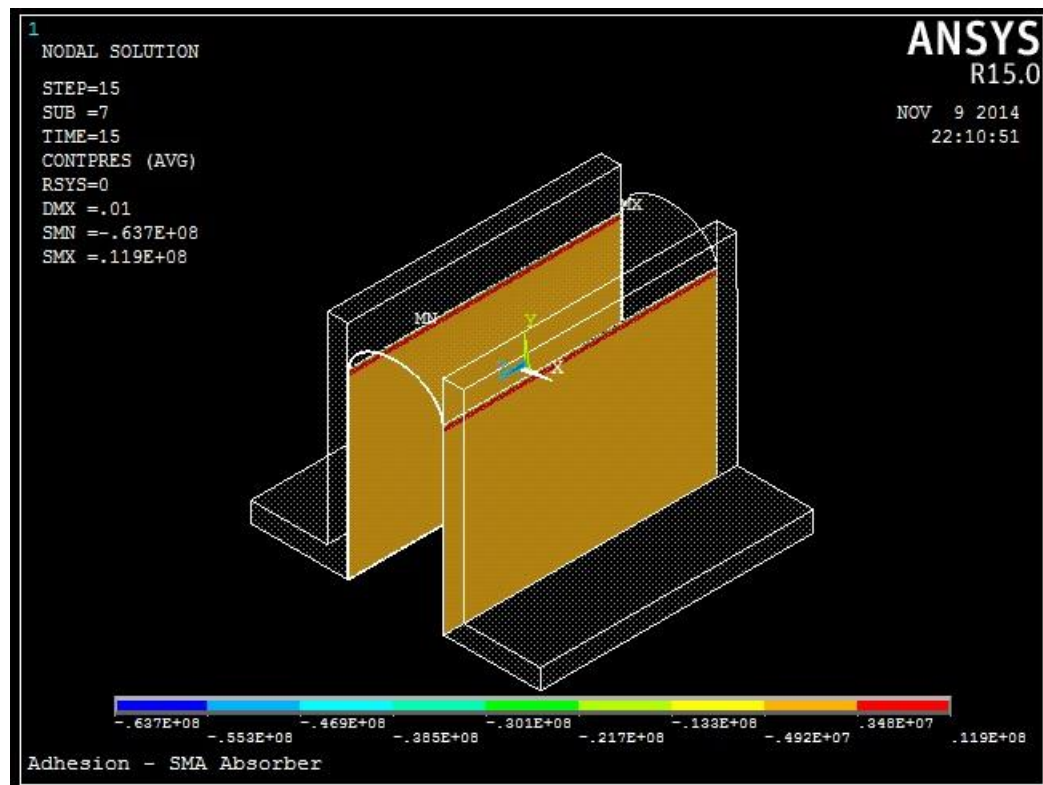


FIGURA 43: Tensão normal na zona de contato com o deslocamento de 10 mm.

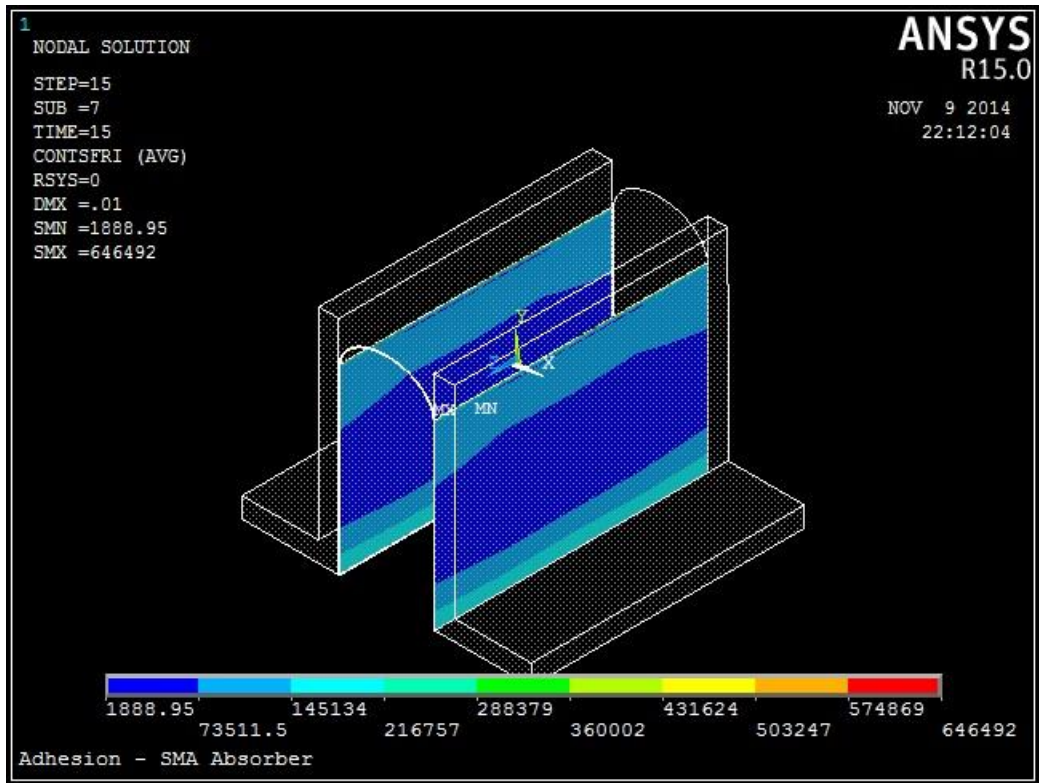


FIGURA 44: Tensão de cisalhamento no adesivo, com o carregamento de 10 mm.

6.2.7. Conclusão

Neste trabalho é proposto um modelo numérico não linear baseado no Método dos Elementos Finitos para estudar a viabilidade da utilização de adesivos em conjunto com as ligas com memória de forma.

Ficou comprovado através dos resultados da simulação que o projeto pode apresentar a característica pseudoelástica da LMF, mesmo quando a ligação entre os componentes do sistema é feita por meio de adesivos. 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.

Utilizando o adesivo como forma de ligação, as propriedades da LMF não sofrem alteração, o que torna o uso do adesivo vantajoso se comparado com a soldagem, por exemplo, a qual pode causar modificações no material devido à alta temperatura.

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.

6.2.8. Sugestões para Trabalhos Futuros

Sendo este um projeto piloto deve-se atentar que muitas melhorias podem ser feitas para que se chegue a uma simulação ainda mais próxima da realidade.

Como sugestões para projetos futuros, pode-se alterar as condições de contorno, eliminando algumas das restrições de movimento, para que se possam representar mais corretamente forças exercidas por automóveis, por exemplo.

A geometria da LMF também pode ser mais elaborada, de forma que haja menos área propícia à deformação e mais área de contato com o adesivo, tornando o gráfico força x deslocamento com uma área maior.

Pode ser estudada também, a influência da altura da área colada na tensão normal máxima atingida. De forma que se encontre a altura mínima necessária para a colagem sem que se afete os resultados obtidos.

Referência Bibliográfica

- [1] da Silva, Lucas Filipe, de Magalhães, Antônio, demoura, Marcelo F.S.F. - Juntas adesivas estruturais.
- [2] Esteves, Jose Luis Soares-Estudo do Comportamento de Adesivos Estruturais.
- [3] Frenzel, J. et. al. High quality vacuum induction melting of small quantities of NiTi shape memory alloys in graphite crucibles. *Materials science e engineering*, p. 299-310, 2004.
- [4] Otsuka, K.; Ren, X. Recent developments in the research of shape memory alloys. *Intermetallics*, 7, pp. 511-528, 1999.
- [5] Wu, S. K.; Lin, H. C. Recent development of TiNi-based shape memory alloys in Taiwan.
- [6] Shaw, J. A. ; Kyriakides, S. Thermomechanical aspects of Ni-Ti. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 43 (8): pp. 1243-1281, 1995. *Materials Chemistry and Physics*, p. 81-92, 2000.
- [7] Hodgson D. E; Wu M. H.; Biermann R. J. Shape Memory Alloys, *Metals Handbook*. Vol. 2. p. 897-902, 1990.
- [8] DesRoches, R. and Delemont, M. Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys. *Engineering Structures*, 2002.
- [9] Rogers, C. A. Intelligent material systems: the dawn of a new materials age. *Journal of Intelligent Materials System and Structures*, Vol. 4, Technomic Publishing Company, Lancaster, U.S.A., 1993.
- [10] Lagoudas D. C., *Shape Memory Alloys - Modeling and Engineering Applications* (2008).
- [11] Adeodato, Arthur, *Redução de Vibrações em Eixo utilizando Elementos de Ligas com Memória de Forma*, Projeto Final, CEFET- Maracá, Maio 2014.
- [12] Delaey L., Krishnan R. V., Tas H., Thermoelasticity, pseudoelasticity, and the memory effects associated with martensitic transformations. Part 1. Structural and microstructural changes associated with the transformations. *Journal of Materials Science*, 9 ed., p. 1521-1535 (1974).
- [13] Semião, Luís António Pereira- *Utilização de Ligas com Memória de Forma no controlo de vibrações em Estruturas Inteligentes de Engenharia Civil*, Mestrado, Universidade Nova do Porto-Portugal, 2010.

- [14] Song, G. Applications of shape memory alloys in civil structures. *Engineering Structures* (28), 1266-1274, 2006.
- [15] Machado, L.G. ; Savi, M.A. Aplicações odontológicas das ligas com memória de forma. *Revista Brasileira de Odontologia*. vol. 59, n. 5, pp. 302-306, 2002.
- [16] Asundi, A. Polarimetric sensors for strain measurement and damage detection: smart structures. *Materials and Mems: Bangalore, India* 1996.
- [17] de Barros, Silvio. *Crack Propagation: Analytical and Numerical Approaches*, NEPEM/UFPB-João Pessoa, 2009.
- [18] La Rovere, H. L. *Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Masonry Walls under Simulated Seismic Loadings*. Ph.D. Dissertation (Structural Engineering), University of California, San Diego ,1990.
- [19] www.engenhariae.com.br-Acessado Outubro de 2014
- [20] Ximenes, Aldo, *Análise de Juntas de Dilatação das Pontes e Viadutos da Região Metropolitana de Recife*, Pós Graduação, Universidade de Pernambuco-Recife, Maio 2011.
- [21] <http://www.vedatechnik.com> – Acessado Agosto de 2014.
- [22] www.abnt.org.br- Acessado em Setembro de 2014.