



PROJETO DE GRADUAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO PARA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS LIGAS NITI

Por,
Fábio Bruno Neiva Melo

Brasília, 30 de Novembro de 2011

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO
DE FIXAÇÃO PARA CARACTERIZAÇÃO
MECÂNICA DAS LIGAS NITI**

POR,
Fábio Bruno Neiva Melo

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Palloma Vieira Muterlle, UnB/ ENM (Orientador)

Prof. Edson Paulo da Silva, UnB/ ENM

Prof. Antônio Manuel Dias Henriques, UnB/ENM

Brasília, 30 de Novembro de 2011.

Agradecimentos

*Agradeço às pessoas que contribuíram com o meu trabalho.
À minha família, em particular meus pais, pela força e incentivo nesta fase difícil;
À Prof. Palloma Vieira Muterlle, pela orientação e confiança;
À minha namorada Mariana, pela presença, apoio e carinho.*

Fábio Bruno Neiva Melo

RESUMO

Absorvedores dinâmicos de vibração são utilizados para mitigar a vibração em cabos de transmissão de energia elétrica causado pela excitação eólica. Os absorvedores *stockbridge* convencionais são projetados para que tenham eficiência máxima em frequências próximas às frequências naturais do cabo, mas apresentam baixo rendimento para outras frequências. A utilização de absorvedores dinâmicos de vibrações, que apresentam o comportamento pseudoelástico das ligas de NiTi, tem como objetivo atenuar as amplitudes de vibrações do sistema primário para uma faixa de frequência de excitação e não apenas para uma frequência fixa. Este projeto tem como objetivo a preparação de todos os requisitos necessários para o ensaio de tração, tendo em vista a posterior caracterização de ligas de NiTi em trabalhos futuros, para obtenção da melhor combinação entre a largura de histerese, o amortecimento e o comportamento dinâmico destas ligas quando em exercício. O projeto de um dispositivo de fixação para a máquina de tração e o dimensionamento dos corpos de prova (de acordo com NBR 6152) estão entre os requisitos necessários.

Palavras-Chave: *stockbridge*, pseudoelástico, liga de memória de forma, NiTi, ensaio de tração, linhas de transmissão.

ABSTRACT

Dynamic vibration absorbers are used to hamper the vibration caused by Aeolian on overhead transmission lines. Conventional stockbridge dampers are designed to have maximum efficiency at frequencies close to the cable natural frequencies, but they presents a low income to other frequencies. The utilization of dynamic vibration dampers, which use the pseudoelastic behavior of NiTi alloys, aims to mitigate the vibration amplitudes of the primary system to a range of excitation frequency and not only for a fixed frequency. The final objective of this project is the characterization of NiTi alloys through tensile testing and metallography to obtain the best combination of the width of hysteresis, damping and dynamic behavior of these alloys when exercising. This project aims to prepare all the necessary requirements for the tensile test, with a view to subsequent characterization of NiTi alloys in future work to obtain the best combination of the width of hysteresis, damping and dynamic behavior of these alloys when exercising. Among the requirements there is the design of a device for the MTS and dimensioning of the specimens (according to NBR 6152).

Keywords: *stockbridge*, pseudoelastic, shape memory alloy, NiTi, traction test, transmission lines.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | CONTEXTUALIZAÇÃO | 1 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 3 |
| 1.3 | METODOLOGIA | 4 |
| 1.4 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 5 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| 2.1 | LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA | 6 |
| 2.1.1 | EFEITO MEMÓRIA DE FORMA (EMF) | 7 |
| 2.1.2 | A QUASIPLASTICIDADE | 10 |
| 2.1.3 | A PSEUDOELASTICIDADE | 10 |
| 2.1.4 | APLICAÇÕES DAS LIGAS NITI | 12 |
| 2.1.5 | COMPORTAMENTO CÍCLICO | 14 |
| 2.1.6 | TAXA DE DEFORMAÇÃO | 15 |
| 2.2 | O DISPOSITIVO <i>STOCKBRIDGE</i> | 16 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 19 |
| 3.1 | MATERIAIS | 19 |
| 3.2 | ENSAIO DE TRAÇÃO | 19 |
| 3.2.1 | CORPOS DE PROVA | 20 |
| 3.2.2 | DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO | 22 |
| 3.2.3 | RESINA EPÓXI PARA PREECHIMENTO DO MOLDE | 23 |
| 3.2.4 | METODOLOGIA DO ENSAIO | 24 |
| 4 | CONCEPÇÃO, PROJETO E FABRICAÇÃO DO SUPORTE | 26 |
| 4.1 | DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO | 26 |
| 4.2 | RESULTADOS | 38 |
| 5 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 44 |
| 5.1 | CONCLUSÃO | 44 |
| 5.2 | RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 44 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 46 |
| | ANEXOS | 50 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Falha típica por fadiga em Espaçador (SNEGOVSKI, 2004). | 1 |
| Figura 1.2 – Falha típica por fadiga em sela de fixação (SNEGOVSKI, 2004). | 1 |
| Figura 1.3 – (a) Cabo Mensageiro Convencional (SAUTER, 2003) e (b) Gráfico comparativo de desempenho entre amortecedores do tipo DogBone médio (verde), Assimétrico (preto) e dois protótipos de NiTi pseudoelástico (azul e vermelho) (CACHUTÉ e YAMAMOTO, 2009). | 2 |
| Figura 2.1 – (a) Estrutura cúbica de corpo centrado da Austenita e (b) Estrutura monoclínica da Martensita (DO NASCIMENTO, 2006). | 6 |
| Figura 2.2 – Representação esquemática das fases envolvidas no EMF para transformação sem carga (a) e com carga (b) e (c) (LAGOUDAS, 2008) (Modificado). ... | 8 |
| Figura 2.3 - Gráfico de tensão-deformação-temperatura exibindo o EMF típico de uma SMA de NiTi (LAGOUDAS, 2008) (Modificado). | 9 |
| Figura 2.4 – Ciclo de carregamento típico de uma SMA (a) e representação esquemática das transformações de fase (b) (LAGOUDAS, 2008) (Modificado). | 11 |
| Figura 2.5 – Exemplo experimental de comportamento pseudoelástico do NiTi em diferentes temperaturas (LAGOUDAS, 2008) (Modificado). | 11 |
| Figura 2.6 – Representação gráfica dos fenômenos EMF, quasiplasticidade e pseudoelasticidade (DA SILVA, 2011). | 12 |
| Figura 2.7 – (a) <i>Stents</i> auto expansíveis (STERNBERG, 2007) e (b) Peças de implantes ortopédicos (HZPRODUCT, 2011). | 13 |
| Figura 2.8 – Modelo de asa inteligente (LAGOUDAS, 2008). | 13 |
| Figura 2.9 – Comportamento cíclico das ligas de NiTi em função do número de ciclos (DAYANANDA, 2008). | 14 |
| Figura 2.10 – Curva de tensão-deformação para ensaio a ruptura (DAYANANDA, 2008) (Modificado). | 15 |
| Figura 2.11 – Curva de tensão deformação cíclica para diferentes taxas de deformação. | 16 |
| Figura 2.12 – <i>Stockbridge</i> montado na linha (SAUTER, 2003). | 17 |
| Figura 2.13 - <i>Stockbridge</i> simétrico (Singh, 2003). | 18 |
| Figura 2.14 – <i>Stockbridge</i> assimétrico (KST, 2011). | 18 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.15 – <i>Stockbridge</i> do tipo <i>DogBone</i> (MEDIA FILMS, 2011). | 18 |
| Figura 3.1 – Máquina Universal..... | 20 |
| Figura 3.2 – Garras da máquina de tração. | 23 |
| Figura 4.1– Representação esquemática do dispositivo de fixação de geometria retangular, (a) componentes separados, (b) dispositivo montado, (c) região de maior esforço, (d) Diagrama de corpo livre. | 27 |
| Figura 4.2 – Montagem de luva de resina epóxi e suporte. | 28 |
| Figura 4.3 – Diagrama de corpo livre da luva (DE LÉLIS, 2011)(Modificado). | 29 |
| Figura 4.4 – Condições de contorno (a) e malha (b) utilizada na simulação. | 30 |
| Figura 4.5 – Geometria 1 (a), geometria 2 (b), geometria 3 (c) e geometria 4 (d). ... | 31 |
| Figura 4.6 – Tensão Cisalhante (xy) na luva de resina das geometrias 2 (a) e 3 (b). 31 | |
| Figura 4.7 – Tensão Equivalente de Von Mises nas geometrias 1 (a) e 2 (b). | 31 |
| Figura 4.8 – Tensão de Von Mises no suporte e Tensão máxima de cisalhamento (xy) na resina das geometrias 1 (a e c) e 4 (b e d). | 32 |
| Figura 4.9 – Esboço de suporte com extremidade cilíndrica já montado nas garras e com luva de resina embutida. | 33 |
| Figura 4.10 – Geometria 5 (a), geometria 6 (b), geometria 7 (c) e geometria 8 (d). 34 | |
| Figura 4.11 – Deflexão Total (a) e Tensão equivalente (b) do suporte escolhido (geometria 7). | 35 |
| Figura 4.12 – Tensões cisalhantes na luva de resina (a) e detalhe em corte (b) e, tensões equivalentes na luva (c) e detalhe em corte (d). | 35 |
| Figura 4.13 – Foto das duas peças fabricadas. | 36 |
| Figura 4.14 – Tensões equivalentes na tampa. | 37 |
| Figura 4.15 - Luva de resina epóxi embutida no molde (a) e chapa de alumínio antes de ser dobrada (b)..... | 37 |
| Figura 4.16 – Moldes reaproveitados. | 38 |
| Figura 4.17 – Detalhe da montagem do corpo de prova. | 38 |
| Figura 4.18 – Ensaio de tração do corpo de prova 1, material 4, primeira parte. | 39 |
| Figura 4.19 – Foto antes (a) e após a primeira parte do ensaio (b). | 39 |
| Figura 4.20 - Ensaio de tração do corpo de prova 1, material 4, segunda parte. | 40 |
| Figura 4.21 - Ensaio de tração do corpo de prova 1, material 4, terceira parte. | 40 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.22 – Material 4 após o ensaio. | 41 |
| Figura 4.23 – Ensaio de tração no corpo de prova 1, material 2. | 42 |
| Figura 4.24 – Marcações indicando o escorregamento da luva. | 42 |
| Figura 4.25 - Ensaio de tração no corpo de prova 3, material 2. | 43 |
| Figura 5.1 – Chapa aparafusada na parte inferior da peça. | 44 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 – Materiais Utilizados e principais propriedades..... | 19 |
| Tabela 3.2 – Dimensões dos corpos de prova. | 21 |
| Tabela 3.3 - Quantidade em peso de resina e endurecedor para diferentes razões de mistura (R)..... | 24 |
| Tabela 4.1 – Tensões admissíveis para alguns aços (SHIGLEY, MISCHKE e BUDYNAS, 2005). | 28 |
| Tabela 4.2 – Resultado dos cálculos preliminares. | 28 |
| Tabela 4.3 – Comprimento de embutimento (mm)..... | 29 |
| Tabela 4.4 – Resultado das simulações das geometrias 1, 2, 3 e 4..... | 30 |
| Tabela 4.5 – Resultados das Simulações das geometrias 5,6,7 e 8..... | 34 |
| Tabela 4.6 – Dureza das peças fabricadas..... | 36 |

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

| | | |
|--------------|--|----------------------|
| M_s | Temperatura inicial da martensita | [°C] |
| M_f | Temperatura final da martensita | [°C] |
| A_s | Temperatura inicial da austenita | [°C] |
| A_f | Temperatura final da austenita | [°C] |
| M_p | Pico de Martensita | [°C] |
| A_p | Pico de Austenita | [°C] |
| ϵ_t | Deformação de transformação | [mm] |
| k | Rigidez | [kg/s ²] |
| M | Massa | [kg] |
| NiTi | Sistema Níquel Titânio | |
| L_0 | Comprimento de medida original | [mm] |
| S_0 | Área da seção transversal original | [mm ²] |
| L_T | Comprimento total do corpo de prova | [mm] |
| L_e | Comprimento de embutimento do corpo de prova | [mm] |
| d | Diâmetro extremo do corpo de prova | [mm] |
| RMC | Carga máxima de tração do corpo de prova | [N] |
| n | Fator de segurança | |
| S_{ut} | Tensão máxima de tração | [MPa] |
| l | Distância entre as garras da MTS | [mm] |
| b | Largura das garras da MTS | [mm] |
| h | Altura das garras da MTS | [mm] |
| F | Força trativa do corpo de prova | [N] |

Símbolos Gregos

| | | |
|--------|-----------|-----------------------|
| ρ | Densidade | [mm ³ /kg] |
|--------|-----------|-----------------------|

x

| | | |
|-----------------|--|-------|
| σ_s | Tensão de início | [MPa] |
| σ_f | Tensão de final | [MPa] |
| ε_t | Deformação de transformação | [m] |
| ω_n | Frequência Natural | [Hz] |
| τ_a | Tensão de arrancamento do corpo de prova | [MPa] |

Grupos Adimensionais

k_{cp} Constante de proporcionalidade para corpos de prova

Siglas

| | |
|----------------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| SMA | <i>Shape Memory Alloy</i> |
| EMF | Efeito de Memória de Forma |
| A | Austenita |
| M | Martensita |
| M ^t | Martensita maclada |
| M ^d | Martensita demaclada |
| CCC | estrutura cristalina cúbica de corpo centrado |
| SCE | <i>Southern California Edison</i> |
| MTS | <i>Material Test System</i> |
| UNB | Universidade de Brasília |
| FINEP | Financiadora de Estudos e Projetos |
| ADVA | Absorvedor dinâmico de vibrações adaptativo |

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar o tema em estudo e a motivação para realização do trabalho, bem como apresentar os objetivos propostos, metodologia utilizada para se alcançar tais objetivos e como este relatório foi estruturado.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As linhas de transmissão de energia elétrica estão sujeitas a ação do vento que geram vibrações nos cabos condutores. Essas vibrações, quando atingem níveis indesejados, podem acarretar em falhas catastróficas e, por conseguinte, em graves prejuízos às pessoas e empresas como queima de equipamentos e queda da capacidade produtiva do dia devido à interrupção da transmissão de energia (SAUTER, 2003). Além disso, essas falhas causam prejuízo extremamente alto para as empresas responsáveis pelas linhas de transmissão devido a elevados custos de manutenção e operação, perdas de material e conseqüentemente, redução da eficiência na transmissão (CACHUTÉ e YAMAMOTO, 2009). As Figuras (1.1) e (1.2) mostram uma falha típica por fadiga perto do ponto de fixação do cabo em um espaçador e em uma sela de fixação, respectivamente, ambas causadas por vibração eólica. Tendo em vista a diminuição da vibração nos cabos e então uma redução do número e frequência das falhas por fadiga no sistema de transmissão, são utilizados principalmente absorvedores de vibração do tipo *stockbridge*. Os *stockbridges* são constituídos basicamente de duas massas inerciais conectadas entre si por um cabo mensageiro, que por sua vez é conectado ao cabo condutor por um grampo de fixação (SILVA, 2006).

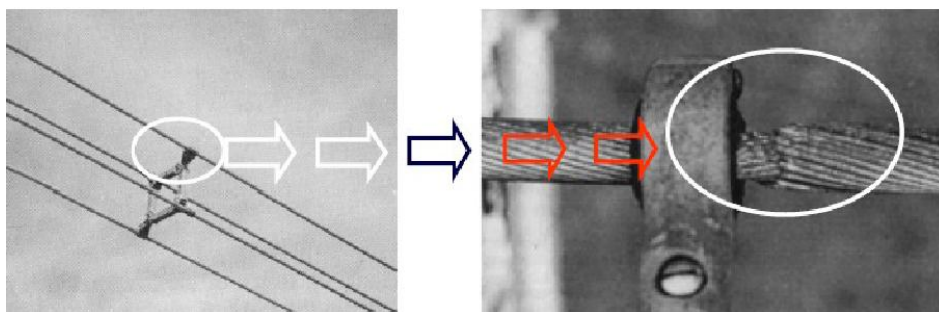
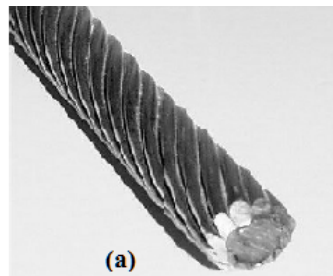


Figura 1.1 – Falha típica por fadiga em Espaçador (SNEGOVSKI, 2004).



Figura 1.2 – Falha típica por fadiga em sela de fixação (SNEGOVSKI, 2004).

Em dispositivos *stockbridges* convencionais o cabo mensageiro é composto por uma alma de aço envolta por camadas de fios entrelaçados (Fig. 1.3 (a)). É devido ao atrito entre os fios que ocorre a dissipação de energia. O amortecimento causado é relativamente baixo, sendo bastante eficiente na redução da vibração nas proximidades do seu ponto de fixação apenas quando a excitação eólica atinge frequências próximas à frequência natural do cabo condutor de eletricidade. Tendo em vista uma melhor eficiência para faixas de frequências mais amplas, pesquisas têm sido realizadas na investigação da substituição dos materiais convencionais dos cabos mensageiros por ligas de SMA (DONG, XIONG, *et al.*, 2006) (CACHUTÉ e YAMAMOTO, 2009). Cachuté e Yamamoto (2009) investigaram a substituição do cabo mensageiro do *stockbridge* convencional por uma barra de SMA com as mesmas características geométricas, através de ensaio dinâmico em um *Shaker*, obtendo assim um gráfico de desempenho comparativo entre vários *stockbridges* convencionais e os protótipos de NiTi pseudoelástico (Fig. 1.3 (b)).



Protótipos de SMA - *DogBone Médio* - Assimétrico

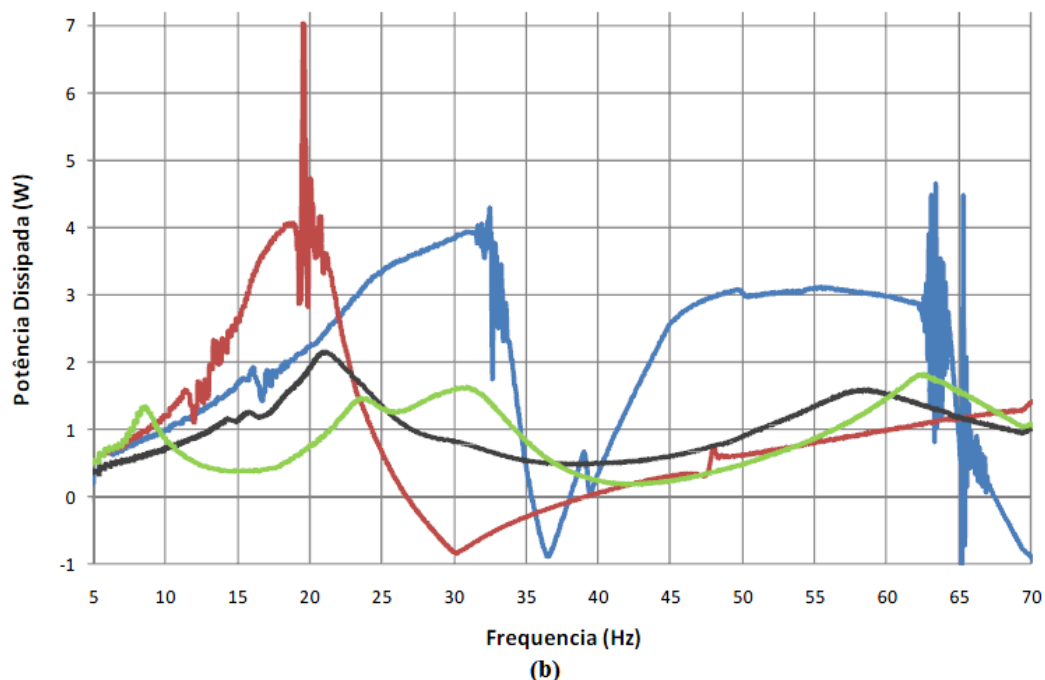


Figura 1.3 – (a) Cabo Mensageiro Convencional (SAUTER, 2003) e (b) Gráfico comparativo de desempenho entre amortecedores do tipo DogBone médio (verde), Assimétrico (preto) e dois protótipos de NiTi pseudoelástico (azul e vermelho) (CACHUTÉ e YAMAMOTO, 2009).

Os resultados mostraram em geral um desempenho superior dos protótipos de NiTi, que apresentaram maiores potências dissipadas e melhor distribuição, ou seja, potências dissipadas em uma faixa maior de frequências (gráfico azul). Entretanto, entre frequências de 25 à 43 Hz o desempenho cai, chegando a um vale em 30 Hz, frequência na qual a presença do *stockbridge* é danosa a linha (ao invés de dissipar, introduz energia ao sistema). Um estudo mais aprofundado do comportamento das propriedades mecânicas das ligas de NiTi poderá otimizar o desempenho para tais amortecedores.

As ligas com memória de forma (SMA's) constituem um grupo de materiais metálicos capaz de recuperar a geometria original (ou de desenvolver consideráveis forças de restituição ao se restringir sua recuperação) através da imposição de um campo de temperatura e/ou de tensão, devido a transformações de fase induzidas no material. A pseudoelasticidade e os efeitos de memória de forma (EMF) são alguns comportamentos apresentados por essas ligas, sendo comercialmente viáveis as ligas à base de cobre e as ligas de níquel-titânio (NiTi) - esta última, o objeto deste trabalho. Estas propriedades singulares das SMAs são encontradas nas ligas que apresentam transformação martensítica reversível, e têm instigado uma série de pesquisas vislumbrando aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento (SCHETKY, 2000) (KAHN, HUFF e HEUER, 1998).

Embora uma variedade relativamente grande de ligas apresente o EMF, somente as ligas que podem recuperar quantidades substanciais de alongamento ou que geram forças significativas de retorno, quando deformadas, e que realizam trabalho, quando carregadas, são de interesse comercial. Atualmente, estas são ligas à base de NiTi e ligas à base de cobre, tais como as de Cu-Zn-Al e Cu-Al-Ni (DOS SANTOS, 2006).

A utilização de absorvedores adaptativos de vibrações tem como objetivo atenuar as amplitudes de vibrações do sistema primário para uma faixa de frequência de excitação e não apenas para uma frequência fixa. Alguns trabalhos apresentam um dispositivo absorvedor dinâmico de vibrações adaptativo (ADVA) com elementos de memória de forma (ZAK, CARTMELL e OSTACHOWICZ, 2005) (HE, OI, *et al.*, 2006) (SONG, MA e LI, 2006). Este tipo de controle é recomendado em sistemas onde a frequência varia ou é incerta. O ADVA com memória de forma possui a capacidade de alterar a sua rigidez de acordo com a temperatura em que os elementos com memória se encontram. Esta propriedade faz com que o ADVA com memória de forma possa atenuar as vibrações do sistema primário através de uma faixa de frequências apenas explorando o laço de histerese e a variação de temperatura.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho é apenas uma parte do projeto “Desenvolvimento de um Absorvedor Dinâmico de Vibração do Tipo *Stockbridge* Baseado no Comportamento Pseudoelástico das Ligas com Memória

de Forma”, financiado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), que tem como objetivo geral desenvolver um *stockbridge* baseado no comportamento pseudoelástico das ligas SMAs. O *stockbridge* pseudoelástico deverá apresentar um desempenho melhor do que aquele apresentado pelos modelos convencionais, de forma a aumentar a confiabilidade de linhas de transmissão de energia elétrica. O desenvolvimento consiste da concepção, projeto, construção, caracterização dinâmica e testes de um protótipo de *stockbridge* pseudoelástico.

Faz parte do projeto de desenvolvimento do *stockbridge* caracterizar cada um dos materiais fornecidos pelas empresas americanas *NDC* e *Memry corporation*, todos ligas de NiTi com variadas temperaturas de austenita final (A_s), inferiores a 6 °C, para os fios fabricados pela *Memry*, e inferiores a 18 °C, para o material fornecido pela *NDC*, que apresentam o efeito da pseudoelasticidade. Traçar as curvas de tensão versus deformação para cada material, obtendo assim a área de histerese e consequentemente a energia que cada um é capaz de dissipar a cada ciclo de carregamento.

Para o ensaio de tração será necessário projetar uma adaptação para a garra da máquina de ensaio de tração, pois os corpos de prova que serão utilizados apresentam a forma de fio com diâmetros variados (menores de 10 mm), além de um tubo vazado. A adaptação a ser projetada possui ainda restrições geométricas impostas pela garra da máquina de ensaio universal MTS 810 100 kN, pertencente ao Laboratório de Ensaio Mecânicos, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (UnB).

Este trabalho tem como objetivo a preparação dos requisitos necessários para a realização dos ensaios de tração, entre eles, o projeto e fabricação do dispositivo de fixação para máquina MTS. Ao menos um ensaio deve ser realizado para a validação da peça projetada. O desenvolvimento da metodologia de ensaio, como escolha da taxa de deformação e preparação dos corpos de prova também fazem parte do objetivo do trabalho.

Espera-se com a conclusão desse estudo das propriedades pseudoelásticas da liga de NiTi, obter a melhor combinação entre a largura de histerese, o amortecimento e o comportamento dinâmico destas ligas, de forma a melhorar o desempenho dos *stockbridges* convencionais, que são eficazes apenas quando excitados em uma frequência determinada, para a qual foram projetados.

1.3 METODOLOGIA

Os suportes para a máquina de tração serão projetados e fabricados, tendo em vista a sua aplicação final em ensaios a ruptura e cíclicos das ligas de NiTi. Para o projeto do sistema de fixação, uma análise analítica e também uma análise por elementos finitos será realizada, utilizando o *software Ansys 13.0*, e com o auxílio de uma ferramenta de CAD, o *software Solid Works 2010*.

Os dispositivos de fixação que atenderem aos requisitos mínimos de projeto, obtidos por elementos finitos, serão testados em ensaio de tração para comprovação de sua eficácia.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.

O presente relatório está dividido em 4 capítulos. O primeiro capítulo refere-se à introdução, com uma breve descrição do tema abordado e sua importância. Este capítulo apresenta também os objetivos propostos neste projeto bem como um resumo da metodologia utilizada para se alcançar tais objetivos.

No segundo capítulo estão detalhados os conceitos aplicados no projeto, como explicações sobre as SMA e seu comportamento termomecânico, e os principais conceitos que envolvem amortecimento mecânico. Bem como a fenomenologia de vibração em cabos, formas de controle e a aplicação de SMA para controle de vibração.

O terceiro capítulo trata sobre os procedimentos experimentais, os equipamentos utilizados para tal, bem como os materiais e a metodologia adotada em cada ensaio. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos.

O último capítulo contém as considerações finais deste trabalho bem como os passos necessários para sua continuação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo, foram abordados os principais conceitos sobre os fenômenos físicos envolvidos no projeto, e sobre o material utilizado. Foi feita uma revisão teórica sobre SMA (Shape Memory Alloy), e o dispositivo Stockbridge.

2.1 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

As ligas com memória de forma (SMA – *Shape Memory Alloys*) são materiais metálicos que possuem a propriedade de recuperar uma forma geométrica previamente definida, após sofrer deformação devido à aplicação de tensões mecânicas ou quando submetidos a certas temperaturas, e pertencem ao grupo dos materiais classificados como inteligentes (OLIVEIRA, 2008).

As SMAs podem absorver e dissipar energia mecânica devido ao processo reversível de deformação histerética, quando sujeitas a cargas cíclicas. Devido ao fenômeno de histerese mecânica já citado anteriormente, esses materiais possuem a capacidade de recuperar deformações de até 10%. Entretanto, em SMAs policristalinas, a presença de contornos de grãos, defeitos e precipitados influenciam na morfologia da fase em evolução ocasionando maior complexidade e heterogeneidade (KHANDELWAL e BURAVALLA, 2009). Portanto, a deformação macroscópica reversível típica é menor (8% para NiTi (LAGOUDAS, 2008)). Tais características, únicas das SMAs, tornaram-nas aplicáveis em sensoriamento, atuadores, absorção de impacto e de vibrações mecânicas (VAJPAI, 2011).

A base para o comportamento peculiar das SMAs é a transformação reversível entre as fases cristalográficas (LAGOUDAS, 2008). Essas ligas apresentam apenas duas fases, a austenita (A) e a martensita (M). Cada fase apresenta diferentes estruturas cristalinas e, portanto, diferentes propriedades. A austenita é geralmente cúbica e dura enquanto a martensita pode ser tetragonal, ortorrômbica ou monoclinica, apresentando caráter mais flexível. A Figura (2.1) ilustra as duas fases de uma liga SMA de NiTi.

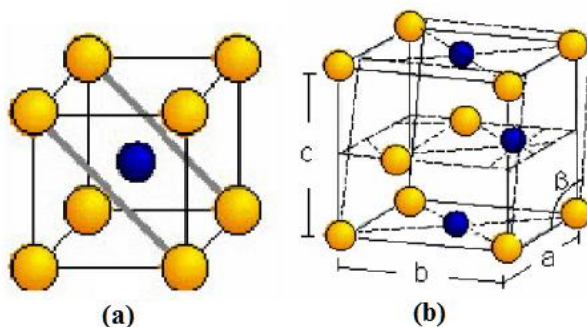


Figura 2.1 – (a) Estrutura cúbica de corpo centrado da Austenita e (b) Estrutura monoclinica da Martensita (DO NASCIMENTO, 2006).

A transformação de uma estrutura para outra não ocorre por difusão de átomos e sim por deformação da rede cristalina (consiste em todos os movimentos atômicos necessários para produzir a nova estrutura) e posterior acomodação atômica (os átomos acomodam-se de forma preferencial nas novas posições dando origem à nova fase), e é conhecida como transformação martensítica ou displaciva. A transformação martensítica geralmente ocorre independente do tempo e de forma muito rápida, tendo como limite a velocidade do som (WILLIAM D. CALLISTER, 2007). Nela a nova fase tem a mesma composição química da fase mãe.

A martensita pode apresentar duas orientações diferentes, a maclada (M^t – *twinned martensite*), induzida por temperatura, e a demaçada (M^d – *detwinned martensite*), induzida por tensão. A martensita maclada possui 24 variantes caracterizadas por diferentes orientações cristalográficas, a não-maclada dá lugar a apenas uma variante, alinhada com a orientação do carregamento de tensão. A austenita apresenta apenas uma variante com uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC).

As SMAs apresentam três fenômenos principais, o efeito de memória de forma, a quasiplasticidade e a pseudoelasticidade. Além destes, elas também podem apresentar outros comportamentos interessantes como os subloops internos devido às transformações incompletas da fase, efeito em dois sentidos da memória de forma (*Two-way shape memory*), plasticidade, plasticidade induzida por transformação, taxa-dependência, acoplamentos termomecânicos e outros comportamentos relacionados às características não homogêneas (LAGOUDAS, 2008).

Os subcapítulos consequentes tratam - se dos três principais fenômenos associados às SMAs, e suas aplicações.

2.1.1 EFEITO MEMÓRIA DE FORMA (EMF)

Na ausência de uma carga aplicada, ao resfriamento, a estrutura do cristal se transforma de austenita em martensita. A transformação resulta na formação de várias variantes martensíticas, até 24 para NiTi (LAGOUDAS, 2008). O arranjo das variantes ocorre de tal maneira que a mudança macroscópica média na forma geométrica é insignificante, resultando em martensita maclada. Quando o material é aquecido a partir da fase martensítica, a estrutura cristalina se transforma de volta para austenita, durante o qual não há mudança de forma associada.

Há quatro temperaturas características associadas à transformação de fase. Durante a transformação para martensita, com carga zero, austenita começa a se transformar em martensita maclada na temperatura de martensita inicial (M_s) e a transformação se completa na temperatura de martensita final (M_f), onde o material está em plena fase martensita maclada. Da mesma forma, durante o aquecimento, a transformação inversa se inicia à temperatura de austenita inicial (A_s) e é completada à temperatura de austenita final (A_f). A Figura (2.2) mostra representação esquemática das estruturas cristalográficas das SMAs durante a transformação de fase que ocasiona no EMF.

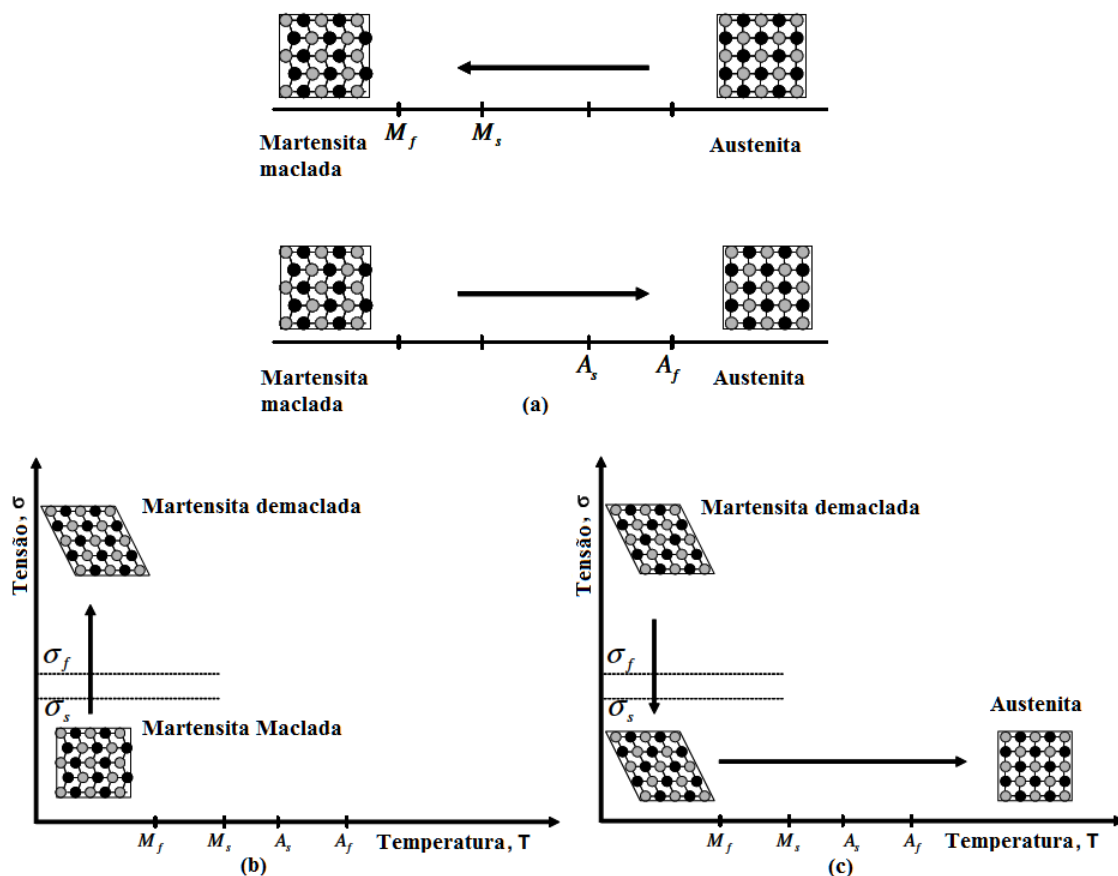


Figura 2.2 – Representação esquemática das fases envolvidas no EMF para transformação sem carga (a) e com carga (b) e (c) (LAGOUDAS, 2008) (Modificado).

Se uma carga mecânica é aplicada ao material na fase martensita maclada (baixa temperatura), é possível, por reorientação de certo número de variantes, a obtenção de martensita demaclada (Fig. 2.2 (b)). Tal processo resulta em uma mudança de forma macroscópica, onde a configuração deformada é mantida quando a carga é liberada. Um aquecimento posterior da SMA a uma temperatura acima de A_f irá resultar em uma transformação de fase reversa (de martensita demaclada para austenita) e irá levar à completa recuperação de forma (Fig. 2.2 (c)). Resfriamento de volta a uma temperatura abaixo de M_f leva à formação de martensita maclada novamente sem nenhuma mudança de forma associada. O processo descrito acima é referido como Efeito Memória de Forma (EMF). A carga aplicada deve ser suficientemente grande para iniciar o processo de transformação de martensita maclada para não-maclada. A tensão mínima necessária para a iniciação do processo é denominada tensão de início (σ_s). Níveis de carga suficientemente altos resultarão em formação completa de martensita demaclada, onde o nível de tensão correspondente é chamado de tensão de final (σ_f).

A natureza do EMF pode ser melhor entendida seguindo o caminho de carregamento termomecânico em um espaço combinado de estresse, tensão e temperatura, como mostrado na Fig. (2.3). Ela representa os dados experimentais para uma amostra típica de NiTi testados sob carregamento uniaxial (LAGOUDAS, 2008). A tensão σ é a tensão uniaxial na amostra devido a uma

carga aplicada. A deformação correspondente ϵ é a mudança no comprimento da amostra ao longo da direção da carga aplicada, normalizada pelo comprimento original.

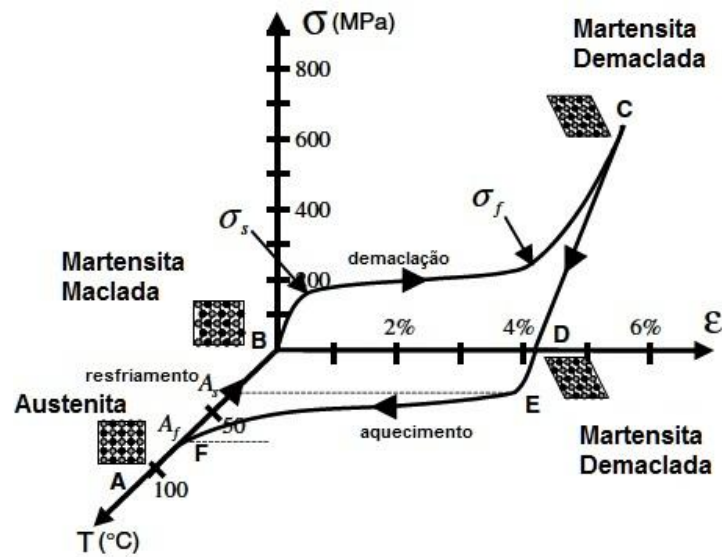


Figura 2.3 - Gráfico de tensão-deformação-temperatura exibindo o EMF típico de uma SMA de NiTi (LAGOUDAS, 2008) (Modificado).

A partir da fase mãe (ponto A na Fig. (2.3)), ocorre resfriamento sem carregamento da austenita abaixo das temperaturas de M_s e M_f , resulta na formação de martensita maclada (ponto B). Quando a martensita maclada é submetida a uma tensão aplicada, que excede o nível de tensão de início (σ_s), o processo de reorientação é iniciado, resultando no crescimento de certas variantes martensíticas favoravelmente orientadas, que crescem à custa de outras variantes menos favoráveis. O nível de tensão para a reorientação das variantes é muito inferior à tensão de escoamento da martensita. A formação completa de martensita demaçada (M^d) é concluída no nível de tensão de final (σ_f), que é caracterizada pelo ponto C no diagrama σ - ϵ na Fig. (2.3). O material é então elasticamente descarregado de C para D, e o estado M^d é mantido. Após aquecimento na ausência de tensão, a transformação inversa se inicia à medida que a temperatura atinge A_s (ponto E), e se completa na temperatura A_f (ponto F), acima do qual apenas a fase mãe austenítica existe. Na ausência de deformação plástica permanente gerada durante o processo de demaçação ($M^f \rightarrow M^d$), a forma original da SMA é recuperada (indicado por A). A deformação recuperada devido à fase de transformação de M^d para martensita é denominada como deformação de transformação (ϵ_t). Uma subsequente refrigeração até martensita novamente irá resultar na formação de M^d sem qualquer mudança de forma, e todo o ciclo do EMF pode ser repetido. O fenômeno descrito acima é chamado de efeito memória de forma de sentido único (*one-way shape memory effect*), ou simplesmente EMF, pois a recuperação de forma só é alcançada durante o aquecimento, após a demaçação causada por carga mecânica aplicada.

Quando sujeita a um treinamento, carregamento termodinâmico específico e cíclico, a SMA pode exibir mudanças de forma repetidas sem aplicação de carregamento, no aquecimento e no resfriamento, comportamento esse chamado de efeito de memória de forma reversível (*two-way shape memory effect*). Basicamente ocorre, devido ao treinamento do material, uma criação de anisotropia (as propriedades físicas de alguns cristais de certa substância depende da direção cristalográfica (WILLIAM D. CALLISTER, 2007)) na fase austenítica ocasionado na formação de campos de tensões internas que, durante o resfriamento, favorecem a formação de determinadas variantes.

2.1.2 A QUASIPLASTICIDADE

A quasiplasticidade é o fenômeno que antecede o EMF, em que o material se encontra abaixo de M_f na fase martensita maclada e, após aplicação de tensão deforma elasticamente até atingir σ_s , onde a deformação acontece com tensão praticamente constante. Após a formação total de martensita demaclada, quando a tensão atinge o nível σ_f , a deformação volta a ser elástica, mas se o carregamento se mantiver e a tensão ultrapassar o limite de escoamento, deformação plástica ocorrerá. Se a retirada do carregamento se der antes do limite de escoamento, o material se comportará elasticamente até o nível de tensão nula, deixando uma deformação residual, denominada quasiplástica.

O motivo de tal denominação é o fato de se conseguir eliminar a deformação quasiplástica através do EMF.

2.1.3 A PSEUDOELASTICIDADE

A pseudoelasticidade está associada à transformação de fase induzida por tensão e, diferentemente da quasiplasticidade, ocorre a uma temperatura suficientemente alta, maior que A_s , onde a fase austenítica é estável.

Quando tensão é aplicada em uma amostra à $T > A_f$, a fase mãe austenítica sofre deformação elástica até o carregamento atingir a tensão de início da transformação martensítica (σ^{M_s}) (A → B), onde deformação plástica ocorrerá em nível de tensão quase constante. A transformação se completará quando o carregamento alcançar a tensão de final da transformação martensítica (σ^{M_f}) (B → C), retomando a partir desse ponto (M_f), a deformação elástica. O material escoará se o nível de tensão continuar a se elevar e atingir o limite de escoamento, mas se antes disso, ocorrer alívio do carregamento (C → D), a martensita reverterá a deformação elástica até atingir a tensão de início da transformação austenítica (σ^{A_s}) (D → E). Durante a transformação de martensita demaclada para austenita (E → F), o material apresenta uma recuperação pseudoelástica da deformação. A transformação se completa no ponto onde a curva de tensão-deformação reencontra a região elástica da austenita (correspondente à tensão de final da transformação austenítica (σ^{A_f}), ponto F). A Figura

(2.4) ilustra o carregamento descrito ($A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow A$) e uma representação esquemática das fases envolvidas.

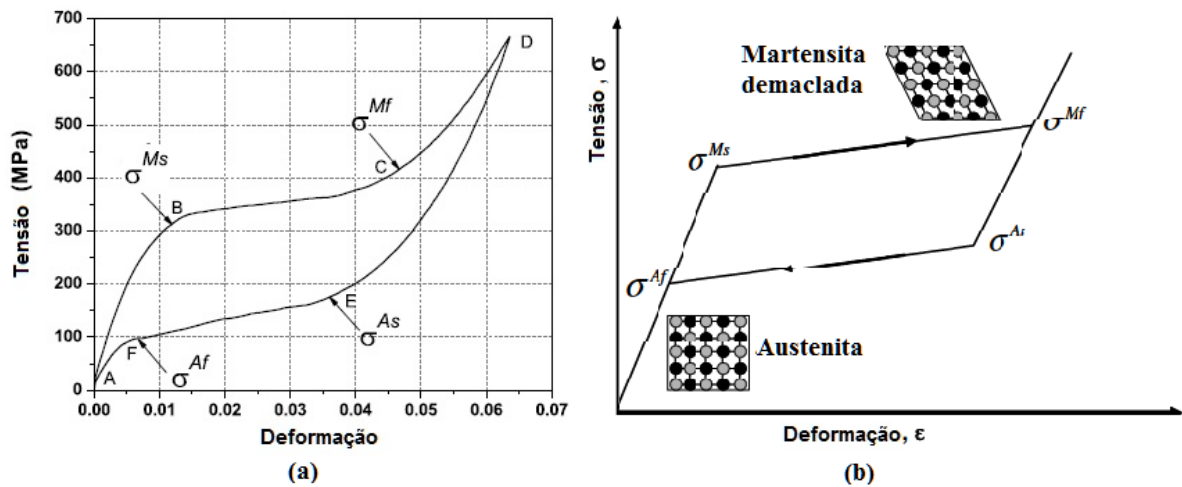


Figura 2.4 – Ciclo de carregamento típico de uma SMA (a) e representação esquemática das transformações de fase (b) (LAGOUDAS, 2008) (Modificado).

A transformação de fase austenita-martensita e martensita-austenita durante um ciclo completo de pseudoelasticidade resulta em histerese (os processos de avanço e de retorno no gráfico seguem caminhos diferentes), a qual, no espaço tensão-deformação, representa a energia dissipada no ciclo. O tamanho da histerese e os níveis de tensão variam com o tipo de liga SMA e condições de teste (principalmente a temperatura), como podemos observar através da Fig. (2.5).

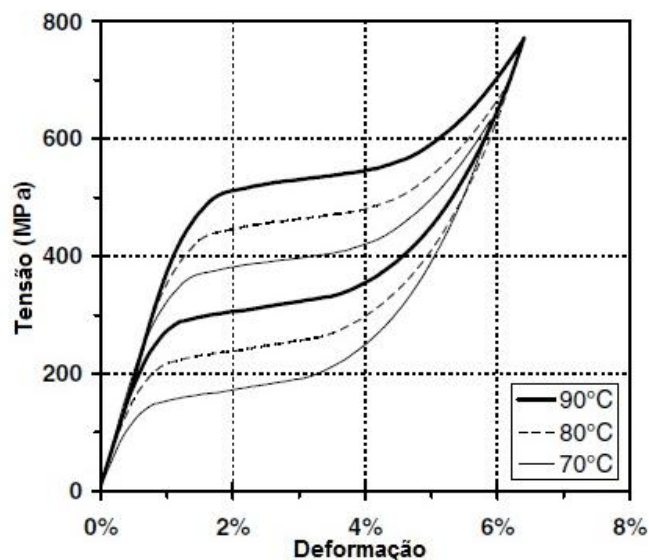


Figura 2.5 – Exemplo experimental de comportamento pseudoelástico do NiTi em diferentes temperaturas (LAGOUDAS, 2008) (Modificado).

Esta histerese é devida a fricção gerada entre os cristais, assim como pelas mudanças nas suas estruturas. O efeito que quantifica a histerese, é a diferença entre o pico da temperatura da martensita (M_p) e o pico da austenita (A_p). M_p e A_p são definidas pelas temperaturas nas quais as transformações do avanço e do retorno estão 50% completas (SOUZA, 2005).

No caso em que o material se encontra numa faixa de temperatura $As < T < Af$, a recuperação pseudoelástica não será completa, restando uma pequena deformação residual que poderá ser recuperada através de aquecimento à uma temperatura acima de Af .

O termo pseudoelasticidade abrange a superelasticidade, nome que se dá à transformação de fase reversível causada por carregamento termomecânico, e o efeito de borracha, comportamento exclusivo da fase martensita que ocorre devido à reorientação reversível da martensita. Como a tensão necessária para demarcação da martensita é muito inferior a σ^{Ms} , costuma-se não considerar o efeito de borracha, e o termo pseudoelasticidade geralmente se refere apenas à superelasticidade.

Segue abaixo figura comparativa entre os três principais fenômenos relacionados às SMAs, representados no espaço tensão-temperatura-deformação (Fig. 2.6).

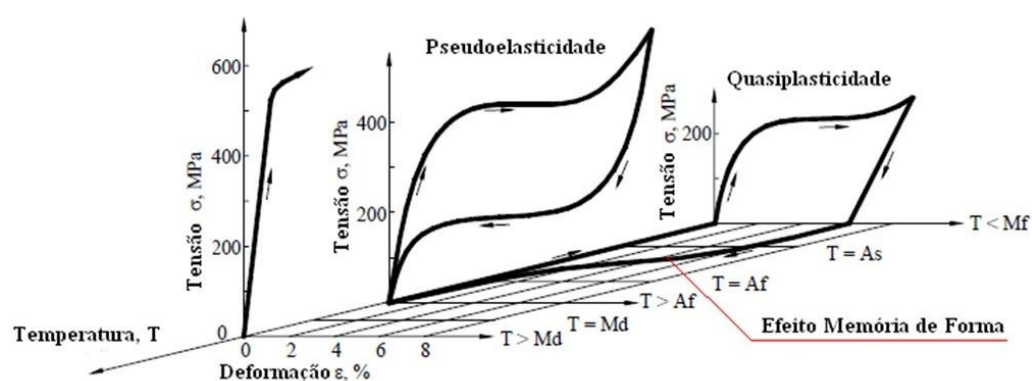


Figura 2.6 – Representação gráfica dos fenômenos EMF, quasiplasticidade e pseudoelasticidade (DA SILVA, 2011).

Outra temperatura importante para classificação do comportamento das SMAs é a temperatura Md , acima da qual não existe martensita. A aplicação de tensão em regiões onde $T > Md$ acarreta em curva de tensão-deformação com duas regiões, uma elástica linear e outra plástica, ambas na fase austenítica, situação ilustrada na Fig. (2.6).

2.1.4 APLICAÇÕES DAS LIGAS NITI

A aplicação das SMAs abrange grande variedade de setores industriais, tais como aeroespacial, automotivo, biomédico, e exploração de petróleo. A aplicação mais abundante é no uso das SMAs como atuadores, que através dos efeitos de EMF e pseudoelasticidade, controlam propriedades, formas, e vibrações quando grandes cargas e deformações, e baixas frequências estão envolvidas. Mas a maior parte do foco comercial se dá na área médica e dental (K.OTSUKA e C.M.WAYMAN, 1998), com produtos tais como *stents* (Fig. 2.7 (a)), implantes ortopédicos (Fig. 2.7 (b)) e aparelhos ortodônticos.

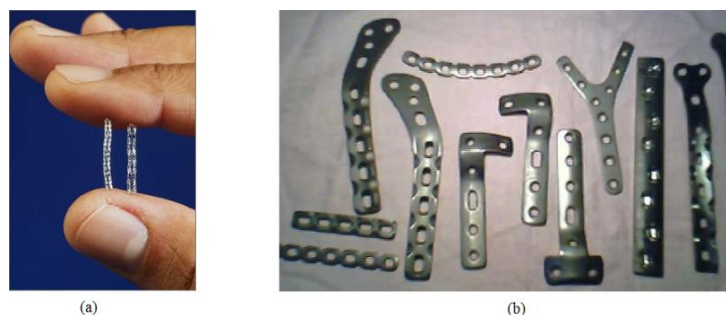


Figura 2.7 – (a) *Stents* auto expansíveis (STERNBERG, 2007) e (b) Peças de implantes ortopédicos (HZPRODUCT, 2011).

Os *stents* são tubos auto expansíveis (utilizam o efeito SME) utilizados para combater o entupimento de vasos sanguíneos. Os dispositivos desenvolvidos para aplicações ortopédicas são utilizados em ossos feridos, enfraquecidos ou fraturados. Através da pseudoelasticidade, os aparelhos ortodônticos que utilizam a liga de NiTi exercem tensão praticamente constante e elevada deformação, o que garante maior conforto ao paciente e redução do tempo total de tratamento.

Dentre o vasto número de ligas SMA, a liga de NiTi é considerada como a melhor para aplicações médicas e dentais devido a sua excelente estabilidade mecânica, resistência a corrosão, biofuncionalidade (habilidade do biomaterial de exercer a função desejada no corpo durante período de tempo esperado), e biocompatibilidade (propriedade do material de permanecer não tóxico ao corpo humano durante o período funcional) (K.OTSUKA e C.M.WAYMAN, 1998) (LAGOUDAS, 2008).

Acoplamentos, uniões e engates são desenvolvidos com estas ligas, devido principalmente à redução do peso (acoplamentos em aeronaves), facilidade de instalação em difícil acesso, confiabilidade comprovada, boa resistência a choques e vibrações, e possibilidade de posterior desmontagem (ao contrário da união feita por solda). Mas seu relativo alto preço tem sido uma barreira para ampliação do uso comercial.

No campo aeronáutico/aeroespacial, SMAs estão sendo desenvolvidas para se usar em asas inteligentes de aeronaves (Fig. 2.8), onde a geometria varia conforme a velocidade do avião, melhorando sua eficiência e reduzindo o nível de ruído. A lenta atuação devido ao aquecimento gradual em SMAs as torna adequadas em aplicações espaciais para mecanismos de baixo choque, como atuadores de placa solar.



Figura 2.8 – Modelo de asa inteligente (LAGOUDAS, 2008).

No setor automotivo SMAs são estudadas para a aplicação em absorção de impacto e vibrações, sensores e atuadores (tempo de resposta menor (3ms) que outros materiais comercialmente disponíveis (10ms)).

A indústria petrolífera tem mostrado extenso interesse na utilização da capacidade dos atuadores de SMA em dispositivos de lançamento e em sistemas de proteção para equipamentos de perfuração de poços.

SMAs também são utilizadas em produtos de moda, decoração e inventos como armações para óculos (leveza, flexibilidade e durabilidade, mas alto custo), armações para sutiãs, antenas para celular (no Japão), fones de ouvido (garantem maior conforto por exercer pressão constante aos ouvidos) (K.OTSUKA e C.M.WAYMAN, 1998).

Desenvolvedores de dispositivos de controle de vibrações em estruturas civis têm demonstrado interesse no comportamento pseudoelástico da liga de NiTi devido à sua capacidade para dissipar energia através de uma grande histerese.

2.1.5 COMPORTAMENTO CÍCLICO

Para a caracterização mecânica das ligas de NiTi através de ensaios cíclicos de tração, é necessário a realização de diversos ciclos de carregamento devido às pequenas mudanças que ocorrem na liga durante cada ciclo, até que a curva de tensão-deformação (área de histerese) se estabilize. A Figura (2.9) mostra um exemplo do ciclo de carregamento, abaixo da tensão de escoamento, em uma liga de NiTi mantida a uma temperatura constante de 27 °C.

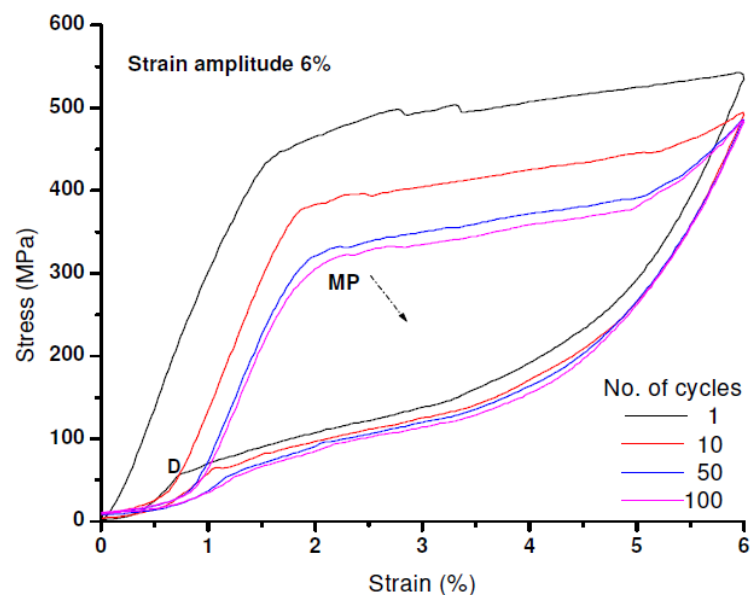


Figura 2.9 – Comportamento cíclico das ligas de NiTi em função do número de ciclos (DAYANANDA, 2008).

Verifica-se, na Figura (2.9), um aumento da deformação residual com a elevação do número de ciclos, e uma diminuição da área de histerese. Estes parâmetros tendem a se estabilizar, tornando-se insensíveis à ciclagem, fato que pode ser explicado pelo encruamento ocorrido a cada ciclo (FIGUEIREDO, 2006). Pode-se observar que após aproximadamente 60 ciclos, o material do exemplo atinge a estabilidade, com deformação plástica em torno de 0.5% (Fig. 3.21) (DAYANANDA, 2008).

2.1.6 TAXA DE DEFORMAÇÃO

Em geral, as propriedades elásticas dos metais dependem da temperatura, e altas taxas de deformação podem levar a um aumento de temperatura no material. Para as ligas de NiTi, uma pequena mudança de temperatura pode produzir uma mudança no comportamento superelástico (NEMAT-NASSER e GUO, 2005).

Em testes cíclicos, a taxa de deformação é menor na região da descarga e ocorre a um valor na ordem de $10^2/s$, independente da taxa utilizada no carregamento. Em geral, há dificuldade no controle da taxa de deformação na descarga, portanto, o foco da atenção deve ser a taxa utilizada no carregamento (NEMAT-NASSER e GUO, 2005).

Dayananda (2008) estudou o efeito que a taxa de deformação causa na transformação martensítica durante o carregamento. Ensaios de tração à ruptura com diferentes taxas de deformação, de 0.2 a 800%/min (equivalente à $3.3 \cdot 10^{-5}$ a 0.13/s), foram realizados (Fig. (2.10)).

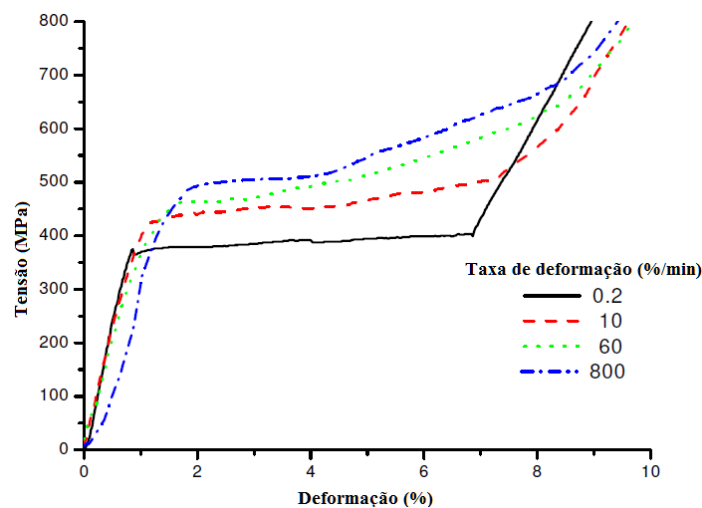


Figura 2.10 – Curva de tensão-deformação para ensaio a ruptura (DAYANANDA, 2008) (Modificado).

Pode-se observar que as curvas com taxa de até 10%/min ($1.6 \cdot 10^{-3}/s$) possuem três regiões “elásticas” durante o carregamento. Já a curva com taxa de 800%/min ($1.3 \cdot 10^{-1}/s$), dá impressão de haver de fato quatro regiões “elásticas” ao invés de três. Há uma região intermediária no segmento em que ocorre a transformação de fase, ou seja, ocorre uma mudança na inclinação da curva durante a transformação de austenita para martensita. Nesta região intermediária ocorre a formação de

martensita simultaneamente à deformação da mesma. Isso ocorre, pois a transformação de fase não consegue acompanhar taxas de deformação impostas superiores à 300%/min ($5 \cdot 10^{-2}/s$) (DAYANANDA, 2008).

O mesmo efeito é observado durante o teste cíclico (Fig. 2.11), onde o patamar de transformação de fase tende a desaparecer para taxas de deformação superiores a $4.2 \cdot 10^3/s$ (NEMAT-NASSER e CHOI, 2004). Para taxas de deformação muito altas, a resposta do material é similar à metais comuns (NEMAT-NASSER e GUO, 2005).

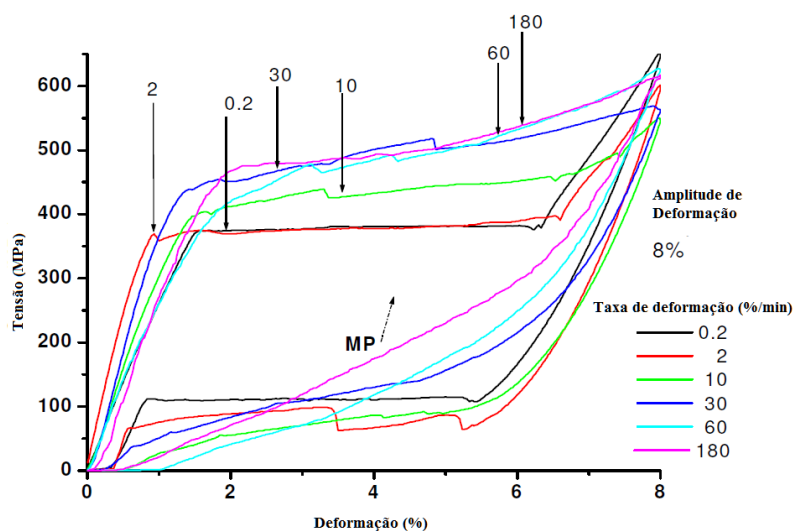


Figura 2.11 – Curva de tensão deformação cíclica para diferentes taxas de deformação.

Observa-se que as tensões de transformação de fase, σ^{Ms} e σ^{As} , aumentam com a elevação da taxa de deformação.

Sendo assim, como se deve evitar a formação de martensita prematuramente e deseja-se obter uma curva de histerese similar às curvas com taxa de deformação entre 0.2%/min e 2%/min, os ensaios de tração devem ser conduzidos com taxa de deformação em torno de 0.5 mm/min (0.5%/min).

2.2 O DISPOSITIVO STOCKBRIDGE

O método de maior popularidade para o amortecimento das linhas de transmissão é a adição de *Stockbridges* no sistema. O dispositivo *Stockbridge* é um absorvedor de vibração constituído basicamente por duas massas, chamadas de “massas inerciais”, conectadas por um cabo, preso à linha por um grampo de fixação. As massas e o cabo, chamado cabo mensageiro, geralmente são feitos de aço galvanizado, sendo o grampo de alumínio. O nome do dispositivo é derivado de seu inventor, George H. Stockbridge, que o criou em meados de 1920 na Califórnia, EUA, onde trabalhava como engenheiro de uma empresa, a *Southern California Edison* (SCE). A Figura (2.12) ilustra o dispositivo e cada um de seus elementos que o compõem.

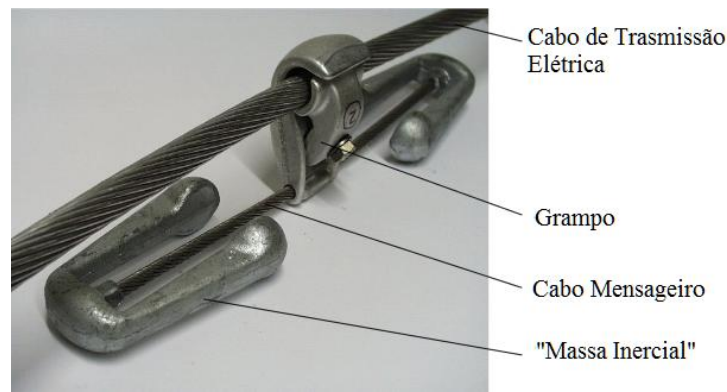


Figura 2.12 – *Stockbridge* montado na linha (SAUTER, 2003).

A finalidade principal de cabos de arame trançado é a transferência de forças na direção axial do cabo, por isso geralmente estão sobre tração. O amortecimento devido ao atrito interno nesse tipo de cabo, sobre vibrações de flexão, é desprezível em muitos casos. Cabos não tensionados axialmente, no entanto, exibem significativa histerese à flexão. Este tipo de histerese estática é utilizado em diversas aplicações onde cabos de aço são usados no amortecimento de vibrações mecânicas. Esse tipo de amortecedor é de baixo preço, fácil de fabricar, livre de manutenção, e sua função é insensível ao clima, bem como à temperatura (SILVA, 2006). Uma das poucas desvantagens pode ser o volume de construção em alguns casos. Um exemplo típico são os amortecedores de cabo de arames trançados, que são utilizados, por exemplo, para proteção simultânea ao choque e à vibração de dispositivos eletrônicos sensíveis em aplicações industriais e de defesa. O dispositivo *Stockbridge* convencional utiliza esse princípio de amortecimento por histerese e por Coulomb, devido ao atrito seco entre os arames do cabo, que geralmente é composto por fios trançados (SAUTER, 2003).

Pesquisas estão sendo desenvolvidas no intuito de substituir o material do cabo mensageiro por ligas de NiTi, por apresentarem alta capacidade de dissipação de energia devido à histerese provocada pelo efeito pseudoelástico (CACHUTÉ e YAMAMOTO, 2009) (DONG, XIONG, *et al.*, 2006).

Nesses amortecedores, parte da energia mecânica vibracional é dissipada no cabo mensageiro, e parte é transferida para as “massas inerciais”, quando a frequência de oscilação atinge valores próximos aos quais o dispositivo foi sintonizado. O funcionamento das “massas inerciais” se baseia no princípio do absorvedor dinâmico de vibração, que é sintonizado para que sua amplitude máxima ocorra na frequência de ressonância do componente a ser protegido, no caso o cabo de transmissão elétrica (RAO, 2008).

Existem três tipos principais de amortecedores *Stockbridge*, o amortecedor simétrico, o tipo *DogBone*, e o assimétrico. O amortecedor do tipo simétrico (Fig. 2.13) é o mais simples de todos, sendo composto por duas massas inerciais idênticas e fixado pelo grampo na posição central do cabo mensageiro, oferecendo então apenas dois modos de vibração.



Figura 2.13 - Stockbridge simétrico (Singh, 2003).

No caso do tipo assimétrico, sua diferença está no ponto onde ocorre a fixação entre o grampo e o cabo mensageiro, agora deslocado para a extremidade oposta de uma das massas. Além disso, o peso de cada massa também pode ser diferente (Fig. 2.14). Esse tipo de configuração oferece maior desempenho que o anterior devido ao modo de vibração adicional causado pela assimetria.



Figura 2.14 – Stockbridge assimétrico (KST, 2011).

Na configuração do tipo *DogBone*, as massas estão com centro de massa fora do eixo axial do *Stockbridge*, adicionando então um modo de vibração torcional, que amplifica a componente torcional aplicada ao cabo mensageiro, elevando assim a dissipação de energia (Fig. 2.15).



Figura 2.15 – Stockbridge do tipo *DogBone* (MEDIA FILMS, 2011).

A posição de fixação do *Stockbridge* no cabo deve ser calculada para atingir o ponto do cabo que possui maior amplitude de deslocamento, e o mais próximo possível do grampo de suspensão, região de maior esforço no cabo de transmissão elétrica (LABEGALINI, FUCHS e DE ALMEIDA, 1994) (DA SILVA, 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais que serão utilizados para caracterização do comportamento pseudoelástico da liga de NiTi, a metodologia empregada, e os equipamentos utilizados.

3.1 MATERIAIS

Serão utilizados quatro fios de diâmetros diferentes, dois fios de cada um dos fabricantes, *Memry* e *NDC*, além de um tubo fornecido pelo último fabricante. As principais propriedades de cada material fornecidas pelo fabricante e seus diâmetros estão ilustrados na Tab. (3.1).

Tabela 3.1 – Materiais Utilizados e principais propriedades.

| Fabricante | Modelo e (Designação para referências posteriores) | Diâmetro (mm) | Tensão Máxima de Tração (<i>Sut</i>) (MPa) | Temperatura de Transformação Af (C°) | Composição |
|--------------------------|--|----------------------------|--|--------------------------------------|--|
| <i>Memry Corporation</i> | <i>Alloy BA</i> (Material 1) | 0.085 in ≈ 2.16 mm | 189.4 KSI ≈ 1306 Mpa | -10 | Ni 56.30 % C (máx) 0.004 % |
| <i>Memry Corporation</i> | <i>Alloy BB</i> (Material 2) | 0.105 in ≈ 2.67 mm | 195.68 KSI ≈ 1350 Mpa | 2 a 6 | Ni 55.86 % O (máx) 0.0244 % C (máx) 0.0293 % |
| <i>NDC</i> | <i>SE 508 Wire</i> (Material 3) | 6 mm | 1100-1150 Mpa | 5 a 18 | Ni 55.8 % O (máx) 0.05 % C (máx) 0.02 % |
| <i>NDC</i> | <i>SE 508 Wire</i> (Material 4) | 8 mm | 1100-1150 Mpa | 5 a 18 | Ni 55.8 % O (máx) 0.05 % C (máx) 0.02 % |
| <i>NDC</i> | <i>SE 508 Tubing</i> (Material 5) | 10.00 mm OD 8.992 mm ID | 1070 MPa | < 15 | Ni 55.8 % O (máx) 0.05 % C (máx) 0.02 % |

3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os corpos de prova deverão ser submetidos a ensaios de tração utilizando-se uma máquina servo – hidráulica MTS – 810 (Material Test System) com força tratativa máxima de 100 kN. De acordo com o fabricante, a máquina possui uma incerteza de cerca de 1%, para cargas acima de 1KN. A Figura (3.1) mostra foto da máquina de tração no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ENM.



Figura 3.1 – Máquina Universal.

3.2.1 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova (cp's) foram dimensionados de acordo com a norma NBR 6152 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que trata de ensaios de tração à temperatura ambiente para materiais metálicos.

A forma e dimensões dos corpos de prova dependem da forma e dimensões dos produtos metálicos dos quais os corpos de prova são retirados. O corpo de prova é, usualmente, obtido pela usinagem de uma amostra do produto ou por forjamento ou fundição.

Entretanto, produtos de seção constante (barras, fios, etc.) e também corpos de prova fundidos (ferro fundido maleável, ferro fundido branco, ligas não ferrosas) podem ser ensaiados sem serem usinados. Se o corpo de prova consistir de uma parte não usinada do produto ou de uma barra, o comprimento livre entre os dispositivos de fixação da máquina de ensaio deve ser suficiente para que as marcas de referência fiquem a uma distância razoável desses dispositivos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2002).

Para corpos de prova não usinados no formato de fio e com espessura menor que 4 mm (materiais 1 e 2), ou na forma de tubos com espessura inferior a 30mm (material 5), o comprimento de medida original (L_0) deve ser de (200 ± 2) mm ou (100 ± 1) mm. A distância entre os dispositivos de fixação da máquina de ensaio, ou comprimento paralelo (L_c), é dada pela Eq. (1), isto é 250 mm e 150 mm respectivamente, exceto no caso de fios de pequeno diâmetro onde essa distância pode ser igual a L_0 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2002).

$$L_c = L_0 + 50 \text{ mm.} \quad (1)$$

Para corpos de prova não usinados no formato de fio e com espessura igual ou maior que 4 mm (materiais 3 e 4), utiliza-se a regra geral para corpos de prova proporcionais, onde o comprimento de medida original (L_0) é relacionado com a área original da seção transversal (S_0) pela Eq. (2).

$$L_0 = k_{cp} * \sqrt{S_0}, \quad (2)$$

onde k_{cp} é uma constante no valor de 5,65.

As extremidades do comprimento de medida original devem ser levemente marcadas com traços ou linhas, mas não com riscos que possam resultar em uma ruptura prematura. Para corpos de prova proporcionais, o valor calculado do comprimento de medida original deve ser arredondado para um valor mais próximo do múltiplo de 5 mm desde que a diferença entre o comprimento marcado e o calculado seja menor que 10% de L_0 . O comprimento de medida original deve ser marcado com uma incerteza de até 1%.

A área da seção transversal original (S_0) deve ser determinada com incerteza de até 1%. Para produtos de seção transversal circular, a área da seção transversal original pode ser calculada pela média aritmética de duas medidas, feitas em direções perpendiculares. Para corpo de prova constituído de um pedaço de tubo ou tira transversal ou longitudinal, sua S_0 pode ser determinada a partir da massa do corpo de prova (M), de seu comprimento total (L_T) e de sua massa específica (ρ) através da Eq. (3).

$$S_0 = \frac{M}{\rho * L_T}. \quad (3)$$

A Tab. (3.2) mostra o resultado dos cálculos de dimensões dos corpos de prova para os materiais 2, 3 e 4:

Tabela 3.2 – Dimensões dos corpos de prova.

| Material | Corpo de prova | Diâmetro Medido 1 e 2 (mm) | S_0 (mm ²) | L_0 (mm) | L_c (mm) |
|----------|----------------|----------------------------|--------------------------|------------|------------|
| 2 | 1 | 2.68 ± 0.01 2.69 ± 0.01 | 5.66 ± 0.05 | 100 ± 0.5 | 100 ± 0.5 |
| | 2 | 2.68 ± 0.01 2.68 ± 0.01 | 5.64 ± 0.05 | | |
| | 3 | 2.67 ± 0.01 2.68 ± 0.01 | 5.62 ± 0.05 | | |

| | | | | | |
|---|---|----------------------------|--------------|----------|-----------|
| 3 | 1 | 5.99 ± 0.01 5.98 ± 0.01 | 28.13 ± 0.09 | 30 ± 0.5 | 100 ± 0.5 |
| | 2 | 5.98 ± 0.01 5.99 ± 0.01 | 28.13 ± 0.09 | | |
| 4 | 1 | 7.99 ± 0.01 8.00 ± 0.01 | 50.20 ± 0.13 | 40 ± 0.5 | 100 ± 0.5 |
| | 2 | 8.01 ± 0.01 8.01 ± 0.01 | 50.39 ± 0.13 | | |

O comprimento de embutimento do corpo de prova pode ser calculado pela Eq. (4) e Eq. (5) (DE LÉLIS, 2011):

$$\frac{L_e}{n} = \frac{RMC}{\pi * d * \tau_a}, \quad (4)$$

$$RMC = Sut * S_0, \quad (5)$$

onde n é o fator de segurança, d é o diâmetro externo do corpo de prova, τ_a é a tensão de arrancamento, RMC é a carga de tração máxima do cp e L_e é o comprimento de embutimento.

A tensão de arrancamento τ_a é dada pelo limite de resistência ao cisalhamento da resina utilizada no dispositivo de fixação.

3.2.2 DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO

O objetivo principal do sistema de fixação é transmitir as forças impostas pelo sistema de atuação ao corpo de prova de maneira uniforme e bem alinhada, garantindo que o ensaio seja puramente axial.

As garras devem fixar o condutor com força suficiente para que ele não deslize ou escape durante os ensaios. No sistema de fixação por compressão, sistema adotado pela MTS presente no Laboratório de Ensaio Mecânicos do ENM, a força de fixação é devido ao atrito estático entre o cabo e a garra, diretamente proporcional à força de compressão radial imposta. Como os corpos de prova são formados por fios com áreas de contato pequenas, principalmente o material 1, podem ocorrer esmagamentos localizados. Além disso, a garra danifica a superfície dos fios e pode gerar trincas. Caso sejam criados defeitos na superfície e modificações na microestrutura do cabo, o rompimento do corpo de prova pode ocorrer na região da garra, descaracterizando o ensaio e invalidando os resultados (DE LÉLIS, 2011).

Além disso, devido às restrições geométricas impostas pela garra da máquina de tração utilizada, sem a utilização de qualquer outro dispositivo de fixação, a máquina não serviria para os ensaios dos corpos de prova adotados no projeto. A distância entre as garras da máquina (l) varia entre 7 mm e 14 mm, impossibilitando então o ensaio dos materiais 1, 2 e 3 (Tab. (3.1)), sendo então necessário a construção de um dispositivo de fixação para estes corpos de prova. A Figura (3.2) mostra foto das garras da máquina de tração que serão utilizadas no ensaio. A largura da garra (b) é de aproximadamente 44.5 mm e sua altura (h) é de 63.5 mm.

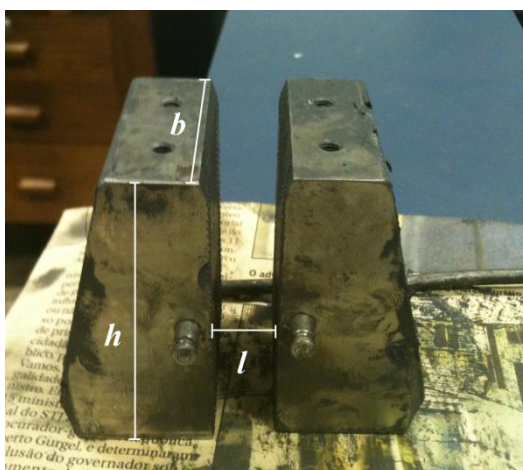


Figura 3.2 – Garras da máquina de tração.

O sistema de fixação de uma máquina de ensaios de tração é muito importante, pois influencia diretamente a qualidade dos resultados experimentais. O sistema deve ser rígido o suficiente para não causar elevadas deformações que podem acabar mascarando o ensaio.

Devido a isso foram estudados diferentes geometrias de dispositivos de fixação até obter aquele que melhor suportaria os esforços solicitados durante o ensaio de tração, e que obtivesse a maior rigidez, não afetando nos resultados dos testes.

Os dispositivos foram primeiramente desenhados utilizando a ferramenta de CAD *Solid Works 2010* e depois testados através de simulações numéricas no *software Ansys 13.0*. O estudo completo destes dispositivos será descrito no capítulo 4 de resultados.

3.2.3 RESINA EPÓXI PARA PREECHIMENTO DO MOLDE

O sistema epoxídico é baseado na resina SQ2001 e no endurecedor SQ3140, da fabricante nacional *SILAEX Química* (SILAEX QUÍMICA LTDA). Esta resina foi escolhida devida sua disponibilidade no Laboratório, e suas excelentes propriedades mecânicas. Suas principais características são apresentadas abaixo:

Resina SQ2001 + SQ3140 (SILAEX QUÍMICA LTDA)

- Proporção de mistura (resina:endurecedor): 100:45 à 100:100 partes em peso;
- Peso Específico (20°) da Resina $\rho_R = 1.16 \text{ g/cm}^3$, e do Endurecedor $\rho_E = 0.97 \text{ g/cm}^3$;
- Temperatura de manipulação: 18° – 30° C;
- Tempo de gel (25° C): 50 – 90 minutos;
- Cura total (20°): 48 – 72 horas;
- Resistência à compressão: 55.2 MPa;
- Resistência à flexão: 96.5 MPa;
- Resistência ao cisalhamento: 24.1 MPa;
- Alongamento máximo: 8%.

A proporção da mistura altera suas propriedades mecânicas, por isso vão ser testadas duas Razões de mistura (R) diferentes: uma com 100:100 e outra com 100:50. A mistura que contém maior quantidade de endurecedor demora mais para curar e, de acordo com o fabricante (SILAEX QUÍMICA LTDA), é a que apresenta a melhor resistência mecânica. A cura foi feita à temperatura ambiente e o tempo de cura para a primeira proporção foi de mais de 72 horas, e para a última mistura foi de 24h. O volume de mistura gasto em cada par de moldes (cada ensaio) é de aproximadamente 0.15 litros (equivalente à 150g de mistura). O cálculo da quantidade em peso de resina e endurecedor é realizado de acordo com as Eq. (6) e (7):

$$R = \frac{m_R}{m_E}, \quad (6)$$

$$\frac{m_R}{\rho_R} + \frac{m_E}{\rho_E} \approx 150, \quad (7)$$

onde m_R é a massa de resina e m_E a massa de endurecedor.

A Tabela (3.3) mostra o resultado dos cálculos para massa de resina e endurecedor que deve ser utilizada para cada corpo de prova (par de moldes), em três diferentes razões de proporção.

Tabela 3.3 - Quantidade em peso de resina e endurecedor para diferentes razões de mistura (R).

| R | 2 (100:50) | 1.3 (100:75) | 1 (100:100) |
|-----------|------------|--------------|-------------|
| m_R (g) | 100 | 86 | 75 |
| m_E (g) | 50 | 64 | 75 |

3.2.4 METODOLOGIA DO ENSAIO

Os ensaios mecânicos de tração terão a finalidade de identificar a largura e a faixa de histerese para as ligas de SMA. O primeiro ensaio no corpo de prova, para cada material, será realizado até sua ruptura, para obtenção do limite de escoamento, além da tensão máxima de tração. Os ensaios

subsequentes servirão para a obtenção da curva tensão-deformação de cada material, e conseqüentemente suas respectivas áreas de histerese, através de aplicação de tensão inferior ao limite de escoamento. Serão necessários vários ensaios, para cada material, devido às pequenas mudanças que ocorrem na liga durante cada ciclo de carregamento, até que a curva de tensão-deformação (área de histerese) se estabilize.

Sendo assim, o ensaio no segundo corpo de prova de cada material deverá ser cíclico e o controle se dará em relação à tensão, o carregamento de cada ciclo tem final quando a tensão atinge o limite de escoamento obtido no ensaio à ruptura no primeiro corpo de prova.

Como se deve evitar a formação de martensita prematuramente e deseja-se obter uma curva de histerese similar às curvas com taxa de deformação entre 0.2%/min e 2%/min, os ensaios de tração devem ser conduzidos com taxa de deformação de 0.5 mm/min (0.5%/min).

4 CONCEPÇÃO, PROJETO E FABRICAÇÃO DO SUPORTE

Este capítulo apresenta o projeto de detalhamento do dispositivo de fixação e as curvas de Força versus deslocamento para os dois materiais (materiais 2 e 4) ensaiados.

4.1 DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO

Primeiramente decidiu-se pela utilização de luvas de resina epóxi de alto desempenho embutidas nas extremidades dos corpos de prova, que serão afixadas nos suportes, servindo como meio de fixação dos cp's, na medida em que as garras da MTS poderão exercer sua função apropriadamente, pois os cabos não entram em contato com as garras, o que previne o esmagamento. A transferência de cargas das luvas para os condutores ocorre através de adesão mecânica. O comprimento de vão livre da máquina deve ser considerado no dimensionamento da luva e do suporte, assim como os comprimentos de embutimento e o comprimento total dos corpos de prova, pois limitará o seu tamanho.

Os pontos negativos na utilização de luvas para a fixação dos corpos de prova é o acréscimo do tempo de preparação e dos custos dos ensaios. Além disso, o preparo e aplicação das resinas e colas industriais devem ser bem controlados para garantir que suas propriedades mecânicas alcancem os valores nominais de projeto e que a adesão à superfície dos cabos seja uniforme (DE LÉLIS, 2011).

Como concepção inicial, decidiu-se na utilização de dois suportes diferentes, um para os corpos de prova com diâmetros menores (até 3 mm), e outro mais robusto para os de maior diâmetro (até 10 mm). Inicialmente, adotou-se uma geometria de seção transversal retangular cujas dimensões foram determinadas a partir das restrições geométricas da garra (*l*).

A Figura (4.1) mostra a representação esquemática do dispositivo de fixação com seus componentes separados (a) e já montados (b).

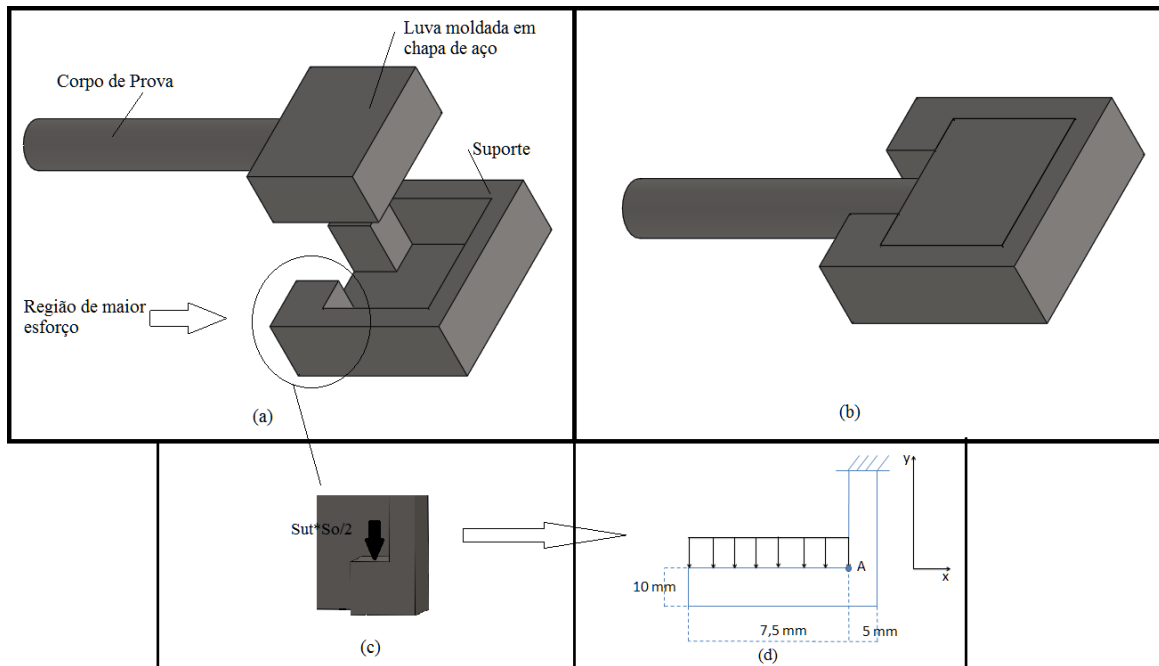


Figura 4.1– Representação esquemática do dispositivo de fixação de geometria retangular, (a) componentes separados, (b) dispositivo montado, (c) região de maior esforço, (d) Diagrama de corpo livre.

Para verificação da resistência do suporte foram feitos os cálculos preliminares na região de maior esforço (Fig. 4.1 (a), (c) e (d)), seguindo a Teoria de Von Mises de acordo com as Eq. (8), (9), (10) e (11):

$$\tau_{xy} = 0, \quad (8)$$

$$\sigma_x = \frac{M * y}{I} = \frac{\frac{Sut * S_0}{2} * 5 * 5}{\frac{12.5 * 10^3}{12}} = 0.012 * Sut * S_0, \quad (9)$$

$$\sigma_y = \frac{\frac{Sut * S_0}{2}}{A_l} + \frac{M * y}{I} = \frac{\frac{Sut * S_0}{2}}{5 * 13.5} + \frac{\frac{Sut * S_0}{2} * 5 * 2.5}{\frac{5^3 * 37.5}{12}} \approx 0.02341 * Sut * S_0, \quad (10)$$

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x * \sigma_y + \sigma_y^2 + 3 * \tau_{xy}^2} \leq \frac{S_y}{n}, \quad (11)$$

onde τ_{xy} é a tensão de cisalhamento no ponto A, σ_x e σ_y são as tensões normais na direção x e y, A_l é a área normal à força na lateral do suporte, M é o momento fletor, y é a distância do ponto A até a linha neutra, I é o momento de inércia, σ' é a tensão equivalente de Von Mises, e S_y é a tensão admissível de flexão para o material do suporte. A Tabela (4.1) apresenta a tensão de escoamento para alguns aços repuxados a frio (SHIGLEY, MISCHKE e BUDYNAS, 2005).

Tabela 4.1 – Tensões admissíveis para alguns aços (SHIGLEY, MISCHKE e BUDYNAS, 2005).

| N SAE e/ou AISI | Tensão de escoamento S_y (MPa) |
|-----------------|----------------------------------|
| 1010 | 300 |
| 1020 | 390 |
| 1035 | 460 |
| 1045 | 530 |

A Tabela (4.2) apresenta o resultado dos cálculos preliminares para o suporte maior com um fator de segurança igual a 1:

Tabela 4.2 – Resultado dos cálculos preliminares.

| Material | Diâmetro (mm) | Tensão Equivalente de Von Mises σ' (MPa) |
|----------|----------------------------|---|
| 3 | 6 mm | 660 |
| 4 | 8 mm | 1172 |
| 5 | 10.00 mm OD 8.992 mm ID | 322 |

Pode-se concluir que a geometria inicialmente adotada não suportará a força trativa dos ensaios para os materiais 3 e 4, pois as tensões aplicadas superam às admissíveis do aço 1045. Uma segunda geometria com maior resistência na região de maior esforço para o suporte deve ser então considerada. As geometrias com formato de luva tetraédrica podem exercer tal função e deve ser investigada (DE LÉLIS, 2011).

As luvas terão então geometria tetraédrica na seção transversal e deverão aderir de maneira uniforme à superfície dos corpos de prova, além de resistir aos esforços de tração. Os esforços de fixação das garras serão suportados pelo suporte projetado. Após a definição de suas geometrias, os componentes podem ser prontamente dimensionados.

A Figura (4.2) mostra um exemplo do conjunto de luva e suporte que poderia ser utilizado.

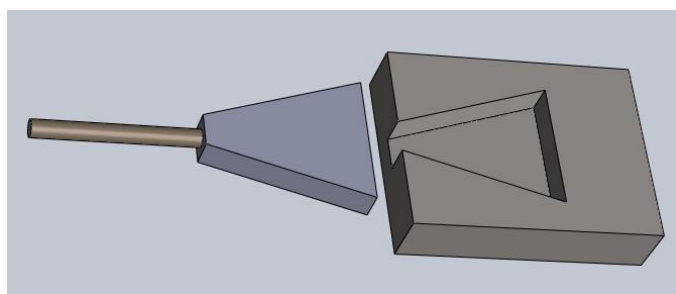


Figura 4.2 – Montagem de luva de resina epóxi e suporte.

O comprimento mínimo de embutimento necessário para que as tensões de cisalhamento na luva de resina não ultrapasassem seu limite de resistência ao cisalhamento, dado pela Eq. (5) determinará o comprimento mínimo para a luva. Utilizou-se como referência um limite de resistência de 24.1 MPa

(SILAEX QUÍMICA LTDA), fornecido pelo fabricante da resina epóxi à disposição no laboratório, e um coeficiente de segurança igual a 1.5. Os resultados estão apresentados na Tab. (4.3).

Tabela 4.3 – Comprimento de embutimento (mm).

| Material | Fabricante | Diâmetro (mm) | Comprimento de embutimento (mm) |
|----------|-------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 1 | Memry Corporation | 0.085 in \approx 2.16 mm | 44 |
| 2 | Memry Corporation | 0.105 in \approx 2.67 mm | 56 |
| 3 | NDC | 6 mm | 103 a 108 |
| 4 | NDC | 8 mm | 137 a 143 |
| 5 | NDC | 10.00 mm OD 8.992 mm ID | 32 |

O dimensionamento do suporte deve ser realizado para a condição de maior esforço, que ocorre no ensaio à ruptura do material 4. O comprimento de embutimento necessário para o ensaio é de aproximadamente 143 mm e a força trativa que o corpo de prova exerce sobre o suporte (F), dada pela Eq. (14), é de aproximadamente 58kN.

$$F = Sut * S_0 \quad (14)$$

Quando o cabo for submetido à tração, a luva se ajustará no interior do suporte e será submetida a forças normais e de atrito em sua superfície externa e à tensões de cisalhamento em sua superfície interna em contato com o corpo de prova. A Figura (4.3) mostra o diagrama de corpo livre na superfície externa da luva.

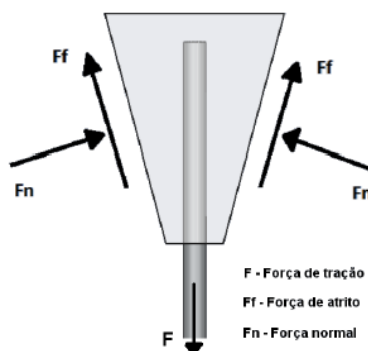


Figura 4.3 – Diagrama de corpo livre da luva (DE LÉLIS, 2011)(Modificado).

Uma vez que as tensões nas superfícies externas dependem de parâmetros geométricos da luva, como a área e o ângulo de inclinação das faces laterais, pode-se dimensioná-las para resistir com segurança às cargas do ensaio.

Diversas simulações numéricas foram realizadas com o auxílio do *software Ansys 13.0*, onde se pôde variar diferentes parâmetros para otimização da geometria. As condições de contorno relacionadas à conexão entre componentes foram importadas da montagem da estrutura feita no

software Solidworks 2010 e ajustadas manualmente. Elas consistiram basicamente de uniões coladas, sem separação ou por apoio com atrito.

O suporte foi engastado na sua face superior e na face normal às garras, e uma tensão de 1150 MPa (tensão de ruptura do fio mais resistente, material 4) foi aplicada ao corpo de prova. Além disso, uma pressão média de 10 MPa foi adicionada às garras (Fig. 4.4 (a)). A malha utilizada não pôde ser muito refinada devido às capacidades do computador (Fig. 4.4 (b)).

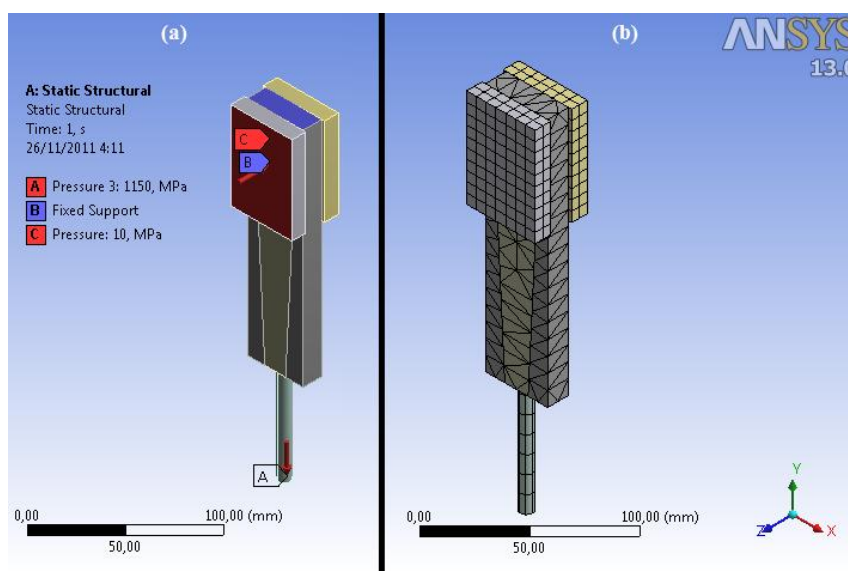


Figura 4.4 – Condições de contorno (a) e malha (b) utilizada na simulação.

Os resultados obtidos pelo programa estão apresentados na Tabela (4.4), que compara quatro geometrias diferentes.

Tabela 4.4 – Resultado das simulações das geometrias 1, 2, 3 e 4.

| Geometria | Máx. Deslocamento (mm) | | Máx. Tensão Equivalente de Von Mises (MPa) | | Máx. Tensão cisalhante na resina (MPa) (plano xy) |
|-----------|------------------------|--------------|--|-----------|---|
| | Na direção y | Na direção z | No Suporte | Na resina | |
| 1 | 0.10253 | 0.29032 | 567.53 | 57.293 | 30.284 |
| 2 | 0.044935 | 0.16662 | 583.45 | 59.961 | 29.2 |
| 3 | 0.076857 | 0.31247 | 949.23 | 75.043 | 40.327 |
| 4 | 0.14407 | 0.013202 | 507.16 | 77.516 | 40.373 |

A Figura (4.5) mostra as três primeiras geometrias, onde o parâmetro comparado entre as duas primeiras é a largura do suporte e o parâmetro comparado entre as geometrias 2 e 3 é o ângulo de inclinação das luvas. A geometria 4 é idêntica à primeira, com exceção do acréscimo de uma tampa em sua extremidade inferior.

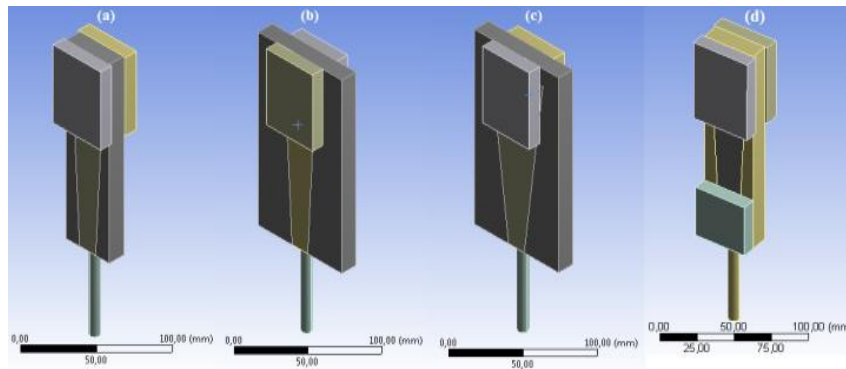


Figura 4.5 – Geometria 1 (a), geometria 2 (b), geometria 3 (c) e geometria 4 (d).

Em relação ao ângulo de inclinação das luvas, há uma maior concentração de tensões na extremidade da luva da geometria 3 (Fig. 4.6(b)), que apresenta tensões máximas bem superiores comparadas a geometria 2 (Fig 4.6 (a)).

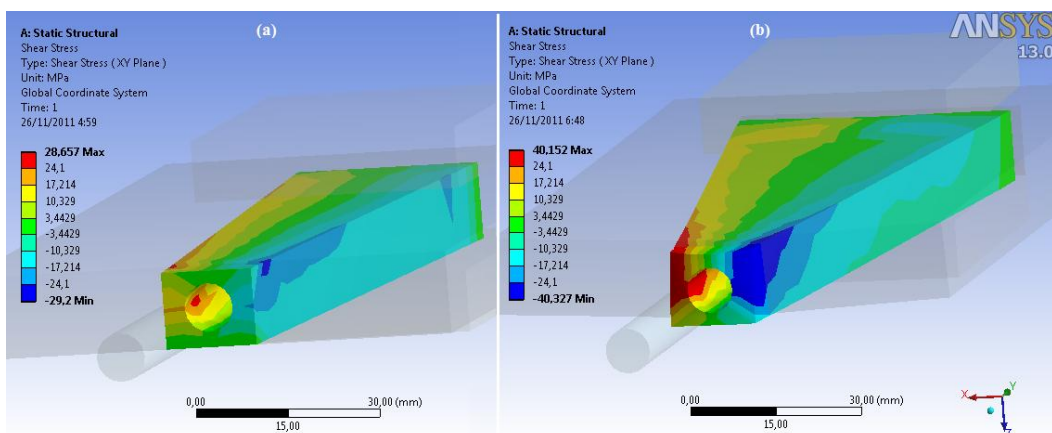


Figura 4.6 – Tensão Cisalhante (xy) na luva de resina das geometrias 2 (a) e 3 (b).

Como esperado, o aumento na largura do suporte causa um acréscimo de sua rigidez, na medida em que a geometria 2 apresenta menor deslocamento em relação a geometria 1. Mas a tensão equivalente de Von Mises continua bastante elevada na geometria 2, apesar de concentrada em área reduzida (Fig. 4.7).

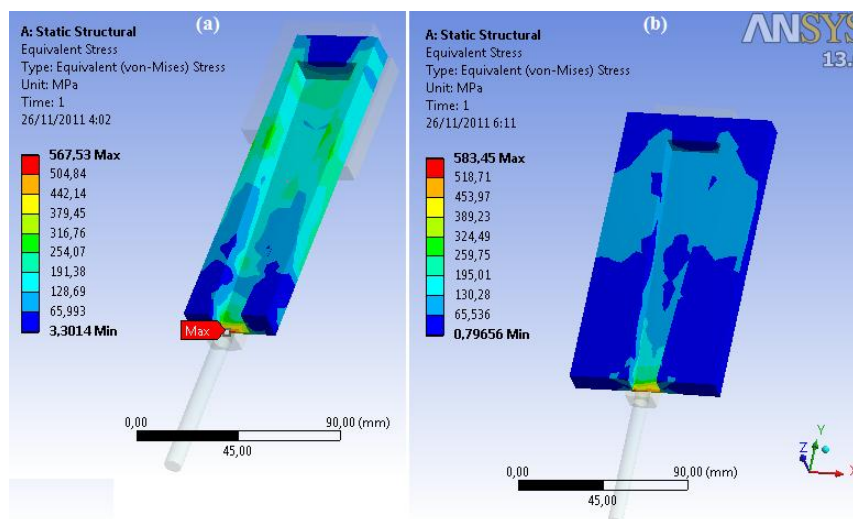


Figura 4.7 – Tensão Equivalente de Von Mises nas geometrias 1 (a) e 2 (b).

A adição da tampa (geometria 4) é uma tentativa de eliminar o problema na extremidade inferior do suporte (Fig. 4.8 (b e d)). Pode-se observar que, apesar de aliviar as tensões e reduzir a área de concentração no suporte, ocorre um efeito contrário na luva de resina (Fig. 4.8 (a e c)).

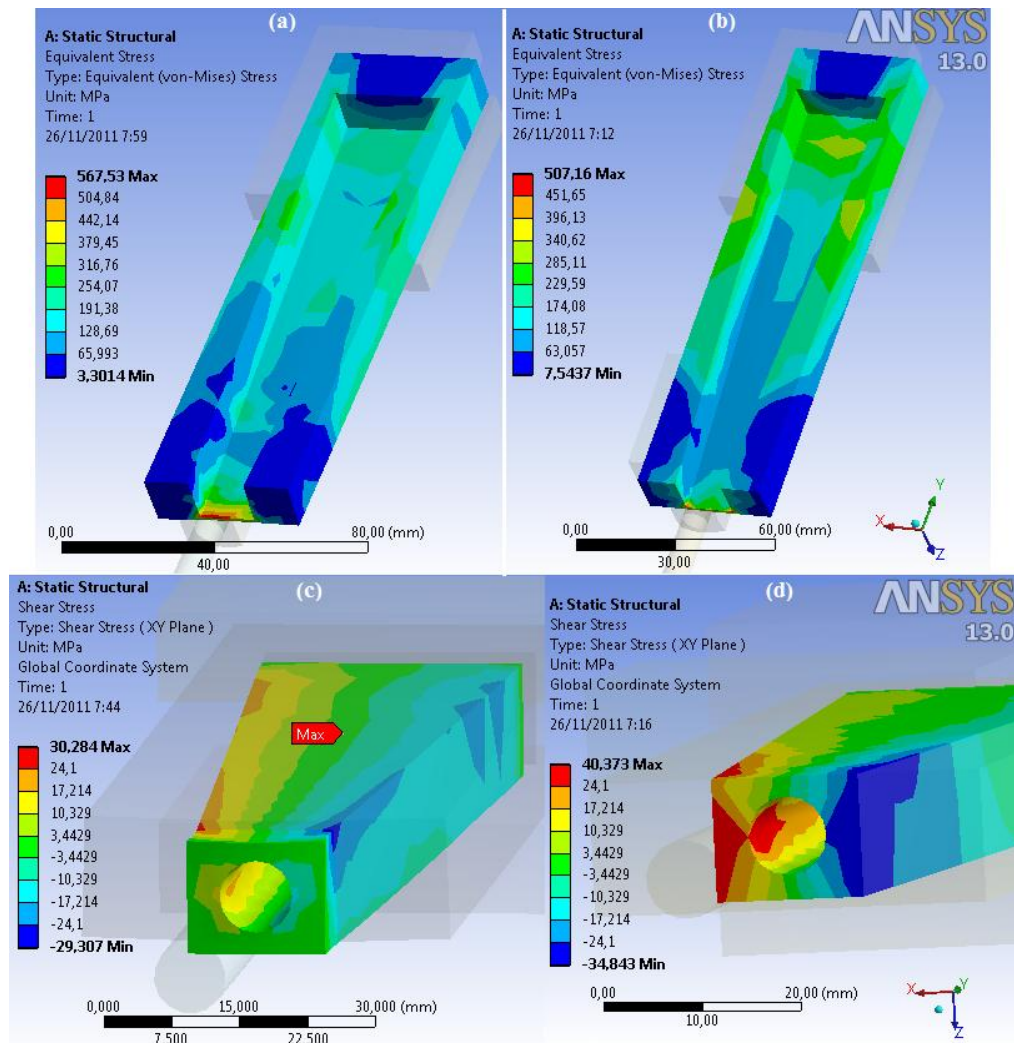


Figura 4.8 – Tensão de Von Mises no suporte e Tensão máxima de cisalhamento (xy) na resina das geometrias 1 (a e c) e 4 (b e d).

Pode-se concluir que nenhuma das geometrias testadas servirá ao seu propósito, pois todas apresentaram tensões, cisalhante e equivalente de Von Mises, máxima na superfície exterior da luva de resina superior ao valor máximo permitido (24.1 MPa).

Uma alternativa seria restringir a área de fixação das garras na extremidade superior do suporte, afastada da região que acomoda a luva. Com a região de fixação afastada da luva, há ainda a possibilidade de se usar as garras cilíndricas, que garantem maior facilidade de alinhamento na montagem. O maior diâmetro que a garra consegue apertar é de 16.5 mm. Para garantir o aperto, projetou-se um suporte com diâmetro de 16 mm, ou seja, com folga de 0.5 mm. A Figura (4.9) ilustra a nova geometria adotada.

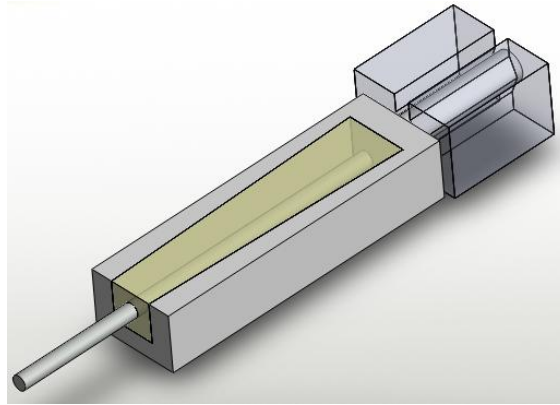


Figura 4.9 – Esboço de suporte com extremidade cilíndrica já montado nas garras e com luva de resina embutida.

A única restrição geométrica restante é na região de fixação, que deve ter comprimento aproximado à altura da garra (h) e diâmetro máximo de 16.5 mm. Pode-se então garantir que esta será a região de maior esforço, na medida em que a geometria do restante do suporte pode ser alterada sem limitações.

Para verificação da resistência do suporte foram realizados os cálculos segundo a Teoria de Von Mises de acordo com as Eq. (11), (13), (14), e (15):

$$\tau_{xy} = P_{garra} * \mu_s, \quad (13)$$

$$\sigma_y = \frac{\frac{S_{ut} * S_0}{2}}{A}, \quad (14)$$

$$\sigma_x = 0, \quad (15)$$

onde P_{garra} é a pressão exercida pelas garras e μ_s é o coeficiente de atrito estático, cujo valor médio no caso de aço-aço é 0.74 (SERWAY, (1992)). O valor encontrado para a tensão equivalente (σ') é de aproximadamente 288 MPa.

Com base em simulações numéricas, pôde-se dimensionar um suporte em que a região de maior esforço está concentrada na parte cilíndrica, onde ocorre a fixação. A partir desse suporte foram testadas várias configurações diferentes de tampas (Fig. (4.10)), a fim de obter a combinação que garantisse o menor deslocamento e as menores tensões na luva de resina.

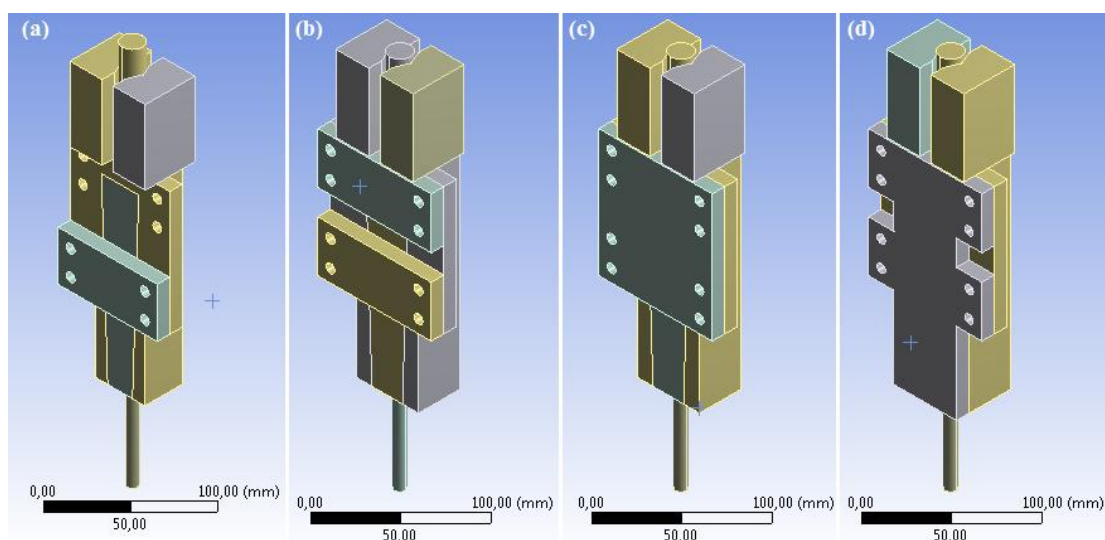


Figura 4.10 – Geometria 5 (a), geometria 6 (b), geometria 7 (c) e geometria 8 (d).

A Tabela (4.5) apresenta os resultados obtidos através de simulação numérica para as diferentes geometrias.

Tabela 4.5 – Resultados das Simulações das geometrias 5,6,7 e 8

| Geometria | Máx. Deslocamento (mm) | | Máx. Tensão Equivalente de Von Mises (MPa) | | Máx. Tensão cisalhante na resina (MPa) (plano xy) |
|-----------|------------------------|--------------|--|-----------|---|
| | Na direção y | Na direção z | No Suporte | Na resina | |
| 5 | 0.19328 | 0.42267 | 310.08 | 42.635 | 23.14 |
| 6 | 0.15231 | 0.14083 | 319.75 | 41.191 | 23.027 |
| 7 | 0.1372 | 0.059015 | 323.51 | 41.978 | 23.536 |
| 8 | 0.1301 | 0.01748 | 323.93 | 52.974 | 28.235 |

A geometria 8 foi descartada pois as tensões na luva de resina superam às admissíveis. Comparando as outras três geometrias, percebe-se pouca diferença entre elas. A diferença mais expressiva é quanto ao deslocamento (na direção z, que varia de 0.05 a 0.42 mm), e a geometria que apresentou melhor resultado e logo, a escolhida, foi a geometria 7. Outra simulação, com uma malha mais refinada foi realizada para a geometria escolhida. A malha possuiu 80931 elementos e 151231 nós. A Figura (4.11 (a)) apresenta os resultados de deflexão total da geometria escolhida, cujo valor máximo foi de aproximadamente 0.15 mm. As tensões equivalentes, vistas na Figura (4.11 (b)), alcançaram valor máximo de 450.8 MPa na região de concentração próximo à base cilíndrica. Isso resultou em um coeficiente de segurança mínimo $\eta = 1.18$, para o aço 1045 repuxado a frio. O anexo I apresenta os desenhos para o suporte e para a tampa.

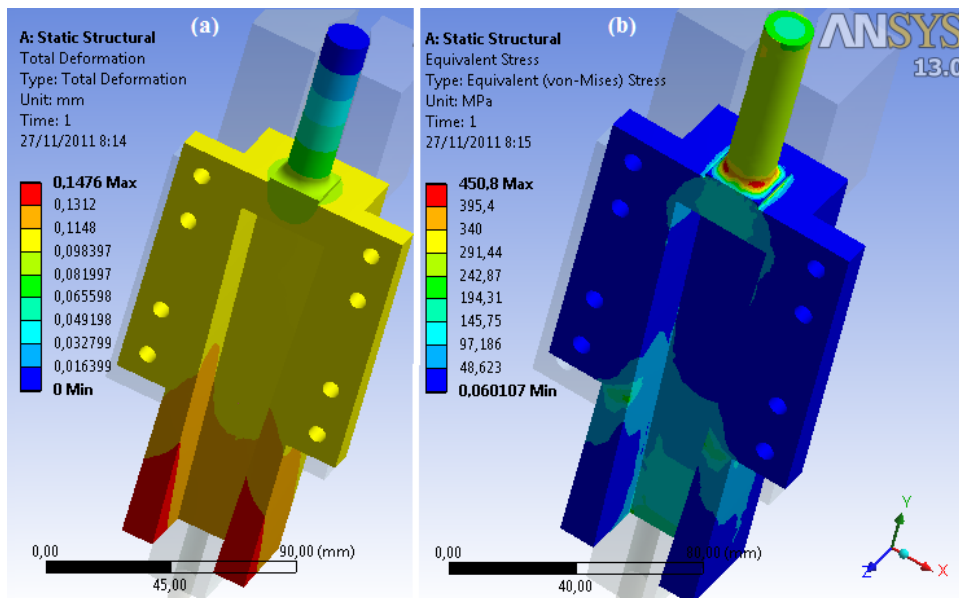


Figura 4.11 – Deflexão Total (a) e Tensão equivalente (b) do suporte escolhido (geometria 7).

A tensão cisalhante e a tensão equivalente atinge valor máximo em uma região concentrada na extremidade da luva. A Figura (4.12) mostra a distribuição das tensões cisalhantes e equivalentes na luva.

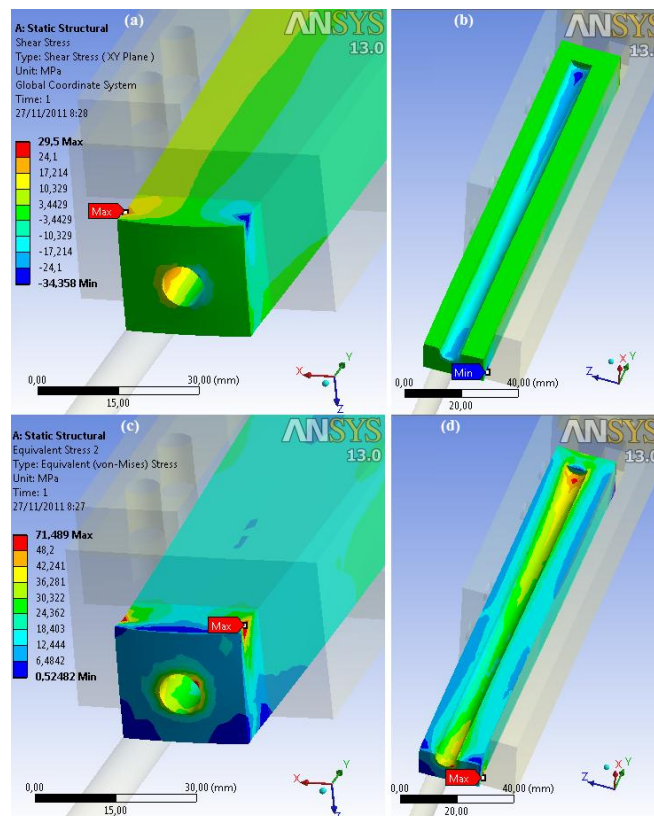


Figura 4.12 – Tensões cisalhantes na luva de resina (a) e detalhe em corte (b) e, tensões equivalentes na luva (c) e detalhe em corte (d).

O valor máximo de tensão equivalente foi de 71.5 MPa, menor que o valor de resistência à flexão admissível para a resina, que de acordo com o fabricante é de 96.5 MPa. Isso garante um coeficiente de segurança mínimo $\eta = 1.35$.

A Tensão cisalhante atinge valores acima do limite permitido (24.1 MPa) também na região em contato com o corpo de prova (Fig. 4.12(b)). Mas isso ocorre em áreas muito reduzidas (de aproximadamente 3 mm de comprimento e 2 mm de largura) na extremidade do cp (perto de um canto vivo), e pode ser um erro devido ao refinamento da malha.

Selecionando a geometria para o dispositivo e sabendo que o mesmo deveria suportar 450.8 MPa, foi selecionado o aço 1045 repuxado a frio para fabricação da peça.

Devido ao preço relativamente alto para fabricação da peça, decidiu-se usar apenas um suporte para todos os materiais, descartando a idéia de um segundo suporte para os materiais 1 e 2, de menor diâmetro.

Para verificar se os materiais utilizados na fabricação da peça apresentavam resistência mecânica desejada, sem a necessidade de se fazer um tratamento térmico para obter as propriedades desejadas, foi realizado ensaios de dureza do tipo Rockwell C (HRC). A Tabela (4.6) apresenta as medidas realizadas, a média e a conversão feita para dureza Brinell (HB) utilizando tabela de conversão para efeito de comparação (WILLIAM D. CALLISTER, 2007).

Tabela 4.6 – Dureza das peças fabricadas.

| | Medidas | | | | | Média | HB |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----|
| Peça 1 (fornecida pela <i>Cerpal</i>) | 14 HRC | 16 HRC | 14 HRC | 19 HRC | 16 HRC | 15.8 | 211 |

Os resultados encontrados estão de acordo com a dureza do aço 1045 repuxado a frio encontrada na literatura, que varia entre 170 HB e 197 HB (MATWEB - MATERIAL PROPERTY DATA), e apresentam uma tensão de escoamento acima da desejada para o suporte.

A peça foi fabricada em um torno CNC, máquina na qual o processo de usinagem é feita por Comandos Numéricos Computadorizados (CNC) através de coordenadas. Sua grande vantagem em relação ao torno mecânico é o acabamento e o tempo de produção. A Figura (4.13) mostra foto das duas peças prontas.



Figura 4.13 – Foto das duas peças fabricadas.

Para o dimensionamento da tampa foi realizado uma simulação numérica. A Figura (4.14) apresenta os valores para as tensões equivalentes. O valor máximo de 331.6 MPa ocorre na região de concentração de tensões em sua extremidade inferior. Isso gera um coeficiente de segurança mínimo $\eta = 1.6$.

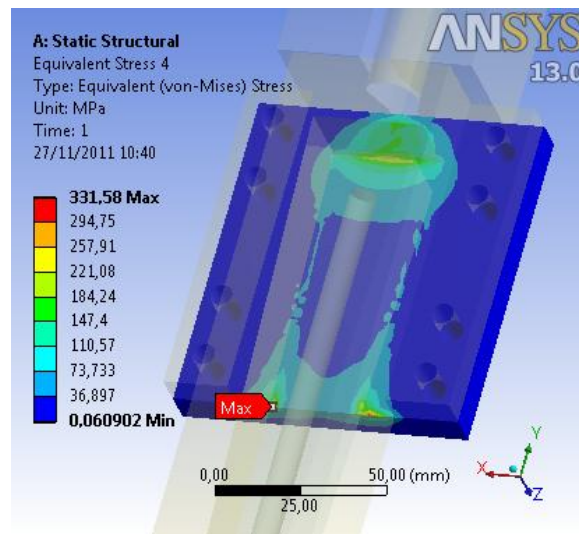


Figura 4.14 – Tensões equivalentes na tampa.

A tampa foi fabricada na oficina do Laboratório SG9 do ENM, utilizando uma chapa de aço 1045 de 0.6 mm de espessura disponível na oficina. Foram selecionados quatro parafusos de ¼ in para a fixação de cada tampa.

Para o ensaio, idealiza-se inserir uma das extremidades do corpo de prova em um molde fabricado com chapas de alumínio dobradas e preencher o conjunto com uma solução de resina. Após a cura, a resina se solidificaria aderindo à superfície do corpo de prova.

Outra possibilidade seria o embutimento da luva diretamente no suporte, mas o desmolde das luvas demandaria tempo e exigiria a realização de posterior usinagem da superfície para remover imperfeições. Seria mais simples e barato, portanto, manter as luvas dentro dos moldes e ensaiar o conjunto completo. Além disso, os moldes facilitam a posterior retirada das luvas do suporte. A Figura (4.15 (a)) mostra foto do molde já com a resina embutida.

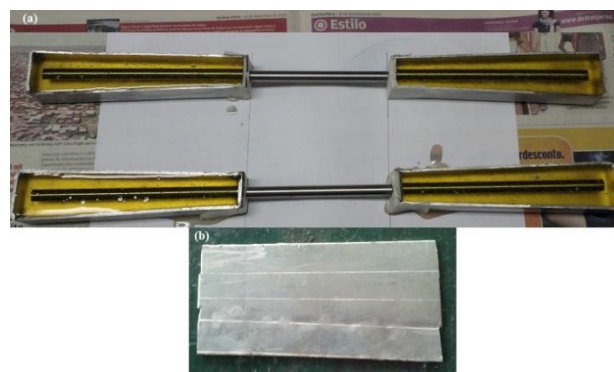


Figura 4.15 - Luva de resina epóxi embutida no molde (a) e chapa de alumínio antes de ser dobrada (b).

O material utilizado para fabricação dos moldes foi o alumínio, por apresentar maior facilidade para se trabalhar e por sua disponibilidade no edifício SG9. Chapas de alumínio de 2 mm de espessura foram cortadas (Fig. 4.15(b)) e dobradas para assumir a geometria final. O anexo I apresenta o desenho técnico dos moldes.

Ao contrário do esperado, os moldes puderam ser recuperados após a realização dos ensaios, com o auxílio de um martelo tipo bola (Fig. (4.16)).



Figura 4.16 – Moldes reaproveitados.

Para garantir o alinhamento do corpo de prova no molde, foi feita uma linha de centro na superfície do interior dos moldes e utilizou-se papel duro (papelão) e fita adesiva para centralizar o furo (Fig. 4.17 (a e b)). Também foram feitas marcas do comprimento de medida e do comprimento de embutimento nos corpos de prova (Fig. 4.17 (c)).

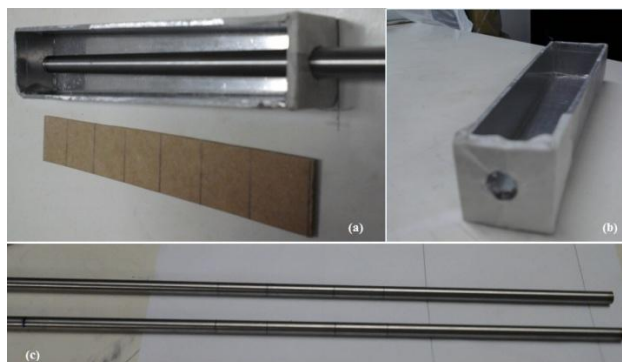


Figura 4.17 – Detalhe da montagem do corpo de prova.

4.2 RESULTADOS

Para validação do suporte projetado, foram realizados testes de tração em dois materiais. O material 4, que promove os maiores esforços e testará o suporte ao limite, e o material 2, de menor diâmetro. Para o ensaio, foi escolhida uma taxa de deformação de 0.5%/min ($8.3 \cdot 10^{-5}$) que garantirá uma melhor visualização da região de transformação de fase. A transformação de fase deverá então,

ocorrer em um patamar mais constante, explicitando melhor as tensões de início e término da transformação martensítica (σ^{Ms} e σ^{Mf}).

As Figuras (4.18), (4.20) e (4.21) mostram as curvas obtidas para o corpo de prova do material 4, com luva embutida na proporção $R = 1$ e comprimento de embutimento $Le = 140$.

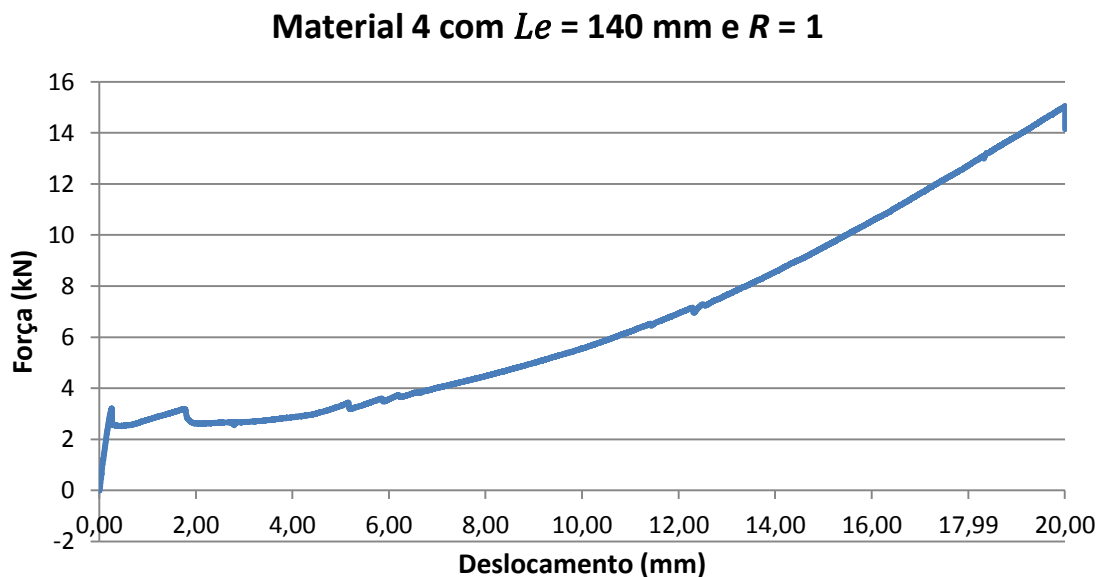


Figura 4.18 – Ensaio de tração do corpo de prova 1, material 4, primeira parte.

O teste apresentou um deslocamento máximo de mais de 20 mm, valor muito acima do esperado de até 10% do comprimento total (10 mm). O motivo deste deslocamento exagerado foi o escorregamento da luva de resina, que não apresentou rigidez o suficiente. A Figura (4.19) mostra foto antes e após a realização da primeira parte do teste, que foi interrompido, pois o deslocamento atingiu o limite de segurança imposto pelo operador da máquina.

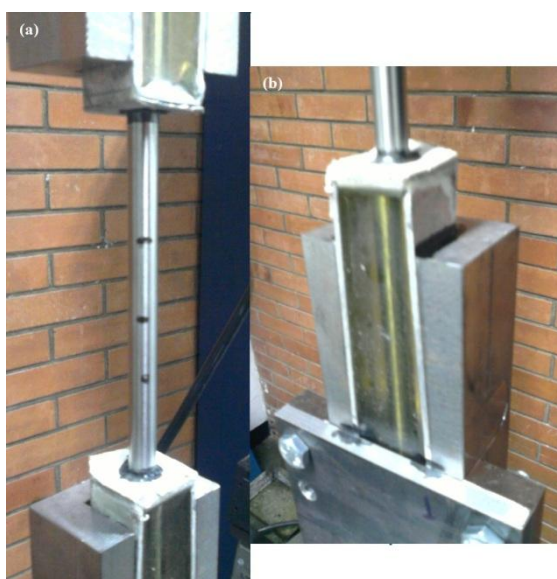


Figura 4.19 – Foto antes (a) e após a primeira parte do ensaio (b).

Para continuação do ensaio (Fig. (4.20)), esperava-se a estabilização do escorregamento para então a realização de outro ensaio a partir do zero (terceira parte), sem a influência do escorregamento. Marcações foram feitas antes da realização do teste para a verificação de um possível escorregamento da luva ou do desprendimento do fio por falha na resina (Fig. 4.19 (b)).

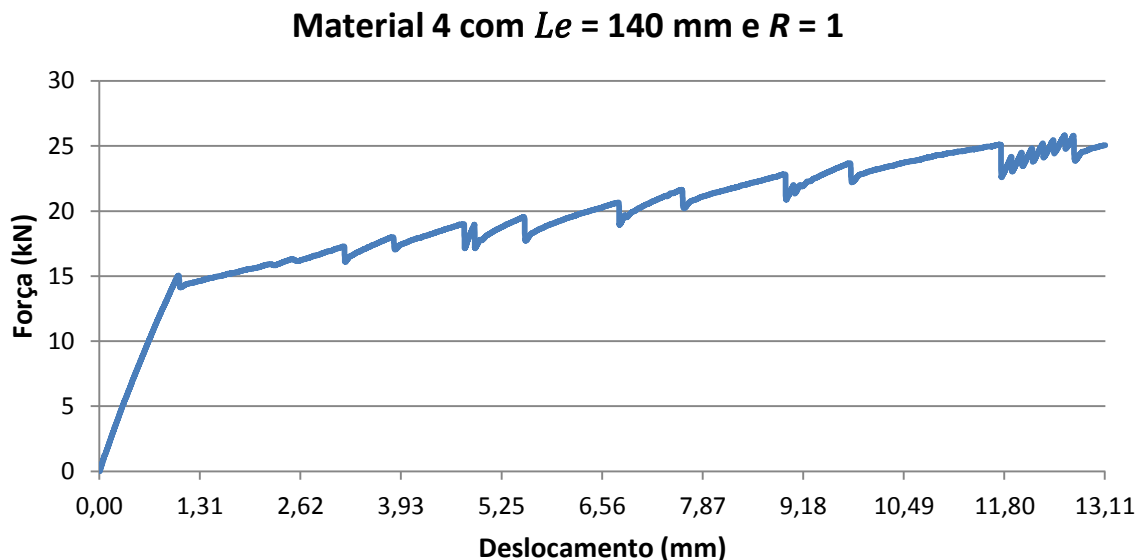


Figura 4.20 - Ensaio de tração do corpo de prova 1, material 4, segunda parte.

Pode-se observar uma região de carregamento elástico até o limite de aproximadamente 15 kN (aproximadamente 1 mm de deslocamento), o mesmo limite obtido na primeira parte do ensaio. Após esse valor, a luva passa a escorregar novamente e o ensaio é interrompido quando a força atinge valores superiores a 25 kN.

Uma terceira tentativa de ensaio foi realizada (Fig. (4.21)).

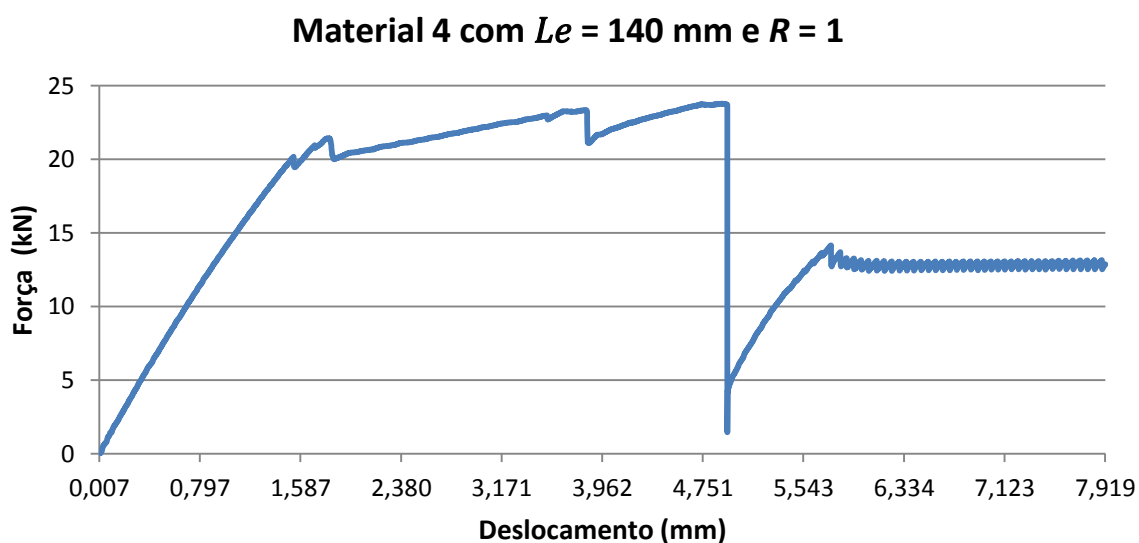


Figura 4.21 - Ensaio de tração do corpo de prova 1, material 4, terceira parte.

Novamente observa-se uma região de carregamento elástico até o limite de 22 kN (aproximadamente 1.6 mm de deslocamento), valor próximo ao atingido na segunda parte do ensaio. Após esse limite a luva volta a escorregar e ocorre o desprendimento total do fio da resina, que ocorre com aproximadamente 24 kN. Após o descolamento da resina, o fio continua fixo ao suporte apenas pelo atrito, a curva quase constante (a partir de 5.7 mm) indica o valor médio equivalente ao atrito, que foi de 13 kN.

Pode-se estimar o valor da resistência adesiva suportada pela resina no teste, utilizando um processo inverso ao do cálculo do comprimento de embutimento através da Eq. (5), o que corresponde a uma tensão de $\tau_a = 6.8 \text{ MPa}$. Esse valor é muito menor que o da tensão cisalhante máxima indicada pelo fabricante da resina. Isso pode ser explicado através da análise da falha, que pode ser adesiva ou coesiva. Quando um material falha adesivamente, o adesivo perde totalmente sua ligação ao substrato. Na falha coesiva, a resistência do material adesivo é menor que as forças aplicadas a ele, o que ocasiona na sua falha. Poções do material adesivo ainda permanecem ligadas ao substrato (EPOTEK - EPOXY TECHNOLOGY, 2009). A Figura (4.22) mostra foto do material após a falha.



Figura 4.22 – Material 4 após o ensaio.

Observa-se que a falha é adesiva, ou seja, a resina não adere suficientemente bem ao substrato. Isso pode ser explicado pelo fato do substrato (fio de NiTi) possuir pouca rugosidade, a superfície do fio é polida.

A qualidade da resina pode também estar prejudicada pelo fato de ter se passado o seu prazo de validade, que de acordo com o fabricante, dentro das especificações de armazenagem, as embalagens não abertas tem vida útil garantida de no mínimo seis meses, todavia o material pode resistir vários meses mais. O prazo de validade do material utilizado é dia 24 de novembro de 2011, dias antes da realização dos ensaios. A porosidade também é um fator que pode alterar na qualidade da resina.

No mesmo dia foi realizado o ensaio do material 2, utilizando agora uma razão de mistura $R = 2$ (Fig. 4.23).

Material 2 com $L_e = 60$ mm e $R = 2$

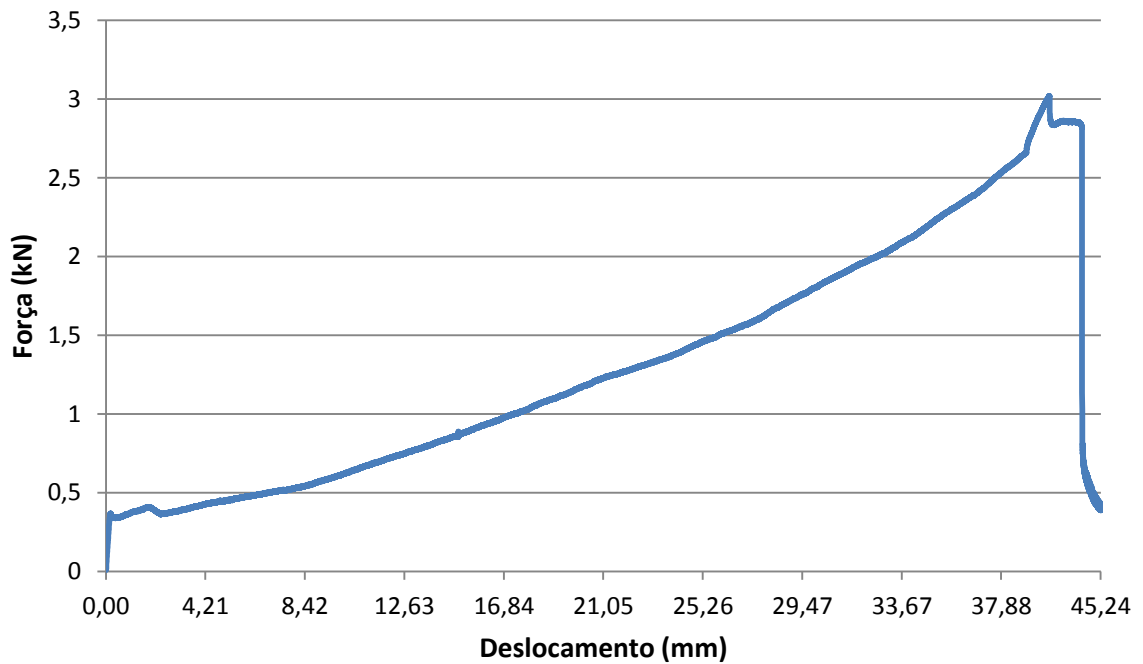


Figura 4.23 – Ensaio de tração no corpo de prova 1, material 2.

Novamente o escorregamento da luva é observado (Fig. (4.24)). O deslocamento atinge o valor máximo de 43 mm e a falha adesiva é novamente observada para uma força de quase 3 kN, o que corresponde a uma resistência adesiva de $\tau_a = 6$ MPa. O valor para a resistência adesiva é pouco menor ao valor encontrado no ensaio do material 4 com $R = 1$.

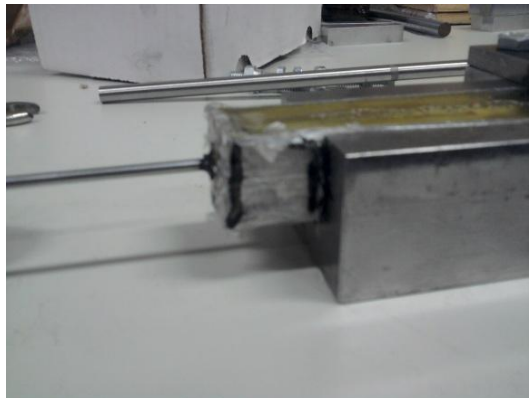


Figura 4.24 – Marcações indicando o escorregamento da luva.

O último ensaio foi realizado também com o material 2, mas aumentou-se o comprimento de embutimento na tentativa de ensaiar o material até a ruptura (Fig. (4.25)), esperando evitar o escorregamento do fio dentro da resina.

Material 2 com $L_e = 140$ mm e $R = 2$

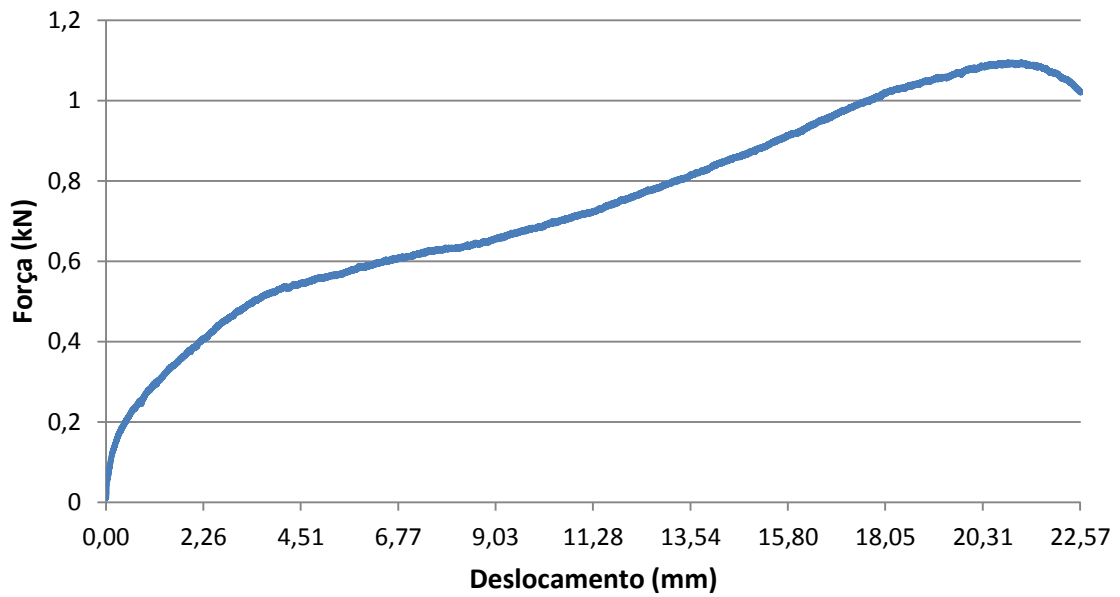


Figura 4.25 - Ensaio de tração no corpo de prova 3, material 2.

Para este último ensaio novamente ocorre o escorregamento e o fio se destaca da resina. A força com que a resina se descola do fio, de 1.1 kN, é bem menor que o valor encontrado no ensaio anterior. A falha também foi adesiva e a tensão de arrancamento foi de $\tau_a \approx 1$ MPa.

Analisando os resultados obtidos através do ensaio de tração foi possível detectar alguns problemas que não foram previstos durante o desenvolvimento do protótipo, sendo eles, principalmente, o escorregamento da luva de resina e a pouca adesão do fio na resina.

Estes problemas deverão ser investigados e solucionados para o prosseguimento do trabalho.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este último capítulo tem como objetivo apresentar as conclusões deste trabalho, bem como apresentar os passos necessários para a continuação deste trabalho.

5.1 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um dispositivo de fixação especial para a máquina de tração para estudo da pseudoelasticidade das ligas NiTi para aplicação em absorvedores dinâmicos de vibração do tipo *stockbridge*.

Foram realizadas algumas simulações numéricas de suportes diversos até se obter aquele que melhor atende aos requisitos de projeto, sendo este testado à tração posteriormente para sua validação.

O suporte projetado não pôde ser validado experimentalmente para sua condição de carga máxima (58 kN), pois não foi possível realizar o ensaio até a ruptura do material 4. O ensaio alcançou um limite máximo de 24 kN, pouco menos da metade da carga máxima esperada. A peça apresentou dois problemas não previstos em projeto que impossibilitaram os ensaios: o escorregamento da luva de resina epóxi durante o ensaio (mascarando assim, a deformação do material) e a baixa resistência adesiva entre a resina e o fio de NiTi.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a resolução do problema de escorregamento da luva, deve ser investigada a possibilidade de fixação de uma placa com um rasgo, aparafusada na parte inferior da peça (Fig. 5.1), ou a utilização de uma resina com maior rigidez.

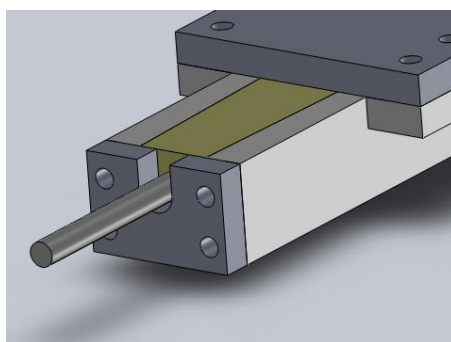


Figura 5.1 – Chapa aparafusada na parte inferior da peça.

Em relação ao descolamento da resina, várias soluções no intuito de aprimoramento da capacidade adesiva deverão ser testadas. Como utilização de uma resina mais resistente, ou até mesmo, de outro

tipo de adesivo. Soluções como introdução de um pino na extremidade do fio (para o caso do material 4) ou enrolamento da extremidade dos fios (para os materiais 1 e 2). Outra possibilidade seria a utilização de outro adesivo de alta eficiência (como o *super bonder*) na superfície do fio. Uma rosca poderia ser desenhada com *super bonder* na superfície dos fios antes do embutimento na resina.

Após a resolução destes dois problemas do suporte, as curvas de tensão versus deformação deverão ser levantadas e uma análise dos resultados deverá ser feita, definindo a área de histerese e consequentemente a energia que cada material é capaz de dissipar a cada ciclo de carregamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR6152 - Materiais Metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente**. ABNT. Rio de Janeiro. 2002.

CACHUTÉ, R. S.; YAMAMOTO, R. R. **Caracterização Dinâmica de um Stockbridge Pseudoelástico**. UnB. Brasília. 2009.

CASTRO, E. C. D.; BRUSAMARELLO, V. J. **Comparativo de desempenho de processos de soldagem MIG robotizado X manual**. Universidade do Contestado (UnC). Caçador - SC, p. 12.

CERPAL - MF PRODUTOS SIDERÚRGICOS LTDA. Disponível em: <www.cerpaldf.com.br>. Acesso em: 10 novembro 2011.

CHOI, S. B.; HWANG, J. H. **Structural Vibration Control Using Shape Memory Actuators**, Korea, 2000.

CLARK, P. W.; AIKEN, I. D.; KELLY, J. M. **Experimental and analytical studies of shape memory alloy damper for structural control**, 1995.

DA SILVA, E. P. **Fenomenologia das Ligas com Memória de Forma: Comportamento Termomecânico**. Brasília - DF: [s.n.]. 2011.

DA SILVA, V. P. **Estudo Numérico e Experimental em Amortecedores Tipo Stockbridge para Linhas de Transmissão Aéreas**. Curitiba. 2006.

DAYANANDA, G. N. **NiTi Super Elastic Shape Memory Alloys for Energy Dissipation in Smart Systems for Aerospace Applications**. Mangalore University. Bangalore, India, p. 186. 2008.

DE LÉLIS, M. B. **Projeto de uma máquina de ensaio de tração de cabos condutores de energia**. Brasília. 2011.

DE SOUZA, M. M. **Caracterização de uma liga com efeito de memória de forma**. Rio de Janeiro. 2005.

DO NASCIMENTO, R. L. E. **Produção e Caracterização de Compósitos Inteligentes**. Lisboa. 2006.

DONG, Y. S. et al. A passive damping device with TiNi shape memory alloy rings and its properties. **Materials science & engineering. A, Structural materials : properties, microstructure and processing**, vol. 416, n^o1-2, p. 92-97, 2006.

DOS SANTOS, C. M. L. **LIGAS Ni-Ti RICAS EM Ni - Tratamento Térmico, Termomecânico e Efeito de Micromemória de Forma**. Rio de Janeiro. 2006.

EPOTEK - EPOXY TECHNOLOGY. **Epoxy Adhesive Application Guide**. [S.l.]: [s.n.], 2009.

FIGUEIREDO, A. M. G. **Caracterização da Fadiga Mecânica de Baixo Ciclo em Ligas Superelásticas de NiTi**. Belo Horizonte. 2006.

GRUPO LABMAT. Disponível em: <<http://www.grupolabmat.com.br>>. Acesso em: 03 outubro 2011.

HE, Y.-Y. et al. Vibration control of a rotor-bearing system using shape memory alloy: II. Experimental study. **Smart Mater. Struct.**, vol. 16, p. 122–127, 2007.

HZPRODUCT, 2011. Disponível em: <<http://www.hzproduct.com/pro/615/65481/titanium-orthopaedic-items-140726.html>>.

K.OTSUKA; C.M.WAYMAN. **Shape Memory Materials**. United Kingdom: Cambridge University Press, 1998.

KAHN, H.; HUFF, M. A.; HEUER, A. H. The TiNi shape-memory alloy and its applications for MEMS, 1998. **J. Micromech. Microeng**, vol. 8, p. 213–221, 1998
KELLY, S. G. **Fundamentals of Mechanical Vibrations**. [S.l.]: McGraw-Hill Book Co, v. II, 2000.

KELLY, S. G. **Fundamentals of Mechanical Vibrations**. [S.l.]: McGraw-Hill Book Co, v. II, 2000.

KHANDELWAL, A.; BURAVALLA, V. Models for Shape Memory Alloy Behavior - An overview of modeling approaches. **The International Journal of Structural Changes in Solids**, vol. 1, n. 1, p. 111-148, 2009.

KST, 2011. Disponível em: <www.chinaopticcable.com>.

KUMAR, A. R.; SOHN, C.-H.; GOWDA, B. H. L. Passive Control of Vortex-Induced Vibrations: An Overview. **Recent Patents on Mechanical Engineering**, Korea, vol. 1, n. 1, p. 1-11, 2009.

LABEGALINI, P. R.; FUCHS, R. D.; DE ALMEIDA, M. T. **Projetos Mecânicos das linhas de transmissão**. 2ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1994.

LAGOUDAS, D. C. **Shape Memory Alloys - Modeling and Engineering Applications**. [S.l.]: Springer, 2008.

MATWEB - MATERIAL PROPERTY DATA. Disponível em: <www.matweb.com>. Acesso em: 25 novembro 2011.

MCKELVEY, A. L.; RITCHIE, R. O. Fatigue-crack propagation in Nitinol, a shape-memory and superelastic endovascular stent material. **Journal of Biomedical Materials Research**, Califórnia, vol. 47, n. 3, p. 301–308, 1999.

MEDIA FILMS, 2011. Disponível em: <www.mediafilms.org>.

MICRO TORNO. Disponível em: <www.microtorno.com.br>. Acesso em: 02 novembro 2011.

NEMAT-NASSER, S.; CHOI, J. Y. Strain rate dependence of deformation mechanisms in a Ni–Ti–Cr shape-memory alloy. **Acta Materialia**, vol. 53, p. 449-454, 2005.

NEMAT-NASSER, S.; GUO, W.-G. Superelastic and cyclic response of NiTi SMA at various strain rates and temperatures. **Mechanics of Materials**, vol. 38, n. 5-6, p. 463-474, 2006. OLIVEIRA, B. A. D. **Desenvolvimento de um isolador de vibração pseudoelástico**. UnB. Brasília - DF, p. 96. 2008.

RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. [S.l.]: Pearson, v. IV, 2008.

SAUTER, D. **Modeling the Dynamic Characteristics of Slack Wires Cables in Wire Cables in Stockbridges Dampers**. Darmstadt. 2003.

SAVI, M. A. **Dinâmica Não-linear e Caos**. Rio de Janeiro: e-papers, 2006.

SCHETKY, L. M. The Industrial Applications of Shape Memory Alloys in North America, Brookfield, USA. **Materials Science Forum**, vol. 327 - 328 (vol. Shape Memory Materials), p. 9-16, 2000.

SERWAY, R. A. **Física**. [S.l.]: McGraw-Hill, (1992).

SHIGLEY, J. E.; MISCHE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. [S.l.]: bookman, 2005.

SILAEX QUÍMICA LTDA. Disponível em: <www.silaex.com.br>. Acesso em: 01 novembro 2011.

SILVA, V. P. **Estudo Numérico e experimental em amortecedores tipo stockbridge para linhas de transmissão aéreas**. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba. 2006.

SINGH, S. N. **Electric Power Generation, Transmission and Distribution**. 6ª. ed. [S.l.]: Prentice-Hall of India, 2003.

SNEGOVSKI, D. **Health Monitoring of Overhead Power Transmission Line: User Needs**. Vienna: [s.n.]. 2004.

SONG, G.; MA, N.; LI, H.-N. Applications of shape memory alloys in civil structures, 2006.

SOUZA, M. M. D. **Caracterização de uma liga com efeito de memória de forma**. Rio de Janeiro. 2005.

STERNBERG, S. Stents under new scrutiny, 2007.

VAJPAI, S. **Processing and Characterization of Cu-Al-Ni Shape Memory Alloy Strips Prepared from Prealloyed Powder by Hot Densification Rolling of Powder Preforms**. [S.l.]: Metallurgical and Materials Transactions , v. 42A, 2011.

VAN DYKE, M. **An Album of Fluid Motion**. Stanford: The Parabolic Press, 2002.

VELOZTECH - ENGENHARIA DE COMPETIÇÃO. Disponível em: <www.veloztech.com>. Acesso em: 05 novembro 2011.

WEIMAR, S. C. **Caracterização Termomecânica de Compósitos Híbridos com Memória de Forma**. Brasília. 2008.

WIKIPEDIA. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Stockbridge_damper_POV.jpg>. Acesso em: 10 novembro 2011.

WILLIAM D. CALLISTER, J. **Materials Science and Engineering - An Introduction**. 7^a. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

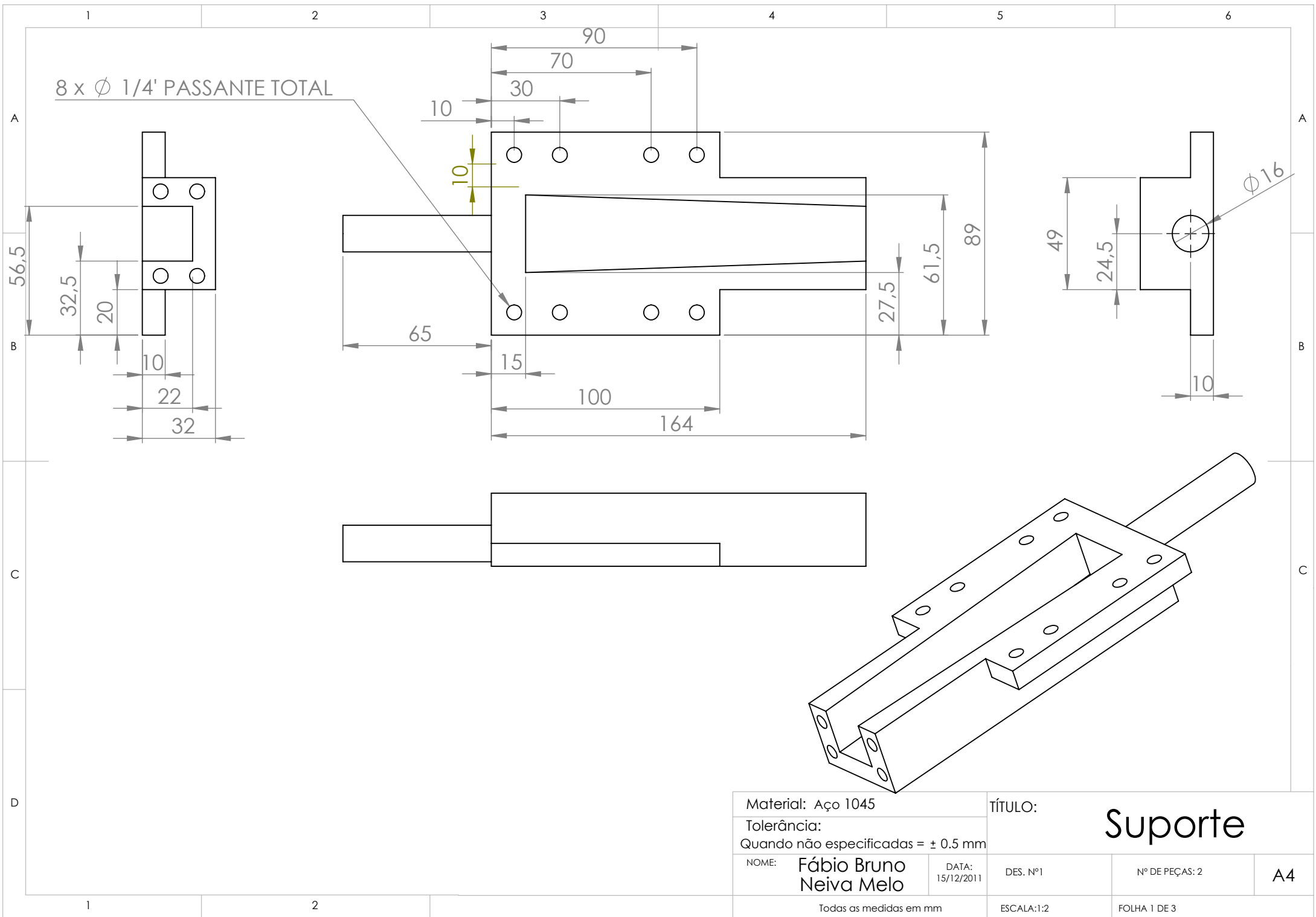
ZAK, A. J.; CARTMELL, M. P.; OSTACHOWICZ, W. M. Dynamics and Control of a Rotor using an Integrated SMA/Composite Active Bearing Actuator. **Key Engineering Materials**, Suíça, vol. 245 – 246 (vol. Damage Assessment of Structures), p. 233-240, 2005.

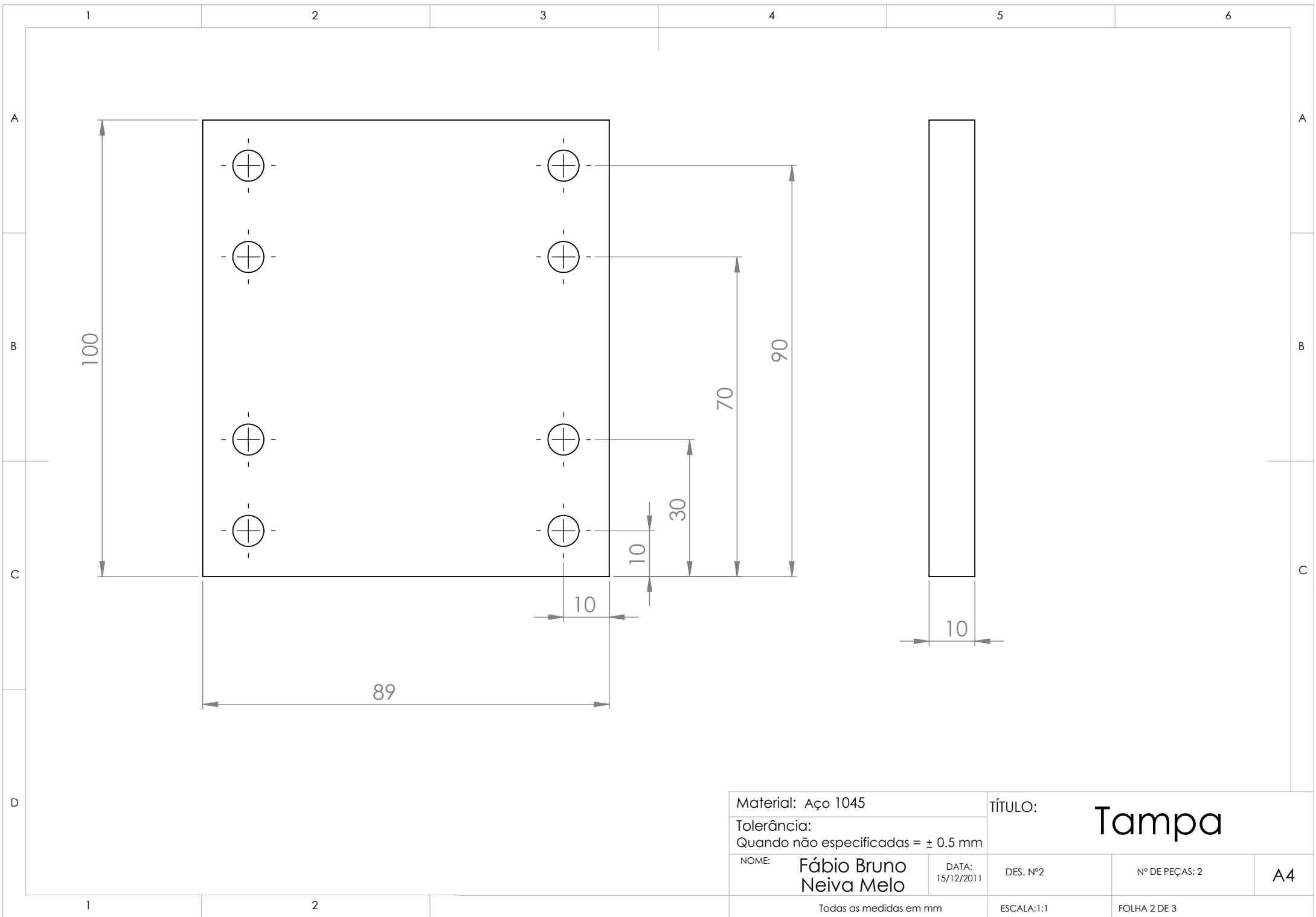
ANEXOS

| | | Pág. |
|----------------|--------------------------|------|
| Anexo I | Desenhos Técnicos | 51 |

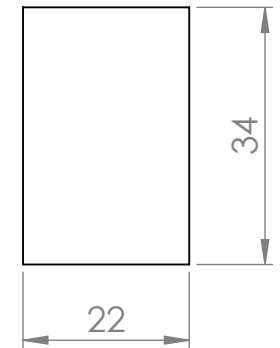
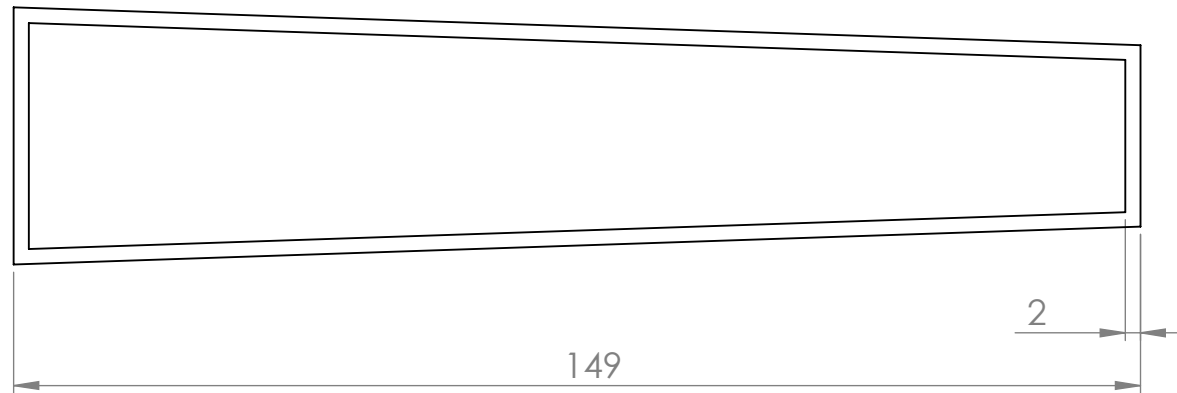
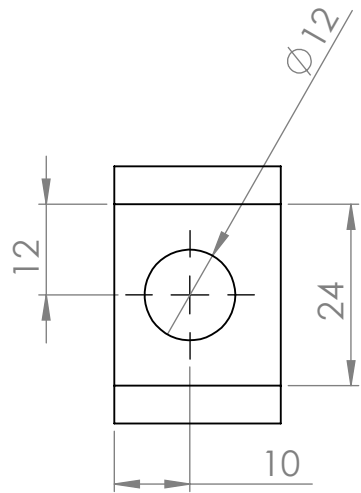
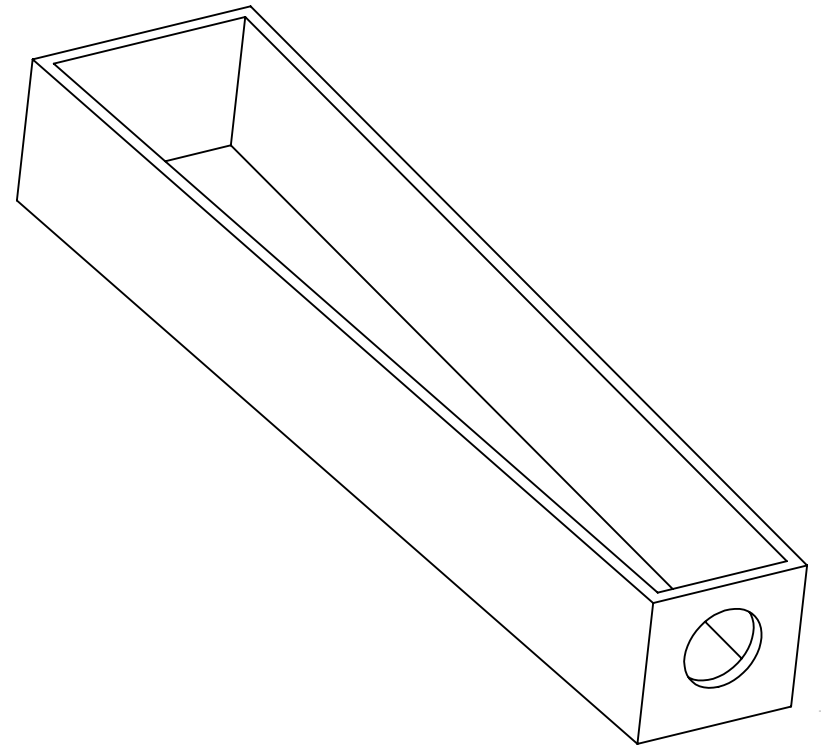
ANEXO I: Desenhos Técnicos

Esta seção apresenta os desenhos técnicos para o suporte, a tampa e o molde.





| | | | | |
|--|---------------------|----------------------|----------------|----|
| Material: Aço 1045 | | TÍTULO: Tampa | | |
| Tolerância: Quando não especificadas = ± 0.5 mm | | | | |
| NOME: Fábio Bruno Neiva Melo | DATA: 15/12/2011 | DES. Nº2 | Nº DE PEÇAS: 2 | A4 |
| Todas as medidas em mm | | ESCALA:1:1 | FOLHA 2 DE 3 | |



| | | | | |
|--|---------------------|----------------------|----------------|----|
| Material: Alumínio | | TÍTULO: Molde | | |
| Tolerância: Quando não especificadas = ± 0.5 mm | | | | |
| NOME: Fábio Bruno Neiva Melo | DATA: 15/12/2011 | DES. Nº3 | Nº DE PEÇAS: 4 | A4 |
| Todas as medidas em mm | | ESCALA:1:1 | FOLHA 3 DE 3 | |