

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

CONCEPÇÃO E PROJETO DE UMA BANCADA PARA CARACTERIZAÇÃO DE FADIGA FUNCIONAL EM LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Por,
Isaac Ambrosio da Silva

Brasília, 27 de Junho de 2016



**ENGENHARIA
MECATRÔNICA**
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

CONCEPÇÃO E PROJETO DE UMA BANCADA PARA CARACTERIZAÇÃO DE FADIGA FUNCIONAL EM LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Por,

Isaac Ambrosio da Silva

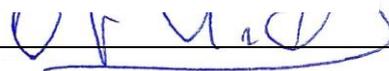
Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Banca Examinadora

Prof. Edson Paulo da Silva, UnB/ ENM (Orientador)



Prof. Carlos Humberto Llanos Quintero, UnB/ ENM



Prof. Guilherme Caribé de Carvalho, UnB/ ENM



Brasília, 28 de Junho de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

ISAAC, AMBROSIO DA SILVA

Concepção e projeto de uma bancada para caracterização de fadiga funcional em ligas com memória de forma,

[Distrito Federal] 2016.

xi, 62p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2016). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1.Ligas com Memória de Forma

2.Fadiga funcional

3.Comportamento termomecânico de SMA's

4.NiTi

I. Mecatrônica/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DA SILVA, I.A., (2016). Concepção e projeto de uma bancada para caracterização de fadiga funcional em ligas com memória de forma. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT. TG-nº 10, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 62p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Isaac Ambrosio da Silva.

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Concepção e projeto de uma bancada para caracterização de fadiga funcional em ligas com memória de forma.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Isaac Ambrosio da Silva

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais e irmãos, que apesar da distância e das dificuldades de visitá-los durante o período letivo, sempre me apoiaram e incentivaram na carreira que escolhi.

Agradeço às grandes amizadas, no Brasil e na Itália, que esse período universitário pôde me proporcionar, em especial ao grande amigo e primo Maycon pelos momentos de companheirismo e por ter me motivado à ingressar na UnB.

Agradeço aos professores da UnB por transmitir todo o conhecimento acadêmico e profissional, de grande importância para meu crescimento pessoal. Agradeço finalmente ao meu professor orientador Edson Paulo da Silva pelas indicações e conselhos fundamentais para a realização deste trabalho.

Isaac Ambrosio da Silva.

"Sonhar grande ou sonhar pequeno dá o mesmo trabalho, então sonhe grande!"

Jorge Paulo Lemann

RESUMO

A aplicação de cargas de maneira cíclica, podendo ser do tipo mecânica ou térmica, é uma das situações mais comuns na utilização de atuadores ou demais aplicações de NiTi SMA (Ligas com Memória de Forma). Um carregamento cíclico do tipo mecânico (Pseudo-elasticidade) ou térmico (Efeito Memória de Forma), pode levar com o tempo à fadiga do material, podendo ou não ocasionar em uma ruptura. O termo fadiga funcional surge do fato que a capacidade de Efeito Memória de Forma no material SMA, diminui de acordo com o aumento no número de ciclos, devido a uma mudança em sua microestrutura. O presente trabalho apresenta uma concepção para o desenvolvimento de uma bancada para testes e análise de fadiga funcional em Ligas com Memória de Forma.

Palavras Chave: Ligas com Memória de Forma; fadiga funcional; pseudo-elasticidade; efeito memória de forma.

ABSTRACT

Actuators are commonly applied on NiTi SMA (Shape Memory Alloy) on the context of reproducing repetitive load, whether a mechanical load or thermal one. A repetitive mechanical load (pseudo-elasticity) or thermal (shape memory effect), could cause a material fatigue, resulting or not in a fracture. The term functional fatigue has origins in the fact that the material's shape memory effect capacity in SMA, decreases as there is an increase of cycle number, as a consequence of its micro structure changing. The current work shows the basics of a development of a test bench where will take place functional fatigue analyses applied to Shape Memory Alloy.

Keywords: Shape Memory Alloy; functional fatigue; superelasticity; shape memory effect.

SUMÁRIO

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	1
1.2 OBJETIVO	2
1.3 METODOLOGIA	2
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	2
Capítulo 2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	3
2.1 AS LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA.....	3
2.2 COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DAS SMA's	7
2.2.1 QUASIPLASTICIDADE	9
2.2.2 PSEUDOELASTICIDADE	10
2.2.3 EFEITO MEMÓRIA DE FORMA	11
2.3 FADIGA FUNCIONAL DAS SMA's.....	12
2.4 O AQUECIMENTO DE SMA's	14
2.5 CURVA S-N.....	15
Capítulo 3 - CONCEPÇÃO E PROJETO	19
3.1 ESPECIFICAÇÃO.....	19
3.2 PROJETO MECÂNICO ESTRUTURAL	20
3.3 PROJETO ELETRÔNICO	23
3.3.1 RETIFICADOR DE MEIA-ONDA.....	24
3.3.2 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA	25
3.3.3 CIRCUITO PWM.....	27
3.4 SENSORES.....	30
3.4.1 CELULA DE CARGA	31
3.4.2 SENSOR DE POSIÇÃO.....	34
3.4.3 SENSOR DE TEMPERATURA	36
3.5 INTERFACE COM USUÁRIO	38

Capítulo 4 RESULTADOS	39
4.1 CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DA BANCADA	39
4.2 INTERFACE GRÁFICA.....	44
4.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO	48
4.4 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE.....	49
Capítulo 5 CONCLUSÕES.....	50
Análise dos resultados.....	50
ANEXO 1 - Desenhos esquemáticos da bancada de caracterização.....	54
ANEXO 2 - Especificações da liga NiTi.	56
ANEXO 3 - Especificações da célula de carga.	57
ANEXO 4 - Especificações do sensor de posição indutivo.	59
ANEXO 5 - Especificações do sensor de temperatura infravermelho.	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Aplicação de uma SMA, propulsor da Boeing com geometria variável. (NASA, 2015).....	4
Figura 2.2.a. Aplicações biomédicas: <i>Stents</i>	4
Figura 2.3.b. Aplicações biomédicas: (b) Filtro de Simon; (c) Arcos Ortodônticos.....	5
Figura 2.4. Representação da estrutura cristalina de uma liga NiTi com (a) austenita, ordenado e simétrico e (b) martensita, não-simétrico. (Otsuka & Wayman, 1999).	5
Figura 2.5. Transformação martensítica, maclada e demaclada.(Otsuka & Wayman, 1999).	6
Figura 2.6. Representação das temperaturas críticas de transformação de fase de uma liga com memória de forma. (da Silva, 2003).	7
Figura 2.7. Transformação direta e reversa. (Lagoudas & Kumar, 2008).	8
Figura 2.8. Transformação da estrutura com a aplicação de carga. (Lagoudas & Kumar, 2008).	9
Figura 2.9. Curva tensão e deformação quasiplástica. (da Silva, 2003).	10
Figura 2.10. Curva tensão deformação pseudoelástica. (da Silva, 2003).	10
Figura 2.11. Curva do processo de memória de forma. (da Silva, 2003).	11
Figura 2.12. Curva Tensão x Deformação mostrando a ciclagem para diferentes temperaturas (a), (b) e (c). (Miyazaki, Imai, Igo, & Otsuka, 1986).	14
Figura 2.13. Esquemático do experimento de Fadiga Funcional.(Eggeler, Hornbogen, Yawny, Heckmann, & Wagner, 2004).	15
Figura 2.14. Ciclos de tensão típicos em fadiga. (a) Alternada (b) Flutuante e (c) Aleatório. (Fuchs, Stephens, Ali, & R.R., 2000).	16
Figura 2.15. Gráfico de um carregamento cíclico com tensão flutuante. (Fuchs, Stephens, Ali, & R.R., 2000).....	17
Figura 2.16. Comportamento típico de uma Curva S-N. (Alvarenga Junior, 2006).	18
Figura 3.1. Modelo da bancada.....	19
Figura 3.2. Alumínio do tipo estrutural.	21
Figura 3.3. Vistas Frontal e lateral esquerda da estrutura.	21
Figura 3.5.a. Diagrama esquemático do circuito.....	24
Figura 3.6.b. Formas de onda relacionadas ao circuito em (a).....	25
Figura 3.7. Esquemático do circuito elétrico do retificador em ponte e ao lado as formas de onda relacionadas.	26
Figura 3.8. Diagrama esquemático do circuito retificador e sinal de saída.	27
Figura 3.9. Exemplos de algumas formas de onda com diferentes <i>Duty Cycles</i>	28

Figura 3.10. Circuito eletrônico para o PWM.	29
Figura 3.11. Forma de onda referente ao PWM.	29
Figura 3.12. Indicação do posicionamento dos sensores na bancada.	31
Figura 3.13. Exemplos de extensômetros (<i>strain gauges</i>).....	31
Figura 3.14. Representação de uma <i>Ponte de Wheatstone</i>	32
Figura 3.16. Desenho Esquemático da célula de carga.	33
Figura 3.17. Circuito esquemático do sensor célula de carga.	33
Figura 3.19. Cuidados ao instalar sensores indutivos.	35
Figura 3.20. Sensor de temperatura infravermelho <i>Micro-Epsilon</i>	37
Figura 3.21. Fluxograma do sistema, com destaque para a interface gráfica.	38
Figura 4.1. Evolução do projeto estrutural.	39
Figura 4.2. Cotagem e apresentação em 3D da bancada.	40
Figura 4.3. Estrutura da bancada montada.....	41
Figura 4.4. Montagem da bancada com os sensores.	41
Figura 4.5. Visão lateral da bancada.....	42
Figura 4.6. Bancada e demais elementos do sistema.	42
Figura 4.7. Sensores e fio de SMA acoplado à bancada.....	43
Figura 4.8. Posicionamento do sensor Célula de Carga.....	43
Figura 4.9. Posicionamento dos sensores de Temperatura e de Posição.	44
Figura 4.10. Painel da Interface com usuário.....	45
Figura 4.11. Parâmetros iniciais.	45
Figura 4.12. Caixas de controle para ligar, salvar e visualizar ciclos.	46
Figura 4.13. Visualização dos sinais captados.	46
Figura 4.14. Visualização dos resultados.....	47
Figura 4.15. Diagrama de Blocos do Painel desenvolvido.....	47
Figura 4.16. Exemplo de construção da Curva S-N. (Mammano, 2011).	49
Figura A-5.1. Especificações de distâncias mínimas para o sensor indutivo.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1. Propriedades físicas do NiTinol com 54,4% de Níquel. (Matthey, 2015).	7
Tabela 3-1. Características dimensionais da estrutura.	20
Tabela 3-3. Resistividade de uma Liga NiTi.....	23
Tabela 3-4. Propriedades físicas do modelo DLRP L002.	32

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

x	Posição	[mm]
T	Temperatura	[°C]
M_s	Temperatura de início de formação de Martensita	[°C]
M_f	Temperatura final de formação de Martensita	[°C]
A_s	Temperatura de início de formação de Austenita	[°C]
A_f	Temperatura final de formação de Austenita	[°C]
V	Tensão	[V]
I	Corrente elétrica	[A]

Símbolos Gregos

σ	Tensão	[MPa]
ε	Deformação	[mm]
Ω	Resistência elétrica	[ohm]

Siglas

UnB	Universidade de Brasília
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SMA	<i>Shape Memory Alloy</i> - Liga com Memória de Forma
NiTi	Liga de Níquel - Titânio
N	Número de ciclos

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são apresentados os aspectos gerais sobre as Ligas com Memória de Forma (SMA), o conceito de Fadiga Funcional e demais propriedades relacionadas às ligas. São estabelecidos também os objetivos, a metodologia utilizada para a realização e a estrutura do trabalho.

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Fadiga de um material se refere à mudança nas propriedades microestruturais, resultantes à aplicações de cargas cíclicas. Um material com memória de forma atua, na maioria das vezes, com ativação térmica, com isso surge o termo de fadiga "termomecânica" ou "funcional", significando que o material ao receber uma carga externa, quando aquecido proporcionará um trabalho mecânico externo (Eggeler, Hornbogen, Yawny, Heckmann, & Wagner, 2004)

Os estudos relacionados à fadiga puramente mecânica das SMA's é relativamente satisfatória no meio científico, porém pesquisas que tratam de fadiga funcional são de certa forma escassos. A resposta para isso se deve do fato que as Ligas com Memória de Forma possuem em sua grande maioria aplicações que utilizam o comportamento *Superelástico ou Pseudoelasticidade* (aparelhos ortodônticos, *stents*, molas, etc.) do que o *Efeito Memória de Forma* (atuadores) (Mammano & Dragoni, 2011).

A pseudoelasticidade e o Efeito Memória de Forma são as duas propriedades mais importantes encontrados quando da utilização de SMA's. A pseudoelasticidade ou superelasticidade possui uma característica isotérmica e é associado à transformação martensítica induzida por tensão, ocasionando uma deformação durante a aplicação de uma carga e então a sua recuperação de forma após o descarregamento em temperaturas acima de A_F . (Niendorf, Kroos, Batyrsina, Paulsen, & Motemani, 2015).

O Efeito Memória de Forma é relacionado á capacidade do material "memorizar" uma determinada forma, mesmo após severas deformações. Para isso, o material é deformado em baixas temperaturas (abaixo de M_F) e então descarregado. Para que possa retornar à sua forma original, a liga é então aquecida acima de A_F .

Este trabalho é baseado no projeto desenvolvido por Giovanni Scirè Mammano e Eugenio Dragoni, (Mammano & Dragoni, 2011), o qual teve como objetivo avaliar a fadiga funcional em ligas com memória de forma sobre condições de tensão constante e deformação constante.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar uma concepção e projeto de uma bancada experimental para testes e análise de Fadiga Funcional em SMA's (Ligas com Memória de Forma).

Com os resultados da análise será possível levantar a Curva S-N de uma determinada liga NiTi sob uma carga constante através da aplicação de esforços térmicos cíclicos.

1.3 METODOLOGIA

Este trabalho apresenta o escopo experimental, ou seja, o desenvolvimento de uma plataforma de testes. Para atingir os objetivos propostos, após uma análise dos conceitos sobre ligas com memória de forma e sobre Fadiga Funcional, será realizada uma análise sobre os componentes necessários para o desenvolvimento da bancada de testes.

Primeiramente será realizado um projeto CAD da estrutura mecânica, juntamente da seleção dos elementos sensores e de uma interface de comunicação com o usuário.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo seguinte será apresentado uma revisão bibliográfica sobre as SMA's, com o enfoque no comportamento termomecânico das Ligas com Memória de Forma e do conceito de Fadiga Funcional. Além disso é realizado uma apresentação das técnicas utilizadas para avaliá-la.

No capítulo 3 tem-se os detalhes sobre a concepção e projeto da bancada experimental, seleção dos elementos sensores e juntamente da interface gráfica desenvolvida. Finalmente, o capítulo 4 expõe os resultados alcançados nesse trabalho.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Neste capítulo será apresentado o comportamento termomecânico das SMA's, o conceito de Fadiga Funcional, a caracterização da Curva S-N e as técnicas utilizadas para a obtenção dos parâmetros experimentais como número de ciclos e tensão máxima de ruptura.

2.1 AS LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Ao longo dos últimos anos, a utilização das ligas com memória de forma (Shape Memory Alloy - SMA's), vem aumentando gradativamente por meio de suas diversas aplicações na engenharia graças a suas propriedades mecânicas como resistência a corrosão e principalmente a capacidade de recuperar uma forma previamente estabelecida quando submetida a uma variação de temperatura. Dentre as aplicações da Liga com Memória de Forma, podem-se destacar: hastes, fios, tubos, molas ou cabos. (da Silva, 2003). Além das suas propriedades mecânicas, também se destacam uma ótima biocompatibilidade, apresentando características semelhantes ou até superiores as do aço inoxidável ABNT 316L e da liga Ti ASTM F 136 (Shimano, 2005).

As SMA's fabricadas a partir da combinação de Níquel e Titânio obtiveram a melhor combinação para tais ligas, possuindo as melhores propriedades para muitas aplicações comerciais. A liga NiTi (Níquel-Titânio) é também denominada Nitinol (Níquel-Titânio Naval Ordnance Laboratory), em referência ao local da descoberta de Willian J. Buehler e Frederick Wang no início de 1960. Buehler e Wang pesquisavam novos materiais para a construção de mísseis, capazes de suportar fadiga, calor e impacto e se depararam com o comportamento inesperado da liga Níquel Titânio. Foi o início das pesquisas que explicam as propriedades e o comportamento termomecânico das SMA's levando em 1994 à criação da *International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies (SMST)*, grupo criado com o intuito de apresentar as tecnologias desenvolvidas que utilizam os efeitos Memória de Forma e Pseudoelástico dos materiais.

Um exemplo de utilização de ligas SMA, é na construção de *chevrons* para a aviação como pode ser visto na Figura 2.1. Para tentar diminuir os enormes ruídos provocados pelas turbinas dos aviões, pesquisadores da NASA, Boeing e General Electric desenvolveram um desenho de cantos serrilhados denominados *chevrons* e inseriram fitas de material SMA. Através das propriedades das ligas com memória de forma, estes *chevrons* podem se modificar de acordo com a temperatura e com isso alterar seu formato fazendo com que o ruído dos propulsores seja amenizado.



Figura 2.1. Aplicação de uma SMA, propulsor da Boeing com geometria variável. (NASA, 2015).

Devido a sua boa biocompatibilidade, outra área de grande utilização de materiais com memória de forma é em dispositivos biomédicos, como pode ser visto na Figura 2.2. Em (a), têm-se diversos *stents*, aparato auto-expansível na forma de tubo e constituído de malhas com a função de manter uma artéria coronariana aberta e sustentar o fluxo sanguíneo. Em (b) é mostrado um Filtro de Simon, dispositivo criado para filtrar os coágulos que possam vir a percorrer a corrente sanguínea. Por último em (c) aparelhos ortodônticos. Os aparelhos com SMA utilizam a capacidade de pseudoelasticidade, fornecendo uma tensão de restituição uniforme e praticamente constante. Com isso, não são necessários repetidos apertos, reduzindo o processo corretivo.



Figura 2.2.a. Aplicações biomédicas: *Stents*.

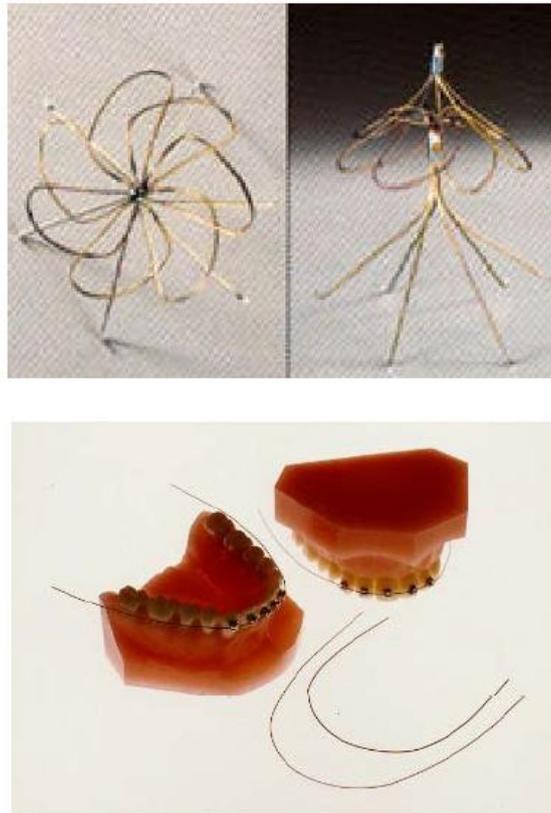


Figura 2.3.b. Aplicações biomédicas: (b) Filtro de Simon; (c) Arcos Ortodônticos.

As ligas SMA possuem duas fases com estruturas cristalinas distintas e, conseqüentemente, diferentes propriedades. A fase de alta temperatura, denominada Austenita (A), apresenta uma estrutura geralmente Cúbica de Corpo Centrado ou CCC/B2, já a Martensita (M), fase de baixa temperatura, possui uma estrutura tetragonal, ortorrômbica ou monocíclica/B19.

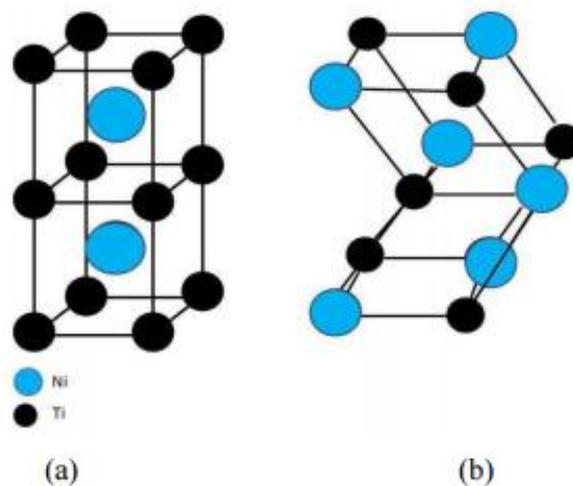


Figura 2.4. Representação da estrutura cristalina de uma liga NiTi com (a) austenita, ordenado e simétrico e (b) martensita, não-simétrico. (Otsuka & Wayman, 1999).

As ligas metálicas e as SMA's podem ser diferenciadas através do movimento atômico que levam de uma fase à outra. Nas ligas com memória de forma este movimento não se dá pela difusão dos átomos mas pelo cisalhamento induzido na rede, conhecido como transformação martensítica. Como a fase martensítica é uma fase de baixa simetria em comparação à Austenita, várias orientações, ou variantes da Martensita podem ser formadas. Esses arranjos de variantes, chamadas também de variantes martensíticas existem sob duas formas: martensita maclada (*twinned martensite*) ou não-maclada também chamada de demaclada (*detwinned martensite*).

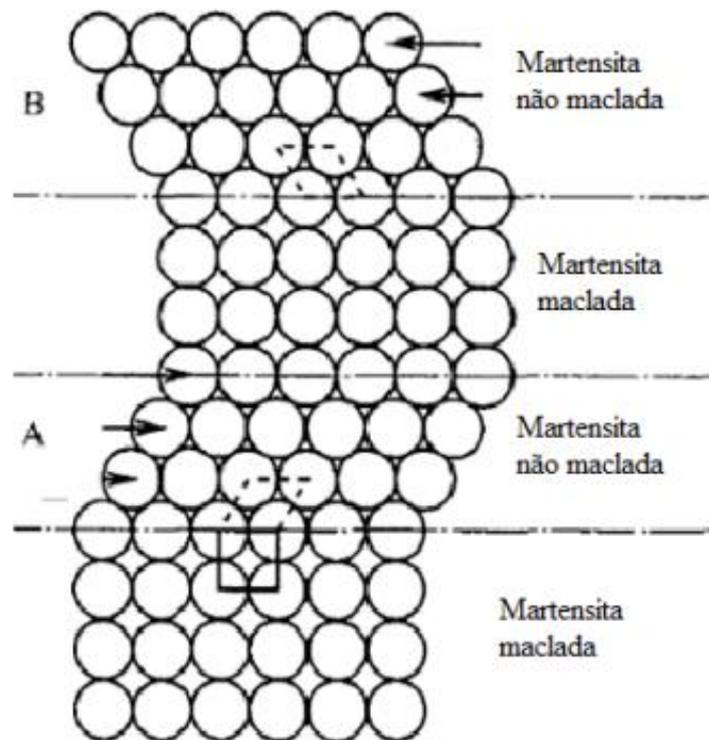


Figura 2.5. Transformação martensítica, maclada e demaclada.(Otsuka & Wayman, 1999).

A transição de uma estrutura austenítica em outra martensítica, ou seja, a passagem de uma fase de alta simetria para outra de menor simetria, dá-se o nome de transformação martensítica. Esta transformação ocorre através do crescimento da fase martensítica por meio de cisalhamento de planos cristalográficos, podendo ser altamente influenciada pela temperatura e pela carga mecânica aplicada.

A Tabela 2-1 apresenta algumas características físicas das Ligas com Memória de Forma, destacando que tais propriedades podem variar de acordo com a estrutura interna da liga, martensita ou austenita.

Tabela 2-1. Propriedades físicas do NiTiInol com 54,4% de Níquel. (Matthey, 2015).

Propriedades	Martensita (M)	Austenita (A)
Ponto de Fusão	1310°C	1310°C
Densidade	6,5 g/cm ³	6,5 g/cm ³
Condutividade Térmica	0,086 W/cm°C	0,18 W/cm°C
Coeficiente de Expansão Térmico	6,6 x 10 ⁻⁶ /°C	11 x 10 ⁻⁶ /°C
Modulo de Elasticidade	28 - 41 GPa	83 GPa
Calor Especifico	0,2 cal/g°C	0,2 cal/g°C
Coeficiente de Poisson	0,33	0,33
Deformação máxima	10%	10%
Resistividade	~80 *10 ⁶ ohm*cm	~100*10 ⁶ ohm*cm

2.2 COMPORTAMENTO TERMOMECAÂNICO DAS SMA's

O comportamento termomecânico de uma Liga com Memória de Forma apresenta grande relação com a temperatura, podendo o caminho de transformação das fases de uma SMA ser detalhado como segue:

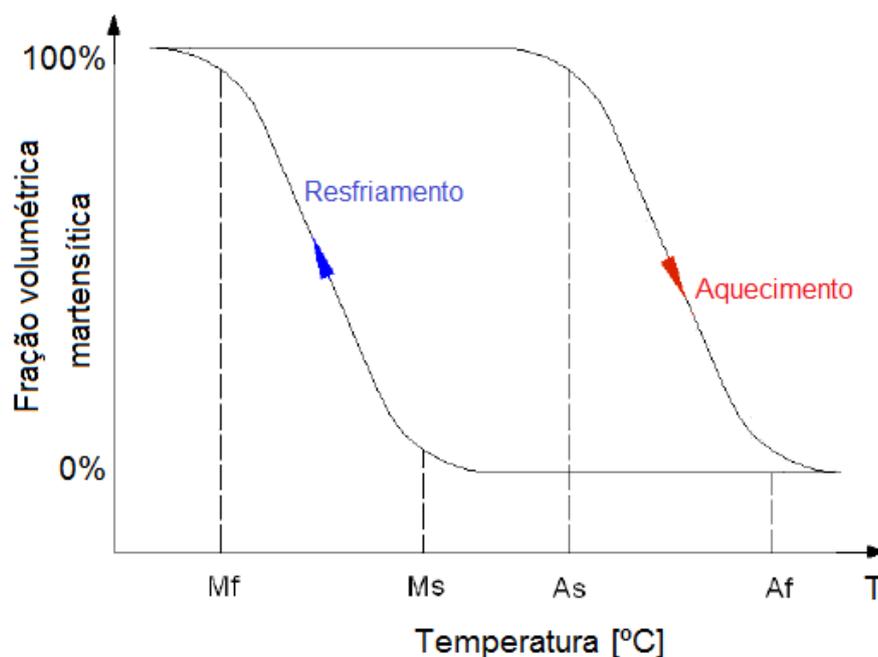


Figura 2.6. Representação das temperaturas críticas de transformação de fase de uma liga com memória de forma. (da Silva, 2003).

Ambas transformações estão relacionadas com as temperaturas críticas do material que são descritas:

- M_S : Temperatura de início da fase Martensita;
- M_F : Temperatura final da fase Martensita;
- A_S : Temperatura de início da fase de Austenita;
- A_F : temperatura final da fase de Austenita.

É importante destacar, como se pode observar na Figura 2.6 ,que existe uma histerese associada com a transformação de fase (transformação martensítica). As temperaturas de transformação são distintas para o aquecimento e resfriamento durante a transformação martensítica. A magnitude dessa histerese varia de acordo com a composição da liga e possuem valores típicos na faixa de 20°C a 40°C. (Miyazaki, Imai, Igo, & Otsuka, 1986).

Na Figura 2.7 é analisada a transformação unicamente pela temperatura, sem a aplicação de cargas. A transformação direta é dada pelo resfriamento da estrutura austenítica para a martensítica, resultando em uma grande formação de variantes macladas, porém sem uma mudança macroscópica.

Ao aquecer o material, a estrutura recupera a forma de Austenita anterior e é denominada transformação reversa de fase, sem uma mudança macroscópica.

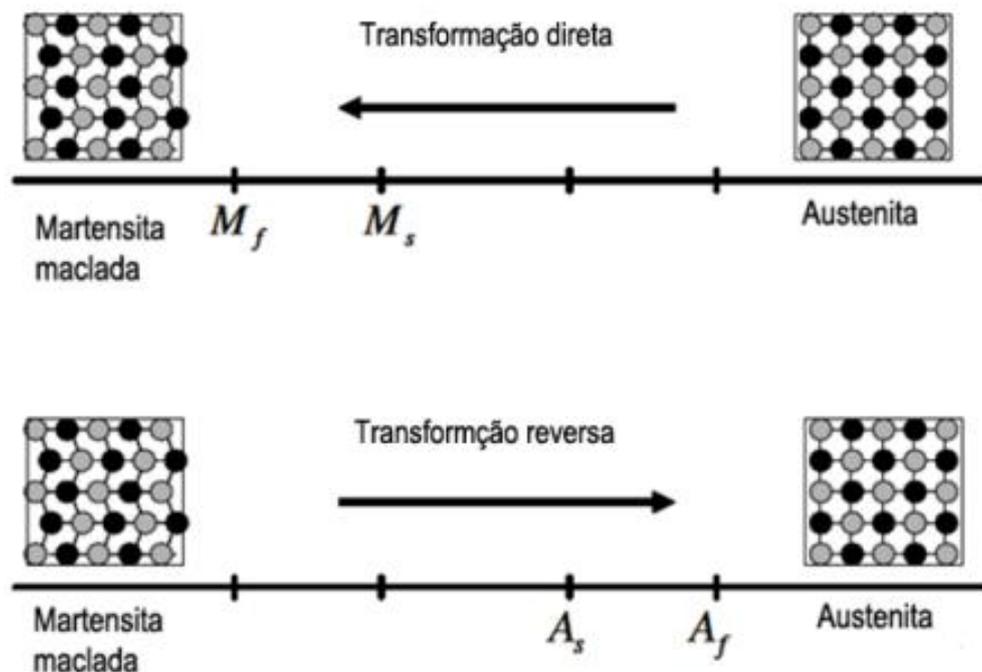


Figura 2.7. Transformação direta e reversa. (Lagoudas & Kumar, 2008).

Com a temperatura abaixo de M_f , com a fase de martensita maclada (twinned martensite), pode-se reorientar as variantes da martensita através da aplicação de uma carga, "demaclando" a estrutura, como pode ser visto na Figura 2.8. Este processo de reorientação altera macroscopicamente a forma do material, porém após a retirada da carga, o material mantém seu formato. (da Silva, 2003)

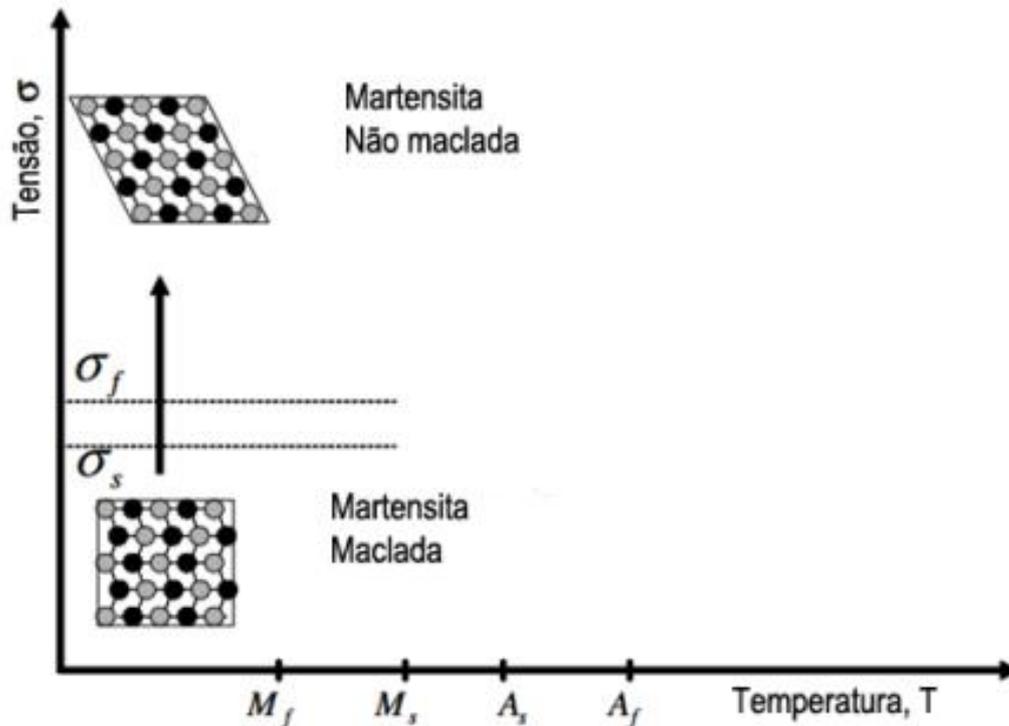


Figura 2.8. Transformação da estrutura com a aplicação de carga. (Lagoudas & Kumar, 2008).

2.2.1 QUASIPLASTICIDADE

As SMA's apresentam três tipos de comportamentos macroscópicos: Quasiplasticidade, Pseudoelasticidade e Efeito Memória de Forma.

A Quasiplasticidade é observada quando o material, em uma temperatura abaixo de M_F , é submetido a uma tensão suficientemente alta. Este material apresenta uma estrutura martensítica maclada e, após um comportamento elástico linear, apresentará, ao nível de tensão crítica correspondente ao material, uma reorientação de sua estrutura, denominada demaçada deformação plástica. Após uma deformação ainda maior, o material volta a apresentar um comportamento elástico e, após o descarregamento, o corpo mantém a configuração deformada.

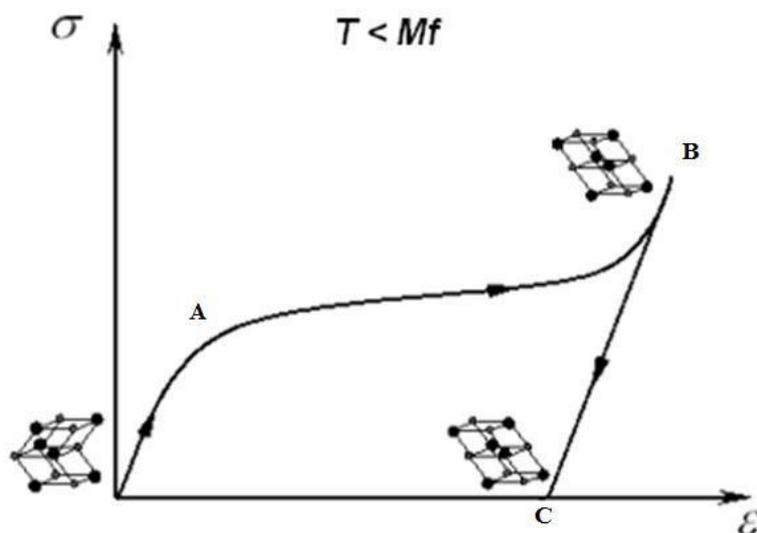


Figura 2.9. Curva tensão e deformação quasiplástica. (da Silva, 2003).

2.2.2 PSEUDOELASTICIDADE

A Pseudoelasticidade pode ser observada em temperaturas superiores a A_f e esta associado a transformação martensítica induzida por tensão. Ao aplicar uma tensão inferior a tensão crítica, o material se comporta de maneira elástica. A utilização de carga em uma temperatura acima de A_f leva a transformação da austenita em martensita e ao descarregar, o material retorna à sua fase de austenita e a deformação é recuperada pseudoelasticamente (Delaey, Krishnan, Tas, & Warlimont, 1974).

A Figura 2.10 apresenta o esquema do comportamento pseudoelástico para duas temperaturas $T_2 > T_1$. Pode-se observar o aparecimento de histerese ao retirar a carga, quando a liga retorna ao estado inicial. A energia envolvida em todo processo é então expressa pela área que delimita a região de histerese.

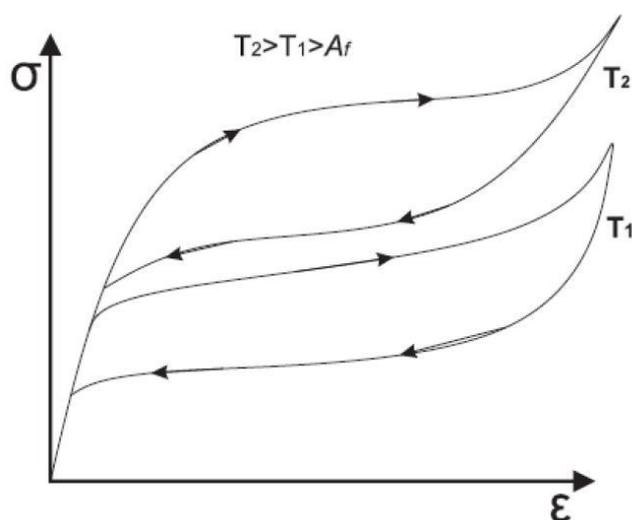


Figura 2.10. Curva tensão deformação pseudoelástica. (da Silva, 2003).

2.2.3 EFEITO MEMÓRIA DE FORMA

Pode-se definir Efeito Memória de Forma (Shape Memory Effect - SME) a capacidade de um material retornar a sua forma inicial. A utilização das ligas SMA se dá, entre outros fatores, pela grande capacidade de recuperação, sendo para ligas NiTi de 6 a 8% (Delaey, Krishnan, Tas, & Warlimont, 1974).

Quando uma liga SMA é deformada na fase martensitica maclada e então descarregada, ao sofrer um aquecimento acima de A_F (sem aplicação de carga) esta irá retornar a sua forma inicial.

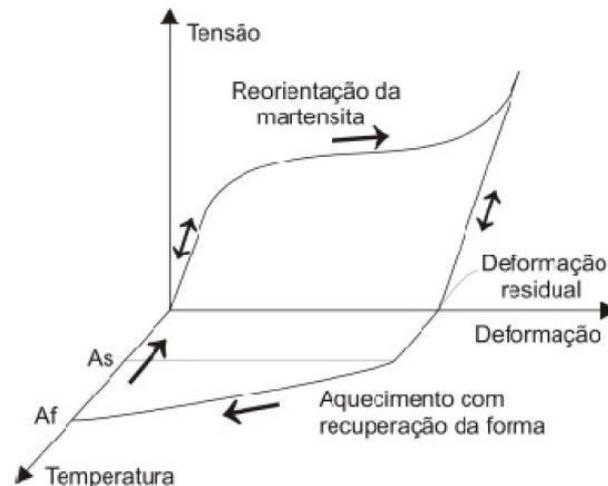


Figura 2.11. Curva do processo de memória de forma. (da Silva, 2003).

Com o aumento da temperatura e sem a aplicação de carga, a martensita demaçada fica instável e ao atingir a temperatura inicial de transformação de Austenita, A_s até A_f , ocorre o processo de transformação reversa, onde em uma temperatura acima de A_f , a martensita demaçada se torna em Austenita novamente, com o formato original, podendo ser observado o efeito memória de forma com uma mudança macroscópica do material.

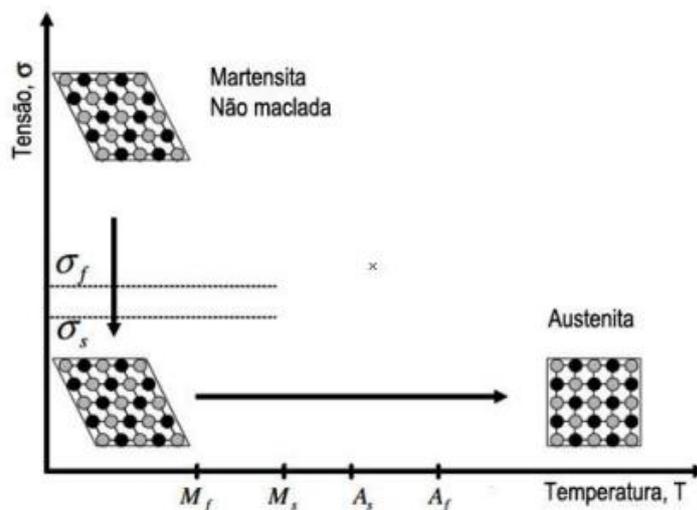


Figura 2.11. Transformação reversa com o efeito memória de forma. (Lagoudas & Kumar, 2008).

2.3 FADIGA FUNCIONAL DAS SMA's

Cronologicamente, os estudos sobre fadiga iniciaram por volta de 1828 com W. A. J. Albert na Alemanha realizando pesquisas sobre esforços cíclicos e falhas mecânicas em materiais. Na seqüência, em 1839 na França, J. V. Poncelet menciona pela primeira vez o termo *fadiga* em um trabalho sobre falhas por esforços cíclicos e em 1860 August Wohler estudando falhas nos trilhos de trem, observa que a resistência mecânica dos trilhos, sob carregamentos cíclicos era menor do que em um carregamento estático, com isso Wohler desenvolve a curva S-N, responsável por caracterizar a amplitude de tensão e o número de ciclos admissíveis para um material, curva esta que por homenagem leva também o nome de curva de Wohler. (Fuchs, Stephens, Ali, & R.R., 2000)

A fadiga de uma material estrutural é por definição a redução gradual de sua habilidade de suportar forças sobre uma aplicação cíclica de cargas, levando então à fratura através das fraturas microestruturais.

Segundo a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), órgão estadunidense responsável por produzir normas técnicas em diversas áreas da indústria, fadiga é definida como um:

"Processo progressivo e localizado de modificações estruturais permanentes, que ocorrem em um material submetido a condições que produzam tensões e deformações cíclicas que pode culminar em trincas ou fratura completa após um certo número de carregamentos cíclicos" (Fuchs, Stephens, Ali, & R.R., 2000).

Têm-se os seguintes termos,

- **Progressivo:** demonstra que o processo de fadiga ocorre durante um período de tempo;
- **Localizado:** indica que a fadiga se apresenta em pequenas áreas e não em todo o material;
- **Fratura:** significa que em uma zona crítica da estrutura, uma trinca cresce até um determinado ponto em que a seção transversal restante do material não suporta as tensões aplicadas e culmina em uma separação do material em duas partes ou mais.

Dependendo da maneira que as ligas com memória de forma são projetadas, elas podem operar em diferentes aplicações, sendo as mais utilizadas as aplicações nas quais são submetidas a esforços cíclicos. Através desses esforços, a diminuição das propriedades funcionais do material se tornam um objeto de pesquisa para se determinar a vida operacional de um certo componente, definindo dois tipos de conceitos: Fadiga estrutural e Fadiga funcional.

Fadiga estrutural é definida como uma consequência natural ao acúmulo de defeitos ou falhas e formação de trincas levando à ruptura do material.

Fadiga funcional de um material é um fenômeno que está relacionado à diminuição das propriedades funcionais de uma liga SMA, devido a um contínuo carregamento cíclico (térmico ou mecânico), por exemplo quando este é utilizado na função de atuador, ocasionando uma redução ou perda da capacidade de memória de forma/superelasticidade e demais propriedades intrínsecas de uma liga SMA. A fonte da fadiga em ligas com memória ocorre devido ao acúmulo de defeitos e variações estruturais, como a mudança de ordenamento entre as fases martensítica e austenítica. Os efeitos da ciclagem até a fadiga implicam diretamente em suas propriedades como temperatura de transformação e o efeito memória de forma.

Considerando algumas aplicações que utilizam ligas com memória de forma sob esforços cíclicos, para uma válvula térmica de SMA, por exemplo, a vida aceitável ou limite de fadiga é de 10^4 ciclos e de uma garra robótica também de SMA é de 10^6 ciclos (Eggeler, Hornbogen, Yawny, Heckmann, & Wagner, 2004).

Em (Miyazaki, Imai, Igo, & Otsuka, 1986), de acordo com a Figura 2.12, são analisados os efeitos da ciclagem térmica, entre M_S e A_F , sobre as temperaturas de transformação em ligas NiTi (com diferentes concentrações e tratamentos termomecânicos). Foi encontrado que para um determinado material com tratamento térmico do tipo recozido, com o aumento do número de ciclos, houve uma redução em M_S e com isso uma elevação na diferença $M_S - M_F$. Porém para ligas com teor de Ni superior a 50% e material envelhecido ou uma concentração de Ni inferior a 50% e material submetido a tratamento térmico prévio, não observaram alterações nas temperaturas de transformação com o aumento de ciclos.

Em (Bertacchini, Lagoudas, & Patoor, 2003), é analisada a caracterização de vida à fadiga de Ligas com Memória de Forma. O material SMA é ciclado pelo método de aquecimento resistivo, com as amostras sujeitas à tensão constante termicamente cicladas até a ruptura. Além do efeito puramente mecânico da ciclagem termomecânica, alguma corrosão e oxidação podem afetar as propriedades de fadiga do material SMA. Com uma superfície áspera ou levemente oxidada, o campo elétrico pode provocar uma corrosão local, diminuindo fortemente a vida em fadiga dos atuadores de Ligas com Memória de Forma.

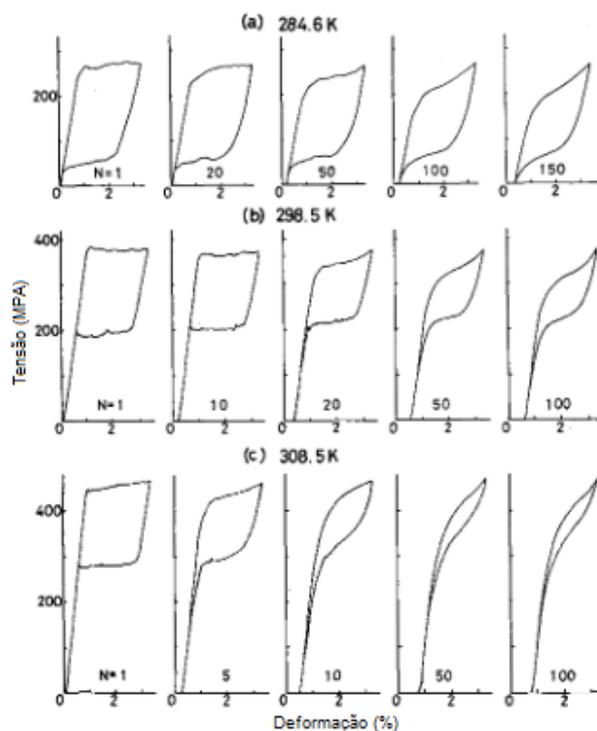


Figura 2.12. Curva Tensão x Deformação mostrando a ciclagem para diferentes temperaturas (a), (b) e (c). (Miyazaki, Imai, Igo, & Otsuka, 1986).

2.4 O AQUECIMENTO DE SMA's

Em (Miyazaki, Imai, Igo, & Otsuka, 1986) foram realizados testes experimentais para se verificar a capacidade de geração de tensão em ligas SMA de NiTi, analisando as propriedades de fadiga funcional e relaxação de tensão. Para isso, foi desenvolvida uma bancada experimental denominada *THERMIS*, capaz de realizar testes termomecânicos em ligas com memória de forma em cabos, tubos ou hastes. A bancada *THERMIS* é composta por um sistema mecânico/hidráulico programável (MTS), um módulo de ativação, responsável por aquecer o material, uma câmera infravermelho que registra a temperatura em específicos pontos no material e sensores termopar tipo J. Um problema encontrado foi controlar precisamente a temperatura no cabo, para isso foram utilizadas a câmera IR e os sensores termopar. Pelo fato do material se encontrar exposto a temperatura ambiente (plataforma aberta), a temperatura não se distribui uniformemente pelo material, sendo a temperatura interna alguns graus maiores que a temperatura externa registrada pelos termopares. Considerando que, em ambos testes, a temperatura foi acima de A_F , para controlar a temperatura do material foi utilizado como base a relação linear encontrada experimentalmente para a região austenítica: $T = 35,72 \cdot P + 47,73$, sendo P a potência em W aplicada e válida somente para cabos de 120mm de comprimento.

Em (Eggeler, Hornbogen, Yawny, Heckmann, & Wagner, 2004), são realizados alguns experimentos para se avaliar as fadigas funcionais e estruturais da liga NiTi. Em um dos experimentos é observado a fadiga funcional em uma mola feita com fios de 49,5% de NiTi através de uma carga de 3N. Tais fios foram trabalhados a frio ($T < M_F$) e então conformados helicoidalmente, e logo após um tratamento térmico por 600s à 400°C. Na temperatura ambiente, aproximadamente 20°C, o material se apresenta na fase Martensítica e é então aplicada uma carga à sua extremidade x_M . A mola é aquecida por efeito Joule, através da aplicação de uma corrente de 4.8A e uma tensão de 5V, até atingir uma temperatura acima de A_F . Com isso a mola contrai e atinge uma posição x_A . Quando a mola se torna estável, com temperatura acima de A_F , a corrente é desligada e a mola volta ao seu estado inicial. Este ciclo térmico é realizado 1000 vezes. Ao final do experimento, observou-se que durante os primeiros 100 ciclos, o material sofre uma deformação plástica irreversível em ambas as fases: a mola aumenta e x_M e x_A diminuem, sendo que o valor de Δ aumenta pois a redução de x_M é maior que a redução de x_A .

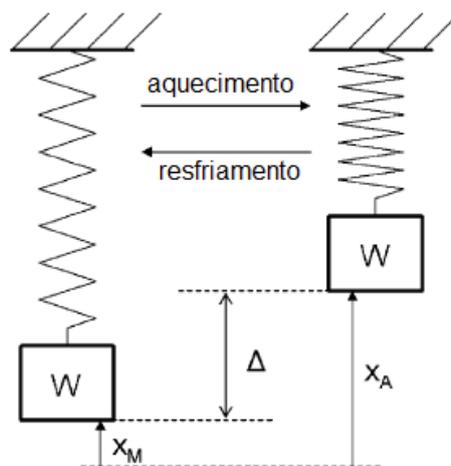


Figura 2.13. Esquemático do experimento de Fadiga Funcional.(Eggeler, Hornbogen, Yawny, Heckmann, & Wagner, 2004).

2.5 CURVA S-N

A curva S-N ou curva de Wohler indica a tensão máxima que um determinado material suporta, não ocorrendo uma falha (fadiga estrutural ou funcional), em função do número de ciclos de carregamento que este material é submetido.

Em 1860 Wohler desenvolveu um método para analisar a fadiga através de curvas, com base em uma série de ensaios sob o qual materiais na forma de corpos-de-prova eram submetidos à carregamentos cíclicos com tensões altas, chegando a 2/3 do valor limite de resistência a tração. O valor de tensão era então progressivamente reduzido, sendo possível

a construção de um gráfico em que no eixo Y tem-se a tensão 'S' versus o número de ciclos 'N' até a ruptura do material, na forma de logaritmo no eixo X.

Nas Figura 2.14 e Figura 2.15 é possível observar um exemplo de carregamento cíclico através do qual será possível obter uma curva S-N. Neste carregamento a tensão apresenta uma forma senoidal e valor médio não-nulo.

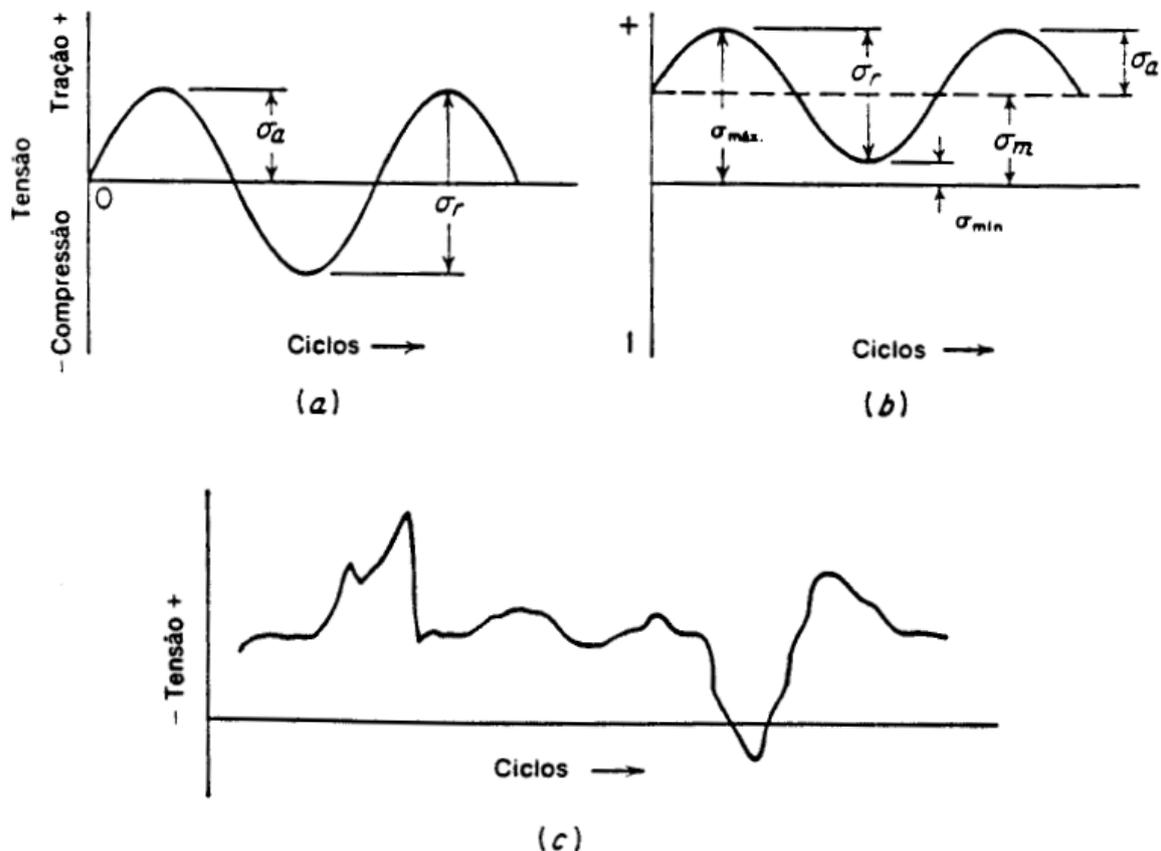


Figura 2.14. Ciclos de tensão típicos em fadiga. (a) Alternada (b) Flutuante e (c) Aleatório. (Fuchs, Stephens, Ali, & R.R., 2000).

Podem ser observados dois tipos de comportamentos em curvas S-N, visualizado na Figura 2.16. É possível destacar que quanto maior for a intensidade da tensão, menor será o número de ciclos que o corpo de prova suportará até a sua ruptura. Para determinadas ligas ferrosas e de titânio, a partir de um valor de tensão 'S', a curva se torna horizontal, chegando no que denominado *plateau effect* da curva S-N. Este valor limite de tensão é chamado de Limite de Resistência à Fadiga, informando que abaixo deste valor de tensão, uma falha por fadiga não ocorrerá.

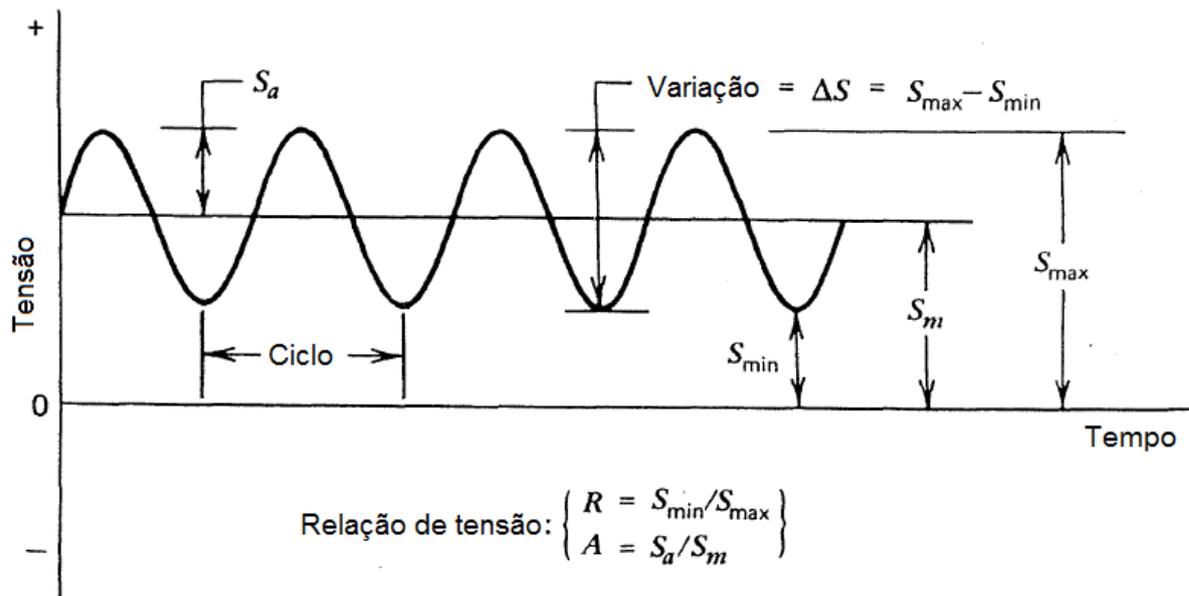


Figura 2.15. Gráfico de um carregamento cíclico com tensão flutuante. (Fuchs, Stephens, Ali, & R.R., 2000).

Já para as ligas não-ferrosas (Alumínio, Cobre, Magnésio), a curva S-N continua o processo de decaimento com o número de ciclos de carregamento. Nestes materiais a falha por fadiga ocorrerá independentemente do nível de tensão aplicada, sendo com isso definido que o limite de resistência à fadiga será o valor de tensão que o material pode suportar para pelo menos 10^7 ciclos de fadiga. (Fuchs, Stephens, Ali, & R.R., 2000).

Denominam-se dois termos para classificar os tipos de fadiga, de alto ou baixo ciclo. A fadiga de alto ciclo é dada quando o número de ciclos até a fratura final apresenta um valor alto ($N_F > 10^3$), em contrapartida para valores de ciclos menores que $N_F < 10^3$ a fadiga é dita ser de baixo ciclo.

A resistência à fadiga está diretamente relacionada com a estrutura interna da liga com memória de forma, a presença de inclusões, segregações de impurezas para os contornos de grão e uma baixa qualidade superficial são fatores que influenciam diminuindo esta propriedade.

Como pode ser visto na Figura 2.16, o número de ciclos para a ocorrência de uma falha é representado na escala logarítmica, tal escolha se dá pelo fato de que este número de ciclos varia rapidamente podendo mudar significativamente sua ordem de magnitude de acordo com o nível de tensão aplicado.

Para um gráfico em que o número de ciclos está na escala logarítmica é possível aproximar os dados da curva S-N para uma reta, com C e D constantes de ajuste, através da Eq. (1).

$$\sigma_a = C + D \log N_f \quad . \quad (1)$$

A curva S-N apresenta em sua maioria resultados qualitativos, sendo difícil a comparação de resultados entre tais curvas, pois fatores como a relação R entre tensão mínima e máxima do ciclo de tensão ou mesmo os testes de fadiga por tensão ou deformação dificultam esse processo.

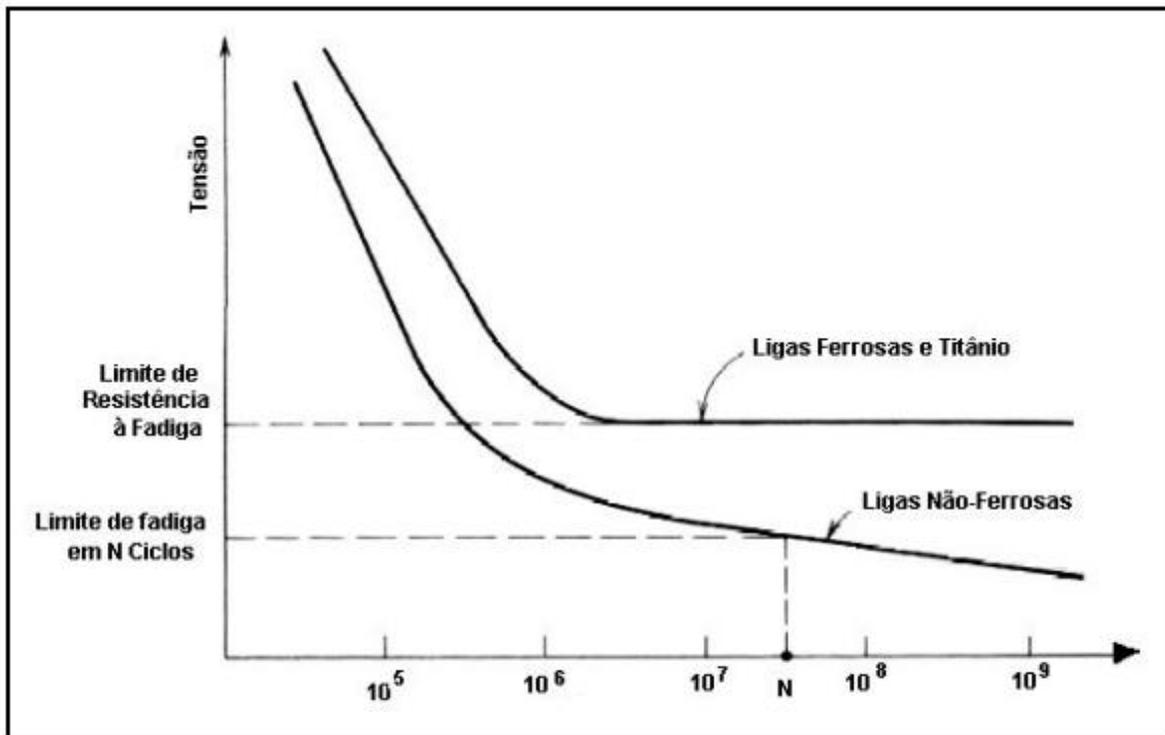


Figura 2.16. Comportamento típico de uma Curva S-N. (Alvarenga Junior, 2006).

CAPÍTULO 3 - CONCEPÇÃO E PROJETO

Neste capítulo são apresentados detalhes sobre a concepção da bancada de testes, todas as especificações técnicas necessárias, o projeto mecânico/estrutural criado e o projeto eletroeletrônico.

3.1 ESPECIFICAÇÃO

O desenvolvimento da bancada de testes envolve alguns requisitos que devem ser seguidos visando uma maior praticidade. A bancada deve ser de certo modo portátil, podendo ser instalada em determinado ambiente e caso necessário ser de fácil locomoção. É recomendável que o material de sua construção seja leve, para isso foi escolhido o Alumínio do tipo estrutural, por possuir características que facilitam a sua montagem.

A bancada deve ser de fácil manipulação pelo usuário, possuindo como funções fundamentais a realização de ciclos de aquecimento do fio de SMA e armazenamento dos dados relativo a todo o processo para posterior verificação pelo usuário.

Na Fig. 3.1 é apresentado um modelo do sistema com os principais elementos como sensores e unidades de alimentação, processamento e armazenamento e visualização de dados.

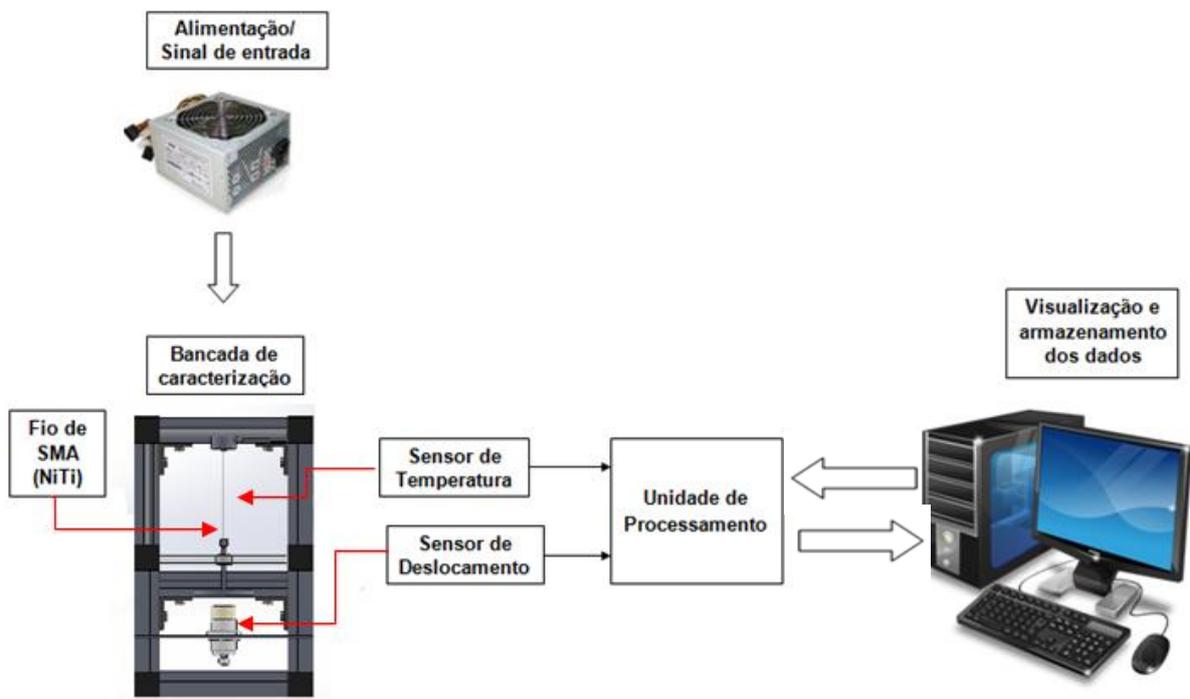


Figura 3.1. Modelo da bancada.

3.2 PROJETO MECÂNICO ESTRUTURAL

A concepção do projeto da estrutura da bancada foi realizada utilizando o software SolidWorks®. As dimensões da estrutura como um todo foram definidas como sendo:

- Comprimento: 500mm;
- Largura: 230 mm;
- Altura: 440mm;

Toda a estrutura é constituída em Alumínio do tipo estrutural, com as vantagens de ser leve, de fácil manuseio e resistente à oxidação e possui perfil do tipo 30x30mm. Devido ao seu baixo peso, ele se torna um excelente material não só para estruturas móveis como também para estruturas estáticas, onde o peso próprio tem fundamental importância nas cargas totais do projeto.

A Tabela 3-1 apresenta os detalhes sobre os perfis presentes no projeto. Ao todo através desta concepção, será necessário um comprimento de perfil de 2880mm.

Tabela 3-1. Características dimensionais da estrutura.

Quantidade	Descrição	Tipo/Dimensão (mm)
2	Perfil de Alumínio	30x30x500
2	Perfil de Alumínio	30x30x300
8	Perfil de Alumínio	30x30x150
2	Perfil de Alumínio	30x30x40
12	Cantoneira	30x30
28	Parafuso sextavado	M6
28	Porca quadrada	M6
2	Chapa de Acrílico	10x130x160
1	Chapa de Acrílico	10x130x130

Na Figura 3.2 pode ser ver alguns exemplos de perfis de Alumínio do tipo estrutural.

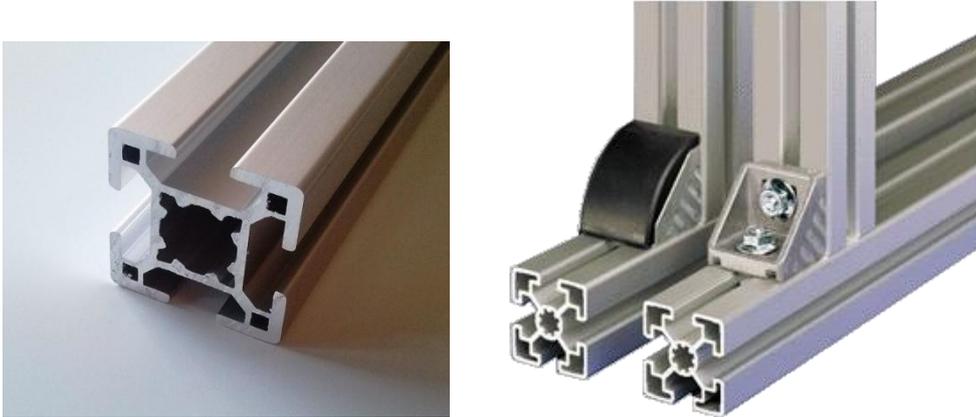


Figura 3.2. Alumínio do tipo estrutural.

Nas Figura 3.3 e Figura 3.4, pode se ter uma visão do modelo projetado através do software SolidWorks.

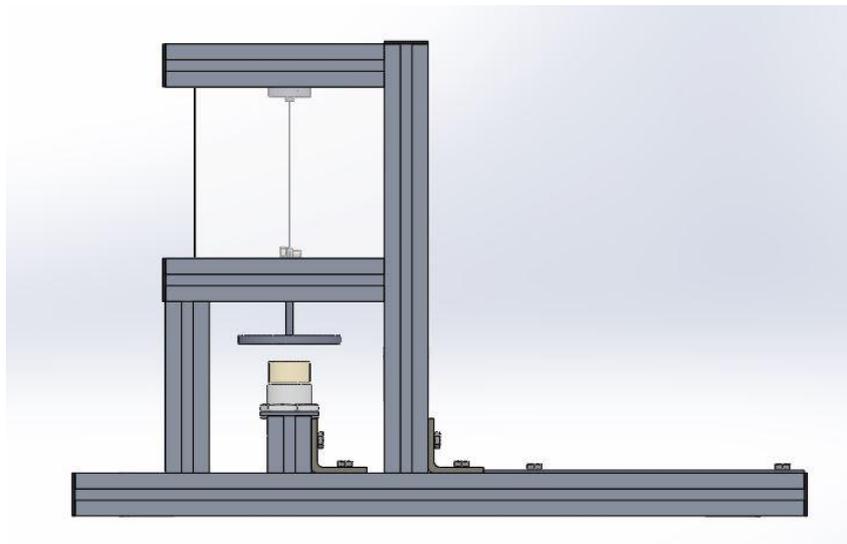
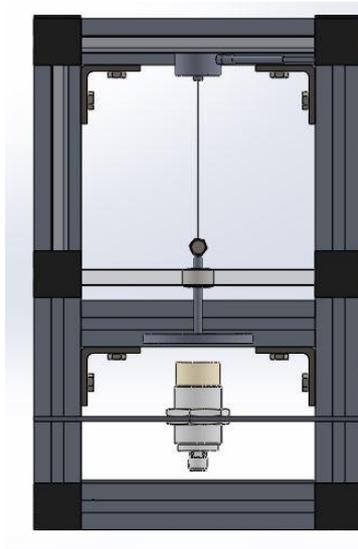


Figura 3.3. Vistas Frontal e lateral esquerda da estrutura.

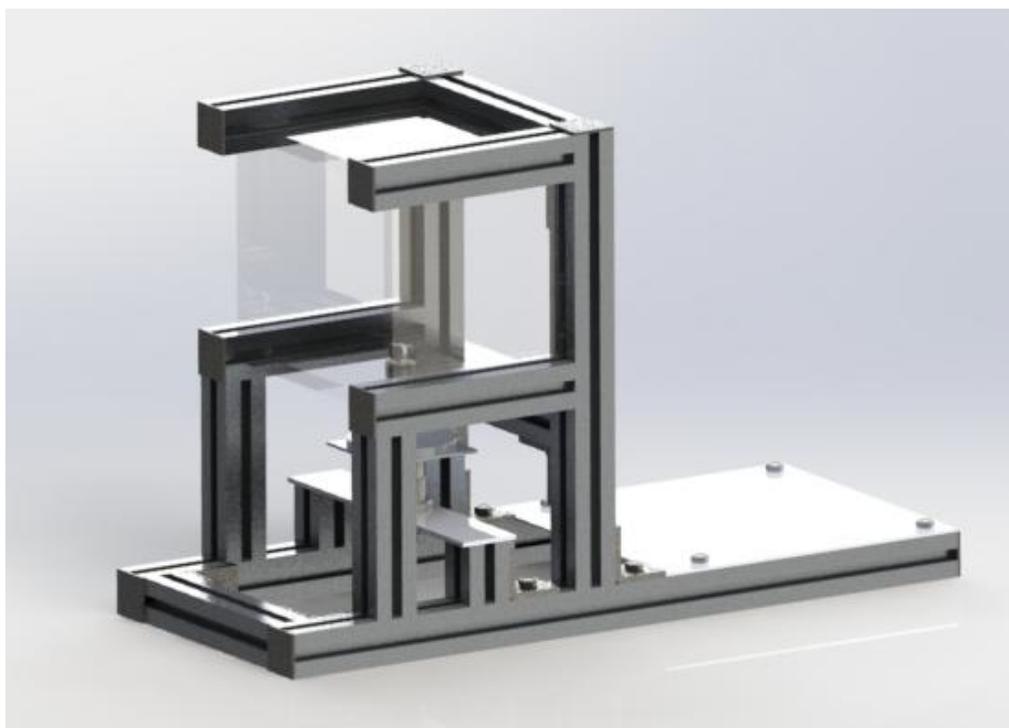


Figura 3.4. Esquemático da estrutura da bancada em CAD 3D.

Como pode ser visto na Figura 3.4, a bancada apresenta elementos em placas de acrílico. Tal escolha foi assim idealizada pois, além de atuar como apoio e sustentação para alguns perfis e para o fio de SMA, o acrílico possui propriedades importantes como rigidez e leveza e também, esteticamente, a sua transparência. Na Tabela 3-2 são apresentadas algumas propriedades relacionadas ao acrílico.

Tabela 3-2. Propriedades Gerais de Chapas Acrílicas. (Vick, 2013).

Propriedades		Valor	Unidade
Física	Densidade	1,19	g/cm ³
Mecânica	Resistência à tração	630	Kgf/cm ²
	Módulo de elasticidade	32800	Kgf/cm ²
	Resistência à flexão	1120	Kgf/cm ²
	Resistência a impacto	1,81	Kgf.cm/cm
	Dureza Rockwell	99,6	Escala M
Térmica	Temperatura de deflexão térmica (HDT)	101	°C
	Coeficiente Linear de Dilatação Térmica	50,7x10 ⁻⁶	°C

As chapas acrílicas possuem até 92% de transparência, superando grande parte dos materiais utilizados na construção civil que apresentam esse aspecto. São aproximadamente 10 vezes mais resistentes ao impacto que um vidro de mesma espessura e é, na mesma espessura, 50% mais leve que o vidro. (Vick, 2013).

É utilizado em diversas aplicações como, por exemplo: luminárias, box para banho, maquetes arquitetônicas, dispositivos para laboratório, prateleiras entre outras.

3.3 PROJETO ELETRÔNICO

Como apresentado na Tabela 2-1, a resistividade da liga NiTi varia de acordo com estrutura interna do material, sendo martensita ou austenita. Estes valores são novamente destacados na Tabela 3-3.

Tabela 3-3. Resistividade de uma Liga NiTi.

Propriedade	Martensita (M)	Austenita (A)
Resistividade	$\sim 80 \cdot 10^{-6} \text{ohm} \cdot \text{cm}$	$\sim 100 \cdot 10^{-6} \text{ohm} \cdot \text{cm}$

Para o projeto do circuito eletrônico responsável pelo controle de temperatura do fio de SMA, é de fundamental importância conhecer o valor da resistência elétrica do material pelo qual percorrerá uma corrente elétrica.

Para o cálculo da resistência elétrica, assumimos valores para o fio de SMA com as seguintes dimensões:

- comprimento: 120mm;
- diâmetro: 0,15mm;

Temos a seguinte equação para o cálculo da resistência elétrica:

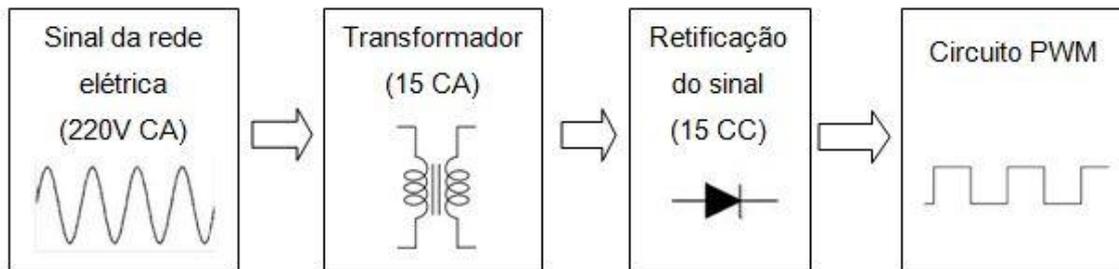
$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (2)$$

Onde ρ representa a resistividade do material, l o comprimento e A a área da seção transversal. Considerando os valores apresentados acima, temos os seguintes valores de resistência:

- Fase martensítica: 5,4 Ω ;
- Fase austenítica: 6,79 Ω .

A ideia fundamental é realizar a conversão do sinal de tensão da rede elétrica, 220V 60Hz, em um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) de amplitude de 1V.

Para tal é necessário realizar os seguintes passos:



A tensão fornecida pela concessionária de energia elétrica é alternada, porém em muitos dispositivos eletrônicos é requerida uma tensão contínua para o seu funcionamento. É necessário retificar o sinal, ou seja, através de circuitos retificadores com elementos semicondutores (diodos ou tiristores) a corrente alternada será convertida em corrente contínua.

Existem dois tipos de retificadores: Retificador de meia-onda e retificador de onda completa.

3.3.1 RETIFICADOR DE MEIA-ONDA

O retificador de meia onda, permite que apenas um semi-ciclo da onda circule pela carga. Na construção do circuito eletrônico desse modelo de retificador é necessário apenas 1 diodo, que tem a função de conduzir em um semi ciclo a corrente elétrica, quando estiver polarizado diretamente. A Figura 3.6 apresenta o diagrama esquemático do circuito elétrico com uma carga resistiva (L) e ao lado as formas de onda obtidas em cada elemento do circuito. V_1 representa a tensão de entrada, V_2 é a tensão de entrada no circuito eletrônico e V_L é a tensão aplicada sobre a carga L.

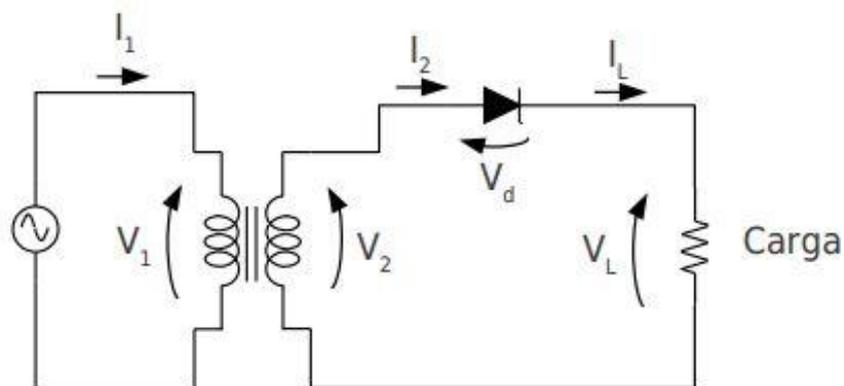


Figura 3.5.a. Diagrama esquemático do circuito

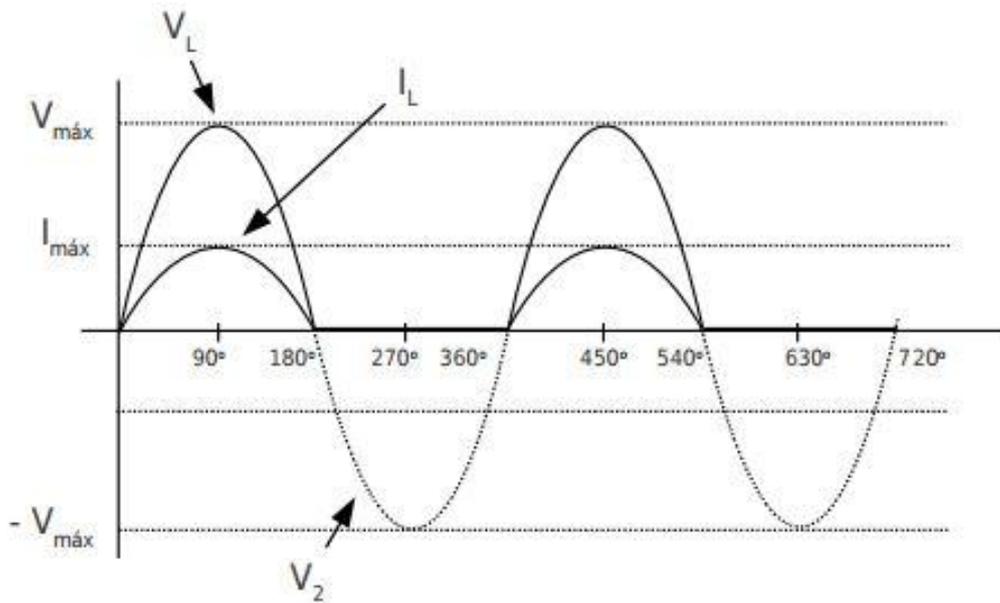


Figura 3.6.b. Formas de onda relacionadas ao circuito em (a).

O valor da tensão média na saída do retificador em meia onda é:

$$V_{med} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \text{sen}(2\pi ft) dt \rightarrow V_{med} = \frac{V_m}{\pi} \quad (3)$$

Já a tensão eficaz é dada por:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} [V_m \text{sen}(2\pi ft)]^2 dt} \rightarrow V_{ef} = \frac{V_m}{2} \quad (4)$$

3.3.2 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA

O retificador de onda completa com 4 diodos, também conhecido por retificador em ponte, é o que encontra uma maior aplicação prática pois resolve o problema de falta de eficiência do circuito anterior.

Consiste de 4 diodos montados de acordo com a Figura 3.7. Esse circuito realiza a retificação completa do sinal, não necessitando de modificações na ligação do transformador.

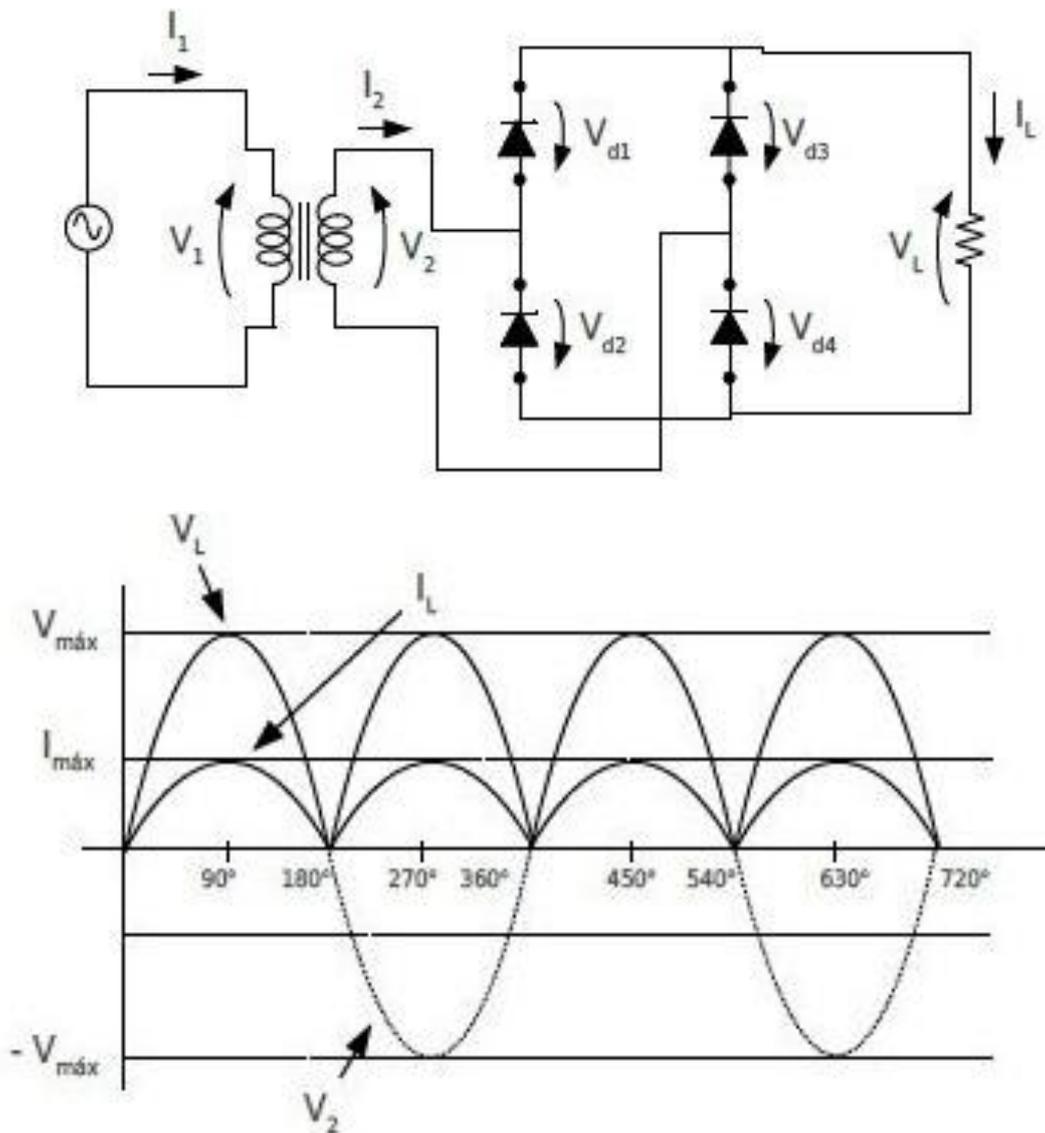


Figura 3.7. Esquemático do circuito elétrico do retificador em ponte e ao lado as formas de onda relacionadas.

De forma semelhante com as equações para o retificador em meia ponte, para o retificador em onda completa têm-se as seguintes equações para a tensão média e eficaz:

$$V_{med} = \frac{2V_m}{\pi} , \quad (5)$$

$$V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} . \quad (6)$$

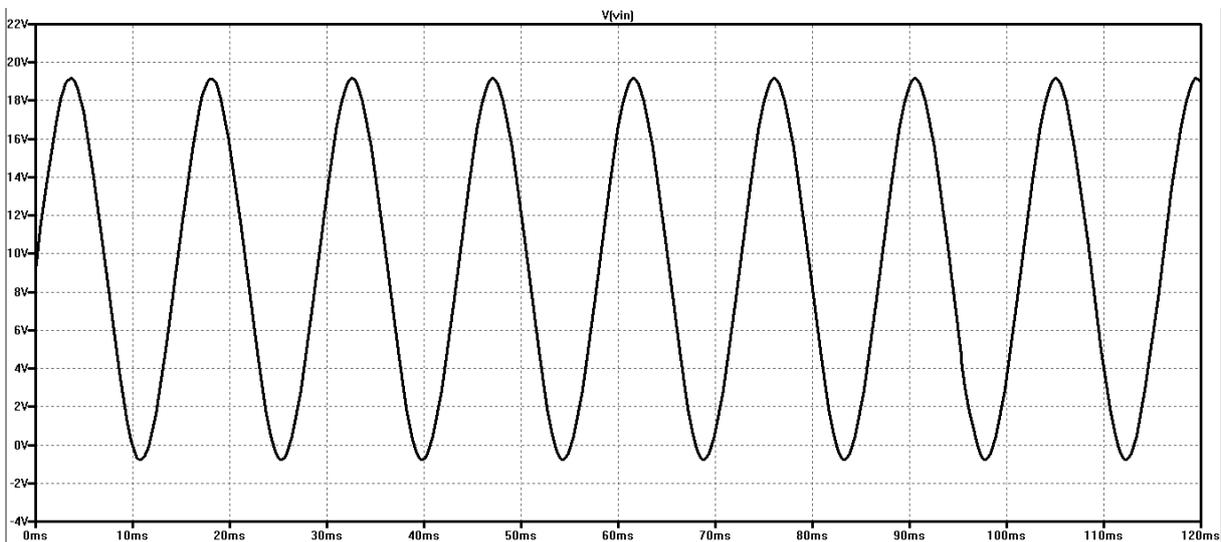
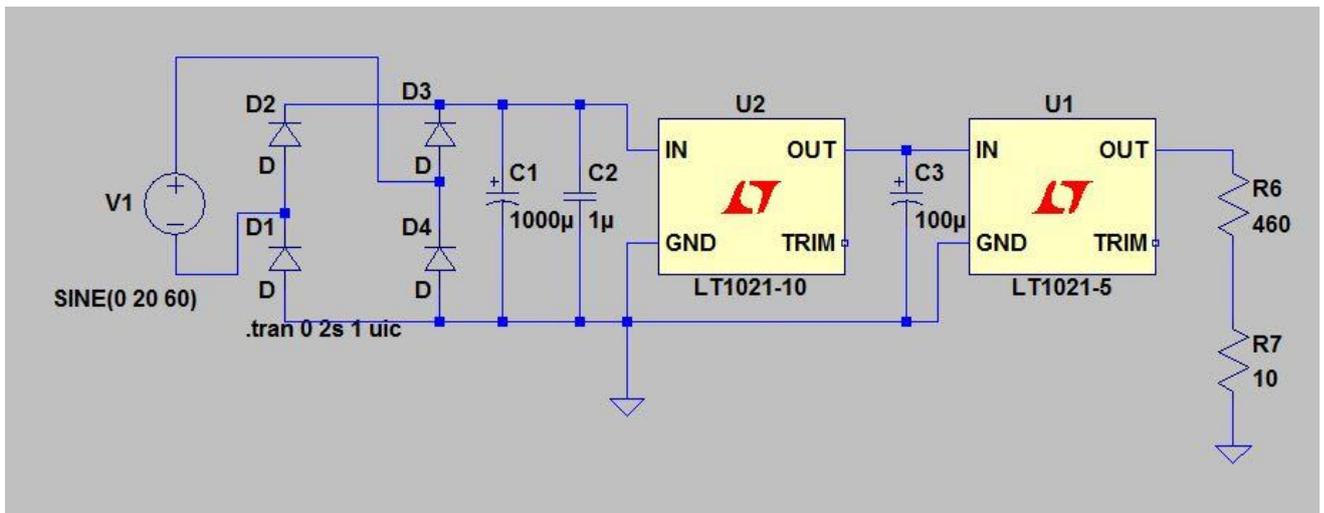


Figura 3.8. Diagrama esquemático do circuito retificador e sinal de saída.

3.3.3 CIRCUITO PWM

Com a necessidade de se controlar a tensão e também a potência fornecida aos dispositivos eletrônicos, nos anos 60 foi desenvolvida uma técnica eficaz capaz de controlar a carga desejada. Com isso surgiu a modulação por PWM, em substituição à técnicas on-off, modulação por frequência ou até mesmo técnicas que utilizavam cargas em série.

PWM do inglês: *Pulse Width Modulation* ou Modulação por Largura de Pulso, ou seja, através da largura do pulso de uma onda quadrada é possível o controle de potência ou velocidade. A técnica PWM é empregada em diversas áreas da eletrônica, talvez a mais comum seja a utilização em fontes chaveadas mas também pode ser utilizada para controle

de velocidade de motores, controle de luminosidade, controle de servo-motores e diversas outras aplicações.

Considerando uma onda quadrada, para o funcionamento correto do PWM devemos variar a largura de pulsos da onda, para efeito de cálculo dois parâmetros são necessários o período e a largura do pulso propriamente dita chamada de *Duty-Cycle*, definida em porcentagem segundo a Eq. (7):

$$DutyCycle = 100 \times \frac{Largura\ do\ Pulso}{Período} \quad (7)$$

Onde *Duty-Cycle* possui o valor em %, Largura de pulso representa o tempo em que o sinal permanece ligado e período é o tempo de um ciclo da onda.

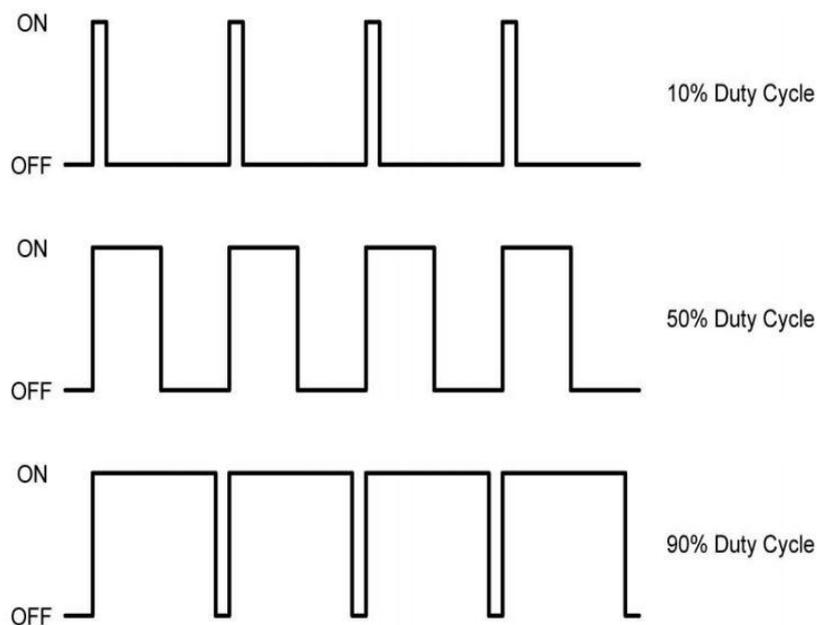


Figura 3.9. Exemplos de algumas formas de onda com diferentes *Duty Cycles*.

A maneira mais comum de se gerar o sinal de PWM é através de um microcontrolador que em sua grande maioria já possui pinos e instruções específicas para tal, porém também é possível gerar um sinal de PWM utilizando circuitos que não são microcontrolados, utilizando osciladores como o LM555.

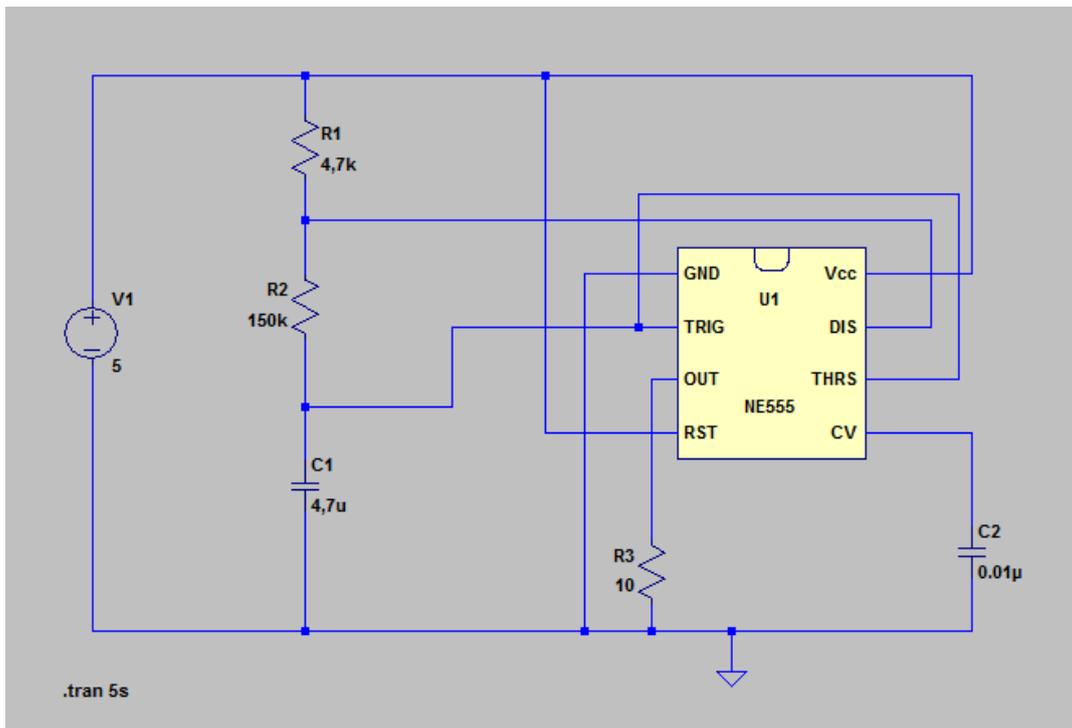


Figura 3.10. Circuito eletrônico para o PWM.

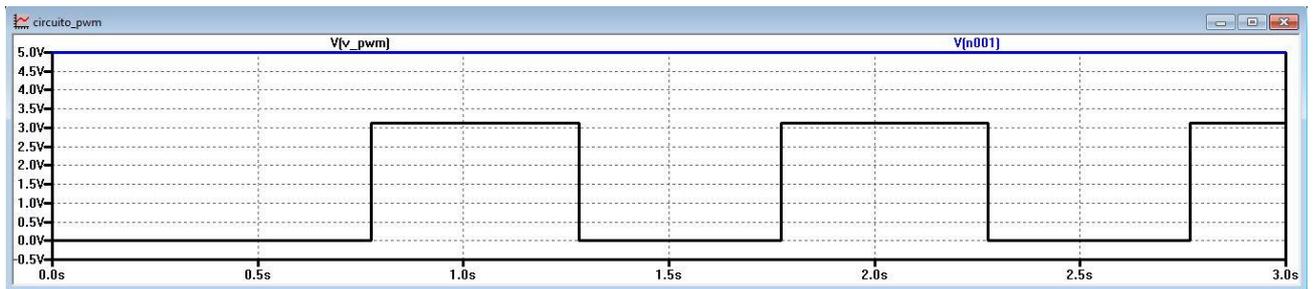


Figura 3.11. Forma de onda referente ao PWM.

Através da análise do circuito presente na Figura 3.10 é possível obter as seguintes equações:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R1 + R2 * 2) * C1} ,$$

$$TL(Time\ low) = 0.693 * R2 * C1 ,$$

$$TH(Time\ high) = 0.693 * (R1 + R2) * C1 ,$$

$$Duty\ Cycle = \frac{R1 + R2}{R1 + 2 * R2} .$$

Tem-se que, para um *Duty Cycle* de 50% e tempo de ativação de 1 segundo, utilizando componentes com valores comerciais:

- $R1 = 4,7 \text{ k}\Omega$;
- $R2 = 150 \text{ k}\Omega$;
- $C1 = 4,7 \text{ }\mu\text{F}$;
- $C2 = 0,01 \text{ }\mu\text{F}$;
- $R3(\text{Carga}) = 10\Omega$.

Para o valor da carga (fio de memória de forma) assume-se uma resistência de 10Ω , como apresentado através da resistividade do material na Tabela 3-3.

O desenvolvimento do projeto eletrônico visto na Figura 3.10 foi realizado utilizando o *software* de simulação LTSpice IV®.

3.4 SENSORES

Os sensores podem ser classificados com um tipo de transdutor. Um transdutor é um componente que transforma um tipo de energia em outro. Existem diversos tipos de sensores utilizados em equipamentos, desde dispositivos de acionamento momentâneo do tipo chave mecânica até transdutores especiais que convertem alguma grandeza física em grandeza elétrica como, por exemplo, uma tensão que posteriormente será processada por um circuito eletrônico. (Thomazini & Pedro Urbano, 2012)

Os sensores podem ser utilizados para realização de medições de temperatura, pressão, umidade, aceleração, nível, deslocamento, força, etc.

A bancada que realizará os testes afim de se obter uma Curva S-N de uma material SMA necessita, como forma de captação de dados, a utilização de sensores. Uma análise para se definir quais parâmetros do modelo são necessários aferir é fundamental para se atingir os objetivos propostos.

Tais parâmetros são: A carga aplicada ao fio de memória de forma, o valor de deslocamento do fio quando sob aquecimento e resfriamento e o valor da temperatura do fio.

Na Figura 3.12 é apresentado o posicionamento dos sensores na bancada de caracterização. Os sensores serão descritos na próxima sessão e compreendem de acordo com seguinte legenda:

1. Célula de Carga;
2. Sensor de Posicionamento Indutivo;
3. Sensor Infra-Vermelho de Temperatura.

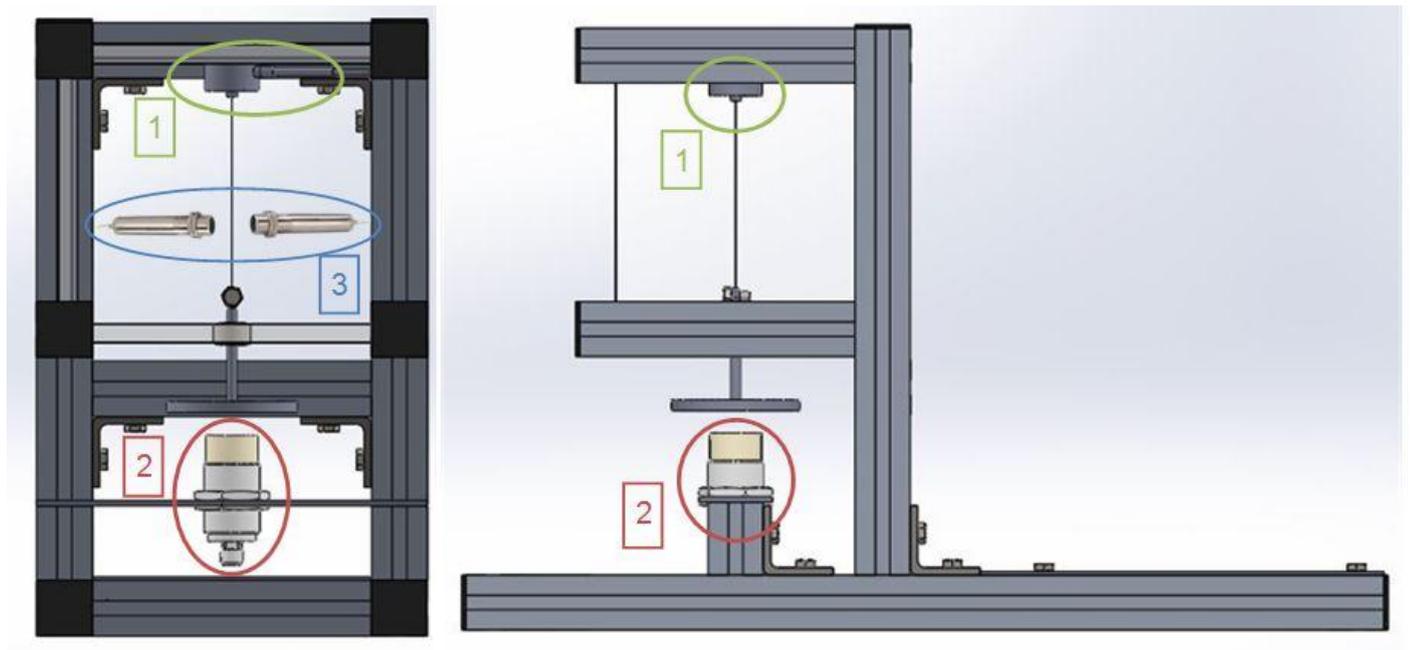


Figura 3.12. Indicação do posicionamento dos sensores na bancada.

3.4.1 CELULA DE CARGA

Uma célula de carga é um transdutor de força, com a função de converter uma grandeza física (força) em um sinal elétrico. Utilizado em diversas aplicações onde é necessário uma medição de força.

A célula de carga utilizada no projeto é um sensor do tipo *strain gauge*, ou seja, baseia-se na variação da resistência ôhmica de um sensor denominado extensômetro, quando submetido a uma deformação. Na Figura 3.13, tem-se dois tipos de sensores do tipo *strain gauges*.

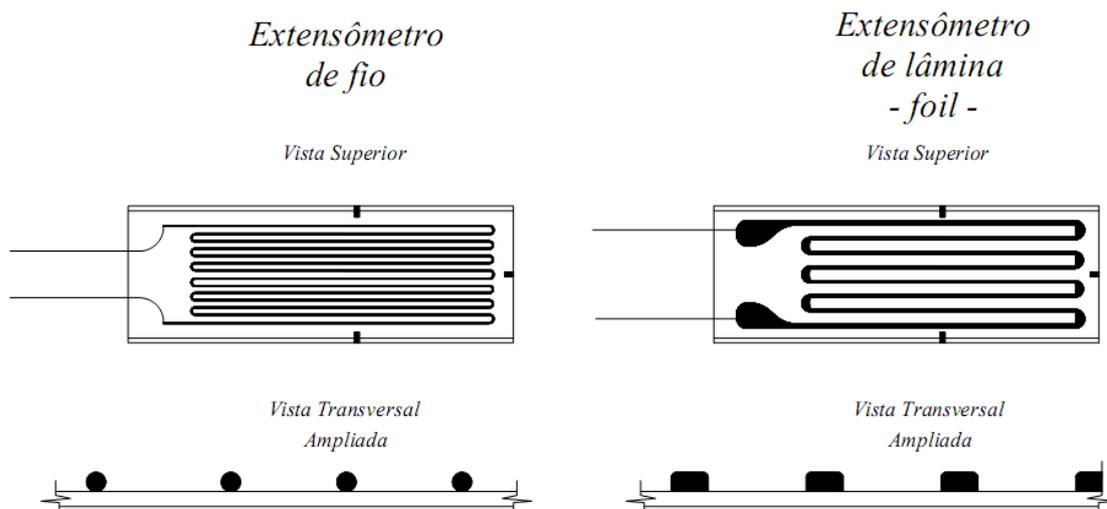


Figura 3.13. Exemplos de extensômetros (*strain gauges*).

Utiliza-se comumente em células de carga quatro extensômetros ligados entre si conforme uma ponte, denominada *Ponte de Wheatstone*, conforme Figura 3.14. Tal ponte tem a função de amplificar os sinais obtidos nas captações, permitindo uma variação ôhmica mais exata.

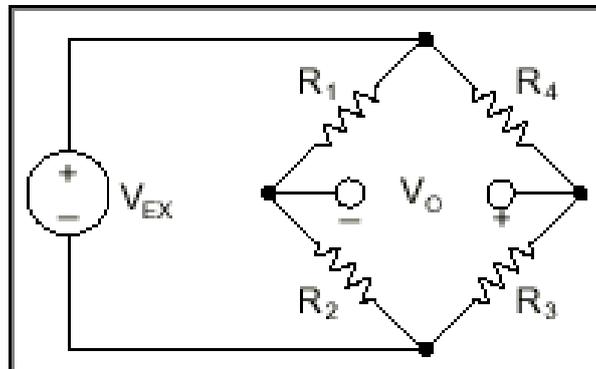


Figura 3.14. Representação de uma *Ponte de Wheatstone*.

De acordo com o circuito da *Ponte de Wheatstone*, o valor da tensão na saída V_O da ponte, a partir de uma tensão de excitação V_{EX} , será:

$$V_O = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \cdot V_{EX} \cdot$$

A configuração na qual são utilizados 4 *strain gauges*, é denominada ponte completa de *Wheatstone*, o que significa que todos os braços resistivos do circuito são ativos. O uso de uma configuração de ponte completa aumenta muito a sensibilidade do circuito às variações de deformação, oferecendo medições mais exatas.

A partir da análise das características necessárias ao bom funcionamento do sistema, chegou-se ao sensor selecionado para o projeto da bancada, cujo modelo é o DLRP L002 da empresa *Baumer*TM por apresentar as seguintes características:

Tabela 3-4. Propriedades físicas do modelo DLRP L002.

Sensibilidade ($\pm 15\%$)	2mV/V
Faixa de medição	0,5 a 10kN
Tensão de excitação	20 a 30 VCC
Corrente de excitação	2 a 20mA



Figura 3.15. Célula de Carga com *strain gauges* da Baumer™.

A montagem da célula de carga se dará de tal forma que o fio de SMA possa ser conectado ao sensor através de um parafuso com olhal na célula de carga, conforme pode ser visto na Figura 3.16.

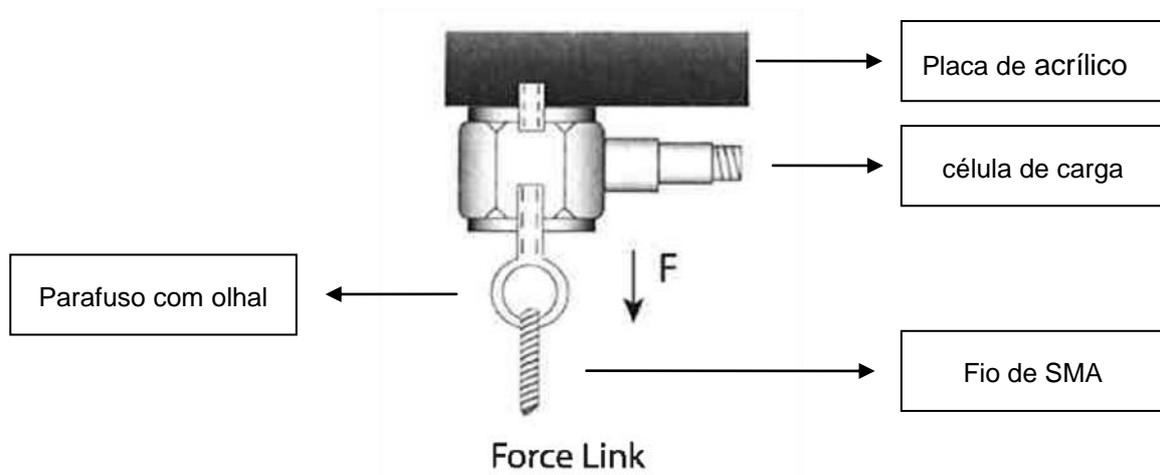


Figura 3.16. Desenho Esquemático da célula de carga.

Para operar este sensor é necessário alimentá-lo com uma tensão de 24-27 V CC e uma corrente constante de 2 a 20 mA. Na Figura 3.17 é possível visualizar o circuito esquemático padrão dos sensores do tipo *strain gauges*.

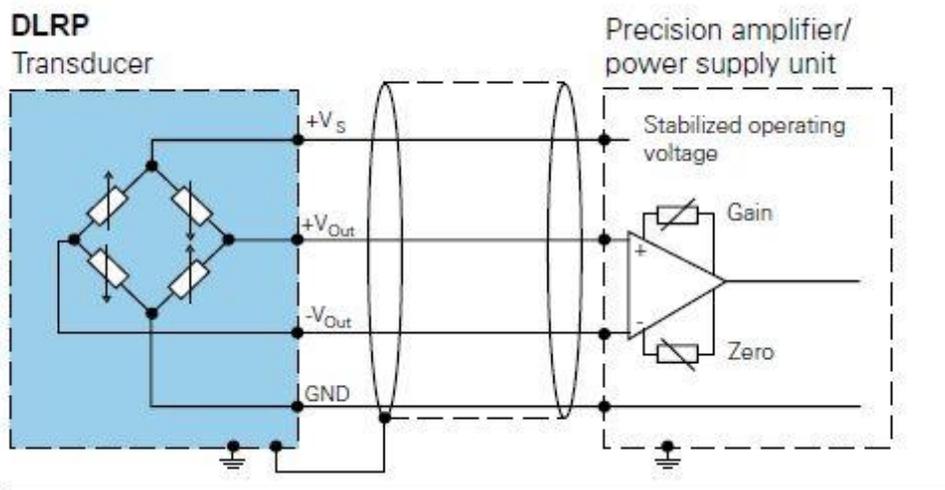


Figura 3.17. Circuito esquemático do sensor célula de carga.

3.4.2 SENSOR DE POSIÇÃO

Os sensores de deslocamento ou de posição estão presentes em inúmeros processos industriais ou comerciais, sendo utilizados quando se deseja controlar a presença e/ou a posição de um objeto em uma linha de produção. Em especial os sensores de efeito indutivo ou capacitivo permitem a detecção sem contato e a medição linear de pequenos deslocamentos (aproximadamente 0 até 30mm).

3.4.2.1 Sensor de posição capacitivo

Os sensores do tipo capacitivo se assemelham aos de proximidade indutivos, sendo a diferença exatamente no princípio de funcionamento, o qual baseia-se na mudança da capacitância da placa detectora localizada na região denominada face sensível.

Utilizados para a detecção de objetos de natureza metálica ou não, tais como madeira, papelão, cerâmica, alumínio, entre outros.

3.4.2.2 Sensor de posição indutivo

Os sensores de posição do tipo indutivo funcionam gerando um campo eletromagnético de alta frequência à sua frente, que é desenvolvido por uma bobina ressonante instalada na face sensora.

É constituído de uma bobina sobre um núcleo de ferrite, um oscilador, um circuito de disparo de sinais de comando e um circuito de saída. Quando um objeto (metálico ferroso ou não-ferroso) penetra no campo, a perda de energia ocasionada pelas correntes de fuga no objeto resulta em uma amplitude de oscilação menor. O circuito de disparo então reconhece esta mudança específica de amplitude e, dependendo da magnitude da mudança, gera um sinal de comando para o circuito de saída.



Figura 3.18. Sensor de posição indutivo.

3.4.2.3 Distância nominal de acionamento (S_n)

A distância nominal de acionamento S_n , é a distância sensora teórica, a qual é utilizado um alvo padrão como acionador e não considera as variações causadas pela indústria, temperatura de operação e tensão de alimentação. É o valor fornecido pelos fabricantes.

3.4.2.4 Distância real de acionamento (S_r)

É a distância medida com tensão de alimentação nominal, em temperatura ambiente (23°C), incluindo a tolerância de fabricação de $\pm 10\%$ da distância S_n :

$$0,9 \times S_n \leq S_r \leq 1,1 \times S_n .$$

3.4.2.5 Distância efetiva de acionamento (S_u)

É a distância influenciada pela temperatura de operação, possuindo um desvio máximo de 10% sobre a distância real de acionamento:

$$0,81 \times S_n \leq S_u \leq 1,21 \times S_n .$$

3.4.2.6 Distância operacional (S_a)

É a distância em que seguramente pode-se operar, considerando-se todas as variações de industrialização, temperatura e tensão de alimentação:

$$0 \leq S_a \leq 0,81 \times S_n .$$

3.4.2.7 Precauções

Certos cuidados devem ser tomados quando se utilizam sensores indutivos, principalmente quando for instalado em painéis metálicos e próximo de outros sensores para se evitar interferências na medição. É necessário respeitar uma distância mínima, descrita pelo fabricante e presente no ANEXO 4, conforme pode-se ver na Figura 3.19.

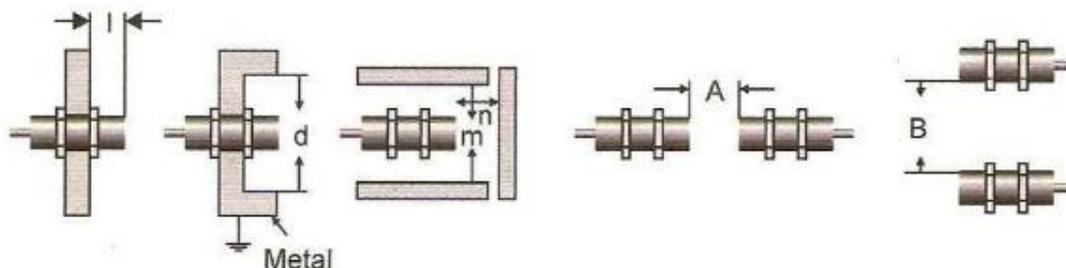


Figura 3.19. Cuidados ao instalar sensores indutivos.

Para o projeto da bancada de caracterização de Fadiga Funcional será utilizado um sensor de posição do tipo indutivo modelo II 5914 da IFM®, cujas especificações encontram-se presentes na Tabela 3-5.

Tabela 3-5. Especificações do sensor de posição indutivo.

Especificação	I15914 (IFM)
Saída analógica	0 a 10V
Resolução	0,714 V/mm
Faixa de medição	1,0 a 15mm
Tensão de operação	15 a 30 VCC

3.4.3 SENSOR DE TEMPERATURA

Para determinar a temperatura em que se encontra o fio de SMA durante o processo de ciclagem térmica, e com isso ter um controle das temperaturas de mudança de fase das estruturas de martensita e austenita do material, será utilizado um sensor de temperatura do tipo infravermelho, ou seja, sem contato.

A realização de medições sem a necessidade de contato com o material (medição óptica) é baseada na propriedade de todos os materiais de emitir radiação eletromagnética ou radiação infravermelha.

Para a escolha correta do instrumento de medição em uma aplicação específica, várias propriedades do objeto a ser medido devem ser consideradas, como sua faixa de temperatura, material e tamanho.

3.4.3.1 Emissividade

O coeficiente de emissão é a relação entre o sinal emitido de um objeto e o sinal emitido por uma fonte de radiação de corpo negro à mesma temperatura. O coeficiente é influenciado pelo material do objeto e depende do comprimento de onda, da temperatura e de outros fatores físicos.

O coeficiente de emissão de um objeto é o parâmetro mais importante na medição de sua temperatura com um pirômetro. Para uma medição correta de temperatura de superfície de um objeto através de um pirômetro (termômetro infravermelho) deve-se utilizar um valor de coeficiente de emissão, ou emissividade, coerente.



Figura 3.20. Sensor de temperatura infravermelho *Micro-Epsilon*.

Para a leitura de temperatura, será utilizado o modelo de sensor infravermelho CT-SF-22 da Micro-Epsilon®.

Tabela 3-6. Especificações do sensor infravermelho.

Especificação	CT-SF22 (Micro-Epsilon)
Faixa espectral	8 μ m a 14 μ m
Resolução	0,1°C a 25°C
Precisão do sistema	\pm 1°C ou \pm 1%
Tempo de resposta	150ms
Emissividade	0,100 a 1,000

3.5 INTERFACE COM USUÁRIO

Com o objetivo de realizar a interação entre o usuário e o equipamento de testes propriamente dito, desenvolveu-se um ambiente gráfico de visualização e comunicação através do software de simulação laboratorial LabView® 2013.

Com o auxílio do LabView®, é possível conectar todos os sensores da estrutura e ter um ambiente que possibilite uma interação com o usuário final. Esse ambiente proporciona também uma visão completa do funcionamento do sistema para, com isso, obter ao final a Curva S-N do material a ser testado, de acordo com a Figura 3.21.

Tal interface possui a capacidade de informar ao usuário os parâmetros como temperatura, deslocamento e carga aplicada sobre o fio se SMA obtidos através da leitura dos sensores presentes na bancada de caracterização: célula de carga, sensor de temperatura infravermelho e sensor de posicionamento indutivo.

Os parâmetros são obtidos com o auxílio da placa de aquisição de dados DAQ da *National Instruments (USB 6251)* e então são transmitidos para o computador e captados pelo *LabView®*.

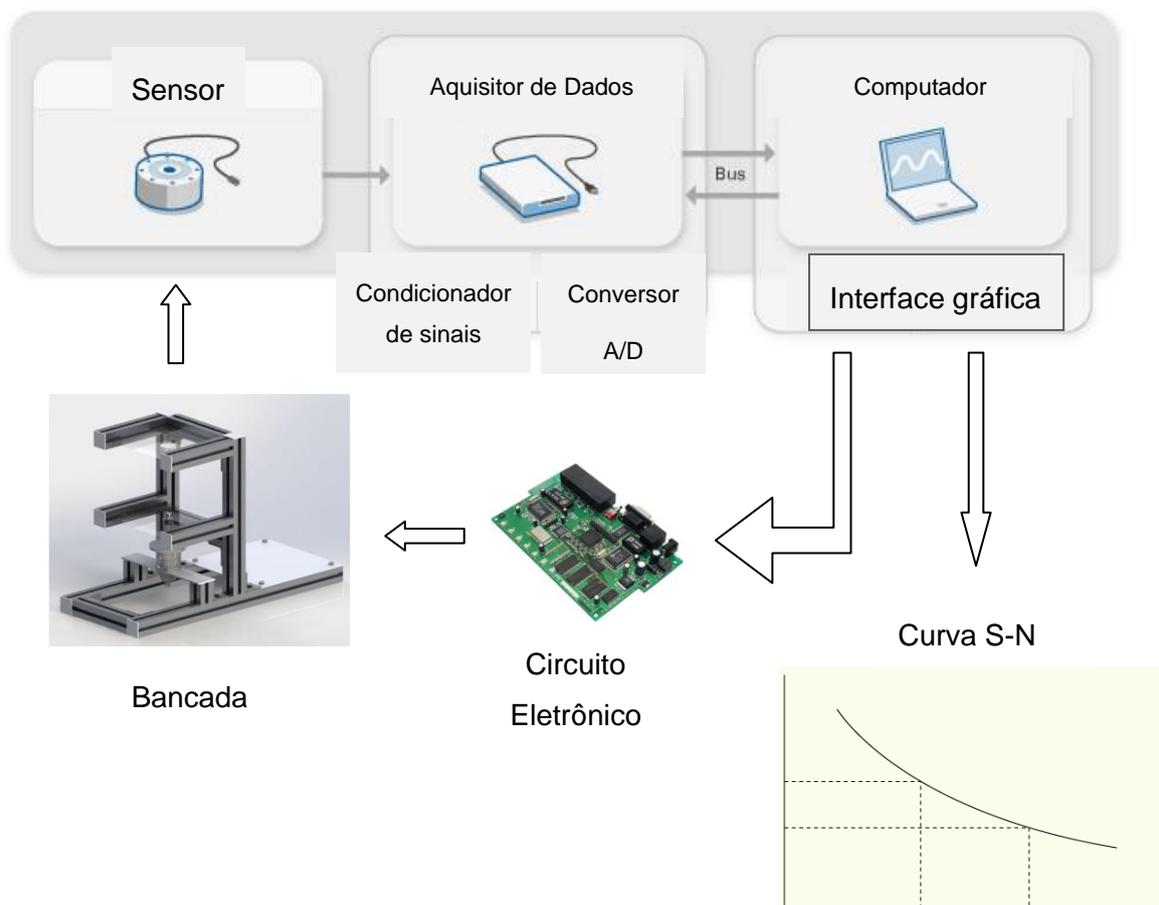


Figura 3.21. Fluxograma do sistema, com destaque para a interface gráfica.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DA BANCADA

Entende-se como resultado deste trabalho de graduação, a concepção e construção de uma bancada de caracterização em ligas com memória de forma, segundo especificações e projeto desenvolvidos neste trabalho.

A bancada foi idealizada em plataforma CAD 3D (SolidWorks®), possibilitando ter uma melhor visão espacial de como seria a estrutura na prática, realizar modificações pertinentes visando um melhor aproveitamento do espaço físico e da capacidade de portabilidade da estrutura cujo modelo final é visto no ANEXO 1 e a evolução é apresentada na Figura 4.1.

A escolha do material de construção da bancada foi realizada com base em fatores como leveza, adaptabilidade para montagem e desmontagem e durabilidade, chegando ao perfil de Alumínio do tipo estrutural, ou modular, de 30x30mm.

Nas figuras a seguir, da Figura 4.2 até Figura 4.6, têm-se mais detalhes da concepção da bancada.

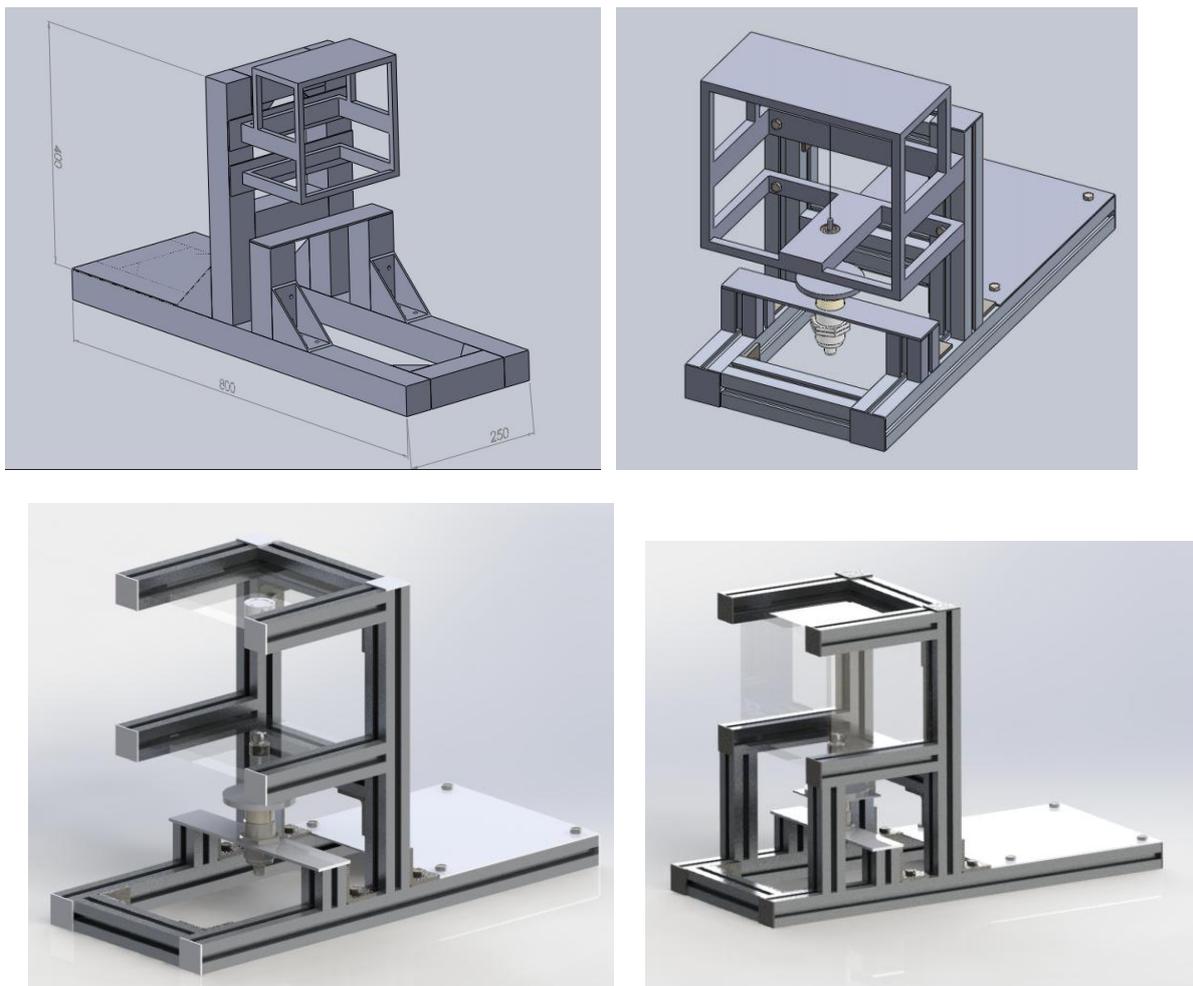


Figura 4.1. Evolução do projeto estrutural.

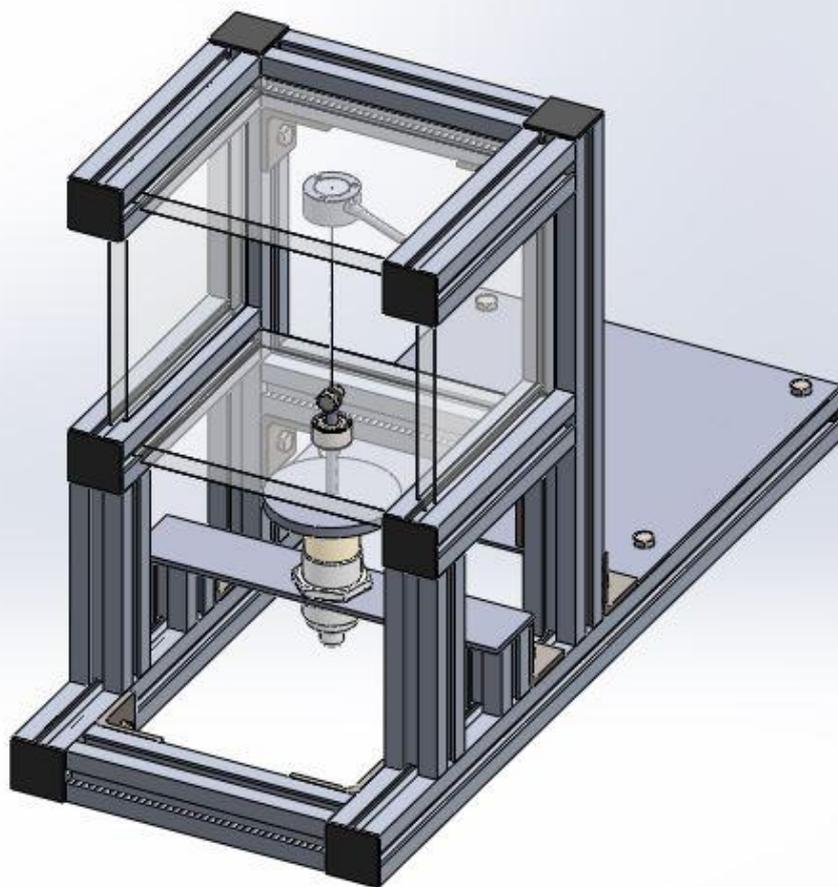
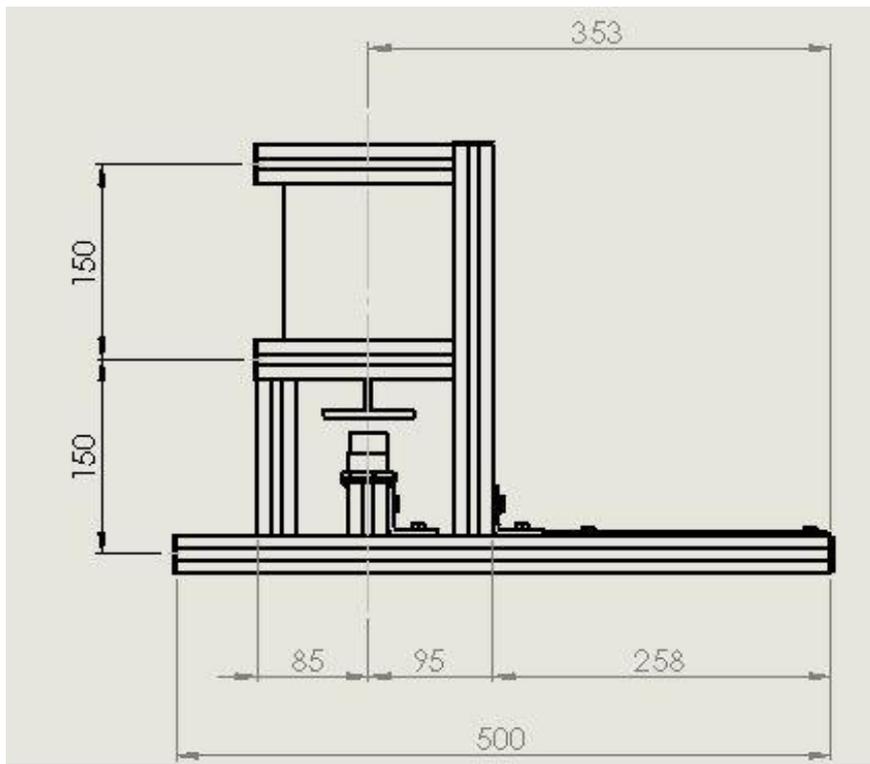


Figura 4.2. Cotação e apresentação em 3D da bancada.

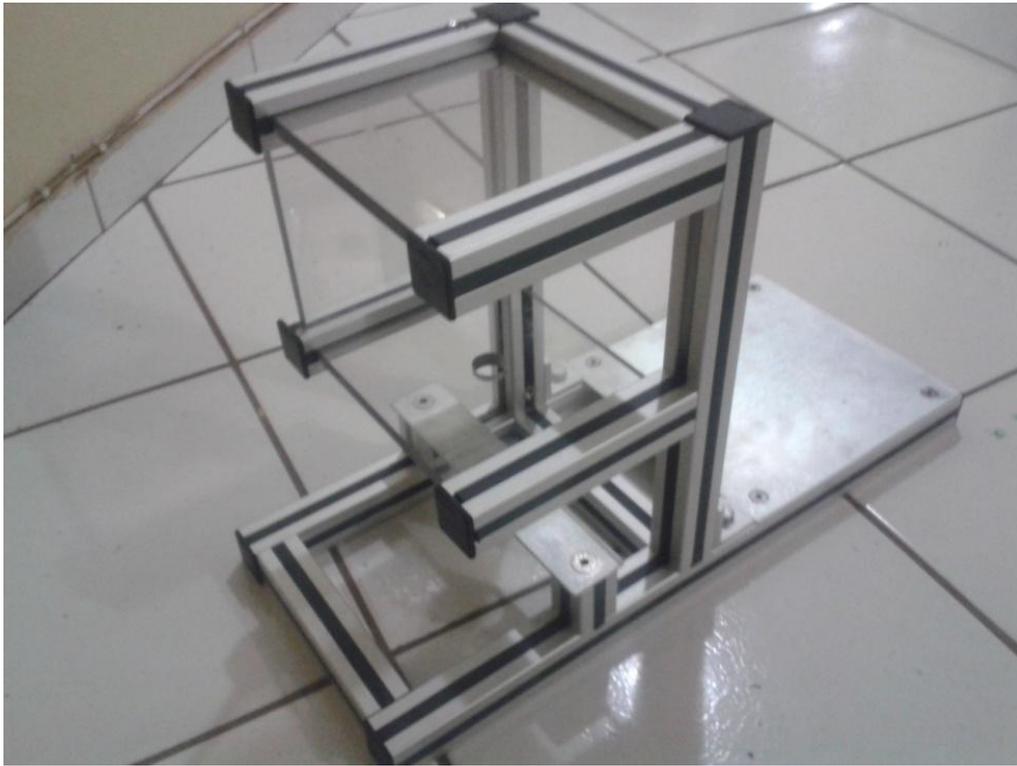


Figura 4.3. Estrutura da bancada montada.

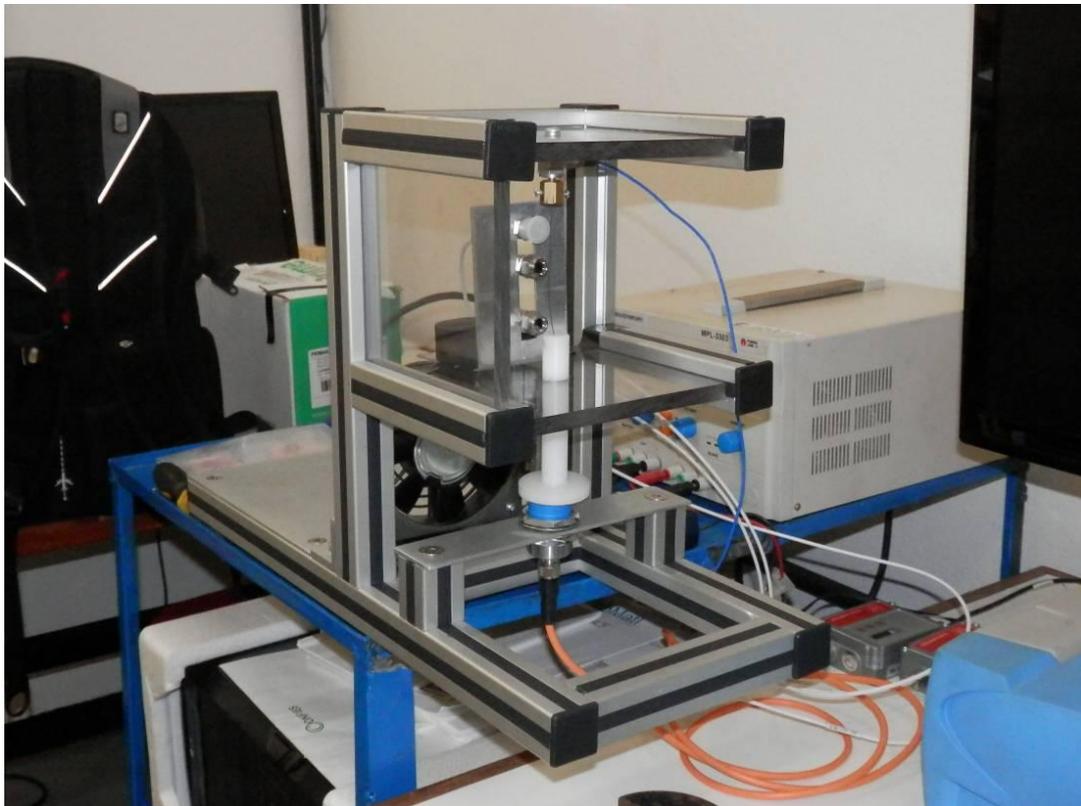


Figura 4.4. Montagem da bancada com os sensores.

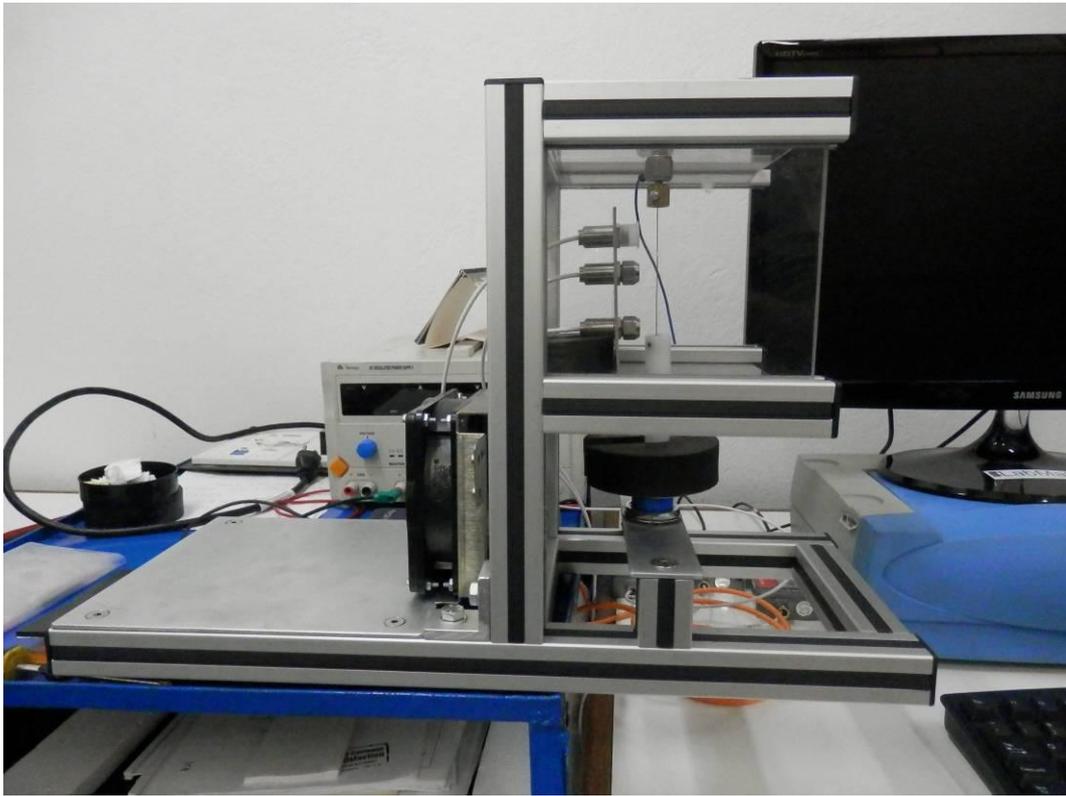


Figura 4.5. Visão lateral da bancada.



Figura 4.6. Bancada e demais elementos do sistema.

Com relação à fixação dos sensores e do fio de SMA, na Figura 4.7 é possível visualizar o fio de SMA junto aos sensores enquanto as Figura 4.8 e Figura 4.9 apresentam os detalhes de posicionamento dos mesmos.

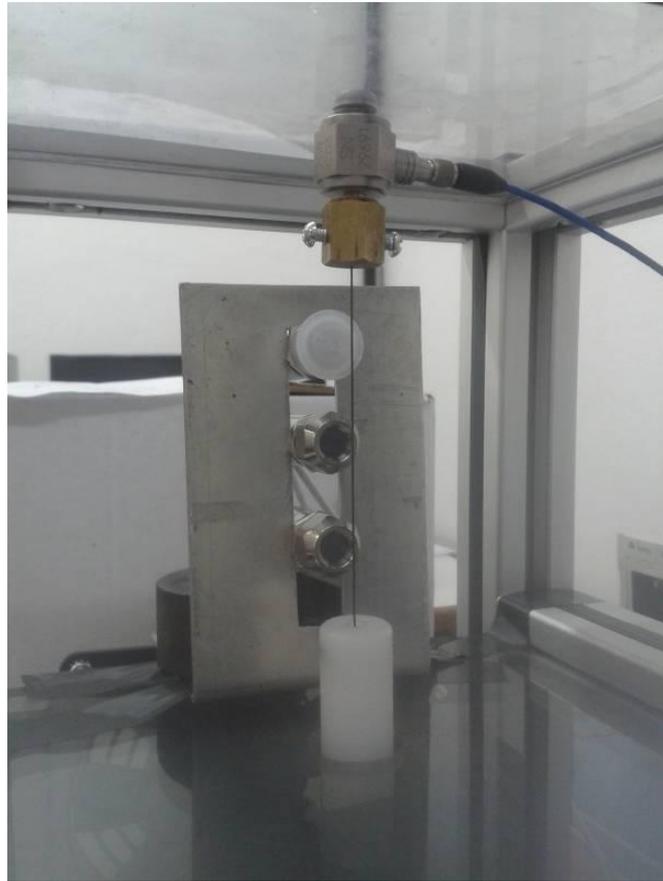


Figura 4.7. Sensores e fio de SMA acoplado à bancada

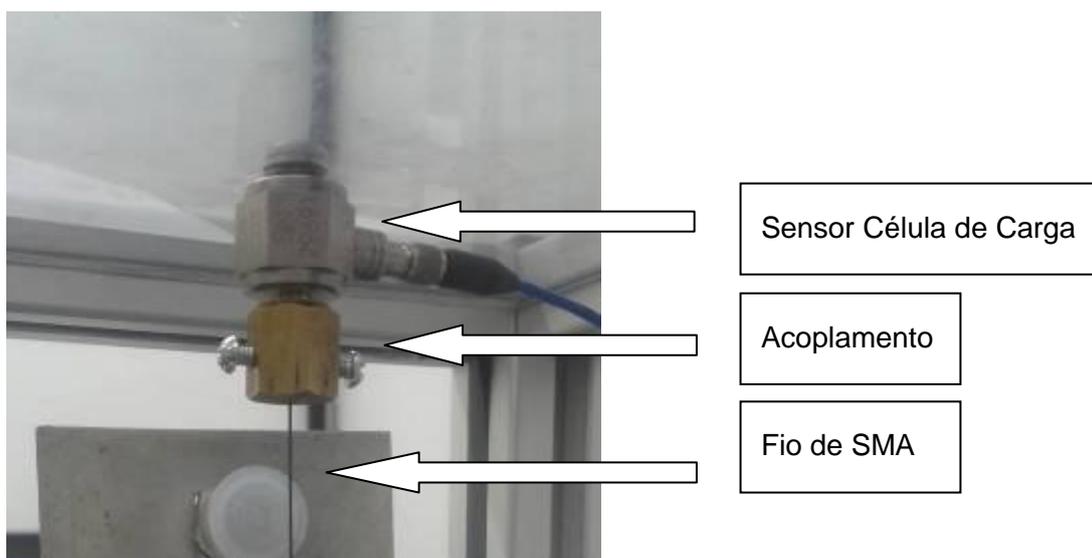


Figura 4.8. Posicionamento do sensor Célula de Carga.

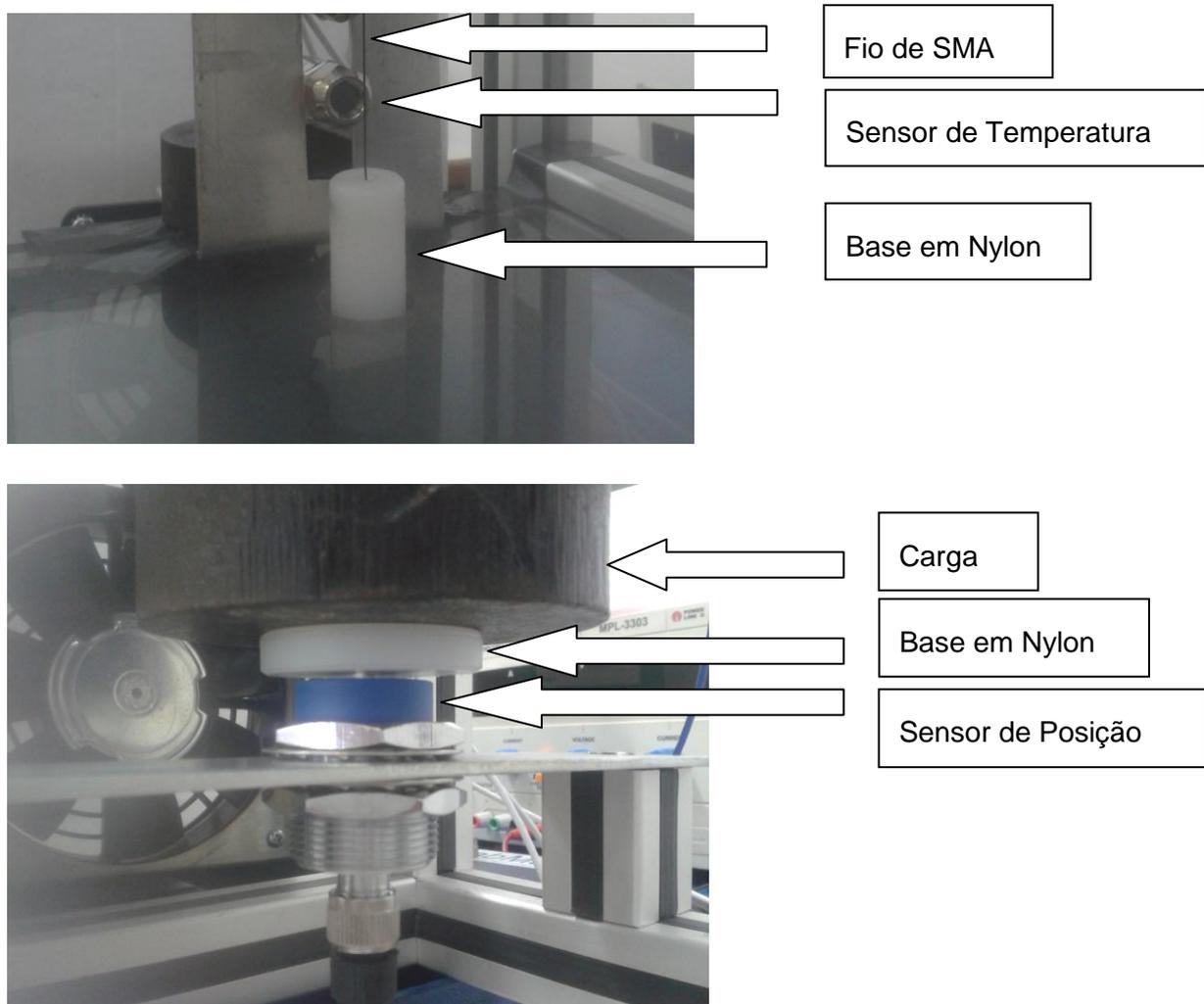


Figura 4.9. Posicionamento dos sensores de Temperatura e de Posição.

Demais componentes presentes na estrutura da bancada são: o Módulo de Processamento, responsável pela captação, transmissão e conversão dos sinais dos sensores para o computador, e a Fonte de Alimentação, responsável por fornecer a tensão e corrente necessárias para o funcionamento do sistema. Ambos componentes serão posicionados na parte posterior da bancada, ocupando uma placa de dimensão de 210 x 258 mm.

4.2 INTERFACE GRÁFICA

Como descrito no Capítulo 4, foi desenvolvida uma interface gráfica para que o usuário possa visualizar e controlar as variáveis do sistema como início e final de testes, possibilidades de salvar os dados e configurar parâmetros dos sensores.

Na Figura 4.10 apresenta-se a interface desenvolvida, seguindo com a descrição de cada elemento presente, visualizados nas Figuras 4.11 e 4.12..

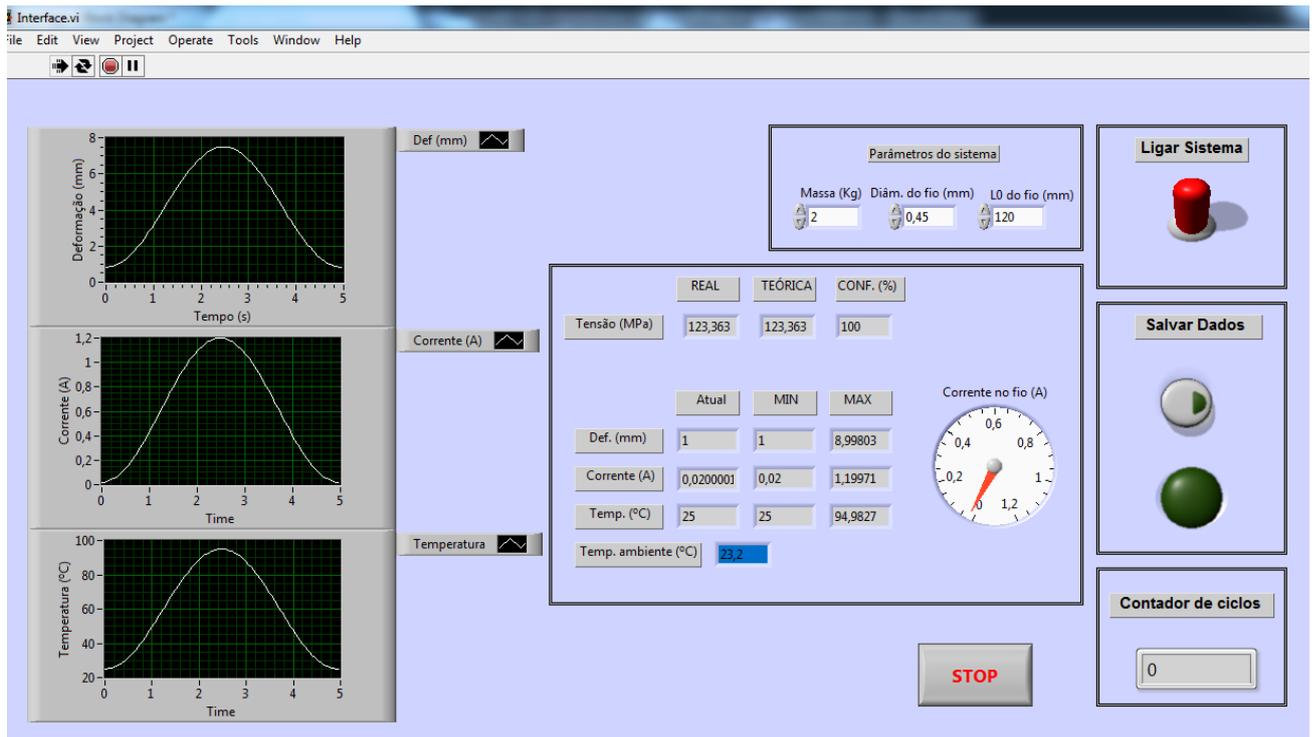


Figura 4.10. Painel da Interface com usuário.

Para se iniciar os testes no Painel, é necessário configurar alguns parâmetros como o diâmetro, o comprimento e também a carga que será aplicada ao fio de NiTi.

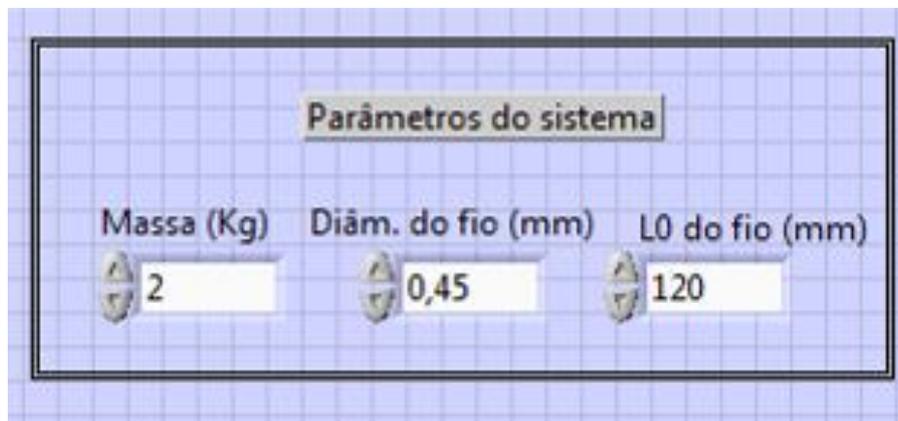


Figura 4.11. Parâmetros iniciais.

Aciona-se a chave "Ligar Sistema" para iniciar a execução dos testes. Com isso a chave altera sua cor de vermelho para verde. Para salvar os dados gerados, deve-se acionar o botão "Salvar Dados" e então selecionar o local e o nome do arquivo onde serão armazenados os registros, podendo estes ser em formato .xlsx (Excel), .LVM (de texto) ou em modo binário. Logo embaixo é possível visualizar o número de ciclos gerados durante toda a execução.



Figura 4.12. Caixas de controle para ligar, salvar e visualizar ciclos.

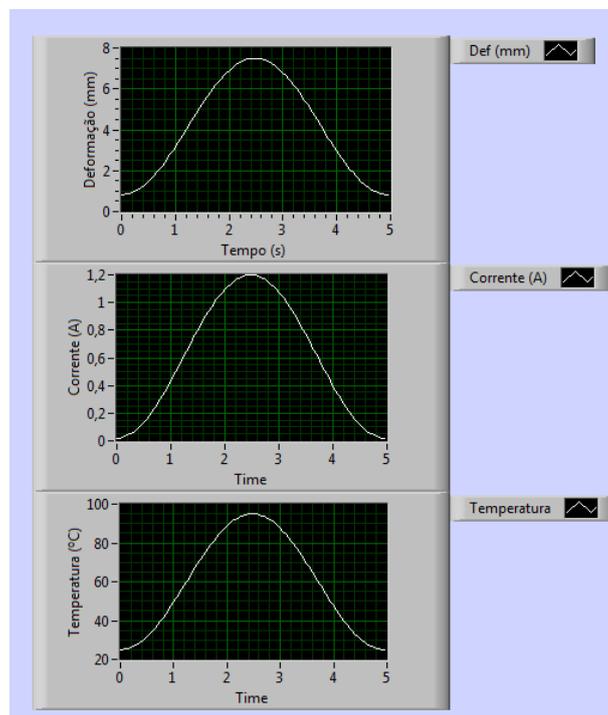


Figura 4.13. Visualização dos sinais captados.

Ao lado esquerdo do painel, temos a representação de 4 parâmetros da bancada. Na seqüência, de acordo com a Figura 4.13, de cima para baixo, a tensão aplicada ao fio em MPa, a deformação do fio em milímetros, a corrente aplicada em Ampères e a temperatura na superfície do fio em graus Celsius, além do indicativo da temperatura ambiente.

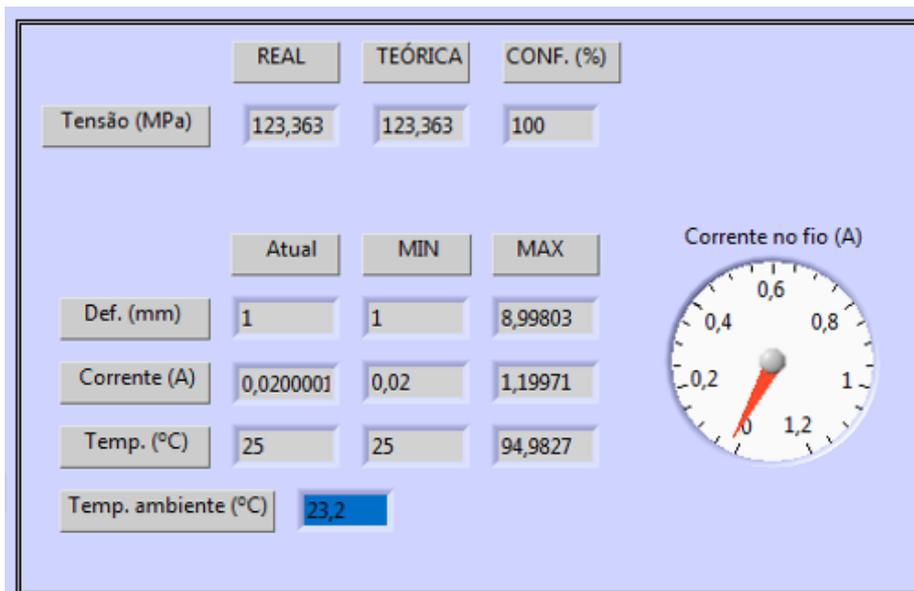


Figura 4.14. Visualização dos resultados.

Na Figura 4.14, é possível visualizar a tela onde estão presentes a captação dos sensores Célula de carga, de posição, temperatura e também do valor da corrente aplicada no fio NiTi. Também é possível visualizar os valores máximos e mínimos de cada parâmetro.

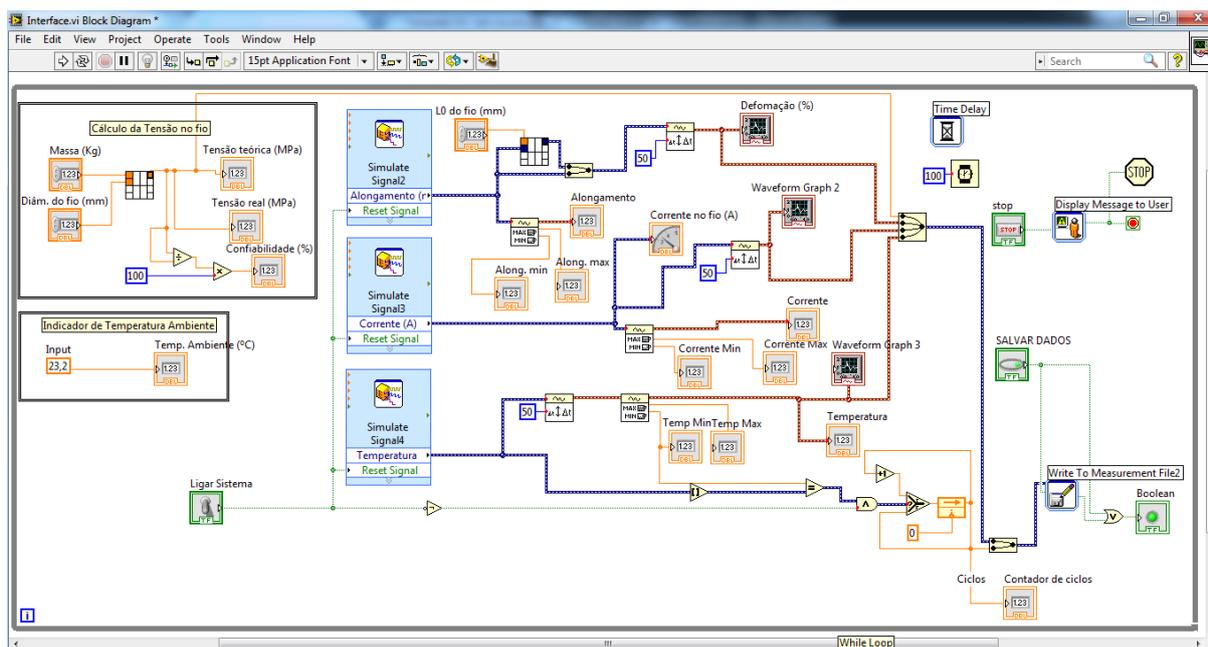


Figura 4.15. Diagrama de Blocos do Painel desenvolvido.

Na Figura 4.15 é apresentado o diagrama de blocos para o painel desenvolvido no software Labview®. Nele estão presentes todos os componentes necessários para o funcionamento do painel visualizado na Figura 4.10.

Além da utilização de lógica booleana nos casos onde o sinal se comportava como "1 ou 0", foi utilizada também a teoria de realimentação do sistema para desenvolver um contador de ciclos.

4.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

O procedimento adotado para se realizar os ensaios nos fios de SMA, considerando uma aplicação de tensão constante, será o seguinte:

1. Um fio de SMA de comprimento de 120 mm com diâmetro de até 0,45mm, é separado para realização do teste de fadiga funcional;
2. Uma ponta do fio é fixada ao acoplamento de latão, junto à célula de carga, conforme destacado na Figura 4.8;
3. A outra ponta do fio é fixada na base inferior, destacada na (B) onde será aplicada a carga ao material, correspondente à tensão desejada;
4. A leitura do sensor de deslocamento é configurada no painel para zero, indicando nenhuma deformação;
5. A carga é aplicada à base (B), de forma a alcançar o valor de tensão desejada cujo valor é captado pelo sensor célula de carga e visualizado no painel da interface gráfica;
6. Os terminais, responsáveis pela passagem da corrente elétrica, são conectados ao fio de SMA, sendo conectados um terminal abaixo do acoplamento (A) e o outro acima da base (B);
7. O teste é iniciado aplicando-se uma corrente elétrica, oscilando entre 0 e um valor de pico, de forma a atingir a temperatura de mudança de fase do material, conforme indicado no Capítulo 1.13.3.3;
8. Ao atingir a temperatura de mudança de fase (A_f), a corrente é desligada para que a temperatura no material volte à temperatura ambiente, completando assim um ciclo;
9. O teste é finalizado automaticamente na ocorrência de uma fratura no fio de SMA, verificado pelo sensor célula de carga (redução brusca do valor aferido), ou quando não ocorre uma falha porém o número de ciclos ultrapassa um valor pré-estabelecido (5×10^5 ciclos).

4.4 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

O objetivo final do projeto é a obtenção de uma Curva S-N de uma liga com memória de forma, informação esta que é utilizada para a caracterização de Fadiga Funcional do material.

A Curva S-N do material é obtida através de 2 parâmetros: Tensão aplicada ao fio de SMA, compondo o eixo Y do gráfico e o número de ciclos a que este material foi submetido no momento de sua ruptura, compondo o eixo X.

Um exemplo da construção de uma Curva S-N é mostrado na Figura 4.16, onde observa-se que para cada teste realizado com determinada tensão aplicada, um número de ciclos é obtido.

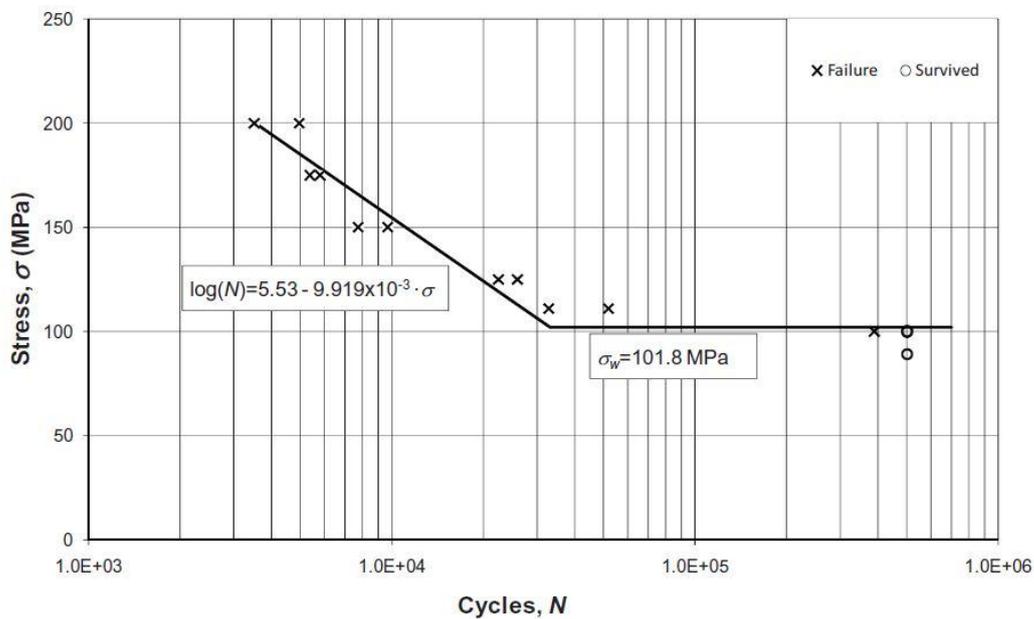


Figura 4.16. Exemplo de construção da Curva S-N. (Mammano, 2011).

A análise dos dados colhidos durante o experimento, é realizada com o auxílio da interface gráfica desenvolvida no LabView. O valor de tensão aplicado ao fio de SMA, captado pelo sensor Célula de Carga, como também o número de ciclos alcançado no momento de ruptura, são registrados e armazenados em um arquivo de texto, conforme destacado no Cap 3.5 e Figura 4.12.

Em posse de tais dados, torna-se simples a construção da Curva S-N, devendo-se somente aplicar uma aproximação por uma reta através da abaixo, em que C e D são constantes de ajuste.

$$\sigma_a = C + D \log N_f$$

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES

Análise dos resultados

O presente trabalho visou a concepção e o projeto de uma bancada para caracterização de Fadiga Funcional através do comportamento termomecânico em ligas SMA. Para a realização dos testes futuros da bancada, foi planejada a utilização de fios de SMA NiTi de diâmetro de aproximadamente 0,45mm de diâmetro de 120mm de comprimento.

Tendo sido desenvolvido o projeto da estrutura mecânica da bancada, foram realizadas cotações e orçamentos para a aquisição do material para a sua construção. Após análises chegou-se ao menor valor requerido de R\$ 628,32 da empresa Allware Sistemas de Automação Ltda localizada em Jundiaí-SP.

Paralelamente ao desenvolvimento do projeto da estrutura mecânica, foram realizados estudos para a escolha dos modelos dos sensores necessários para a captação de sinais e posterior análise e construção da Curva S-N, chegou-se às seguintes especificações:

- Célula de Carga: Tipo *Strain gauge*, Modelo DLRP L002 da *Baumer®*;
- Sensor de Posicionamento Indutivo: II5914 Efactor 100 da *IFM®*;
- Sensor de Temperatura: CT-SF-22 da *Micro-Epsilon®*.

Realizado o pedido e a entrega do material da bancada de caracterização, partiu-se para a montagem e adaptação dos elementos sensores responsáveis pela captação dos parâmetros como carga aplicada, posicionamento e temperatura.

Para a realização do processo de ciclagem térmica do fio de SMA visando analisar o processo de Fadiga Funcional, o material será submetido, através da Lei de Joule, a uma corrente contínua de acordo com o especificado no projeto do circuito eletrônico presente no Capítulo 3.3. Esta corrente será aplicada de maneira cíclica de modo a aquecer o fio de SMA e após determinado tempo será suspensa para que o material possa retornar à temperatura ambiente e então volte à sua forma original.

Trabalhos futuros

Os resultados obtidos neste projeto, desde a concepção até a montagem de uma plataforma laboratorial, com a respectiva análise e seleção de elementos sensores, proporcionam um grande avanço e oportunidade para a realização de trabalhos futuros na área de pesquisa e caracterização de Ligas com Memória de Forma. Como continuação deste trabalho, a instalação do módulo condicionador de sinais, que será responsável pelo controle e conversão dos sinais captados dos sensores, representará um grande avanço para a conclusão do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarenga Junior, A. (2006). *Avaliação experimental dos efeitos da fadiga térmica nas propriedades de um aço inoxidável austenítico*. UFMG.
- Antonucci, V., Faiella, G., Giordano, M., Mennella, F., & Nicolais, L. (2007). Electrical resistivity study and characterization during NiTi phase transformations. *Thermochimica Acta*, 64-69.
- Banke, J. (2015). *Nasa helps create a more silent night*. Acesso em 10 de setembro de 2015, disponível em NASA: http://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/bridges_chevron_events.html.
- Bentley, J. P. (2004). *Principles of Measurement Systems*. Pearson Education.
- Bertacchini, O. W., Lagoudas, D. C., & Patoor, E. (2003). Fatigue life characterization of shape memory alloys undergoing thermomechanical cyclic loading. *Smart Structures and Materials*, 5053.
- Casati, R., Passaretti, F., & Tuissi, A. (2011). Effect of electrical heating conditions on functional fatigue on thin NiTi wire for shape memory actuators. *Procedia Engineering*, 3423-3428.
- da Silva, E. P. (2003). *Aplicação de ligas com memória de forma em estruturas adaptativas*. UnB, Brasília.
- Delaey, L., Krishnan, R., Tas, H., & Warlimont, H. (1974). Thermoelasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations. *Journal of Materials Science*, 9, 1521-1535.
- Eggeler, G., Hornbogen, E., Yawny, A., Heckmann, A., & Wagner, M. (2004). Structural and functional fatigue of NiTi shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 24-33.
- Fuchs, H., Stephens, R. I., Ali, F., & R.R., S. (2000). *Metal Fatigue in Engineering* (2ª Edição ed.). Wiley.
- Lagoudas, D. C., & Kumar, P. K. (2008). *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications*. (D. C. Lagoudas, Ed.) Springer.
- Mammano, S. G., & Dragoni, E. (2011). Functional Fatigue of shape memory wires under constant stress and constant-strain loading conditions. *10*, 3692-3707.
- Matthey, J. (2015). *Nitinol Technical Properties*. Acesso em 10 de Outubro de 2015, disponível em Johnson Matthey Medical Components: <http://jmmedical.com/resources/221/Nitinol-Technical-Properties.html>

- Miyazaki, S., Imai, T., Igo, Y., & Otsuka, K. (1986). Effect of cyclic deformation on the pseudoelasticity characteristics of Ni-Ti alloys. *Metallurgical Transactions*, 17, 115-120.
- Niendorf, T., Kroos, P., Batyrsina, E., Paulsen, A., & Motemani, Y. (2015). Functional and structural fatigue of titanium tantalum high temperature shape memory alloys (HT SMAs). *Materials Science and Engineering: A*, 620, 359-366.
- Otsuka, K., & Wayman, C. (1999). *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press.
- Shimano, S. G. (2005). *Comportamento mecânico e análise dimensional de prafusos corticais de aço inoxidável e liga de titânio submetidos a ensaios de torção*. USP.
- Thomazini, D., & Pedro Urbano, B. d. (2012). *Sensores Industriais - Fundamentos e Aplicações*. Érica.
- Vick. (20 de setembro de 2013). *Acrílico - Chapas cast e extrudadas*. Acesso em 11 de Outubro de 2015, disponível em VICK Comércio de Plásticos e Metais: www.vick.com.br/vick/novo/datasheet-acrílico_chapas_cast_e_extrudadas.pdf

ANEXOS

Anexo 1 - Desenhos esquemáticos da bancada de caracterização.

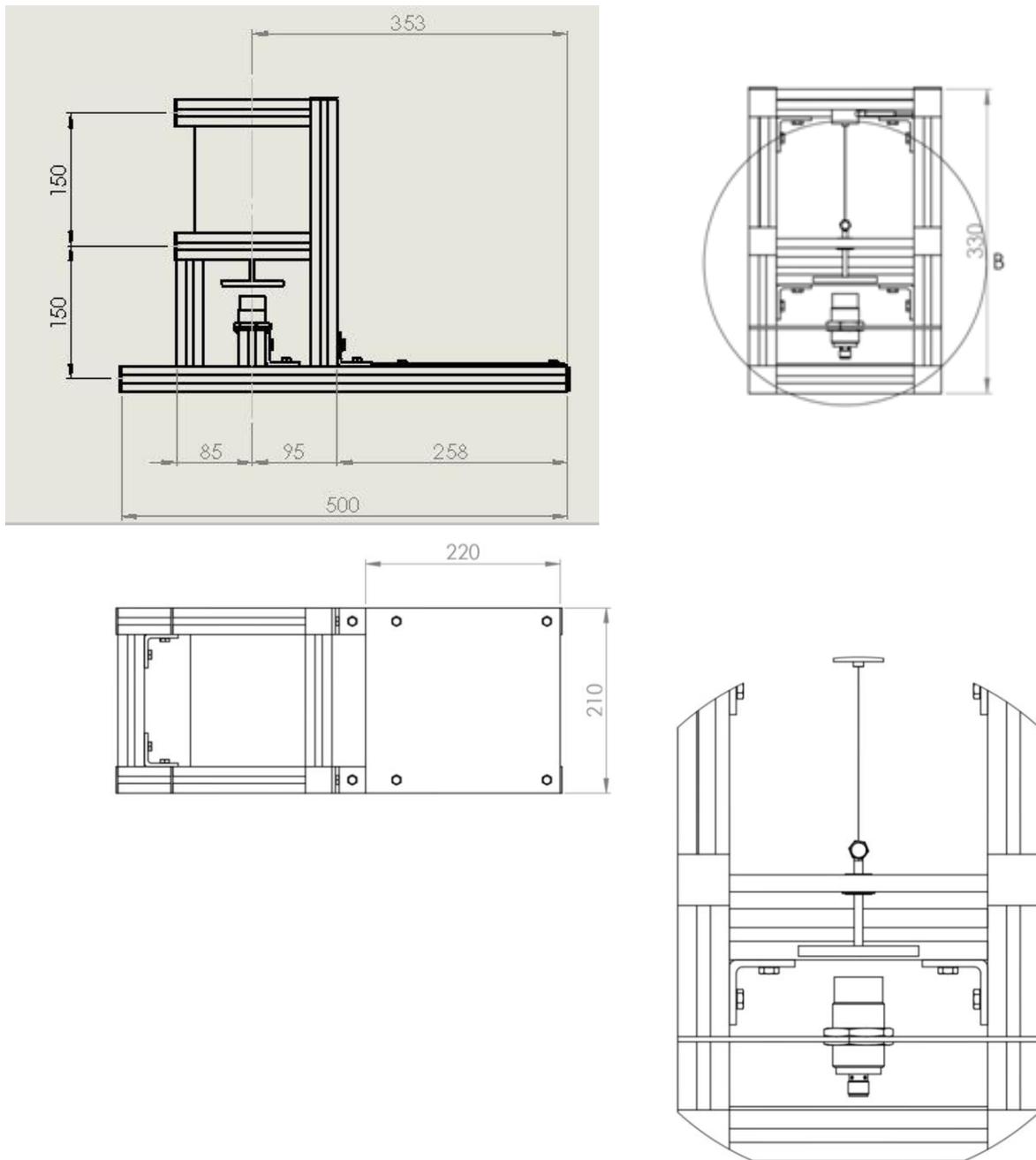
Anexo 2 - Especificações da liga NiTi.

Anexo 3 - Especificações da célula de carga.

Anexo 4 - Especificações do sensor de posição indutivo.

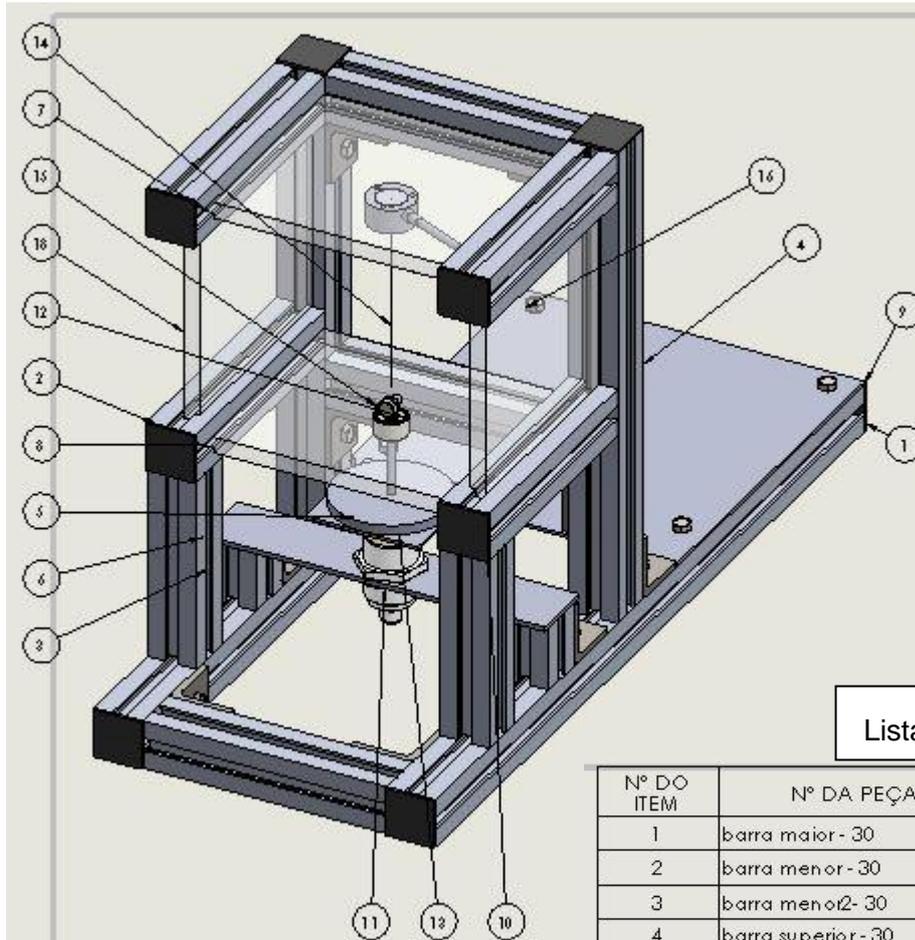
Anexo 5 - Especificações do sensor de temperatura infravermelho.

ANEXO 1 - Desenhos esquemáticos da bancada de caracterização.



DETALHE B
ESCALA 2 : 5

Representação em 3 vistas da bancada de caracterização, com destaque para área do Detalhe B onde se pode ver o sensor de posição indutivo instalado e o fio de SMA suspenso através da aplicação de uma carga.



Lista de Materiais

Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	barra maior - 30		2
2	barra menor - 30		8
3	barra menor2 - 30		2
4	barra superior - 30		2
5	cantoneira		12
6	placa_superior30		1
7	placa_acilico		1
8	placa_acilico_inf		1
9	placa_apoio_fonte30		1
10	capa30		10
11	IT226_part1		1
12	AFBMA 18.1.3.6 - 19NU14 - Full,SLNC,Full		1
13	base para carga		1
14	fio de sma		1
15	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M6 x1.0 x10 --10WN		1
16	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M6 x1.0 x12 --12WN		28
17	celula de carga		1
18	placa_acilico - lateral		2
19	barra engastada		2
20	placa de aluminio		1

Representação da estrutura física em 3D com a identificação de cada elemento presente em sua composição através da Lista de Materiais.

Shape Memory Nitinol Alloys*

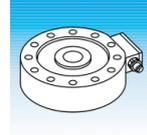
	<u>SM495</u>	<u>SM500</u>
PHYSICAL PROPERTIES		
Melting Point:	1310°C	1310°C
Density:	6.5 g/cm ³	6.5 g/cm ³
Modulus of Elasticity:	28 – 41 GPa	28 – 41 GPa
Coefficient of Thermal Expansion:	6.6 x 10 ⁻⁶ / °C	6.6 x 10 ⁻⁶ / °C
MECHANICAL PROPERTIES		
Ultimate Tensile Strength:	≥ 1070 MPa	≥ 1070 MPa
Total Elongation:	≥ 10%	≥ 10%
SHAPE MEMORY PROPERTIES		
Loading Plateau Stress @ 3%	≥ 100 MPa	≥ 100 MPa
Shape Memory Strain	≤ 8.0%	≤ 8.0%
TRANSFORMATION TEMPERATURE		
Ingot Austenite Finish (A _f)	75 to 110°C	45°C to 80°C
Finished Product A _f	50 to 80°C	30°C to 50°C
COMPOSITION (Meets ASTM F2063 requirements)		
Nickel (nominal):	54.5 wt.%	55.0 wt.%
Titanium:	Balance	Balance
Oxygen:	≤ 0.05 wt.%	≤ 0.05 wt.%
Carbon:	≤ 0.02 wt.%	≤ 0.02 wt.%
Inclusion Area Fraction:	≤ 2.8%	≤ 2.8%
APPLICATIONS		
	SM495 is our standard shape memory wire that is malleable at room temperature and returns to shape in boiling water or autoclave. Typical applications for the material are actuators and surgical tools.	SM500 exhibits shape memory such that it is malleable at room temperature and returns to shape just above body temperature. Typical applications for SM500 are for dental products such as archwires and springs.

* These values should only be used as guidelines for developing material specifications. Properties of Nitinol Alloys are strongly dependent on processing history and ambient temperature. The mechanical and shape memory properties shown here are typical for standard shape memory Nitinol at room temperature tested in uniaxial tension. Bending properties differ, and depend on specific geometries and applications. Modulus is dependent on temperature and strain. Certain shapes or product configurations may require custom specifications. Materials are also available in the cold-worked or annealed conditions.

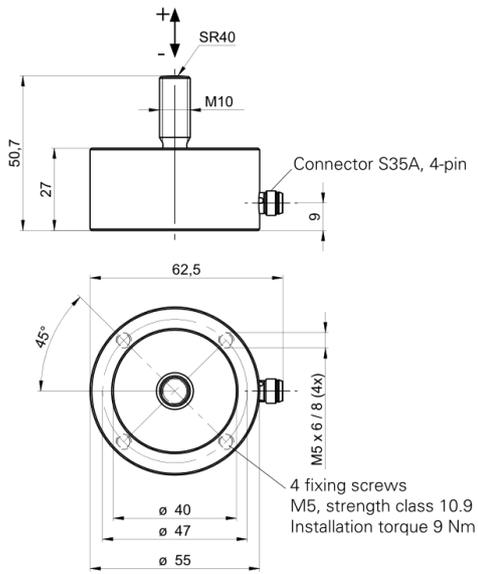


Nitinol Devices & Components • 47533 Westinghouse Drive • Fremont, California 94539
(510)683-2000 • Fax: (510)683-2001 • sales@nitinol.com • www.nitinol.com

We are Nitinol.™



Dimensions (mm)



2

Electrical Connection

S80



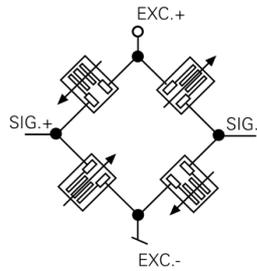
Pin	Signal
1	+Vs
2	-V _{OUT}
3	+V _{OUT}
4	GND
Housing	⏏

W24

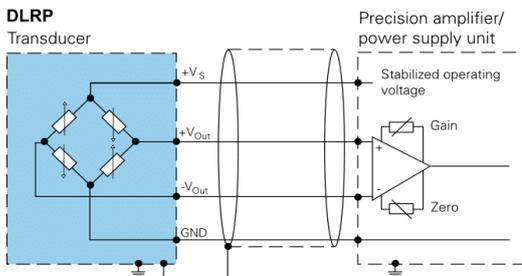


Color	Signal
brown	+Vs
black	-V _{OUT}
blue	GND
white	+V _{OUT}
Housing	⏏

Bridge Circuit



Wiring



ANEXO 4 - Especificações do sensor de posição indutivo.

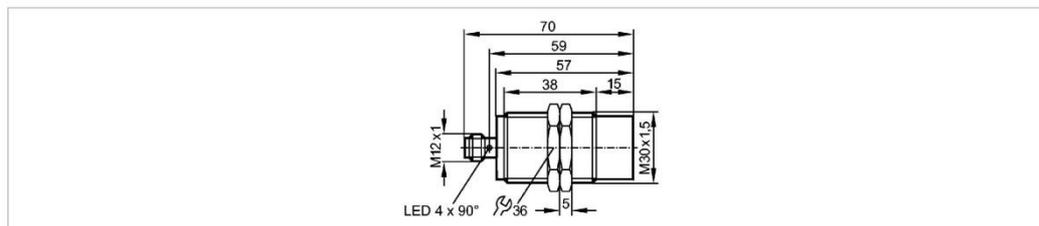
efector100



I15914

I1K3015A2PKG/US

sensores indutivos



Made in Germany

Características do produto	
Sensor indutivo	
Rosca metálica M30 x 1,5	
Conexão	
Saída analógica 0...10 V (linear, gradiente: 0,714 V/mm) *)	
Alcance de medição 1,0...15 mm; [nb] não embutido	
Dados elétricos	
Função elétrica	DC analógico
Tensão de operação [V]	15...30 DC
Consumo de corrente [mA]	< 20
Classe de proteção	II
Proteção contra inversão de polaridade	sim
Saídas	
Saída	0...10 V analógico
Carga mín. [Ω]	2000
proteção contra curto-circuitos	sim
Proteção contra sobrecarga	sim
faixa de registro	
Alcance de medição [mm]	1,0...15
precisão / desvios	
Fatores de correção	aço = 1 / aço inoxidável aprox. 0,7 / latão aprox. 0,5 / Alumínio aprox. 0,4 / cobre aprox. 0,3
Erro de linearidade	± 1 %; de UA máx
Coeficiente de temperatura	± 5 % da UA máx a -25...70°C; ± 10 % da UA máx a 70...80°C
Repetibilidade	± 1 %; de UA máx
Tempos de reação	
Tempo de resposta [ms]	< 20
condições ambientais	
Temperatura ambiente [°C]	-25...80
proteção	IP 67
Certificações / testes	
MTTF [anos]	1005
Dados mecânicos	
montagem	não embutido
Material da carcaça	carcaça: latão revestido com bronze branco; face ativa: PBT

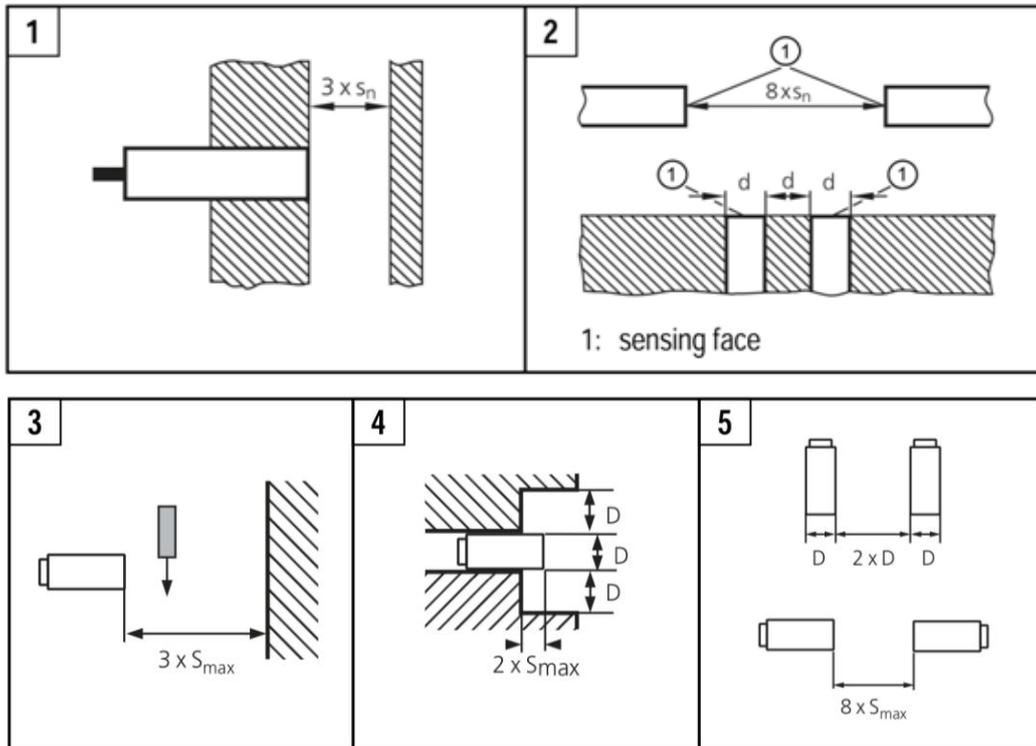


Figura A-5.1. Especificações de distâncias mínimas para o sensor indutivo.

Conforme pode-se observar na Figura A-5.1, as especificações variam de acordo como o sensor é posicionado e se encontra-se presente outro sensor indutivo próximo. Tais especificações são descritas a seguir:

- Espaço livre na face sensora quando montado em superfície metálica (1, 3 e 4);
- Distâncias mínimas quando vários sensores do mesmo tipo são montados (2 e 5);

ANEXO 5 - Especificações do sensor de temperatura infravermelho.

As especificações técnicas do sensor de temperatura infravermelho são apresentadas a seguir, sendo elas como sendo: especificações de medição, gerais e elétricas.

As tabelas apresentadas na sequência foram retiradas do manual de instruções e especificações técnicas do sensor de temperatura infravermelho da empresa Micro-Epsilon, destacando que o modelo utilizado no projeto foi o CT-SF22.

Measurement Specifications

CT Model

Model	CT-SF02	CT-SF15	CT-SF22
Temperature range (scalable)	-50 ... 600 °C	-50 ... 600 °C	-50 ... 975 °C
Operating temperature (sensor)	-20 ... 130 °C	-20 ... 180 °C	-20 ... 180 °C
Storage temperature (sensor)	-40 ... 130 °C	-20 ... 180 °C	-20 ... 180 °C
Spectral range	8 ... 14 μm		
Optical resolution	2:1	15:1	22:1
System accuracy ^{1,2}	± 1 °C or ± 1 % ³		
Repeatability ¹	± 0.5 °C or ± 0.5 % ³		
Temperature coefficient ⁵	± 0.05 K/ K or ± 0.05 %/ K (whichever is greater)		
Temperature resolution (NETD) ^{3,4}	0.1 K	0.05 K	
Response time (95 % signal)	150 ms		
Warm-up time	10 min		
Emissivity/ gain	0.100 ... 1.100 (adjustable via programming keys or software)		
Transmissivity	0.100 ... 1.100 (adjustable via programming keys or software)		
Signal processing	Average, peak hold, valley hold (adjustable via programming keys or software)		
Software (optional)	CompactConnect		

1) At operating temperature 23 ± 5 °C; whichever is greater.

2) Accuracy for thermocouple output: ± 2.5 °C or ± 1 %

3) At object temperatures > 0 °C; $\epsilon = 1$

4) At time constant 200 ms and an object temperature of 25 °C

5) For ambient temperatures (sensor): 18 °C \leq sensor ≤ 28 °C

On the CT models CT-SF02 the sensor cable must not be moved during the measurement.

General Specifications

	Sensor	Controller
Protection class	IP 65	
Operating temperature	See also Chapter Measurement Specification, see Chap. 2.5	0 ... 85 °C (+32 ... +185 °F)
Storage temperature	See also Chapter Measurement Specification, see Chap. 2.5	-40 ... 85 °C (-40 ... +185 °F)
Relative humidity	10 ... 95 %, non-condensing	
Material	Stainless steel	Die casting zinc
Dimensions	28 mm x 14 mm, M12x1	89 mm x 70 mm x 30 mm
Dimensions CTH, CTP	55 mm x 29.5 mm, M18x1 (with massive housing)	89 mm x 70 mm x 30 mm
Weight	40 g	420 g
Cable length	1 m (only CT-SF02, CT-SF15, CT-SF22, CT-SF15, CT-SF22), 3 m (standard at CTH, CTM ¹ and CTP), 8 m, 15 m	
Cable diameter	2.8 mm	
Ambient temperature cable	Max. 180 °C [High temperature cable for Cth: 250 °C]	
Vibration	IEC 68-2-6: 3 g 11 - 200 Hz, any axis	
Shock	IEC 68-2-27: 50 g, 11 ms, any axis	
CompactConnect Software	optional	

1) The CTM-3 models are only available with 3 m cable.

Electrical Specifications

Power supply	8 - 36 VDC	
Current draw	max. 100 mA	
Outputs/ analog Channel 1	selectable: 0/4 - 20 mA, 0 - 5/10 V, thermocouple (J or K) or alarm output (Signal source: object temperature)	
Channel 2 (only CT-SF02, CT-SF15, CT-SF22, CTP)	Sensor temperature [-20 ... 180 °C], [-20 ... 250 °C at CTH-SF02 or CTH-SF10] as 0 - 5 V or 0 - 10 output or alarm output (Signal source switchable to object temperature or controller temperature if used as alarm output)	
Alarm output	Open collector Output on Pin AL2 [24 V/50 mA]	
Output impedances	mA	max. loop resistance 500 Ω (at 8 - 36 VDC)
	mV	min. 100 kΩ load impedance
	Thermocouple	20 Ω
Digital interfaces	USB, RS232, RS485, CAN, Profibus DP, Ethernet (optional plug-in modules)	
Relay outputs	2 x 60 VDC/42 VAC _{RMS} , 0.4 A; potential free (optional plug-in modules)	
Functional inputs	F1 up to F3; software programmable for the following functions: - external emissivity adjustment - ambient temperature compensation, - trigger (reset of hold functions) Input impedance F2 and F3: 43 kΩ	