

RAFAEL COURA PAIVA VIANA

**CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE MÁQUINA DE
ENSAIO DE TRAÇÃO SOB CARGA CONSTANTE PARA AVALIAÇÃO
DE SUSCEPTIBILIDADE AO HIDROGÊNIO EM AMOSTRAS
METÁLICAS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2020

RAFAEL COURA PAIVA VIANA

**CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE MÁQUINA DE
ENSAIO DE TRAÇÃO SOB CARGA CONSTANTE PARA AVALIAÇÃO
DE SUSCEPTIBILIDADE AO HIDROGÊNIO EM AMOSTRAS
METÁLICAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em engenharia mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Sinésio D. Franco

UBERLÂNDIA – MG

2020

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãs por todo apoio e incentivo durante a minha trajetória acadêmica.

Ao professor Sinésio Domingues Franco pela orientação, apoio e principalmente pela oportunidade de fazer parte do LTAD.

Aos engenheiros Rodrigo Freitas da Silva Alvarenga, Douglas Teruyuki Cabral e Henry Fong Hwang por contribuírem na orientação do trabalho.

Aos engenheiros Fernando Buiatti Rodrigues, Dênis Soares de Freitas e Juliano Oséias de Moraes pelo apoio técnico.

À Petrobras pelo investimento e confiança no projeto.

VIANA, R.C.P.; **CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE MÁQUINA DE ENSAIO DE TRAÇÃO SOB CARGA CONSTANTE PARA AVALIAÇÃO DE SUSCEPTIBILIDADE AO HIDROGÊNIO EM AMOSTRAS METÁLICAS**. Projeto de Fim de Curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia / MG, 2020.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo realizar a calibração, validação e otimização de um protótipo para ensaios de tração sob carga constante, desenvolvido no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste. A máquina foi desenvolvida para avaliar a susceptibilidade à fragilização por hidrogênio em amostras metálicas seguindo as diretrizes da norma BS ISO 16573 (ISO, 2015). O princípio de funcionamento do equipamento é o uso de pesos-mortos em um braço de alavanca. Antes do início da operação do equipamento foi necessário levantar a curva massa *versus* carga de tração, e as incertezas relacionadas. Além disso, foi reavaliado o protótipo visando redução de custos e otimização do tempo de fabricação para as demais máquinas a serem construídas. A principal modificação realizada foi na estrutura de sustentação do equipamento e na concepção das garras de tração. Finalmente, foram definidos os procedimentos de calibração das massas padrão e validação da curva de ensaio do equipamento protótipo, que servirão de base para os demais equipamentos fabricados.

Palavras-chave: máquina de tração sob carga constante, calibração, otimização, fragilização pelo hidrogênio.

VIANA, R.C.P.; **CALIBRATION, VALIDATION AND OPTIMIZATION OF CONSTANT LOAD TESTING MACHINE FOR ASSESSMENT OF HYDROGEN SUSCEPTIBILITY IN METAL SAMPLES**. Course completion work, Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlandia / MG, 2020.

ABSTRACT

This work aimed to perform the calibration, validation and optimization of a prototype equipment for tensile tests under constant load, developed at the Friction and Wear Technology Laboratory. The machine was developed to assess hydrogen embrittlement susceptibility in metallic samples following the guidelines of BS ISO 16573 standard (ISO, 2015). The operating principle of the equipment is the use of dead weights on a lever arm. Before starting the equipment operation, it is necessary to plot mass versus tensile load, and calculate the corresponding uncertainties. In addition, the prototype was reevaluated in order to reduce costs and optimize manufacturing time for the other machines to be built. The main modification carried out was in the load frame of the equipment and the design of the sample grips. Finally, the procedures for calibrating the standard masses and validating the test curve of the prototype equipment were defined, which will help as basis for the other equipment to be manufactured.

Keywords: constant load tensile machine, calibration, optimization, hydrogen embrittlement.

LISTA DE FIGURAS

	Pg.
Figura 2.1.1 Interação entre o hidrogênio e a microestrutura do material: A) Solução sólida, B) Par hidrogênio e soluto, C) Em discordâncias, D) Nos contornos de grãos, E) Interface entre matriz e partícula, F) H ₂ presente nos vazios.	13
Figura 2.1.2 Gráfico Tensão de formação obtidos para diferentes tamanhos de grão em ambiente inerte (a) e com carregamento de hidrogênio (b) (Adaptado de Park, Kang, Liu, 2017).	14
Figura 2.2.1 Sistema de carregamento com (a) quadro auto carregável (<i>proof ring</i>) (b) ensaio peso morto (Nace, 2005).	15
Figura 2.2.2 Exemplo dos resultados do ensaio de carga constante tipo 1: teor de hidrogênio difusível <i>versus</i> tempo até a ruptura para dois materiais diferentes. (ISO, 2015)	17
Figura 2.2.3 Exemplo dos resultados do ensaio de carga constante gráfico tipo 1: teor de hidrogênio difusível <i>versus</i> tempo até a ruptura para dois materiais diferentes (ISO, 2015).	17
Figura 3.1.1 Vista Isométrica do HMax.	22
Figura 3.1.2 Sistema de alavanca três pontos. (Adap. ANTUNES, 2015).	22
Figura 3.2.1 Subconjunto de tração e fixação do corpo de prova.	23
Figura 3.2.2 Subconjunto de tração e fixação do corpo de prova.	24
Figura 3.2.3 Subconjunto estrutura principal.....	25
Figura 5.1.1 Comparativo entre os equipamentos: a) HMAX protótipo, b) HMAX atualizado.	34
Figura 5.1.2 Comparação braço de alavanca e pesos Comparação braço de alavanca e pesos: a) HMAX protótipo; b) HMAX atualizado.	34
Figura 5.1.3 Conjunto de fixação e tração: a) Conjunto montado no equipamento protótipo; b) Conjunto montado no equipamento HMAX atualizado.	38

Figura 5.1.4 Olhal de tração: a) Olhal macho; b) Olhal fêmea.....	37
Figura 5.1.5 – a) Estrutura principal protótipo, b) Estrutura principal atualizada.....	38
Figura 5.1.6 – a) Projeto Usinado; b) Projeto com solda.	39
Figura 5.3.1 Retirada de pesos e incremento do garfo de travamento.	40
Figura 5.3.3 Modificações realizadas na mesa de regulação de altura.	42
Figura 5.4.1 Modificações realizadas no sistema de argolas.	44
Figura 5.4.2 Modificação no olhal e nos adaptadores.	45
Figura 5.4.3 Modificação no conceito de fabricação dos pesos	47
Figura 5.4.4 – Equipamento HMAX em operação, a esquerda o protótipo e a direita equipamento atualizado.	49

LISTA DE SIGLAS

GUM – Guia para determinação de Incertezas em medição

HEDE – *Hydrogen Enhanced Desconhesion* (Decoção Induzida por Hidrogênio)

HELP – *Hydrogen Enhanced Localized Plasticity* (Plasticidade Localizada Induzida por Hidrogênio)

H_{th} - Concentração Crítica Hidrogênio

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

ISO – *International Organization for Standardization*

LTAD – Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste

U – Incerteza Padrão

U_c – Incerteza Padrão Combinada

LISTA DE TABELAS

	Pg.
Tabela 3.1 – Parâmetros definidos do projeto HMAX.	26
Tabela 4.1 – Fator de abrangência em função de GL e PA.	31
Tabela 5.3.1 – Comparativo de custo de fabricação do sistema de travamento ...	41
Tabela 5.3.2 – Comparativo de custo de fabricação do ajuste de altura	43
Tabela 5.3.3 - Comparativo custo de fabricação sistema de argolas.	
Tabela 5.3.4 - Comparativo custo de fabricação do olhal e dos adaptadores.	
Tabela 5.3.5 - Comparativo custo de fabricação perfil U modificado.	
Tabela 5.3.6 - Comparativo custo de fabricação dos pesos.	
Tabela 5.5.1 – Resultados resumidos das incertezas de medição para as massas padrão.....	51
Tabela 5.6.1 – Resultados resumidos de incerteza de medição das forças de calibração.	55
Tabela 5.6.2 – Resultados de massa adicionada ao sistema <i>versus</i> força de tração da máquina.	57
Tabela 5.8.1 – Informações referentes às incertezas percentuais.....	57

SUMÁRIO

CAPITULO 1: INTRODUÇÃO.....	11
CAPITULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Fenômeno da fragilização por hidrogênio	12
2.2 Ensaio de tração sob carga constante	15
2.3 Conceitos de metrologia aplicados a calibração	19
CAPÍTULO 3: DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	21
3.1 Princípio de funcionamento do equipamento HMAX	21
3.2 Apresentação do equipamento desenvolvido pelo LTAD	22
CAPÍTULO 4: METODOLOGIA ADOTADA	26
4.1 Procedimentos para levantar curva de validação do equipamento.....	30
CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5.1 Vantagens operacionais da otimização do projeto protótipo	32
5.2 Reduções de tempo e custo de fabricação.....	37
5.3. Sistema de Alavanca.....	38
5.4 Modificações no garfo de fixação inferior.....	41
5.5 Incerteza de medição das massas.....	46
5.6 Incertezas de medição das cargas do sistema	50
5.7 Curva de validação do equipamento	53
5.8 Análise das incertezas associadas a força de tração do equipamento	55
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES.....	57
CONCLUSÕES	57
CAPÍTULO 7: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
ANEXOS	58

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

A fragilização por hidrogênio é um fenômeno severo que afeta quase todos os grupos de metais e ligas, dependendo do meio em que estão inseridos (Barnoush *et al.*, 2010). Devido ao hidrogênio apresentar diâmetro atômico muito pequeno e, portanto, fácil mobilidade no estado sólido, ele difunde facilmente no material, interagindo com sua microestrutura, levando, conseqüentemente, à fragilização dos mesmos (Martiniano, 2016).

O presente trabalho tratou-se da concepção, simulação e fabricação de um equipamento mecânico protótipo que seguiria as diretrizes firmadas pelo LTAD e que atendesse a norma BS ISO 16573 (ISO, 2015) para avaliação da fragilização por hidrogênio em aços de alta resistência e baixa liga, tendo em vista o ambiente exposto dos mesmos.

Após a fabricação do equipamento protótipo, a próxima etapa seria a realização dos ensaios para confirmar a funcionalidade mecânica da máquina. Antes disso, o primeiro passo foi levantar a curva de operação do equipamento, a partir dessa informação, tem-se uma validação operacional do projeto, sabendo a real carga de tração nos ensaios. A calibração do equipamento será a escala de referência para condicionar os pesos mortos no suporte, sabendo previamente a reação de tração desejada no corpo de prova. Ademais, se faz necessário otimizar o equipamento, visto uma necessidade de reduzir custo e prazo de fabricação dos componentes.

O trabalho foi direcionado apresentando primeiramente as melhorias concebidas no projeto e posteriormente os cálculos de validação da máquina. O resultado final, é um equipamento calibrado, validado e com um custo de fabricação dentro do estipulado pelo LTAD.

CAPITULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica dos principais temas de estudo necessários para o desenvolvimento deste trabalho. São abordados os seguintes tópicos: fragilização por hidrogênio, ensaios de tração sob carga constante, metrologia aplicada à calibração de equipamentos, procedimentos de calibração e operação e otimização para fabricação de equipamentos mecânicos.

2.1 Fenômeno da fragilização por hidrogênio

A fragilização por hidrogênio é um fenômeno severo que afeta grande parte dos aços utilizados na indústria óleo e gás. O átomo de hidrogênio, devido ao seu pequeno volume, pode se difundir intersticialmente e interagir de várias formas com a estrutura atômica dos materiais, deteriorando suas propriedades mecânicas (Ferreira, 2017).

De acordo com Rosado (2011) o fenômeno da fragilização por hidrogênio ocorre devido ao aprisionamento do hidrogênio nos interstícios cristalinos do material ou nos seus defeitos. A interação do hidrogênio, como demonstra a Figura 2.1, com a microestrutura pode provocar reduções nas propriedades mecânicas de tenacidade e ductilidade dos materiais. Assim, materiais que normalmente são dúcteis podem exibir comportamento frágil na presença do hidrogênio (Masoumi; Silva; De Abreu, 2016).

A forma do hidrogênio se movimentar através da rede cristalina é condicionada pela estrutura cristalina dos materiais, pelo tamanho dos sítios intersticiais e pelos defeitos presentes, tais como: lacunas, discordâncias, contorno de grãos, interstícios, precipitados e inclusões não-metálicas (Rosado, 2011). Tais defeitos microestruturais podem atuar como sítios aprisionadores de hidrogênio. Dependendo da energia de interação desses defeitos com o átomo de hidrogênio, os mesmos podem aumentar ou não a susceptibilidade do material à fragilização. Esses defeitos são condicionados pelos processos de fabricação, tratamento térmico e interação entre os elementos químicos (Ferreira, 2017).

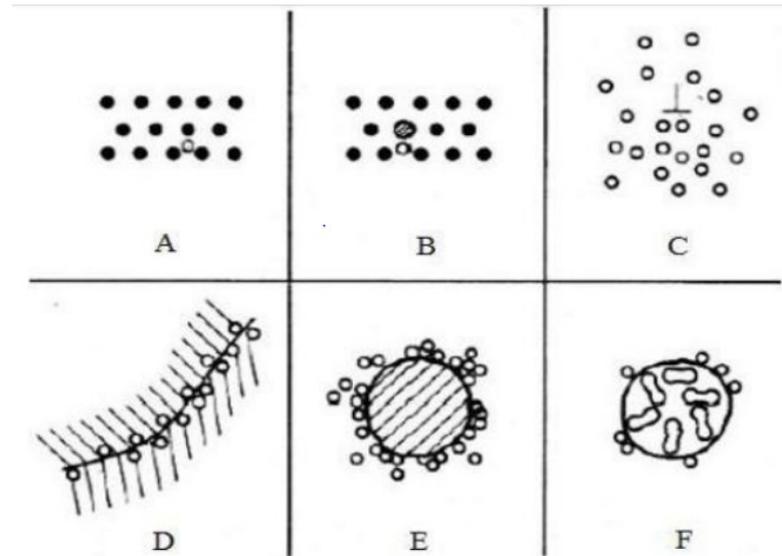


Figura 2.1.1 - Interação entre o hidrogênio e a microestrutura do material: a) Solução sólida, b) Par hidrogênio e soluto, c) Em discordâncias, d) Nos contornos de grãos, e) Interface entre matriz e partícula, f) H₂ presente nos vazios (THOMPSON, 1980).

Existem dois principais mecanismos de fragilização por hidrogênio, o primeiro deles é o *HELP (Hydrogen Enhanced Localized Plasticity)* – Plasticidade Localizada Facilitada pelo Hidrogênio. Este mecanismo é baseado no aumento local de plasticidade em determinadas regiões do material. Segundo essa teoria, a presença do hidrogênio aumenta a mobilidade das discordâncias, aumentando a densidade de discordâncias em regiões de alta triaxialidade. O aumento de plasticidade local do material resulta em propagação de trincas devido à coalescência de microcavidades ao longo de planos cristalográficos preferenciais (Knarbak, 2015).

O outro mecanismo é o *HEDE (Hydrogen Enhanced Decohesion)* – Decoesão facilitada pelo hidrogênio. Esta segunda teoria é baseada na hipótese de que o hidrogênio reduz localmente a força coesiva entre os átomos da estrutura cristalina pela dilatação do reticulando cristalino e, assim, reduz-se a energia necessária para a fratura do material. Isto leva ao enfraquecimento das ligações metálicas em regiões próximas a pontas de trincas devido à alta concentração local de hidrogênio, de maneira que a decoesão irá ocorrer em planos preferenciais (Robertson *et al.*, 2015). O mecanismo de decoesão é normalmente utilizado para explicar o fenômeno de fragilização quando há presença de fratura intergranular (Martin *et al.*, 2012). É importante observar também que em um mesmo material, ambos os mecanismos podem ser atuantes.

A permeação do hidrogênio para a estrutura cristalina do material pode ocorrer durante os estágios iniciais de sua fabricação ou assistido pelo meio, tais como: processo de soldagem, galvanização, reação catódica durante a corrosão, processos de eletrodeposição de revestimentos metálicos, etc. (Melo, 2019). Com o tempo, esse hidrogênio é capaz de alterar as propriedades mecânicas do material. Na Figura 2.1.2 é possível observar o efeito do hidrogênio, por meio de um ensaio de tração com baixa taxa de deformação, na ductilidade de um aço com 3 % Si com três tamanhos médios de grão (14, 26 e 35 μm). Nesse trabalho foram comparadas as propriedades mecânicas ao ar e em atmosfera contendo hidrogênio.

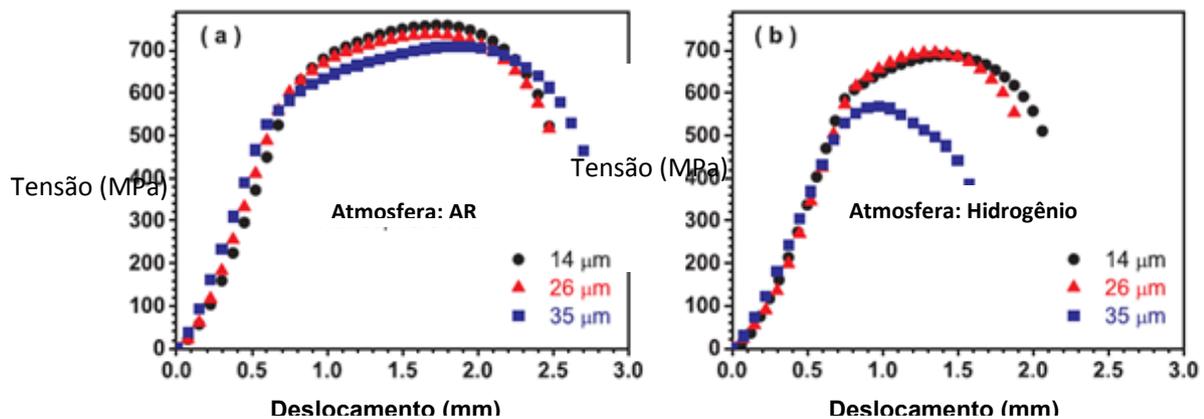


Figura 2.1.2 Gráfico tensão de formação obtidos para diferentes tamanhos de grão em ambiente inerte (a) e com carregamento de hidrogênio (b) (Adaptado de Park, Kang, Liu, 2017).

No momento em que o aço é exposto a algum meio hidrogenado (líquido ou gasoso), ocorre a formação de hidrogênio iônico (H^+) que, posteriormente, é adsorvido (impregnação do hidrogênio na superfície) pelo material. Adiante, o hidrogênio é absorvido e se difunde na microestrutura seguindo para os locais de maior tensão hidrostática, devido ao aumento dos volumes dos interstícios nesses locais. A concentração de hidrogênio nesses locais aumenta até atingir uma concentração crítica para aquelas condições de tensão mecânica aplicada. Após atingir essa concentração crítica, que varia de material para material, ocorre a iniciação da trinca e em seguida, a falha do material (WANG, 2006).

É perceptível a perda de resistência mecânica entre o aço exposto ao ambiente hidrogenado em comparação ao ambiente inerte (ar) como mostra a figura 2.1.2. A

partir dessa constatação, vários estudos se aprofundaram no conhecimento desse fenômeno com objetivo de evitá-lo ou minimizá-lo, uma vez que seus impactos para os projetos mecânicos são prejudiciais no que diz respeito a perda de resistência mecânica dos componentes.

2.2 Ensaios de tração sob carga constante

Existem diferentes métodos para avaliar a susceptibilidade a fragilização de materiais metálicos, entre eles os ensaios de tração sob carga constante. Eles podem ser realizados em sistemas de peso morto, molas ou pela deflexão de um anel metálico (*proof ring*) (Figura 2.2.71). Em ensaios de carga constante, após a formação da trinca, a mesma cresce rapidamente, levando à fratura do material, enquanto que em ensaios de deslocamento constante, a trinca cresce de forma mais lenta até atingir uma taxa bem pequena de propagação, quase nula (Ferreira, 2017).

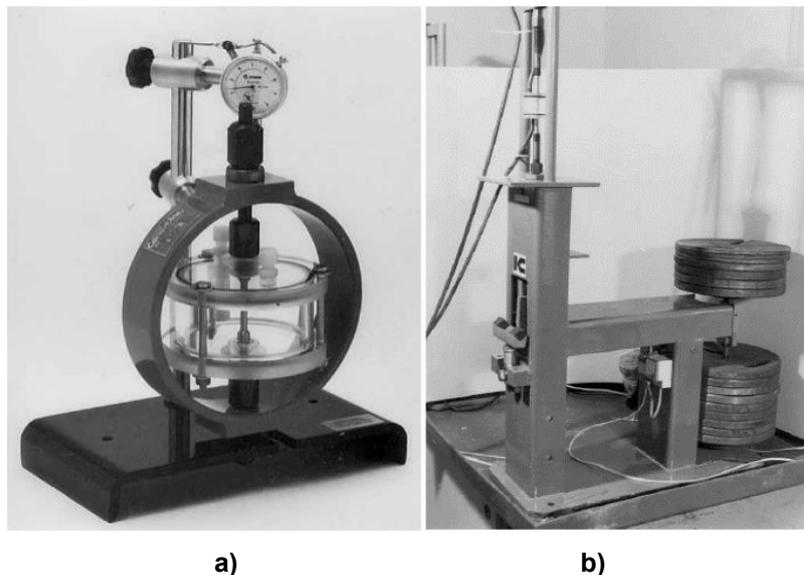


Figura 2.2.1 Sistema de carregamento com (a) quadro auto carregável (*proof ring*) e (b) ensaio peso morto (NACE, 2005).

O ensaio de tração sob carga constante geralmente produz como resultado final um gráfico da tensão aplicada no corpo de prova *versus* o tempo para falha (Figura 2.2.1) ou concentração de hidrogênio *versus* tempo para falha. Este gráfico permite obter a tensão limiar (σ_{th}) ou concentração crítica de hidrogênio (H_{th}), abaixo da qual não ocorrerá falha por fragilização assistido pelo meio em condições semelhantes ao ensaio. Por razões práticas, o teste geralmente é finalizado após um tempo pré-

determinado, normalmente 100 ou 200 horas. Neste caso, a presença de trincas ou o número de trincas é utilizado como critério de falha ou suscetibilidade (Ferreira, 2017). Para os ensaios, geralmente, são especificados valores de tensão da ordem de 30 a 90% do limite de escoamento real do material. Segundo a norma ISO 16573:2015, após o teste de carga constante, o teor de hidrogênio difusível no corpo de prova deve ser medido imediatamente (ISO, 2015).

Ao ensaiar amostras contendo várias concentrações de hidrogênio difusível, pode ser obtida a relação entre o teor de hidrogênio difusível e tempo de ruptura das amostras. O teor de hidrogênio difundido pode ser medido por análise de dessorção térmica utilizando o corpo de prova após a falha. Este método pode proporcionar comparação qualitativa da resistência à fragilização por hidrogênio entre os vários aços de alta resistência com diferentes microestruturas ou composições (ISO, 2015).

Os gráficos das Figuras 2.2.2 e 2.2.3 apresentam resultados típicos dos ensaios de carga constante. A Figura 2.2.3 representa as informações do gráfico tipo 1, no qual o eixo das abscissas representa o tempo de ensaio até a ruptura (em escala logarítmica, normalmente em horas) e o eixo das ordenadas representa o hidrogênio difusível na microestrutura do aço em fração de massa (ppm). Nesse caso, uma mesma tensão é aplicada em todos os corpos de prova, porém eles possuem diferentes concentrações de hidrogênio.

Já a Figura 2.2.2 é do gráfico tipo 2, apresenta no eixo das abscissas o tempo de ensaio até a fratura, e no eixo das ordenadas ele traz o coeficiente entre a tensão aplicada e a tensão máxima para ruptura do material, ou simplesmente a tensão aplicada, (ISO, 2015).

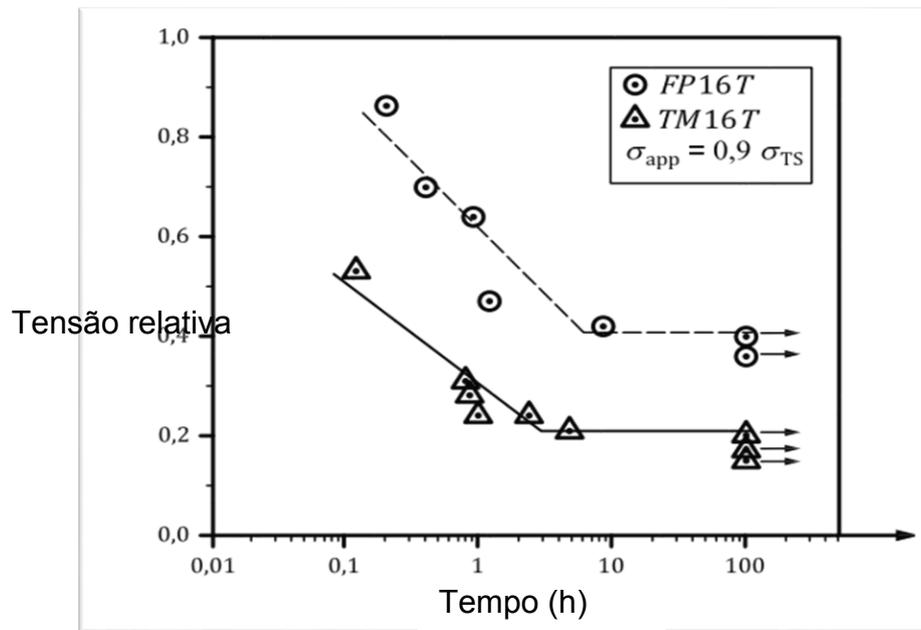


Figura 2.2.2 - Exemplo dos resultados do ensaio de carga constante gráfico tipo 2: o eixo Y representa tensão aplicada *versus* eixo X que representa tempo até ruptura, para dois materiais diferentes (ISO, 2015).

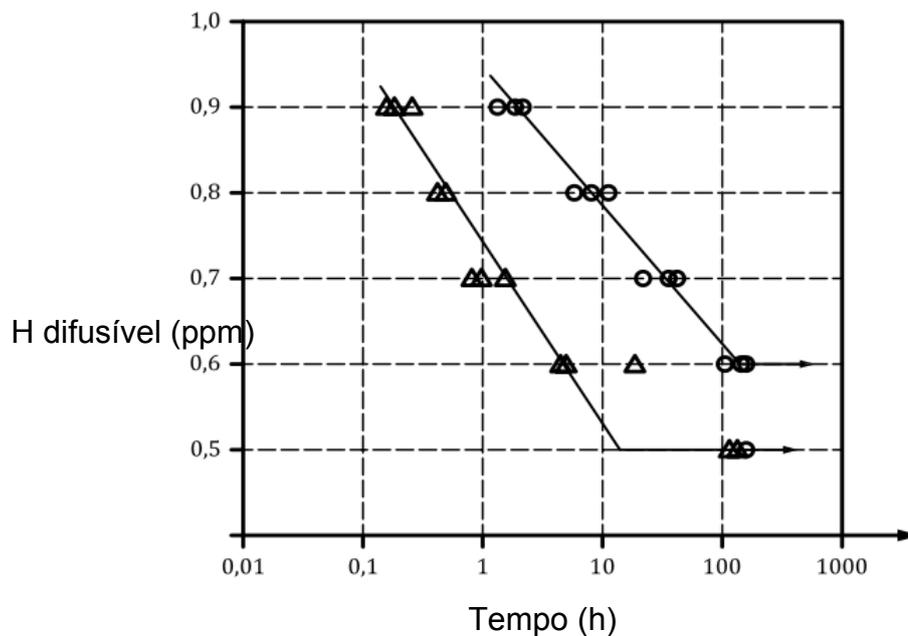


Figura 2.2.3- Exemplo dos resultados do ensaio de carga constante tipo 1: teor de hidrogênio difusível *versus* tempo até a ruptura para dois materiais diferentes (ISO, 2015).

De acordo com a norma ISO 16573 (ISO, 2015), a concentração crítica de hidrogênio para um determinado nível de tensão aplicada é a concentração máxima de hidrogênio no material que após um determinado período (100 ou 200 h) não provoca falha, ou seja, para aquela combinação de tensão e concentração de hidrogênio o material não é levado à fratura. Dessa forma, quanto maior a concentração crítica de hidrogênio, mais resistente é o material em relação à fragilização por hidrogênio.

Pode concluir-se que a susceptibilidade à fragilização por hidrogênio é maior se o tempo até a falha é mais curto quando testados na mesma proporção de tração e de absorção de hidrogênio, ou seja, a concentração de hidrogênio necessária para fraturar o corpo de prova é menor. Como um método de avaliação adicional, a concentração de hidrogênio local e a carga de ensaio podem ser calculadas pelo método numérico, para comparar os resultados de amostras com diferentes fatores de concentração de tensões (ISO, 2015).

2.3 Conceitos da metrologia aplicados à calibração

Os procedimentos de calibração seguem normas e procedimentos estabelecidos pelo INMETRO e exigem um tratamento prévio de dados para determinar as incertezas do processo de medição e erros atrelados a eles (INMETRO, 2012). Nesse tópico, são apresentados os conceitos aplicados no cálculo da incerteza de medição das massas e também da incerteza de medição de força do equipamento.

1- Calibração: é um procedimento experimental em que são estabelecidas relações entre valores indicados por um instrumento de medida e valores considerados exatos. O resultado de uma calibração permite tanto o estabelecimento dos valores do mensurando para as indicações apresentadas pelo instrumento, como a determinação das correções a serem aplicadas. A calibração, nada mais é que um processo de comparação entre o resultado de uma medição com o valor já pré-estabelecido, como por exemplo o comprimento de um bloco padrão. O certificado de calibração apresenta informações acerca da funcionalidade metrológica do sistema de medição e descreve os procedimentos adotados. (JUNIOR, 2002).

2- Calibração direta: a medição obtida pelo instrumento a ser calibrado é realizado em medidas materializadas, cada uma com seu valor verdadeiro, convencional e

suficientemente conhecido. Dessa forma, o resultado da medição é comparado com um resultado já aceito como exato e verdadeiro. São exemplos de medidas materializadas: blocos padrão (comprimento), massas padrão, pontos de fusão de substâncias puras, entre outras (JUNIOR, 2002).

3- Incerteza de medição: a incerteza do resultado de uma medição demonstra a falta de ciência exata do valor do calculado. Após as correções resta-se somente uma estimativa do valor mensurado vinda da incerteza proveniente do processo de medição. Na prática, existem muitas fontes possíveis de incerteza em uma medição, como: definição incompleta do mensurando, prática incorreta de definição do mensurando, amostragem não-representativa, desconhecimento dos efeitos das condições ambientais sobre a medição, erro de leitura de instrumentos analógicos pelo operador, valores inexatos dos padrões de medição, aproximações e suposições incorporadas ao processo de medição pelo operador do instrumento e utilização inadequada do instrumento de medição para determinada situação (JUNIOR, 2002).

4- Incerteza padrão de medição: é uma medida do quanto os resultados se diferem da média de uma sequência de medições, essa diferença pode ser observada pelo valor do desvio padrão (JUNIOR, 2002).

5- A incerteza padrão combinada (U_c): é calculada através do desvio padrão resultante da ação combinada das várias fontes de incertezas consideradas, esse cálculo considera a ação simultânea de todas as fontes de incerteza associadas ao processo de medição (JUNIOR, 2002).

6- Incerteza expandida: quando utilizada na engenharia é comum trabalhar com níveis de confiança de 95%. Para atingir este nível de confiança, a incerteza padrão combinada (U_c) deve ser multiplicada por um coeficiente numérico, o coeficiente de *Student*. Este fator é conhecido por fator de abrangência, representado pelo símbolo "K95" quando o nível de confiança 95% é usado. A incerteza expandida ($U_{95\%}$) corresponde à faixa de valores que enquadra a incerteza do valor com nível de confiança de aproximadamente 95%. É estimada pela fórmula: " $U_{95\%} = U_c \times K_{95}$ " sendo, U_c é a incerteza padrão combinada, K 95% é o fator de abrangência e $U_{95\%}$ representa a incerteza expandida para o nível de confiança 95%. Neste caso, a incerteza expandida é estimada pela multiplicação da incerteza padrão combinada

pelo respectivo fator de abrangência que reflete a faixa de dúvida ainda presente na medição (JUNIOR, 2002).

7- Fator de abrangência: é determinado em função do número de graus de liberdade efetivo, obtido a partir da equação de *Welch-Satterthwaite*. O fator de abrangência é obtido da tabela (figura 3.2) de coeficientes apresentada nas metodologias de cálculo. Após o cálculo de do grau de liberdade efetivo, determina-se o fator de abrangência e finalmente calcula-se a incerteza expandida (JUNIOR, 2002).

8- Grau de liberdade efetiva (V_{eff}): grau de liberdade efetivo é o número de graus de liberdade associado à incerteza padrão combinada, utilizando a equação de *Welch-Satterthwaite*, apresentada no tópico das metodologias. O número de graus de liberdade é diretamente proporcional a confiabilidade adotada como referência no cálculo, na calibração apresentada foi utilizado um índice de 95% de confiabilidade (JUNIOR, 2002).

CAPÍTULO 3

DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do projeto mecânico do equipamento; também é mostrado o princípio de funcionamento da máquina. A partir disso, tem-se a motivação para os procedimentos de validação, calibração e otimização.

3.1 Princípio de funcionamento do equipamento HMAX

A base de todo esse projeto, foi o desenvolvimento inicial de um equipamento mecânico, denominado por HMAX, para ensaios de tração sob carga constante para avaliar níveis críticos de hidrogênio no material. Para compreensão dos procedimentos descritos nesse trabalho, inicialmente será apresentado o princípio físico de funcionamento da máquina. A imagem da Figura 3.1.1 representa a versão protótipo do equipamento, projetado por VIANA (2018).

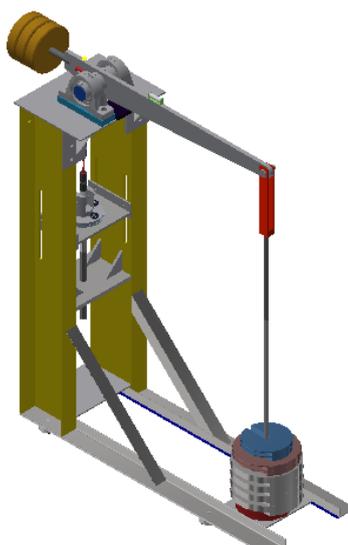


Figura 3.1.1 - Vista isométrica do HMAX.

O princípio físico de funcionamento do equipamento se compara com um sistema de alavanca como mostrado na Figura 3.1.2, na qual é posicionado os pesos

no suporte do braço de força, sendo que a resistência do “Braço de resistência” neste caso é o corpo de prova sujeito ao esforço de tração.

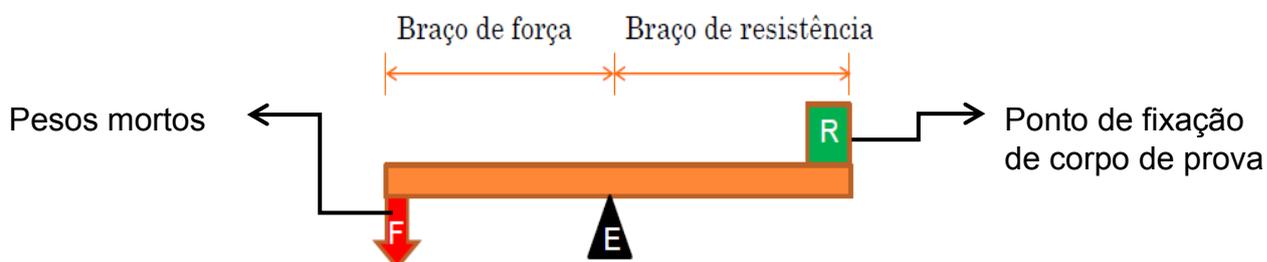


Figura 3.1.2 Sistema de alavanca três pontos. (Adaptado de ANTUNES, 2015).

Todo esse sistema de ganho de força é montado sobre uma estrutura rígida, dimensionada para suportar as cargas do ensaio. O sistema de alavanca foi utilizado como princípio de construção do projeto, uma vez que é possível uma relação de ganho de 10:1 em um único braço de força. O ponto de apoio E, como mostrado na figura, é o ponto de rotação do sistema. No projeto, esse ponto de rotação é um mancal de rolamento de esfera, projetado para permitir a rotação com mínimo atrito, fato que contribui para maximizar a ampliação de carga de tração no corpo de prova.

3.2 Apresentação do equipamento protótipo

Para uma melhor compreensão do princípio de funcionamento da máquina, dividiu-se ela em três subconjuntos. A seguir é apresentada a funcionalidade de cada componente no momento do ensaio, bem como o princípio pelo qual eles foram projetados (ver Figura 3.2.1).

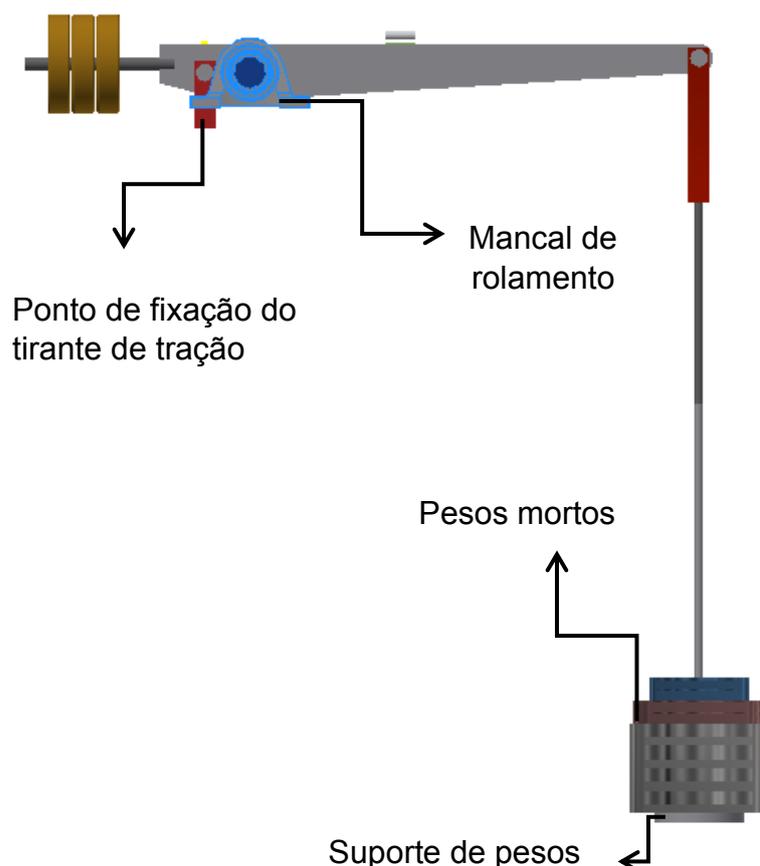


Figura 3.2.1- Subconjunto de tração e fixação do corpo de prova.

O subconjunto mostrado na Figura 3.2.1 tem como objetivo realizar a multiplicação da carga adicionada ao suporte. A relação de alavanca teórica é de 10:1, dessa forma, a cada 10 kgf de carga adicionados ao suporte, a reação esperada no corpo de prova será de 100 kgf. Sabe-se que esse é um fato que não ocorre de forma precisa, uma vez que existem fatores físicos que impedem essa exatidão. Esse contexto será abordado durante as metodologias para a validação do equipamento.

O sistema de fixação do corpo de prova (Figura 3.2.2) consiste em adaptadores que são rosqueados no olhal de tração, fixados por pinos nos garfos de fixação. Esse sistema permite uma montagem do conjunto fora da máquina, sendo posteriormente inserido e travado pelos pinos. Ele foi projetado para permitir dois graus de liberdade para o corpo de prova, garantindo um alinhamento constante e, conseqüentemente, um esforço de tração durante a realização do ensaio. A mesa de regulagem de altura permite o ajuste de altura do garfo de fixação inferior, podendo trabalhar com diferentes comprimentos de corpo de prova. Tanto o garfo de fixação inferior e superior permite o movimento de rotação do conjunto, o que garante a facilidade na montagem.

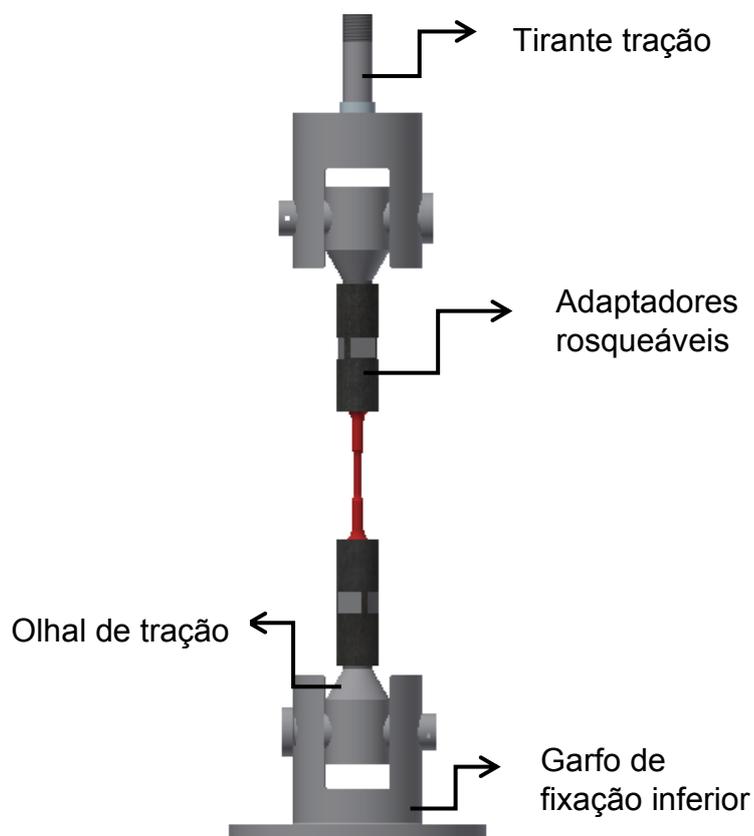


Figura 3.2.2 - Subconjunto de tração e fixação do corpo de prova.

A estrutura principal (ver Figura 3.2.3) foi projetada para proporcionar ao ensaio a maior estabilidade possível. O subconjunto é composto por chapas, perfis de aço laminado e cantoneiras, todos fixados com objetivo de tornar o equipamento rígido. A estrutura foi dimensionada considerando um coeficiente de segurança igual a 2, podendo atuar com até 800 kgf de carga no suporte dos pesos.

A chapa inferior fixa de regulagem é o aparato que recebe toda carga de reação no corpo de prova, possuindo reforços laterais em forma de mão francesa, que garantem a rigidez e resistência necessária para suportar o esforço mecânico.

Na posição onde se encontra o apoio do suporte de pesos, foi colocado um aparato de borracha para amortecer o impacto das massas no momento em que o corpo de prova fratura. Além disso, na base inferior da estrutura existem batentes reguláveis, que vão permitir o alinhamento da estrutura para realização dos procedimentos de calibração e operação, garantindo que o esforço no corpo de prova seja exclusivamente de tração.

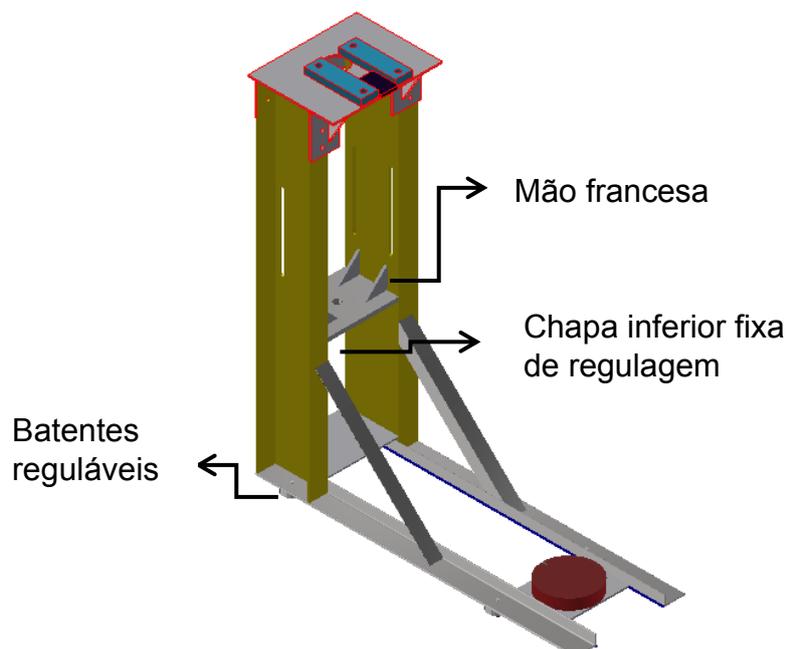


Figura 3.2.3 -Subconjunto estrutura principal.

A tabela 3.1 contém os parâmetros pré-definidos pelo LTAD para o projeto HMAX. A partir dessas informações, iniciou-se o planejamento para todas as etapas do projeto.

Tabela 3.1 – Parâmetros definidos do projeto HMAX.

Grupo	Parâmetro	Definição / Valores limites selecionados
Corpo de prova	Dimensões	5 mm na região útil
Corpo de prova	Limite de escoamento	1100 MPa
Corpo de prova	Tipos de amostras	Cilíndrica lisa ou entalhada
Ensaio	Tempo estimado máximo de ensaio	200 h
Ensaio	Tensões de ensaio	Faixa de 0,3 a 0,9 do limite de escoamento
Simulação estrutural	Esforço Máximo	800 kgf no suporte de pesos
Sistema de força	Força máxima	4000 kgf no suporte de pesos
Sistema de força	Coeficiente de segurança	2
Tração das amostras	Carga máxima	400 kgf
Tração das amostras	Relação do braço de alavanca.	10:1
Tração das amostras	Transmissão de força	Tirante rígido

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA ADOTADA

Neste tópico são abordadas as metodologias e procedimentos adotados para realização da calibração das massas e validação do equipamento HMAX, para essa calibração são utilizadas normas específicas do INMETRO - GUIA DE EXPRESSÃO DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO (INMETRO, 2012). Também são apresentadas as melhorias adotadas no projeto protótipo. O aperfeiçoamento foi idealizado pelo autor do trabalho, adotando princípios de autenticidade e criatividade, objetivando sempre diminuir tempo e custo de fabricação.

Ao calcular a incerteza dessa curva de operação, primeiramente, é indispensável o cálculo da incerteza da massa dos pesos mortos. Com o cálculo da incerteza das massas dos pesos mortos também será calculada a incerteza da força aplicada ao corpo de prova, validando, assim, a curva de operação do equipamento.

Ainda que se utilize um instrumento de medição calibrado, permanecem outros fatores que levam a incertezas de medição, como será apresentado na metodologia do cálculo de incerteza. Além disso, a validação operacional da máquina se faz necessária por três fatores, a saber:

- a) A relação de alavanca 10:1 alcançada a partir da fabricação do braço não é uma relação exata devido a erros inerentes aos processos de fabricação;
- b) Durante a prática do ensaio existe uma mínima deflexão do braço de alavanca;
- c) O alinhamento do corpo de prova não é exato o que também leva a variação na relação de tração.

De acordo com o GUM, Guia para determinação de incerteza em medição (INMETRO, 2012), o cálculo da incerteza em uma medição deve ser realizado empregando-se o seguinte procedimento geral:

- 1) Definição do mensurando ou variável de saída;

2) Identificação das variáveis que podem afetar o resultado da medição do mensurando (variáveis de entrada ou fatores de influência), três variáveis sempre estarão presentes:

- Variabilidade das leituras (desvio-padrão);
- Resolução finita do sistema de medição;
- Incerteza associada à calibração do sistema de medição ou dos equipamentos que compõem o sistema de medição.

3) Definição do modelo matemático: expressão do mensurando em função de todas as variáveis de influência, por meio de um modelo matemático;

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i)$$

Onde:

- Y: Variável de saída
- X_i com $i = 1 \dots N$ – Variáveis de entrada.

4) Após identificar as variáveis, iniciam-se os cálculos:

A. Média e desvio padrão amostral, calculados pelas fórmulas:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Onde:

- N: número de leituras realizadas
- X_i com $i=1 \dots N$: variáveis de entrada.
- \bar{X} : média das leituras realizadas

B. Incerteza padrão relacionada a calibração do instrumento:

- Calculada para uma distribuição normal, onde a estimativa provém de especificações do fabricante, certificados de calibração, manuais técnicos ou outras fontes.
- Avaliação de incerteza do Tipo B:

$$U(x_i) = \frac{U}{K}$$

Onde:

- U: Incerteza declarada, valor de incerteza expandida encontrada no certificado de calibração, para aquela faixa de medição realizada.
- K: Fator de abrangência encontrado no certificado de calibração do instrumento utilizado;
- X_i: São as incertezas avaliadas;

C. Incerteza padrão associada a resolução da escala:

- Distribuição de probabilidade retangular
- Avaliação de incerteza do Tipo B

$$U(x_i) = \frac{\text{Valor}}{\text{Divisor}}$$

Onde:

- Valor: grandeza real da variável declarada, se no caso é a incerteza da resolução, então, o valor utilizado é a resolução do instrumento de medição.
- Divisor: valor utilizado de acordo com a tabela de distribuição de probabilidade.

D. Incerteza padrão associada ao desvio padrão amostral:

- Distribuição de probabilidade “*t-student*”
- Avaliação de incerteza do Tipo A

$$U(X_i) = \frac{\text{Valor}}{\sqrt{N}}$$

Onde:

- Valor: grandeza real da variável declarada, no caso é a incerteza do desvio padrão amostral.
- N: número de medições realizadas para se encontrar o valor da média e do desvio padrão, ou seja, o número de leituras utilizadas.

E. Cálculo a incerteza padrão combinada para as grandezas de entrada, utilizando a equação abaixo.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i)} \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$$

Onde:

- $C_i = \frac{\partial F}{\partial x_i}$;
- $U_c(y)$: Incerteza padrão combinada;
- $U(x_i)$: Incertezas padrão calculadas nos itens anteriores.

F. Cálculo do grau de liberdade efetivo pela equação de *Welch-Satterwaite*:

$$v_{ef} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u^4(y_i)}{v_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{(u(x_i) \cdot c_i)^4}{v_i}}$$

Onde:

N: número de variáveis de entrada;

V_i : número de graus de liberdade de cada variável de entrada;

$U_c(y)$: incerteza-padrão combinada da variável de saída;

$U(y_i)$: incerteza-padrão de cada variável de entrada na unidade do mensurando ou variável de saída;

$U(x_i)$: incerteza-padrão de cada variável de entrada;

C_i : coeficiente de sensibilidade do mensurando em relação a cada variável de entrada x_i .

G. Seleção na tabela do fator de abrangência corrigido para o novo grau de liberdade efetivo.

Tabela 4.1 - Tabela com o fator de abrangência em função de GL (graus de liberdade efetivo) e PA (probabilidade de abrangência)(Kalid, 2017).

GL↓ PA→	50,00%	68,27%	90,00%	95,00%	95,45%	99,00%	99,80%
1	1,00	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	318,31
2	0,82	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	22,33
3	0,76	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	10,21
4	0,74	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	7,17
5	0,73	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,89
6	0,72	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	5,21
7	0,71	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,79
8	0,71	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,50
9	0,70	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,30
10	0,70	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	4,14
20	0,69	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,55
30	0,68	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,39
40	0,68	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,31
50	0,68	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,26
60	0,68	1,01	1,67	2,00	2,04	2,66	3,23
80	0,68	1,01	1,66	1,99	2,03	2,64	3,20
120	0,68	1,00	1,66	1,98	2,02	2,62	3,16
150	0,68	1,00	1,66	1,98	2,02	2,61	3,15
250	0,68	1,00	1,65	1,97	2,01	2,60	3,12
500	0,67	1,00	1,65	1,96	2,01	2,59	3,11
∞	0,67	1,00	1,64	1,96	2,00	2,58	3,09

Considerando o grau de liberdade efetivo calculado no item anterior e a probabilidade de abrangência estabelecida em 95%, pode-se selecionar o fator de abrangência para calcular o a incerteza expandida da medição.

VII. Cálculo da incerteza expandida $U(y)$ associada à variável de saída y , que no caso é a massa dos pesos mortos.

$$U(Y) = k * U_c$$

Onde:

- K: fator de abrangência tabelado;
- U_c (y): incerteza padrão combinada.

4.1 Procedimentos para determinação da curva de validação do equipamento

Como mencionado anteriormente, é necessário realizar a curva de validação do equipamento e seus determinados erros, dessa maneira foi estabelecido um

procedimento para obter esse gráfico. Abaixo, é apresentado o passo a passo do procedimento.

Etapa 1: Inicialmente é necessário nivelar a estrutura do equipamento em relação ao piso no qual está apoiado, utilizando a regulagem dos vibra stop posicionados na parte inferior da máquina, foi utilizado um nível bolha em diferentes partes do equipamento

Etapa 2: Posicionar a célula de carga no equipamento. Foi utilizada a célula de carga U2B HBM com faixa nominal 0 – 50 kN e resolução de 0,1 kgf. O certificado de calibração encontra-se nos Anexos.

Etapa 3: Alinhar a alavanca utilizando o nível de bolha posicionado na parte superior do braço.

Etapa 4: Iniciar as leituras utilizando os valores obtidos pela célula de carga, fazendo 3 leituras para cada nível de massa dos “pesos-mortos” colocada.

Etapa 5: Adiciona-se cada peso na ordem numerada, mantendo sempre a sequência do mais pesado para o mais leve. Cada medição deve ser realizada 3 vezes, respeitando o tempo de estabilização da célula de carga.

Etapa 6: Utilizando *software*, calcula-se a média dos valores encontrados. A partir desses dados, é feita a curva de validação, gerando a equação matemática que descreve o comportamento da curva.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são abordados os resultados obtidos com a otimização da máquina em relação ao tempo, custo de fabricação e facilidade operacional. Além disso, serão apresentados resultados obtidos na calibração das massas padrão, cálculos de incerteza e a curva de validação carga *versus* massa adicionada.

5.1 Vantagens operacionais da otimização do projeto protótipo

Nesse tópico é apresentada uma comparação dos subconjuntos do equipamento protótipo com os da última versão da máquina. Serão mostradas as mudanças após as melhorias, apresentando também as vantagens operacionais obtidas. Na Figura 5.1.1 tem uma vista geral dos dois equipamentos: antes e após as melhorias implementadas.

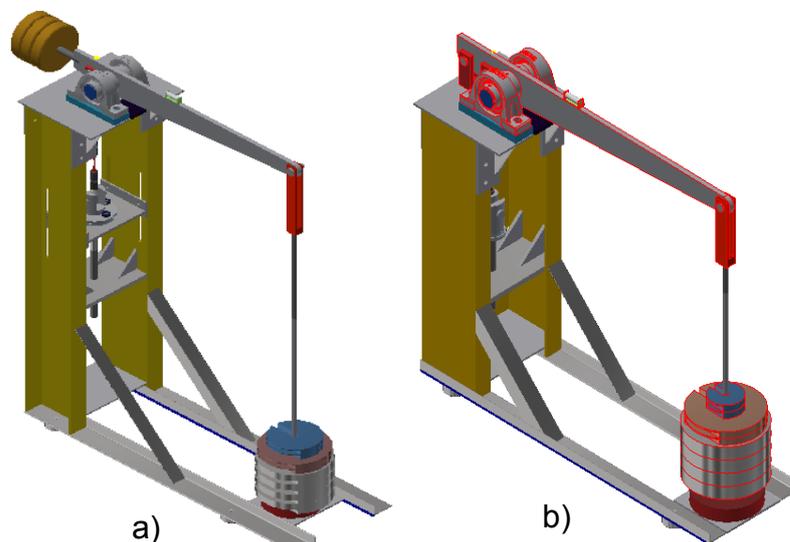


Figura 5.1.1 Comparativo entre os equipamentos: a) HMAX protótipo, b) HMAX atualizado.

1) Subconjunto braço de alavanca.

A figura 5.1.2 apresenta o sistema utilizado para transmitir a carga do sistema de pesos mortos antes e depois da otimização. A principal modificação foi à retirada do sistema de contrabalanceamento da alavanca. A princípio, o projeto continha 3

contrapesos posicionados na parte anterior do braço de alavanca. Sua função era nivelar e equilibrar as cargas do equipamento, antes do início do ensaio. O braço de alavanca possui um nível de bolha na parte superior e os contrapesos eram rosqueáveis de forma a ajustar a balança o mais próximo possível do equilíbrio estático.

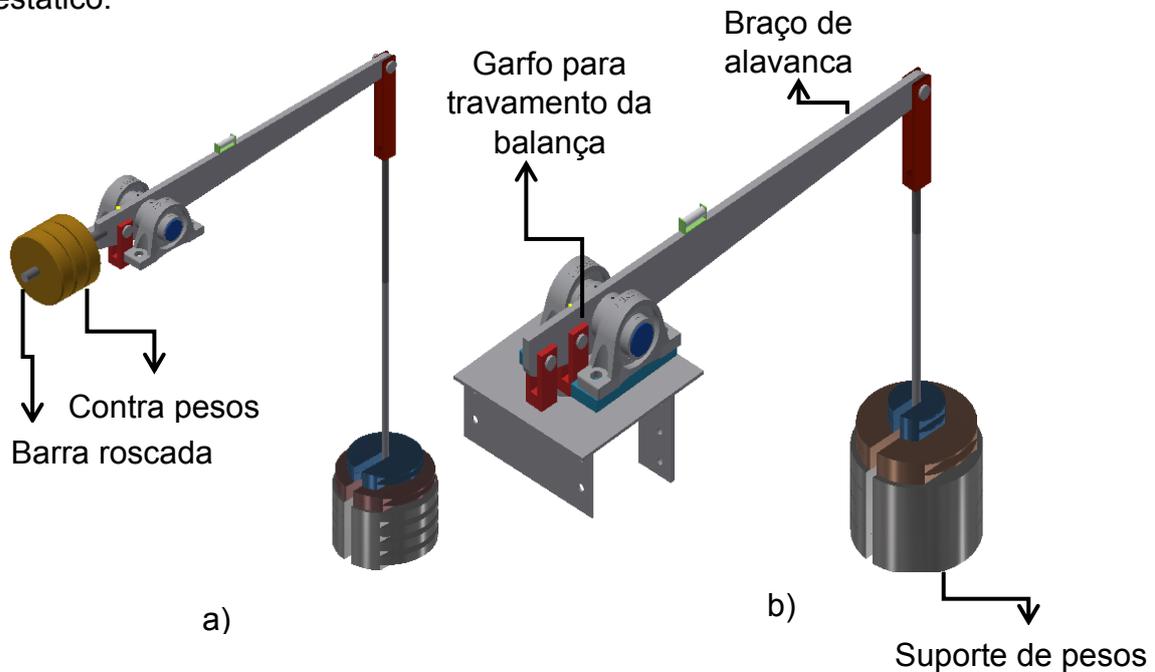


Figura 5.1.2 Comparação braço de alavanca e pesos: a) HMAX protótipo; b) HMAX atualizado.

Avaliando sua funcionalidade irrelevante para o ensaio, foram retirados esses componentes, tornando o equipamento mais leve e modificando a forma de nivelamento da balança. A partir de então, o peso próprio do braço e dos suportes passaram a entrar no cálculo de força do ensaio, sendo mais um contribuinte para a carga atuante. Ou seja, sem o contrapeso a tração já se inicia desde o momento da montagem do corpo de prova na máquina, sendo somado com os pesos adicionados ao suporte. Os ensaios geralmente operam com uma carga de tração de 30 000 N no corpo de prova, sendo que desses, aproximadamente 1300 N são oriundos do desequilíbrio gerado pela retirada dos contrapesos.

A figura 5.1.3b, apresenta o braço de alavanca e o suporte de pesos do equipamento HMAX atualizado. Com a retirada dos contrapesos, modificou-se a forma de alinhamento da balança, sem esse prévio alinhamento a montagem se torna complicada, uma vez que o corpo de prova tem uma posição determinada durante a montagem do aparato de ensaio. Com isso, foi projetado um garfo para travamento inicial do braço, como indicado na figura acima. Após a montagem do corpo de prova,

pode-se retirar o pino que trava esse garfo, liberando a balança, posteriormente, adiciona os pesos e se inicia o ensaio. Com essa modificação a operação se tornou mais simples, uma vez que não é mais necessário fazer o equilíbrio com o uso de contrapesos.

Além disso, o processo de calibração também é otimizado, uma vez que, o peso próprio da balança e dos demais componentes passam a ser acrescentados na somatória de cargas do ensaio, reduzindo em aproximadamente 1300 N de força no suporte de pesos. Com isso, reduziu a necessidade de fabricação de massas padrão em aproximadamente 13 kg, o que reduziu o custo de construção da máquina.

2) Subconjunto fixação e articulação do corpo de prova.

A figura 5.1.3 apresenta o sistema de fixação e adaptação dos corpos de prova. A montagem dos dois é parecida, porém com algumas mudanças prática. Inicialmente, retirou-se a chapa de sustentação lateral, uma vez que estava com uma funcionalidade irrelevante no equipamento. Com a retirada desse item, foi trocada a chapa de base de apoio quadrada para uma chapa redonda. O que eliminou a necessidade de fazer um rasgo lateral nos perfis U, como mostrado na Figura 5.1.4

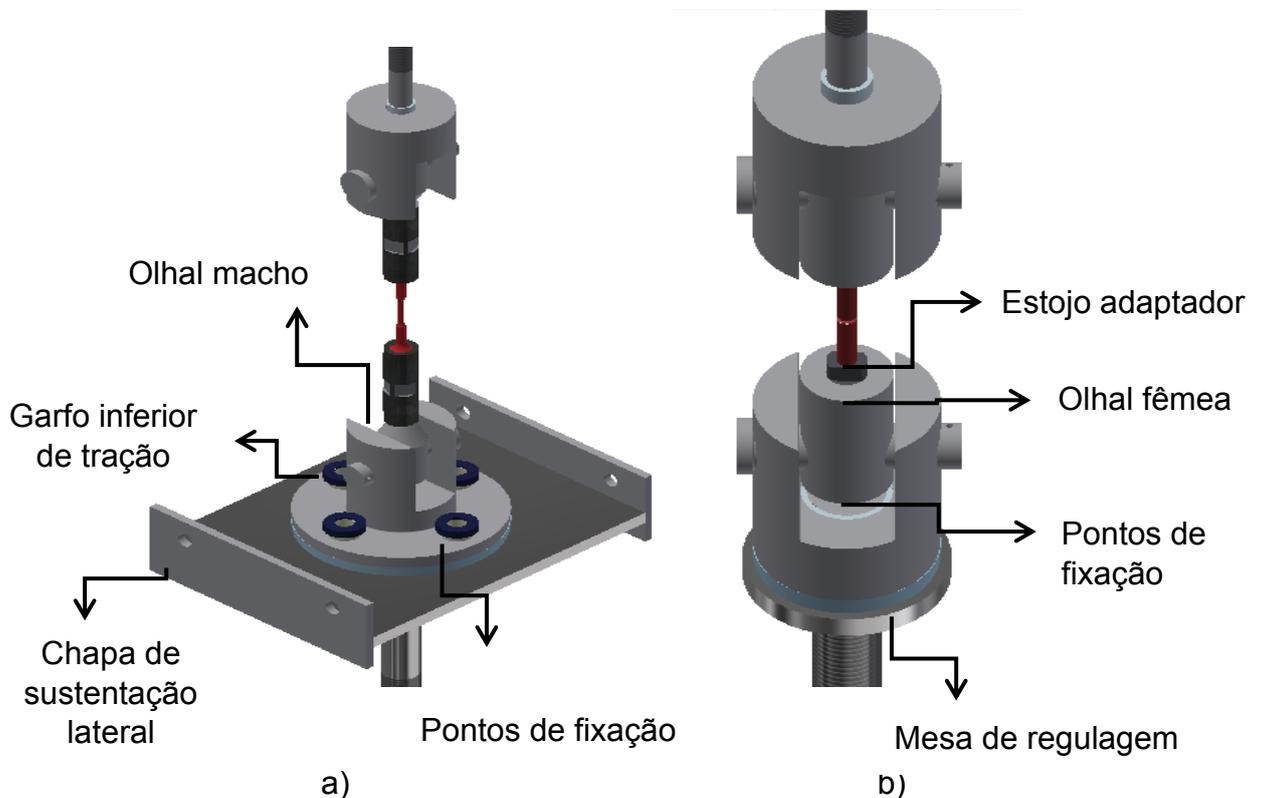


Figura 5.1.3 Conjunto de fixação e tração: a) Conjunto montado no equipamento protótipo; b) Conjunto montado no equipamento HMAX atualizado.

Outra modificação realizada foi na fixação do garfo inferior de tração, inicialmente ele era fixado por quatro parafusos igualmente espaçados em 90°, porém modificou-se colocando apenas um parafuso de cabeça cilíndrica no centro da peça, tornando-a mais simples. Essa alteração, além de reduzir custo de fabricação, promoveu mais um grau de liberdade ao corpo de prova, que passou a rotacionar em torno do centro.

Outra mudança foi no olhal de tração, que foi modificado de um olhal macho para um olhal fêmea. Isso retirou em alguns casos, a necessidade de um adaptador intermediário, podendo ser ligado diretamente ao corpo de prova. Para suprir a demanda de variação de diâmetro do corpo de prova, foi projetado um estojo adaptador, que faz a redução da rosca para o diâmetro necessário.

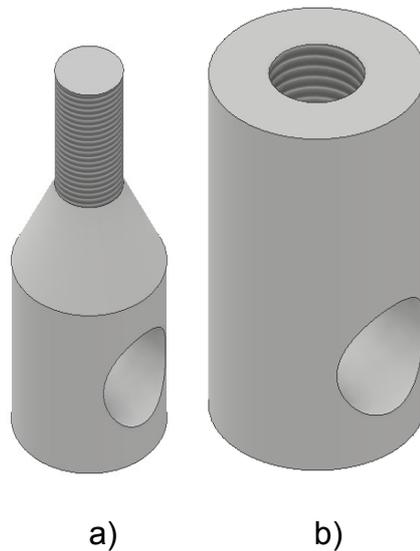


Figura 5.1.4 – Olhal de tração: a) Olhal macho; b) Olhal fêmea.

3) Subconjunto estrutura principal.

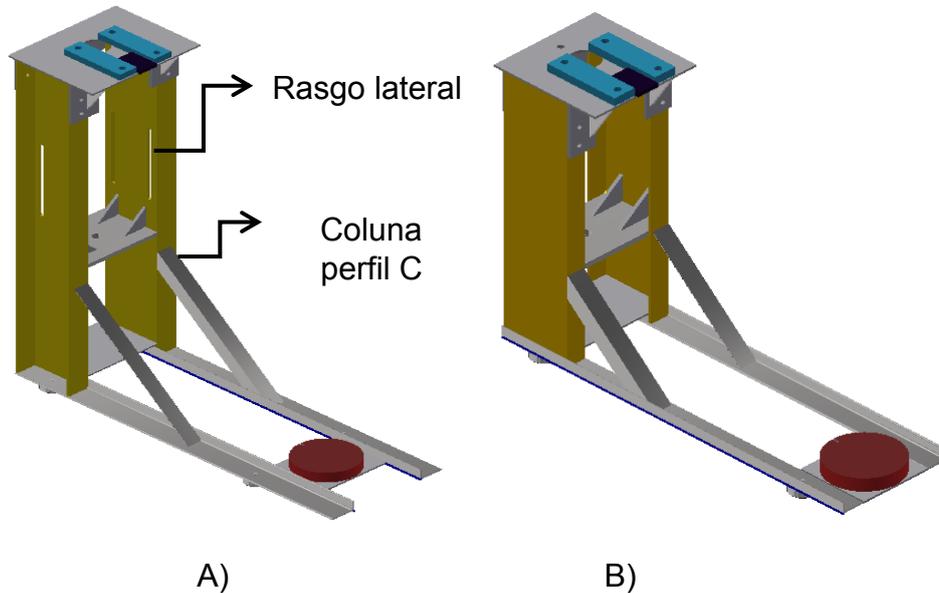


Figura 5.1.5 - a) Estrutura principal protótipo; b) Estrutura principal atualizada.

O subconjunto mostrado na Figura 5.4 a, representa a estrutura principal do equipamento protótipo que suporta todas as cargas de reação do ensaio, sendo necessárias estabilidade e resistência mecânica. Apesar disso, a única mudança substancial foi a redução de altura do equipamento, passando de 1,6 metros para 1,0 metro. Inicialmente, projetou-se o equipamento com altura de 1,6 metros para facilitar a montagem do aparato de ensaio. Porém, essa configuração de projeto elevou muito o custo de fabricação, uma vez que as colunas de aço em perfil U possuem um custo elevado, além disso, facilitou a movimentação do equipamento durante os processos de fabricação.

O subconjunto mostrado na Figura 5.4 b, representa a estrutura principal do equipamento atualizado. Como visto, reduziu-se em 60 cm de altura no perfil U principal, isso gerou uma economia na compra das peças devido ao tamanho comercial, além de reduzir o peso do equipamento. Ademais, sem a necessidade da chapa de apoio lateral, eliminou-se a usinagem do rasgo lateral e também inverteu o posicionamento dos perfis. Eles foram montados com as abas voltadas para dentro (Figura 5.5 b), o que tornou a estrutura mais rígida e estável.

4) Subconjunto massas padrão.

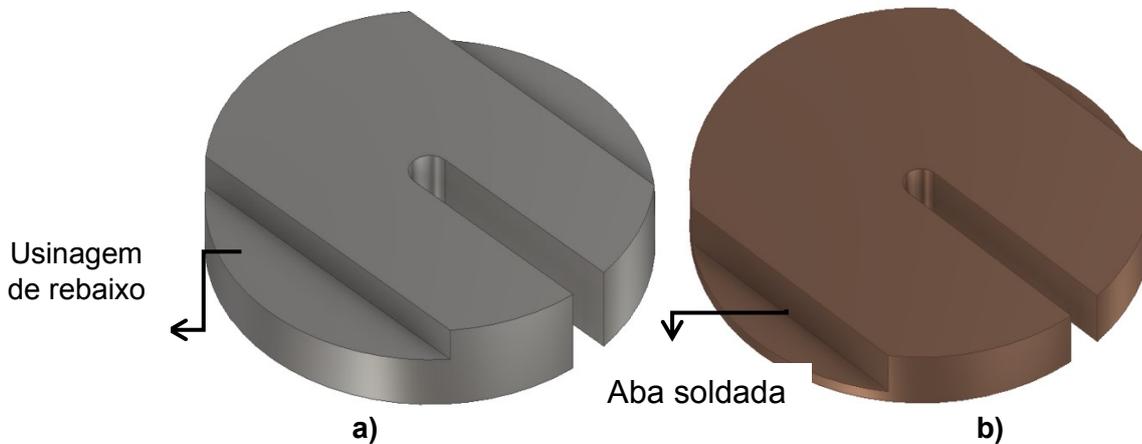


Figura 5.1.6 - a) Projeto usinado; b) Projeto com solda.

O subconjunto mostrado na Figura 4.6 representa o conjunto de pesos mortos usinados, nele foi identificado que o processo de usinagem estava com um custo e tempo elevado, uma vez que era necessário um rebaixo de 20 mm para suporte das mãos do operador. Além disso, a motivação principal para mudança é a quantidade de pesos com a mesma geometria que o mostrado na figura abaixo. Em cada máquina terão 8 massas padrão de 25 kg, 2 massas padrão de 10 kg e 4 massas padrão de 2 kg. Ou seja, para cada equipamento houve 14 processos de usinagem, sendo 7 máquinas, tem-se um total de 98 processos de usinagem de rebaixo para apoio das mãos.

O projeto dos pesos foi otimizado buscando eliminar esses processos de usinagem, para isso, idealizou-se um novo modelo de suporte soldado na lateral dos pesos. Essa mudança facilitou em muito a fabricação, além de tornar ainda mais seguro a operação do equipamento.

5.2 Reduções de tempo e custo de fabricação

Com as modificações realizadas, obteve-se redução de tempo e custo de produção dos componentes. Abaixo, serão listadas as peças com sua fabricação anterior e posterior, mostrando a diferença entre o custo de cada uma delas. Os dados avaliados serão: tempo de usinagem, tempo de soldagem e custo de material para cada componente. Todo estudo econômico foi desenvolvido a partir de dados fornecidos pelo fabricante da máquina, já partindo de um pressuposto que a empresa realizou uma cotação de preço, buscando o melhor valor no mercado. Ou seja,

avaliou-se a redução de custo apenas com a empresa que foi vencedora do processo licitatório do projeto HMAX.

5.3. Sistema de Alavanca

O sistema de alavanca foi otimizado retirando os sistemas de contrapesos e incrementando uma argola de travamento da balança como mostrado na figura abaixo.

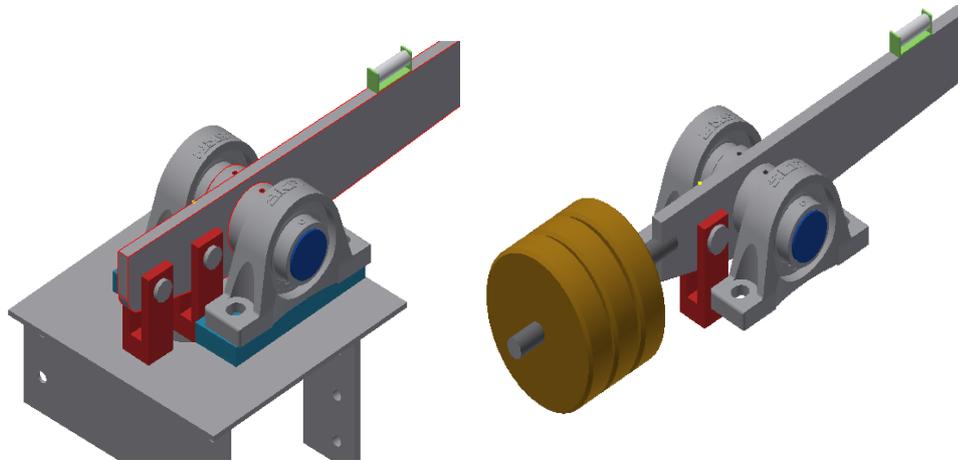


Figura 5.3.1 - Retirada de pesos e incremento do garfo de travamento.

As informações presentes na tabela acima serão explicadas apenas para o primeiro subconjunto, os demais seguem a mesma linha de raciocínio. A partir desses dados, foi possível determinar o custo e o tempo aproximado de fabricação de cada componente. Assim, foi feito um comparativo entre os diferentes projetos, chegando a um valor de redução de custo e tempo de trabalho.

- a) O custo da matéria prima: foi apresentado levando em conta orçamentos realizados na cidade de Uberlândia com 3 fornecedores diferentes, cada peça com sua especificidade. São eles: “Comercial Gerdau”, “ArcelorMittal Distribuição” e “Aços triângulo”;
- b) Peso bruto: foi calculado por uma ferramenta do *software* AUTODESK INVENTOR 2018.1, no qual em muitos casos recriou-se o componente bruto, desconsiderando os processos de usinagem final;

- c) Custo de usinagem por hora: foi apresentado o valor estipulado pelo fornecedor, que entregou um menor custo para fabricar o equipamento HMAX, dentro de um processo licitatório realizado pelo LTAD;

Tabela 5.3.1 - Comparativo de custo de fabricação sistema de travamento.

Componente	Protótipo		Novo	
	Contra pesos em aço carbono	Barra roscada em aço carbono	Argola de travamento em aço carbono	Pino de travamento em aço 1045
Itens/ máquina	3	1	1	1
Custo de matéria prima (R\$) / kg	8,00	5,00	5,00	5,00
Peso Bruto (kg)	15,30	1,80	2,00	0,50
Custo de usinagem (R\$) / (h)	100,00	100,00	100,00	100,00
Tempo usinagem (h)	1,00	0,50	0,30	0,50
Custo de soldagem (R\$) / (h)		70,00	70,00	
Tempo de soldagem (h)		0,50	0,20	
Custo final de fabricação (R\$)	667,20	94,00	54,00	52,50
Tempo final de fabricação (h)	3,00	1,00	0,50	0,50
Redução de custo obtido (R\$)	654,70			
Redução de tempo obtido (h)	3,00			

- d) Tempo de usinagem: apresenta o tempo aproximado de usinagem de cada componente mecânico, fornecido pelo fabricante da máquina;
- e) Custo de soldagem por hora: foi apresentado o valor estipulado pelo fabricante da máquina, para peças que necessitaram de soldagem;
- f) Tempo de soldagem: apresenta o tempo aproximado de soldagem de cada componente mecânico, fornecido pelo fabricante da máquina.

O sistema de ajuste de altura do corpo de prova foi otimizado retirando as abas laterais da mesa, e modificando seu formato de retangular para circular. Com isso, utilizou-se menos material para confecção e ainda se eliminou a necessidade de uma usinagem lateral nos perfis estruturais C, como identificado na figura 5.4. Além disso, a retirada das abas laterais elimina a necessidade de solda durante a montagem, o que facilitou ainda mais o processo de construção da máquina.

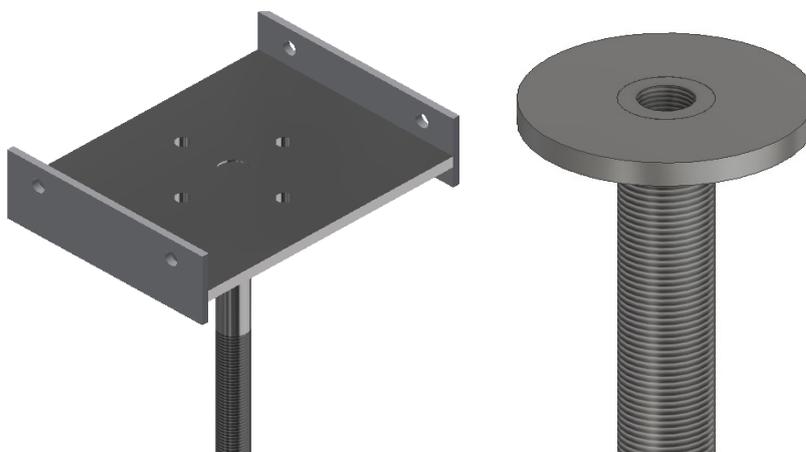


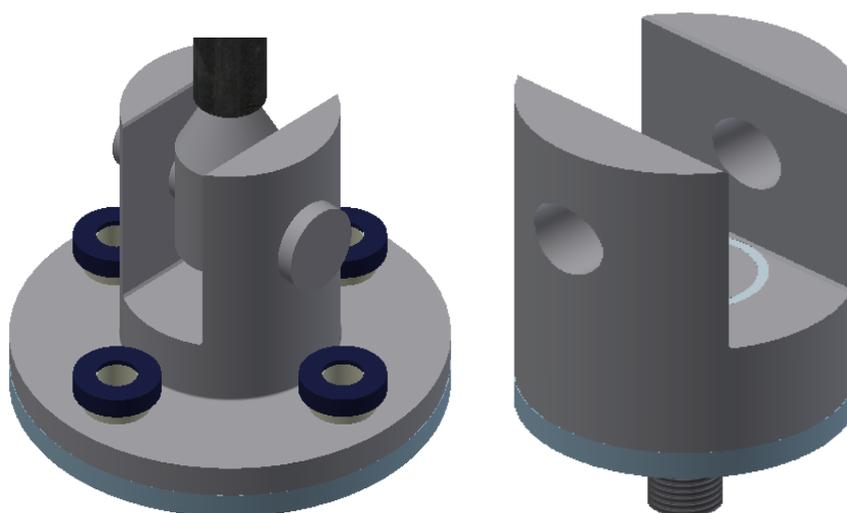
Figura 5.3.3 - Modificações realizadas na mesa de regulagem de altura.

Tabela 5.3.2 - Comparativo custo de fabricação sistema ajuste de altura.

Componente	Protótipo	Novo
	Mesa de regulagem de altura retangular	Mesa de regulagem de altura circular
Itens / máquina	1,00	1,00
Custo de matéria prima (R\$) / kg	8,00	8,00
Peso Bruto (kg)	13,60	2,70
Custo de usinagem (R\$) / (h)	120,00	120,00
Tempo de usinagem (h)	1,50	0,30
Custo de soldagem (R\$) / (h)	80,00	
Tempo de soldagem (h)	1,00	0
Custo final de fabricação (R\$)	368,80	57,60
Tempo final de fabricação (h)	2,50	0,30
Redução de custo obtido (R\$)	311,20	
Redução de tempo obtido (h)	2,2	

5.4 Modificações no garfo de fixação inferior

O sistema de garfo de fixação inferior também foi modificado, inicialmente era produzido a partir de um tarugo de 180 mm de diâmetro, realizando uma usinagem de rebaixo para 90 mm, permanecendo apenas a flange com 180 mm. Esse processo gerava um custo de usinagem elevado, pelos inúmeros “passes” realizados e também pelo desgaste da ferramenta de usinagem. Além disso, o produto é confeccionado em aço inoxidável AISI 420, que possui um elevado custo de compra e que nesse processo de usinagem grande parte desse material é perdida, o que tornava o processo ainda mais inviável. Para tornar mais simples sua confecção, modificou-se o sistema de fixação da argola passando de 4 para 1 parafuso, o que reduziu a usinagem para apenas um furo central.



5.4.1 – Modificações realizadas no sistema de argolas.

O sistema de adaptação do corpo de prova também foi alterado, inicialmente era composto por um “olhal macho” mais um “adaptador fêmea-fêmea” e um corpo de prova no diâmetro do adaptador. Com as modificações, projetou-se um olhal fêmea com rosca de 20 mm, que poderia ser acoplado ao corpo de prova diretamente, caso o mesmo fosse de 20 mm. Para suprir a demanda por corpo de prova abaixo de 20 mm, projetou-se um sistema de redução de rosca, chamado estojo adaptador, que poderá ser confeccionado para qualquer diâmetro abaixo de 16 mm. Este sistema se mostrou mais compacto que o outro, tendo uma redução de altura de 165 mm do conjunto de ensaio, o que refletiu em redução de altura na estrutura principal. Além disso, esses componentes citados passam por tratamento térmico, e o mesmo é

calculado por quilograma de material tratado, dessa forma, com a redução de tamanho, conseqüentemente reduziu-se a massa e o custo de fabricação.

Tabela 5.3.3 - Comparativo custo de fabricação sistema de argolas.

Componente	Protótipo			Novo	
	Garfo inferior de fixação (Aço inox 420)	Bucha de isolamento parafuso (Nylon)	Restrição da bucha (Aço carbono)	Garfo inferior de fixação (Aço Inox 420)	Parafuso de fixação
Itens / máquina	1,00	4,00	4,00	1,00	1,00
Custo de matéria prima (R\$)/ kg	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
Peso Bruto (Kg)	25,00	0,25	0,30	6,00	1,00
Custo de usinagem (R\$) / (h)	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
Tempo de usinagem (h)	4,00	0,25	0,25	2,50	0,50
Custo final de fabricação (R\$)	930,00	138,00	141,60	408,00	78,00
Tempo final de fabricação (h)	4,00	1,00	1,00	2,50	0,50
Redução de custo (R\$)	723,60				
Redução de tempo (h)	3,00				

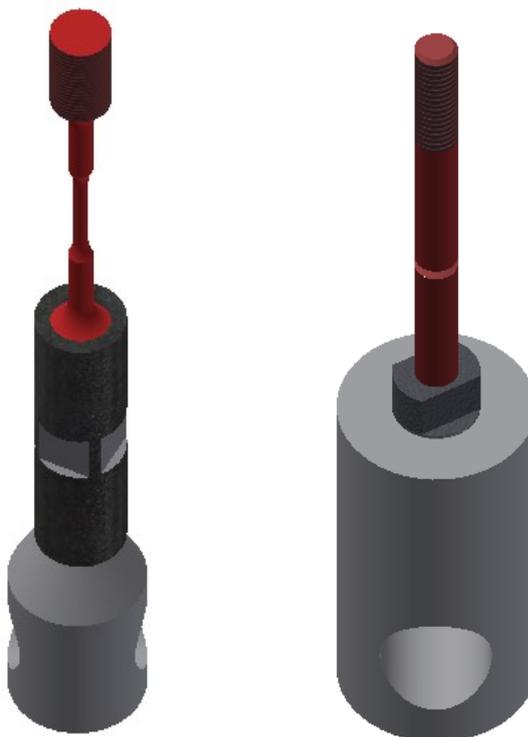


Figura 5.4.2 Modificação no olhal e nos adaptadores.

Tabela 5.3.4 - Comparativo custo de fabricação do olhal e dos adaptadores.

Componente	Protótipo		Novo	
	Olhal de tração macho	Adaptador fêmea - fêmea	Olhal de tração fêmea	Estojo adaptador macho - fêmea
Itens / máquina	2,00	2,00	2,00	2,00
Custo de matéria prima (R\$) / kg	18,00	18,00	18,00	18,00
Peso Bruto (Kg)	1,00	0,50	1,00	0,10
Custo de usinagem (R\$) / (h)	120,00	120,00	120,00	120,00
Tempo de usinagem (h)	2,00	2,00	1,00	1,50
Custo final de fabricação (R\$)	516,00	498,00	276,00	363,60
Tempo final de fabricação (h)	4,00	4,00	2,00	3,00
Redução de custo obtido (R\$)	R\$ 374,40			
Redução de tempo obtido (h)	3,00			

Com todas essas alterações na máquina, a altura geral do equipamento também foi alterada. Visando redução de custo e peso do equipamento, reduziu-se em 60 cm a altura dos perfis. Outro fator que veio a reduzir custo foi a substituição da chapa dobrada pelo perfil laminado. A primeira apresenta um custo de aproximadamente R\$ 8,00/kg de aço carbono, já o perfil laminado representa um custo de aproximadamente R\$ 4,50, porém são vendidas a barra de no mínimo de 6 metros.

**Figura 5.4.3** Perfil U modificado.

Tabela 5.3.5 - Comparativo custo de fabricação perfil U modificado.

Componente	Protótipo	Novo
	Perfil C dobrado	Perfil C laminado
Itens/ máquina	2,00	2,00
Custo de matéria prima (R\$) / kg	8,00	5,50
Peso Bruto (kg)	40,00	23,00
Custo de usinagem (R\$) / (h)	120,00	120,00
Tempo de usinagem (h)	2,50	0,50
Custo final de fabricação (R\$)	1240,00	373,00
Tempo final de fabricação (h)	5,00	1,00
Redução de custo obtido (R\$)	867,00	
Redução de tempo obtido (h)	4,00	

Uma última modificação que reduziu ainda mais o custo final do projeto foi a eliminação da usinagem do apoio das mãos nos pesos mortos. Na fabricação de cada uma dessas peças eram gastas em média duas horas de usinagem, o que gerava um custo extremamente elevado. Além disso, disso o material usinado era desperdiçado, o que tornava o processo ainda mais dispendioso. Para suprir essa mudança, foi projetado uma aba lateral soldada, a chapa passou a ser cortada a plasma com um custo de R\$ 8,00 por quilograma de material cortado. Incrementado a isso, um processo de soldagem para fixação da aba na lateral dos pesos. O processo se tornou muito mais simples, levando para apenas um dia a fixação das abas na lateral de todos os pesos. Essa foi uma das mudanças mais impactantes do projeto, tendo como resultado um ganho de 4 semanas nos processos de usinagem, levando em consideração 44 horas de trabalho semanal.

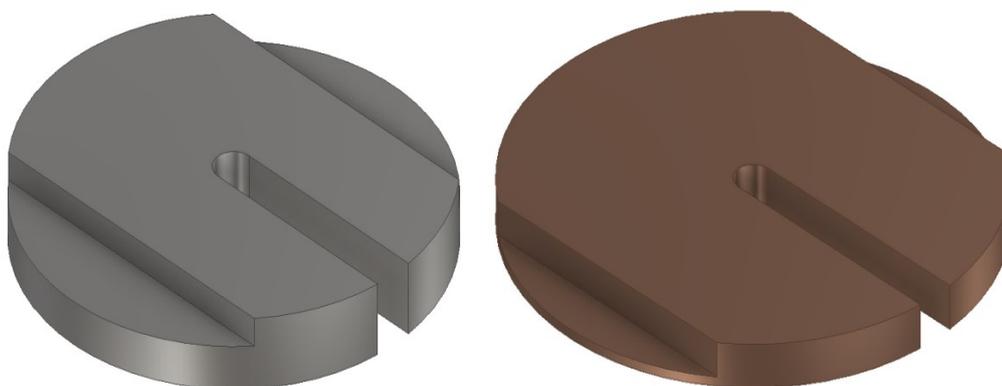
**Figura 5.4.3** - Modificação no conceito de fabricação dos pesos.

Tabela 5.3.6 - Comparativo custo de fabricação dos pesos.

Componente	Protótipo	Novo	
	Pesos com suporte usinado	Pesos com suporte soldado	Suporte soldado
Itens/ máquina	20,00	14,00	28,00
Custo de matéria prima (R\$) / kg	8,00	8,00	8,00
Peso Bruto (kg)			
Custo de usinagem (R\$) / (h)	120,00	120,00	120,00
Tempo de usinagem (h)	2,00		
Custo de soldagem (R\$) / (h)	80,00	80,00	80,00
Tempo de soldagem (h)	0,00		0,40
Custo final de fabricação (R\$)	4800,00		896,00
Tempo final de fabricação (h)	40,00		11,20
Redução de custo obtido (R\$)	3904,00		
Redução de tempo obtido (h)	28,80		

Observação: nessa tabela foram avaliados apenas o custo e o tempo de mão de obra para fabricação. Não se considerou a redução de custo com material. O motivo para isso é que a redução do número de pesos foi uma alteração na concepção do projeto e não mudança visando otimizar a fabricação. Dessa forma, nessa tabela não foi incluída a massa de cada item descrito.

As modificações citadas acima podem ser observadas na foto abaixo do equipamento pronto para operação.



Figura 5.4.4 – Equipamento HMAX em operação, a esquerda o protótipo e a direita equipamento atualizado.

5.5 Incerteza de medição das massas

Nesse item será apresentado o resultado da calibração das massas padrão. O processo de calibração implica em aferir os valores das massas por uma balança calibrada e expressar esses valores considerando as incertezas de medição. Os resultados serão apresentados em uma tabela, contendo informação de média, incerteza expandida de medição (U_e), fator de abrangência (K) e graus de liberdade efetivo (ν_{eff}). Será apresentado também um exemplo de cálculo, usando o valor da massa com maior desvio padrão. É importante ressaltar que como se utilizou sempre o mesmo instrumento de medição, os valores de incerteza padrão devido à calibração da balança (ΔC) e a incerteza padrão devido a resolução da balança (ΔR) apresentam os mesmos valores para todas as massas padrão. Dessa forma, a única fonte de incerteza variável é a incerteza devido à variabilidade das leituras (X). Para medição

das massas foi utilizada a balança MARK 3200 1, com faixa de medição de 0 – 32.000 g e resolução de 0,1 g. O certificado de calibração da balança se encontra adicionado nos Anexos.

O exemplo é apresentado para o peso morto numerado por 25.2, que corresponde a uma massa de 24876,0 g.

1ª Etapa: Definição do Mensurando

- ✓ Massa (g)

2ª Etapa: Fatores de Influência

- ✓ Variabilidade das Leituras (X);
- ✓ Resolução Finita do Sistema de Medição (ΔR);
- ✓ Calibração do Sistema de Medição (ΔC);

3ª Etapa: Modelo Matemático

$$M = X + \Delta R + \Delta C$$

Cálculos:

- Variabilidade das Leituras (X)
 - ✓ Avaliação Tipo A
 - ✓ Distribuição “t-student”
 - ✓ Graus de Liberdade: 2

$$U(X) = \frac{s}{\sqrt{N}} = \frac{0,5541}{\sqrt{5}} = 0,2478 \text{ g}$$

- Resolução Finita do Sistema de Medição (ΔR)
 - ✓ Avaliação Tipo B;
 - ✓ Distribuição Retangular;
 - ✓ Graus de Liberdade: ∞

$$U(\Delta R) = \frac{R}{2\sqrt{3}} = \frac{0,1 \text{ g}}{2\sqrt{3}} = 0,0289 \text{ g}$$

- Calibração do Sistema de Medição (ΔC)
 - ✓ Avaliação Tipo B
 - ✓ Distribuição Normal
 - ✓ $K = 2,11$
 - ✓ Graus de Liberdade: ∞

$$U(\Delta C) = \frac{C}{k} = \frac{0,1 \text{ g}}{2,11} = 0,0474 \text{ g}$$

- Incerteza combinada:

$$U_c(M) = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial X}\right)^2 \cdot u^2(X) + \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta R}\right)^2 \cdot u^2(\Delta R) + \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta C}\right)^2 \cdot u^2(\Delta C)}$$

$$U_c(M) = 0,2539 \text{ g}$$

- Graus de liberdade efetivo (ν_{eff}):

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(F)}{\frac{u^4(X)}{\nu(X)}} = \frac{(0,2539 \text{ g})^4}{\frac{(0,2478 \text{ g})^4}{2}} = 4,41$$

- Definição do fator de abrangência tabelado:

$$K = 2,7764$$

- Incerteza Expandida:

$$U_e(M) = 2,7764 \times 0,2539 \text{ g} = 0,705 \text{ g}$$

4ª Etapa: Apresentação de um resultado de medição

Resultado de Medição: $24876,0 \pm 0,7$ g com fator de abrangência $k = 2,7764$ e probabilidade de abrangência de 95 %.

Abaixo segue a tabela com os resultados de incerteza de todas as massas padrão do equipamento HMAX, seus valores serão utilizados para validar a curva de operação da máquina. A tabela com os dados completos contendo todas as fontes de incerteza será adicionada em anexo.

Tabela 5.5.1 – Resultados resumidos de incerteza de medição para as massas padrão.

“Peso-morto”	Média das massas (g)	Ue(g)	K	Veff
25.1	24959,3	0,37	2,57	5
25.2	24876,0	0,71	2,77	4
25.3	24845,8	0,23	2,37	8
25.4	24843,4	0,51	2,78	4
25.5	24874,3	0,34	2,57	4
25.6	24830,5	0,52	2,77	4
25.7	24854,2	0,58	2,77	4
25.8	24821,6	0,16	2,11	16
25.9	24894,7	0,20	2,21	10
25.10	24825,0	0,14	2,04	28
10.1	10124,5	0,17	2,16	13
10.2	10113,9	0,16	2,11	16
10.3	10107,1	0,14	2,05	25
10.4	10093,6	0,24	2,36	7
10.5	10088,1	0,12	2,01	43
5.1	4935,5	0,12	2,01	46
5.2	4929,1	0,12	2,01	46
5.3	4917,3	0,12	2,01	43
5.4	4880,9	0,12	2,01	43
5.5	4955,6	0,12	2,01	43

A partir do cálculo de incertezas das massas, verificou-se que os valores encontrados são relativamente pequenos em relação a massa nominal. Dessa forma, para o cálculo da incerteza das forças foi desprezado a incerteza associado a massa. Apesar de ser encontrado um resultado relativamente pequeno, é necessário esse procedimento como forma de verificação das incertezas associados ao processo de medição, de maneira a garantir uma melhor garantia nos processos.

5.6 Incertezas de medição das cargas do sistema

Nesse item será apresentado o resultado da calibração das cargas de tração do sistema. O processo de calibração implica em aferir os valores das cargas por uma célula de carga calibrada e expressar esses valores considerando as incertezas de medição. Os resultados serão apresentados em uma tabela, contendo informação de média, incerteza expandida de medição (U_e), fator de abrangência (K) e graus de liberdade efetivo (ν_{eff}). Será apresentado também um exemplo de cálculo, usando o valor da carga com maior desvio padrão. É importante ressaltar que como foi utilizado sempre o mesmo instrumento de medição, os valores de incerteza padrão devido a calibração da célula de carga (ΔC) e a incerteza padrão devido a resolução do instrumento (ΔR) apresentam os mesmos valores para todas as cargas aferidas. Para cálculo da incerteza de medição das cargas, utiliza-se, além do fator de variabilidade das leituras (X), o fator de desvio de linearidade da célula de carga, como mostrado no exemplo abaixo. O certificado de calibração da célula de carga será adicionado em anexo.

O exemplo é apresentado para o carregamento que resultou no maior desvio padrão amostral, nesse caso a carga escolhida é a de 27508,5 N. Como a incerteza associada à massa dos pesos-mortos foi pequena, a mesma foi desconsiderada nos cálculos seguintes.

1ª Etapa: Definição do Mensurando

- ✓ Força (N)

2ª Etapa: Fatores de Influência

- ✓ Variabilidade das Leituras (X);
- ✓ Resolução Finita do Sistema de Medição (ΔR);
- ✓ Calibração do Sistema de Medição (ΔC);
- ✓ Desvio de Linearidade da Célula de Carga (ΔD);

3ª Etapa: Modelo Matemático

$$F = X + \Delta R + \Delta C + \Delta D$$

Cálculos:

- Variabilidade das Leituras (X)

- ✓ Avaliação Tipo A
- ✓ Distribuição “t-student”
- ✓ Graus de Liberdade: 2

$$u(X) = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{52,300 \text{ N}}{\sqrt{3}} = 30,198 \text{ N}$$

- Resolução Finita do Sistema de Medição (ΔR)
 - ✓ Avaliação Tipo B;
 - ✓ Distribuição Retangular;
 - ✓ Graus de Liberdade: ∞

$$u(\Delta R) = \frac{R}{2\sqrt{3}} = \frac{0,981 \text{ N}}{2\sqrt{3}} = 0,283 \text{ N}$$

- Calibração do Sistema de Medição (ΔC) - Vuolo
 - ✓ Avaliação Tipo B
 - ✓ Distribuição Normal
 - ✓ $K = 2$
 - ✓ Graus de Liberdade: ∞

$$u(\Delta C) = \frac{R}{k} = \frac{0,981 \text{ N}}{2,00} = 0,490 \text{ N}$$

- Desvio de Linearidade (ΔD) – 0,009 %
 - ✓ Avaliação Tipo B
 - ✓ Distribuição Triangular
 - ✓ Graus de Liberdade: ∞

$$u(\Delta D) = \frac{E}{\sqrt{6}} = \frac{0,00009 \times 27508,548 \text{ N}}{\sqrt{6}} = 1,011 \text{ N}$$

- Incerteza combinada:

$$u_c(F) = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial X}\right)^2 \cdot u^2(X) + \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta R}\right)^2 \cdot u^2(\Delta R) + \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta C}\right)^2 \cdot u^2(\Delta C) + \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta D}\right)^2 \cdot u^2(\Delta D)}$$

$$u_c(F) = 30,220 \text{ N}$$

- Graus de liberdade efetivo (v_{eff}):

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(F)}{\frac{u^4(X)}{v(X)}} = \frac{(30,220 \text{ N})^4}{\frac{(30,198 \text{ N})^4}{2}} = 2,00$$

- Definição do fator de abrangência tabelado:

$$K = 4,3$$

- Incerteza Expandida:

$$U_e(F) = 4,30 \times 30,220 \text{ N} = 129,946 \text{ N}$$

4ª Etapa: Apresentação de um resultado de medição

Resultado de Medição: $27\,508,5 \pm 129,9 \text{ N}$ com fator de abrangência $k = 4,30$ e probabilidade de abrangência de 95 %.

Abaixo segue a tabela com os resultados de incerteza de todo carregamento realizado no dia da calibração do equipamento HMAX, seus valores serão utilizados para construir a curva de operação da máquina. A tabela com os dados completos contendo todas as fontes de incerteza será adicionada em anexo.

Tabela 5.6.1- Resultados resumidos de incerteza de medição das forças de calibração.

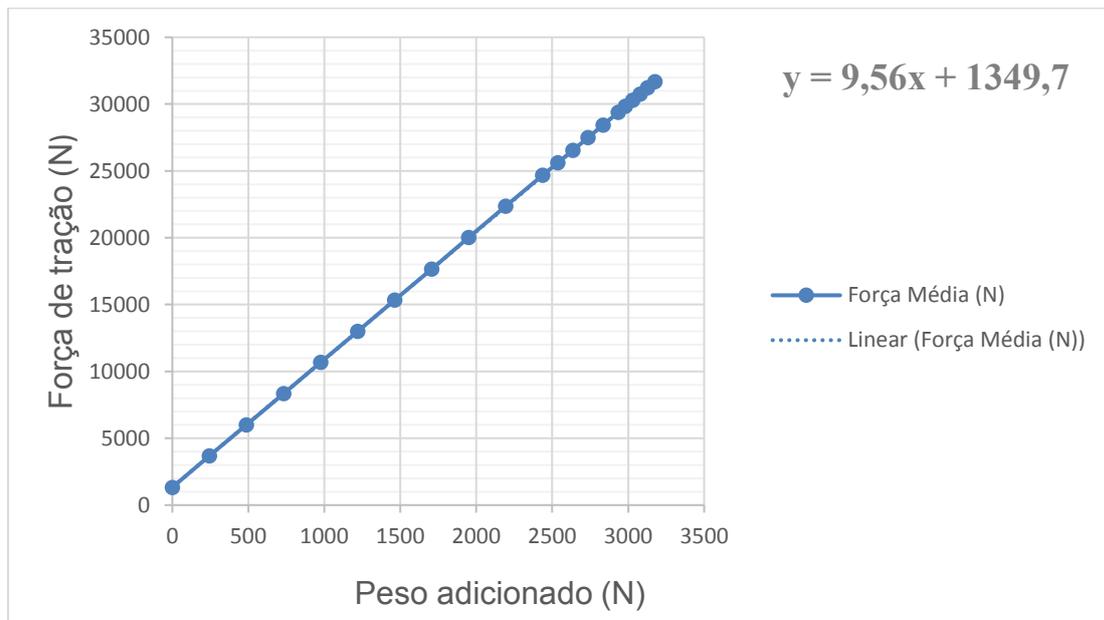
Massas Totais (kg)	1ª Sequência (N)	2ª Sequência (N)	3ª Sequência (N)	Média (N)	Ue (N)	veff	k
0	1318,46	1330,24	1338,08	1328,93	24,63 (1,9%)	2,04	4,3
24,959	3672,86	3683,66	3681,69	3679,40	14,48 (0,4%)	2,13	4,3
49,824	6005,68	6014,51	6019,42	6013,20	17,47 (0,3%)	2,09	4,3
74,670	8336,54	8360,08	8368,91	8355,18	41,63 (0,5%)	2,02	4,3
99,513	10673,28	10675,24	10700,75	10683,09	38,15 (0,4%)	2,02	4,3
124,387	12998,25	13015,91	13032,59	13015,58	42,74 (0,3%)	2,02	4,3
149,218	15314,39	15349,71	15363,44	15342,51	62,91 (0,4%)	2,01	4,3
174,072	17616,80	17671,73	17689,39	17659,31	94,06 (0,5%)	2,01	4,3
198,894	19986,89	20044,77	20056,55	20029,40	92,64 (0,4%)	2,01	4,3
223,788	22320,69	22386,42	22374,65	22360,59	87,11 (0,4%)	2,01	4,3
248,613	24636,83	24683,92	24708,45	24676,40	90,46 (0,4%)	2,01	4,3
258,738	25558,97	25638,44	25648,25	25615,22	121,62 (0,5%)	2,01	4,3
268,852	26502,70	26568,42	26586,08	26552,40	109,19 (0,4%)	2,01	4,3
278,959	27453,29	27515,09	27557,27	27508,55	129,93 (0,5%)	2,01	4,3
289,052	28406,82	28430,36	28486,28	28441,15	101,45 (0,4%)	2,01	4,3
299,141	29354,46	29401,55	29416,27	29390,76	80,31 (0,3%)	2,02	4,3
304,076	29816,51	29863,60	29872,43	29850,85	74,81 (0,3%)	2,02	4,3
309,005	30263,85	30324,67	30330,56	30306,36	91,84 (0,4%)	2,01	4,3
313,922	30721,00	30772,01	30783,78	30758,93	83,39 (0,3%)	2,02	4,3
318,803	31186,97	31239,95	31247,79	31224,90	82,31 (0,3)	2,02	4,3
323,759	31651,97	31700,03	31698,07	31683,36	67,76 (0,2%)	2,03	4,3

5.7 Curva de validação do equipamento

A partir dos dados coletados durante a validação do equipamento e a análise quantitativa das incertezas associadas ao processo de calibração, foi possível definir a curva de validação da máquina e estimar possíveis erros associados ao sistema. Abaixo segue a tabela e o gráfico massa adicionada (N) versus carga de tração da máquina (N), ambas as variáveis na unidade de força (Newton).

Tabela 5.6.2 - Resultados de massa adicionada ao sistema *versus* força de tração da máquina.

Massas Totais x 9,81 (N)	Força Média (N)
0,00	1328,93
244,85	3679,40
488,77	6013,20
732,51	8355,18
976,22	10683,09
1220,24	13015,58
1463,83	15342,51
1707,65	17659,31
1951,15	20029,40
2195,36	22360,59
2438,90	24676,40
2538,22	25615,22
2637,44	26552,40
2736,59	27508,55
2835,60	28441,15
2934,57	29390,76
2982,99	29850,85
3031,34	30306,36
3079,58	30758,93
3127,46	31224,90
3176,08	31683,36



Figura

5.6.1 – Análise gráfica dos dados tabela 3.

Como esperado a curva de operação da máquina foi aproximadamente uma equação linear, com coeficiente angular igual a 9,56. Dessa forma, seguindo a ordem

de adição de pesos definida no procedimento, é possível definir o valor da carga de tração da máquina a partir da equação apresentada acima. A utilização desse procedimento garante uma faixa de erro de no máximo 0,5 %, de acordo com os cálculos de incerteza adotados. O primeiro valor observado, representa o peso próprio do suporte, por ser um valor relativamente baixo a balança apresentou uma desestabilidade na leitura, porém isso ocorreu apenas com o suporte vazio. Dessa maneira, considerou-se irrelevante para o procedimento o erro de 1,85 % associado a essa primeira medição.

5.8 Análise das incertezas associadas a força de tração do equipamento

A partir dos cálculos de incerteza associadas à força de tração da máquina é possível definir a confiabilidade prática do equipamento. Apresenta-se uma tabela com os valores das médias das forças bem como das incertezas percentuais associadas a cada medição.

Tabela 5.8.1 - Informações referentes às incertezas percentuais.

Média (N)	Ue (N)	Ue % (N)
1328,93	24,63	1,85
3679,40	14,49	0,39
6013,20	17,48	0,29
8355,18	41,63	0,50
10683,09	38,16	0,36
13015,58	42,74	0,33
15342,51	62,91	0,41
17659,31	94,07	0,53
20029,40	92,64	0,46
22360,59	87,11	0,39
24676,40	90,47	0,37
25615,22	121,62	0,47
26552,40	109,19	0,41
27508,55	129,94	0,47
28441,15	101,45	0,36
29390,76	80,31	0,27
29850,85	74,81	0,25
30306,36	91,84	0,30
30758,93	83,03	0,27
31224,90	82,38	0,26
31683,36	67,76	0,21

A partir dos cálculos, é possível concluir que o equipamento se encontra em uma faixa de incerteza de no máximo 0,5 %, valor considerado relativamente pequeno em relação aos valores nominais. A incerteza de 1,85 % foi desconsiderada nessa avaliação, pois durante essa medição, o suporte de pesos vazios não exerceu uma estabilidade na leitura da célula de carga, o que gerou essa disparidade da primeira leitura.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizadas otimizações e validação de uma máquina de ensaio de tração desenvolvida por Viana (2018). Como se trata de um equipamento voltado para a realização de pesquisas, é necessário todo o cuidado para que o projeto atenda aos requisitos de ensaio produzindo resultados precisos, atenda aos requisitos da norma que rege o mesmo (ISO,2015) e que fique com custos o mais baixo possível.

As diversas etapas do projeto foram realizadas, revistas e otimizadas. Dentre essas etapas destaca-se a estrutura principal do equipamento, que foi reduzida com objetivo de diminuir custos e facilitar fabricação. Além disso, foi reavaliado o sistema de pesos, sistema contrabalanceamento e o sistema de garras de tração, com o objetivo de reduzir custos e facilitar os ensaios.

Por fim, a curva de validação do equipamento gerou um coeficiente angular próximo ao esperado. O projeto, apresentava uma relação de alavanca de 1:10, porém, o número validado pela curva foi de 1 para 9,56. Além disso, o erro, avaliado pelos cálculos da incerteza se mostraram relativamente pequenos, o que torna o projeto confiável em termos operacionais.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI JUNIOR, A.; Apostila de Metrologia, parte 1. 2002. 159 p.
http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/7460/material/metrologia_1.pdf. Acesso em: 30 dez. 2019.

WANG, R.; Effects of hydrogen on the fracture toughness of a x70 pipeline steel. Corrosion Science. Northampton, v.51, n.12, p. 2803-2810, dec. 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.07.013> AKIYAMA, E. et al. Constant-load delayed fracture test of atmospherically corroded high strength steels. Applied Surface Science, v. 257, n. 19, p. 8275–8281, 2011.

ASAHI, H.; HIRAKAMI, D.; YAMASAKI, S.; Hydrogen Trapping Behavior in Vanadium-added Steel. ISIJ International, v. 43, n. 4, p. 527–533, 2003. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.527>.

INTROGUM. Avaliação de dados de medição: uma introdução ao “Guia para a expressão de incerteza de medição” e a documentos correlatos –2009. Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012.
http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteudo/iso_gum_versao_site.pdf.

BRAHIMI, S.; Hydrogen Embrittlement in Coated Steel Fasteners A review of the literature. n. April, 2006.
<file:///C:/Users/Cliente/Downloads/2.%20Review%20Paper%20%20Hydrogen%20Embriement%20in%20Coated%20Steel%20Fasteners%20-%20Brahimi-2006.pdf>

BRAHIMI, S.; Fundamentals of hydrogen embrittlement in steel fasteners. IBECA Technologies Corp, p. 1, 2014.
<http://www.boltcouncil.org/files/HydrogenEmbriementInSteelFasteners-Brahimi.pdf>

BRAHIMI, S. V.; YUE, S.; SRIRAMAN, K. R.; Alloy and composition dependence of hydrogen embrittlement susceptibility in high-strength steel fasteners. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering

Sciences, v. 375, n. 2098, 28 jul. 2017.
<http://www.boltcouncil.org/files/HydrogenEmbrittlementInSteelFasteners-Brahimi.pdf>

BARNOUSH, A.; VEHOFF, H.; Recent developments in the study of hydrogen embrittlement: Hydrogen effect on dislocation nucleation. *Acta Materialia*. v. 58, p. 5274-5285, jul. 2010. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/240367307_Recent_developments_in_the_study_of_hydrogen_embrittlement_Hydrogen_effect_on_dislocation_nucleation>. Acesso em 18 dez. 2020.

CHIDA, T. *et al.* Comparison of Constant Load, SSRT and CSRT Methods for Hydrogen Embrittlement Evaluation Using Round Bar Specimens of High Strength Steels. *Tetsu-to-Hagane*, v. 100, n. 10, p. 1298–1305, 2014. Disponível em: <<http://electrochemsci.org/papers/vol14/140302705.pdf>>. Acesso em 18 dez 2020.

KNARBAKK, K.; Hydrogen induced stress cracking of Inconel 718 under cathodic polarization. [s.l.] Dissertação de mestrado - Norwegian University of Science and Technology, 2015.

ROBERTSON, I. M.; SOFRONIS, P.; NAGAO, A.; MARTIN, M. L.; WANG, S.; GROSS, D.W.; NYGREN, K.E.; Hydrogen Embrittlement Understood. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, v. 46, n. 6, 2015.
<https://doi.org/10.1007/s11661-015-2836-1>

CRANK, J.; *The mathematics of diffusion*. 2. ed. Oxford: Brunel University Uxbridge, 1975. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/160360116/Crank-J-the-Mathematics-of-Diffusion-Elsevier-1975>>. Acesso em: 18 dez 2020.

FERREIRA, D.C.F.; *Ensaio e metodologias de análise de integridade para equipamentos em aço baixa liga sujeitos à fragilização por hidrogênio*. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

INMETRO. *Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição*. 2012. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteudo/iso_gum_versao_site.pdf Acesso em 18 dez. 2020.

ISO 16573. Steel. Measurement method for the evaluation of hydrogen embrittlement resistance of high strength steels. 2015.

ALBERTAZZI JUNIOR, A.; Sistema de Medição e Erro de Medição, Notas de estudo de Metrologia. 2002. Disponível em: Sistema de Medição e Erro de Medição, Notas de estudo de Metrologia. Acesso em: 30 dez. 2019.

KALID, R.D.; Avaliação da incerteza de medição. Universidade Federal da Bahia. 2017. Disponível em:

<https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/1300/1/Martins%2c%20Kalid_2010.pdf>

Acesso em 14 maio. 2020.

MARTINIANO, G.A.; Desenvolvimento de um equipamento para avaliação da susceptibilidade à fragilização por hidrogênio. 2016. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

MELO, G. F. Tenacidade à fratura e fragilização por hidrogênio de aços de alta resistência e baixa liga. 2019. 184f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ROSADO, D.B.; Comparação do efeito da fragilização por hidrogênio em aços com resistência à tração de 1000 MPa. 2011. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MASOUMI, M.; SILVA, C.C.; ABREU, H.F.G.; Effect of crystallographic orientations on the hydrogen-induced cracking resistance improvement of API 5L X70 pipeline steel under various thermomechanical processing. Corrosion Science, v. 111, p. 121–131, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.05.003>.

MARTIN, M. L.; SOMERDAY, B. P.; RITCHIE, R. O.; SOFRONIS, P.; ROBERTSON, I.M.; Hydrogen-induced intergranular failure in nickel revisited. Acta Materialia, v. 60, n.6, p. 2739–2745, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.01.040>.

ANEXOS

Certificado de calibração célula de carga HBM U2B, 50 kN.

Prüfprotokoll		<small>test record / protocole d'essai</small>			
Typ: <small>type / type</small>	U2B	Auftrag: <small>order no / commission</small>	802145416		
Nennmessbereich: <small>range / portée</small>	50 kN	Prüfer: <small>examiner / contrôleur</small>	Sawal		
IdentNr: <small>serial no / N°-ident</small>	O07590	Datum: <small>test date / date d'essai</small>	2017-01-25		
Prüfergebnisse: <small>test results / résultats d'essai</small>					
Eingangsgröße des Messbereichs [%] <small>input quantity / échelle d'essai</small>		Ausgangsgröße [mV/V] <small>output quantity / résultats</small>			
		Zug <small>tension / traction</small>	Druck <small>compression / compression</small>		
0		0.0000	0.0000		
50		-1.0001	1.0013		
100		-2.0007	2.0041		
50		-1.0005	1.0016		
0		0.0000	0.0000		
Aus den Prüfergebnissen berechnete messtechnische Kenngrößen: <small>Metrological characteristic quantities computed from the test results. Grandeurs caractéristiques de mesure calculées à partir des résultats d'essai :</small>					
Kennwert C [mV/V] <small>sensitivity / sensibilité</small>		-2.0007	2.0041		
Linearitätsabweichung [%vC] <small>linearity deviation / linéarité (Abweichung von der bestpassenden Geraden durch das Nullsignal) (deviation from bestfit through zero / écart par rapport à la meilleure droite passant par le zéro)</small>		-0.009	0.024		
Relative Umkehrspanne 0,5 F _{nom} [%v] <small>relative hysteresis / hystérésis relatif</small>		0.043	0.030		
<small>Alle aus den Messergebnissen ermittelten Kenngrößen entsprechen den Spezifikationen gemäß Datenblatt. Toutes les grandeurs caractéristiques déterminées à partir des résultats de mesure correspondent aux spécifications selon les caractéristiques techniques.</small>					
Allgemeine Zusatzinformationen: <small>general information / informations complémentaires</small>					
<small>Alle weiteren messtechnischen Eigenschaften des Aufnehmers sind durch Typprüfungen und laufende Produktaudits des Qualitätswesens abgesichert. All other metrological characteristics of the transducer are verified by type testing and regular product audits of the quality department. Toutes les autres caractéristiques techniques du capteur sont garanties par le Service Qualité, au moyen d'essais et d'audits suivis sur le produit.</small>					
<small>Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Im Tiefen See 45, 64293 Darmstadt, Germany www.hbm.com Registered as GmbH (German limited liability corporation) in the commercial register at the local court of Darmstadt, HRB 1147</small>					

Certificado de calibração balança MARK 3200 1



Balanças Indelt Minas
 Rede Brasileira de Calibração
 Laboratório de Calibração de Balança acreditado pelo Inmetro sob Nº 0460

Calibração
NBR ISO/IEC
17025



CAL 0460

Certificado de Calibração

Nº 1731

Solicitante do serviço

Cliente : MARCIO BACCI DA SILVA CAPES / PROEX Endereço: AVENIDA JOAO NAVES DE AVILA 2121 BLOCO 1M Cidade: Uberlândia CNPJ/CPF: 53935578687 Telefone: 34-3239-4016 Fax: 34-3239-4206 Contato: ROSENDA VALDES ARENCIBIA	N.Fantasia : MARCIO BACCI DA SILVA CAPES / Ficha 8398 Bairro : CAMPUS SANTA MONICA UF: MG CEP : 38400902 Insc. Estadual : E-mail: Setor : PROFESSORA
---	---

Informações administrativas

Data da Calibração : 16/04/2013	Data da Emissão do Certificado : 23/04/2013
Local da Calibração : Nas dependências do cliente	Nº do Certificado de Calibração : 1731

Objeto de Calibração

Objeto BALANÇA	Tipo Instrumento Digital	Fabricante : BEL
Nº de Série : 00654357	Modelo : MARK 3200 1	
Carga Máxima (g) : 32.000,0	Resolução (g) : 0,1	
Divisão de verificação (g) : 1,0	Localização : LABORATORIO	
Classe : II	Nº do Ativo : 089371	

Padrões utilizados

TAG/ Cód de Identificação	Identificação dos padrões	Rastreabilidade	Validade da Calibração
CJ - 19 - 1mg a 200g	2g	CERTI 4143/11	12/08/2013
CJ 22 - 200g a 10kg	5kg,10kg	IDRAO BAL.MA 017_07_	06/07/2014
R - 3 20 kg	20kg	CERTI 3284/11	28/06/2013

Padrões de medição ambiental utilizados

TAG/ Cód de Identificação	Identificação dos padrões	Rastreabilidade	Validade da Calibração
OREGON BAR988HG.T	THG.02	VISOMES LV08296-13-	01/03/2015
OREGON RTG328N'	THG.02	VISOMES LV08297-13-	01/03/2015
OREGON BAR988HG.T BARO	THG.02	VISOMES LV08536-13-	04/03/2015

Condições ambientais

Temperatura (°C) :	Umidade Relativa do Ar (%) :	Pressão (h Pa) :	Massa específica do ar (kg/m³) :
26,5 a 26,6	45 a 46	1020	NÃO APLICAVEL

Método de calibração

- A calibração foi realizada através da comparação direta entre o valor de um padrão de referência e a média das leituras indicadas pelo instrumento, conforme procedimento específico PI 5.4 - Calibração de balanças.

- A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição, multiplicada pelo fator de abrangência calculado para cada ponto de medição, o qual para uma distribuição t encontrará, os graus de liberdade, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95,45%.

- A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

- Esta calibração não isenta o instrumento do controle estabelecido na regulamentação metroológica.

- Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer outros instrumentos de medição, ainda que similares.

- Este documento somente poderá ser reproduzido em sua totalidade. Reprodução parcial deverá ser precedida de autorização formal do laboratório da Balanças Indelt Minas.

- O ajuste de instrumento, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.

- O presente certificado de calibração atende aos requisitos da NBR ISO/IEC 17025:2005 e é válido apenas para o instrumento de medição acima caracterizado, não sendo extensivo a quaisquer outros instrumentos de medição, ainda que similares.

- Uma cópia deste certificado ficará armazenada eletronicamente durante 05 anos.

Interlagos 108 - Contagem - MG - 32141-005
 CNPJ : 22.339.626/0001-60 Insc. Est. : 186.875102.0028 Telefax : (31) 3354-9742
 Homepage : www.balancasindelt.com.br E-mail : laboratorio@balancasindelt.com.br

For 5.4/02 - Certificado de Calibração, Rev. 03 de 20/05/2011

Pág. 1/2



Balanças Indelt Minas
 Rede Brasileira de Calibração
 Laboratório de Calibração de Balança acreditado pelo Inmetro sob Nº 0460

Certificado de Calibração

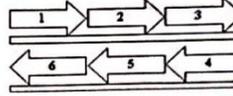
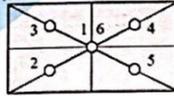
Nº 1731

Calibração
 NBR ISO/IEC
 17025



CAL 0460

Ensaio de excentricidade



Outro / Não aplicável

Posição	1	2	3	4	5	6
Unidade	g					
Antes do Ajuste	9.997,2	9.997,3	9.997,3	9.997,3	9.997,2	9.997,3
Depois do Ajuste	10.000,0	10.000,1	10.000,1	10.000,1	10.000,0	10.000,1

Faixa de medição

0 a 32000g

Pontos de Calibração						
Valor de Referência (g)	Valor antes da calibração (g)	Média das Leituras (g)	Erro da Indicação (g)	Incerteza Expandida (+/- g)	Fator de Abrangência (k)	Graus de Liberdade (veff)
2,0	2,0	2,0	0,0	0,1	2,06	38,03
5.000,0	4.997,8	5.000,0	0,0	0,1	2,11	22,80
10.000,0	9.997,3	10.000,0	0,0	0,1	2,11	22,82
20.000,1	19.996,5	20.000,1	0,0	0,1	2,11	22,83
32.000,1	31.994,7	32.000,1	0,0	0,1	2,11	22,86

FÁBIO EDUARDO E LISBOA
 Técnico executante

ALEXANDRE GOMES CARDOSO
 Signatário autorizado

Interlagos 108 - Contagem - MG - 32141-005

CNPJ : 22.339.626/0001-60 Insc. Est. : 186.875102.0028 Telefax : (31) 3354-9742

Homepage : www.balancasindelt.com.br E-mail : laboratorio@balancasindelt.com.br

For 5.4/02 - Certificado de Calibração, Rev. 03 de 20/05/2011

Pág. 2/2