

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

**Fabricação e Comissionamento de um Dispositivo
para Aplicação de um Campo Uniaxial de Tensão em
Placas.**

Rafael Braga

Prof. Orientador: Paulo Pedro Kenedi

**Rio de Janeiro
Novembro de 2017**

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

**Fabricação e Comissionamento de um Dispositivo
para Aplicação de um Campo Uniaxial de Tensão em
Placas.**

Rafael Braga

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

Prof. Orientador: Paulo Pedro Kenedi

**Rio de Janeiro
Novembro de 2017**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

B813 Braga, Rafael
Fabricação e comissionamento de um dispositivo para aplicação
de um campo uniaxial de tensão em placas / Rafael Braga.—2017.
xiii, 50f. + anexo : il. (algumas color.) , grafs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2017.

Bibliografia : f. 50

Orientador : Paulo Pedro Kenedi

1. Engenharia mecânica. 2. Tensões residuais. 3. Processos de
fabricação. 4. Resistência de materiais. I. Kenedi, Paulo Pedro
(Orient.). II. Título.

CDD 621

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que acreditam que o conhecimento é o único e verdadeiro caminho para a paz.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Paulo Pedro Kenedi por me dar a oportunidade de concluir meu curso de graduação com um projeto útil para a instituição CEFET/RJ, e por todo trabalho de orientação prestado tanto durante o curso, como para a elaboração deste trabalho.

Aos técnicos e estagiários do LABUS, em especial ao Técnico de Laboratório Brenno Duarte, por toda ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Aos profissionais da Manutenção do CEFET/RJ por todos os serviços de apoio prestados durante a montagem do dispositivo.

A minha mãe, Neide Dias Braga, por ter me fornecido todos os meios para que eu tenha voltado a estudar.

Ao time de basquete da Associação Atlética Acadêmica do CEFET/RJ por terem sido minha família durante os últimos anos da graduação e terem me apoiado nos momentos mais difíceis do curso.

Ao Presidente da Associação Atlética Acadêmica do CEFET/RJ, Guilherme Serpa, por ter gerenciado esta associação tão importante para o envolvimento dos alunos da graduação com a instituição. Agradeço também por ter sido meu amigo durante todos os momentos que precisei e ter sido a primeira pessoa a de fato acreditar em minha capacidade quando esta fê foi posta a prova.

RESUMO

Com a realização de um projeto de um quadro de reação capaz de impor um campo de tensão uniaxial trativo conhecido a uma chapa fina, corpo de prova, no ano de 2006 como projeto final por dois formandos da engenharia mecânica do CEFET/RJ, os professores orientadores responsáveis buscaram meios de construir o equipamento. Neste projeto foram abordadas a fabricação de todas as peças necessárias, a pesquisa bibliográfica relevante, incluindo o projeto original do equipamento realizado em 2006, todas as adaptações necessárias ao projeto original para a adequação deste aos recursos disponíveis pela instituição e no mercado sem afetar o funcionamento final do equipamento, e por fim a montagem do equipamento em si. O trabalho abrangeu as áreas de Processos de Fabricação, Usinagem, Elementos de Máquinas e Resistência dos Materiais. O equipamento foi montado e se encontra localizado no LINUS (Laboratório de Instrumentação e Ultrassom) do CEFET/RJ e servirá principalmente para impor um campo de tensões conhecido para a realização de ensaios de Furação Instrumentada para determinação de macro tensão residual em componentes mecânicos.

Palavras chave: Quadro de Reação, Tensões Residuais, Furação Instrumentada.

ABSTRACT

With the conclusion of the design of a reaction frame capable of imposing a known uniaxial stress field in a thin plate, specimen, on the year of 2006 as a final project by two graduates of mechanical engineering on CEFET/RJ, the professor adviser responsible looked for ways to construct the equipment. On this project were addressed the fabrication of all needed pieces, the relevant bibliographic research, including the original project of the equipment made in 2006, all the necessary adaptations to the original design to fit the available resources on the institution or the market without affecting the final functionality of the device, and the assembly of the device itself. The work included the fields of Fabrication Processes, Machining, Machine Design and Mechanics of Materials. The equipment was assembled and is found at LINUS (Instrumentation and Ultrasound Laboratory) of the CEFET/RJ and will be mainly used to impose a known stress distribution to the execution of the Hole-Drilling Strain Gaged test to measure the residual macro stress on mechanical parts.

Keywords: Reaction frame, Residual Stresses , Hole-Drilling Method.

SUMÁRIO

Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Motivação	2
1.2 Justificativa.....	3
1.3 Objetivos	3
1.4 Metodologia e Trabalho Realizado	3
1.5 Organização do Trabalho	4
Capítulo 2	5
Desenvolvimento e fabricação das peças.....	5
2.1 Projeto Original	5
2.2 Fabricação da Moldura do Quadro	7
2.3 Fabricação das Chapas Inferior e Superior do Quadro	8
2.4 Fabricação das Garras	9
2.5 Fabricação dos Tirantes.....	10
2.6 Fabricação dos Olhais.....	12
2.7 Fabricação das Barras Cilíndricas	13
2.8 Fabricação das Barras Retangulares	14
2.9 Fabricação dos Pinos	16
2.10 Fabricação dos Apoios.....	16
2.10.1 Verificação a compressão dos apoios	18
2.10.2 Verificação à flambagem dos apoios	19
2.11 Fabricação do Corpo de Prova	20
2.12 Demais Materiais	21
2.12.1 Célula de Carga.....	21
2.12.2 Macaco Hidráulico	22
Capítulo 3	24

Montagem do Equipamento	24
3.1 Considerações gerais para a montagem	24
3.2 Montagem dos elementos estruturais da moldura do quadro	24
3.2.1 Fixação dos apoios	25
3.2.2 Colocação das vigas horizontais.....	26
3.3 Montagem dos elementos superiores do trem de carga.....	27
3.3.1 Posicionamento da chapa superior do quadro	27
3.3.2 Colocação dos tirantes superiores e da barra retangular superior	28
3.3.3 Montagem do olhal superior	29
3.3.4 Montagem das garras superiores	30
3.4 Fixação do corpo de prova	31
3.5 Montagem dos elementos inferiores do trem de carga.....	33
3.5.1 Montagem das garras inferiores.....	33
3.5.2 Montagem do olhal inferior e tirantes inferiores	34
3.5.3 Colocação da chapa inferior, das roscas de fixação e da barra retangular inferior.....	35
3.6 Alinhamento final e soldagem das chapas no quadro	35
3.7 Montagem do quadro de reação finalizada	36
Capítulo 4	38
Teste de validação do quadro	38
4.1 Preparação para o teste.....	38
4.1.1 Fixação do Strain-Gauge	38
4.1.2 Solda dos conectores do “strain-gage”	39
4.1.3 Conexão do “strain-gage” e da Célula de Carga ao sistema de aquisição de dados	40
4.2 Realização do Teste.....	41
4.2.1 Posicionamento do Macaco Hidráulico e tara do sistema.....	41
4.2.2 Carregamento do sistema e travamento	42
4.2.3 Descarregamento do sistema	43
4.3 Dados coletados durante o teste	44

4.4 Modelo analítico do teste	46
4.5 Comparando os resultados do teste com o modelo analítico	47
Capítulo 5	48
Conclusão	48

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Dispositivo Montado.	6
FIGURA 2: Moldura Externa do Quadro.	7
FIGURA 3: Moldura do Quadro Montada.	8
FIGURA 4: Chapa Bruta de 1”.	9
FIGURA 5: Chapa Superior Pronta.	9
FIGURA 6: Modelo da Garra.	10
FIGURA 7: Garras.	10
FIGURA 8: Modelo do Tirante.	11
FIGURA 9: Tirantes Prontos.	11
FIGURA 10: Modelo do Olhal.	12
FIGURA 11: Olhal Pronto.	13
FIGURA 12: Modelo da Barra Cilíndrica.	14
FIGURA 13: Barra Cilíndrica Antes do Acabamento.	14
FIGURA 14: Barra Cilíndrica Pronta.	14
FIGURA 15: Modelo da Barra Retangular.	15
FIGURA 16: Barra Retangular Superior.	15
FIGURA 17: Barra Retangular Inferior.	15
FIGURA 18: Pinos Ø20 e Ø30 Prontos.	16
FIGURA 19: Desenho Esquemático do Apoio.	17
FIGURA 20: Corpo de Prova.	20
FIGURA 21: Especificações Técnicas da Célula de Carga.	21
FIGURA 22: Esquema Elétrico da Célula de Carga.	22
FIGURA 23: Parafuso de Alívio de Pressão.	22
FIGURA 24: Macaco Hidráulico.	23
FIGURA 25: Montagem do Apoio.	25
FIGURA 26: Montagem em U da Moldura.	26
FIGURA 27: Moldura com Apoios.	27
FIGURA 28: Montagem da Célula de Carga.	28

FIGURA 29: Montagem da Barra Retangular Superior.	29
FIGURA 30: Montagem do Olhal Superior.	30
FIGURA 31: Montagem da Garra, visão frontal.	31
FIGURA 32: Montagem da Garra, visão traseira.	31
FIGURA 33: Montagem Frontal Superior do Corpo de Prova.	32
FIGURA 34: Montagem Traseira Superior do Corpo de Prova.	32
FIGURA 35: Montagem da Garra Inferior Dianteira no Corpo de Prova.	33
FIGURA 36: Montagem da Garra Inferior Traseira no Corpo de Prova.	34
FIGURA 37: Conjunto do Olhal Inferior.	34
FIGURA 38: Chapa Inferior, Barra Retangular e Sistema de Travamento.	35
FIGURA 39: Solda da Chapa Inferior na Viga Transversal do Quadro.	36
FIGURA 40: Quadro de Reação Finalizado.	37
FIGURA 41: “Strain-gage.”	38
FIGURA 42: Solda dos Conectores do “Strain-gage.”	39
FIGURA 43: Fixação dos Cabos do Sistema de Aquisição de Dados.	40
FIGURA 44: Equipamento de Aquisição de Dados.	40
FIGURA 45: Sistema de Aquisição de Dados Montado.	41
FIGURA 46: Macaco Hidráulico na Condição Inicial do Teste.	42
FIGURA 47: Quadro Durante Teste Inicial Carregado e Travado.	43
FIGURA 48: Gráfico dos Esforços Obtidos Através da Célula de Carga.	44
FIGURA 49: Gráfico das Deformações Obtidas Através do “Strain-gage.”	45
FIGURA 50: Área da Seção Transversal do CP.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Símbolo – Significado - Unidade

σ - Tensão normal - Pa, MPa

τ - Tensão de cisalhamento - Pa, MPa

S_y - Limite de escoamento - Pa, MPa

S_u - Limite de resistência - Pa, MPa

S_{sy} - Limite de escoamento ao cisalhamento - Pa, MPa

E - Módulo de elasticidade - Pa, MPa

N - Esforço normal - N, kN

V - Esforço cortante - N, kN

M - Momento fletor – $N.m, kN.m$

I_n - Momento de inércia em relação a eixo genérico n - m^4, mm^4

r_n - Raio de giração em relação a eixo genérico n - m, mm

F_p - Força aplicada no ponto genérico P - N, kN

P - Carga concentrada - N, kN

W - Carga distribuída - $N/m, kN/m$

Q - Carga fictícia - N, kN

M_p - Momento reativo ou aplicado no ponto genérico P - Nm, kNm

R_p - Reação no ponto genérico P – N, kN

g - Aceleração da Gravidade - m/s^2

m - Massa - kg

t - Espessura – m, mm

A - Área - m^2, mm^2

b - Largura da base - m, mm

h, H - Altura - m, mm

l, L - Comprimento - m, mm

a - Distância até a origem do sistema de coordenadas - m, mm

c - Distância da extremidade até a linha neutra - m, mm

δ_p - Deslocamento do ponto genérico P - m, mm

ρ - Massa específica – kg/m^3

σ_w - Tensão no cordão de solda - Pa, MPa

- n_p - Número de parafusos, número de pinos
 C - Constante de condição de extremidade
 ν - Coeficiente de *Poisson*
 DCL - Diagrama de corpo livre
 n_y - Fator de segurança ao escoamento
 n_s - Fator de segurança ao escoamento (cisalhamento)
 n_f - Fator de segurança à flambagem
 n_w - Fator de segurança do cordão de solda
 δ - Variação do comprimento - m, mm
 ε - Deformação nominal - m/m

Capítulo 1

Introdução

O objetivo deste trabalho foi fabricar as peças faltantes, compra de materiais comerciais, tais como contra-pinos e parafusos, e a montagem final de um quadro de reação capaz de impor um campo de tensão uniaxial trativo conhecido em um corpo de prova, uma chapa fina, para servir como campo de tensões de referência para experimentos utilizando o método da Furação Instrumentada (Hole-Drilling Method)[1]. A finalidade deste ensaio é determinar a macro tensão residual em componentes mecânicos. O ensaio pelo método de furação instrumentada é realizado através da execução de um furo cego em uma chapa por uma máquina de ensaio de furação instrumentada especial, como o equipamento Vishay modelo RS-200.

O dispositivo proposto foi projetado no ano de 2006 como Projeto Final para concessão do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica por dois alunos da graduação do CEFET/RJ [4].

Para se conseguir um desempenho adequado, o equipamento precisa satisfazer diversas condições, tais como:

- Desenvolver no corpo de prova uma distribuição de tensões uniaxial homogênea na área útil deste;
- Apresentar uma configuração que não transmita para o corpo de prova outros esforços diferentes do axial, e que provoquem perturbações no estado uniaxial de tensão, como tensões de flexão associadas a excentricidades;
- Apresentar deslocamentos inferiores a valores admissíveis, para que o ensaio ocorra de forma adequada.

No dispositivo proposto, a aplicação de carga se dá através de um macaco hidráulico de acionamento manual. A magnitude da carga máxima é da ordem de dez toneladas e a configuração do dispositivo foi escolhida de forma a obter-se um campo de tensão no corpo de prova compatível com a resolução de leitura da máquina de ensaio de furação instrumentada.

Após a aplicação da carga, o corpo de prova é mantido carregado através de um dispositivo mecânico de travamento por elementos roscados.

Para medir o nível de carga aplicada, foi especificada uma célula de carga fabricada pela Bucher&Bucher, modelo 750i 10t[5], tipo cisalhamento duplo e trabalhando à compressão. Sua capacidade foi definida em função do valor máximo esperado do carregamento a ser aplicado. A fixação do corpo de prova é feita por pinos, por não ser factível a fixação por atrito para cargas desta magnitude e para um corpo de prova de espessura fina.

O dispositivo proposto no projeto original foi um quadro de reação, modelado no software 3D paramétrico Solidworks®. Sua verificação de integridade e otimização de desempenho foram realizados com comparação entre modelos analíticos convencionais e modelos numéricos no método de Elementos Finitos, utilizando o pacote comercial de elementos finitos ANSYS®. Modelos numéricos também foram utilizados no projeto original para prever o campo de tensões que estará presente no corpo de prova. [4]

Este trabalho descreve inicialmente a montagem final do quadro de reação, incluindo sua fabricação quando necessário,. As características originais de projeto foram mantidas, exceto quando inviáveis devido aos recursos disponível ou ao processo de fabricação utilizado. Por fim, este trabalho descreve o teste de validação do equipamento que demonstrou valores muito próximos aos previstos analiticamente, encerrando o comissionamento do quadro de reação.

Nas conclusões são debatidos tantos os resultados alcançados comparados com os desejados no projeto original. como também os próximos passos para melhoria e manutenção do equipamento pronto.

1.1 Motivação

A necessidade do CEFET/RJ adquirir um equipamento voltado ao ensaio de Furação Instrumentada, para determinação de macro tensão residual em componentes mecânicos, motivou em 2006 o projeto de um quadro de reação. Através do dispositivo é possível impor um campo de tensão uniaxial conhecido, o que permite avaliar o desempenho do método de furação instrumentada para diversos corpo de prova de vários materiais.

1.2 Justificativa

Após a elaboração do projeto do quadro de reação em 2006, este nunca conseguiu ser construído para uso da instituição. Sendo um equipamento de pesquisa útil para projetos futuros de análise de tensões residuais, sua fabricação era estratégica para a instituição, podendo ser utilizado por outros projetos de graduação e pós-graduação que utilizem o método de furação instrumentada em suas pesquisas.

1.3 Objetivos

O escopo deste trabalho envolveu a aquisição de material comercial, de matéria prima, fabricação das peças necessárias seguindo as especificações informadas no projeto original, montagem do equipamento no laboratório e, quando necessário, adaptação do projeto original a realidade de materiais e equipamentos de fabricação disponíveis pela instituição ou no comércio próximo. Ao final, obteve-se um equipamento funcional capaz de realizar o teste desejado conforme projeto.

1.4 Metodologia e Trabalho Realizado

O trabalho principal foi focado na leitura e compreensão do projeto original, pesquisa no comércio dos materiais disponíveis, pequenas adequações quando o material disponível não era idêntico ao solicitado, compra de matéria prima, fabricação das peças pelo processo de usinagem conforme a disponibilidade interna do CEFET/RJ, principalmente no LABUS (Laboratório de Usinagem), ou por contratação de usinagem externa nos casos em que a fabricação interna não estava disponível e finalmente a montagem do equipamento no laboratório.

Durante o processo de leitura do projeto original foi feita a verificação de todo material disponível no CEFET/RJ e quais peças ou métodos necessitariam ser modificados e quais materiais comercialmente disponíveis necessitavam ser adquiridos. Além da determinação dos procedimentos básicos de usinagem que precisariam ser realizados (corte, fresamento, furação,

torneamento, etc.) e quais destes processos estavam disponíveis na instituição e quais necessitariam de contratação externa.

A etapa seguinte foi a aquisição de matéria prima necessária para usinagem de peças e compra de peças básicas: parafusos, porcas, arruelas e contrapinos. Foi contratada uma empresa de usinagem para realizar alguns dos procedimentos nas peças mais complexas, pois não haviam na instituição equipamentos capazes de realizá-los.

Nos casos onde a usinagem externa foi necessária, foi realizado o acompanhamento na fábrica de todas as etapas necessárias para a confecção das peças, desde aquisição de matéria prima, fornecimento dos desenhos com todas as informações necessárias para fabricação, visita a fábrica para acompanhamento dos processos que estavam sendo realizados, retirada de dúvidas pelos executantes, e visita final para validação e recebimento das peças prontas.

1.5 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em 5 capítulos:

O capítulo 1 apresenta o histórico do projeto original do quadro de reação, realizado em 2006 por dois formandos em Engenharia Mecânica do CEFET/RJ. Neste capítulo também se encontra a justificativa do trabalho e apresentação da metodologia principal a ser utilizada.

O capítulo 2 trata do processo de fabricação de cada peça necessária a montagem do equipamento. Explicando que matéria prima foi utilizada, se a peça já se encontrava pré-montada anteriormente a este projeto e qual principal método utilizado para montagem de cada peça.

O capítulo 3 trata da montagem passo a passo do quadro de reação, incluindo os cuidados necessários para diminuir a chance de erro durante um ensaio.

O capítulo 4 descreve a montagem do sistema de aquisição de dados e o teste inicial de validação do equipamento que demonstrou a capacidade deste de realizar o ensaio previsto sem apresentar falhas estruturais ou erros grosseiros. Os resultados experimentais do teste de validação se encontram no final do capítulo.

O capítulo 5 é a conclusão do trabalho, onde o resultado do teste inicial é discutido e futuras aplicações do equipamento são propostas.

Capítulo 2

Desenvolvimento e fabricação das peças

Neste capítulo será abordada a aquisição de cada peça, seja por fabricação ou compra, e o detalhamento das mudanças necessárias em relação ao projeto original para adequação aos materiais e métodos disponíveis.

2.1 Projeto Original

A Figura 1 mostra uma visão isométrica do quadro de reação montado conforme sua concepção original. Apenas duas mudanças foram necessárias em relação a este projeto: A viga transversal que compõe o quadro é formada por duas chapas de $\frac{1}{2}$ " cada em vez de uma chapa única de 1", pois estas estavam disponíveis na instituição e a espessura dos apoios do quadro foi reduzida para $\frac{1}{2}$ " em vez de $\frac{3}{4}$ " para redução do peso e do custo das peças.

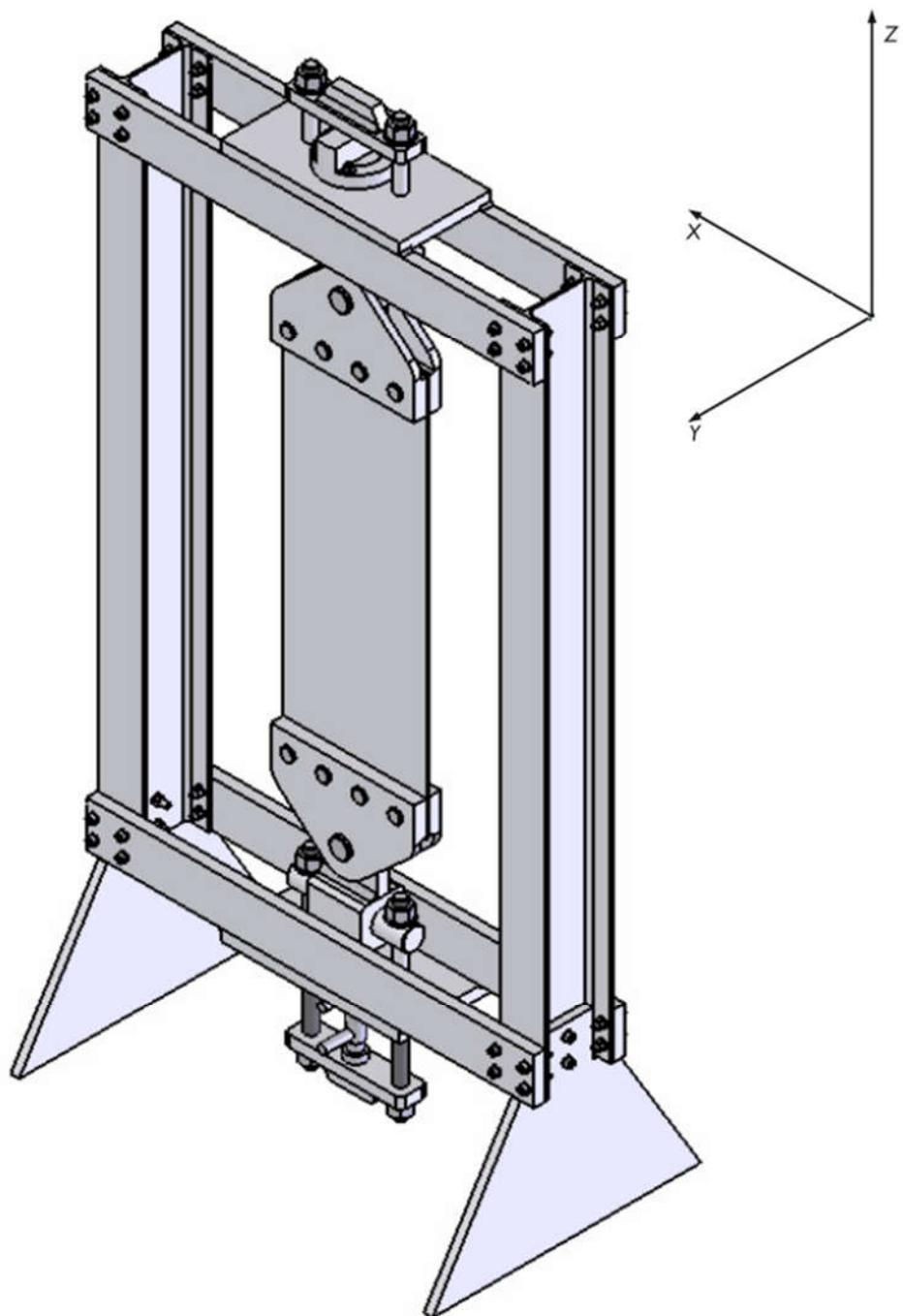


Figura 1: Dispositivo montado [4].

2.2 Fabricação da Moldura do Quadro

A moldura (parte externa) do quadro foi montada anteriormente a este projeto. Foram utilizadas dois perfis “I” de abas largas encontrados comercialmente, conforme projeto original[4], com a diferença que em vez de se utilizar uma única viga horizontal de 1” de espessura em cada lado, optou-se por utilizar duas vigas de ½” cada, pois estas estavam disponíveis no CEFET/RJ na época desta montagem. A Figura 2 mostra o conceito da moldura utilizando Solidworks® e a Figura 3 mostra a moldura montada conforme entregue para o início deste projeto. Para fixação de cada vértice foram utilizados 8 parafusos M10, classe 8 ou superior, 4 de cada lado, com suas respectivas porcas e arruelas comerciais.

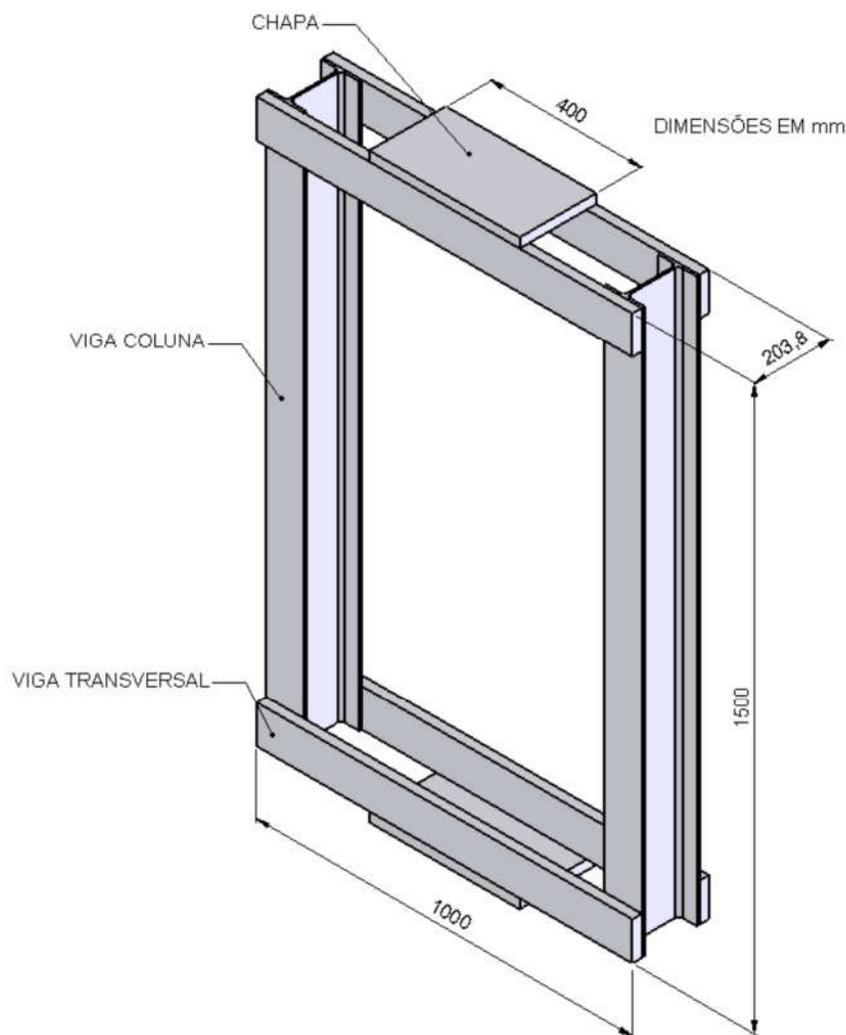


Figura 2: Moldura externa do quadro[4].



Figura 3: Moldura do quadro montada.

Esta moldura foi posteriormente desmontada para melhoria dos furos, muitos precisavam de um novo acabamento devido ao acúmulo de oxidação. Neste momento também foram realizados os furos laterais para a colocação dos apoios do quadro de reação.

2.3 Fabricação das Chapas Inferior e Superior do Quadro

As chapas inferior e superior do quadro são idênticas, exceto pela furação dos pararusos da célula de carga, no caso da chapa superior, e o apoio do macaco hidráulico no caso da chapa inferior.

Sua fabricação foi efetuada a partir de duas chapas de aço A36 de 1" de espessura com 250 mm de largura e 400 mm de comprimento. O modelo projetado possuía 200 mm de largura, mas durante a confecção foi escolhido deixar 5 mm de sobra para facilitar na acomodação destas no quadro, bem como possibilitar um pouco de liberdade na hora de alinhar a chapa superior com a chapa inferior. As dimensões finais foram 1" x 205 mm x 400 mm. Foi realizado o adocamento das bordas para evitar cortes e aumentar a segurança durante a montagem e quaisquer trabalhos futuros que venham a ser realizados no equipamento. A Figura 4 mostra a chapa utilizada de matéria prima e a Figura 5 mostra o estado final da chapa superior após furações e redução de largura.



Figura 4: Chapa Bruta de 1”.



Figura 5: Chapa Superior Pronta.

As furações de passagem dos tirantes, os dois furos maiores laterais, foram realizadas utilizando brocas comerciais de 1” e, na chapa superior, as furações para os parafusos da célula de carga foram realizadas utilizando brocas comerciais Ø10.

2.4 Fabricação das Garras

As 4 garras que compõe o sistema que sustenta o corpo de prova já se encontravam fabricadas no início do projeto. Foram fabricada a partir de uma chapa de aço A36, seguindo todas as especificações do projeto original. Foi realizado um lixamento superficial por conta da

oxidação acumulada durante os anos e foi necessário realizar um passo de acabamento nos furos menores $\text{Ø}20$ por conta da oxidação presente. A Figura 6 mostra o modelo projetado e a Figura 7 mostra a garra pronta como foi fornecida para este projeto.

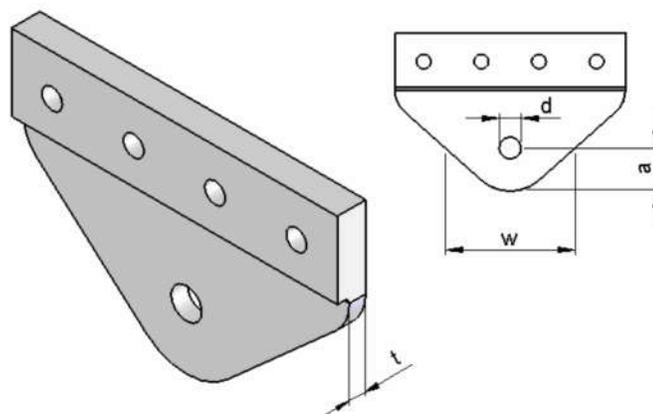


Figura 6: Modelo da Garra[4].



Figura 7: Garras.

2.5 Fabricação dos Tirantes

Os tirantes foram dimensionados a partir de barras cilíndricas de Inox AISI 420 com 1” de diâmetro. Sua fabricação seguiu a especificação original, sendo roscadas no padrão 1” – 8

UNC. Ao início deste projeto os tirantes já se encontravam confeccionados, porém suas roscas apresentavam fios agudos e foram lixados para evitar cortes e aumentar a segurança do manuseio, tanto na fase de montagem do equipamento quanto na sua posterior utilização. Em algumas barras algumas partes dos fios de rosca se encontravam com pequenos amassados e precisaram ser corrigidos para garantir o livre rosqueamento necessário para o funcionamento correto do equipamento.

A Figura 8 mostra o modelo original do tirante e a Figura 9 mostra um tirante superior e um tirante inferior finalizados, lixados e prontos para montagem no equipamento.

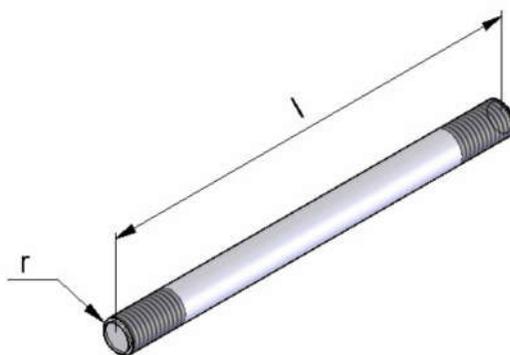


Figura 8: Modelo do Tirante[4].



Figura 9: Tirantes prontos.

2.6 Fabricação dos Olhais

Os olhais foram as peças de fabricação mais complexa de todo equipamento, pois necessitam de solda robusta, projetadas para 12 mm de lado de contato[4], e um furo central de 2” de diâmetro para passagem das barras cilíndricas. A peça em forma de paralelepípedo do Olhal possuía 95mm x 95mm de sessão quadrada[4], porém a barra quadrada comercial mais próxima de aço 1020 é de 4” (101,6mm) de lado da sessão quadrada. Portanto escolheu-se fabricar a peça em forma de paralelepípedo do Olhal utilizando esta sessão quadrada de 4” de lado.

A parte superior do Olhal, a ser soldada no paralelepípedo, já se encontrava confeccionada no início deste projeto e apenas foi realizado um lixamento superficial na região da solda. A solda foi realizada antes do furo de 2” do paralelepípedo para evitar a deformação do furo pelo calor de soldagem. A Figura 10 mostra um modelo do Olhal e a Figura 11 mostra o Olhal pronto para ser montado no equipamento.

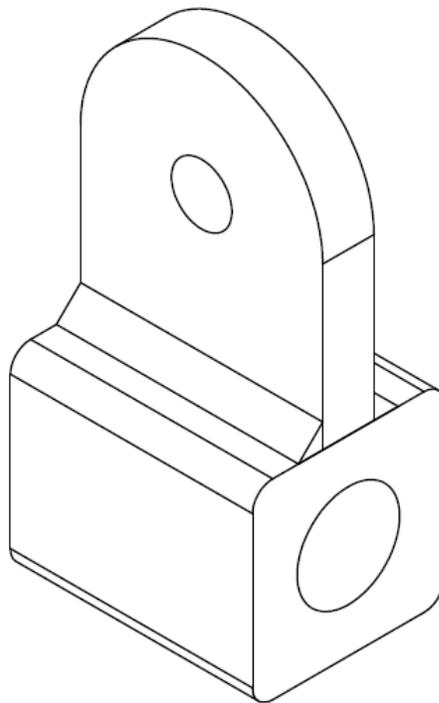


Figura 10: Modelo do Olhal[4].



Figura 11: Olhal pronto.

2.7 Fabricação das Barras Cilíndricas

As Barras Cilíndricas já se encontravam prontas ao início deste projeto, porém devido ao tempo transcorrido desde sua fabricação, apresentavam grande oxidação e precisaram passar por um passo de acabamento no torno novamente. Além disso, ambos os furos de 1” foram refeitos com passo de acabamento final de furação, pois apresentavam acabamento muito ruim, o que dificultava a passagem dos tirantes. Os diâmetros das barras foram perfeitamente ajustados para passarem livremente, porém sem folga, pelos furos de 2” do Olhal. A Figura 12 mostra o modelo da Barra Cilíndrica, a Figura 13 mostra uma das Barras Cilíndricas antes do acabamento final e a Figura 14 mostra uma das Barras Cilíndricas prontas para a montagem no equipamento após acabamento.

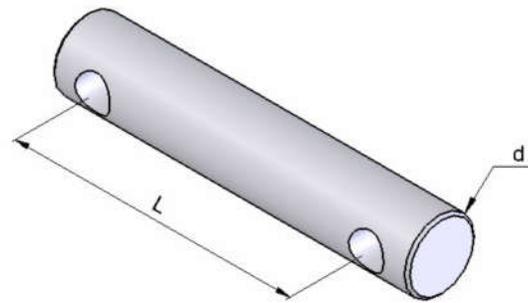


Figura 12: Modelo da Barra Cilíndrica[4].



Figura 13: Barra Cilíndrica antes do acabamento.



Figura 14: Barra Cilíndrica pronta.

2.8 Fabricação das Barras Retangulares

As Barras Retangulares e seus devidos reforços já se encontravam fabricadas ao início do projeto, porém ainda havia necessidade de soldar os reforços nas respectivas barras. Foi realizado um lixamento na região da solda, e esta foi realizada exatamente como especificada no projeto original [4]. A Barra Retangular Superior já possuía um inserto de alta dureza (>45HRc) colocado conforme solicitado no projeto. Novamente os furos de 1” receberam um passo de acabamento para garantir boa passagem pelos Tirantes. A Figura 15 mostra o modelo da Barra Retangular e a região do inserto, a Figura 16 mostra a Barra Retangular Superior fabricada com o inserto e reforço e a Figura 17 mostra a Barra Retangular Inferior com o reforço.

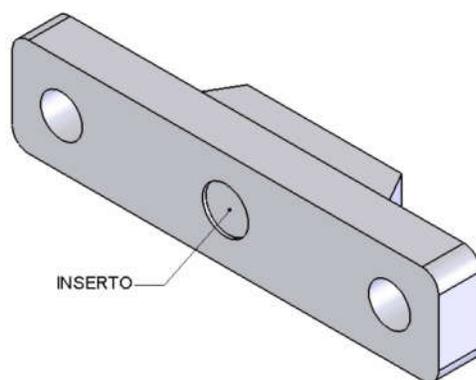


Figura 15: Modelo da Barra Retangular [4].



Figura 16: Barra Retangular Superior.



Figura 17: Barra Retangular Inferior.

2.9 Fabricação dos Pinos

Não foram encontrados Pinos Ø20 e Ø30 durante a pesquisa comercial do projeto, por isso ambos os tipos precisaram ser completamente fabricados. Foram utilizados 8 barras comerciais de 7/8" ($\approx 22,2\text{mm}$) de diâmetro com 100mm de comprimento e 2 barras comerciais de 1¼" (31,75mm) de diâmetro com 100mm de comprimento, todas de aço 1020, que foram usinadas no torno até 20 mm e 30 mm de diâmetro, respectivamente, deixando uma cabeça de 20 mm de comprimento no diâmetro original, tanto para fixação, como para facilitar o manuseio durante a instalação do corpo de prova.

Foram feitos furos Ø4 e Ø6, respectivamente nos pinos Ø20 e Ø30, para colocação de contrapinos comerciais para fixação destes nas Garras. A Figura 18 mostra pinos Ø20 e Ø30 prontos para instalação no equipamento.



Figura 18: Pinos Ø20 e Ø30 prontos.

2.10 Fabricação dos Apoios

Os apoios do quadro foram as únicas peças que necessitaram novo cálculo devido a mudanças dimensionais. Ao se pesquisar o projeto original, verificou-se que nestes os apoios possuíam fator de segurança ao escoamento $n_y = 169,7[4]$ e fator de segurança a flambagem $n_f = 98,9[4]$, caracterizando que a escolha das características dimensionais foram mais estéticas

do que por necessidades mecânicas do equipamento. Por conta disto, optou-se em utilizar chapas de $\frac{1}{2}$ " de espessura em vez de $\frac{3}{4}$ ", que possuem custo menor e são mais leves. A Figura 19 mostra o desenho esquemático dos apoios[4]. O valor da espessura "b" era de 19,05mm no projeto original e foi recalculada utilizando-se 12,7mm que foi o valor final utilizado. As Equações de 1 a 4 foram utilizadas no projeto original para calcular as propriedades de geometria da seção.

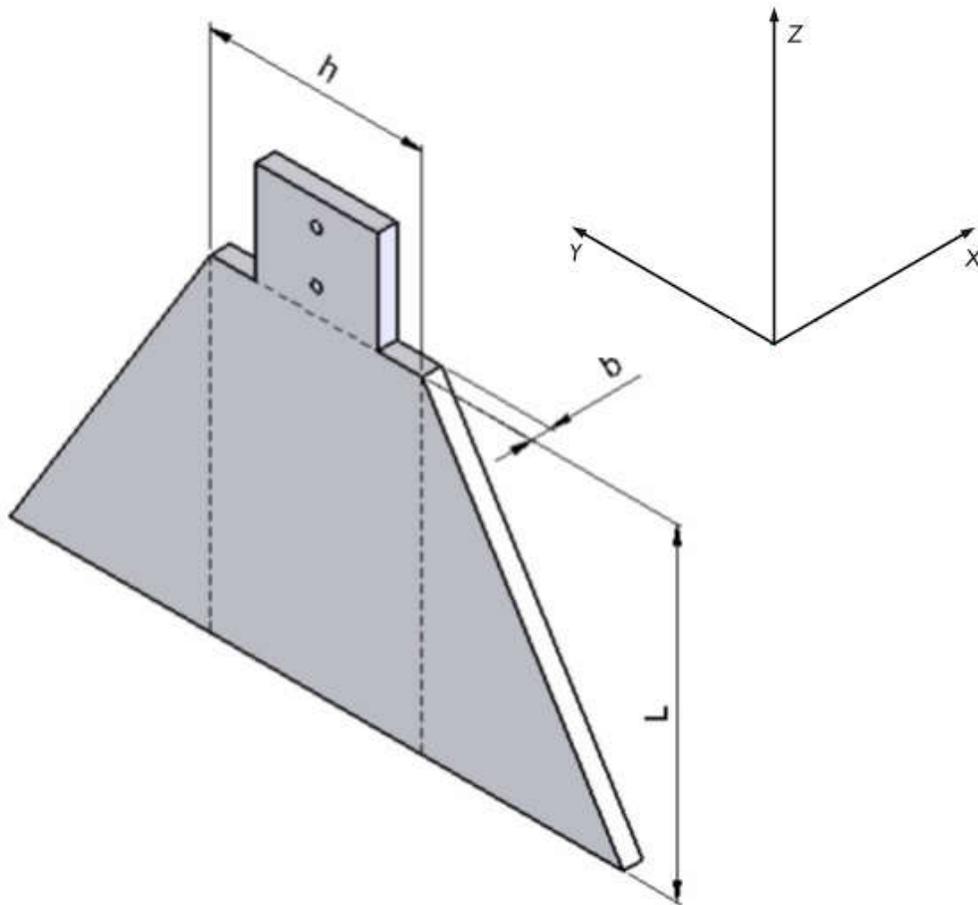


Figura 19: Desenho Esquemático do Apoio[4].

Geometria e propriedades das seções:

$$L = 320 \text{ mm}$$

$$b = 12,7 \text{ mm, valor modificado do projeto, o valor original era de } 19,05 \text{ mm}[4].$$

$$h = 207 \text{ mm}$$

$$I_x = \frac{bh^3}{12} \quad (1)$$

$$I_x = 9,4 \times 10^6 \text{mm}^4$$

$$I_y = \frac{hb^3}{12} \quad (2)$$

$$I_y = 3,5 \times 10^4 \text{mm}^4$$

$$r_x = \frac{h}{\sqrt{12}} \quad (3)$$

$$r_x = 59,7 \text{ mm}$$

$$r_y = \frac{b}{\sqrt{12}} \quad (4)$$

$$r_y = 3,7 \text{ mm}$$

As propriedades do material utilizado, ASTM A-36, conforme bibliografia e utilizadas no projeto original[4] são:

$$E = 200 \text{ GPa}$$

$$S_y = 250 \text{ MPa}$$

$$S_u = 475 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,26$$

A massa do equipamento conforme projeto vale 296,2kg[4] e seu peso(N) foi majorado duas vezes conservativamente para o valor de 5,809 kN[4].

2.10.1 Verificação a compressão dos apoios

A Equação 5 mostra a área da seção sujeita a compressão conforme Figura 19 e a Equação 6 mostra a fórmula da tensão compressiva a que esta área está sujeita[3].

$$N = 5,809 \text{ kN}$$

$$A = bh \quad (5)$$

$$A = 2.628,9 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (6)$$

$$\sigma = 2,21 \text{ MPa}$$

A fórmula para o fator de segurança(n_y) ao escoamento é dada na Equação 7[2].

$$n_y = \frac{S_y}{\sigma} \quad (7)$$

$$n_y = 113$$

2.10.2 Verificação à flambagem dos apoios

Utilizando-se o mesmo coeficientes de condição de extremidade ($C = 1/4$) a Equação 8 determina a tensão crítica de flambagem e a Equação 9 o fator de segurança à flambagem(n_f) do apoio[2].

$$\sigma_{cr} = \frac{C\pi^2 E}{\left(\frac{L}{r_y}\right)^2} \quad (8)$$

$$\sigma_{cr} = 65,97 \text{ MPa}$$

$$n_f = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma} \quad (9)$$

$$n_f = 29,85$$

Fica claro pelos valores calculados do fator de segurança à compressão e à flambagem muito acima do necessário que a redução de espessura dos apoios de 19,05 mm para 12,7 mm não causará nenhum risco a integridade dos mesmos, tendo como único efeito a redução do custo e do peso das peças.

2.11 Fabricação do Corpo de Prova

O corpo de prova inicial foi fabricado a partir de uma chapa de aço 1020 de 6/32" de espessura, pois não havia no mercado disponibilidade de chapas de 5/32" de espessura como especificada no projeto original[4]. Analisando-se o projeto constatou-se que o valor de 6/32" de espessura não possui diferenças de comportamento significativas em relação a espessura de 5/32" considerando o critério adotado no projeto: A geração de um campo de tensão compatível com a resolução do equipamento de furação instrumentada. A Figura 20 mostra um desenho isométrico simples de um Corpo de Prova.



Figura 20: Corpo de Prova.

2.12 Demais Materiais

Todos os demais materiais listados no projeto original, na lista de material[4], incluindo porcas, parafusos, arruelas, célula de carga e macaco hidráulico, foram encontrados comercialmente e comprados para realização da montagem do equipamento. A lista completa de materiais se encontra nos desenhos do projeto original e segue também no Anexo A deste documento.

2.12.1 Célula de Carga

A célula de carga comprada para o quadro foi uma Utilcell modelo 750 com carga máxima de trabalho de 20 toneladas. A Figura 21 mostra as especificações técnicas da célula de carga fornecidas pelo fabricante e a Figura 22 mostra as ligações elétricas para o sistema de aquisição de dados também fornecida pelo fabricante.[6]

SPECIFICATIONS			TECHNISCHE DATEN
Nominal capacities (Ln)	7.5-10-15- 20-25-30	t	Nennlasten (Ln)
Accuracy class	3000	n. OIML	Genauigkeitsklasse
Minimum dead load	0	%Ln	Minimale Vorlast
Service load	150	%Ln	Gebrauchslast
Safe load limit	200	%Ln	Grenzlast
Total error	< ±0.017	%Sn	Zusammengesetzter Fehler
Repeatability error	< ±0.015	%Sn	Wiederholgenauigkeit
Temperature effect: on zero on sensitivity	< ±0.01 < ±0.006	%Sn/5°K %Sn/5°K	Temperaturfehler: Nullpunkt Kennwert
Creep error (30 minutes)	< ±0.016	%Sn	Kriechfehler (30 min)
Temperature compensation	-10...+40	°C	Nenntemperaturbereich
Temperature limits	-30...+70	°C	Arbeitstemperaturbereich
Nominal sensitivity (Sn)	2	mV/V (1)	Nennkennwert (Sn)
Nominal input voltage	10	V	Nom. Speisespannung
Maximum input voltage	15	V	Max. Speisespannung
Input impedance	800 ±25	Ω	Eingangswiderstand
Output impedance	700 ±5	Ω	Ausgangswiderstand
No load output	< ±2	%Sn	Nullsignaltoleranz
Insulation resistance	> 5000	MΩ	Isolationswiderstand
Maximum deflection (at Ln)	0.3	mm	Nennmessweg (bei Ln)
(1) Pre-corner adjustment optimized at ±0.05% by output current calibration / Auf ±0.05% optimierter Eckenvorabgleich durch Stromkalibrierung des Ausgangssignals			

Figura 21: Especificações técnicas da célula de carga.[6]

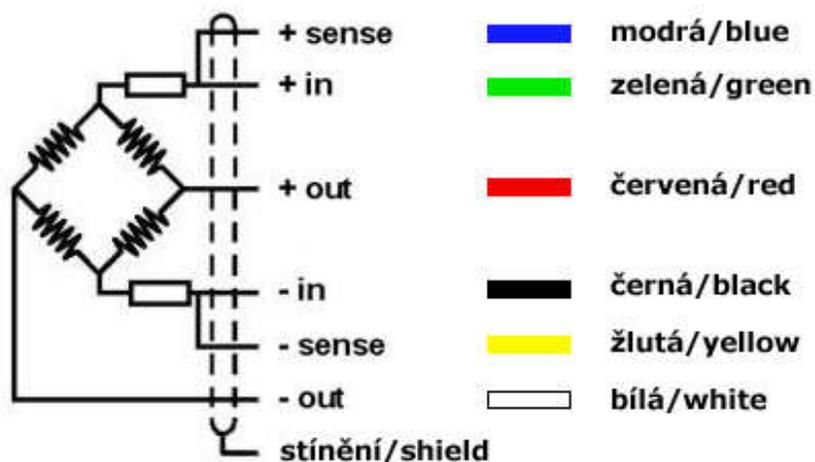


Figura 22: Esquema elétrico da célula de carga.[6]

2.12.2 Macaco Hidráulico

Foi comprado para a operação do equipamento um macaco hidráulico de acionamento manual com limite de operação de 10 toneladas. Este só deve ser colocado no equipamento durante sua operação.

A pressurização do macaco hidráulico é realizada por alavanca localizada no topo do corpo da bomba e sua despressurização por um parafuso de alívio localizado ao lado do corpo da bomba. A Figura 23 mostra a localização do parafuso de alívio de pressão e a Figura 24 mostra o conjunto bomba-mangueira-atuador do macaco hidráulico montado em bancada pronto para a operação do equipamento.



Figura 23: Parafuso de alívio de pressão.



Figura 24: Macaco Hidráulico.

Capítulo 3

Montagem do Equipamento

Neste capítulo será abordada a montagem do quadro de reação, observando a ordem de eventos necessária para uma montagem segura e correta.

3.1 Considerações gerais para a montagem

Para se realizar a montagem e desmontagem do quadro de reação foi necessário verificar a disponibilidade de espaço físico no laboratório, tanto para a residência permanente do equipamento como para a manipulação das peças e ferramentas durante a sua montagem. É recomendado a utilização de óculos de segurança, luva de malha pigmentada e capacete de segurança sempre que estiver realizando o aperto dos parafusos principalmente nas partes internas do quadro. Deve-se dispor também de ao menos uma chave Allen para parafuso M10 e ao menos uma chave de boca para porca M10 e para porca de 1 polegada. Um nível deve ser utilizado no início da montagem, antes dos apertos finais, para se certificar do alinhamento correto dos componentes da moldura do quadro.

3.2 Montagem dos elementos estruturais da moldura do quadro

O primeiro passo para a montagem do quadro de reação foi a montagem da moldura externa do quadro. Esta moldura é constituída de dois perfis I que formam as colunas laterais do quadro, oito vigas de ½" polegada de espessura que formam as vigas horizontais do quadro, substituindo as quatro vigas de 1" do projeto original e dois apoios trapezoidais que são fixados nas laterais dos perfis I.

3.2.1 Fixação dos apoios

Os dois Apoios são fixados nas laterais dos perfis I que compõe o quadro. A fixação de cada Apoio foi realizada por 2 parafusos M10 com porcas e arruelas M10. A Figura 25 mostra a fixação de um apoio no perfil I que forma a lateral do quadro.



Figura 25: Montagem do Apoio.

Após a fixação dos apoios, os perfis I devem ser colocados na vertical e as vigas que compõe a parte horizontal do quadro devem ser fixadas. Para facilitar a montagem, recomenda-se fixar primeiro as vigas inferiores formando uma estrutura em “U”, conforme Figura 26. Esta ordem de montagem garante a estabilidade do quadro desde o início da montagem.

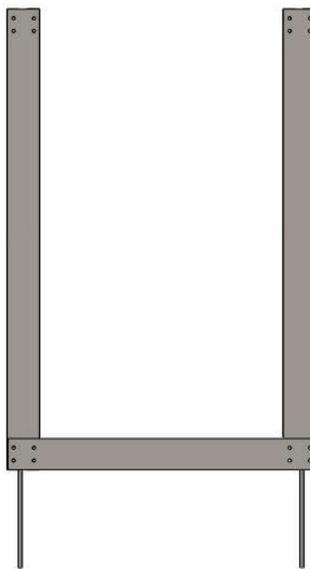


Figura 26: Montagem em U da Moldura.

3.2.2 Colocação das vigas horizontais

Colocam-se as vigas horizontais restantes do quadro. Ao total o quadro possui oito vigas de $\frac{1}{2}$ " de espessura, colocadas duas a duas, substituindo as quatro vigas de 1" do projeto original[4].

Foi necessária a utilização de um nível ou ferramenta semelhante para garantir o alinhamento das partes e que as vigas façam ângulos retos com os perfis I. Este alinhamento é extremamente importante para garantir o perfeito encaixe das peças que posteriormente serão posicionadas no interior do quadro, formando seu trem de carga, bem como evitar a aparição de tensões de flexão indesejadas ao longo do quadro durante um ensaio. A Figura 27 mostra a moldura completamente montada com os apoios no laboratório.



Figura 27: Moldura com Apoios.

3.3 Montagem dos elementos superiores do trem de carga

O trem de carga superior do quadro é constituído da chapa superior onde ficará a célula de carga, da barra retangular superior, dos dois tirantes superiores, de um dos olhais, de duas das quatro garras, de um dos dois pinos Ø30, de quatro dos oito pinos Ø20 e de todas as porcas, arruelas e contrapinos necessários para a fixação destas peças.

3.3.1 Posicionamento da chapa superior do quadro

A chapa superior é o elemento por onde passarão os tirantes superiores e onde fica acomodada a célula de carga superior. Esta deve ser acomodada o mais próximo possível do centro do lado superior da moldura. Nesta etapa ela ainda não deve ser soldada na moldura, pois ainda é necessário realizar seu alinhamento com o restante do equipamento. Convém posicionar a célula de carga nesta etapa para garantir o bom posicionamento da barra retangular

superior na etapa seguinte. A célula de carga é fixada na chapa superior por quatro parafusos M10 de 80 mm de comprimento e respectivas porcas e arruelas. A Figura 28 mostra a chapa posicionada, com a célula de carga montada, pronta para a passagem dos tirantes e colocação da barra retangular superior.



Figura 28: Montagem da Célula de Carga.

3.3.2 Colocação dos tirantes superiores e da barra retangular superior

O próximo passo é a passagem dos tirantes superiores pela chapa superior e fixação destes na barra retangular superior. Esta fixação foi realizada utilizando uma porca de 1" 8 UNC em cada tirante, com sua respectiva arruela. Nesta etapa é crítico observar que os tirantes devem poder correr pelos furos da chapa superior o mais livremente possível, para garantir o mínimo de atrito e evitar medição imprecisa da célula de carga durante um ensaio. Deve-se garantir também que a região do inserto da barra retangular superior esteja posicionada imediatamente acima do acionador da célula de carga. A Figura 29 mostra a correta montagem da barra retangular superior na célula de carga e os tirantes.



Figura 29: Montagem da Barra Retangular Superior.

3.3.3 Montagem do olhal superior

Primeiro deve-se passar as barras cilíndricas nos furos de 2" dos olhais. Os olhais devem ser posicionados com maior precisão possível no meio das barras cilíndricas para se garantir simetria das cargas aplicadas nos tirantes. Passa-se então o conjunto olhal-barra cilíndrica nos tirantes conforme desenho de montagem original[4] ou no Anexo A, e mostrado na Figura 30. Conforme mostrado, a fixação novamente é realizada utilizando um conjunto porca e arruela de 1". As porcas são padrão 8 UNC.



Figura 30: Montagem do Olhal superior.

3.3.4 Montagem das garras superiores

O último elemento do trem de carga superior são as garras que seguram o corpo de prova. Estas devem ser fixadas no furo $\varnothing 30$ do Olhal utilizando-se um dos Pinos $\varnothing 30$ fabricados para este fim. Deve-se utilizar uma arruela de diâmetro compatível e um contrapino de fixação para garantir que as garras não deslizem pelo pino durante a realização de um ensaio. Recomenda-se que o pino seja colocado de tal forma que o furo para o contrapino fique na parte traseira do quadro, pois isto diminui a chance de contato com pontas durante a manipulação de instrumentos na realização de um ensaio.

A Figura 31 mostra a visão frontal da montagem das Garras e a Figura 32 mostra a visão traseira da montagem das Garras, com o contrapino posicionado.

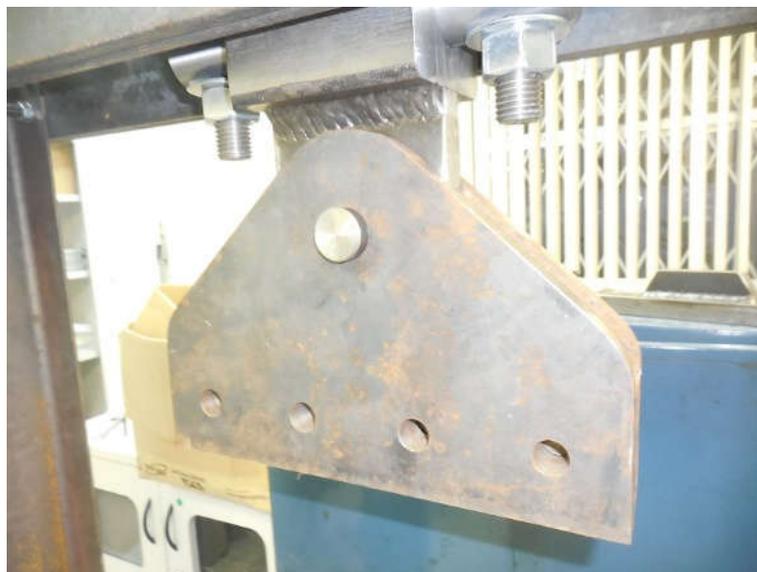


Figura 31: Montagem da Garra, visão frontal.



Figura 32: Montagem da Garra, visão traseira.

3.4 Fixação do corpo de prova

Após a montagem inicial, o corpo de prova poderá ser trocado livremente sem a necessidade de desmontagem dos elementos inferiores do trem de carga, porém na montagem

inicial do equipamento, o corpo de prova foi colocado logo após os elementos superiores do trem de carga para facilitar o alinhamento das peças e diminuir o risco de tensões de flexão durante um ensaio. O corpo de prova foi fixado às garras por 4 pinos Ø20. Os pinos foram confeccionados de forma a permitir um encaixe justo e certificar que todos os 4 pinos estejam sujeitos aproximadamente ao mesmo cisalhamento durante a operação do equipamento. Novamente foram usados contrapinos para impedir o deslizamento das garras durante um ensaio. A Figura 33 mostra a montagem frontal do corpo de prova com os pinos na garra superior e a Figura 34 mostra a montagem traseira do corpo de prova na garra superior com o detalhe dos contrapinos de fixação.



Figura 33: Montagem frontal superior do Corpo de Prova.



Figura 34: Montagem traseira superior do Corpo de Prova.

3.5 Montagem dos elementos inferiores do trem de carga

O trem de carga inferior é constituído da chapa inferior do quadro, dos dois tirantes inferiores, da barra retangular inferior, de um dos olhais, de duas das quatro garras, de um dos dois pinos Ø30, de quatro dos oito pinos Ø20, do macaco hidráulico e de todas as porcas, arruelas e contrapinos para fixação destas peças.

3.5.1 Montagem das garras inferiores

Nesta etapa foi realizado o procedimento inverso ao descrito na etapa 3.3.4. Com o Corpo de Prova em suspensão, são fixadas ambas as garras inferiores pelos 4 pinos Ø20, novamente utilizando-se arruelas e contrapinos de fixação para evitar o deslizamento da garra durante o ensaio. O encaixe dos pinos precisa ser o mais justo possível, sem travamento, para garantir uma distribuição uniforme de forças cisalhantes entre estes durante o ensaio. A Figura 35 mostra a montagem frontal das garras inferiores no Corpo de Prova e a Figura 36 mostra a montagem traseira das garras inferiores no Corpo de Prova, destacando as arruelas e contrapinos de fixação.



Figura 35: Montagem da garra inferior dianteira no Corpo de Prova.



Figura 36: Montagem da garra inferior traseira no Corpo de Prova.

3.5.2 Montagem do olhal inferior e tirantes inferiores

Utilizando-se o outro conjunto olhal-barras cilíndrica, cuja montagem foi discutida no item 3.3.3, deve-se fixar o olhal às garras inferiores utilizando novamente um conjunto pino Ø30, arruela e contrapino. Por questão de espaço de trabalho e peso dos próximos componentes, é interessante colocar os olhais já com os tirantes inferiores posicionados e presos com as arruelas e porcas, pois estes tirantes são maiores que os superiores e quase não apresentam folga até o chão. A Figura 37 mostra o conjunto do olhal inferior montado já com os tirantes inferiores.

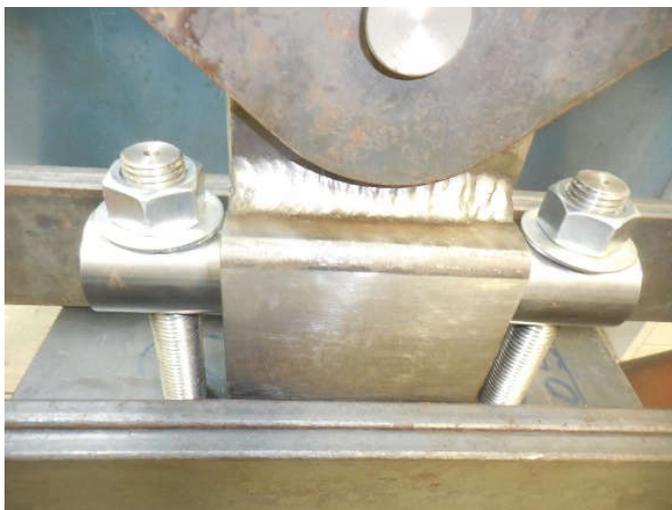


Figura 37: Conjunto do Olhal inferior.

3.5.3 Colocação da chapa inferior, das roscas de fixação e da barra retangular inferior

A chapa inferior foi colocada passando-se seus furos de 1” pelos tirantes inferiores. Em seguida, passou-se uma arruela e duas porcas de 1” 8 UNC em cada tirante inferior, que servirão como sistema de travamento durante os ensaios[4]. Estas porcas provisoriamente foram utilizadas para manter a chapa inferior em contato físico com a moldura do quadro para permitir seu alinhamento e soldagem nas etapas seguintes. Por último é colocada a barra retangular inferior presa aos tirantes por um conjunto de porca e arruela de 1”. A Figura 38 mostra todo este conjunto montado e pronto para o alinhamento final e soldagem das chapas no quadro.



Figura 38: Chapa inferior, barra retangular e sistema de travamento.

3.6 Alinhamento final e soldagem das chapas no quadro

Com todo sistema montado, foi realizado um leve aperto nas porcas de travamento para pressionar as chapas superiores e inferiores contra a estrutura do quadro lentamente, até que estas se acomodassem. Após se acomodarem foram utilizados níveis e réguas para verificar se o sistema de carga estava alinhado. Não foram encontradas grandes divergências geométricas relativas entre a parte superior e inferior do trem de carga. Com a confirmação do alinhamento, foi feita a soldagem das chapas superiores e inferiores nas vigas transversais da moldura do

quadro. O tipo de solda utilizado foi de eletrodo revestido 6013, com eletrodo de 2,5 mm. A Figura 39 detalha um dos quatro pontos de solda realizado em cada chapa.



Figura 39: Solda da chapa inferior na viga transversal do quadro.

3.7 Montagem do quadro de reação finalizada

Após a soldagem das chapas superior e inferior do quadro, a montagem de comissionamento do quadro de reação foi considerada concluída. A Figura 40 mostra o quadro de reação totalmente montado no laboratório.



Figura 40: Quadro de reação finalizado.

Capítulo 4

Teste de validação do quadro

Neste capítulo é descrito todo procedimento realizado para o teste de validação do quadro de reação, desde sua preparação até a execução do teste em si.

4.1 Preparação para o teste

Esta etapa constitui todos os procedimentos realizados antes de se iniciar a aplicação de carga ao sistema.

4.1.1 Fixação do Strain-Gauge

A primeira etapa de preparação para o teste foi a fixação do “strain-gage” no corpo de prova. Por se tratar de um teste simples para verificar a integridade do equipamento, foi utilizado somente um “strain-gage” para medir a deformação axial vertical do corpo de prova.

A Figura 41 mostra o “strain-gage” fixado no centro do corpo de prova



Figura 41: “strain-gage”.

. Esta posição central ao corpo de prova foi escolhida devido ao princípio de Saint-Venant que afirma, de uma forma simplificada, que as tensões e as deformações produzidas em pontos suficientemente distantes da região de aplicação das cargas se distribuem de forma mais uniforme que em pontos próximos a região de aplicação das cargas.[3]

4.1.2 Solda dos conectores do “strain-gage”

Em seguida foi realizada a solda dos conectores do “strain-gage” nos fios que vão para o sistema de aquisição de dados. Esta solda foi realizada utilizando-se um ferro de solda simples e uma solda para eletrônicos comum. A Figura 42 mostra o detalhe da solda nos terminais do “strain-gage” e a Figura 43 mostra a fixação dos cabos no corpo de prova utilizando-se uma fita crepe comum.

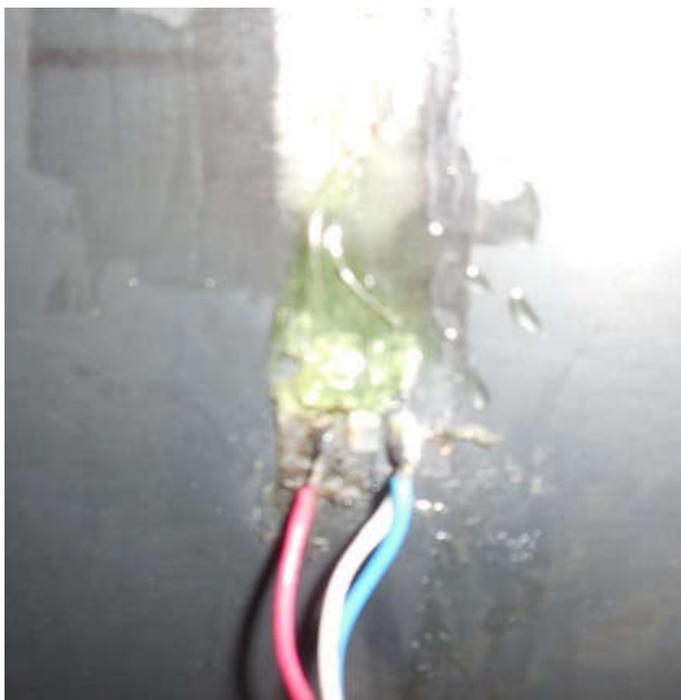


Figura 42: Solda dos conectores do “strain-gage.”



Figura 43: Fixação dos cabos do sistema de aquisição de dados.

4.1.3 Conexão do “strain-gage” e da Célula de Carga ao sistema de aquisição de dados

A última etapa de preparação para o teste foi realizar a conexão do “strain-gage” e da célula de carga ao sistema de aquisição de dados. O sistema de aquisição de dados utilizado foi um HBM Spider 8.[7] A Figura 44 mostra o detalhe do equipamento de aquisição de dados e a Figura 45 mostra todo o sistema de aquisição de dados montado e pronto para a realização do teste.



Figura 44: Equipamento de aquisição de dados.



Figura 45: Sistema de aquisição de dados montado.

4.2 Realização do Teste

O teste inicial foi realizado com carga de 1 tonelada medida pela célula de carga. Durante este teste o equipamento foi inspecionado em busca de possíveis falhas estruturais. As etapas a seguir descrevem cada etapa do teste.

4.2.1 Posicionamento do Macaco Hidráulico e tara do sistema

A primeira etapa do teste foi posicionar o macaco hidráulico na barra retangular inferior e pressurizá-lo até que este entrou em contato com a chapa inferior do quadro. Em seguida foi realizada a tara das variáveis de entrada no sistema de aquisição de dados, considerando todos os valores lidos pelo sistema até este momento como a condição inicial do sistema devido ao peso próprio. A Figura 46 mostra o posicionamento do macaco hidráulico em contato com a chapa inferior, definindo as condições iniciais do teste.



Figura 46: Macaco Hidráulico na condição inicial do teste.

4.2.2 Carregamento do sistema e travamento

Após a tara do sistema é iniciado o carregamento deste pelo macaco hidráulico. Para o teste inicial foi definido uma carga máxima de 1 tonelada para avaliação do sistema. Esta carga foi medida pela célula de carga e os valores lidos pelo “strain-gage” também começaram a variar, indicando que ambos estavam respondendo ao sistema. Quando a carga lida pela célula de carga atingiu aproximadamente 1 tonelada, foi realizado o travamento das porcas do sistema de travamento da chapa inferior do quadro.

Em seguida o quadro inteiro foi inspecionado visualmente em busca de quaisquer falhas estruturais ocasionadas pelo carregamento ou algum defeito de fabricação.

A Figura 47 mostra o quadro carregado, travado, durante a realização do teste com o sistema de aquisição de dados registrando as leituras da célula de carga e do “strain-gage”.



Figura 47: Quadro durante teste inicial carregado e travado.

4.2.3 Descarregamento do sistema

A última etapa do teste foi o descarregamento do sistema. Este descarregamento foi realizado carregando-se novamente o macaco hidráulico até que este atingisse uma carga ligeiramente acima da carga do teste, garantindo que o sistema de travamento do quadro não mais mantinha o quadro carregado. Então realizou-se o destravamento das porcas de travamento e, por fim, o macaco hidráulico foi despressurizado lentamente para garantir que as partes do quadro que sofreram deformação elástica retornassem lentamente à posição inicial.

4.3 Dados coletados durante o teste

Os dados coletados durante o teste inicial pelo sistema de aquisição de dados foram:

- Carga, em kN, aplicada sobre a célula de carga durante todo o teste.
- Deformação, em μStrain , sofrida pelo “strain-gage” durante todo o teste.

Estes dados foram compilados em dois gráficos, mostrados nas Figuras 48 e 49.

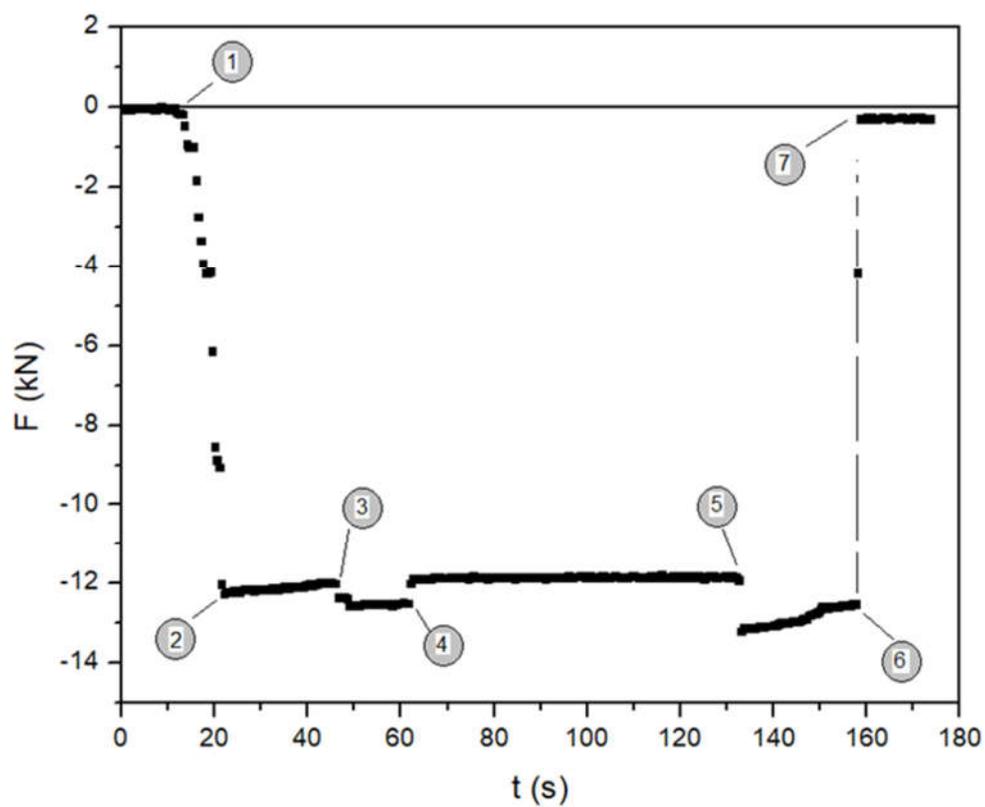


Figura 48: Gráfico dos esforços obtidos através da célula de carga.

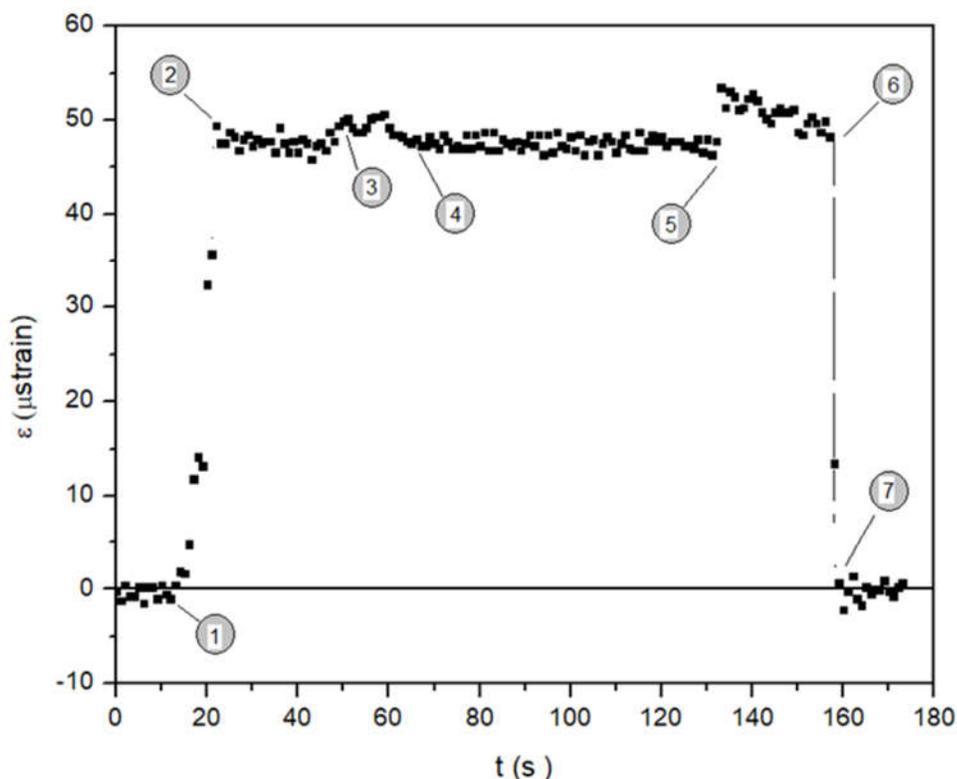


Figura 49: Gráfico das deformações obtidas através do “strain-gage”.

Onde os eventos do teste estão marcados nas Figuras 48 e 49:

1 – início do carregamento com pressurização do sistema, de 1 a 2 – imposição de cargas crescentes até atingir o patamar desejado, 2 – fim do carregamento, de 2 a 3 – o tempo está passando sem se mexer no pistão, de 3 a 4 – período de aperto das porcas, 4 – final do aperto das porcas e retirada do carregamento do pistão, de 4 a 5 – manutenção da tração no c.p. apenas com as porcas (sem o pistão), 5 – carregamento pelo pistão, de 5 a 6 – afrouxamento das porcas, 7 – pistão recolhido e circuito hidráulico totalmente despressurizado.

Os valores do gráfico de esforços obtidos através da célula de carga aparecem negativos indicando que a célula de carga foi sujeita a cargas compressivas, como esperado, e os esforços do gráfico das deformações obtidas através do “strain-gage” se encontram positivas indicando que a carga no corpo de prova durante o teste foi trativa.

É interessante observar na Figura 48, que entre as etapas 2 e 3 o sistema apresentou pequena perda de carregamento, porém após o acionamento das porcas de travamento entre as etapas 3 e 4, o sistema se manteve perfeitamente estável. Este comportamento indica que o pistão do macaco hidráulico não é suficiente para manter o sistema em equilíbrio, porém o

sistema de travamento projetado para o quadro de reação funcionou corretamente e foi aprovado neste teste.

4.4 Modelo analítico do teste

Segundo HIBBELER[3], a variação do comprimento(δ) do corpo de prova, que possui área de seção transversal constante, é dada pela Equação 10:

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad (10)$$

E a deformação(ϵ) é dada pela Equação 11:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (11)$$

Trabalhando-se a Equação 10, tem-se:

$$\frac{\delta}{L} = \frac{P}{AE}$$

Combinando-se as Equações 10 e 11, obtém-se a Equação 12:

$$\epsilon = \frac{P}{AE} \quad (12)$$

Onde:

P = Carga aplicada sobre o corpo de prova;

A = Área da seção transversal do corpo de prova;

E = Módulo de elasticidade do corpo de prova.

O valor da carga P durante o teste, conforme Figura 48, foi de aproximadamente 12 kN, o módulo de elasticidade E para aço ASTM A-36 vale 200 GPa, e a área da seção transversal do corpo de prova A, mostrada na Figura 50, é calculada pela Equação 13.

$$A = bh \quad (13)$$

Onde:

$$b = 0,320 \text{ m}$$

$$h = 0,0047 \text{ m}$$

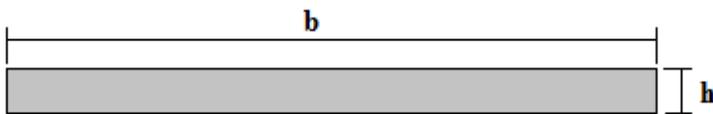


Figura 50: Área da seção transversal do CP.

Calculando-se temos:

$$A = 1,504 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Aplicando os valores de P, E e A na Equação 12, temos:

$$\varepsilon = \frac{12 \times 10^3}{1,504 \times 10^{-3} \times 200 \times 10^9}$$

$$\varepsilon \approx 40 \times 10^{-6} \text{ m/m}$$

4.5 Comparando os resultados do teste com o modelo analítico

Pelos gráficos do teste (Figuras 48 e 49), a deformação, ε , para uma carga de 12 kN foi de aproximadamente 47 μstrain (10^{-6} m/m). Comparando-se com o valor analítico de aproximadamente $40 \times 10^{-6} \text{ m/m}$ para um carregamento de 12 kN, a diferença foi de aproximadamente 17%.

O resultado do teste indicou que o quadro está aprovado para testes de carga reduzida (Até 12kN), necessitando novos testes comparativos com o modelo analítico para validar cargas superiores.

Capítulo 5

Conclusão

No total, foram fabricadas 39 peças individuais de complexidades variadas: 8 vigas transversais, 2 vigas verticais perfil I, 1 chapa superior, 1 chapa inferior, 4 garras, 2 olhais, 2 barras cilíndricas, 2 barras retangulares, 2 tirantes superiores, 2 tirantes inferiores, 2 apoios, 8 pinos Ø20, 2 pinos Ø30 e 1 corpo de prova e foram utilizados diversos processos de fabricação: Torneamento externo, torneamento interno, corte, fresamento, furação e soldagem para se concluir a montagem do quadro.

O teste de validação do quadro de reação mostrou que este não apresenta falhas grosseiras de projeto ou fabricação, atingindo experimentalmente valores muito próximos dos valores teóricos calculados. Ainda não foram realizados testes com cargas próximas a carga máxima de projeto, de 10 toneladas.

Necessita-se realizar primeiro testes com frações da carga máxima antes de se realizar teste um com a carga total. Valores recomendados seriam de 2,5 toneladas e 5 toneladas para somente após se realizar o teste em carga máxima de 10 toneladas.

A diferença entre os valores experimentais obtidos e os teóricos calculados pode ser atribuída tanto a presença de momento fletor no corpo de prova, como a diferença nos valores assumidos para o módulo de elasticidade do material ao valor real que este apresenta, que pode ser futuramente verificado com a realização de outro teste com múltiplos “strain-gages”:

- Se os valores lidos nos “strain-gage” posicionados na parte frontal do corpo de prova tiverem módulos muito diferentes dos valores lidos nos “strain-gage” posicionados na parte traseira do corpo de prova, ficará clara a existência de momento fletor no corpo de prova e este deve ser realinhado para se tentar reduzir este momento.
- Caso os valores entre “strain-gage” frontais e traseiros apresentem diferenças e seu valor médio também seja diferente do valor teórico esperado, será necessário tanto corrigir o momento fletor no corpo de prova como também recalibrar o sistema.

Necessita-se a realização de pelo menos um teste de múltiplos “strain-gage”, com carga semelhante ao já realizado (12 kN), antes de se realizar um teste com carga máxima, para se verificar a presença de momento fletor que resultariam em pontos da estrutura excedendo a tensão limite de escoamento estabelecida pelo projeto original.

Outro trabalho futuro que será importante para a manutenção e conservação do quadro será um trabalho de lixamento e pintura, pois todo o material que compõe o quadro é oxidável. Também recomenda-se a lubrificação periódica dos tirantes, na passagem pelas chapas superior e inferior, e das barras cilíndricas para que estas permitam o perfeito deslizamento dos olhais durante um teste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E-837. *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method*, 1992.

[2] BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K.; *Elementos de Máquinas de Shigley*, 8ª ed. Porto Alegre, AMGH, 2011.

[3] HIBBELER, R. C.; *Resistência dos Materiais*, 7ª ed. São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2010.

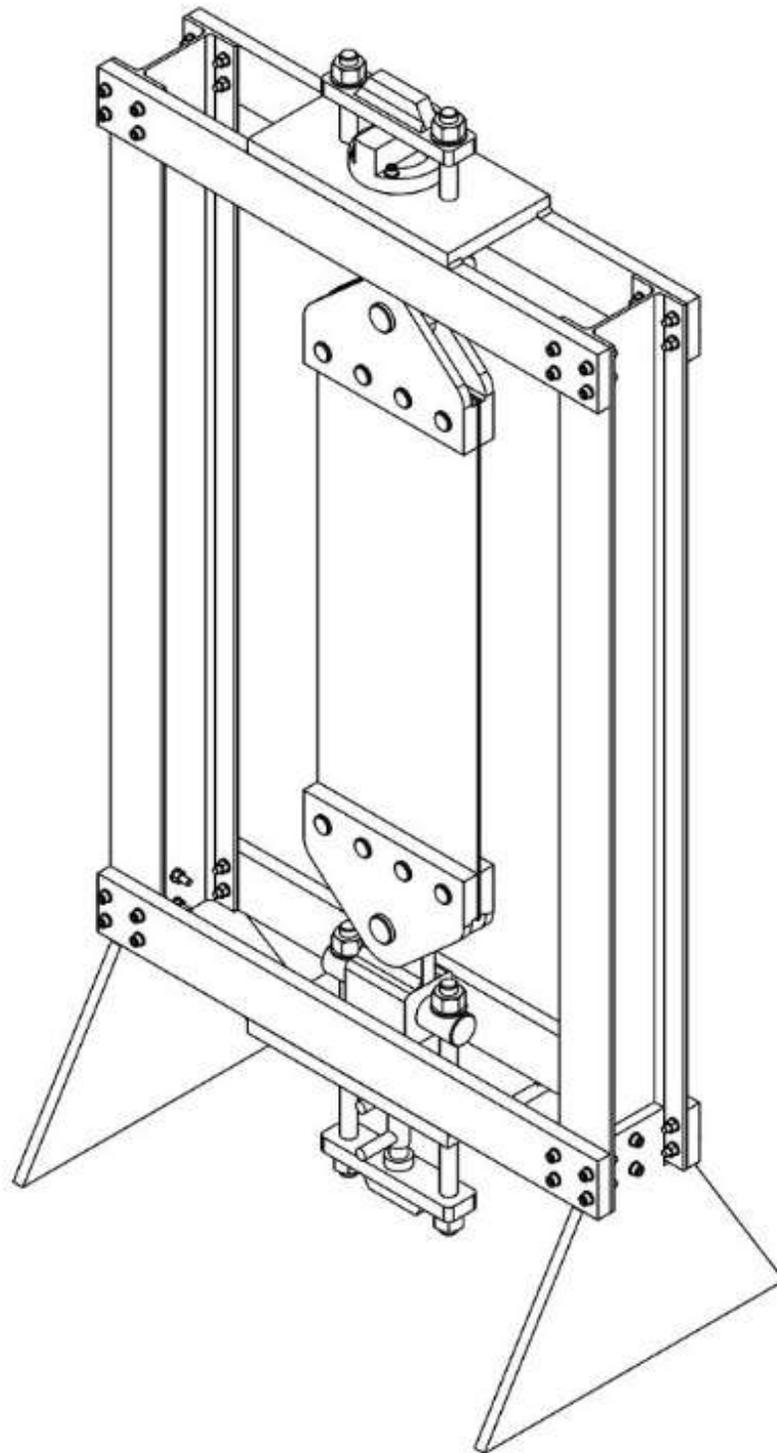
[4] SANTOS, H. G.; PEREZ, H.; *Projeto de um Dispositivo para a Aplicação de um Campo Uniaxial de Tensão em Placas*, Rio de Janeiro, Agosto 2006. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET/RJ.

[5] <http://www.bucher.com.br>

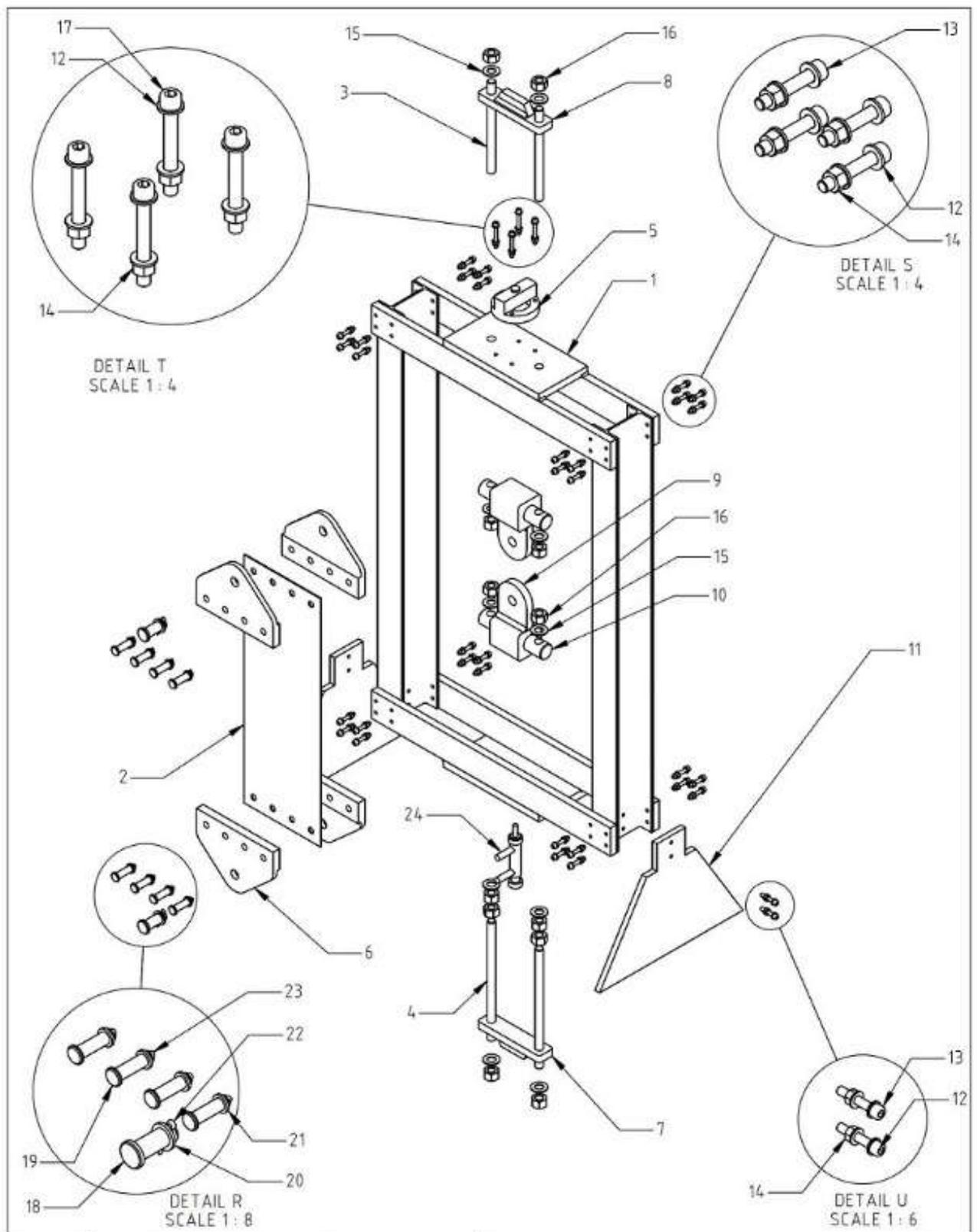
[6] <http://www.utilcell.com/en/content/load-cell-m750>

[7] <http://www.usas.no>

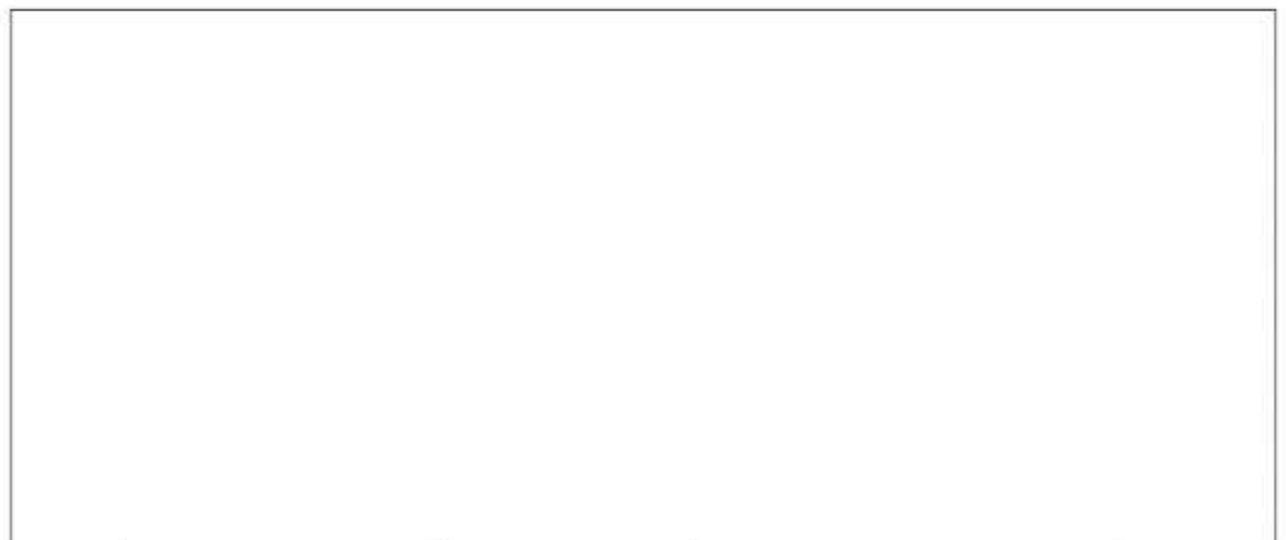
ANEXO A: Desenhos e lista de material.



ALUNO	Hugo Perez / Hugo Gama dos Santos			<h1>CEFET-RJ</h1>		
PROF.						
DATA	9/7/2006	VISTO				
ESC.	TÍTULO			TURMA	NÚMERO	FOLHA Nº
1:10	CONJUNTO - ISOMÉTRICA			10º P. MEC		1/12
				NÚMERO DO DESENHO		
				01		
DIMENSÕES EM MM		TOLERÂNCIAS NÃO INDICADAS:		0 ± 0,1	0,0 ± 0,05	0,00 ± 0,02

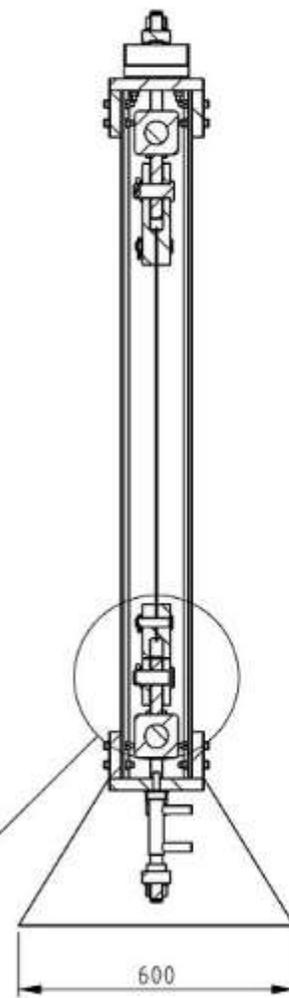
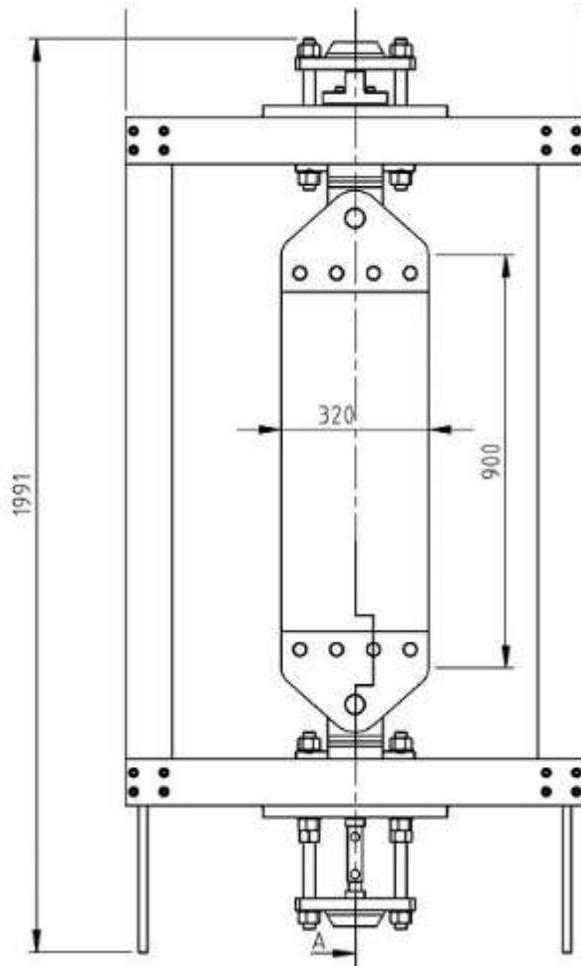


ALUNO	Hugo Perez / Hugo Gama dos Santos			<h1>CEFET-RJ</h1>		
PROF.						
DATA	9/7/2006	VISTO				
ESC.	TÍTULO			TURMA	NÚMERO	FOLHA Nº
1:16	CONJUNTO - EXPLODIDA			10º P. MEC		2/12
				NÚMERO DO DESENHO		
				01		
DIMENSÕES EM MM		TOLERÂNCIAS NÃO INDICADAS:		0±0,1	0,0±0,05	0,00±0,02

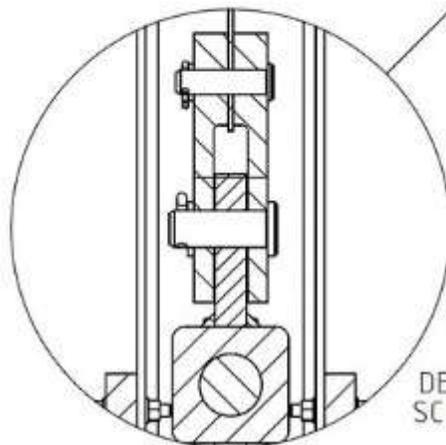


ITEM	DESCRIÇÃO	MATERIAL	QTD
1	QUADRO		1
2	CORPO DE PROVA		1
3	TIRANTE SUPERIOR		2
4	TIRANTE INFERIOR		2
5	CELULA DE CARGA		1
6	GARRA		4
7	BARRA RETANGULAR INFERIOR		1
8	BARRA RETANGULAR SUPERIOR		1
9	OLHAL		2
10	BARRA CILINDRICA		2
11	APOIO		2
12	ARRUELA ISO 7091 M10		80
13	PARAFUSO ISO 4762 M10		36
14	PORCA SEXTAVADA ISO 4034 M10		40
15	ARRUELA 1"		10
16	PORCA SEXTAVADA 1"-8 UNC		12
17	ISO 4762 M10 x 80 --- 32C		4
18	PINO ISO 2341 M30		2
19	PINO ISO 2341 M20		8
20	ARRUELA ISO 8738 - M30		2
21	ARRUELA ISO 8738 - M20		8
22	CONTRAPINO ISO 1234-M8		2
23	CONTRAPINO ISO 1234 M5		8
24	MACACO HIDRAULICO		1

ALUNO	Hugo Perez / Hugo Gama dos Santos		<h1>CEFET-RJ</h1>		
PROF.					
DATA	9/7/2006	VISTO			
ESC.	TÍTULO	TURMA	NÚMERO	FOLHA Nº	
1:20	LISTA DE MATERIAL	10º P. MEC		3/12	
		NÚMERO DO DESENHO			
		01			
DIMENSOES EM MM		TOLERANCIAS NAO INDICADAS:			
		0±0,1	0,0±0,05	0,00±0,02	

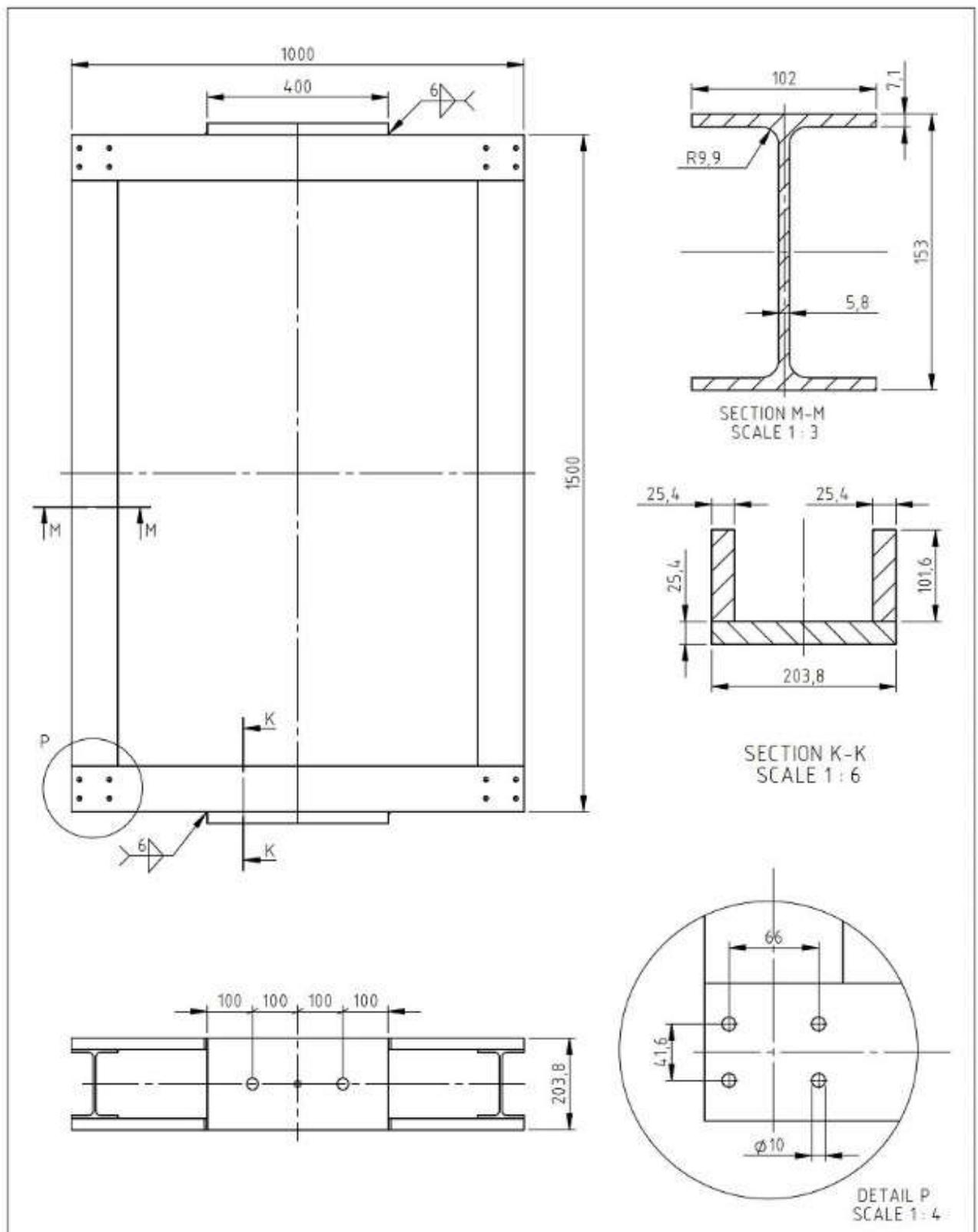


SECTION A-A

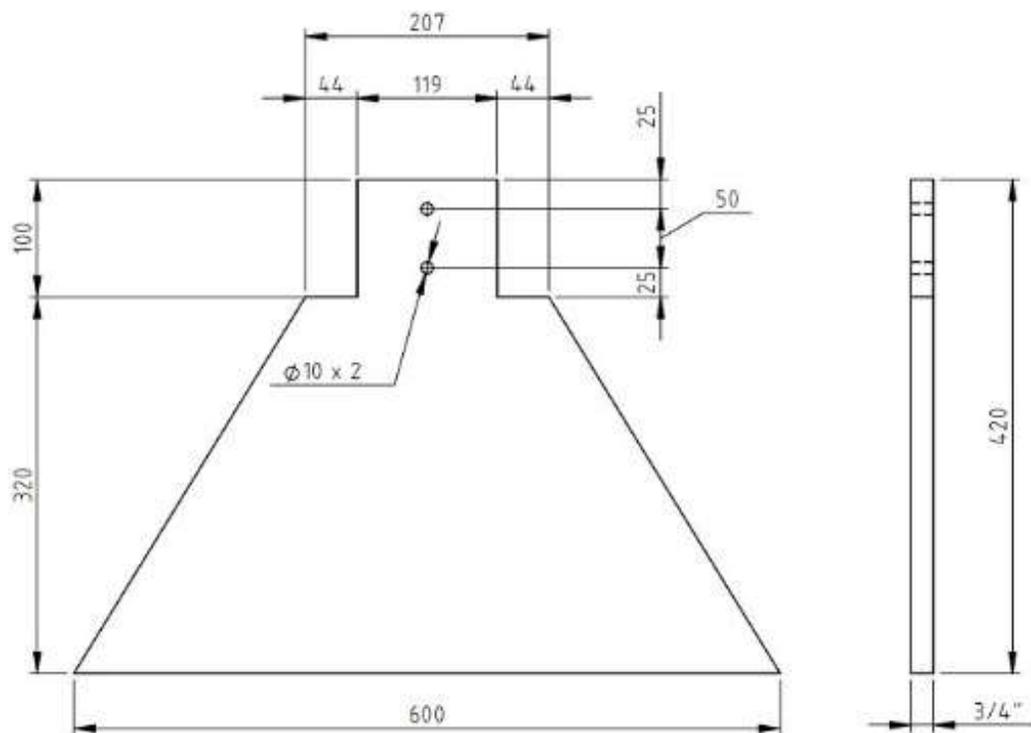
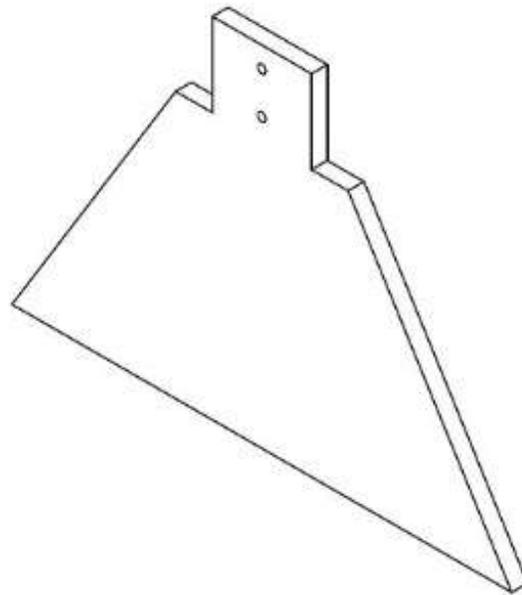


DETAIL A
SCALE 1:6

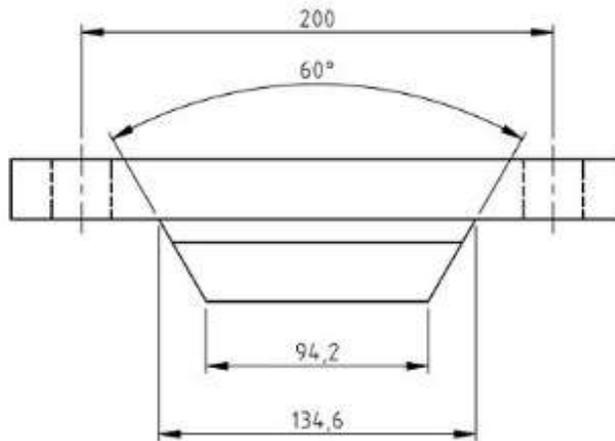
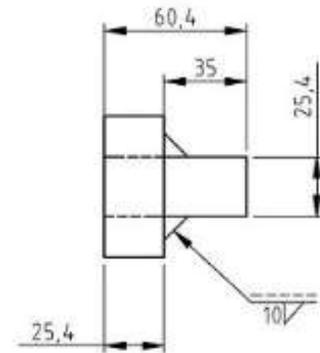
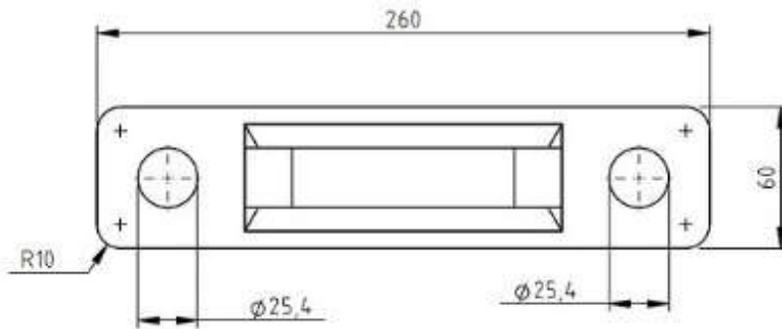
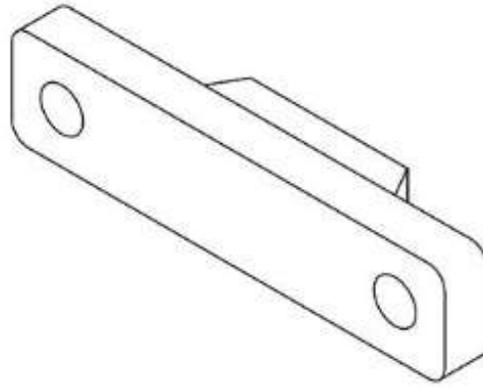
ALUNO	Hugo Perez / Hugo Gama dos Santos		<h1>CEFET-RJ</h1>			
PROF.						
DATA	9/7/2006	VISTO				
ESC.	TÍTULO			TURMA	NÚMERO	FOLHA Nº
1:16	CONJUNTO - DIMENSÕES			10º P. MEC		4/12
				NÚMERO DO DESENHO		



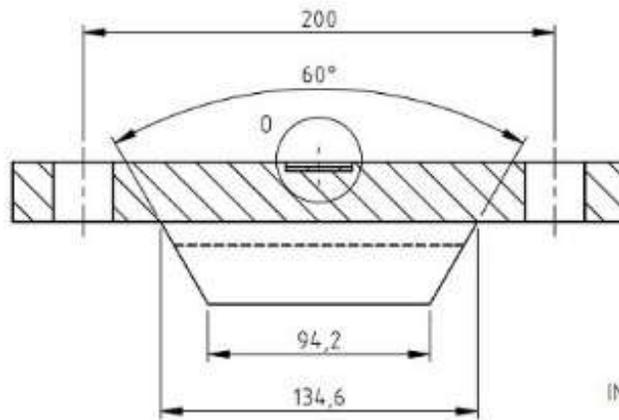
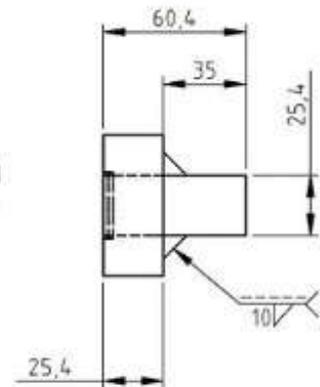
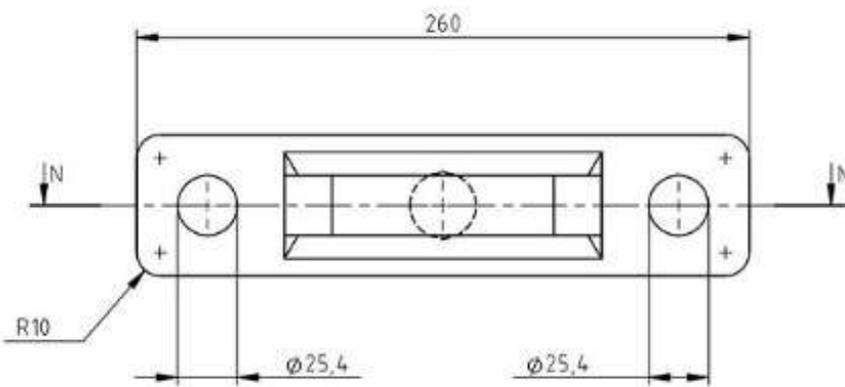
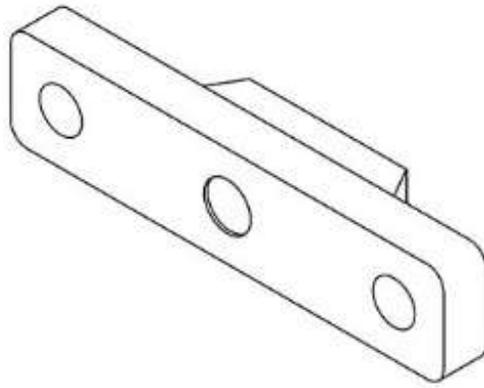
ALUNO	Hugo Perez / Hugo Gama dos Santos			<h1>CEFET-RJ</h1>		
PROF.						
DATA	9/7/2006	VISTO				
ESC.	TÍTULO	QUADRO		TURMA	NÚMERO	FOLHA Nº
1:12				10º P. MEC		5/12
				NÚMERO DO DESENHO		
				01		
DIMENSÕES EM MM		TOLERÂNCIAS NÃO INDICADAS:		0 ± 0,1	0,0 ± 0,05	0,00 ± 0,02



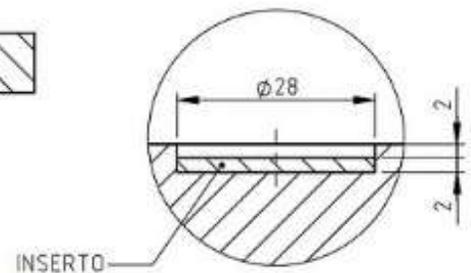
ALUNO	Hugo Perez / Hugo Gama dos Santos			<h1>CEFET-RJ</h1>		
PROF.						
DATA	9/7/2006	VISTO				
ESC.	TÍTULO	APOIO		TURMA	NÚMERO	FOLHA Nº
1:6				10º P. MEC		6/12
				NÚMERO DO DESENHO		
				01		
DIMENSÕES EM MM		TOLERÂNCIAS NÃO INDICADAS:		0 ± 0,1	0,0 ± 0,05	0,00 ± 0,02



ALUNO	Hugo Perez / Hugo Gama dos Santos			<h1>CEFET-RJ</h1>		
PROF.						
DATA	9/7/2006	VISTO				
ESC.	TÍTULO			TURMA	NÚMERO	FOLHA Nº
1:3	BARRA RETANGULAR INFERIOR			10º P. MEC		7/12
				NÚMERO DO DESENHO		
				01		
DIMENSÕES EM MM		TOLERÂNCIAS NÃO INDICADAS:		0±0,1	0,0±0,05	0,00±0,02

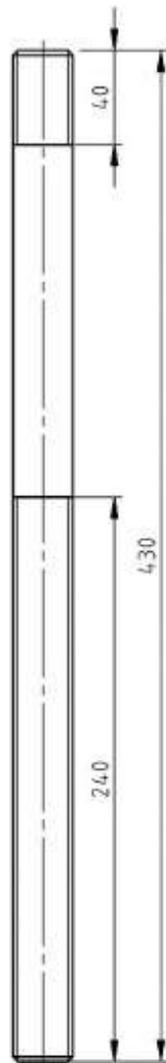
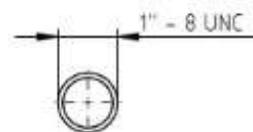
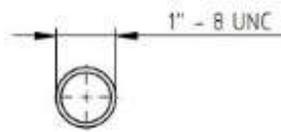


SECTION N-N

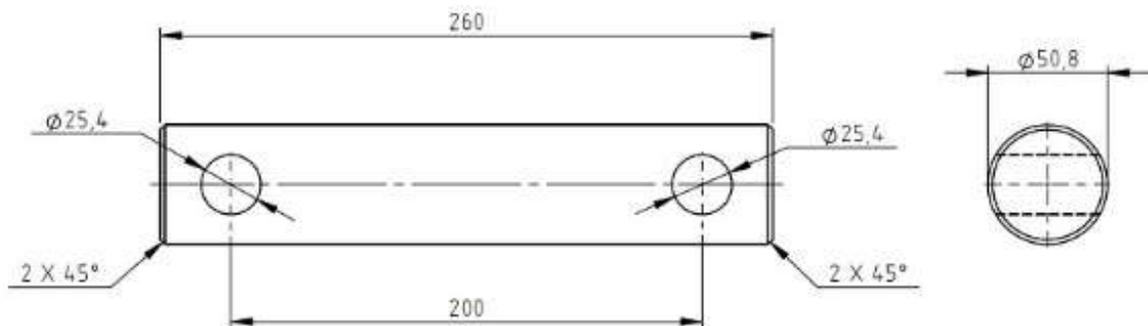
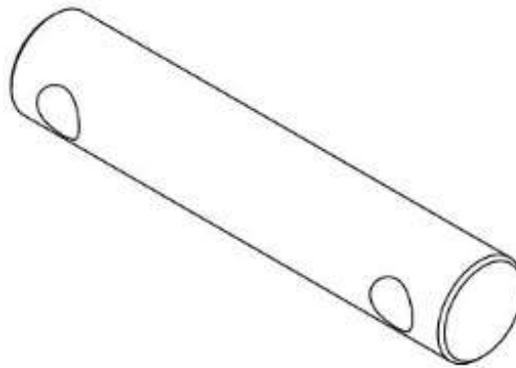


DETAIL O
SCALE 1:1

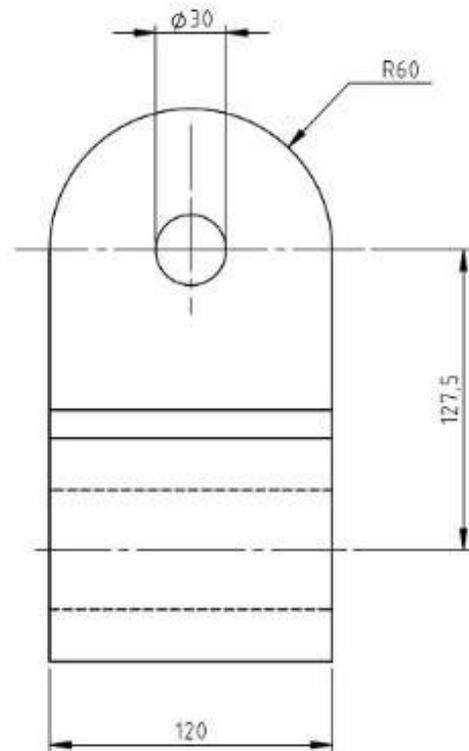
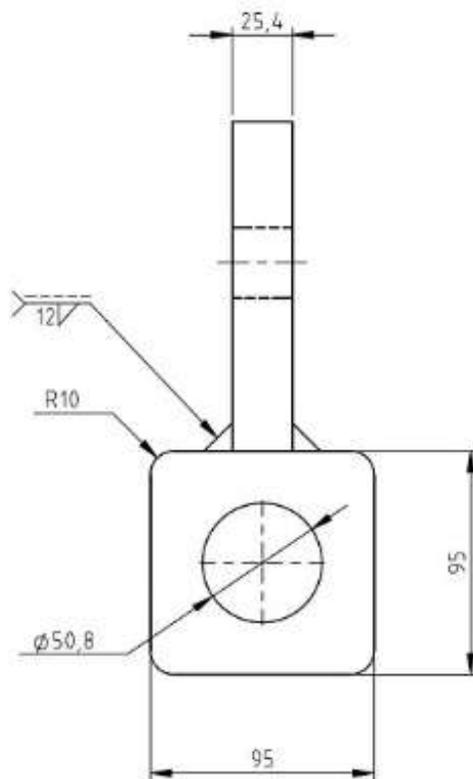
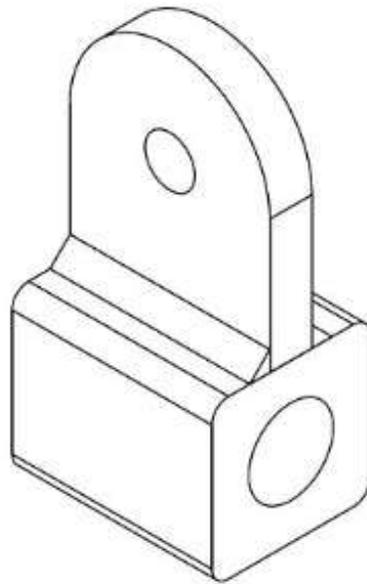
ALUNO	Hugo Perez / Hugo Gama dos Santos			<h1>CEFET-RJ</h1>		
PROF.						
DATA	9/7/2006	VISTO				
ESC.	TÍTULO	TURMA	NÚMERO	FOLHA Nº		
1:3	BARRA RETANGULAR SUPERIOR	10º P. MEC		8/12		
		NÚMERO DO DESENHO				
		01				
DIMENSÕES EM MM		TOLERÂNCIAS NÃO INDICADAS:		0 ± 0,1	0,0 ± 0,05	0,00 ± 0,02



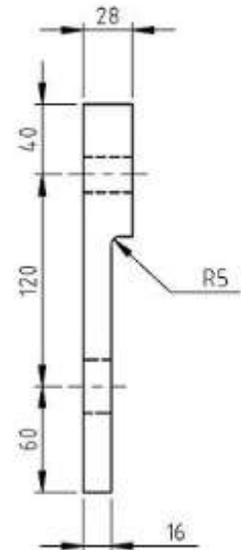
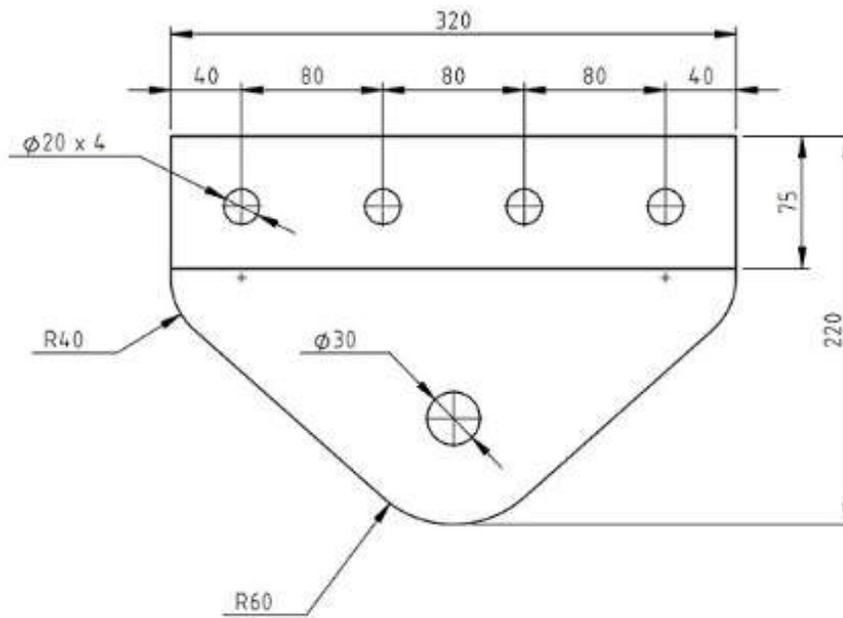
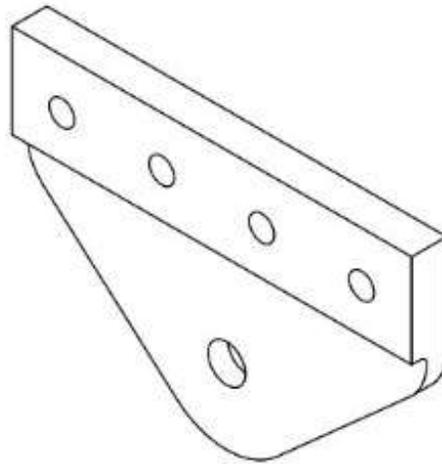
ALUNO	Hugo Perez / Hugo Gama dos Santos			<h1>CEFET-RJ</h1>		
PROF.						
DATA	9/7/2006	VISTO				
ESC.	TÍTULO	TIRANTES		TURMA	NÚMERO	FOLHA Nº
1:3				10º P. MEC		9/12
				NÚMERO DO DESENHO		
				01		
DIMENSÕES EM MM		TOLERÂNCIAS NÃO INDICADAS:		0 ± 0,1	0,0 ± 0,05	0,00 ± 0,02



ALUNO	Hugo Perez / Hugo Gama dos Santos			<h1>CEFET-RJ</h1>		
PROF.						
DATA	9/7/2006	VISTO				
ESC.	TÍTULO	TURMA	NÚMERO	FOLHA Nº		
1:3	BARRA CILINDRICA	10º P. MEC		10/12		
		NÚMERO DO DESENHO				
		01				
DIMENSÕES EM MM		TOLERÂNCIAS NÃO INDICADAS:				
		0 ± 0,1	0,0 ± 0,05	0,00 ± 0,02		



ALUNO	Hugo Perez / Hugo Gama dos Santos			<h1>CEFET-RJ</h1>		
PROF.						
DATA	9/7/2006	VISTO				
ESC.	TÍTULO	OLHAL		TURMA	NÚMERO	FOLHA Nº
1:3				10º P. MEC		11/12
				NÚMERO DO DESENHO		
				01		
DIMENSÕES EM MM		TOLERÂNCIAS NÃO INDICADAS:		0±0,1	0,0±0,05	0,00±0,02



ALUNO	Hugo Perez / Hugo Gama dos Santos			<h1>CEFET-RJ</h1>		
PROF.						
DATA	9/7/2006	VISTO				
ESC.	TÍTULO	GARRA		TURMA	NÚMERO	FOLHA Nº
1:4				10º P. MEC		12/12
				NÚMERO DO DESENHO		
				01		
DIMENSÕES EM MM		TOLERÂNCIAS NÃO INDICADAS:		0 ± 0,1	0,0 ± 0,05	0,00 ± 0,02