

3

Programa Experimental

Este capítulo apresenta o programa experimental executado em laboratório abrangendo a preparação da coluna de aço, o sistema de aplicação e medição dos esforços, instrumentação e a configuração global do ensaio em escala real que é composto de três colunas de aço estaiada.

3.1

Visão global da coluna de aço estaiada

A coluna de aço estaiada é dotada de um tubo para a coluna central e um tubo de diâmetro menor para as barras perpendiculares, cedidos pela empresa de estruturas metálicas Metalfenas, com as seguintes dimensões: altura da coluna de 12 m; comprimento das barras perpendiculares de 0,6 m; diâmetro externo do tubo principal de 89,3 mm; espessura do tubo do tubo principal de 3,2 mm; diâmetro externo das barras perpendiculares de 42,6 mm; espessura das barras perpendiculares: de 3 mm. Para os estais foram utilizados cabos e barras com diâmetro externo de 6,35 mm. A Figura 3.1 apresenta uma visão global das características geométricas da coluna de aço estaiada.

A coluna tem como tensão média de escoamento e de ruptura os valores de 403,79 MPa e 465,29 MPa, respectivamente, conforme resultados obtidos em laboratório [1].

Devido o ensaio ter sido executado na horizontal [1] e apresentar aparentemente um só plano de flambagem, foram realizados ensaios na coluna de dois modos distintos: um em “modo x” e o outro em “modo +”, como ilustrado na Figura 3.2.

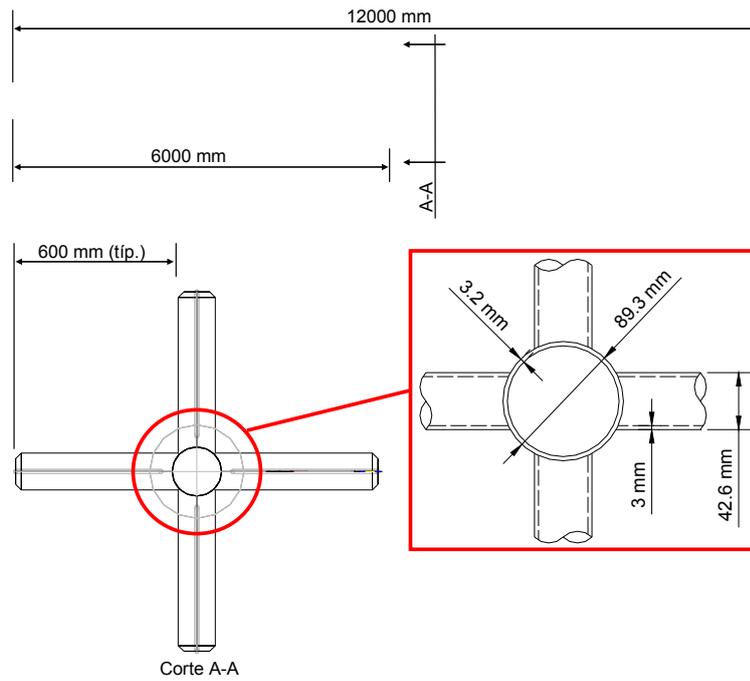


Figura 3.1 Visão global da coluna de aço estaiada



Figura 3.2 Modos de ensaios no laboratório – “modo x” e “modo +” respectivamente

3.2 Sistema de reação de carga e obtenção dos esforços

A carga a ser aplicada na coluna de aço foi gerada por um macaco hidráulico apoiado no sistema de reação de carga para ensaio na horizontal e

seus dados medidos por duas células de carga [11] conforme apresentado na Figura 3.3.

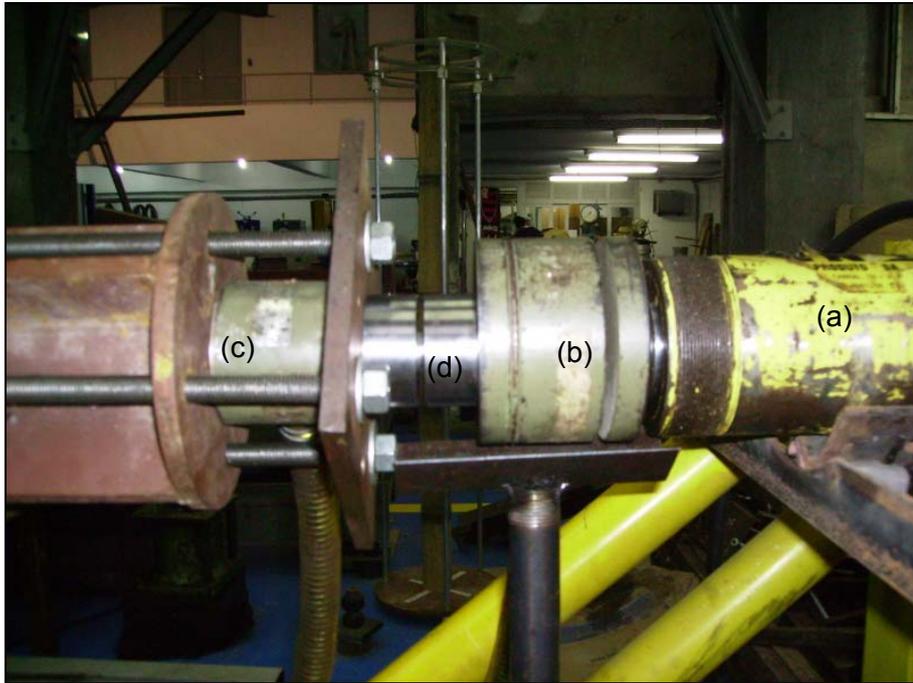


Figura 3.3 (a)Macaco hidráulico; (b)células de carga externa; (c)células de carga interna; (d)rótula universal (lado do macaco hidráulico).

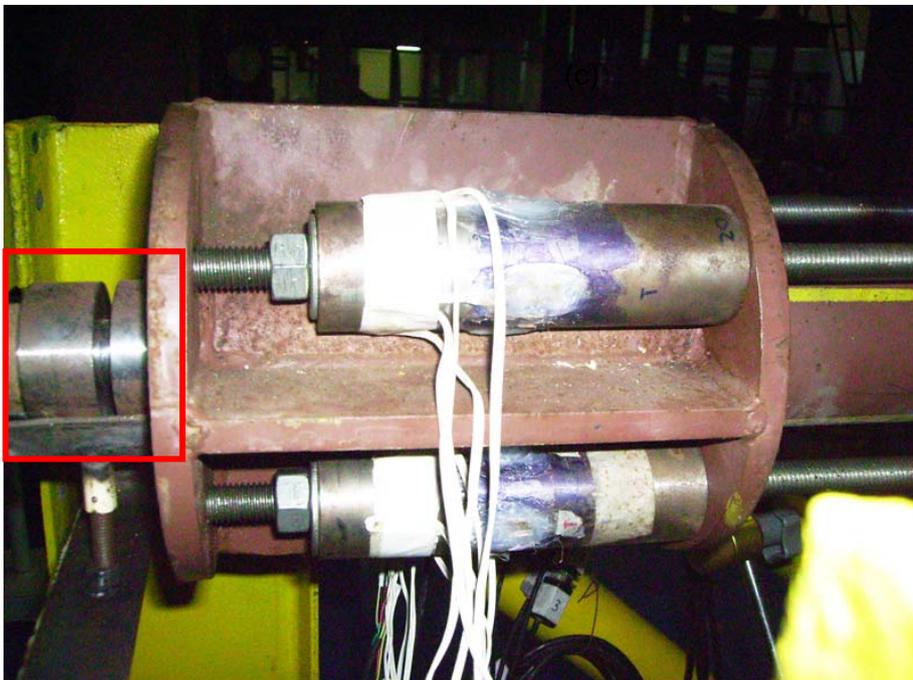


Figura 3.4 Rótula universal (lado das células de carga para os estais).

O sistema de reação de carga teve de ser alterado, em relação ao utilizado durante os ensaios realizados em 2005 [1], com o intuito de aumentar o espaço físico para acrescentar mais uma rótula universal e aumentar a resistência ao cisalhamento nas barras de ancoragem (Figura 3.5 g). Esse novo sistema foi composto por: quatro tirantes em tubos circulares de 75 mm de diâmetro externo com 1,5 mm de espessura (Figura 3.5 a), onde o tirante externo foi trocado por um mais longo que o utilizado em 2005 [1]; duas bases formadas por dois perfis do tipo c enrijecidos de 230x120x49x7 mm (Figura 3.5 b); duas colunas em perfil I 8"x34,3 (Figura 3.5 c); uma viga de apoio superior em perfil I 8"x34,3 (Figura 3.5 d); uma viga de ancoragem em perfil c enrijecido de 230x120x49x7 mm (Figura 3.5 e); duas barras de ancoragem rosqueadas de 25,4 mm de diâmetro situadas na base (Figura 3.5 f) e duas barras com roscas nas extremidades de 50,8 mm situadas na viga de ancoragem (Figura 3.5 g).

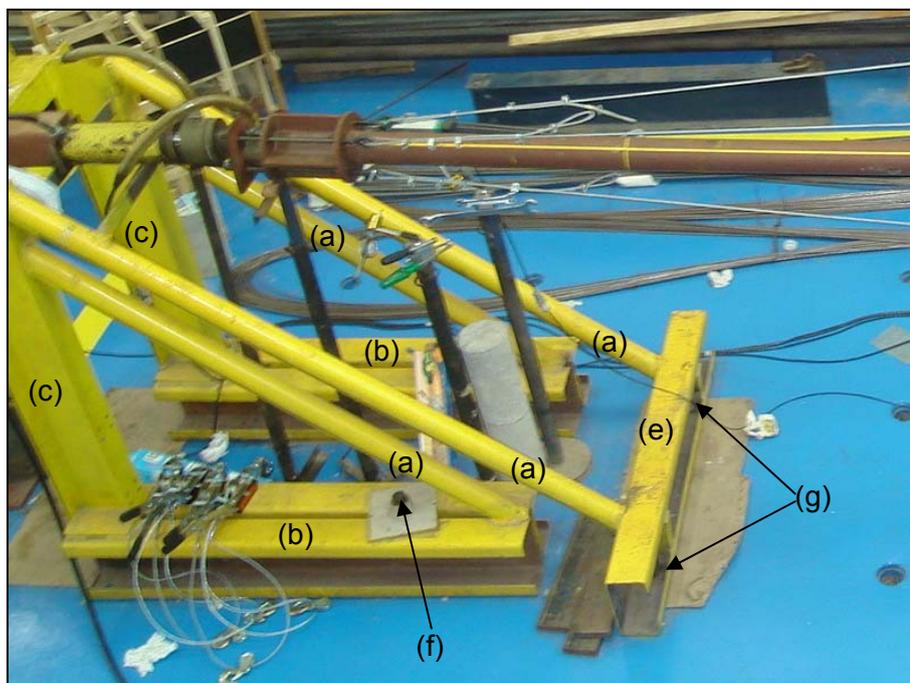


Figura 3.5 (a)tirantes; (b)base; (c)coluna; (d)viga de apoio; (e)viga de ancoragem; (f)barras de ancoragem de 25,4mm; (g)barras de ancoragem de 50,8mm.

O sistema de ancoragem dos estais também foi alterado para dar mais segurança e aumentar o nível de protensão aplicado na estrutura. Assim, onde antes os estais iam até a placa de fixação da célula de carga interna, agora foram utilizadas quatro barras rosqueadas com um “olhal” em uma das extremidades, fixando a célula interna e ancorando os estais, sejam estes cabos

ou barras. Na Figura 3.6 e na Figura 3.7 pode-se observar a diferença entre o sistema novo e o sistema antigo de ancoragem dos estais.

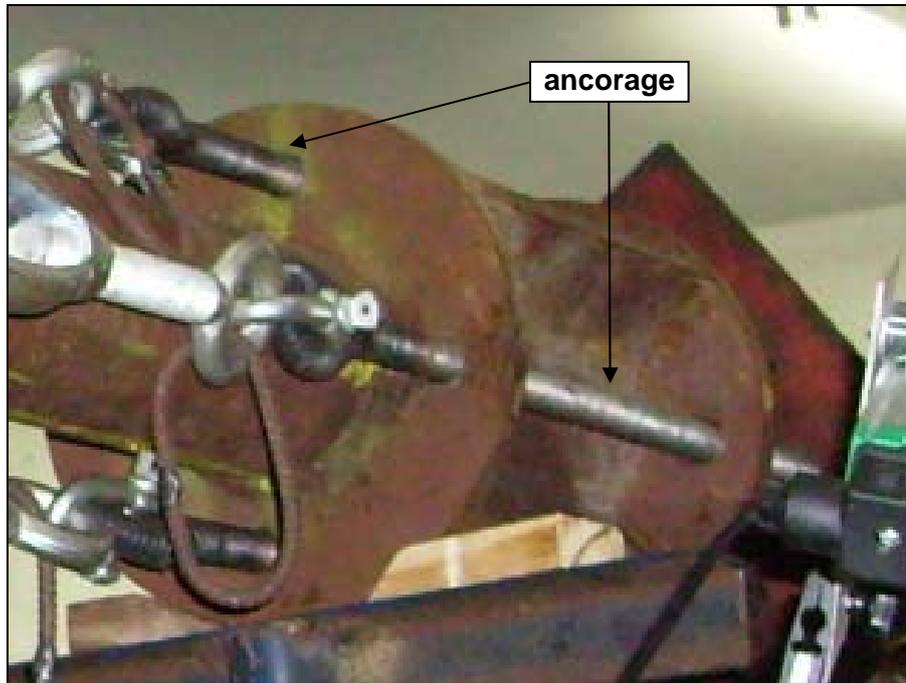


Figura 3.6 Barras de ancoragem dos estais (novo sistema)

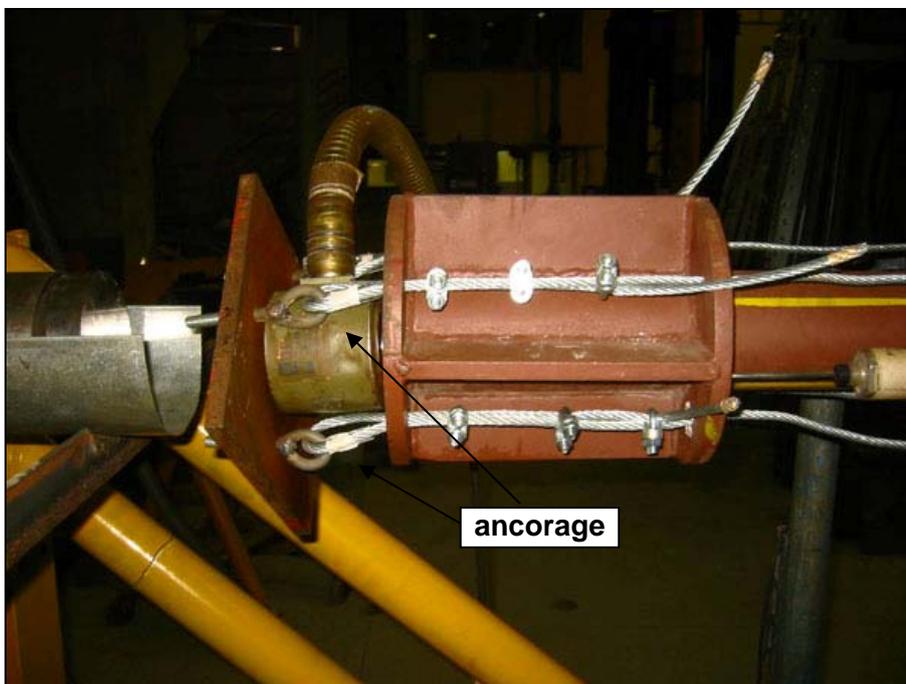


Figura 3.7 Barras de ancoragem dos estais (antigo sistema)

A obtenção dos esforços nos estais foi conseguida através da utilização de células de cargas individuais. Este assunto está abordado no item 0 deste capítulo.

3.3 Células de carga para os estais

A utilização de células de carga como transdutores para medição de força em ensaios experimentais é essencial para que se possam validar os resultados obtidos na teoria. Isto tem o objetivo de possibilitar um maior controle na aplicação dos carregamentos na estrutura durante os ensaios. Uma célula de carga trabalha através da variação da resistência elétrica do sensor.

No decorrer da análise computacional da coluna, percebeu-se a importância em se medir os esforços nos estais durante a aplicação do pré-esforço e após o carregamento aplicado. De posse dos dados obtidos pela análise computacional idealizou-se uma maneira de medir os esforços dos cabos durante os ensaios experimentais no laboratório, conforme descrito no artigo escrito para o congresso CILAMCE 2008 [26].

Inicialmente pensou-se em utilizar uma célula de carga do tipo “S” (Figura 3.8), já que esse tipo célula encontrava-se disponível no laboratório de estruturas. Este tipo de célula mede tanto valores de tração como de compressão. A célula situar-se-ia na “cabeça” da coluna (Figura 3.9), entre as duas chapas que a compõe. Devido às dimensões não serem compatíveis com o local, esse tipo de célula não pode ser aproveitada para os ensaios.

Como o laboratório não dispunha de uma célula de carga apropriada para esse tipo de ensaio, procurou-se no mercado uma que possibilitasse a obtenção dos esforços em cada cabo. A Figura 3.10 ilustra um modelo de célula de carga que seria possível para utilização nos ensaios.

Específica para trabalhar em tração, este modelo de célula de carga é ideal para testes em cabos de aço. Sendo composta em aço de alta resistência mecânica, inoxidável ou aço níquel. Apesar das qualidades, não foi possível a sua utilização por ser financeiramente inviável. Sendo assim, pensou-se em utilizar uma única célula de carga medindo apenas a força aplicada na coluna e perdendo os esforços gerados pelos estais. Visto que essa não era uma boa solução elaborou-se uma maneira de, através de mais uma célula de carga, acoplada a uma placa, obter simultaneamente os esforços gerados por todos os quatro estais. Esta nova célula ficaria apoiada externamente na coluna e a outra

célula disposta no macaco hidráulico medindo a carga aplicada na estrutura. Um dos problemas do uso desta célula de carga é que não se podia medir o desbalanceamento dos estais que ocorre durante os ensaios. Sua única vantagem foi a de obter o esforço total na coluna e os esforços nos estais seria obtido pela diferença dos resultados lidos como pôde ser observado na Figura 3.3 item (c).

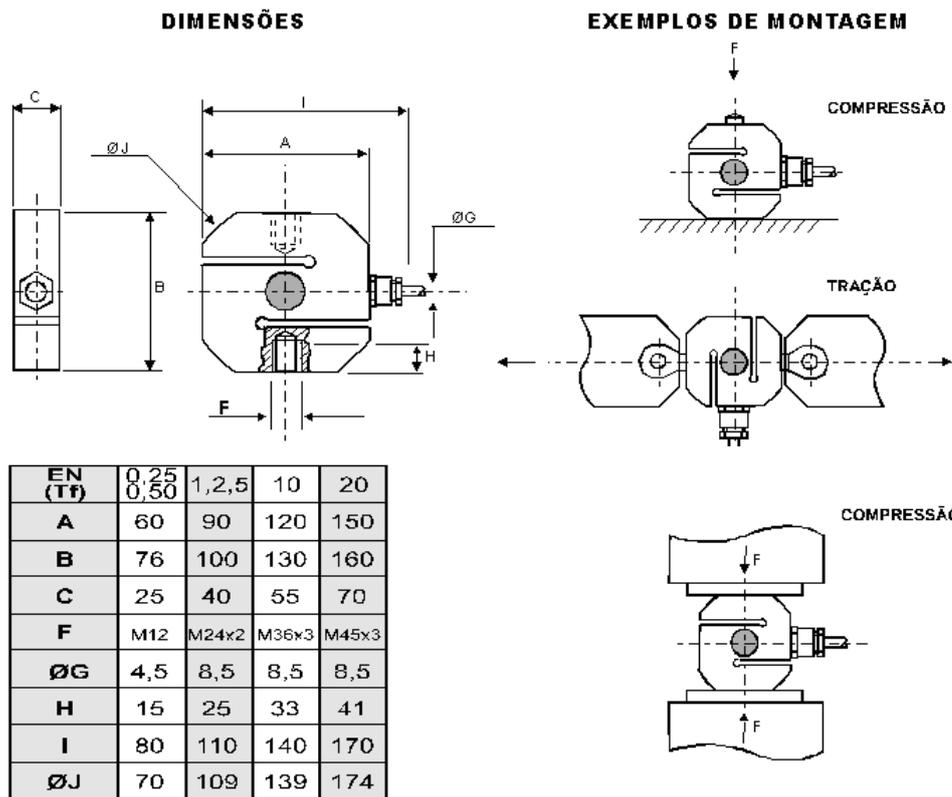


Figura 3.8 Especificação para a célula de carga do tipo “S”

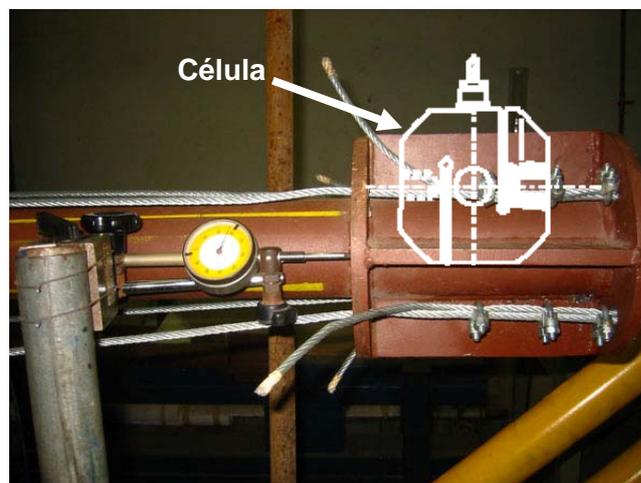


Figura 3.9 Posicionamento representativo da célula na “cabeça” da coluna



Figura 3.10 Células de carga do tipo “MAT-XX”. [223]

Todavia, fez-se necessário procurar uma outra solução de se obter os esforços nos estais para que se adaptasse na geometria da “cabeça” da coluna. Esta solução gerou a necessidade de se projetar uma célula de carga para medição dos esforços nos estais. A célula de carga projetada é composta por um tubo de aço com uma placa de aço de apoio em uma das extremidades, com 10 mm de espessura, por onde os estais aplicarão a carga, gerada durante a protensão e no decorrer dos ensaios (Figura 3.11).

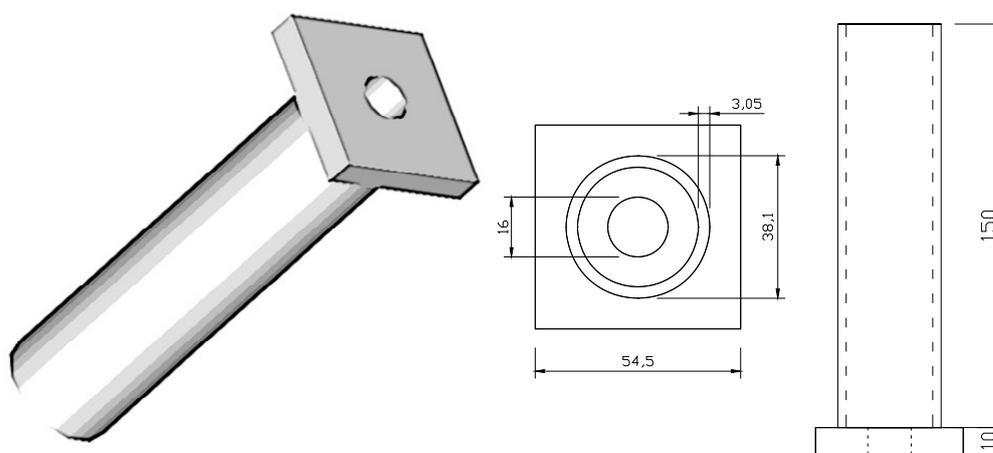


Figura 3.11 Esboço de projeto da célula de carga para os estais.

Procurou-se projetar a célula de carga de modo que seu comportamento estivesse dentro do regime linear elástico. Com isso, o cálculo foi realizado com 50% da tensão admissível do aço de projeto. Sendo o aço adotado para o cálculo com tensão admissível de 300 MPa e seu módulo de elasticidade de 205.000 MPa, projetou-se uma célula de carga que apresentasse deformações lineares até o valor de carga aplicada de 50 kN. A área calculada é de 333,33 mm². Através de catálogos comerciais o tubo adotado tem um diâmetro externo

de 38,1 mm com espessura de 3,05 mm onde a sua área é de aproximadamente 335 mm². O tubo foi verificado quanto a flambagem local através da equação ((3.1) da norma canadense [25].

$$\frac{\phi_c}{t_c} \cong 12,5 < \frac{23000}{\sqrt{F_y}} \cong 1328 \quad (3.1)$$

3.3.1

Parâmetros da análise numérica da célula de carga

A célula de carga foi modelada no programa de análise numérica ANSYS [17] com elementos de casca do tipo SHELL63. Seu comprimento é de 150 mm ao longo do eixo z, com diâmetro de 38,1 mm para o tubo e de 50 mm para a placa de extremidade. A malha gerada automaticamente pelo programa pode ser observada na Figura 3.12. Para se ter uma melhor precisão da aplicação das cargas, criou-se um círculo entre o furo da placa e o diâmetro do tubo, na região da placa de extremidade, forçando a geração de nós ao logo do perímetro. Este círculo representa a influência da arruela na placa de extremidade.

Foram realizadas quatro análises no programa de análise numérica ANSYS [17]. As cargas estão aplicadas pontualmente nos nós da placa de extremidade ao logo do perímetro do círculo de influência da arruela. A Figura 3.13 apresenta exatamente os pontos de aplicação das cargas (nós vermelhos).

Desta forma, as análises realizadas foram as seguintes:

- Carga por nó $P = 2700\text{N}$ ($\approx 54\text{kN}$) (todos os nós)
- Desbalanceamento 2/1: 50% - $P_1 = 3300\text{N}$ (nós 01 à 10) e 50% - $P_2 = 1660\text{N}$ (nós 11 à 20)
- Desbalanceamento 2/1: 25% - $P_1 = 3840\text{N}$ (nós 01 à 06) e 75% - $P_2 = 1920\text{N}$ (nós 07 à 20)
- Desbalanceamento 2/1: 12,5% - $P_1 = 4340\text{N}$ (nós 01 à 03) e 87,5% - $P_2 = 2170\text{N}$ (nós 04 à 20)

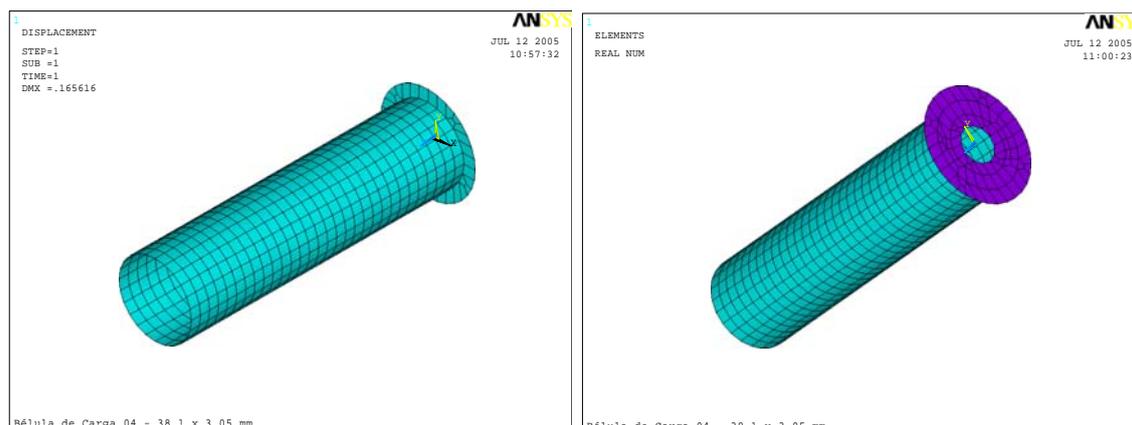


Figura 3.12 Geração automática da malha na célula de carga..

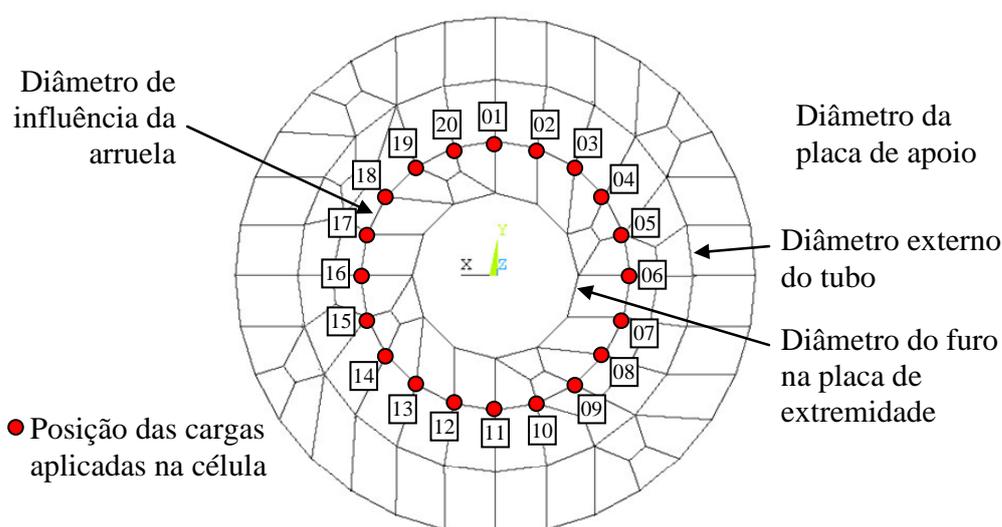


Figura 3.13 Pontos de aplicação das cargas.

O desbalanceamento representa algum imprevisto que possa vir a ocorrer durante os ensaios, como por exemplo, uma pequena excentricidade do posicionamento da barra de ancoragem na placa de extremidade ou a superfície onde a célula estará alocada não se encontrar totalmente plana.

3.3.2 Primeira análise

Nesse primeiro modelo todas as cargas são aplicadas com o mesmo valor de $P=2700\text{N}$. As figuras a seguir apresentam os resultados obtidos no programa de análise numérica ANSYS [17]. Ao observar a Figura 3.14 confirma-se os 50% da tensão admissível inicialmente projetada. O valor máximo atingido na análise é de aproximadamente 178,5 MPa em praticamente todo corpo da

célula de carga. Tendo em vista a distribuição de tensões e deslocamentos ao longo da célula de carga, e como era de se esperar, a melhor posição para colagem dos extensômetros é no centro do tubo de aço.

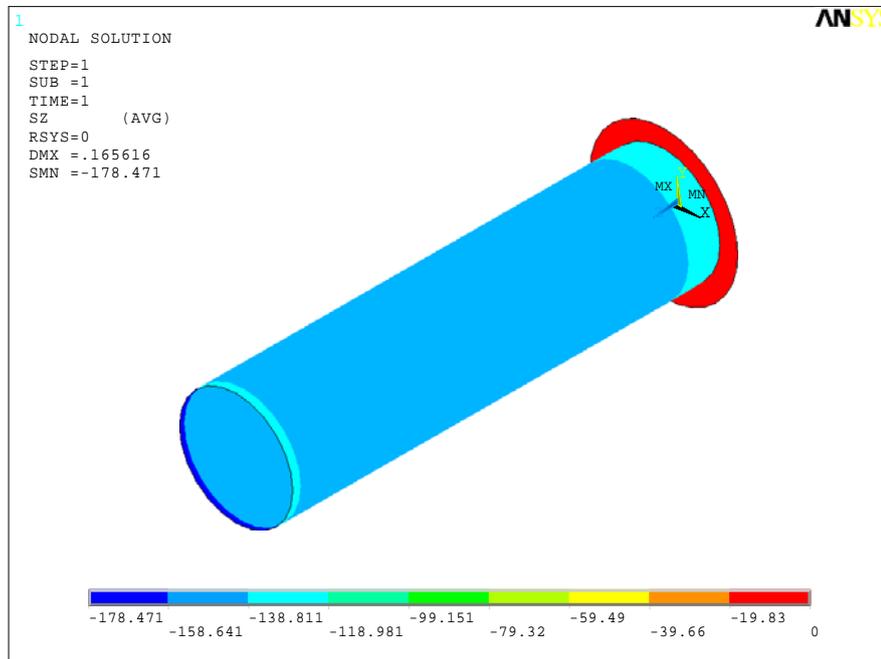


Figura 3.14 Tensão normal ao longo do eixo z (em MPa).

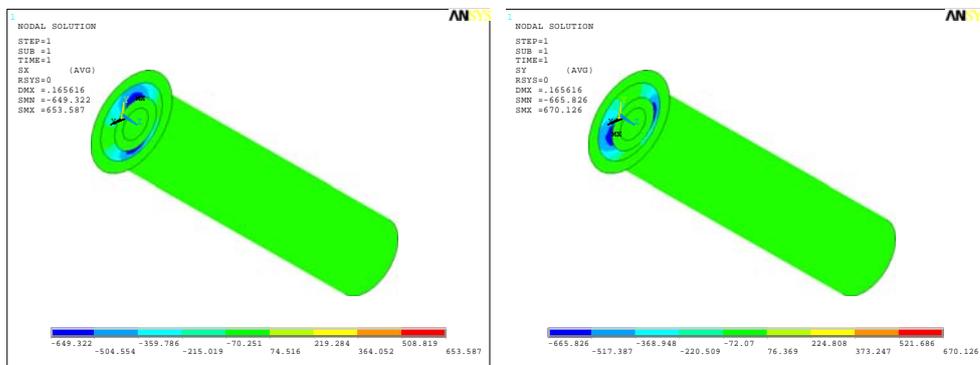


Figura 3.15 Tensões normais nas direções x e y, respectivamente (em MPa).

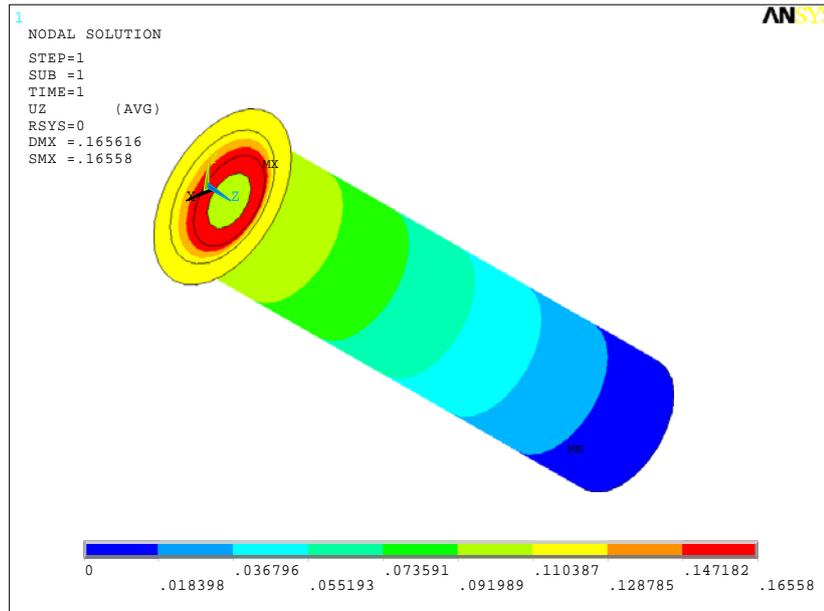


Figura 3.16 Deslocamento ao longo do eixo z (em mm).

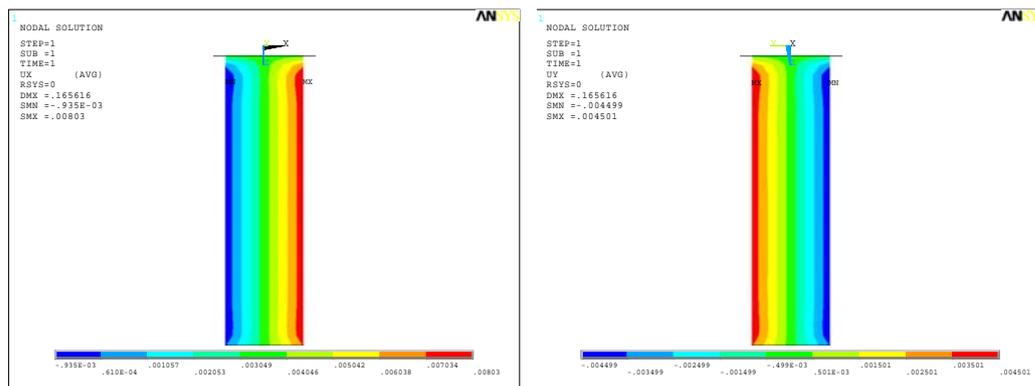


Figura 3.17 Deslocamentos nas direções x e y, respectivamente (em mm).

3.3.3 Segunda análise

No segundo modelo as cargas são aplicadas desbalanceadas na proporção de 2/1. Metade das cargas com valor de $P_1=3330$ N e a outra metade com valor de $P_2=1660$ N. As próximas figuras apresentam os resultados obtidos no programa de análise numérica ANSYS.

Apesar de o carregamento estar descentralizado, não se obteve um valor maior do que o esperado, mesmo chegando próximo dos 186 MPa. A tensão continua abaixo do limite de escoamento como previsto e a zona para uma melhor obtenção dos resultados com pouca influência das extremidades continua sendo no centro do tubo de aço.

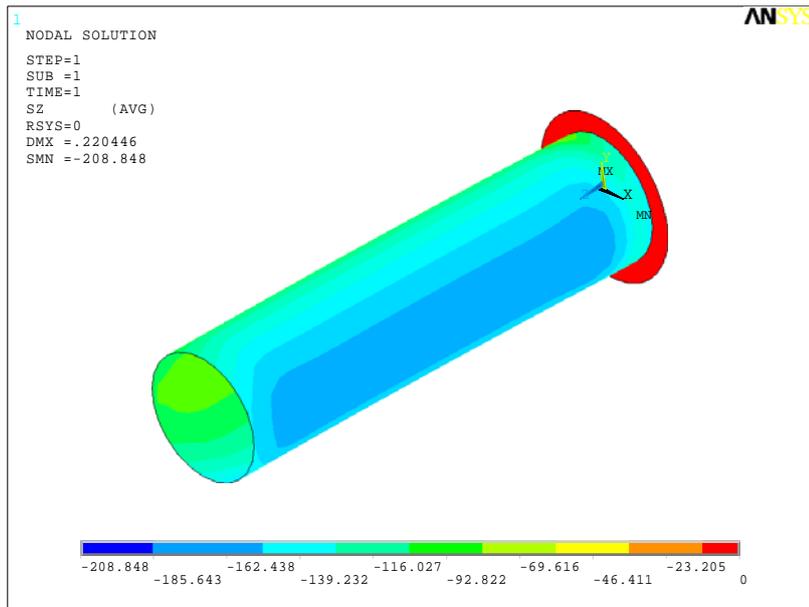


Figura 3.18 Tensão normal ao logo do eixo z (em MPa).

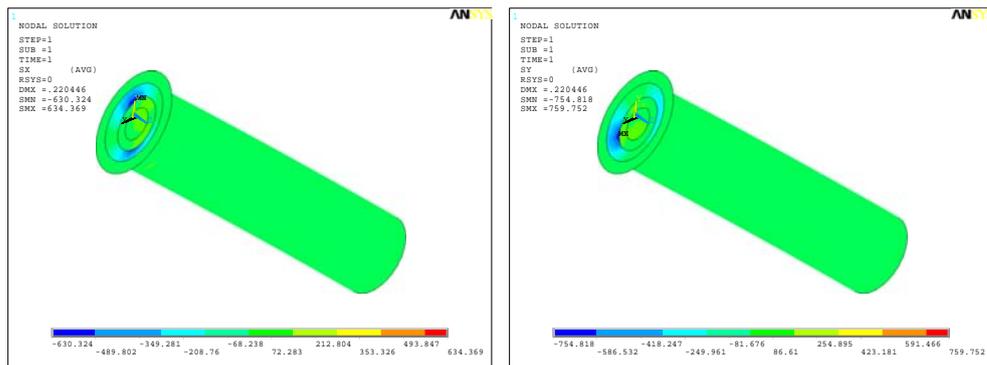


Figura 3.19 Tensões normais nas direções x e y, respectivamente (em MPa).

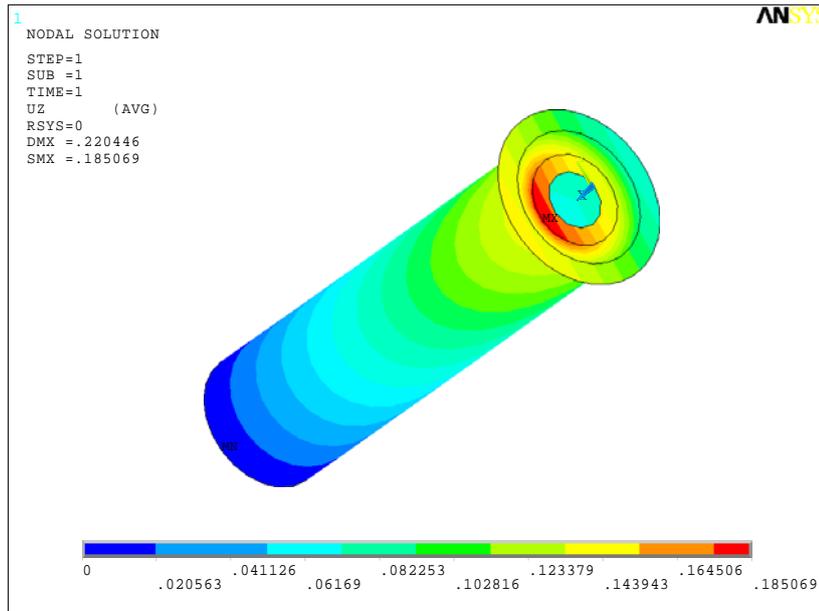


Figura 3.20 Deslocamento ao longo do eixo z (em mm).

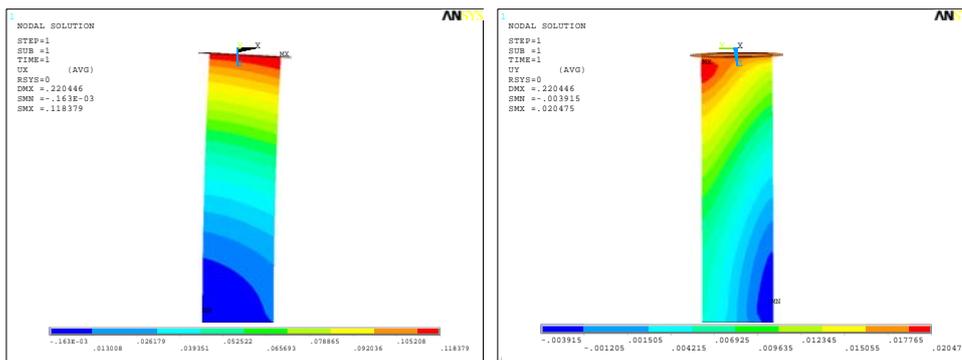


Figura 3.21 Deslocamentos nas direções x e y, respectivamente (em mm).

3.3.4 Terceira análise

Neste terceiro modelo as cargas continuam aplicadas desbalanceadas na proporção de 2/1 sendo 25% das cargas com o valor de $P_1=3840$ N e 75% das cargas com o valor de $P_2=1920$ N. As próximas figuras apresentam os resultados obtidos no programa de análise numérica ANSYS.

Para a situação onde o carregamento está concentrado em 25% da região de apoio da barra de ancoragem, observa-se uma concentração de tensão da ordem de 190 MPa e o restante do modelo com uma tensão de 167 MPa, provando que a melhor região para instrumentação continua sendo no centro do tubo de aço.

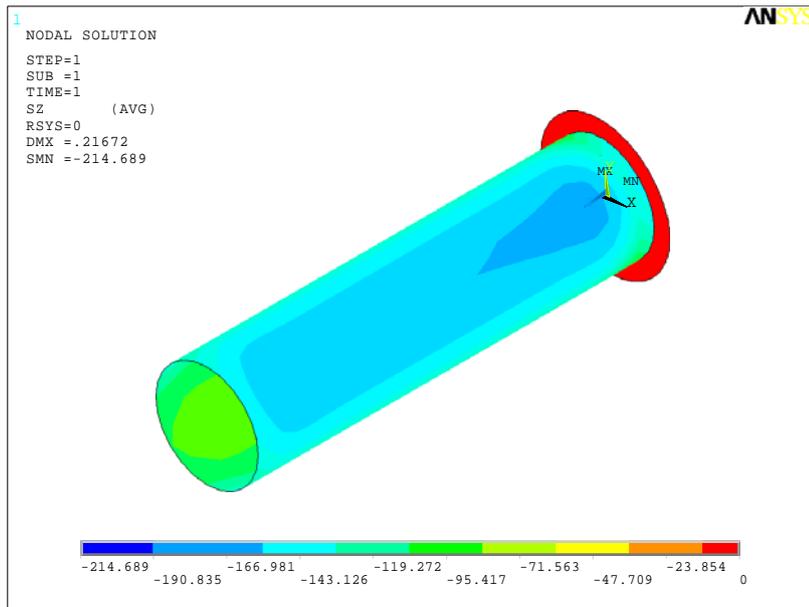


Figura 3.22 Tensão normal ao logo do eixo z (em MPa).

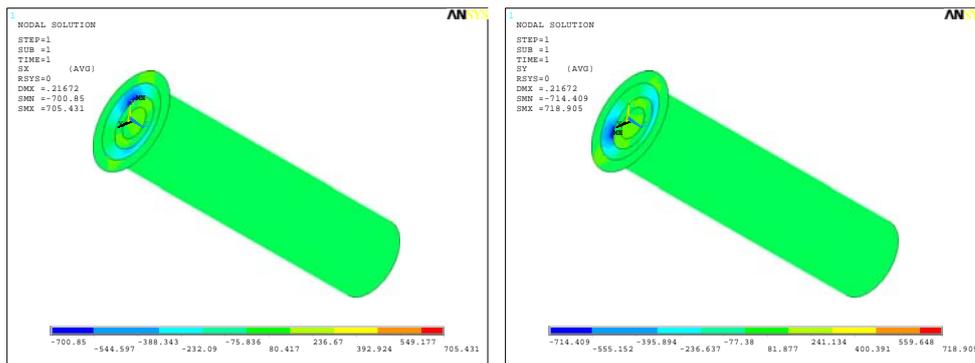


Figura 3.23 Tensões normais nas direções x e y, respectivamente (em MPa).

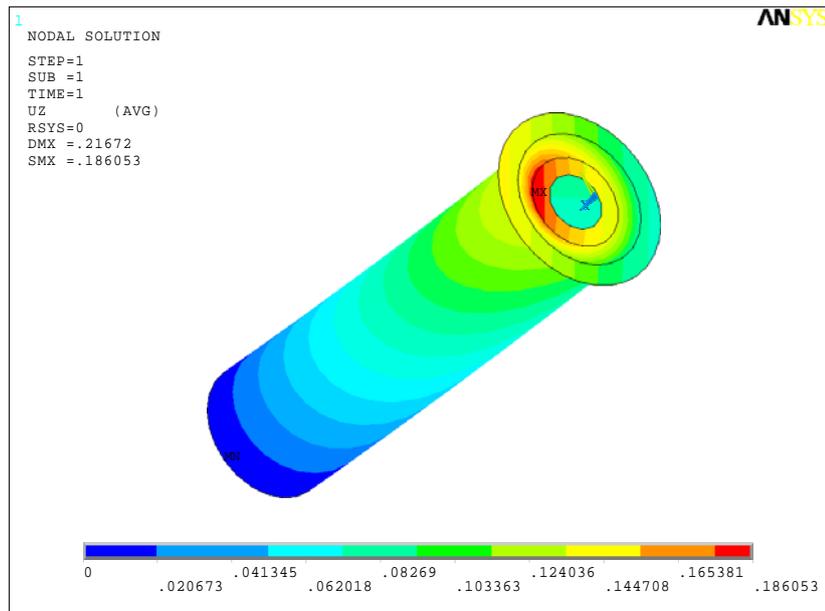


Figura 3.24 Deslocamento logo do eixo z (em mm).

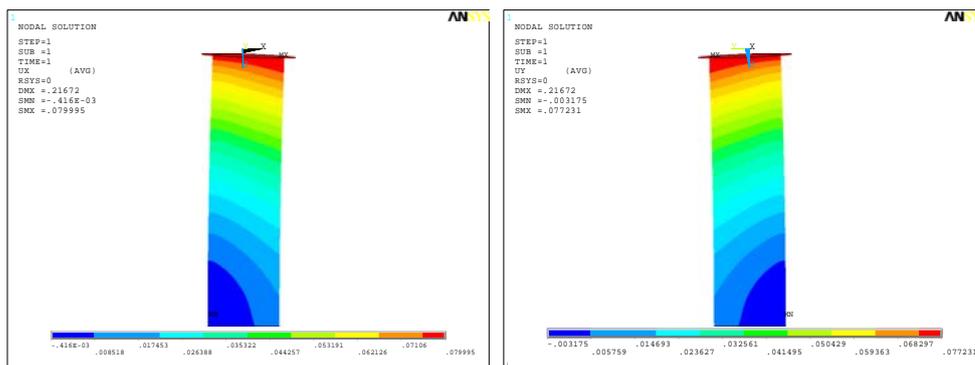


Figura 3.25 Deslocamentos nas direções x e y, respectivamente (em mm).

3.3.5 Quarta análise

No último modelo, as cargas continuam aplicadas desbalanceadas na proporção de 2/1 sendo 12,5% das cargas com o valor de $P_1=4340$ N e o restante das cargas com o valor de $P_2=2170$ N. As próximas figuras apresentam os resultados obtidos no programa de análise numérica ANSYS.

Aumentando a concentração da carga aplicada com o intuito de levar o carregamento ao extremo em relação ao apoio da barra de ancoragem na chapa de apoio da célula de carga, chega-se a conclusão de que o centro do corpo do tubo de aço é o local mais apropriado para instrumentação, evitando uma concentração de tensões nas extremidades da peça.

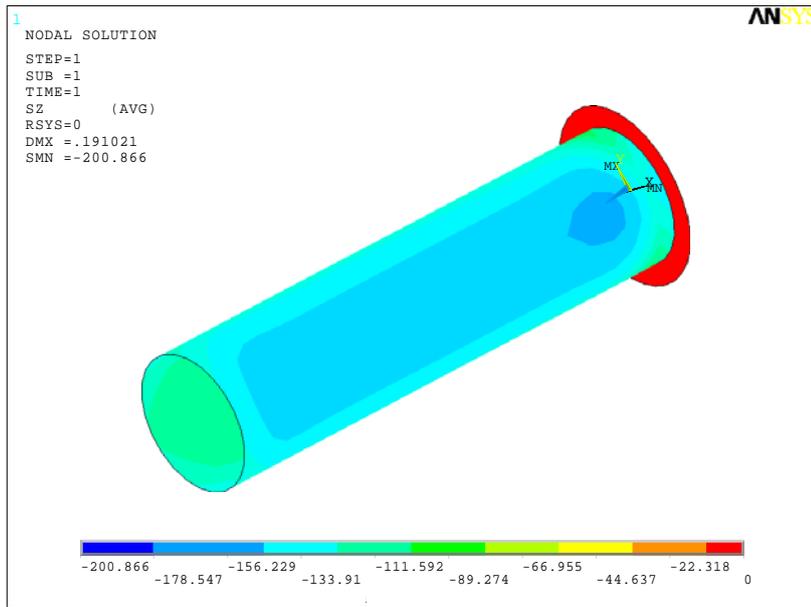


Figura 3.26 Tensão normal ao longo do eixo z (em MPa).

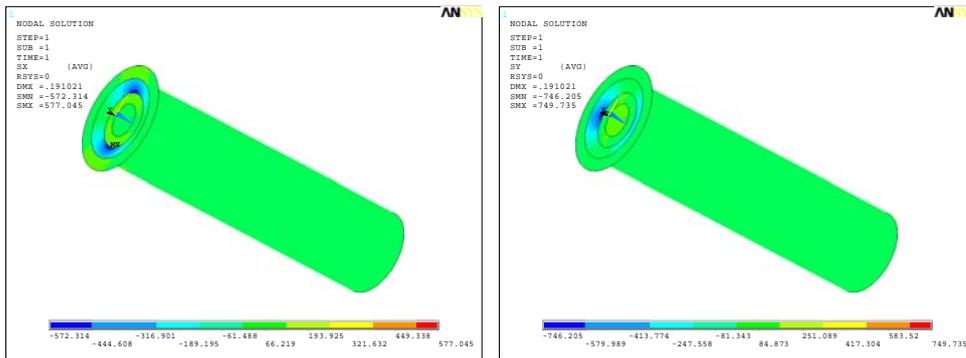


Figura 3.27 Tensões normais nas direções x e em y, respectivamente (em MPa).

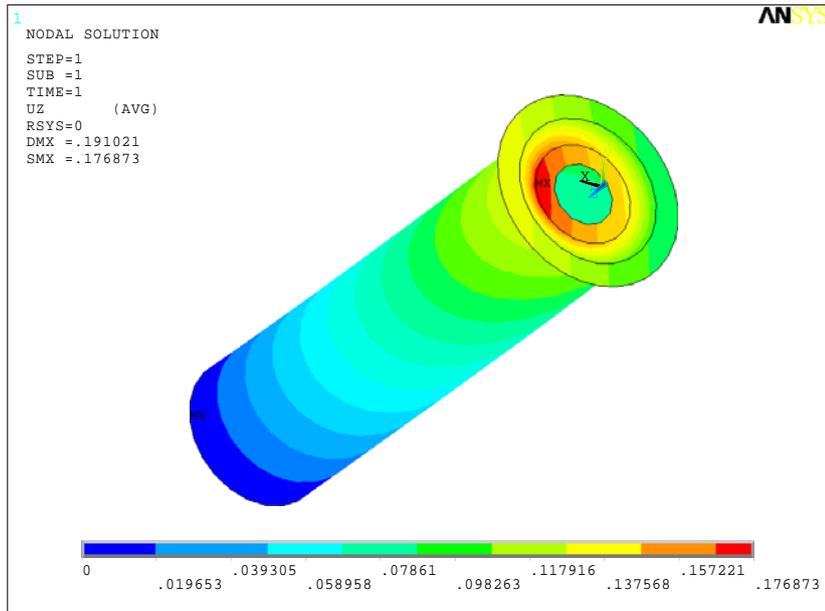


Figura 3.28 Deslocamento ao longo do eixo z (em mm).

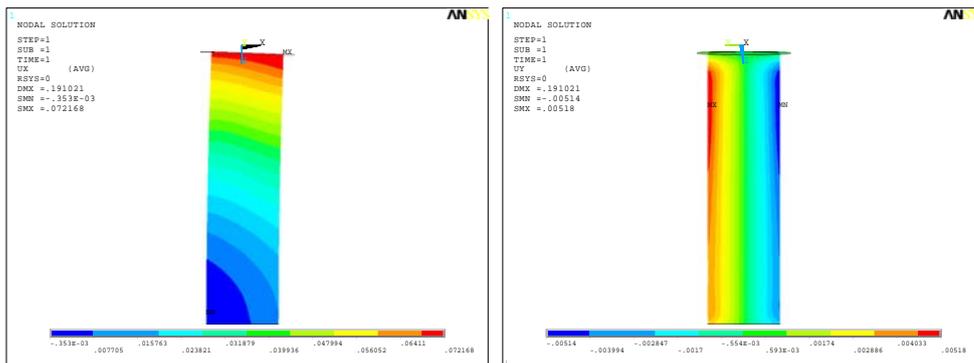


Figura 3.29 Deslocamentos nas direções x e y, respectivamente (em mm).

3.3.6 Novo projeto

De posse desses dados, o projeto inicial da célula foi alterado em relação a placa de apoio da barra de ancoragem retirando a parte que fica após o diâmetro externo do tubo, visto que a mesma não teria função na resistência e seria um obstáculo para instalação da célula de carga na cabeça da coluna de aço estaiada. A Figura 3.30 é uma esquematização de como a nova célula de carga foi elaborada utilizando um tubo de parede fina e uma chapa grossa em uma das extremidades. Assim poder-se-ia passar a barra de ancoragem dos estais e travá-la na outra extremidade.

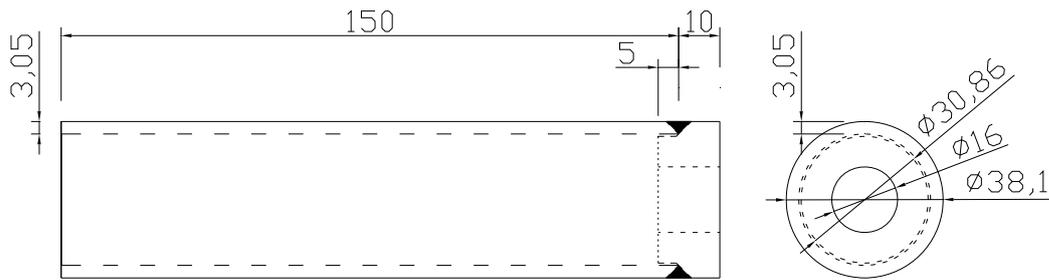


Figura 3.30 Dimensões em milímetros (mm) da célula de carga usada em cada estai.

A área calculada é de $333,33 \text{ mm}^2$. Através de catálogos comerciais adotou-se um tubo de parede fina com um diâmetro externo de 38,1 mm com espessura de 3,05 mm onde a sua área é de aproximadamente 335 mm^2

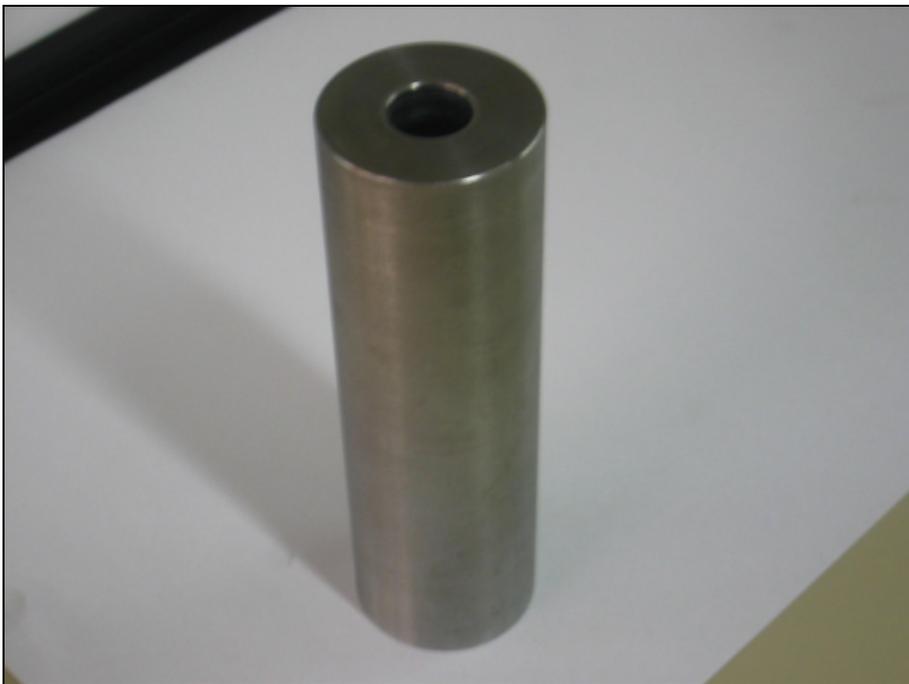


Figura 3.31 Célula de carga para medição dos esforços nos estais.

Foram fabricadas cinco células de carga na fábrica da Metalfenas conforme a esquematização da Figura 3.30. Quatro para serem utilizadas nos ensaios e uma de reserva para caso alguma tivesse problemas.

3.3.7 Primeiro Modelo

Inicialmente utilizaram-se quatro extensômetros ligados independentemente, distando 90° entre eles e colados ao centro da peça, para medir a deformação de cada célula de carga e assim obter o valor da carga aplicada, conforme a Figura 3.32. Através de uma prensa hidráulica verificou-se a linearidade e depois utilizando uma célula de carga do tipo “s”, calibrou-se as cinco células de carga (para os estais), no sistema de aquisição de dados disponível no laboratório. Os extensômetros foram protegidos com silicone para que não houvesse interferências ou contato com outros materiais durante os ensaios.

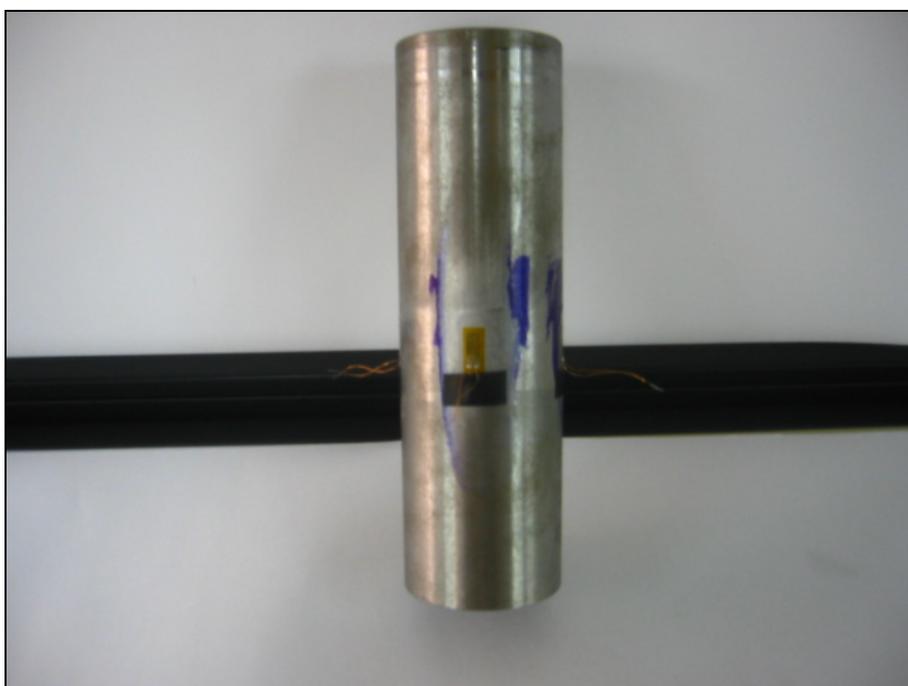


Figura 3.32 Primeiro modelo de célula de carga.

3.3.8 Segundo Modelo

Um segundo modelo foi proposto com o objetivo de melhorar o desempenho das células de carga obtendo melhores resultados e minimizando possíveis problemas de calibração. Neste novo modelo os extensômetros são ligados de acordo com uma ponte de wheatstone completa (Figura 3.33), gerando apenas um canal de leitura de dados. As células de carga também foram pintadas para protegê-las de corrosão e os extensômetros protegidos por

silicone evitando assim problemas com interferências e contatos. A Figura 3.34 apresenta as cinco células de carga de acordo com o segundo modelo proposto.

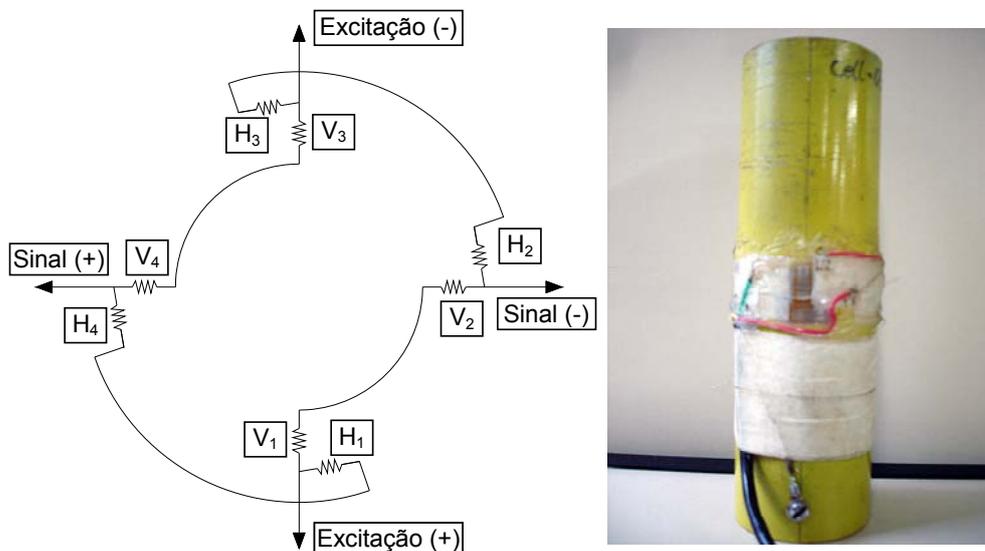


Figura 3.33 Ponte completa para a célula de carga, onde V é o extensômetro no eixo axial da célula e H é o extensômetro no diametral.



Figura 3.34 Segundo modelo de célula de carga.

Novamente através de uma prensa hidráulica verificou-se a linearidade e depois utilizando uma célula de carga do tipo "s", calibrou-se as cinco células de carga. A Figura 3.35 apresenta um dos ensaios de como foi realizado a calibração das células de carga.



Figura 3.35 Calibração da célula de carga na prensa hidráulica

3.4

Sistema de apoio da coluna de aço estaiada

Comparando os ensaios novos com o ensaio anterior [1] poucos itens foram alterados e/ou adicionados em relação ao sistema de apoio e instrumentação da coluna de aço estaiada.

Em relação ao sistema de apoio, para os novos ensaios, foi adicionado um sistema de apoio do tipo primeiro gênero para o cabo de sustentação da coluna de aço do vão central ao pórtico de aço. Este sistema de apoio foi elaborado com basicamente quatro roldanas e uma chapa de aço, lembrando a estrutura de um carro de “trem”, onde o mesmo desliza por sobre as mesas de um perfil do tipo U conforme apresentado na Figura 3.36.



Figura 3.36 Apoio para sustentação da coluna no vão central

Com a utilização desse novo sistema de apoio diminuiu-se o travamento da coluna de aço ao pórtico de sustentação, gerado pelo atrito do cabo, dando maior liberdade para que a coluna deslize no plano horizontal de flambagem. Porém, o principal objetivo da utilização deste cabo é de retirar a imperfeição inicial gerada pelo peso-próprio, sendo uma das contribuições desta tese.

3.5 Instrumentação da coluna de aço estaiada

Esta fase consistiu em uma das maiores contribuições da presente dissertação visto que até onde se conseguiu aferir, este programa de ensaios é o primeiro envolvendo peças em escala real em um modelo tridimensional.

A instrumentação da coluna de aço estaiada seguiu o mesmo procedimento adotado para aferir os deslocamentos e deformações do ensaio realizado anteriormente [1]. Para este ensaio foram utilizados onze LVDTs, um em cada pórtico de reação e os outros nove dispostos na coluna principal como mostra a Figura 3.37.

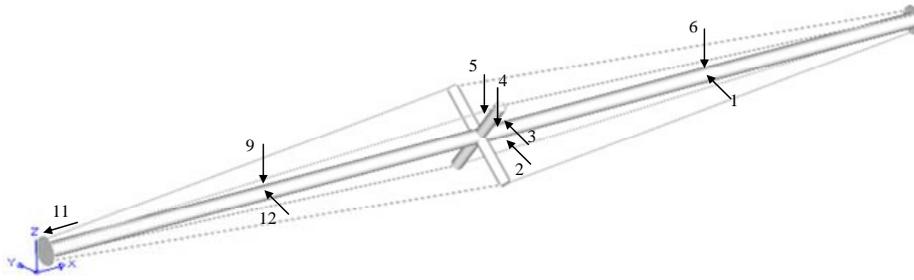


Figura 3.37 Posicionamento dos LVDTs na coluna principal.

Os LVDTs 1, 6, 9 e 12 estão a $\frac{1}{4}$ do comprimento da coluna e os LVDTs 2, 3, 4 e 5 estão praticamente no centro da coluna (Figura 3.38). O LVDT 11 foi instalado na extremidade da coluna onde era aplicada a carga externa com o objetivo de medir o deslocamento axial da mesma. O problema com a forma circular do tubo foi resolvido colando chapas nos pontos de aplicação dos LVDTs de modo a gerar uma superfície plana para medição.

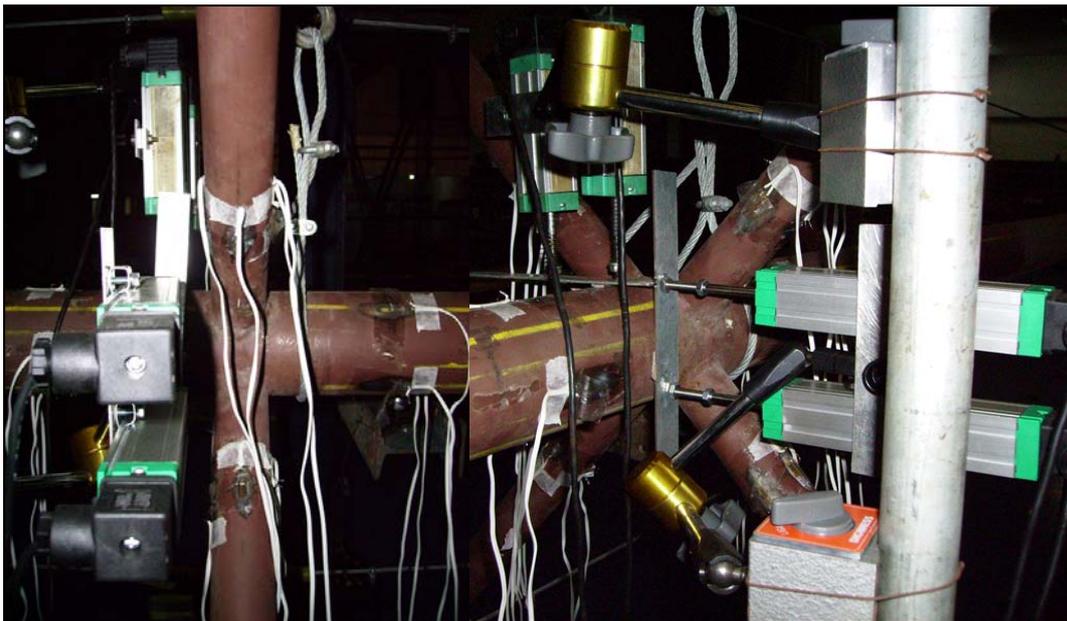


Figura 3.38 LVDTs 2, 3, 4 e 5 próximos ao centro da coluna.

Dois extensômetros adicionais foram usados por “braço” da coluna em relação a configuração originalmente ensaiada, [1] totalizando vinte e quatro extensômetros, sendo oito na coluna principal e quatro em cada um dos quatro “braços”

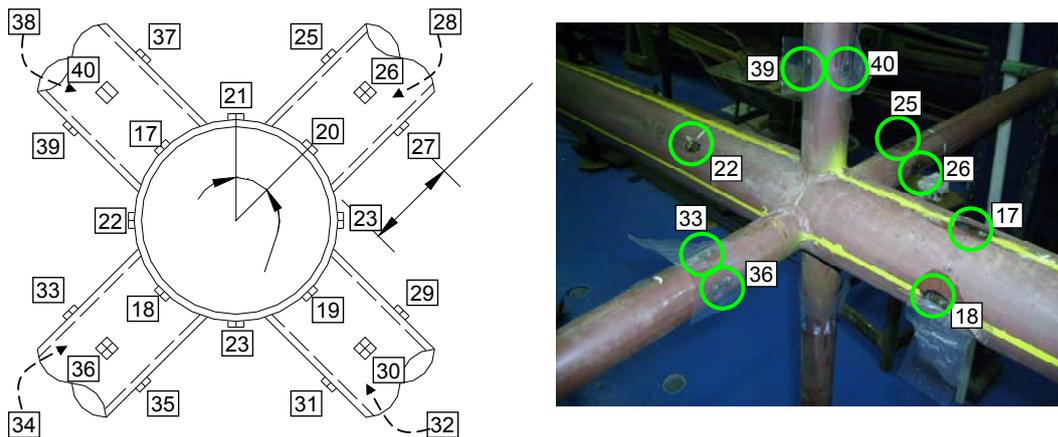


Figura 3.39 Posicionamento dos extensômetros na coluna de aço estaiada.

Devido à complexidade dos ensaios, foram utilizados dois relógios analógicos para se ter um controle visual dos deslocamentos da coluna de aço. Um dos relógios foi aplicado em uma das extremidades para se ter o controle do deslocamento axial. O outro relógio foi localizado no centro da coluna para se ter o controle do deslocamento no plano horizontal, como pode ser observado na Figura 3.40.

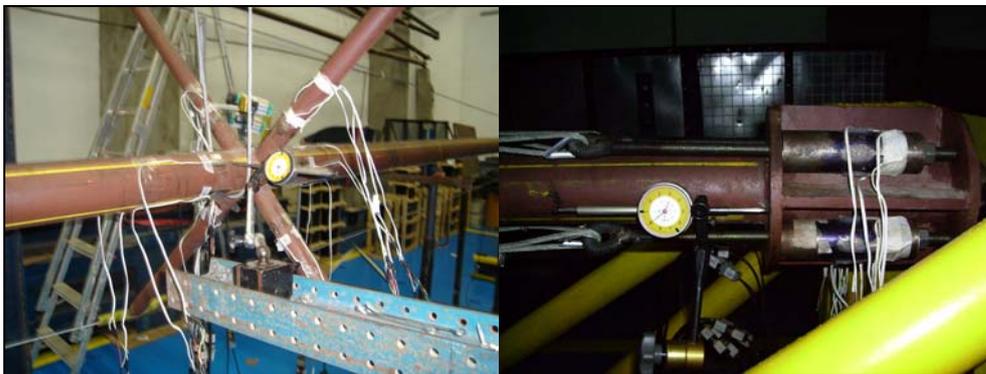


Figura 3.40 Relógios analógicos para controle visual dos deslocamentos da coluna.

3.6

Montagem dos estais e processo de protensão da Coluna 1

Neste primeiro ensaio utilizou-se cabos de aço como estais para o sistema de travamento da coluna principal. Os materiais utilizados nesta primeira montagem foram:

- 4 Cabos de aço de 1/4" para servir como estai;
- 32 anilhas de 1/4" (ou grampos) para o diâmetro do cabo;
- 8 sapatilhos para o diâmetro do cabo;

- 8 barras rosqueadas com olhal em uma das extremidades para servir de ancoragem dos cabos;
- Um conjunto de 8 porcas e 8 arruelas;
- 4 células de carga de carga para estais do primeiro modelo (vide 0);
- 2 células de carga para obtenção dos esforços externo e total [1];
- Um conjunto contendo um tifor e uma anilha para protender os estais.

O procedimento para a montagem começa por passar cada sapatilho pelo olhal de cada barra de ancoragem diminuindo assim o atrito e protegendo os estais contra o desgaste gerado pela protensão.

Na extremidade da coluna, onde é aplicada a carga externa, instala-se as quatro barras de ancoragem passando pelos furos dispostos na “cabeça2 da coluna travando-as na placa após a célula de carga que mede o esforço total na estrutura (carga externa somada a carga gerada pelos estais) conforme a Figura 3.41.



Figura 3.41 Ancoragem na extremidade da coluna próximo ao macaco hidráulico.

Com a ancoragem instalada passa-se o cabo de aço através do olhal da ancoragem, certificando que o cabo esteja sobre o sapatilho, prendendo-o com três anilhas conforme a norma de segurança apresentada pelo catálogo da CIMAF [724] e de acordo com o exemplo da Figura 3.42, onde se observa que a maneira correta de posicionar é colocando a base da anilha no trecho mais comprido do estai (o que vai em direção a outra extremidade da coluna).

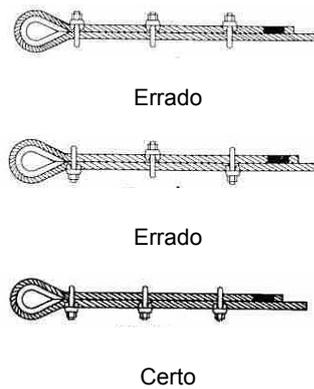


Figura 3.42 Posição correta de travamento dos cabos.

Em seguida leva-se o estai a outra extremidade da coluna conduzindo-o por dentro de um pequeno tubo de aço soldado no final do braço. Este tubo serve para manter o estai aplicando força sempre no mesmo ponto do braço e evitar qualquer problema do cabo fugir do ponto de aplicação.

Na outra extremidade da coluna, onde se encontram as células de carga para medir os esforços nos estais do primeiro modelo (vide 0), passa-se a barra de ancoragem por dentro dessas células de carga antes de travar na coluna. Foi importante que a barra de ancoragem atravessasse a segunda placa da cabeça da coluna, pois assim, a célula de carga dos estais não perdeu o alinhamento com a coluna durante os ensaios.

A porca usada para travar a barra de ancoragem deve ser colocada na diretamente na célula de carga dos estais para transferir o esforço do cabo para a mesma como pode ser observada nas Figura 3.43 e Figura 3.44.

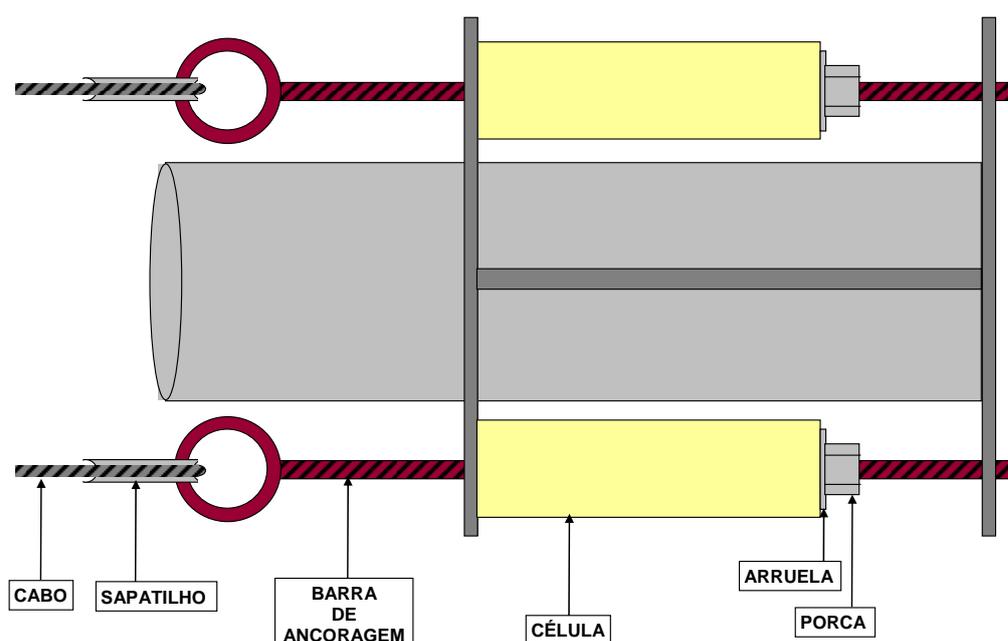


Figura 3.43 Esquemática da montagem dos estais em uma das extremidades da coluna.

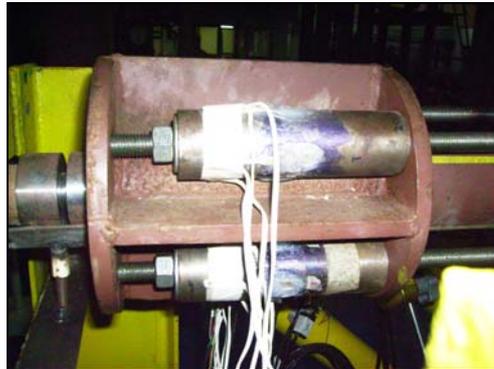


Figura 3.44 Barras de ancoragem montada com as células de carga.

Após o travamento da barra de ancoragem na célula de carga dos estais, passa-se o cabo pelo olhal e prende-o conforme explicado no catálogo da CIMAF [24], repetindo todo o processo de montagem para todos os outros três estais.

Para o processo de aplicação de protensão nos estais fez-se um laço na extremidade do cabo. Neste laço foi preso um dos ganchos do tifor. O outro gancho do tifor foi preso em uma anilha de 1,5 in colocada diretamente no cabo de aço como pode ser visto na Figura 3.45.



Figura 3.45 Aplicação de protensão utilizando um tifor.

Através do titor é introduzida a protensão nos cabos até próximo até próximo a carga pretendida, onde depois é realizado um ajuste fino pela porca da barra de ancoragem do estais até atingir o valor da protensão desejada.

Para a primeira coluna utilizou-se somente um titor para protender cada estai, pois não se tinha conhecimento se era viável a sua utilização, a qual foi muito bem aceito. Observou-se que este processo era muito lento na aplicação de protensão de nível alto, cerca de 1,5 kN a 3 kN por estai dificultando também o equilíbrio de forças nos mesmos. Um outro problema ocorreu na aderência da anilha presa no cabo de aço para aplicação de protensão, onde ao atingir níveis de protensão elevados a anilha perdia aderência e deslizava pelo cabo perdendo assim toda protensão já adquirida. A solução adotada para a aplicação de níveis altos de protensão foi levar os estais até próximo de 1,5 kN por estai e o restante da protensão era aplicada pelo ajuste da porca das barras de ancoragem.

3.7

Montagem dos estais e processo de protensão da Coluna 2

A segunda coluna é uma réplica da primeira coluna pois se queria ter uma confirmação dos resultados obtidos e poder compará-los. Sendo que alguns itens foram melhorados, devido a experiência obtida pelos ensaios da primeira coluna. A começar pelas células de cargas dos estais que foram substituídas pelo segundo modelo (vide 0), sendo esta a única diferença no processo de montagem.

Para o processo de protensão foram adquiridos mais três titor, totalizando quatro, um para cada estai. A perda de aderência da anilha de travamento do titor no cabo foi resolvida criando-se outro laço, feito com pedaços cabo a parte, no estai. Nesse laço foram presas duas anilhas: uma de maior resistência e tamanho (38,1 mm) para envolver os cabos; e uma menor (6,4 mm) somente para aumentar a aderência. A Figura 3.46 apresenta a nova composição utilizada para protender os estais.

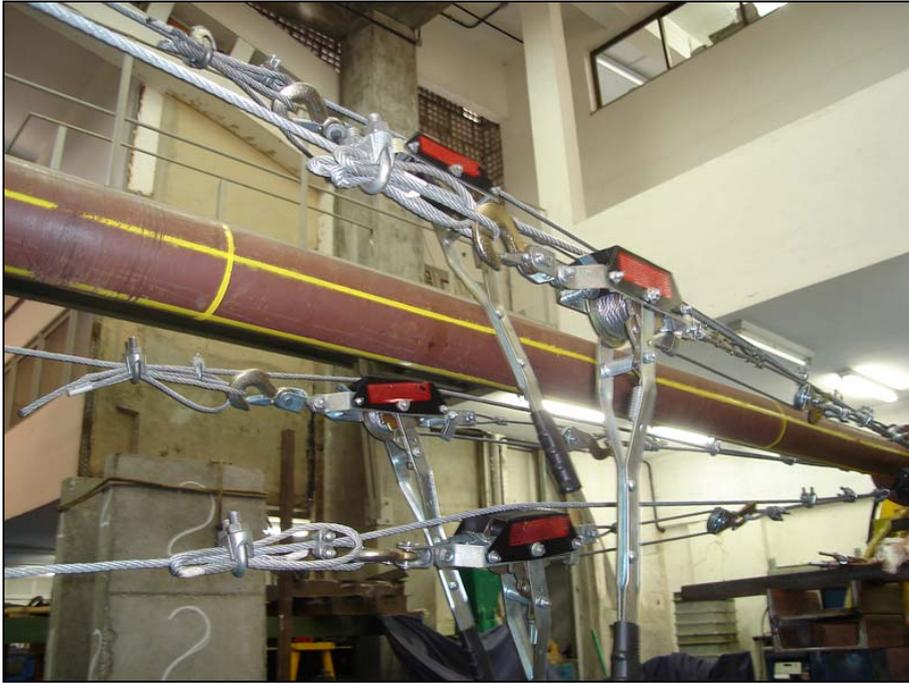


Figura 3.46 Aplicação de protensão utilizando quatro tifor.

Com a utilização dos quatro tifor a aplicação da carga é quase simultânea na protensão nos cabos. A aplicação era feita dois a dois, onde se apertavam dois cabos diametralmente opostos com 0,25 kN e depois os outros dois, evitando assim o desbalanceamento na estrutura, até próximo a protensão desejada. Para se chegar ao nível de protensão desejada realizou-se um ajuste fino através das porcas das barras de ancoragem.

3.8

Montagem dos estais e processo de protensão da Coluna 3

Para ensaiar a terceira coluna resolveu-se aumentar a rigidez dos estais trocando o material de cabo de aço por barras (vergalhão) para o sistema de travamento da coluna principal. Os materiais utilizados nesta primeira montagem foram:

- 4 barras de aço de 6,3mm de diâmetro para trabalhar como estais;
- 4 esticadores;
- 8 anilhas para travar os estais nas barras de ancoragem;
- 8 barras rosqueadas com olhal em uma das extremidades para servir de ancoragem dos estais;
- Um conjunto de 8 porcas e 8 arruelas;

- 4 células de carga de carga para estais do segundo modelo (vide 0);
- 2 células de carga para obtenção dos esforços externo e total [1];

A montagem inicia por passar cada estai pelo tubo soldado na extremidade de cada braço conforme Figura 3.47. Para esse caso era imprescindível que este fosse o começo da montagem já que nas extremidades foram soldados gancho de ancoragem dos estais.



Figura 3.47 Passagem dos estais pelos braços.

Estes ganchos foram elaborados com a intenção de transferir os esforços dos estais para as barras de ancoragem sem a geração de momento binário. Para tal, usou-se o mesmo material da barra de aço para gerar os elos de transferência de esforços, produzindo oito elos, um para cada extremidade do estai, e soldados no mesmo.

A ancoragem dos estais difere um pouco para cada extremidade da coluna de aço. Na extremidade da coluna onde estão situadas as células de carga do segundo modelo (vide 0), os estais foram ancorados através de anilhas às barras de ancoragem, como pode ser observado na Figura 3.48.



Figura 3.48 Travamento dos estais nas barras de ancoragem próximo as células de carga dos estais.

Na outra extremidade da coluna, utilizaram-se esticadores entre os ganchos e as anilhas. Estes esticadores serviram para gerar a protensão nos estais. A Figura 3.49 mostra como foi realizada esta ligação.

Assim como a primeira e segunda coluna, o processo de montagem das barras de ancoragem na estrutura para a terceira coluna é igual para ambas as extremidades (Figura 3.41 e Figura 3.44).

Para a aplicação da protensão nas barras não se pôde aproveitar da mesma técnica utilizada para os cabos, descartando assim os tior. Como instrumento de aplicação de protensão utilizou-se esticadores. Do mesmo modo que a aplicação da protensão nos cabos usada na segunda coluna, a aplicação foi realizada dois a dois, onde se apertavam duas barras diametralmente opostos de 0,25 kN e depois as outras duas, evitando assim o desbalanceamento na estrutura até próximo da protensão. Em seguida um ajuste fino era realizado pelas barras de ancoragem até o nível de protensão desejada.



Figura 3.49 Travamento dos estais nas barras de ancoragem próximo ao macaco hidráulico.

No capítulo a seguir serão apresentados os resultados das três colunas de aço estaiada obtidos durante os ensaios experimentais.