

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Nota 9,5
[Assinatura]
11.12.02

Desenvolvimento de Sensor de Força

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em
Engenharia

Melissa Hoppenstedt Ruzzi

Orientador: Roberto Spinola Barbosa

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo

2002

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600007733

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. Roberto Spinola Barbosa que me incentivou e me orientou, tornando possível a realização deste trabalho.

Ao IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas que forneceu suporte técnico e financeiro para esse projeto.

RESUMO

Esse projeto tem como objetivo o desenvolvimento de sensor de força, baseado em instrumentação com extensômetros elétricos, para medição de esforço longitudinal de tração de composições ferroviárias. A medição da força de tração do trem ferroviário tem a finalidade de verificar o desempenho do conjunto de locomotivas. O engate é o componente mecânico responsável pelo acoplamento entre os veículos ferroviários. Devido a sua concepção mecânica o corpo do engate possui uma distribuição de tensões bastante irregular. Adicionalmente, a aplicação de força ocorre em diferentes posições, em função das condições de operação. Desta forma a constituição deste componente como elemento elástico do sensor de força contem problemas de engenharia de projeto. A motivação desse trabalho consiste na identificação da localização apropriada para a instrumentação visando a eliminação de fenômenos cruzados no elemento sensor de forma a permitir a identificação adequada do fenômeno estudado Para desenvolver um sensor de forças em engates ferroviários foram seguidas as seguintes etapas: projeto funcional do elemento sensor, modelamento geométrico do componente estrutural, análise estática através do método de elementos finitos, concepção e projeto da instrumentação.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Fundamentos Teóricos.....	1
2.1. Elementos Finitos	1
3. Metodologia.....	3
3.1. Projeto Funcional	3
3.2. Modelamento Geométrico	7
3.2.1. Modelo Elementar do sensor de força	7
3.2.2. Estudo de simplificação do engate	8
3.2.3. Projeto geométrico do modelo simplificado	9
3.3. Análise do modelo através do Método de elementos finitos.....	11
3.3.1. Obtenção das tensões críticas e sua posição no engate.....	12
3.3.2. Análise da influência de momentos no engate	13
4. Resultados	15
4.1. Modelo Geométrico do Engate.....	15
4.1.1. Esforços de Tração e compressão:.....	15
4.1.2. Influência dos Momentos.....	17
5. Discussão.....	22
6. Estudo da instrumentação.....	23
6.1. Escolha da posição de instrumentação	23
6.2. Modelamento Geométrico do Engate com Furo.....	24
6.3. Análise do modelo com furo através do Método de elementos finitos	24
6.4. Resultados do Modelo com Furo.....	25
6.4.1. Esforços de Tração e compressão:.....	25
6.4.2. Influência dos Momentos:.....	27
6.5. Escolha da configuração do sensor a ser utilizado	29
6.5.1. Fundamentos Teóricos	29
6.5.2. A Ponte de Wheatstone	33
6.5.3. Configuração Adequada da Instrumentação	34
7. Comentários	36
8. Conclusão.....	36
9. Bibliografia	38

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ENGATES FERROVIÁRIOS ACOPLADOS.....	1
FIGURA 2 - CORPO LIVRE SUBMETIDO A FORÇAS EXTERNAS.....	4
FIGURA 3 - ELEMENTO INFINITESIMAL DE ÁREA SOB ESTADO DE TENSÃO GERAL	4
FIGURA 4 - FORÇA LONGITUDINAL DE TRAÇÃO APLICADA NA LINHA NEUTRA.....	5
FIGURA 5 - FORÇA LONGITUDINAL DE COMPRESSÃO APLICADA NA LINHA NEUTRA	5
FIGURA 6 - FORÇA LONGITUDINAL DE TRAÇÃO APLICADA FORA DA LINHA NEUTRA	6
FIGURA 7 - DIAGRAMA DE CORPO LIVRE EQUIVALENTE A FIGURA 6	6
FIGURA 8 - DIAGRAMA DE CORPO LIVRE E TENSÕES PARA O MODELO ELEMENTAR DO ENGATE.	8
FIGURA 9 - DESENHO DO ENGATE TIPO F EM SÓLIDO DO AUTOCAD®	10
FIGURA 10 - VISTA SUPERIOR DO DESENHO DO ENGATE TIPO F EM AUTOCAD ®	10
FIGURA 11 - ENGATE F COM MALHA, ESFORÇO DE TRAÇÃO E RESTRIÇÕES	12
FIGURA 12 - ENGATE F COM MALHA, ESFORÇO DE COMPRESSÃO E RESTRIÇÕES	13
FIGURA 13 - ENGATE F COM MALHA, MOMENTO EM Y E RESTRIÇÕES	14
FIGURA 14 - ENGATE F COM MALHA, MOMENTO EM Z E RESTRIÇÕES.....	14
FIGURA 15 - TENSÕES NA DIREÇÃO X PARA TRAÇÃO NO ENGATE F, VISTA LATERAL ESQUERDA	15
FIGURA 16 - TENSÕES NA DIREÇÃO X PARA TRAÇÃO NO ENGATE F, VISTA LATERAL DIREITA	16
FIGURA 17 - TENSÕES NA DIREÇÃO X PARA COMPRESSÃO NO ENGATE F, VISTA LATERAL ESQUERDA ..	16
FIGURA 18 - TENSÕES NA DIREÇÃO X PARA COMPRESSÃO NO ENGATE F ,VISTA LATERAL DIREITA	17
FIGURA 19 - TENSÕES NA DIREÇÃO X PARA MOMENTO +Y NO ENGATE F ,VISTA LATERAL ESQUERDA .	18
FIGURA 20 - TENSÕES NA DIREÇÃO X PARA MOMENTO +Y NO ENGATE F ,VISTA LATERAL DIREITA	18
FIGURA 21 - VISTA SUPERIOR DO ENGATE.....	20
FIGURA 22 - CORTE AA - COTAS PARA CÁLCULO DO BARICENTRO	20
FIGURA 23 - TENSÕES NA DIREÇÃO X PARA MOMENTO +Z NO ENGATE F ,VISTA LATERAL ESQUERDA..	21
FIGURA 24 - TENSÕES NA DIREÇÃO X PARA MOMENTO +Z NO ENGATE F ,VISTA LATERAL DIREITA.....	22
FIGURA 25 - VISTA LATERAL ESQUERDA DO ENGATE COM FURO.....	24
FIGURA 26 - VISTA ISOMÉTRICA DO ENGATE COM FURO	24
FIGURA 27 - MALHA DE 5MM UTILIZADA NO FURO DO ENGATE PARA INSTRUMENTAÇÃO	25
FIGURA 28 - TENSÕES NA DIREÇÃO X PARA TRAÇÃO NO ENGATE F, VISTA LATERAL ESQUERDA	25
FIGURA 29 - TENSÕES NA DIREÇÃO X PARA TRAÇÃO NO ENGATE F, VISTA LATERAL DIREITA	26
FIGURA 30 - TENSÕES NA DIREÇÃO X PARA COMPRESSÃO NO ENGATE F, VISTA LATERAL ESQUERDA ..	26
FIGURA 31 - TENSÕES NA DIREÇÃO X PARA COMPRESSÃO NO ENGATE F ,VISTA LATERAL DIREITA	27
FIGURA 32 - TENSÕES NA DIREÇÃO X PARA MOMENTO +Y NO ENGATE F ,VISTA LATERAL ESQUERDA .	27
FIGURA 33 - TENSÕES NA DIREÇÃO X PARA MOMENTO +Y NO ENGATE F ,VISTA LATERAL DIREITA	27
FIGURA 34 - TENSÕES NA DIREÇÃO X PARA MOMENTO +Z NO ENGATE F ,VISTA LATERAL ESQUERDA..	28
FIGURA 35 - TENSÕES NA DIREÇÃO X PARA MOMENTO +Z NO ENGATE F ,VISTA LATERAL DIREITA.....	28
FIGURA 36 - CADEIA DE MEDIDAS UTILIZANDO UM EXTENSÔMETRO.....	31
FIGURA 37 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE UM EXTENSÔMETRO ELÉTRICO	32

FIGURA 38 – CIRCUITO DA PONTE DE WHEATSTONE	33
FIGURA 39 – CIRCUITO DA PONTE DE WHEATSTONE	35

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – RESULTADOS OBTIDOS PARA O MODELO GEOMÉTRICO SIMPLIFICADO.....	22
TABELA 2 – POSIÇÃO ESCOLHIDA PARA INSTRUMENTAÇÃO.....	23
TABELA 3 – RESULTADOS DO MODELO COM FURO PARA INSTRUMENTAÇÃO PARA TENSÃO EM X.....	29
TABELA 4 - RESULTADOS DO MODELO COM FURO PARA INSTRUMENTAÇÃO PARA TENSÃO EM Z.....	35

1. INTRODUÇÃO

Os engates ferroviários são os componentes responsáveis pelo acoplamento entre os veículos, conforme pode ser visto na Figura 1. Através desse equipamento é possível verificar o sistema de tração do trem ferroviário. Existem diversos tipos de engates, cada qual desenvolvido para uma determinada aplicação.



Figura 1 - engates ferroviários acoplados

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Elementos Finitos

O método de elementos finitos (MEF) é largamente utilizado na engenharia. É um procedimento numérico para cálculos de estruturas e meios contínuos. As análises podem ser estáticas, dinâmicas, comportamento térmico entre outras.

No caso de estruturas simples ou de solução analítica conhecida, os métodos clássicos de resolução podem ser facilmente aplicados, porém, quando uma estrutura mais complexa está envolvida, o método de elementos finitos se mostra mais eficaz.

A principal diferença entre esse método e os clássicos é a maneira como a estrutura é estudada. Nos métodos clássicos as estruturas são contínuas e possuem comportamentos descritos por equações diferenciais parciais e ordinárias. Nesse método a estrutura é dividida em partes, ou seja subdomínios, e o comportamento de cada parte é descrito por uma equação algébrica. É necessário então, se obter soluções locais, que garantam uma convergência para os problemas globais.

Essas partes de tamanho finito são chamadas de elementos finitos. Os pontos onde os elementos são conectados são chamados nós, e o procedimento da escolha dos nós se chama discretização, e influencia no resultado a ser obtido, por isso sua escolha é muito importante.

Dois conceitos básicos envolvem o MEF:

- sua solução é baseada em uma integral da função;
- a solução é uma aproximação feita por polinômios definida na discretização do sistema;

Por isso o MEF não é um método exato, mas soluções muito precisas podem ser obtidas se utilizado corretamente.

O procedimento do MEF consiste basicamente em montar o sistema de forma matricial, em função dos nós, aplicar as condições de contorno e resolver o sistema.

O sistema matricial a ser definido é:

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

onde

$[K]$ é a matriz de rigidez ;

$\{u\}$ é o vetor de deslocamento de deslocamento;

$\{F\}$ é o vetor carregamento;

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desse projeto serão seguidas as seguintes etapas:

- Projeto Funcional, analisando-se as forças longitudinais envolvidas;
- Simplificação da geometria do engate para elaboração de modelo geométrico que será utilizado na análise de elementos finitos;
- Análise estática por elementos finitos utilizando-se programa numérico, determinando-se por este método as tensões críticas e sua posição no engate e ainda a influência de momentos.
- Estudo da instrumentação, onde será escolhida a configuração do sensor a ser utilizado, será feita a validação funcional do sensor e ainda desenvolvida uma metodologia de balanceamento.
- Para instrumentação, primeiramente será feito um levantamento da geometria da seção, para a posterior instalação do sensor. Então, será realizado o balanceamento do engate e, ainda a sua verificação funcional, sendo essa, aferição longitudinal e verificação dos momentos.

3.1. Projeto Funcional

Para iniciar o estudo do engate é necessário conhecer as forças e momentos presentes no mesmo, para tanto se realizou uma análise das forças longitudinais envolvidas.

Partindo-se do princípio da aplicação de uma força externa em uma direção qualquer, tem-se que as forças internas atuantes possuem magnitudes e direções variadas. Essas forças mantêm o equilíbrio com as forças externas, e podem ser decompostas em componentes paralelas e perpendiculares ao plano da seção.

Assim por exemplo no caso do carregamento abaixo existirão forças internas que se equilibram às forças externas.

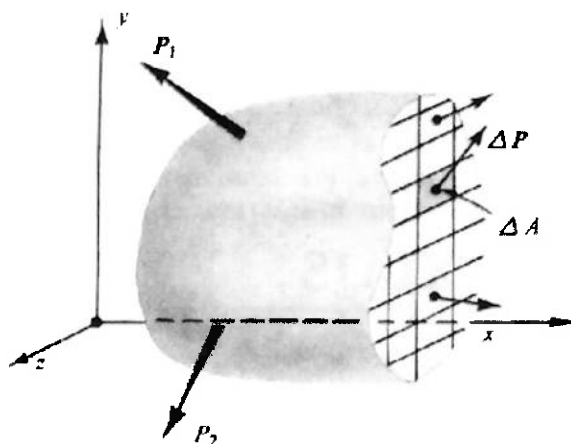


Figura 2 - corpo livre submetido a forças externas

Isolando um elemento de área infinitesimal tem-se a seguinte distribuição de tensões:

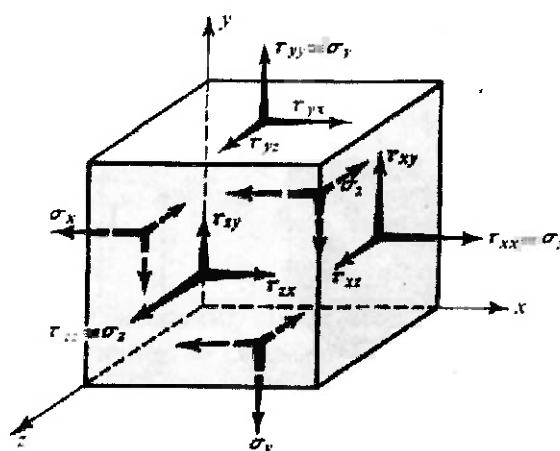


Figura 3 - elemento infinitesimal de área sob estado de tensão geral

Como o objetivo desse estudo é a medição das forças longitudinais, a tensão de interesse é a tensão normal na direção x, ou seja σ_x .

Construiu-se o diagrama de corpo livre do engate para direção longitudinal, para observar os esforços atuantes e suas reações.

Primeiramente analisou-se o plano xy (conforme Figura 4) e considerou-se um acoplamento perfeito entre os engates, onde a força aplicada estaria sobre a linha

neutra do engate estudado. Nesse primeiro caso, considerou-se uma força de tração entre os engates. Essa força exercida pelo acoplamento do segundo engate será compensada por uma reação no pino do primeiro. O diagrama de corpo livre equivalente dessa situação pode ser visto na Figura 4.

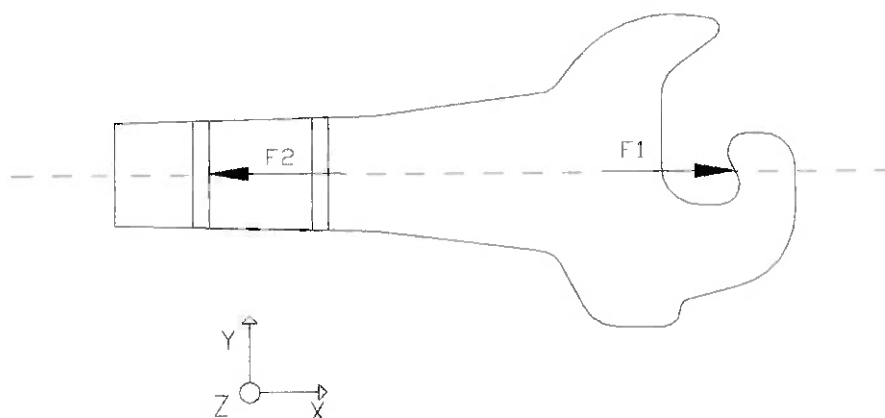


Figura 4 - Força longitudinal de tração aplicada na linha neutra

Fazendo equilíbrio estático para a Figura 4 tem-se:

$$\Sigma F = 0 \quad (2)$$

$$F1 = F2 \quad (3)$$

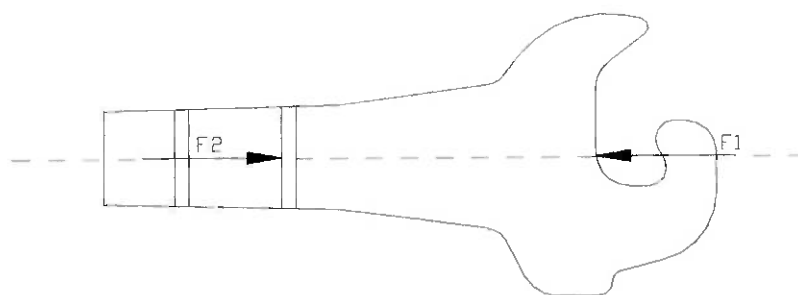


Figura 5 - força longitudinal de compressão aplicada na linha neutra

Na Figura 5, considera-se o mesmo acoplamento que da Figura 4, porém a força aplicada é de compressão. Tem-se então:

$$\Sigma F = 0 \quad (4)$$

$$F1 = F2 \quad (5)$$

Porém, se levarmos em conta um acoplamento real, a força aplicada pode não estar na linha neutra, devido a diferenças de posição ou mesmo dimensionais dos engates envolvidos. Uma primeira análise seria da força de tração aplicada acima da linha neutra com pode-se ver na Figura 6.

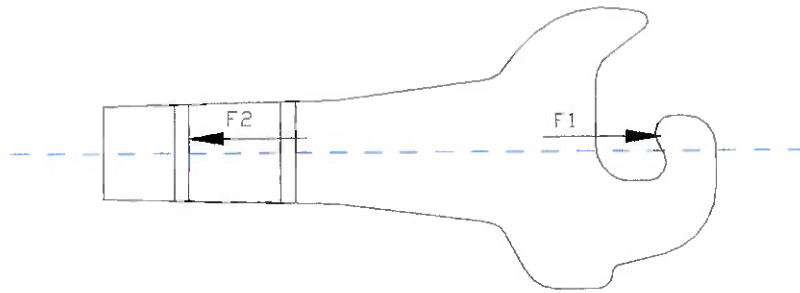


Figura 6 - força longitudinal de tração aplicada fora da linha neutra

Pode-se fazer um diagrama de corpo livre equivalente ao da Figura 6, transportando a força para linha neutra. Fazendo-se isso aparecerá um momento equivalente, conforme pode ser visto na Figura 7.

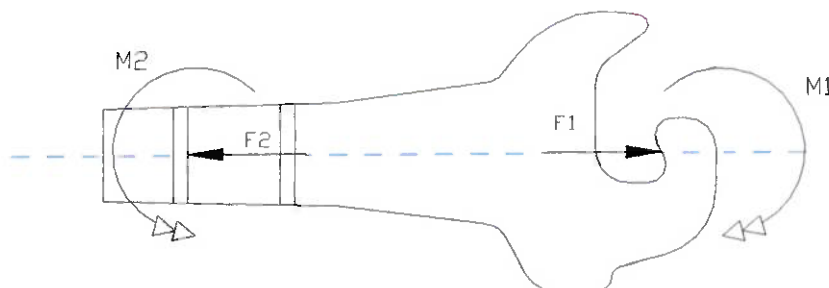


Figura 7 - diagrama de corpo livre equivalente a Figura 6

Fazendo equilíbrio estático

$$\Sigma F = 0 \quad (6)$$

$$F1 = F2 \quad (7)$$

$$\Sigma M = 0 \quad (8)$$

$$M1 = M2 \quad (9)$$

$$M1 = F1.d \quad (10)$$

Onde d= distância entre o ponto de aplicação da força (Figura 6) e a linha neutra.

Esse momento que surge de uma aplicação da força deslocada em relação à linha neutra influenciará a distribuição de tensões no engate, por isso o interesse da análise desse caso no presente estudo.

O mesmo ocorre para uma força deslocada para baixo em relação à linha neutra.

Pode-se analisar o outro plano do engate, xz (conforme Figura 4), onde devido a uma diferença de altura entre os engates ou diferenças geométricas, a força aplicada pode estar deslocada em relação à linha neutra. A análise é análoga para o plano xy. Entretanto, esse plano também será estudado porque devido a ele ocorrem mudanças nas distribuições das tensões ao longo do engate, devido à não simetria da peça.

3.2. Modelamento Geométrico

3.2.1. Modelo Elementar do sensor de força

O modelo mais simplificado do sensor de força, ou seja, do engate é uma barra submetida à esforços axiais, conforme pode-se ver na figura abaixo.

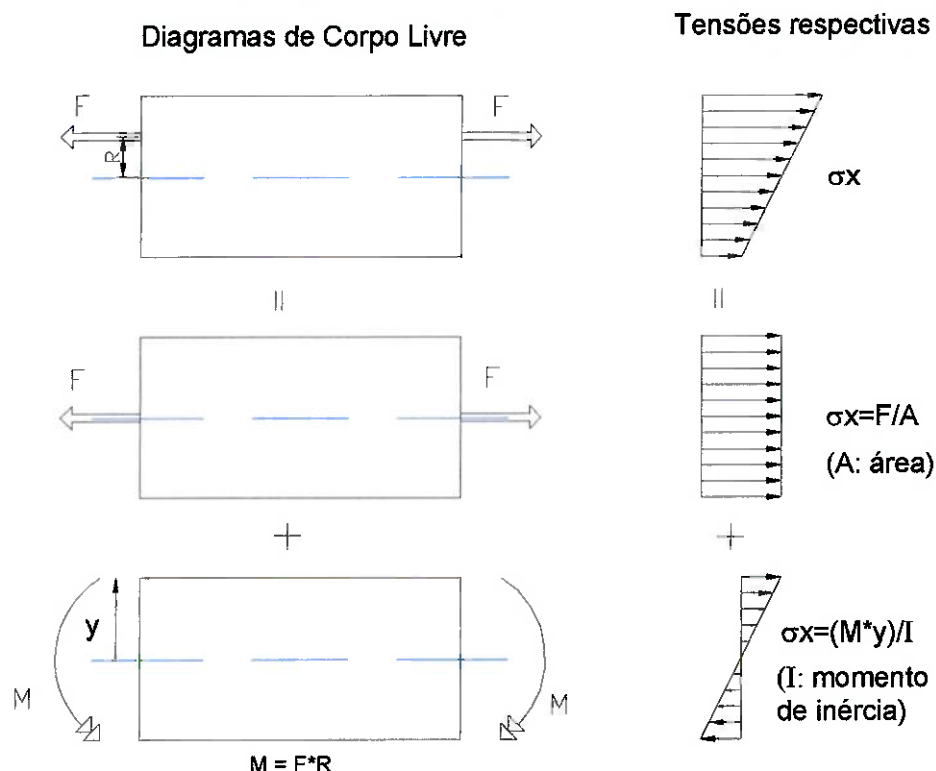


Figura 8 - diagrama de corpo livre e tensões para o modelo elementar do engate.

Porém esse modelo não atende às necessidades desse estudo, por ser demasiadamente simplificado, ou seja, devido a sua simetria, não aparecerem as distribuições irregulares de tensão que ocorrem de fato no engate.

Por isso, desenvolveu-se um modelo com mais detalhes construtivos que representasse com mais fidelidade as distribuições de tensões ao longo do engate.

3.2.2. Estudo de simplificação do engate

A partir do estudo das forças envolvidas pode-se simplificar o modelo real do engate para facilitar o estudo em elementos finitos. Foi estudado o engate tipo F, um dos mais utilizados no meio ferroviário. Esse engate utiliza como elemento de fixação um pino. Além disso, o tipo F possui uma diferença entre as espessuras de parede de sua seção trapezoidal.

Primeiramente deve-se levar em conta os detalhes que estão fora da linha neutra da peça, pois serão responsáveis por alterações nas tensões, todos os detalhes que estão na linha neutra ou são simétricos em relação a mesma podem ser omitidos.

É importante ressaltar que, como o estudo feito será basicamente qualitativo e não quantitativo, o mais importante é a proporção da peça e não suas dimensões em si. Os detalhes do pivô da mandíbula, e da mandíbula em si foram simplificados por não interferirem muito na região a ser estudada, região de instrumentação, que se encontra no corpo do engate entre a mandíbula e o pino.

3.2.3. Projeto geométrico do modelo simplificado

Para atender a necessidade de análise por elementos finitos do engate, houve a necessidade de, primeiramente, realizar o projeto geométrico das mesmas. Este projeto foi obtido utilizando-se o software de desenho AutoCad®. A partir das simplificações feitas, se utilizou os desenhos disponíveis e ,quando necessário, realizou-se medições na peça real disponível para realizar a construção do elemento geométrico. Construiu-se o modelo geométrico do engate tipo F.

Os principais recursos utilizados foram os de construção de sólidos geométricos (basicamente paralelepípedos e cilindros) bem como as operações que podem ser realizadas com estes sólidos (subtração, união e intersecção).

Ainda, no modelo geométrico, construiu-se um entalhe na cabeça para se garantir que a força de compressão fosse aplicada sobre essa superfície, sendo assim aplicada sobre a linha média do engate.

Os resultados do projeto geométrico são figuras (sólidos) em formato dwg e estão expostas.

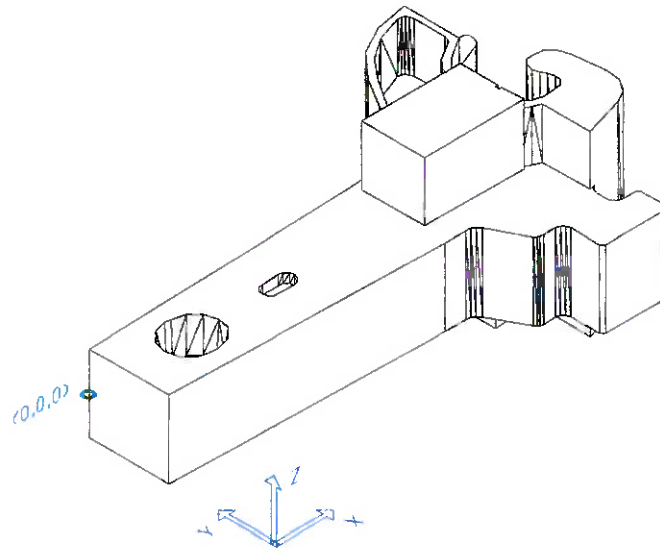


Figura 9 - desenho do engate tipo F em sólido do AutoCad®

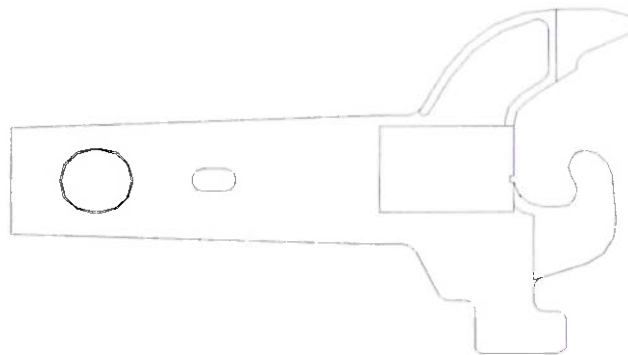


Figura 10 - vista superior do desenho do engate tipo F em AutoCad ®

3.3. Análise do modelo através do Método de elementos finitos

O programa numérico de análise por elementos finitos utilizado foi o Cosmos/DesignStar®. Esse programa possui algumas ferramentas automáticas como escolha do tipo de elemento e aplicação de condições de contorno somente sobre superfícies ou extremidades. Esse fato gera certas restrições ao uso, porém para uma análise aproximada se mostra muito eficaz.

Para realizar os estudos no programa de elementos finitos deve-se seguir algumas etapas:

1. Utilização do modelo geométrico previamente desenvolvido;
2. Início de um estudo estático;
3. Definição do material, no caso como se está realizando um estudo qualitativo e não quantitativo, o material utilizado não precisa ser necessariamente o utilizado na fabricação do engate, utilizou-se então liga de Aço 1020.
4. Definição das condições de contorno, que variam conforme o carregamento a ser estudado;
5. Definição de uma malha, no caso foram utilizados elementos de aproximadamente 25 mm de tamanho, sendo que fez-se um refinamento de malha na região de interesse, utilizando elementos de aproximadamente 10mm na região trapezoidal do engate, isso porque quanto menor o elemento mais interpolações o programa realizará, obtendo-se melhores resultados, principalmente em termos de obtenção de valores de tensão em posições estabelecidas. Porém, devido ao esforço computacional necessário existem limitações a serem respeitadas.;
6. Processamento numérico do caso de carregamento.
7. Obtenção dos valores de tensão na direção x, a partir da plotagem de tensões, e ainda utilizando comando que fornece os valores de tensão e coordenadas de um ponto da malha especificada, refinando a escala de cores equivalente, e seccionando a figura para avaliar as tensões internas à parede.

3.3.1. Obtenção das tensões críticas e sua posição no engate

Para cada engate deve-se analisar as tensões críticas decorrentes das forças de tração e compressão e observar sua posição. Para tanto, deve-se determinar as condições de contorno relativas a cada caso.

3.3.1.1. Esforço de tração:

Condições de contorno:

Restrição da peça com um vínculo de engastamento, simulando o encosto do pino no furo do pino, nesse caso, como o furo é cônico, o pino encostaria somente do meio do furo, conforme pode-se ver na Figura 11.

Aplicação de uma carga de 10000N normal à face onde seria feito o contato com o outro engate (em vermelho).



Figura 11 - engate F com malha, esforço de tração e restrições

3.3.1.2. Esforço de Compressão

Condições de contorno:

Nesse caso, a posição de engastamento é oposta à da tração pois o pino encostará na frente do furo.

A face de contato é oposta à de tração e o sentido da força é na direção de $-x$, conforme pode-se observar na figura abaixo:

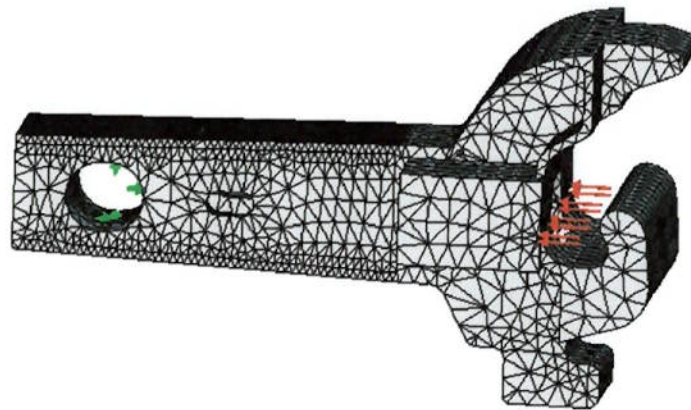


Figura 12 - engate F com malha, esforço de compressão e restrições

3.3.2. Análise da influência de momentos no engate

Conforme já citado no projeto funcional do engate ,deve-se analisar a influência dos fenômenos decorrentes de uma força aplicada fora da linha neutra, ou seja momento em Y e momento em Z, para que se possa desenvolver um método de instrumentação que anule essas tensões, obtendo-se apenas o resultado do fenômeno de interesse, ou seja esforços longitudinais.

3.3.2.1. Momento em +Y

Condições de contorno:

O engastamento será oposto à força aplicada, ou seja engasta-se em duas posições que representam a reação ao momento. Então, aplicam-se dois binários com

forças opostas de 5000N, cada um, correspondente a um momento no sentido positivo do eixo y do engate.

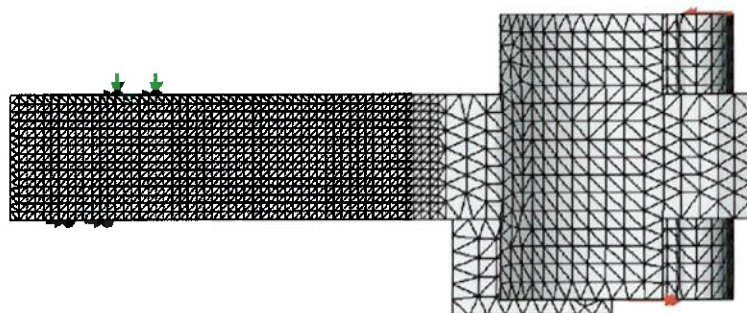


Figura 13 - engate F com malha, momento em Y e restrições

3.3.2.2. Momento em +Z

Condições de contorno:

O engastamento também será oposto à força aplicada, ou seja engasta-se em duas posições que representam a reação ao momento. Então, aplicam-se dois binários com forças opostas de 5000N, cada um, correspondente a um momento no sentido positivo do eixo z do engate.

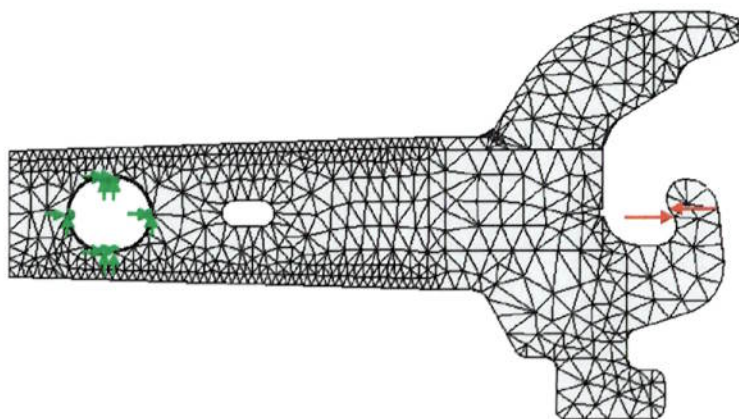


Figura 14 - engate F com malha, momento em Z e restrições

4. RESULTADOS

4.1. Modelo Geométrico do Engate

4.1.1. Esforços de Tração e compressão:

Observando a análise de elementos finitos do engate para tração observa-se que existe uma distribuição bem irregular das tensões. O objetivo desse estudo é localizar uma posição onde as tensões sejam as mais uniformes possíveis e que onde essas tensões estejam distribuídas o mais próximas possíveis em faces opostas.

tipof_10000-fore :: Static Node Stress
Units: MPa Deformation Scale: 1.0

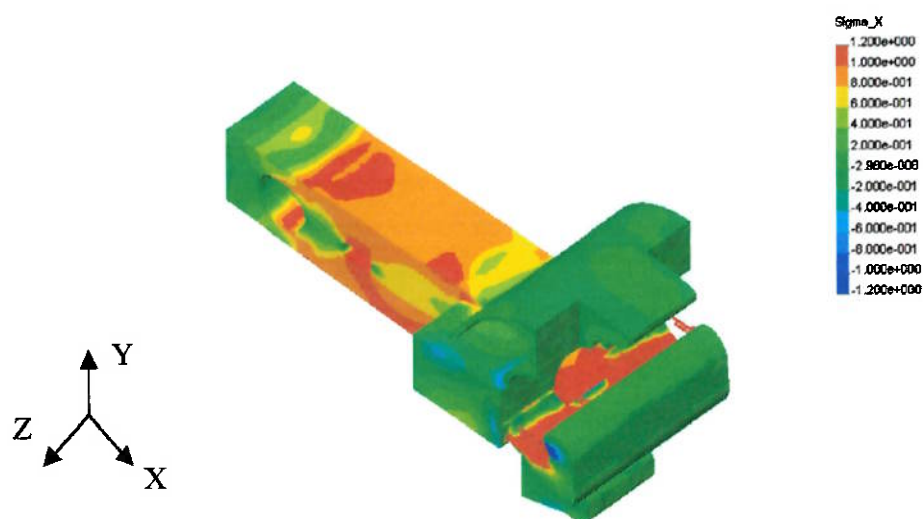


Figura 15 - tensões na direção X para tração no engate F, vista lateral esquerda

tipoF_10000-fora : Static Model Stress
Units: MPa Deformation Scale 1 : 0

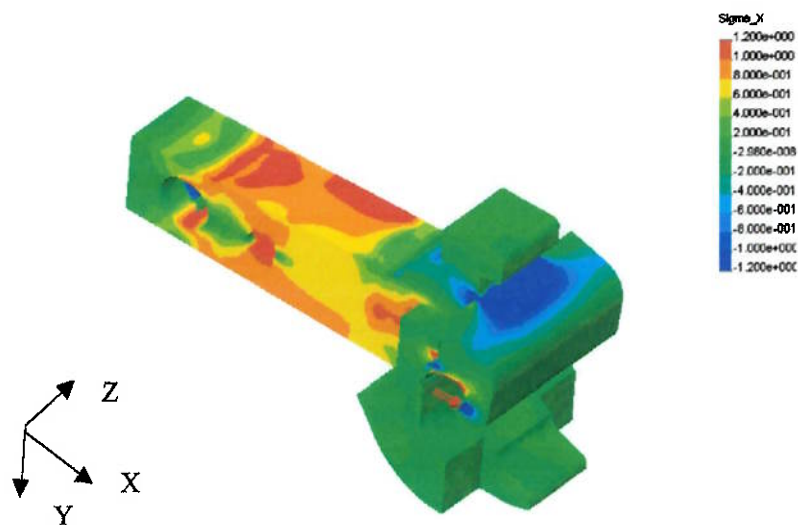


Figura 16 - tensões na direção X para tração no engate F, vista lateral direita

tipoF_10000-fora : Static Model Stress
Units: MPa Deformation Scale 1 : 0

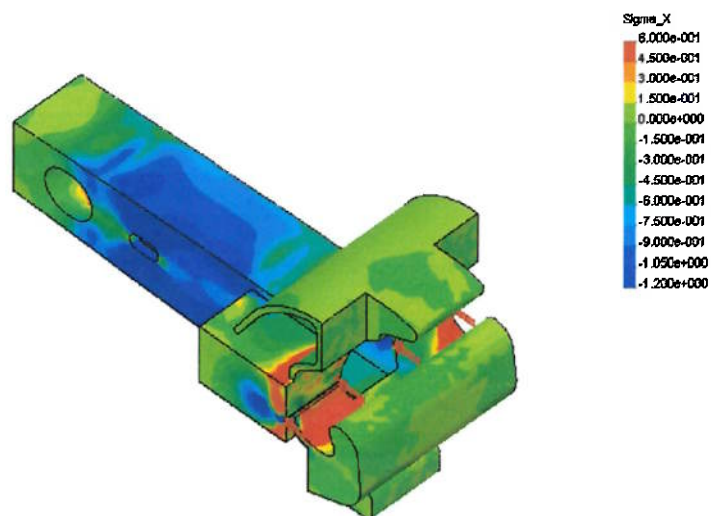


Figura 17 - tensões na direção X para compressão no engate F, vista lateral esquerda

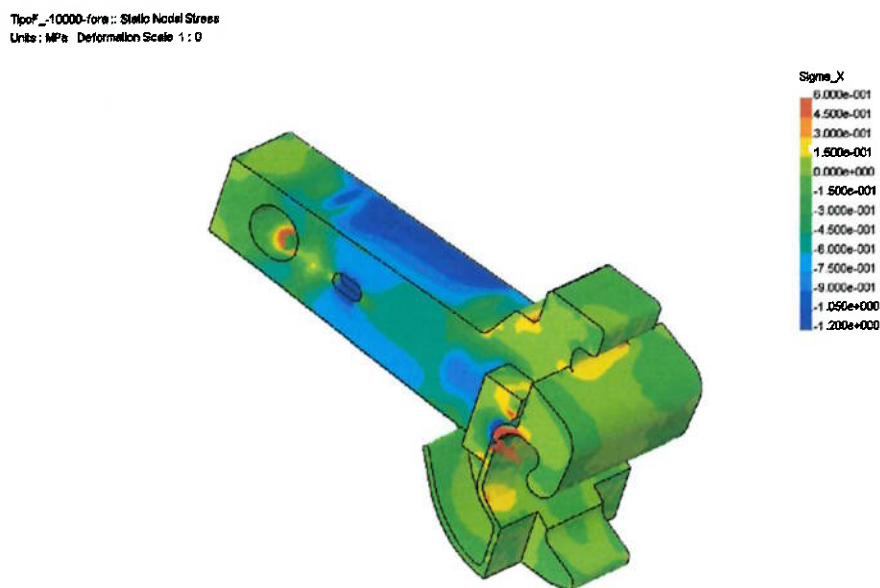


Figura 18 - tensões na direção X para compressão no engate F ,vista lateral direita

Observou-se que as faces opostas em relação ao eixo z não apresentavam distribuição de tensões parecidas enquanto que as faces opostas em relação ao eixo y apresentam em certas regiões distribuições parecidas. Isso se deve ao fato do engate não possuir dimensões de espessura de parede iguais em relação ao eixo x, ou seja olhando o topo do engate ,plano x,z as paredes são diferentes, assim a distribuição de tensão nessas paredes será diferente uma da outra, conforme pode-se observar com elementos finitos.

Portanto optou-se por analisar as outras faces, opostas em y, onde a distribuição de tensões aparentava mais uniforme.

4.1.2. Influência dos Momentos

Para que a leitura final da deformação nos extensômetros seja confiável deve-se eliminar os fenômenos espúrios, no caso os momentos que podem estar presentes na medição.

Ao se acoplar um engate a outro, erros de posicionamento podem ocorrer. Para que os momentos resultantes desse fenômeno não interfiram na leitura, deve-se analisar a influência dos mesmos na posição de instrumentação.

Momento Y

Esse momento aparece devido á diferença de alturas entre vagões, por exemplo.

Tipof_MY_2-krs Static Model Stress
Units: MPa Deformation Scale: 1.0

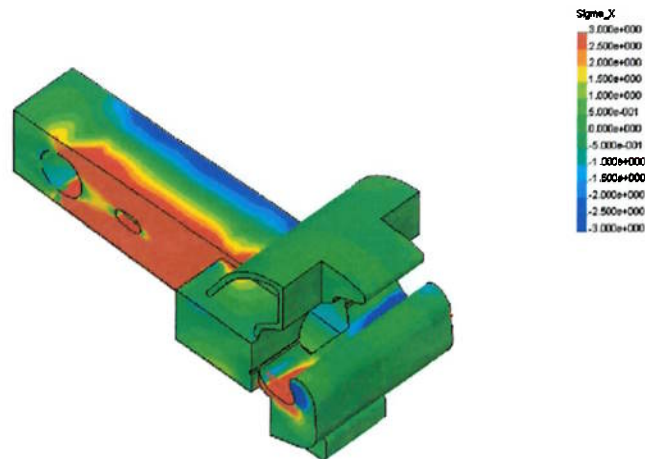


Figura 19 - tensões na direção X para momento +Y no engate F ,vista lateral esquerda

Tipof_MY_2-krs Static Model Stress
Units: MPa Deformation Scale: 1.0

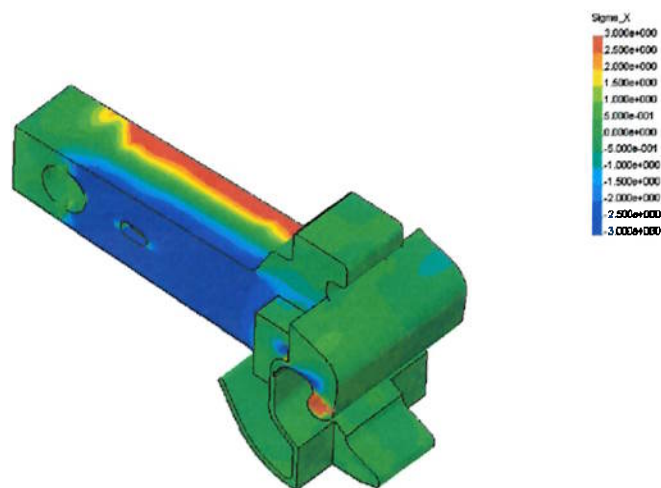


Figura 20 - tensões na direção X para momento +Y no engate F ,vista lateral direita

Observa-se que uma face lateral do engate apresenta tração e a outra compressão, o objetivo é fazer uma instrumentação que anule as tensões nas posições desejadas. Como o furo de instrumentação será feito nas faces $Y +$ e $Y -$, deve-se escolher o centro do furo coincidente com a linha neutra, assim as tensões ficam simétricas anulando-se se somadas.

Cálculo da linha neutra do engate

A posição mais indicada para se localizar o centro do furo de instrumentação é sobre a linha neutra do engate em relação ao eixo z , assim os extremos diametralmente opostos do furo ficarão simétricos em relação ao momento em Y permitindo eliminar esse efeito indesejável posicionando os extensômetros nesses extremos.

Sabendo-se que a linha neutra de uma peça homogênea coincide com seu o baricentro, deve-se calcular o baricentro dessa seção do engate em relação ao eixo z .

Assim como a espessura de parede de um lado é diferente do outro deve-se calcular a cota z do baricentro nessa posição.

Sabendo-se que um lado da parede tem 19,050 mm ($3/4"$) de espessura, o outro 22,225 ($7/8"$) e que a espessura total do engate é de 163,5125 ($6 \frac{7}{16} "$) pode-se calcular utilizando-se a equação de cálculo de baricentro obtida da mecânica geral com as cotas observadas na figura baixo. Como os dados geométricos foram retirados de [7], onde o sistema utilizado é o de polegadas, as cotas aqui utilizadas serão apresentadas nesse mesmo sistema, embora não corresponda ao sistema SI utilizado no Brasil.

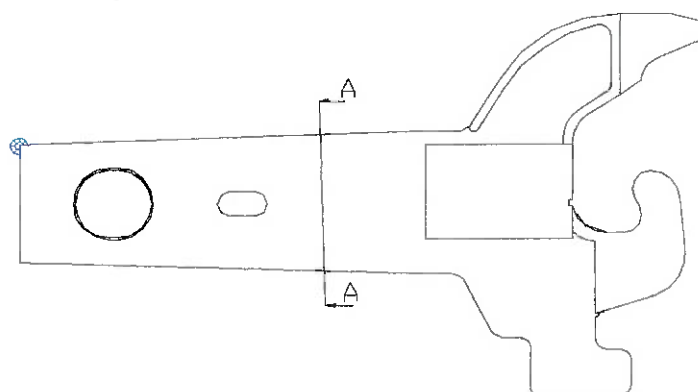


Figura 21 – Vista superior do engate

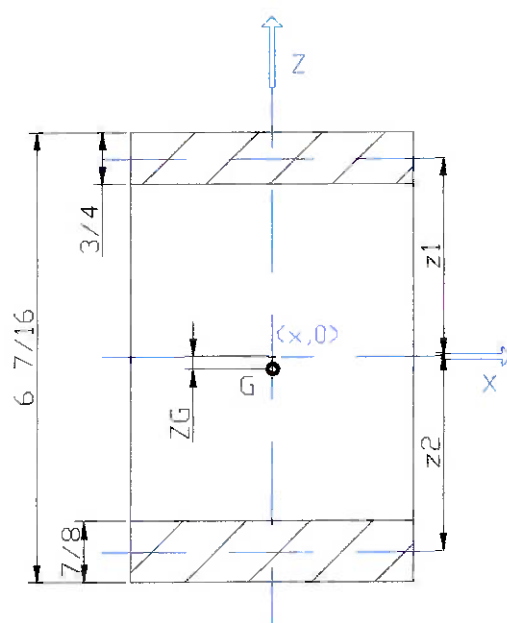


Figura 22 - corte AA - cotas para cálculo do baricentro

Sabe-se que:

$$Z_G = \frac{\sum m_i \cdot z_i}{\sum m_i} \quad (11)$$

então,

$$Z_G = \frac{m_1 \cdot z_1 + m_2 \cdot z_2}{m_1 + m_2} \quad (12)$$

onde:

Z_G = posição do baricentro em relação ao eixo z.

m_1 = massa menor (3/4 ")

z_1 = distância em z do baricentro da massa 1 até a cota (x,0)

m_2 = massa maior (7/8")

z_2 = distância em z do baricentro da massa 2 até a cota (x,0)

Portanto obtém-se:

$$Z_G = -0.1851" \quad (13)$$

Momento Z

Quanto a esse momento, observa-se que os valores de tensão, presentes na região provável de instrumentação, são simétricos.

Tipof_MZ_1-fore:: Static Model Stress
Units: MPa Deformation Scale: 1.0

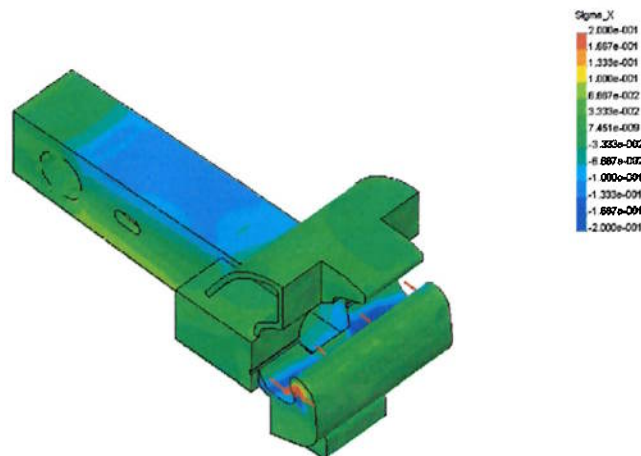


Figura 23 - tensões na direção X para momento +Z no engate F ,vista lateral esquerda

Tipo: MZ, 2-fora: Static Model Stress
Units: MPa Deformation Scale: 1 : 0

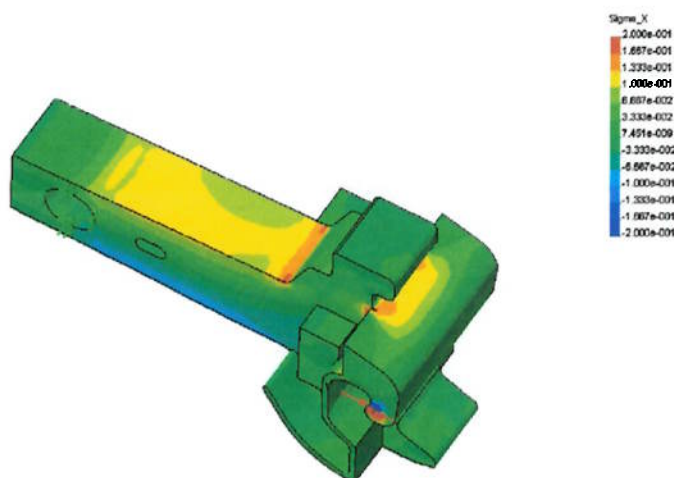


Figura 24 - tensões na direção X para momento +Z no engate F ,vista lateral direita

Tabela 1 – Resultados obtidos para o modelo geométrico simplificado

Modelo Geométrico do Engate							
posição no engate				força atuante			
X (in)	Y (in)	Z (in)		Tração (Mpa)	Compressão (Mpa)	MY (Mpa)	MZ (Mpa)
17,046	0,5303	0,64375		0,9539	-0,9829	1,7735	-0,2071
17,046	0,5303	-1,07290		0,9577	-0,8782	-1,8683	-0,2126
17,046	-7,1303	0,64375		0,9755	-0,9962	1,9540	0,1999
17,046	-7,1303	-1,07290		0,8624	-0,8068	-2,3832	0,2090
somat :				3,7494	-3,6642	-0,5240	-0,0108
influência dos momentos (%)						13,98	0,29
diferença entre tração e compressão (tração+compressão/tração):							
				2,27	%		

5. DISCUSSÃO

A partir das observações feitas, pode-se discutir os resultados obtidos.

A posição mais indicada para o furo da instrumentação foi obtida a partir das observações feitas sobre o resultado das tensões em elementos finitos para tração na Figura 15 e Figura 16, e para compressão na Figura 17 e Figura 18.

Para que se obtenha respostas do elemento sensor equivalentes para o carregamento de tração e de compressão, deve-se escolher posições onde as tensões possuam valores mais próximos possíveis, para os dois casos. Assim pode-se utilizar a mesma curva de calibração para os dois casos. É conveniente, ainda, que o campo de tensões seja o mais uniforme possível, visto que a instrumentação alterará a

distribuição de tensões e que o elemento sensor, extensômetro, possui tamanho físico. Então, a região mais adequada seria entre a cabeça do engate e o furo do oblongo.

Como o momento é fruto de um carregamento longitudinal não centrado e este efeito altera o valor das tensões, como observado na Figura 19 e Figura 20, pode-se escolher a posição adequada para que esses efeitos sejam anulados. Fazendo-se com que a posição de instrumentação coincida com o baricentro, ou seja a linha neutra, em relação ao eixo z (Z_G), anula-se o efeito do momento em y. Para o caso do momento em z, observado na Figura 23 e Figura 24, como os valores de tensão em uma face lateral são exatamente opostos ao da outra, pode-se anular esse efeito, instrumentando-se de forma a somar esses valores.

6. ESTUDO DA INSTRUMENTAÇÃO

6.1. Escolha da posição de instrumentação

Para aumentar a sensibilidade do sensor, optou-se por fazer um furo circular na posição de instrumentação, assim as tensões se multiplicarão em torno de três vezes.

A partir dos resultados obtidos em 4, escolheu-se uma posição adequada no engate para realizar-se o furo de instrumentação. O diâmetro mínimo necessário do furo para a instrumentação pode variar conforme o tipo e a utilização dos sensores. No caso utilizou-se um furo de $1 \frac{3}{4}$ “.

Tabela 2 – Posição escolhida para instrumentação

direção	X(in)	X(mm)	Y(in)	Y(mm)	Z(in)	Z(mm)
posição	17,0000	431,8000	passante	passante	-0,1851	-4,7015

6.2. Modelamento Geométrico do Engate com Furo

Construiu-se um novo modelo geométrico, seguindo a mesma metodologia citada em 3.2, contendo o furo da posição escolhida, para posterior análise de elementos finitos.

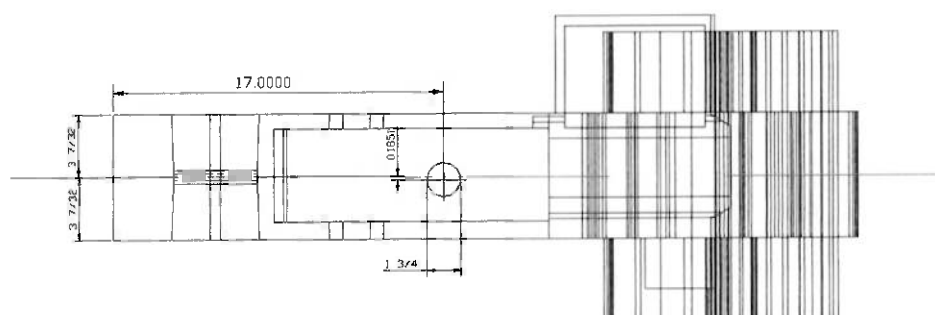


Figura 25 – vista lateral esquerda do engate com furo

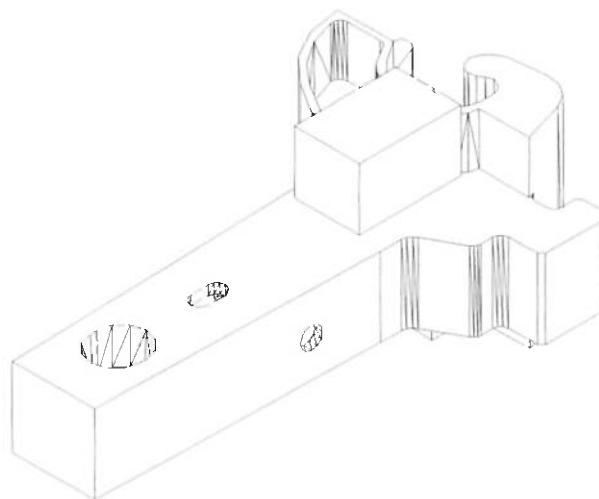


Figura 26 – vista isométrica do engate com furo

6.3. Análise do modelo com furo através do Método de elementos finitos

Realizou-se uma nova análise de elementos finitos, seguindo a mesma metodologia citada em 3.3, com um acréscimo no item 5 onde refinou-se a malha no

furo para instrumentação utilizando-se elementos de tamanho 5 mm para tração e compressão e 2 mm para os momentos.

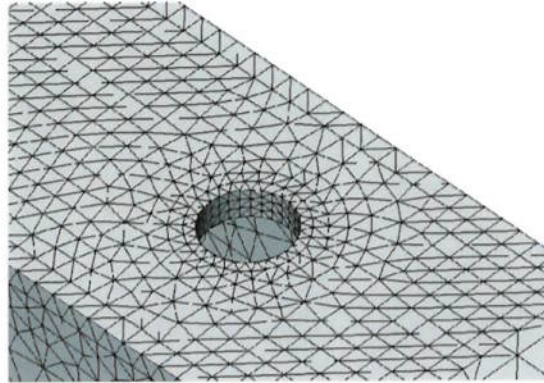


Figura 27 – malha de 5mm utilizada no furo do engate para instrumentação

6.4. Resultados do Modelo com Furo

6.4.1. Esforços de Tração e compressão:

hook_furo17r_1881_10000-angle : Static Model Stress
Units: MPa Deformation Scale: 1.0

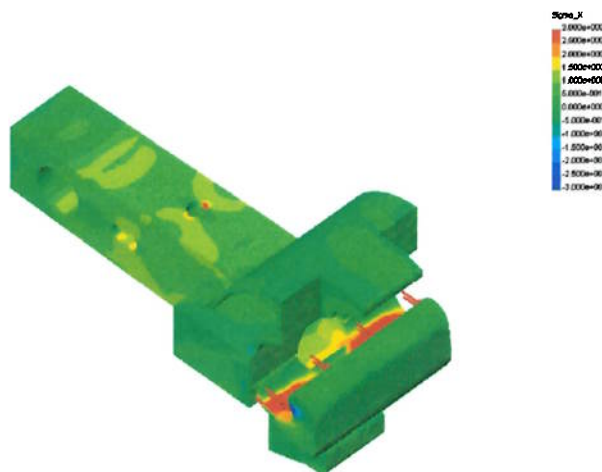


Figura 28 - tensões na direção X para tração no engate F, vista lateral esquerda

topF_Aux017n_1051_10000-engate Static Model Stress
Units: MPa Deformation Scale: 1.0

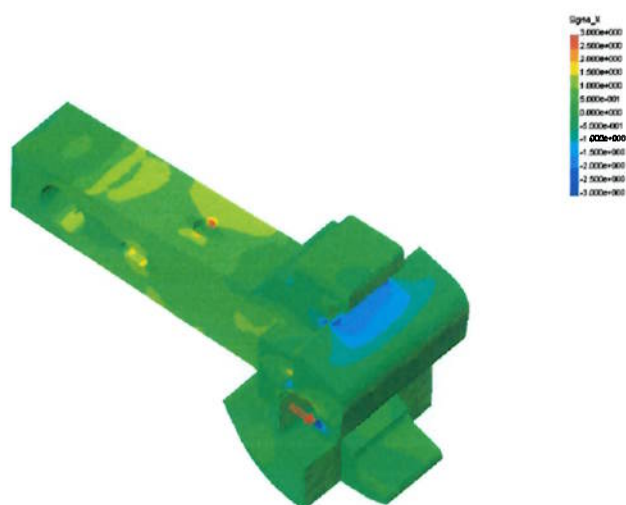


Figura 29 - tensões na direção X para tração no engate F, vista lateral direita

topF_Aux017n_1051_10000-engate Static Model Stress
Units: MPa Deformation Scale: 1.0

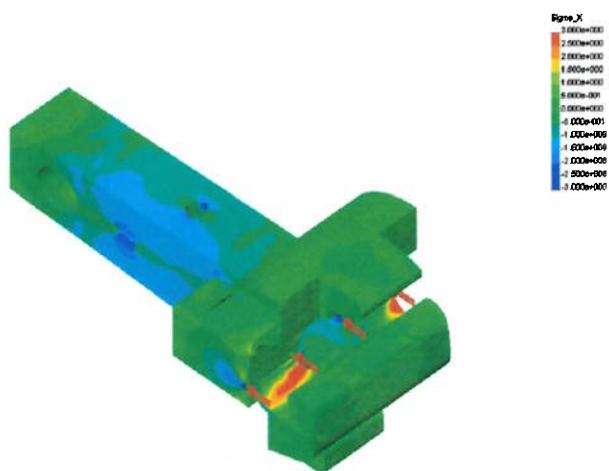


Figura 30 - tensões na direção X para compressão no engate F, vista lateral esquerda

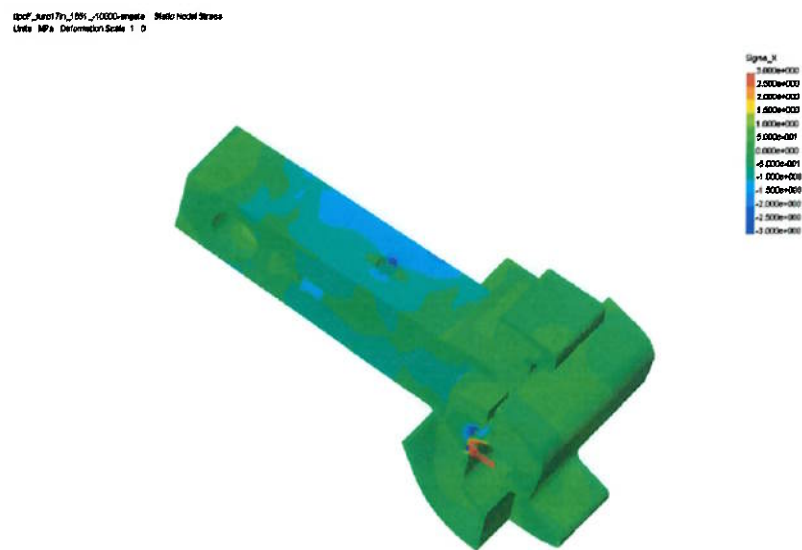


Figura 31 - tensões na direção X para compressão no engate F ,vista lateral direita

6.4.2. Influência dos Momentos:



Figura 32 - tensões na direção X para momento +Y no engate F ,vista lateral esquerda



Figura 33 - tensões na direção X para momento +Y no engate F ,vista lateral direita

topF_furo7in_1851_MZ_2-engate - Static Model Stress
Units: MPa Deformation Scale: 1 : 0

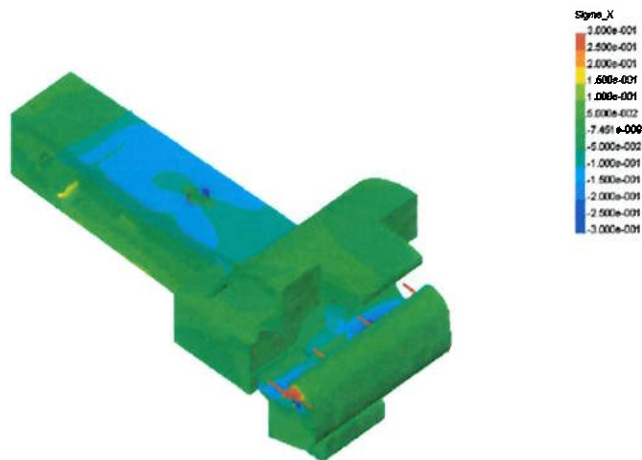


Figura 34 - tensões na direção X para momento +Z no engate F ,vista lateral esquerda

topF_furo7in_1851_MZ_2-engate - Static Model Stress
Units: MPa Deformation Scale: 1 : 0

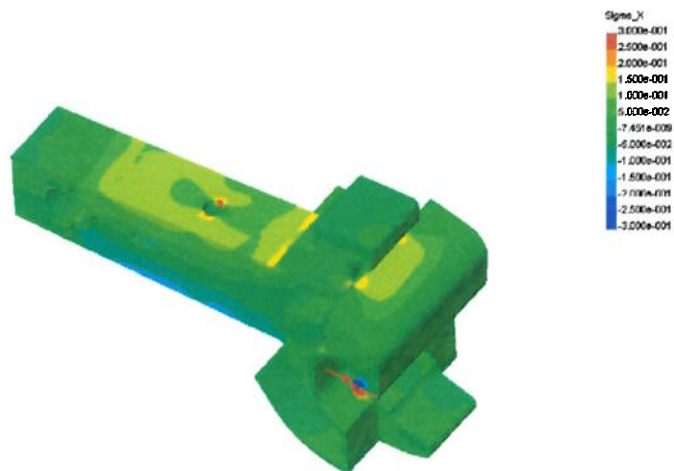


Figura 35 - tensões na direção X para momento +Z no engate F ,vista lateral direita

Utilizando-se das mesmas ferramentas em 4, obteve-se uma tabela de resultados.

Tabela 3 – Resultados do modelo com furo para instrumentação para tensão em x

TENSÃO NA DIREÇÃO X							
Engate com furação para instrumentação posição no engate:				força atuante: 10000 N			
X (in)	Y(in)	Z (in)		Tração (Mpa)	Compressão (Mpa)	MY (Mpa)	MZ (Mpa)
17	0,2162	0,6899		2,9488	-3,0340	2,0107	-0,3048
17	0,2162	-1,0601		2,8991	-2,6366	-1,7922	-0,3095
17	-6,8162	0,6899		2,9361	-3,0073	2,0511	0,3052
17	-6,8162	-1,0601		2,7056	-2,5043	-2,2415	0,3130
			somas :	11,4896	-11,1822	0,0281	0,0038
influência dos momentos (%)						0,24	0,03
diferença entre tração e compressão (tração+compressão/tração):							
2,68		%					

6.5. Escolha da configuração do sensor a ser utilizado

6.5.1. Fundamentos Teóricos

Para a escolha da configuração deve-se primeiramente definir qual o tipo de sensor mais adequado ao tipo de fenômeno a ser medido. No caso como o fenômeno de interesse é a força longitudinal tem-se as seguintes relações:

No caso em estudo as forças atuantes de interesse são normais, ou seja forças de tração ou compressão. E a tensão originada dessa força é dada por:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (14)$$

onde:

σ : tensão [Pa]

F: força [N]

A: área da seção transversal [m²]

Sendo o material linearmente elástico, tem-se uma relação linear na curva tensão-deformação na região de deformação elástica. Essa relação é dada pelo módulo de elasticidade do material.

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (15)$$

onde:

ε : deformação [m/m]

E: módulo de elasticidade [Pa]

O método utilizado para a medição da deformação parte do princípio da medição relativa de variações de comprimento.

Sendo a variação de comprimento dada por:

$$\Delta l = l - l_0 \quad (16)$$

onde:

l: comprimento de uma seção

l_0 :comprimento de referência ou comprimento original

Tem-se então que a variação relativa de comprimento, ε , é dada por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (17)$$

A medida ε também é definida como deformação, ou pela ISO 31 "strain".

A unidade utilizada para deformação é então:

$$(\varepsilon) = \left\{ \frac{\Delta l}{l_0} \right\} \left[\frac{m}{m} \right] \quad (18)$$

Ou seja é adimensional. Porém como a medida de Δl é muito pequena geralmente se utiliza a unidade de μm , então, tem-se ε em " $\mu\varepsilon$ ", ou seja microstrains.

Portanto uma maneira de se obter a força seria medindo a deformação, o sensor utilizado para esse tipo de medição é o extensômetro.

Para a seleção do extensômetro adequado a medição desejada deve-se seguir algumas exigências. A primeira é a de que a medição deve ter objetivos definidos e que suas condições de contorno devem ser conhecidas. A segunda é a de que as características do extensômetro devem ser conhecidas.

Se a maior parte das condições de trabalho que afetam a medição são conhecidas então resultados imprevisíveis podem ser minimizados.

A cadeia de medidas com a utilização de extensômetros é simples e consiste basicamente de quatro elementos.

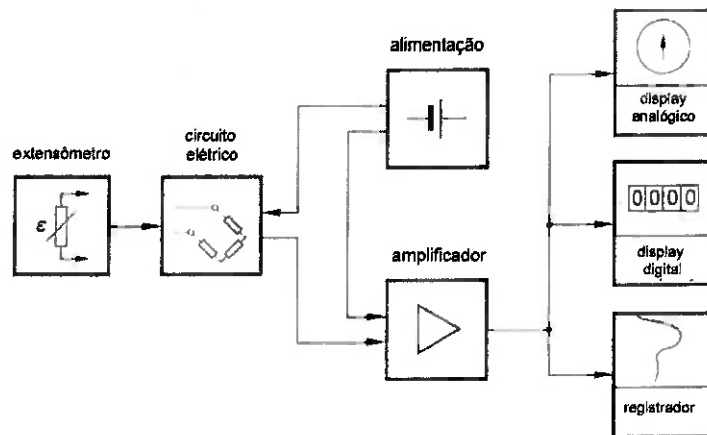


Figura 36 – cadeia de medidas utilizando um extensômetro

O primeiro elemento é o próprio sensor, o extensômetro, que converte a deformação mecânica em uma variação da resistência elétrica.

O segundo elemento é o circuito de medição, a ponte de Wheatstone, montado de acordo com a necessidade de medição.

Esses dois elementos são passivos fisicamente e precisam de uma alimentação externa para excitá-los. Geralmente, utiliza-se uma alimentação de corrente contínua.

O terceiro componente é o amplificador, que introduzirá um ganho no sistema suficiente para realizar-se a sua medição.

O quarto componente é responsável pela saída do sinal. Ele converte o sinal de saída do amplificador de forma que o mesmo possa ser armazenado pelo registrador, ou pelo mostrador.

6.5.1.1. Características do Extensômetro

Existem diversos tipos de extensômetros: resistência elétrica metálica, semicondutores, filmes finos depositados por vapor, capacitivos, piezoelétricos, fotoelásticos e mecânicos.

Para a seleção do tipo de extensômetro a ser utilizado deve-se conhecer as características dos mesmos.

Extensômetros podem ser utilizados tanto para análises experimentais de tensões ou para construção de transdutores. Existem tipos específicos para cada utilização.

Para o caso em estudo, o extensômetro utilizado foi o de resistência elétrica devido a sua relação entre variação da resistência elétrica e a variação de deformação mecânica.

O extensômetro deve seguir alguns requisitos. Seu tamanho deve ser reduzido, para assim obter-se as medidas de deformação o mais pontual possível. O extensômetro também não deve apresentar rigidez suficiente para interferir na peça, de forma que haja perfeita reprodução do fenômeno em estudo, e ainda, apresentar linearidade, estabilidade e repetibilidade.

As características geométricas importantes do gage podem ser observadas na Figura 37, onde observa-se a base (a), que é a película isolante onde se aplica o filme metálico, a grade de medidas (b), que é o file metálico em si, as conexões (c) e o comprimento efetivo (d), que é o comprimento de uma das linhas da resistência elétrica da grade.

Qualquer condutor elétrico altera sua resistência elétrica devido a tensões mecânicas. Essa alteração se deve à deformação do condutor e a uma alteração na resistividade do material resultante de alterações microestruturais.

Define-se então o fator de sensibilidade do extensômetro que é dado por:

$$k = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} \quad (19)$$

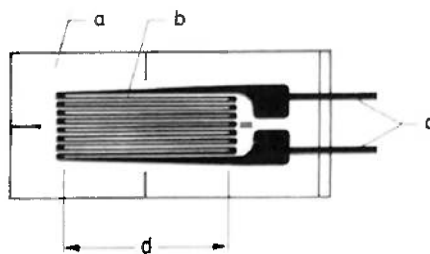


Figura 37 - Características geométricas de um extensômetro elétrico

6.5.2. A Ponte de Wheatstone

A ponte de Wheatstone pode ser utilizada para determinar-se o valor absoluto de uma resistência comparando-a com um valor conhecido, ou para determinar-se mudanças relativas da resistência.

O princípio de funcionamento se baseia no diagrama do circuito da ponte de Wheatstone.

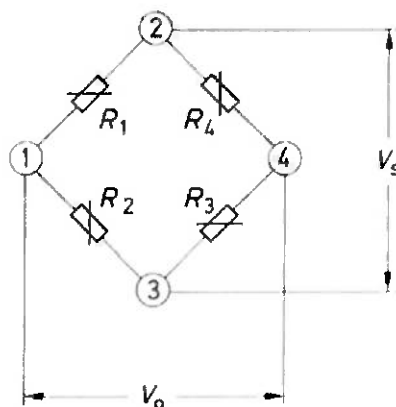


Figura 38 –Circuito da ponte de Wheatstone

Quando uma voltagem é aplicada na ponte nos pontos 2 e 3, então a mesma é dividida em duas metades de ponte: R1 ,R2 e R3 e R4, como uma razão das correspondentes resistências.

Para excitar a ponte de Wheatstone pode-se utilizar tanto corrente contínua como alternada, a escolha vai depender do sistema de amplificação utilizado na saída da ponte.

Considerando-se que a resistência da fonte de alimentação é mínima, e que a resistência interna do instrumento de medição da voltagem de saída da ponte é muito alta e portanto não causa cargas residuais no circuito da ponte, tem-se a seguinte formulação:

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{R_1 * R_3 - R_2 * R_4}{(R_1 + R_2) * (R_3 + R_4)} \quad (20)$$

Quando todas as resistências da ponte têm o mesmo valor , ou quando as razões entre as resistências nas duas metades das pontes são iguais, ou seja

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (21)$$

Tem-se que :

$$\frac{V_0}{V_s} = 0 \quad (22)$$

E diz-se que a ponte está balanceada.

Então, supondo-se válida a eq.(21), tem-se a seguinte formulação para as variações de resistência:

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{1}{4} * \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (23)$$

Utilizando-se a relação:

$$\frac{\Delta R}{R} = k * \varepsilon \quad (24)$$

Tem-se que:

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{k}{4} * (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (25)$$

Geralmente, o valor de k é 2.

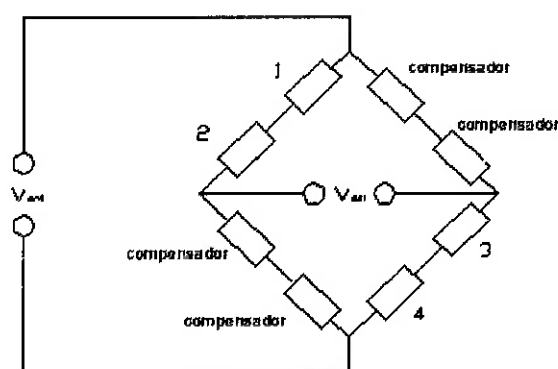
6.5.3. Configuração Adequada da Instrumentação

A partir dos resultados obtidos em 6.4, observou-se que a melhor configuração a ser utilizada seria a soma das resistências dos 4 extensômetros. Seria possível utilizar como compensadores outros 4 extensômetros posicionados de forma a sofrerem a ação da tensão na direção z. Analisou-se então o comportamento dessas tensões.

Tabela 4 - Resultados do modelo com furo para instrumentação para tensão em z

TENSÃO NA DIREÇÃO Z							
Engate com furação para instrumentação posição no engate				força atuante			
X (in)	Y	Z (in)		Tração (Mpa)	Compressão (Mpa)	MY (Mpa)	MZ (Mpa)
17,875	0,2435	-0,1851		-1,0940	1,0291	-0,1493	0,1102
16,125	0,1890	-0,1851		-1,1242	1,0425	-0,1575	0,1159
17,875	-6,8435	-0,1851		-0,9564	0,9218	0,0571	-0,1190
16,125	-6,7890	-0,1851		-1,0330	0,9624	-0,0371	-0,1174
			somas :	-4,2076	3,9558	-0,2868	-0,0103
						6,82	0,24
Diferença entre tração e compressão se forem utilizados os 8 extensômetros							
Tração:		15,70					
Compressão:		-15,14					
Diferença:		3,56 %					
Influência dos momentos se utilizados os 8 extensômetros:							
MY	0,47 %						
MZ	0,07 %						

Observa-se que, embora a utilização de 8 extensômetros aumente a sensibilidade do circuito, essa utilização acrescentará uma maior influência dos momentos na leitura e uma variação maior entre as leituras de tração e compressão. Por isso opta-se pela utilização de 4 extensômetros ativos na direção de x e de 4 compensadores que não estarão fisicamente conectados ao corpo do engate, chamados de dummy. Então, tem-se o seguinte circuito da ponte de Wheatstone:

**Figura 39 – Circuito da Ponte de Wheatstone**

Quanto ao sensor, devido à disponibilidade no mercado pode-se utilizar um extensômetro elétrico. Conforme verificado na distribuição de tensões no furo para instrumentação, a dispersão de tensões não é muito grande em um raio em torno de 6

mm, portanto, um extensômetro com comprimento útil em torno de 5 mm é suficiente para se obter um bom resultado, já que a leitura resultante é a média da leitura ao longo do comprimento útil.

7. COMENTÁRIOS

Algumas dificuldades foram encontradas durante o decorrer desse estudo e serão expostas a seguir.

Em relação ao modelamento geométrico, teve-se que obter algumas das dimensões diretamente do engate, pois na bibliografia utilizada apenas as cotas principais são apresentadas.

Quanto ao programa utilizado para o cálculo numérico de elementos finitos, constatou-se algumas restrições quanto ao uso:

Devido ao fato do programa só aplicar as condições de contorno sobre superfícies, teve-se que se criar superfícies no modelo em locais determinados de modo a se obter o carregamento desejado. Quanto às restrições, algumas tiveram que ser analisadas para que não se aplicasse sobre superfícies indesejáveis, porém em alguns casos isso não foi possível, embora em termos de distribuição de tensão na região de interesse, essas variações não causaram distúrbios significativos.

Ainda, para se fazer um bom uso do programa, ou seja obter-se bons resultados otimizando o custo computacional, optou-se por um refinamento dos elementos da malha no local de maior interesse, ao invés de diminuir globalmente o tamanho dos elementos. Esse refinamento foi escolhido ponderando-se, além da disponibilidade computacional, os efeitos de transição entre elementos e o tamanho físico do extensômetro.

8. CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados obtidos pode-se apresentar as seguintes conclusões:

Identificou-se as principais características funcionais do elemento sensor, no caso o engate.

Foi realizado um projeto mecânico para o elemento sensor utilizando o cálculo das tensões pelo método dos elementos finitos.

Devido à distribuição irregular das tensões nas faces superior e inferior, a melhor posição para se realizar a instrumentação é nas faces laterais do engate (ao longo do eixo y).

No engate tipo F, devido à irregularidade de distribuição de tensões ao longo dessas faces laterais, deve-se localizar a instrumentação entre a cabeça do engate e o oblongo, local de menor variação de tensões.

Os cálculos das tensões considerando aspectos relativos à instrumentação, como o furo, demonstrou que a diferença entre as tensões de tração e compressão é menor que 3%. E que a influência dos momentos na medição é menor que 1%.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] BEER ,F.P, e RUSSELL Johnston Jr - **Mecânica vetorial para engenheiros . 5.** ed. São Paulo : Mcgraw Hill do Brasil, 1991.
- [2] GIACAGLIA, Giorgio E O. - **Mecânica geral .10.** ed. Rio de Janeiro : Campus, 1982. 587 p.
- [3] HOFFMANN, Karl – **An Introduction to Measurements using Strain Gages.** Hottinger Baldwin Messtechnik, Darmstadt, 1989.
- [4] MARTINS, R. M., Endo, M. T. - **Trabalho 44 - Manutenção do conjunto de acoplamento de vagões :** ABNT Comitê Brasileiro do equipamento e material ferroviário - CB- 6 Subcomitê brasileiro de estudos gerais - SCB 6:02 I ENMAT - Encontro Nacional Do Material Rodante -. Cobrasma S.A. junho 1986.
- [5] POPOV, Egor .P - **Introdução à mecânica dos sólidos .**São Paulo : Edgard Blücher , 1978
- [6] SPYRAKOS, Constantine Christoforos. - **Finite element modeling in engineering practice :includes examples with ALGOR .** Morgantown, WV : West Virginia University Press, c1994.
- [7] The Association of American railroads - **Manual of Standards and Recommended Practices: section B: couplers and freight car draft components.** 1978
- [8] IPT – **Medida de Tensões na CVRD – Calibração e desenvolvimento da haste de ligação .** Relatório 39.399 ,1999.