

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CALIBRAÇÃO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE TESTE DE IMPACTO ENTRE UM PROJÉTIL
E O TETO DE UMA RETROESCAVADEIRA

por

Mateus Haubert

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2011



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

CALIBRAÇÃO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE TESTE DE IMPACTO ENTRE UM PROJÉTIL
E O TETO DE UMA RETROESCAVADEIRA

por

Mateus Haubert

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Rogério José Marczak

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Edson Hikaro Aseka

Prof. Dr. Jun Sérgio Ono Fonseca

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, 16 de Novembro de 2011.

dedico este trabalho a minha família e à natureza;
neste contexto sou apenas uma turbina,
eles são a fonte de toda a energia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço

Aos meus pais, *Vitor Nestor Haubert e Eronita Haubert*, e irmãs *Caroline Haubert Porcher e Gabriela Haubert*, pelo apoio incondicional, carinho e conforto durante todo o meu percurso;

Ao meu professor orientador e amigo, *Prof. Dr. Rogério José Marczak*, por me guiar durante este trabalho, com conselhos e ensinamentos que foram além da Engenharia Mecânica;

Às famílias *Lemke, Roth e Porcher*, por me acolherem sempre com grande carinho, conduzindo-me ao lugar que me encontro hoje;

A todos os meus amigos, em especial *Anderson Andrighetti Letti, Rodrigo Brenner Miguel e Ronan Spanevello Olivier*, pelos momentos e sabedoria compartilhados, não concluiria esta etapa sem o seu apoio;

À empresa AGCO, pela oportunidade de realização deste trabalho;

Ao Gmap, em especial ao *Antônio Droescher Sandri e Tales de Vargas Lisboa*, pelo conhecimento compartilhado e auxílio constante;

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo ensino público e de qualidade.

"Um homem precisa viajar. Por sua conta, não por meio de histórias, imagens, livros ou tv. Precisa viajar por si, com seus olhos e pés, para entender o que é seu. Para um dia plantar as suas árvores e dar-lhes valor. Conhecer o frio para desfrutar o calor - e o oposto. Sentir a distância e o desabrigo para estar bem sob o próprio teto. Um homem precisa viajar para lugares que não conhece para quebrar essa arrogância que nos faz ver o mundo como o imaginamos, e não simplesmente como é ou pode ser; que nos faz professores e doutores do que não vimos, quando deveríamos ser alunos, e simplesmente ir ver."

Amyr Klink

HAUBERT, M. **Calibração de uma simulação numérica de teste de impacto entre um projétil e o teto de uma retroescavadeira**. 2011. 17. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

Diante do alto custo de protótipos e testes experimentais, os métodos numéricos se mostram uma alternativa robusta e eficiente para o desenvolvimento e otimização de produtos. Este estudo apresenta a calibração de uma análise pelo método de elementos finitos de um teste de impacto de baixa velocidade entre um projétil e o teto de uma retroescavadeira. O problema possui comportamento altamente não linear por apresentar grandes deslocamentos, deformações plásticas, contato e componentes hiperelásticos. Nesta análise, o deslocamento relativo vertical do ponto onde ocorre o impacto no teto foi comparado com os dados obtidos no teste experimental realizado conforme a norma ISO-3449:2005. Diante da não concordância entre os resultados numéricos e experimentais realizou-se uma análise de sensibilidade dos resultados em relação a quatro variáveis do problema: tensão de escoamento; módulo tangente do material; e posição do impacto no teto (ao longo dos eixos x e z). Com isso foi possível a definição das duas variáveis mais influentes, que, quando alteradas através de um procedimento de estimação de parâmetros, permitiram que o modelo numérico fornecesse resultados mais próximos dos experimentais (calibração). O modelo numérico, então calibrado, passou a representar melhor o fenômeno, possibilitando a análise de outras situações de carregamento com maior fidelidade.

PALAVRAS-CHAVE: calibração de modelos, análise de sensibilidade, impacto, método de elementos finitos.

HAUBERT, M. **Numerical Simulation Updating of an Impact Test Between a Projectile and a Bulldozer Tractor Roof**. 2011. 17. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

Given the high cost of prototyping and experimental testing, numerical methods have become a robust and efficient alternative for product development and optimization. This study presents the calibration of a finite element analysis of a low speed impact test between a projectile and a bulldozer tractor roof. The problem is highly nonlinear one, presenting large displacements, plastic strain, contact and hyperelastic components. In this analysis the relative transverse displacement of the impact area of the roof was compared to data obtained from experimental test performed according to ISO-3449:2005. Since the numerical and experimental results have not agreed very well, a sensitivity analysis of the results was carried out regarding four variables: yield stress, tangent modulus of the material and impact's location at the roof (along x and z axes). The two most sensitive variables were used to update the numerical model, which generated numerical results in very good agreement to the experimental ones. The updated numerical model now is a better representation of the physical model, allowing the analysis of other load cases with more accuracy and confidence.

KEYWORDS: model's calibration, sensitivity analysis, impact, finite element method.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	1
2. DESCRIÇÃO DO PRODUTO	1
3. ENSAIO EXPERIMENTAL	3
4. MODELAGEM COMPUTACIONAL	8
5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	10
6. CALIBRAÇÃO	11
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
8. CONCLUSÕES	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
Apêndice I	16
Apêndice II	16
Apêndice III	17

1. INTRODUÇÃO

O grande número de protótipos e testes experimentais necessários em empresas que trabalham com o desenvolvimento de produtos representa um desafio nos dias atuais devido ao seu alto custo para as organizações, visto que uma peça protótipo custa em média dez vezes o valor desta mesma peça fabricada em série e gera sucatas em excesso.

Diante disto as simulações numéricas se mostram uma maneira muito eficiente de reduzir estes gastos e aplicar melhorias no produto, considerando que pode nos levar à peças mais eficientes e de menor custo. O método de elementos finitos (FEM), em particular, tem se difundido amplamente nas últimas décadas, se mostrando como uma das mais notáveis metodologias dentro da análise estrutural. Ele é parte essencial em trabalhos de otimização, onde se busca o resultado ótimo através de uma análise de sensibilidade das variáveis em questão.

Este trabalho concentra-se na calibração de uma simulação de impacto entre um projétil e o teto de uma retroescavadeira, conforme especificado pela norma ISO-3449:2005, para tal simulação utilizou-se o método de elementos finitos do módulo de integração explícita LS-Dyna dentro do software comercial Ansys. Para alcançar a calibração realizou-se uma análise de sensibilidade do módulo tangente e tensão de escoamento do material utilizado na fabricação do teto e ainda a posição do impacto. Os dados da simulação foram comparados com dados experimentais, deixando o modelo numérico apto a ser aplicado em outras situações de projeto.

1.1 OBJETIVOS

- Realizar uma simulação numérica pelo método de elementos finitos de um problema dinâmico, com impacto, grandes deslocamentos e deformações plásticas;
- Fazer uma análise de sensibilidade do problema em relação a algumas variáveis de projeto, selecionando as mais importantes;
- Calibrar a simulação com os dados obtidos em teste experimental e comparar os resultados;

2. DESCRIÇÃO DO PRODUTO

O teste realiza-se no teto de uma retroescavadeira modelo MF96, que é utilizada principalmente em obras de pavimentação e construção civil. O teto é composto por uma cobertura, quatro reforços e dois suportes, que são apoiados em coxins elastoméricos, conforme é possível identificar na figura 2.1.

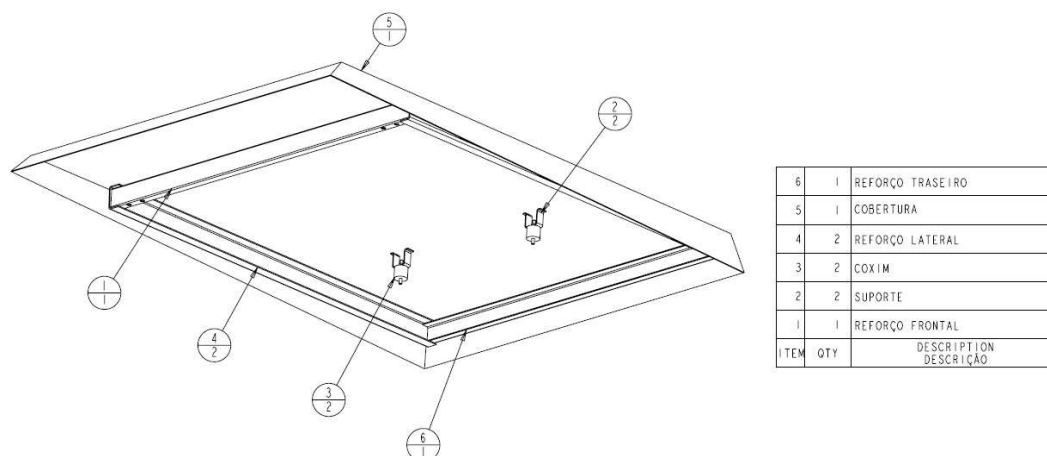


Figura 2.1. Identificação dos componentes do teto.

O teto e o reforço frontal possuem uma espessura de 1,9mm, enquanto os outros reforços tem 3mm e o suporte possui 2,5mm, sendo todos eles fabricados a partir de chapas de aço baixo carbono SAE 1010 laminadas a quente. O reforço frontal é apoiado na estrutura frontal do veículo enquanto os coxins são fixados na estrutura de proteção contra capotagem, um modelo representativo do teto montado na estrutura do veículo pode ser visualizado na figura 2.2.



Figura 2.2. Modelo do teto montado no veículo.

3. ENSAIO EXPERIMENTAL

O ensaio experimental foi realizado conforme a norma ISO-3449:2005, visando atender ao nível I da mesma norma, o qual define que o teto deve fornecer proteção contra o impacto de um objeto com a ponta esférica em uma queda que desenvolva uma energia de 1365J. O objetivo deste teste é garantir a segurança do operador em caso de queda de algum objeto durante a sua operação, o deslocamento máximo da estrutura é definido através da norma ISO-3164:1995 que especifica o volume limitante de deflexão, que consiste em um volume semelhante ao de uma pessoa de grande porte, sentada e utilizando capacete de proteção.

O projétil utilizado possui 45kg, conforme recomendado pela norma, e a altura de queda de 3,1m foi obtida a partir da energia potencial:

$$E = m \cdot g \cdot h$$

onde E = energia [J], m = massa [kg], g = aceleração da gravidade [m/s^2], h = altura [m].

Para que o projétil tivesse uma queda mais vertical possível e sem movimento de rotação utilizou-se um sistema de liberação com acoplamento magnético. O teto foi montado em uma máquina sucateada e apenas com os principais componentes estruturais, conforme a norma permite por identificar que isto não interfere nos resultados. O veículo com o teto, o equipamento de acoplamento do projétil e a estrutura que define o volume limitante de deflexão podem ser identificados na figura 3.1.



Figura 3.1. Teto, volume limitante de deflexão e sistema de liberação do projétil.

Após a conclusão do teste, utilizou-se o equipamento Bendix 72A com precisão de 0,1mm para se realizar a medição. Para tal, definiu-se o ponto de impacto do projétil e traçou-se duas linhas ortogonais paralelas as bordas do teto que passassem por este ponto, a mesa de apoio do teto e o ponto de impacto foram usados como referência e então obteve-se o perfil do teto deformado bem como o deslocamento e as coordenadas do ponto de impacto. Na figura 3.2 pode-se visualizar o equipamento Bendix realizando a medição assim como o sistema de coordenadas adotado.



Figura 3.2. Equipamento utilizado na medição do teto.

Para efeitos de calibração da simulação utilizou-se apenas o perfil transversal de deformação do teto, ou seja, apenas o perfil que vai de uma lateral a outra ao longo do eixo z. As coordenadas dos pontos medidos neste perfil podem ser visualizadas na tabela 3.1, bem como o perfil da estrutura deformada na figura 3.3. Os dados utilizados para comparação com o modelo numérico são os deslocamentos verticais relativos entre o ponto 08 e os pontos 01 e 15, que conforme os dados apresentados são, respectivamente, 38,9mm e 40,7mm.

Tabela 3.1. Coordenadas dos pontos medidos no teto deformado

Ponto	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
01	0	92,6	605
02	0	83,2	455
03	0	76,6	305
04	0	72,8	155
05	0	69,6	105
06	0	63,5	55
07	0	57,7	30
08	0	53,7	0
09	0	56,8	-25
10	0	63,0	-50
11	0	69,6	-100
12	0	72,4	-150
13	0	79,4	-300
14	0	89,0	-450
15	0	94,4	-527

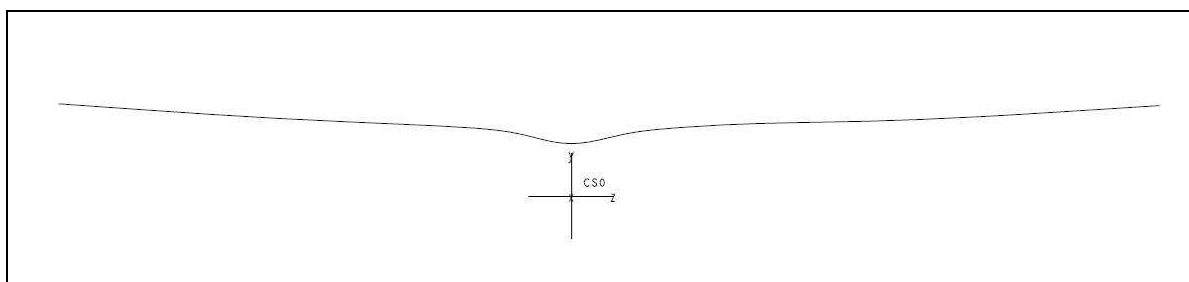


Figura 3.3. Perfil da deformação do teto ao longo do eixo z.

4. MODELAGEM COMPUTACIONAL

Para iniciar este estudo, utilizou-se severas simplificações no modelo e no método, com intuito de apenas inserir os principais parâmetros e verificar o comportamento da análise. Após isso, gradativamente, tornou-se a simulação mais complexa, principalmente em termos do modelo geométrico, que passou a ter todos os seus componentes estruturais além de ligações que representam as soldas aplicadas entre os componentes e também materiais com comportamento não linear.

Esta análise se mostra especialmente complexa por apresentar todos os tipos de não linearidades, que conforme Bathe, 1982, podem ser divididas em três grupos distintos descritos a seguir:

- Não linearidade geométrica, causada por grandes deslocamentos;
- Não linearidade do material, causada por regiões de deformações plásticas;
- Não linearidade das condições de contorno, causada pela ação do contato;

Tanto o teto como o projétil foram modelados no software comercial Pro/ENGINEER e exportados no formato IGES para o software também comercial Ansys, cuja documentação técnica é encontrada no Ansys Ls-Dyna User's Guide, 2009. Os componentes do teto foram exportados como casca, enquanto o projétil como sólido, visando já nesta etapa o tipo de elemento que seria utilizado em cada componente.

O Ansys foi utilizado para realizar-se o pré e pós processamento, enquanto o solver utilizado foi o LS-Dyna, que utiliza o método de integração numérica explícita com integração no tempo por diferenças centrais. Segundo Sánchez, 2001, o método explícito apresenta como principais vantagens a robustez, menor memória requerida, possibilidade de paralelização, bom desempenho para instabilidades de rigidez e se mostra mais rápido que o algoritmo estático implícito. Como desvantagens são citadas a convergência condicional e os pequenos passos de tempo necessários.

Os passos de tempo no LS-Dyna são obtidos a partir de uma verificação de todos os elementos e materiais utilizados na análise, de onde é possível encontrar-se as variáveis necessárias para a resolução da equação 4.1, conforme o Ansys LS-Dyna User's Guide, 2009, onde o valor de 0,9 é um coeficiente de segurança adotado pelo software.

$$\Delta t = 0,9 \cdot \frac{l}{c} \quad (4.1)$$

onde Δt = passo de tempo, l = comprimento característico do elemento, c = velocidade de propagação de onda no material

Para reduzir o tempo de simulação, o projétil, que no teste experimental é lançado a uma altura de 3,1m do teto, no método numérico saiu a uma altura de 0,1m com uma velocidade inicial de 7,672m/s. Para isto foi desprezada qualquer dissipação de energia durante a queda, considerando assim um movimento retilíneo uniformemente variado, sendo a velocidade inicial facilmente obtida a partir da equação de Torricelli:

$$v^2 = v_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta y \quad (4.2)$$

onde, v = velocidade [m/s], v_0 = velocidade inicial [m/s], a = aceleração [m/s²], Δy = deslocamento [m]

Outro passo para a realização desta análise foi a seleção dos elementos. Para os componentes do teto, exceto os coxins, utilizaram-se elementos de casca SHELL163, evitando assim uma malha com um número muito elevado de elementos que seria gerada no caso de elementos sólidos. Este refinamento se daria pela necessidade de ter-se mais de um elemento ao longo da espessura, o que influenciaria no tamanho dos elementos em todas as direções para evitar-se erros causados por uma razão de aspecto elevada. Conforme o Ansys Ls-Dyna User's Guide, 2009, o elemento SHELL163 é composto por três ou quatro nós com doze graus de liberdade em cada nó, sendo eles translação, velocidade e aceleração nas direções x, y e z e rotação em torno dos eixos x, y e z. A formulação do elemento utilizada foi a de Belytschko-Tsay com a regra de quadratura de Gauss. A malha gerada é composta em sua maioria por elementos de quatro nós, no entanto alguns elementos de três nós são necessários em virtude do software não conseguir gerar uma malha somente com elementos quadriláteros na geometria do teto.

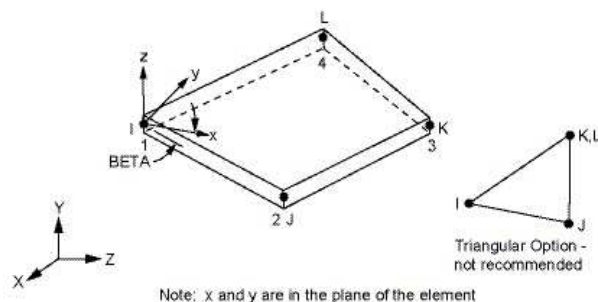


Figura 4.1. Elemento SHELL163 utilizado nos componentes do teto.

Já o projétil é composto por elementos sólidos SOLID164, com sua malha formada totalmente por elementos tetraédricos de quatro nós, tendo nove graus de liberdade em cada nó, sendo eles translação, velocidade e aceleração, todos nas direções x , y e z . Não deu-se muita importância para a malha do projétil pois o mesmo foi considerado rígido na análise, devido à sua rigidez ser muito mais elevada do que a do teto, sendo assim a única preocupação com a malha no sentido de manter-se a geometria do componente.

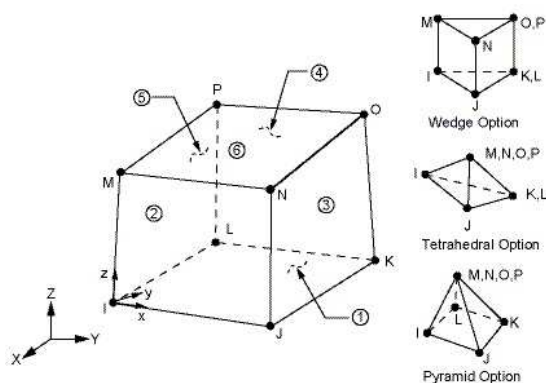


Figura 4.2. Elemento SOLID164 utilizado no projétil.

O terceiro elemento utilizado foi o COMBI165, que consiste em um elemento de ligação unidimensional utilizado para representar-se molas e amortecedores. Ele é composto por dois nós e no caso de molas translacionais cada nó possui nove graus de liberdade que são deslocamento, velocidade e aceleração nas direções x , y e z . Este elemento foi utilizado para representar-se os coxins, onde dois nós ligam dois elementos sobrepostos, um representando a mola e outro o amortecedor. Ele também nos permite utilizar rigidez e amortecimento não lineares, dados que são vistos mais profundamente no detalhamento do material do coxim.

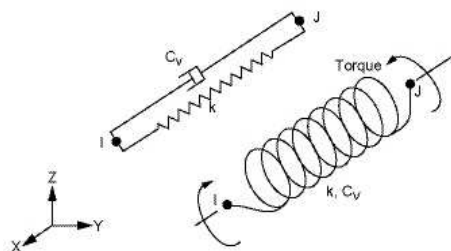


Figura 4.3. Elemento COMBI165 utilizado para representar os coxins.

Conforme citado no capítulo 2, os componentes metálicos do teto foram fabricados a partir de aço SAE 1010 laminado a quente, em www.matweb.com obteve-se a tensão de escoamento deste material, o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, tensão de ruptura e a deformação no momento da ruptura. Para o método numérico utilizou-se um

material bilinear isotrópico, onde a partir dos dados citados acima pôde-se construir a curva de tensão x deformação e calcular-se os dados de entrada do software que são apresentados na tabela 4.1. Sabe-se que estes valores podem variar consideravelmente entre diferentes amostras deste aço, bem como utilizar-se a tensão e deformação na ruptura podem nos levar a um valor abaixo do verdadeiro módulo tangente do material na região logo após o escoamento, onde espera-se encontrar a maior parte das deformações plásticas, no entanto alguns destes dados serão reavaliados no capítulo 5 de análise de sensibilidade.

Tabela 4.1. Propriedades do material utilizado no teto

Propriedade	Valor
Densidade [kg/m ³]	7,86E3
Modulo de Elasticidade [Pa]	2,1E11
Coefficiente de Poisson	0,292
Tensão de escoamento [Pa]	180E6
Modulo tangente [Pa]	520E6

No projétil utilizaram-se os mesmos valores das propriedades do teto, com exceção da tensão de escoamento e do módulo tangente por se tratar de um material linear. Como seu material foi definido rígido, a propriedade que se faz interessante é a densidade, onde o software permite verificar sua massa e encontra-se 45,3kg, um valor bem aproximado dos 45,1kg que é a massa do projétil real.

Por último definiu-se o material dos coxins, que são fabricados em material elastomérico. Conforme Gent e Scott, 1992, estes materiais possuem um comportamento intermediário entre sólidos e líquidos, com propriedades que se comportam entre a Lei de Hooke (que descreve o comportamento de sólidos lineares elásticos) e a Lei de Newton (que descreve líquidos viscosos ideais), sendo assim chamados de materiais viscoelásticos.

Segundo Sommer e Yeoh, 1992, este comportamento intermediário se mostra ainda mais evidente e complexo em aplicações dinâmicas, conforme é o caso desta análise. No entanto os autores sugerem que este componente pode ser aproximado por um sistema composto por uma mola e um amortecedor.

A propriedade de maior interesse nesta análise foi a curva de força x deslocamento durante a compressão da borracha por identificar-se que esta influenciaria significativamente nos resultados da análise. Para se obter esta curva foi realizado um ensaio de compressão dos coxins, em um equipamento da marca Instron. O deslocamento foi obtido por um relógio comparador Mitutoyo com precisão de 0,01mm enquanto a força foi medida através de um anel dinamométrico montado em série com a amostra. Este é um anel classe III, ou seja, com um erro máximo de 3% conforme o Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1994.



Figura 4.4. Ensaio de compressão dos coxins

A curva força × deslocamento obtida no ensaio foi espelhada para o quadrante de forças e deslocamentos positivos, assumindo assim o mesmo comportamento quando submetida à tração. Embora se saiba que este material apresenta uma rigidez menor quando está sob tração, a hipótese de simetria da curva foi adotada por considerar-se que no momento em que a borracha está sofrendo esforços trativos o projétil já não se encontra mais em contato com o teto, entendendo-se assim que esta suposição não interfere nos resultados. Esta curva espelhada foi associada à mola utilizada na simulação e está ilustrada na figura 4.5.

No ensaio a amostra foi ensaiada até o limite de 4189N, onde a partir deste valor os resultados do ensaio sofriam uma grande influencia do coeficiente de relaxação da borracha, no entanto para a simulação a curva foi extrapolada para uma força de 10910N.

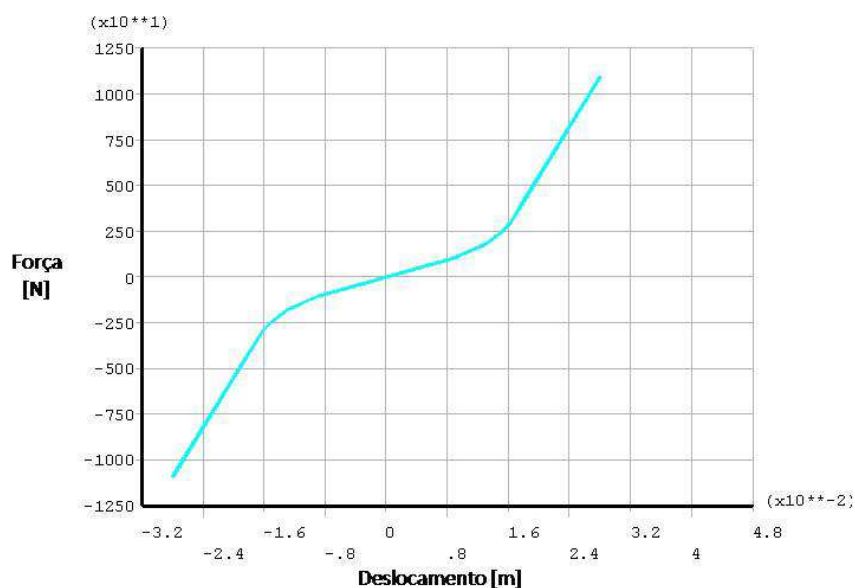


Figura 4.5. Curva de força por deslocamento da mola aplicada na análise.

Já o amortecimento associado aos coxins foi obtido a partir de uma análise das frequências naturais do teto. Segundo Barbetti, 2005, o fator de amortecimento da borracha natural varia entre 0,01 e 0,08, podendo obter-se o seu coeficiente de amortecimento a partir deste dado, da massa e da frequência natural da estrutura.

$$C = \zeta \cdot 2 \cdot m \cdot \omega_n \quad (4.3)$$

onde C = coeficiente de amortecimento, ζ = fator de amortecimento, m = massa e ω_n = frequência natural.

Através de uma análise modal no Ansys identificou-se a primeira frequência natural da estrutura como sendo de 14,21Hz enquanto sua massa é de 52,57kg. No entanto utilizou-se um fator de amortecimento da borracha de 0,2, na busca de atingir uma estabilização da estrutura mais rapidamente. Com estes valores aplicados na equação 4.3 temos um coeficiente de amortecimento de aproximadamente 300 N.s/m. Esta propriedade foi associada a um amortecedor ligado em paralelo com a mola descrita acima, que também utiliza o elemento COMBI165.

Para efeitos de simulação, desprezou-se a flexibilidade do restante do veículo, restringindo o deslocamento dos nós inferiores das molas e da parte inferior da barra frontal em todas as direções. Os reforços laterais se encontram em contato com a cobertura, sendo assim, as áreas superiores das barras foram fundidas na área da cobertura, considerando-se nestas áreas uma espessura correspondente ao somatório das duas chapas. Os reforços

frontal e traseiro foram ligados a cobertura e aos reforços laterais com ligações rígidas entre os nós nas regiões onde os mesmos possuem soldas. Estas ligações rígidas fazem com que os nós ligados não possuam deslocamento relativo entre eles em nenhuma direção.

Por ultimo, nesta análise, definiu-se o contato entre o projétil e o teto. Para isso utilizou-se da opção Automatic Surface To Surface (ASTS) disponível no LS-DYNA, o objeto de contato é o projétil enquanto o alvo do contato é o teto, uma vez que o teto foi engastado e o projétil recebeu o vetor de aceleração atribuído a seus nós. Os parâmetros definidos no ASTS foram os coeficientes de atrito estático e dinâmico. Estes valores foram determinados conforme Stoeterau, 2004, o qual determina estes coeficientes para o contato entre corpos de aço doce. Não realizaram-se estudos mais aprofundados em relação ao assunto por assumir-se que o mesmo interferiria significativamente apenas a partir do segundo impacto que não foi analisado neste estudo.

Tabela 4.2. Coeficientes de atrito entre o projétil e o teto.

Coeficiente	Valor
Coeficiente de atrito estático	0,74
Coeficiente de atrito dinâmico	0,57

5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Os resultados de análises preliminares diferiram razoavelmente dos dados obtidos experimentalmente. Isto era esperado pelo fato de diversos parâmetros da análise terem sido inseridos a partir de estimativas, além de possuírem dispersões estatísticas relativamente altas. Portanto, uma calibração do modelo de elementos finitos se fez necessária, elegendo inicialmente um número de variáveis que poderiam alterar os resultados numéricos. A fim de limitar o número de variáveis da calibração, realizou-se uma análise de sensibilidade do modelo numérico.

Conforme Choi e Kim, 2005, engenheiros simplificam problemas físicos em modelos matemáticos capazes de representar o problema físico com o nível desejado de precisão. Segundo eles o modelo matemático possui parâmetros que estão relacionados a parâmetros do problema físico. Eles citam ainda que a análise de sensibilidade diz respeito à relação entre as variáveis de design disponíveis ao engenheiro e a resposta estrutural determinada pelas leis da mecânica.

A análise de sensibilidade deste modelo não busca relacionar variáveis de design em busca de uma otimização, mas sim avaliar a sensibilidade do modelo numérico em relação a incertezas encontradas durante sua construção. Esta também é uma forma de compensar erros menos evidentes de natureza numérica ou inerentes ao MEF.

Inicialmente, definiram-se quatro variáveis a serem analisadas, que são a tensão de escoamento e o modulo tangente do material, bem como a posição do impacto nas direções dos eixos x e z. A escolha destas variáveis deu-se pelo fato de o material não ter sido ensaiado e seus dados obtido a partir da literatura, bem como pela incerteza relacionada ao real ponto de impacto do teste experimental.

Desta forma realizaram-se simulações onde estas quatro variáveis foram alteradas de forma independente e obteve-se o deslocamento na direção do eixo y do nó correspondente ao impacto em relação as bordas, por conveniência, definiu-se a parte do teto que possui valores negativos do eixo z como lado esquerdo e a parte positiva do eixo como lado direito. Os deslocamentos encontrados são apresentados na tabela 5.1, bem como a figura 5.1 nos ilustra o gráfico da função custo em relação aos parâmetros variados. A função custo é dada pela seguinte equação:

$$\psi = \sqrt{\left(\Delta u_{ye_{MEF}} - \Delta u_{ye_{EXP}}\right)^2 + \left(\Delta u_{yd_{MEF}} - \Delta u_{yd_{EXP}}\right)^2} \quad (5.1)$$

onde ψ = função custo, Δu_{y_e} = deslocamento relativo a borda esquerda, Δu_{y_d} = deslocamento relativo a borda direita, MEF = subíndice indicando dados obtidos pelo método de elementos finitos, EXP = subíndice indicando dados obtidos no teste experimental.

Tabela 5.1. Resultados da função custo nas simulações.

Tensão de Escoamento [MPa]	Módulo Tangente [MPa]	Posição Impacto Z [mm]	Posição Impacto X [mm]	$u_{y \text{ impacto}}$ [mm]	u_{y_d} [mm]	u_{y_e} [mm]	Δu_{y_d} [mm]	Δu_{y_e} [mm]	Função Custo
162	520	0	0	68,4	26,3	9,4	42,0	59,0	18,57
180	520	0	0	62,7	21,0	6,7	41,7	56,0	15,60
198	520	0	0	58,2	17,6	4,6	40,7	53,6	13,04
216	520	0	0	54,2	14,1	1,6	40,1	52,7	12,04
180	520	0	0	62,7	21,0	6,7	41,7	56,0	15,60
180	546	0	0	62,6	21,1	6,7	41,5	55,8	15,36
180	572	0	0	62,4	21,1	6,8	41,3	55,6	15,14
180	598	0	0	62,3	21,2	6,9	41,2	55,5	14,97
180	520	-10	0	64,9	24,1	7,0	40,8	57,9	17,34
180	520	0	0	62,7	21,0	6,7	41,7	56,0	15,60
180	520	10	0	61,0	19,2	7,1	41,9	53,9	13,53
180	520	0	-10	62,7	20,2	6,4	42,5	56,3	16,03
180	520	0	0	62,7	21,0	6,7	41,7	56,0	15,60
180	520	0	10	63,2	21,5	7,0	41,7	56,1	15,66

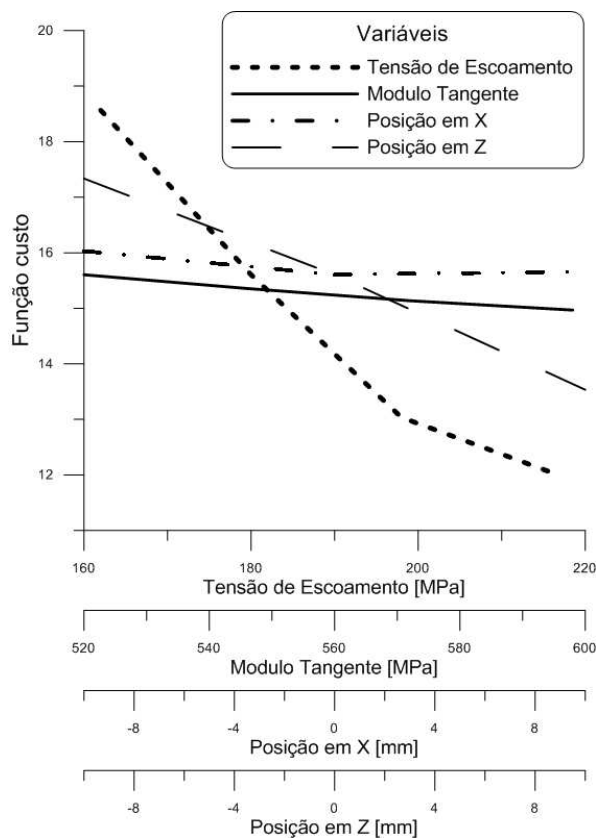


Figura 5.1. Gráfico da função custo em relação às variáveis de sensibilidade.

6. CALIBRAÇÃO

Com os dados obtidos na análise de sensibilidade, definiram-se duas variáveis com maior influência na função custo, que são a tensão de escoamento e a posição de impacto ao longo do eixo z. A partir disto realizou-se novas simulações, agora alterando estas duas variáveis simultaneamente para buscar-se a minimização da função custo.

Também a partir da análise de sensibilidade pôde-se determinar que aumentando a tensão de escoamento e alterando a posição do impacto na direção positiva do eixo z estaríamos indo ao encontro da minimização do erro.

Sendo assim, vinte e cinco novas análises foram realizadas, onde a tensão de escoamento variou a um passo de 10% em relação a tensão utilizada originalmente e a posição em z variou a um passo de 10mm. Com isso tem-se a tensão de escoamento entre 180Mpa e 252Mpa e a posição entre 0mm (posição considerada na primeira análise) e 40mm, sendo estes limites definidos arbitrariamente. Estas combinações de valores e seus resultados são apresentados na 'Tabela 6.1', onde a formulação utilizada na função custo é a mesma da análise de sensibilidade.

Tabela 6.1. Resultados das análises realizadas durante a calibração.

Análise	Tensão de Escoamento [MPa]	Posição do impacto em Z [mm]	$U_{y \text{ impacto}}$ [mm]	U_{yd} [mm]	U_{ye} [mm]	Δu_{yd} [mm]	Δu_{ye} [mm]	Função Custo
01	180	0	62,73	21,01	6,68	41,72	56,05	15,6041
02	180	10	61,04	19,17	7,14	41,87	53,90	13,5329
03	180	20	60,17	18,24	7,98	41,92	52,19	11,8769
04	180	30	59,60	16,49	8,92	43,12	50,68	10,8326
05	180	40	58,95	14,86	9,93	44,09	49,01	9,7996
06	198	0	58,24	17,59	4,62	40,65	53,62	13,0353
07	198	10	57,88	16,19	5,04	41,69	52,84	12,4571
08	198	20	56,60	14,76	5,36	41,85	51,24	10,9451
09	198	30	55,43	12,77	5,70	42,66	49,73	9,7855
10	198	40	54,09	10,89	6,25	43,20	47,84	8,3384
11	216	0	54,25	14,12	1,57	40,13	52,68	12,0428
12	216	10	53,32	12,34	1,57	40,97	51,74	11,2351
13	216	20	51,44	10,38	1,44	41,05	49,99	9,5382
14	216	30	49,01	7,98	2,03	41,03	46,98	6,6298
15	216	40	47,34	5,86	2,21	41,48	45,13	5,1247
16	234	0	47,92	10,49	1,73	37,44	46,19	5,6818
17	234	10	46,38	9,08	1,02	37,30	45,37	4,9340
18	234	20	44,08	6,91	0,92	37,17	43,16	3,0105
19	234	30	40,18	3,42	1,34	36,76	38,84	2,8402
20	234	40	40,45	2,05	0,57	38,40	39,88	0,9617
21	252	0	37,75	7,08	-3,27	30,67	41,02	8,2364
22	252	10	37,74	4,13	-3,49	33,61	41,24	5,3136
23	252	20	35,39	1,38	-3,72	34,00	39,11	5,1471
24	252	30	34,68	-0,59	-3,46	35,26	38,14	4,4452
25	252	40	34,85	-1,73	-3,04	36,59	37,90	3,6354

Com isto pôde-se gerar a figura 6.1 que representa uma superfície de resposta com os dois eixos do plano horizontal sendo formados pelas variáveis selecionadas para a calibração (tensão de escoamento e posição do impacto) enquanto o eixo vertical representa a função custo.

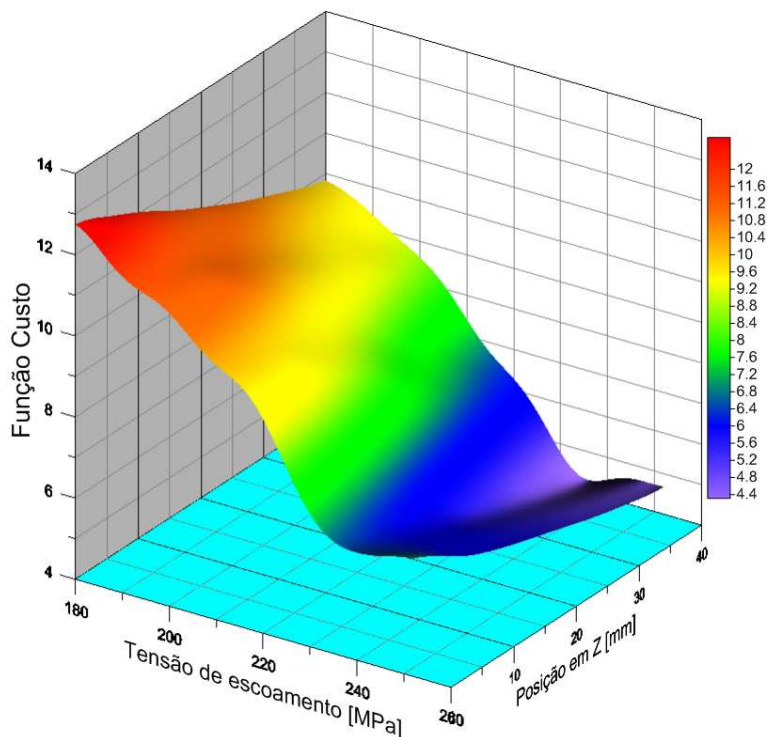


Figura 6.1. Gráfico da função custo em função das variáveis de sensibilidade.

8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme apresentado nos capítulos anteriores, a variável utilizada para averiguação dos resultados foi o deslocamento do nó localizado no ponto do impacto sofrido pelo teto em relação aos nós localizados nas bordas do teto, estando os três nós dispostos ao longo do plano formado pelos eixos z e y conforme o sistema de coordenadas indicado no capítulo 3. Esta escolha se deu pela dificuldade de instrumentação do ensaio experimental e pelo deslocamento se apresentar como uma melhor aproximação do que os dados de tensão, por exemplo.

Conforme pode-se verificar na tabela 6.1, a análise 20 apresenta um erro em relação ao ensaio experimental de menos de 3% em relação a ambas as bordas, portanto utilizar-se-á os dados provenientes desta análise para apresentar alguns resultados e a mesma será então denominada análise final.

Uma das primeiras análises realizadas foi em relação à região de deformação plástica resultante da simulação, a qual se mostrou bem coerente apresentando zonas plastificadas apenas na região do impacto, suportes e nas regiões de ligação entre o teto e os reforços frontal e lateral.

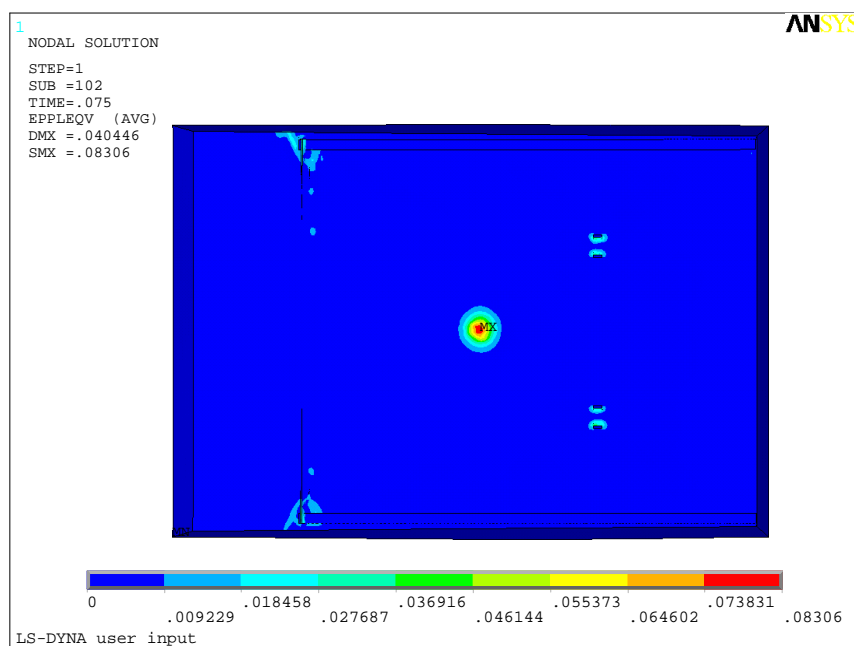


Figura 8.1. Regiões com deformação plástica do modelo final.

O modelo numérico nos permite também gerar um gráfico do deslocamento em y do nó onde acontece o impacto no teto, possibilitando assim que tenhamos uma noção do deslocamento máximo deste ponto, dado que se faz muito importante quando deseja-se estimar a performance do teto em relação a norma ISO-3449:2005, ou seja, nos permite saber se o teto invade ou não o volume limitante de deflexão. Nota-se que o deslocamento em y não estabilizou ao fim da simulação, entretanto conforme é possível verificar no apêndice III este deslocamento se dá pela oscilação dos coxins.

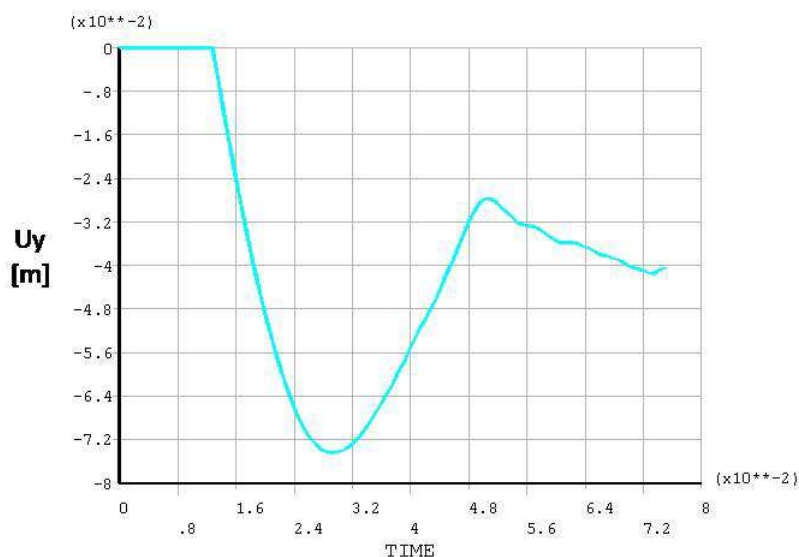


Figura 8.2. Deslocamento no eixo y do nó onde ocorre o impacto no teto.

Outro dado considerado foi o perfil do teto deformado ao longo do plano formado pelos eixos y e z , este perfil pode ser comparado com o perfil obtido do teto ensaiado. Na figura 8.3 podemos observar que a deformação está muito semelhante entre o modelo numérico e o experimental.

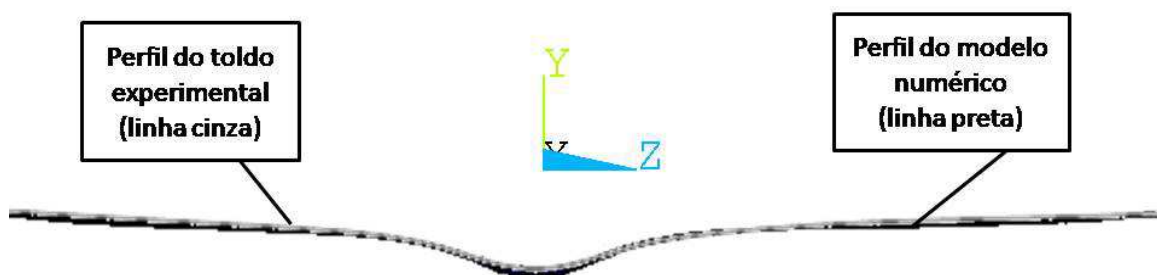


Figura 8.3. Comparação entre os perfis experimental e numérico.

Na figura 8.4 estão representados os resultados da calibração em um gráfico de contorno. Conforme é possível se identificar visualmente, dentro dos valores analisados a região da mínima função custo é encontrada ao utilizar-se uma tensão de escoamento de 234MPa e posição em z de 40mm.

No entanto, para uma melhor definição do comportamento da função custo seria necessário um número maior de análises, especialmente em relação a posição em z que apresenta seu mínimo no limite do gráfico. Em contrapartida, isto representaria um maior custo computacional e os valores das variáveis estariam se distanciando dos considerados inicialmente.

Contudo, o valor de 0,9617 para a função custo da análise final, embora possa não representar um mínimo global, pode ser considerado um resultado excelente. Especialmente em análises dinâmicas e altamente não lineares este valor representa uma aproximação muito fiel do deslocamento real.

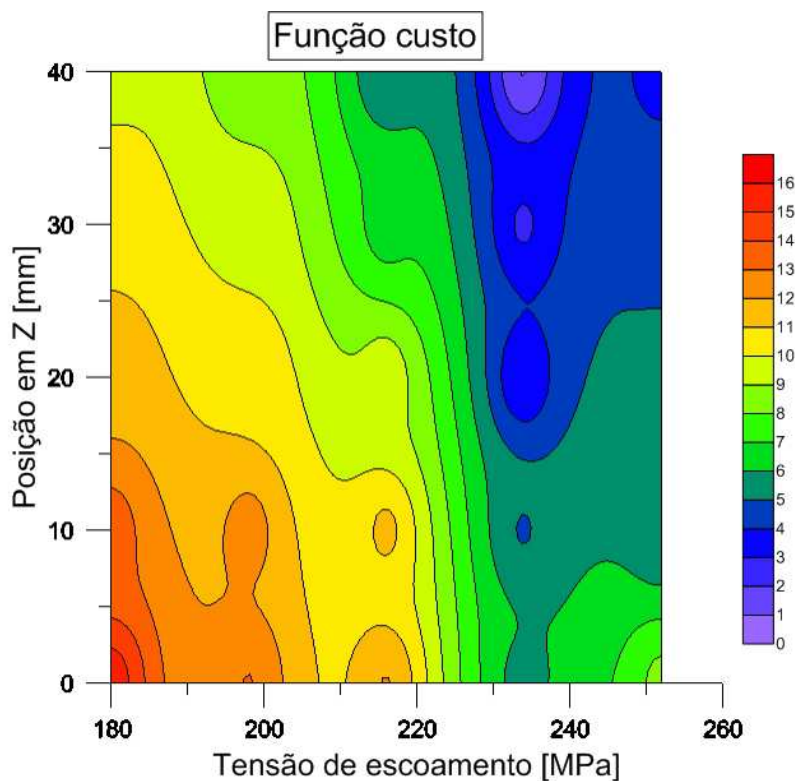


Figura 8.4. Gráfico de contorno da função custo.

9. CONCLUSÕES

Este estudo mostrou a importância da calibração de modelos numéricos quando se dispõe de dados experimentais. Os resultados da análise final mostraram uma diferença inferior a 3% em relação aos valores experimentais. É importante frisar que, se por um lado tais valores podem diferir de suas magnitudes reais, o objetivo dos mesmos no presente contexto é compensar erros do método e incertezas em relação ao modelo. O modelo numérico assim calibrado foi capaz de reproduzir bem o experimento e, portanto, é mais confiável que sua versão inicial, podendo ser agora empregado para simular outras situações. Ainda assim, os valores encontrados na calibração se mostram coerentes e dentro de uma faixa de valores aceitáveis para tais variáveis. A comparação entre as configurações deformadas obtidas numericamente e experimentalmente apresentaram ótima concordância, considerando todas as não linearidades presentes neste tipo de problema. Eventuais otimizações do produto podem agora ser realizadas com o modelo numérico devidamente calibrado, dispensando ensaios não-obrigatórios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ansys Ls-Dyna User's Guide, Release 12.0 Documentation for Ansys, 2009.

Barbetti, M. R. S. "**Estudo Comparativo Entre Coxim Hidráulico e Coxim Elastomérico, Aplicados ao Sistema de Apoio do Motor Automotivo**", dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

Bathe, K. J. "**Finite Element Procedures in Engineering Analysis**", Prentice Hall, 1982.

Choi, K. K., Kim, N. H. "**Structural Sensitivity Analysis and Optimization 1**", Springer, 2005.

Gent, A. N., Scott, K. W. "**Engineering with Rubber – How to Design Rubber Components**", Capítulo Dynamic Mechanical Properties, Hanser, 1992

Instituto de Pesquisas Tecnológicas. "**Certificado de Aferição IPT7330**", IPT, São Paulo, 1994.

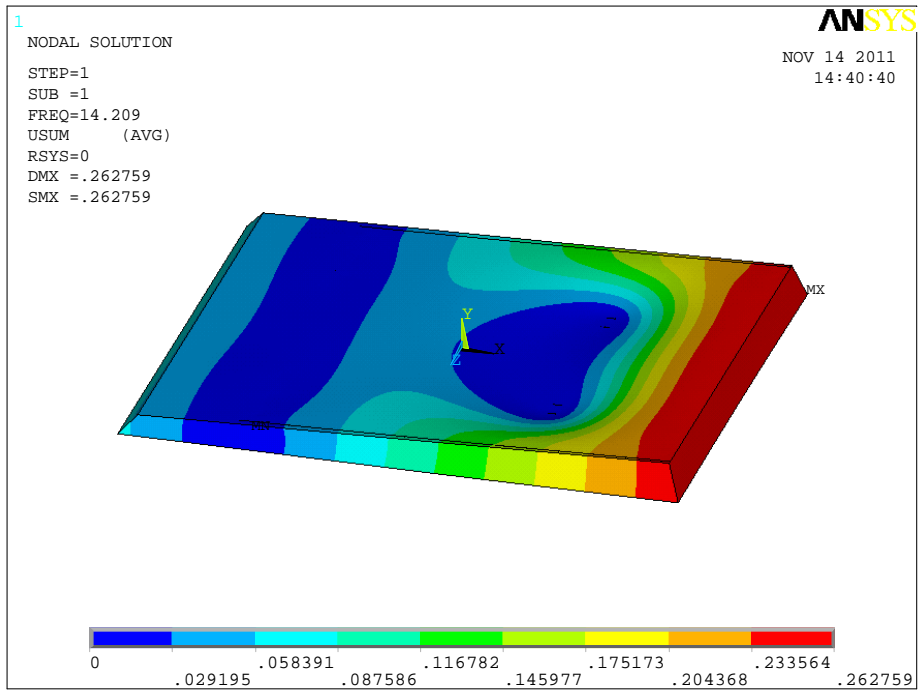
Matweb, "**AISI 1010 Material Property Data**", <http://www.matweb.com>. Acessado em 04/08/2011.

Sánchez, C. A. A. "**Estudo de Impacto Usando Elementos Finitos e Análise Não Linear**", dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, 2001.

Sommer, J. G., Yeoh, O. H. "**Engineering with Rubber – How to Design Rubber Components**", Capítulo Tests and Specifications, Hanser, 1992

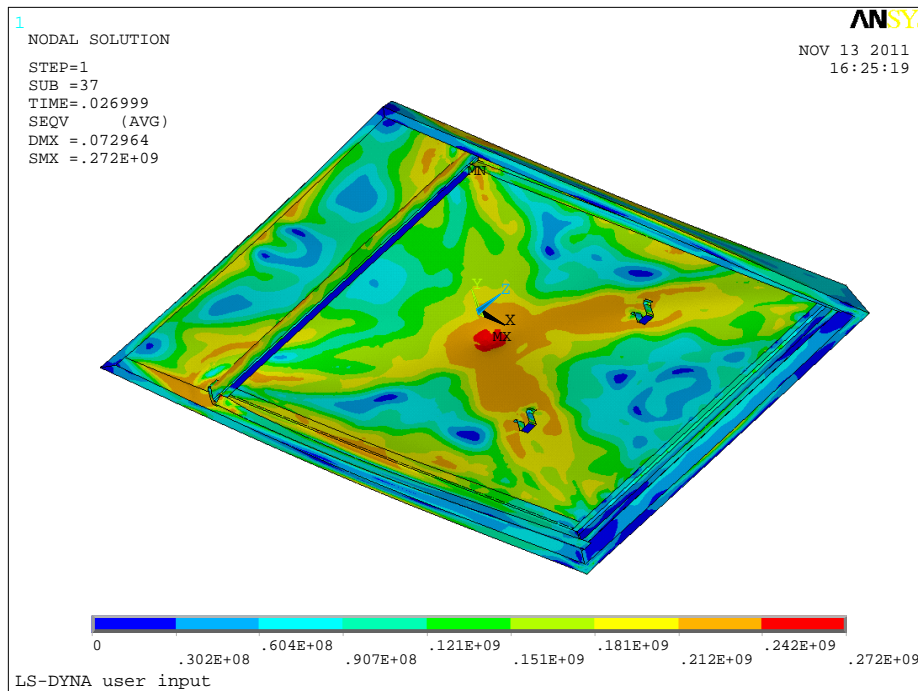
APÊNDICE I

Deslocamentos do teto na sua primeira frequência natural.



APÊNDICE II

Distribuição de tensões de Von Mises no teto durante o impacto do projétil, no instante 0,026999s.



APÊNDICE III

Gráfico comparativo entre deslocamento vertical do nó onde ocorre o impacto e do nó superior dos coxins.

