

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia de Metalúrgica e de Materiais

Alexandre Linhares Vieira

**Simulação por elementos finitos de coxim de composto
elastomérico de aplicação automobilística**

SÃO PAULO
2005

ALEXANDRE LINHARES VIEIRA

**Simulação por elementos finitos de coxim de composto
elastomérico de aplicação automobilística**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para graduação em Engenharia de Materiais.

Prof. Orientador:
Dr. Ronald Lesley Plaut

SÃO PAULO
Dezembro – 2005

ALEXANDRE LINHARES VIEIRA

**Simulação por elementos finitos de coxim de composto
elastomérico de aplicação automobilística**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para graduação em Engenharia de Materiais.

Área de concentração:
Engenharia de Materiais

Prof. Orientador:
Dr. Ronald Lesley Plaut

SÃO PAULO
Dezembro – 2005

Dedico este trabalho totalmente à minha família, por ter
me agüentado por todo este tempo de trabalho, e à
minha querida namorada Paula, que me ajudou muito
em todos os aspectos.

Agradecimentos

À empresa ROMA BORRACHAS por fornecer a fábrica e dar a permissão para utilizar sua peça e sua formulação;

À Professora Wang e ao Professor Hélio pelos conselhos e indicações sobre resinas;

Ao meu tio Mario pelo conhecimento automotivo e escolha de uma peça adequada;

Ao meu Pai Mauro, pela ajuda na fabricação dos moldes artesanais de gesso;

Ao querido Professor Ronald, por ter me dado todo o apoio necessário para a realização deste trabalho;

E a todos que contribuíram com o mínimo de carinho e atenção para que eu pudesse finalizar esse tão sonhado trabalho.

Resumo

Coxins são longamente utilizados nos automóveis em diversos locais como motor, suspensão, sistemas de acionamento elétrico de vidros, teto-solar, radiadores, etc. São compostos na maioria das vezes por borracha natural, um material não biodegradável, e sem alternativas de reciclagem que possam agregar valor ao processo, portanto, o desperdício de material além de ser ruim para a natureza, por conter muito enxofre em sua composição, não pode ser incinerado sem causar maiores danos, pode ser ruim para a fabricação também.

Por outro lado, a indústria automobilística vem constantemente crescendo e necessitando de meios ágeis e produtivos com qualidade nos inúmeros formatos de peças necessárias para a composição do automóvel moderno, não dando muita alternativa para o processo de fabricação senão produzir para alimentar esse setor.

O objetivo deste estudo foi justamente encontrar uma maneira de sanar essa necessidade de dinamismo no processo de fabricação de automóveis, desde o projeto até a montagem, tomando como objeto de estudo uma peça simples, porém crucial para o bom funcionamento do automóvel. O processo de fabricação foi acompanhado para se ter uma noção completa e precisa de qualquer variação que poderia modificar o resultado desta simulação.

A técnica de elementos finitos existe justamente para aliar a agilidade com que a indústria necessita do retorno, ou seja, a peça pronta para montagem, com a qualidade e precisão de fabricação, seja em relação a desperdício de material, mas principalmente em saber exatamente qual material utilizar para se obter as propriedades mecânicas desejadas, a partir de pré análises realizadas com pequenas amostras de várias possibilidades de alternativas.

A análise dos elementos finitos consistiu em a partir de um pequeno corpo de prova do material a ser estudado, com dimensões de LxC de 0,5"x1,0", numa máquina solicitadora de esforços de compressão estáticos e dinâmicos, cujo ensaio forneceu os dados para a caracterização e execução da simulação por FEM.

Os dados foram então levados aos aplicativos utilizados neste trabalho, no caso os COSMOS GeoSTAR e DesignSTAR, cuja diferenças estavam no tipo de desenho da peça, no caso do primeiro em 2D, e no segundo 3D.

Foram ensaiados não somente o corpo de prova fabricado nas dimensões mencionadas, mas também a peça, por motivo de comparação de resultados. Em ambos os casos os valores obtidos para a validação do procedimento, no caso a carga resultante do esforço de compressão, e o deslocamento acarretado por tal carga, foram próximos, entretanto, por se tratar de uma peça de formato não uniforme ao longo de um de seus eixos, o cálculo para os valores obtidos diretamente da peça se comprometem, mas já com os dados padronizados para o material a partir dos corpos de prova, isso não acontece e o valor é bem próximo do calculado e obtido a partir de gráficos e curvas obtidas nos ensaios.

Foi possível então concluir que as ferramentas de FEM são muito importantes para uma caracterização de esforços confiável a partir da curva carga x deslocamento de um material que se deseja fabricar, e isto não fica preso somente aos elastômeros, utilizados neste trabalho, e podem se estender a outros tipos como metais e compósitos. Com isso, consegue-se até tentar prever que uma nova geração de fabricação pode estar por surgir em um curto prazo de tempo, e essa tendência fica cada vez mais possível com a validação de um processo tão importante quanto a análise de elementos finitos.

Palavras-chave: coxim, elementos finitos, FEM, elastômeros, poliuretanos.

Abstract

Bushings are largely used on cars in several places like engine, suspension systems, electric and refrigeration systems and so on. They are usually made of natural rubber, and once vulcanized, they cannot be recycled and they're not biodegradable either. So the waste of materials like that can bring prejudice as to nature as to the fabrication process.

On the other hand, the automobile industry has keep growing and are also in need of fast and productive ways, without loosing quality, with the many kinds of geometry that composes the modern car.

The objective of this study was to find a measure to sane this need of dinamism on the automobile fabrication process, since the project, untill mouting, taking as object of study, a simple part, but crucial to the good functioning of the car.

The fabrication process was observed for giving a complete and precise idea of any variation that could modify the results of this simulation.

The Finite Elements Method exists to gather the velocity that the industry needs the part ready to apply it, with quality and precision in fabrication, related either to waste of materials, or knowing rightly the material to use to obtain mechanical properties desired, based on analises realized with small pieces of several possible alternatives

The FEM consisted on a small cilindric piece of the material to be study, with dimensions of WxH (0,5"x1,0"), in a dinamic and static compression forces machine (MTS), whose tests gave the data to characterize and execute the simulation.

The data was then given to both aplicatives used in this study, Cosmos' GeoSTAR and DesignSTAR, whose biggest difference was in the kind of entry representing the autopart. The fist one, in 2D, and the second one in 3D

It was tested not only the test body, but also the part itself, for reasons of results comparacy. In both cases the results corresponded to the real ones, neverthenless its non-uniform geometry, the results can not be considered so real, but on a second study based on the MPC curve obtained with the simulation of the test body patternned, the results were very close to real.

This turned it possible to concluce that FEM are very important to a trustable forces characterization based on a Force versus Displacement curve of a singular

material. This method is not stucked only to elastomers, and can extend to other kinds of materials like metals and composites.

With that, its even possible to try to visualise that a new generation of industry is about to come in a so short period of time, and this tendency gets more and more possible with the validation of a process so important as the FEM analyses.

Keywords: bushings, finite elements, FEM, elastomers, poliurethanes.

Índice

Lista de Figuras	<i>xi</i>
Lista de Quadros e Tabelas	<i>xiii</i>
Lista de Anexos e Apêndices	<i>xiv</i>
Lista de Simbologias	<i>xv</i>
1 – Introdução	01
1.1 – Coxins e compostos elastoméricos	01
1.2 – Alternativa de material	04
1.2.1 – <i>Propriedades Mecânicas</i>	05
1.2.2 – <i>Propriedades Elétricas</i>	05
1.2.3 – <i>Propriedades Térmicas</i>	05
1.2.4 – <i>Propriedades Químicas</i>	05
1.3 – Ensaios dinâmicos	06
1.4 – Modelamento Matemático	06
2 – Objetivo	07
3 – Materiais e Métodos	08
3.1 – Caracterização do Problema	08
3.2 – Coxins	09
3.2.1 – <i>Fabricação da peça</i>	11
3.2.2 – <i>Caracterização do CE Utilizada</i>	12
3.3 – Testes Dinâmicos	15
3.4 – Modelamento Matemático	22
3.4.1 – <i>GeoSTAR</i>	23
3.4.2 – <i>DesignSTAR</i>	25
3.4.3 – <i>Área de secção transversal aproximada</i>	26
4 – Resultados e discussão	27
4.1 – Validação das curvas MPC	27
4.2 – Simulação do coxim por FEM	35
4.2.1 – <i>GeoSTAR</i>	35
4.2.2 – <i>DesignSTAR</i>	43

4.3 – Discussões Finais	52
4.3.1 – GeoSTAR	52
4.3.2 – DesignSTAR	54
4.4 – Fabricação com poliuretano (sugestão oferecida)	54
5 – Conclusões	56
6 – Referências Bibliográficas	57
7 – Anexos	58
Apêndices	75

Lista de Figuras

Figura 1 – Detalhe do coxim de uma suspensão automotiva.	04
Figura 2 – Coxim utilizado neste trabalho.	10
Figura 3 – Fluxograma de produção do coxim.	11
Figura 4 – Molde utilizado para fabricação do coxim.	11
Figura 5 – Prensa aquecida para realizar a vulcanização.	12
Figura 6 – Medição da dureza SHORE A da peça.	12
Figura 7 – Reômetro utilizado na análise reológica. Modelo TE100/03.	13
Figura 8 – Curva reométrica avaliada após a vulcanização.	14
Figura 9 – Curvas de cura típicas de elastômeros.	15
Figura 10 – Molde de gesso fabricado.	15
Figura 11 – Corpo de prova.	16
Figura 12 – Sistema MTS de ensaio dinâmico ^[4] .	16
Figura 13 – Fluxograma de funcionamento do sistema MTS ^[4] .	17
Figura 14 – Gráfico de saída da máquina de ensaios dinâmicos MTS.	17
Figura 15 – Gráfico da pré-curva para cálculo da MPC.	18
Figura 16 – Curva MPC 1, calculada diretamente com os passos obtidos com o ensaio dinâmico.	20
Figura 17 – Curva MPC 2 padrão para ser utilizada nas simulações.	21
Figura 18 – Janela de entrada para carregamento solicitado	25
Figura 19 – Deformações resultantes da simulação com carregamento aplicado de 5.096 kgf.	25
Figura 20 – Curva MPC 3 obtida a partir de valores aproximados da área da secção transversal do coxim.	26
Figura 21 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 1 da simulação do corpo de prova e seu deslocamento MPC1.	27
Figura 22 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 2 da simulação do corpo de prova e seu deslocamento MPC1.	28
Figura 23 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 3 da simulação do corpo de prova e seu deslocamento MPC1.	29
Figura 24 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 4 da simulação do corpo de prova e seu deslocamento MPC1.	30
Figura 25 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 1 da simulação do corpo de prova e seu deslocamento MPC2.	31
Figura 26 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 2 da simulação do corpo de prova e seu deslocamento MPC2.	32
Figura 27 – Comparação entre os resultados de RRFY obtidos para as curvas MPC1 e MPC2.	33
Figura 28 – Curva obtida com os valores obtidos com o ensaio MTS, para o corpo de prova.	33
Figura 29 – Curva de comparação dos carregamentos obtidos com a simulação e o MTS.	34
Figura 30 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 1 da simulação do coxim e seu deslocamento MPC1.	35
Figura 31 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 2 da simulação do coxim e seu deslocamento MPC2.	37
Figura 32 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 4 da simulação do coxim e seu deslocamento MPC2.	38
Figura 33 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 2 da simulação do coxim e seu deslocamento MPC3.	40
Figura 34 – Comparação entre os resultados de RRFY obtidos para as curvas MPC1, MPC2 e MPC3.	41
Figura 35 – Curva obtida com os valores obtidos com o ensaio MTS, para o corpo de prova.	41
Figura 36 – Curva de comparação dos carregamentos obtidos com a simulação e o MTS para o coxim.	42
Figura 37 – Curva de comparação dos carregamentos obtidos com a simulação DS e o MTS para o corpo de prova.	44
Figura 38 – Perfil de tensões no corpo de prova durante o STEP 3 no DesignSTAR.	44
Figura 39 – Perfil de deslocamentos no coxim durante o STEP 4 no DesignSTAR.	46
Figura 40 – Comparação entre os valores experimentais e os obtidos com a curva MPC2 para carregamentos aplicados.	46

Figura 41 – Plotagem do nível de tensões normais para o coxim no passo 1 utilizando a curva MPC3.	47
Figura 42 – Curva de comparação dos carregamentos obtidos com a simulação DS com MPC3 e o MTS para o coxim.	48
Figura 43 – Curva de comparação de todos os métodos utilizados para o corpo de prova em relação ao MTS.	49
Figura 44 – Curva de comparação de todos os métodos utilizados para o coxim em relação ao MTS.	49
Figura 45 – Curva de comparação do método estático com o método Real (MTS).	51
Figura 46 – Curva de comparação de todos os métodos confiáveis utilizados no ensaio do coxim.	52
Figura A.1 – Cotas para programação em CAD.	76
Figura A.2 – Ferramenta Line.	76
Figura A.3 – Procedimento para desenho da peça, com cota na linha de comando.	77
Figura A.4 e A.5 – Procedimento para fazer a inclinação (4) e peça finalizada (5).	78
Figura A.6 – Criação da região da seção transversal do coxim.	78
Figura A.7 – Menu revolve.	79
Figura A.8 – Eixo Y selecionado para comando Revolve.	79
Figura A.9 – Figura finalizada, pronta para exportação.	80
Figura A.10 – Janela de exportação.	80
Figura B.1 – Tela pronta após a programação.	82
Figura B.2 – Janela com os passos a serem seguidos pelo aplicativo.	83
Figura B.3 – Deslocamento localizado na seção da peça.	84
Figura B.4 – Listagem das cargas de compressão, e sua somatória.	84
Figura C.1 – Tela com a peça recém exportada.	85
Figura C.2 – Definição da curva TIMES.	86
Figura C.3 – Definição da Material Properties Curve (MPC).	86
Figura C.4 – Definição do tipo de material que compõe a peça.	87
Figura C.5 – Engastamento e carregamento já presentes na peça.	88
Figura C.6 – Peça pronta para início da simulação.	89
Figura C.7 – Representação da simulação ocorrendo.	89
Figura C.8 – Tela completa com todas saídas, e mostrando a deformação resultante.	90

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Funções dos elastômeros no automóvel ^[1] .	03
Tabela 2 – Formulação para o CE utilizada ^[7] .	10
Tabela 3 – Valores de partida para a construção das planilhas.	18
Tabela 4 – Valores de partida para a construção das planilhas.	19
Tabela 5 – Valores de MPC para o corpo de prova e para o coxim(aproximada).	21
Tabela 6 – Resultantes das forças no eixo Y encontradas para a curva MPC1 no corpo de prova.	30
Tabela 7 – Resultantes das forças no eixo Y encontradas para a curva MPC2 no corpo de prova.	32
Tabela 8 – Comparação de valores ensaiados com os simulados.	34
Tabela 9 – Resultantes das forças no eixo Y encontradas para a curva MPC1 no coxim.	36
Tabela 10 – Resultantes das forças no eixo Y encontradas para a curva MPC2 no coxim.	37
Tabela 11 – Resultantes das forças no eixo Y encontradas para a curva MPC3 no coxim.	40
Tabela 12 – Comparação de valores ensaiados com os simulados para o coxim.	42
Tabela 13 – Propriedades de entrada para a simulação.	43
Tabela 14 – Comparação de valores ensaiados com os simulados para o corpo de prova.	43
Tabela 15 – Comparação de valores ensaiados com os simulados para o coxim MPC2.	45
Tabela 16 – Comparação de valores ensaiados com os simulados para o coxim MPC3.	47
Tabela 17 – Comparação de todos os métodos de simulação do corpo de prova.	48
Tabela 18 – Comparação de todos os métodos de simulação do coxim.	48
Tabela 19 – Comparação de valores ensaiados com os simulados para o coxim no ensaio estático.	51
 Tabela B.1 – Tipos de opção possíveis para retornar resultados para comparação.	 83
Tabela C.1 – Tipos de opção possíveis para retornar resultados para comparação.	90
 Quadro 1 – Código para programação do corpo de prova GEO-CP1.txt	 23
Quadro 2 – Código para programação do corpo de prova GEO-CP2.txt	23
Quadro 3 – Código para programação do coxim GEO-COXIM1.txt	24
Quadro 4 – Código para programação do coxim GEO-COXIM2.txt	24
Quadro 5 – Código para programação do coxim GEO-COXIM-AREA.txt	39

Lista de Anexos e Apêndices

Anexo I – Plotagens no GeoSTAR do Corpo de Prova ensaiado	58
Anexo II – Plotagens no GeoSTAR do Coxim ensaiado	62
Anexo III – Plotagens no DesignSTAR do CP ensaiado	68
Anexo IV – Plotagens no DesignSTAR do Coxim ensaiado	70
Anexo V – Desenho técnico do Coxim utilizado.	74
Apêndice A –Desenho da Peça em Autodesk AutoCAD versão 2005	76
Apêndice B – Programação em COMOS GeoSTAR 256K - Rotina	81
Apêndice C – Programação em DesignSTAR 4.5 - Rotina	85

Lista de Simbologias e abreviações

N – Newton

Kgf – Kilogramaforça

$T_{nominal}$ – Tensão nominal

T_{Real} – Tensão real

d – Deformação nominal

DL – Deslocamento

L_0 – Comprimento inicial

D – Deformação real

h – Altura

$d\Phi$ – divisão angular

ts1 – tempo t1

ts2 – tempo t2

E – Módulo elástico

$tg\alpha$ – tangente de α

MHF – torque máximo

ML – torque mínimo

RRFY – resultante das forças de reação na base(no eixo Y)

MPC – Material Properties Curve (curva de propriedades do material)

FEM – Finit Element Method – método de elementos finitos

PU – Poliuretano

CE – Composto elastomérico

1 – Introdução

1.1 – Coxins e compostos elastoméricos

Compostos elastoméricos estão cada vez mais presentes na indústria de bens de consumo e conseqüentemente na indústria automobilística. Seja na forma de materiais de vedação simples, ou na forma de buchas, coxins, e pneus, onde o estudo certamente é mais aprofundado e necessário para garantir as propriedades que cada uma destas peças necessita.

Dentre as várias maneiras de classificar os elastômeros na engenharia de materiais, a classificação de maior interesse está associada às propriedades ou ao seu uso final. Uma das classificações mais importantes encontra-se baseada na resistência ao calor e a solventes.

Tem-se 2 tipos extremos que condizem à classificação dos elastômeros em: termoplásticos, que são elastômeros que amolecem e escoam (reversivelmente) quando aquecidos ou tratados com solventes apropriados; e termofixos que são formados por reticulados tridimensionais que não amolecem uma vez curados. As propriedades dos termofixos, característica do coxim utilizado neste trabalho, são afetadas pela densidade de encadeamento “crosslinking density”, ou, inversamente, pela massa molecular entre os encadeamentos^[4].

Existem pelo menos 10 tipos ou categorias diferentes de elastômeros disponíveis comercialmente, cada qual com suas características básicas (físicas, químicas) e bastante diferenciadas. Os elastômeros devem ser entendidos e empregados corretamente, dentro de suas vantagens e limitações, permitindo a seleção do material de menor custo e melhor desempenho para a aplicação específica^[5].

A seguir, algumas propriedades em comum, a saber:

a) devem apresentar alguma liberdade rotacional, permitindo o encolhimento das cadeias quando da aplicação de uma força;

b) não devem cristalizar com facilidade quando submetidos a deformações, contrastando com o item a), já que com a deformação, o alinhamento de cadeias aumenta, conjuntamente com a facilidade para cristalização.

c) deve haver um mecanismo de encadeamento que uma os diferentes monômeros de diferentes cadeias; fenômeno importante na formação de cadeias

poliméricas e que pode ocorrer no estágio de polimerização ou mais freqüentemente, em um estágio posterior ao processo.

Elastômeros são caracterizados pela sua resiliência e elasticidade sobre altos graus de deformação. Geralmente são esticados, comprimidos ou torcidos por diversas vezes a sua dimensão de relaxamento, e somente retornam a sua forma original quando a força aplicada é removida. Componentes automotivos constituídos de elastômeros são usados para controlar vibrações, vedar fluidos, poeira, reduzir barulho, transportar fluidos e garantir resistência e flexibilidade em diversas aplicações. Trabalham em uma enorme variedade de ambientes agressivos, como alta temperatura do compartimento do motor, e baixa temperatura durante o inverno. Mais ainda, estes componentes devem permanecer flexíveis e impermeáveis a muitos reagentes químicos. Por todas estas razões, uma grande gama de elastômeros com características térmicas e químicas específicas está disponível para a engenharia automotiva^[1].

Atualmente são utilizado elastômeros em aproximadamente 700 partes diferentes no automóvel, compreendendo apenas 4% do peso total do veículo. Uma vasta seleção de elastômeros se faz necessária para atender a demanda de aplicações. O desafio contínuo da engenharia automotiva é a própria seleção de design e de material para servir as constantes atualizações e mudança no design de automóveis^[1].

A performance de um componente de borracha no automóvel depende da propriedade específica do composto escolhido para a aplicação. Elastômeros são utilizados em diversas correias para transmitir potência no compartimento do motor. A alta fricção entre a superfície metal / borracha e a resistência ao uso abrasivo ditam a performance do material nesta aplicação. Coxins de motor, suspensão, buchas e borrachas de vedação isolam a vibração de rolagem e o barulho no automóvel. Nestas aplicações, a habilidade de amortecimento e a resistência à fadiga do material são propriedades críticas para a performance do componente. Juntas e gaxetas formuladas com compostos de borracha devem ser quimicamente inertes a fluidos agressivos e devem manter sua forma constante sob tensões constantes. Neste caso, a reatividade e as características termodinâmicas em conjunto com a habilidade de resistir, define um guia para o engenheiro na seleção do material para o componente^[1].

As aplicações e propriedades utilizadas em automóveis são tão grandes para discutir em detalhes, que não se fazem necessárias neste trabalho. Entretanto, uma pequena lista correlaciona propriedades gerais desejadas com funções específicas para cada componente é mostrada a seguir, para dar uma boa noção de propriedades.

Tabela 1 – Funções dos elastômeros no automóvel^[1].

Função	Aplicação	Propriedades
Mobilidade	Pneus	Atrito, resistência à fadiga, propriedades dinâmicas, permeabilidade.
Conforto e dirigibilidade	Buchas, Coxins, Isolantes, Pára-choques	Resistência à fadiga, resiliência, damping.
Isolar o veículo	Borrachas de porta e janelas	Ozônio, oxidação, resistência a UV, resistência a compressão definida.
Condução e contenção de fluidos	Mangueiras, tubos, juntas e gaxetas.	Flexibilidade, resistência a solventes, a calor, a corte e ozônio.
Segurança	Componentes de freio, Espuma de padding.	Propriedades dinâmicas, resistência a solventes, a calor, processabilidade.

Os tipos de borracha utilizados para todas estas funções são os mais diversos, entretanto o referido neste trabalho será a borracha natural, com o composto elastomérico tendo sua composição mais tarde revelada.

Tema deste trabalho, os coxins são peças certamente desconhecidas do público em geral mais leigo no assunto de mecânica de automóveis, mas certamente os proprietários de veículos viveriam todos estressados e nervosos se estes não existissem. Os coxins podem estar presentes desde nas estruturas de vidros elétricos, certamente a utilização mais luxuosa para este fim, como também podem estar na ponta do amortecedor, servindo de elo entre a carroceria e a torre do amortecedor. Sem esta peça, o carro seria muito mais duro de ser dirigido, e o seu conforto iria por “água abaixo” (Figura 1). Podem ser encontrados ainda em motores, radiadores, teto solares, caixas de câmbio, etc.

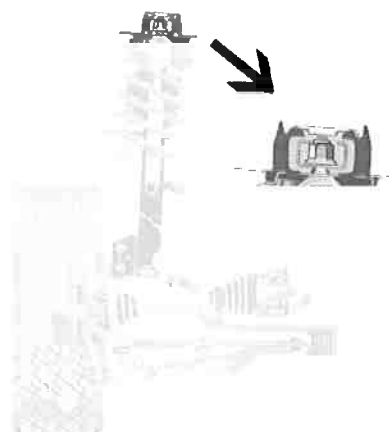


Figura 1 – Detalhe do coxim de uma suspensão automotiva.

Constituídos por um corpo de borracha natural, amplamente utilizada, e com "cabeças" ou extremidades metálicas colocadas antes da vulcanização da borracha, os coxins poderiam ser simplesmente descritos dessa maneira.

Podem ser do tipo *monoarticulado*, *biarticulado* e um novo tipo mencionado aqui apenas em nível de conhecimento, o do tipo *hidráulico*, elemento utilizado para suportar o conjunto motor/câmbio na carroceria, cuja função é isolar as vibrações de funcionamento. No lugar de borracha maciça, um fluido viscoso é forçado a passar de uma câmara interna para outra, produzindo um efeito de amortecimento dos esforços. O objeto deste estudo caracteriza-se por um coxim monoarticulado, onde a outra face é afixada a partir de um orifício presente nesta face que se encaixa em um apoio, fornecendo a segunda articulação, chamada de passiva (Figura 2).

Compostos elastoméricos vulcanizados em geral são impossíveis, atualmente, de serem reaproveitados e reciclados em novos processos de produção, e desta forma, preocupações com rejeitos, peças não aproveitadas, e até mesmo as rebarbas da produção, existem na indústria de compostos elastoméricos.

1.2 – Alternativa de material

Atualmente peças de borracha natural vêm sendo substituídas por peças de Poliuretano que pertence a um grupo de plásticos que aliam características de elastômero com possibilidade de transformação, devido à grande variação de durezas possíveis de se estabelecer na sua formulação.

Possui alta resistência à tração e compressão e é ideal na produção de peças que exijam grande durabilidade. Pode ser utilizado tanto em serviços de repuxo, como prensa chapa, onde é necessário um curso maior, com ciclo de operação mais

lento, quanto em serviços onde seja necessário um curso menor, com ciclo de operação mais rápido. Por isso, existe uma variação quanto à determinação do espaço para alojamento das molas, que deve ser entre 20 e 30% maior que o diâmetro externo da mola, a fim de permitir seu abaulamento.

Em [2] estão listados diversas propriedades que possuem as peças moldadas por poliuretanos, estas propriedades são mostradas a seguir.

1.2.1 – Propriedades Mecânicas

O Poliuretano possui elevada resistência à tração com grande alongamento até a ruptura. Comparando com as borrachas, o Poliuretano possui elevado módulo de elasticidade. Além disso, possui um intervalo de dureza que vai de 20 a 95 shore A. É altamente resistente ao corte e rasgamento, possui ótima flexibilidade e grande resistência à compressão, voltando sempre à forma original. Por isso, é aplicado em amortecimento em geral.

1.2.2 – Propriedades Elétricas

Seu comportamento dielétrico é favorável, possui boa resistência elétrica, mas não é recomendado como material isolante.

1.2.3 – Propriedades Térmicas

A temperatura de trabalho do Poliuretano compreende o intervalo de 40°C a 80°C e eventualmente pode ser submetido a 100°C por pequenos períodos de tempo. Seu comportamento térmico está relacionado diretamente com a sua estrutura molecular, que determina o tipo de Poliuretano segundo a sua dureza.

1.2.4 – Propriedades Químicas

O Poliuretano é resistente a Benzeno, Graxas e Óleos, Ozônio, Água Fria (um contato contínuo com a água fria resulta na perda gradativa de suas propriedades mecânicas) e Oxigênio. Entretanto, não resiste a água quente, vapor saturado, ácidos concentrados e soluções alcalinas, álcool, hidrocarbonatos clorados e amoníaco.

1.3 – Ensaios dinâmicos

Ensaios deste tipo levantam informações que caracterizam o comportamento do elastômero e possibilita quantificar informações, destacando-se principalmente, a curva *força x deslocamento*, base deste trabalho, como consequência a curva *tensão x deformação*, além dos módulos, complexo, elástico e viscoso, de rigidez, tangente delta, e energias total e dissipada por ciclo, transmissibilidade e amortecimento [3].

1.4 – Modelamento Matemático

Para tal, o objetivo do estudo em questão, o modelamento matemático, é em si realizar uma otimização do procedimento de testes mecânicos, com uma simulação através de computadores, da peça que será produzida, prevendo suas características mecânicas e ajustando a produção adequadamente à necessidade, consequentemente até mesmo reduzindo a quantidade de material desperdiçado.

O software utilizado para conduzir o trabalho será o aplicativo Cosmos, com suas duas variações, o GeoSTAR (2D), e o DesignSTAR (3D) e suas linhas de comando serão fornecidas como meio de dar seqüência ao trabalho.

Neste programa, devem ser fornecidos como dados de entrada, além da geometria da peça, propriedades do material em forma de curva tensão x deformação, entre outros dados para realização das iterações.

2 – Objetivo

Com a finalidade de fornecer uma tarefa completa de engenharia ao autor, esta presente redação tem como objetivo o estudo, caracterização, modelamento matemático por FEM e suas conseqüentes conclusões para a simulação computadorizada de peças altamente utilizadas no setor automotivo.

Trata-se de coxim de aplicação automobilística, fabricado em composto elastomérico. Serão realizados ensaios de caracterização estática e dinâmica, onde tal caracterização fornecerá os dados para a execução da simulação empregando o método de elementos finitos nesta peça.

Objetiva-se efetuar a comparação entre os resultados obtidos pelo FEM com os valores experimentais obtidos na compressão em ensaios do componente, visando a validação do modelamento.

Serão analisadas também alternativas de materiais que poderiam ser aplicados para tal finalidade, de modo a comparar com CE.

3 – Materiais e Métodos

3.1 – Caracterização do Problema

Atualmente, existe uma necessidade enorme de otimização de processos fabris, envolvendo toda a cadeia de produção de uma peça ou produto manufaturado. Faz-se então necessário encontrar uma alternativa rápida e confiável para conseguir substituir um certo tipo de procedimento realizado durante este processo.

O Modelamento matemático por ferramentas de elementos finitos tem como proposta a obtenção dos resultados obtidos com testes mecânicos, sejam em situações teóricas, iniciais, ou até mesmo em situações práticas de utilização final. Imagine um desenvolvimento de um carro desde seu projeto na prancheta até a montagem do primeiro exemplar. Agora imagine este mesmo carro, tendo que ser remontado, pois uma peça recém projetada para ser utilizada no mesmo, não respondeu com os resultados esperados por inúmeros problemas, mas principalmente pela forma geométrica da mesma. Isso acarreta em tempo de produção, e liberação para lançamento, ou então mais seriamente ainda, pode ocasionar um futuro recall, deixando seus clientes em péssima situação.

Imagine agora a mesma peça que não respondeu com as expectativas, sendo ensaiada através do computador, permitindo encontrar locais de esforço máximo em situações de trabalho, podendo ser previsto todo o problema anterior. Ou até mesmo ensaiado no próprio conjunto do automóvel, assumindo sua função em interação com seus outros componentes. Além de reduzir o tempo até o refinamento da qualidade do automóvel, o computador pode mostrar ao seu usuário futuros problemas, que podem ser sanados antes mesmo da produção em si da peça, seja com alterações geométricas, alteração de material, não importa, entretanto fornecendo uma saída mais segura com resultados já previstos.

Com isso, a produção pode ser otimizada, já que formatos, composições, inúmeros fatores previamente ensaiados, fornecem uma certeza melhor do que será produzido, e aliado à experiência de produção da fábrica, já no âmbito de questões de processo como quantidade de material, temperatura de processo, tempo de produção, aumenta também a qualidade do produto.

Outro fator que não deve ser descartado é a redução da poluição ambiental, no caso do material objeto de estudo em questão, os elastômeros. Caracterizados

por possuírem longas cadeias carbônicas e com enxofre em grande quantidade, devido ao processo de vulcanização, são impossíveis de serem reciclados em sua totalidade, podendo ser reaproveitado no processo, apenas em baixíssima quantidade. São destinados a outras funções como carga, negro de fumo, preenchimento de espaços em paredes de concreto, e até mesmo “esferas” para gramados de campos de futebol society. Entretanto, o seu destino mais certo é o meio ambiente, pois este reprocessamento, freqüentemente, não é barato para a própria indústria, e o prejudicado acaba sendo a natureza.

Com este estudo computadorizado, não é possível que sejam reduzidos os níveis de rebarbas das peças produzidas, já que isso vem da cultura de produção elastomérica, e é um procedimento muito difícil de modo a evitar falhas no componente produzido como bolhas, mas pode sim evitar que peças sejam produzidas por engano e que não resultem em lixo a ser descartado pela fábrica. Se melhor analisado, as ferramentas de elementos finitos se tornam um grande atrativo para a indústria borracheira, já que produção errada também resulta em prejuízo com material, tempo de produção, mão de obra, ou seja, perde-se todo o processo de fabricação juntamente com as peças fabricadas.

Neste presente trabalho, é feita uma introdução de como poderá ser a indústria do futuro, com setores totalmente integrados, desde o planejamento até o produto final, onde variáveis experimentadas fornecerão o ponto ótimo do produto e conseqüentemente mais perto da perfeição será possível chegar, e com outros enormes atrativos, otimização de processos, e redução de custos, a maior preocupação da economia capitalista que reina o mundo atual.

Uma outra coisa a ser pensada, é o tradicionalismo atual da indústria, e a abertura de mão de obra para tais ferramentais. Com o mundo em evolução, se torna cada dia mais importante a discussão dos processos de fabricação realizados da mesma maneira como realizados há décadas atrás. É necessária a abertura de portas na indústria, fornecendo resultados convincentes, para que sejam implementadas com sucesso tais alternativas.

3.2 – Coxins

Será estudado neste trabalho um coxim automobilístico, peça que pode ser aplicada em diversos lugares num carro e, que se caracteriza por ter em sua

estrutura uma parte metálica presa no corpo de borracha por ter participado do processo de vulcanização (Figura 2). Normalmente trata-se de uma articulação com esforços de compressão e de tração, alternadamente, em regiões simétricas da peça, conforme a solicitação, daí o motivo do importante estudo com FEM.



Figura 2 – Coxim utilizado neste trabalho.

Inicialmente o trabalho se dá com peças de composto elastomérico de borracha natural, cuja composição poderemos ver a seguir (Tabela 2), e da mesma maneira que é produzido atualmente.

Tabela 2 – Formulação para o CE utilizada^[7].

Matéria-Prima	Peso (Kg)	PHR
Elastômero		
Borracha Natural	2500	100
Aditivos		
STRUKTOL A42	75	3
Óxido de Zinco	125	5
Estearina	50	2
FlexZone 3C	75	3
Prozone	75	3
STRUKTOL WB212	50	2
STRUKTOL 40MS	75	3
Negro de Fumo N339	650	26
Negro e Fumo N660	925	37
Plastificante A	250	10
Aceleradores		
Enxofre	38	1,5
Vulkacit CZ	30	1,2
TMTM	13	0,5
Santogard PVI	13	0,5

3.2.1 – Fabricação da peça

O processo de fabricação é mostrado a seguir conforme o fluxograma abaixo (Figura 3).



Figura 3 – Fluxograma de produção do coxim.

No início da fabricação desta peça, utilizam-se os rolos de mistura, como laminadores, para obter a mistura uniforme com todos os aditivos agregados à borracha, e então poder cortar e iniciar a vulcanização.

Após preencher os moldes com o CE necessária para ocupar todas as vacâncias (Figura 4), estes são fechados e então levados a prensas pré-aquecidas e que mantêm a temperatura no momento da prensagem. Ao serem colocados na prensa, alguns solavancos são aplicados ao molde, o que facilita a saída de ar do mesmo, evitando defeitos como buracos ou partes ocas na peça. Após a aplicação destes solavancos, o molde permanece por 10 minutos na prensa (Figura 5), aquecida sempre a 160°C, para finalizar o processo de vulcanização.



Figura 4 – Molde utilizado para fabricação do coxim.



Figura 5 – Prensa aquecida para realizar a vulcanização.

Após a retirada, o molde é aberto e a peça retirada e deixada resfriar para ser então manuseada normalmente e iniciar o acabamento final da mesma.

3.2.2 – Caracterização do CE Utilizada

Logo após a fabricação, são feitos testes de dureza e de reologia para ser caracterizado o CE utilizado. Entretanto, a dureza não pode ser considerada como final poucos instantes após a vulcanização. No caso do coxim, a medição, feita com um durômetro (Figura 6) apontou 50 SHORE A, cujo valor se estabilizou após alguns dias para 55 SHORE A, número esperado para o coxim.



Figura 6 – Medição da dureza SHORE A da peça.

Testes dimensionais também são realizados alguns momentos após a fabricação para evitar disparidades em suas dimensões e prejudicar a sua utilização.

Superficialmente, o reômetro de disco oscilante utilizado, relembra o Viscosímetro Mooney ^[1], mas estes dois instrumentos devem ser reconhecidos como equipamentos designados a produzir informações significativamente diferentes sobre um composto.

Diferentemente do Mooney, o rotor do reômetro de disco oscilante é oscilado perante um pequeno arco de rotação, ao invés de ser continuamente rotacionado. A amostra é sujeita a um cisalhamento oscilatório, em amplitude constante. Um rotor é introduzido na amostra de CE que fica confinada numa cavidade sobre pressão e controlado pela temperatura de vulcanização desejada. O torque requerido para oscilar o rotor é então medido. Com o andamento da vulcanização, o torque necessário para cisalhar o CE aumenta e a curva de torque *versus* tempo de cura pode ser construída.

A oscilação do rotor sobre apenas um pequeno arco não resulta em destruição da amostra, diferente de como ocorre no viscosímetro mooney, e um significativo valor de torque pode ser medido durante todo o processo de cura. Desde que o rotor esteja tensionando o CE, o torque resultante será diretamente relacionado ao modulo de cisalhamento do CE.

Neste trabalho, a reometria foi feita através de um reômetro de torque específico acoplado a um computador, modelo Teâmetro TE100/03, marca ZEA (Figura 7).



Figura 7 – Reômetro utilizado na análise reológica. Modelo TE100/03.

Segundo a referência [8], alguns parâmetros podem ser definidos a partir da curva. Estes serão mostrados no decorrer do trabalho.

Uma pequena amostra foi fornecida à máquina, que ajustada na mesma temperatura de vulcanização, construiu a curva reológica do material (Figura 8).

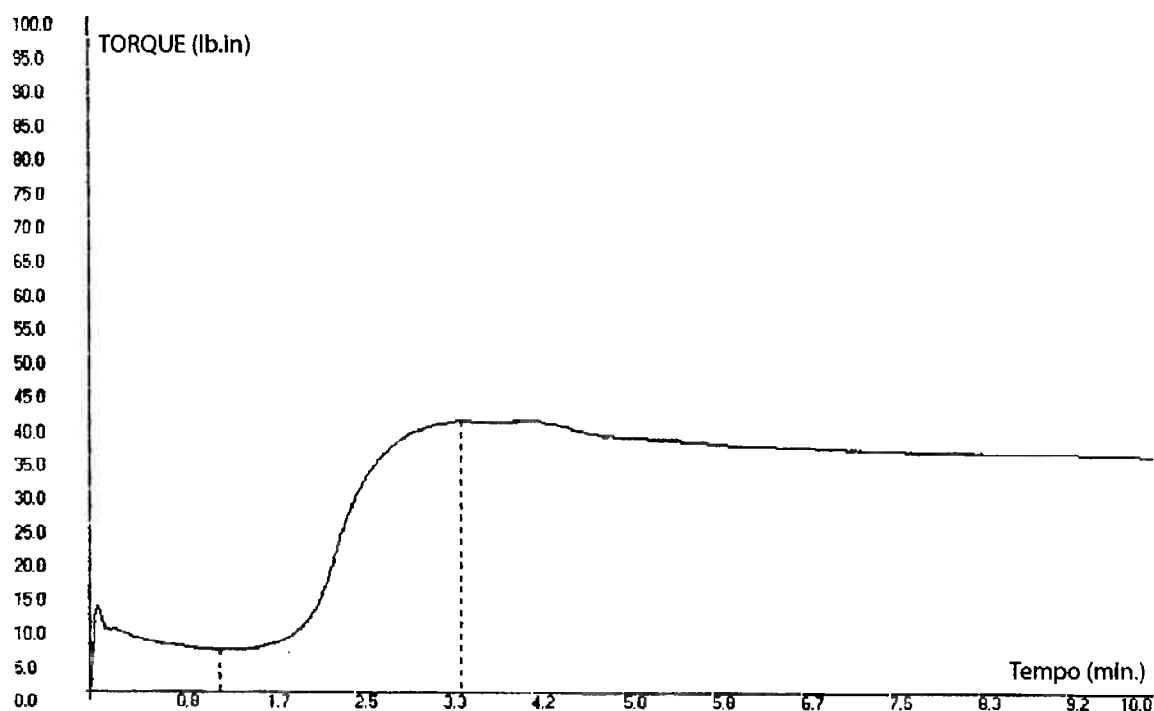


Figura 8 – Curva reométrica avaliada após a vulcanização.

A seguir, conforme a norma referida, são indicados os parâmetros para a curva obtida no ensaio do CE.

$$MHF = 40.40 \text{ lbf.in}$$

$$ML = 6.208 \text{ lbf.in}$$

$$Ts1 = 1'44'' (7.20 \text{ lbf.in})$$

$$Ts2 = 1'53'' (8.20 \text{ lbf.in})$$

As curvas de cura em geral mostram uma das três formas exemplificadas a seguir, como mostra a Figura 9. Algumas borrachas sintéticas alcançam um equilíbrio constante de torque (MHF), enquanto a maioria das borrachas naturais, exibe reversão (MHR). Normalmente o “borracheiro” tem o desafio de desenvolver um composto que não reverte e nem aumenta o módulo do torque com a cura em excesso.

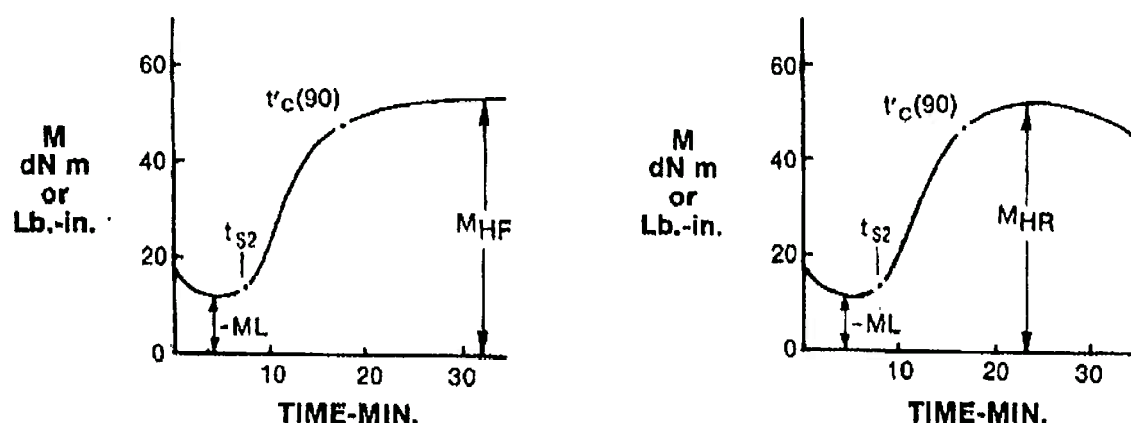


Figura 9 – Curvas de cura típicas de elastômeros.

Um molde de gesso foi fabricado artesanalmente para a peça em poliuretano, já que não poderia ser utilizado o mesmo molde da vulcanização, tendo em vista que se tratava de um molde em quatro partes e sem canal de alimentação, para a inserção da mistura de PU (Figura 10).



Figura 10 – Molde de gesso fabricado.

As dimensões foram respeitadas e a peça obtida poderia ser utilizada para os mesmos ensaios que a peça de borracha natural, e todos os procedimentos de caracterização são realizados, exceto a reometria. Entretanto, não foi possível levar a frente tal comparação prática por motivos de falta de financiamento.

3.3 – Testes Dinâmicos

Testes dinâmicos foram realizados com o corpo de prova cilíndrico de 1" de altura por 0.5" de diâmetro (Figura 11) e também realizado com o próprio coxim

(Figura 2) em nível de comparação, de acordo com as normas ASTM D2231-87 e a DIN 53513.

- ASTM D2231-87: "Standard practice for rubber properties in forced vibration".
- DIN 53513: "determination of viscoelastic properties of elastomers on exposure to forced vibration at non-resonant frequencies".



Figura 11 – Corpo de prova.

Foi utilizado um equipamento de ensaio como o da Figura 12 abaixo. Chamado de MTS, ele é ligado a um computador que capta a variação de carregamento dinâmico com a variação de deslocamento do corpo de prova anteriormente mostrado.

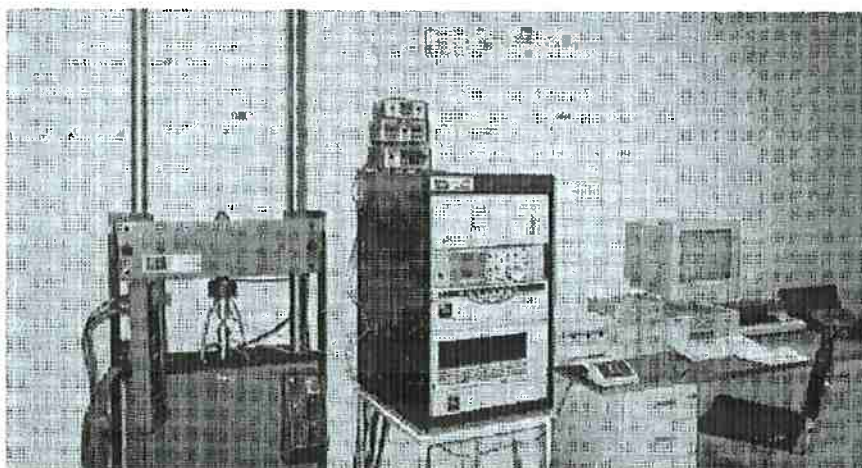


Figura 12 – Sistema MTS de ensaio dinâmico^[4].

O esquema de como funciona o equipamento pode ser visualizado na Figura 13, em seguida, mostrando toda a rotina de aplicação do ensaio.

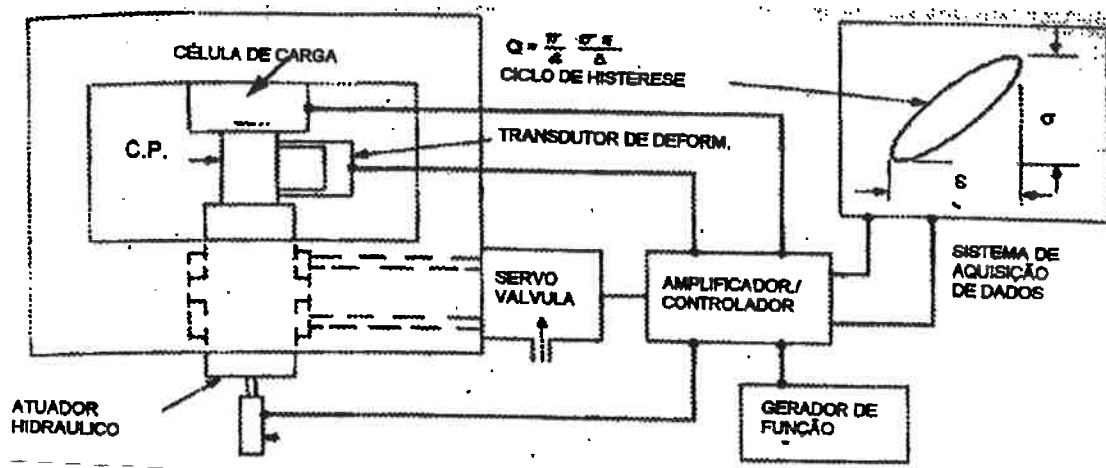


Figura 13 – Fluxograma de funcionamento do sistema MTS^[4].

O ensaio forneceu diversas curvas, exemplificadas na Figura 14, de acordo com cada carregamento fornecido durante a compressão com uma frequência de 1Hz, o que possibilitou a construção de uma pré-curva *carga x deslocamento* do elastômero em questão. A temperatura ambiente era de 25°C.

As curvas estão representadas na Figura 15, e é a partir destas curvas que foram calculadas as planilhas para obtenção da curva MPC para os dois corpos ensaiados, o coxim e o corpinho de prova.

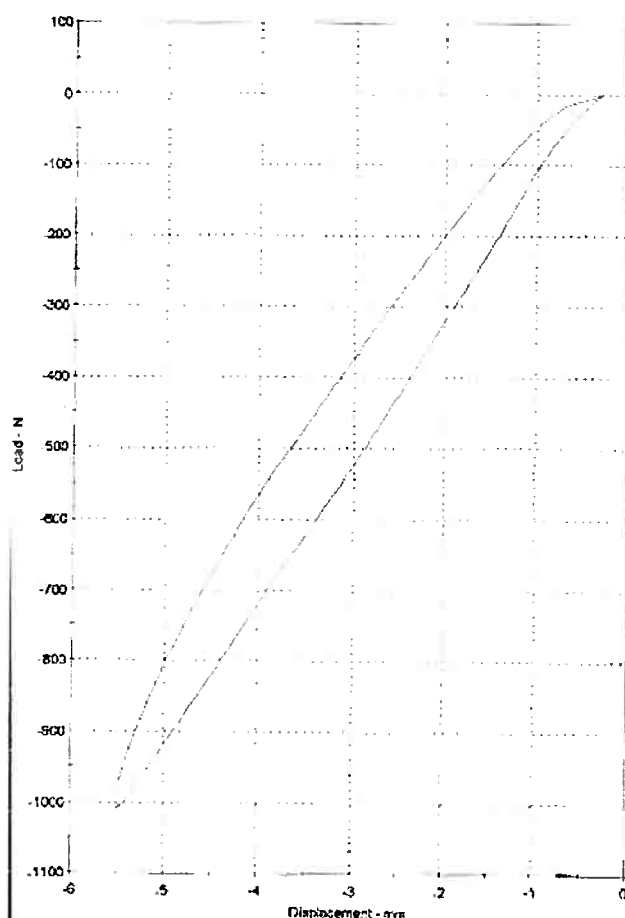


Figura 14 – Gráfico de saída da máquina de ensaios dinâmicos MTS, para o ciclo com 1hz, a 23°C.

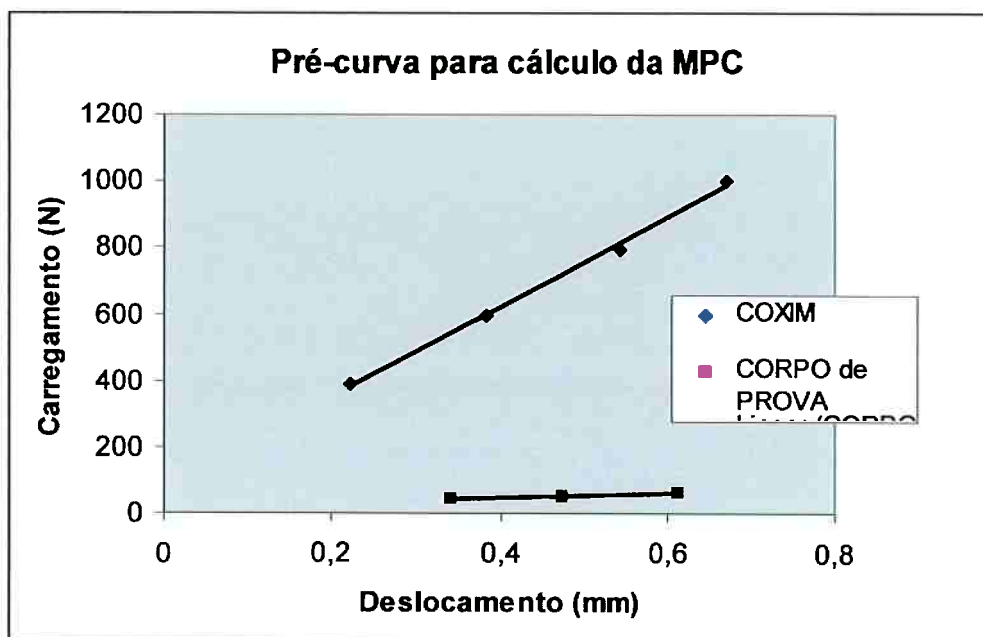


Figura 15 – Gráfico da pré-curva para cálculo da MPC.

Os valores de partida para cada uma das peças se encontram na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 – Valores de partida para a construção das planilhas.

Corpo de Prova			Coxim	
Carregamento (N)	Deslocamento (mm)		Carregamento (N)	Deslocamento (mm)
-39,89474925	-3,423402143		-392	-2,239
-49,94693735	-4,71467871		-598,8	-3,821
-60,22171929	-6,120783203		-798,69	-5,41
			-1000,16	-6,69

É importante lembrar que as planilhas devem servir tanto para a simulação em 2D, quanto para a simulação em 3D.

A partir dos valores tabelados, foi feita uma normalização, envolvendo uma sequência discriminada a seguir.

Primeiramente, foi calculada a área da seção transversal do corpo de prova em questão para o caso do corpo de prova acima mostrado, uma área circular simples, entretanto para o caso do coxim, e uma melhor conferência dos valores, foi calculado uma área aproximada da seção transversal, já que apesar do formato cilíndrico, a peça não tem seções uniformes ao longo de sua altura.

Os valores obtidos são encontrados na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Valores de partida para a construção das planilhas.

Áreas de secção transversal	
Corpo de Prova	0,9503 cm ²
Coxim (<i>aproximada</i>)	10,751 cm ²

Em seguida, foi dada seqüência à normalização com o calculo da tensão nominal,

$$10 \text{ N} = 9,8066 \text{ Kgf}$$

$$T_{\text{nominal}} = \text{carga (kgf)} / \text{área (cm}^2\text{)}.$$

Logo após, é obtida a deformação nominal, onde:

$$d = DL/L_0$$

E subsequêntemente a deformação, com:

$$D = LN((L_0 + x)/h).$$

Possibilitando a obtenção dos valores de tensão REAL previamente normalizados para a curva tensão deformação do material.

Assim,

$$T_{\text{REAL}} = T_{\text{Nominal}} * (1 + d).$$

Obtidos os valores de tensão REAL e suas respectivas deformações, a caracterização da curva MPC (Figura 16) já poderia se dar como encerrado, entretanto como um método de aprimoramento e aproximação da realidade, foi tomado como próximo passo, a definição de um passo uniforme para os valores de deformação, a partir do valor máximo de deformação, isso auxiliará na interpretação da curva pelo computador, melhorando o ensaio.

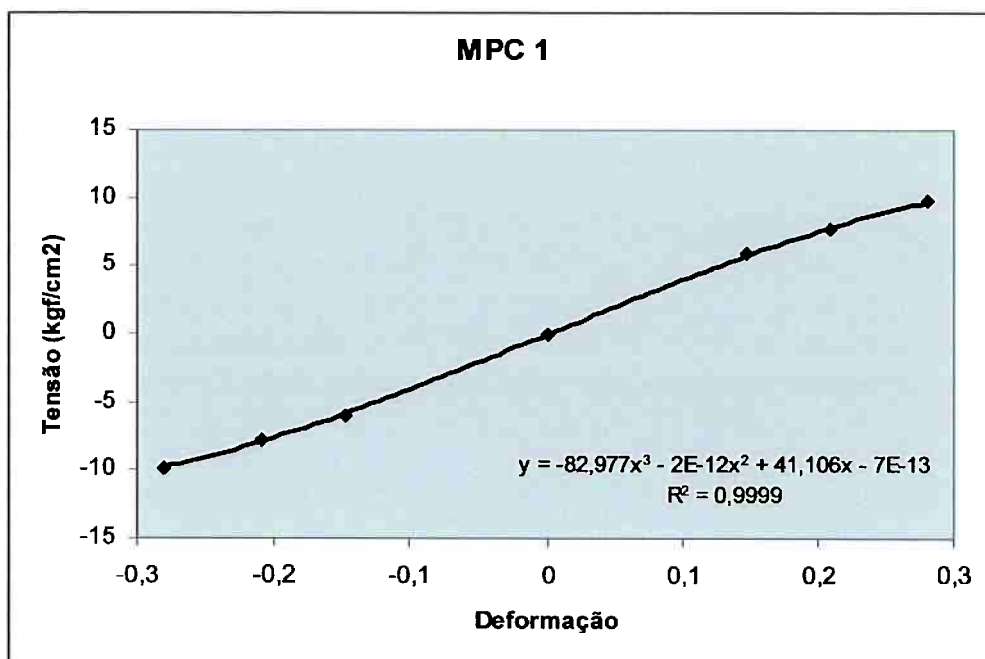


Figura 16 – Curva MPC 1, calculada diretamente com os passos obtidos com o ensaio dinâmico.

Para isto, utilizou-se de três passos positivos e três negativos, simétricos, portanto:

$$|\text{passo}| = |\text{deformação máxima}| / 3.$$

Construiu-se então o gráfico *tensão REAL x deformação*, e a partir da curva aproximada, foram fornecidos os valores de deformação obedecendo aos passos anteriormente calculados e os valores retornados correspondem aos valores de tensão REAL para cada um dos valores de deformação fornecidos.

Em seguida, construiu-se o gráfico *tensão REAL x deslocamento*, onde fornecendo os valores de tensão REAL da curva MPC, se obteve os respectivos valores de deslocamento para sua conferência.

Com isso foi possível a construção do gráfico correspondente a uma curva MPC melhorada em relação à primeira apresentada anteriormente, o que auxilia na interpretação da curva pelo computador. Isto foi feito tanto para o corpo de prova quanto para o coxim, cada um com seus respectivos valores de entrada.

As planilhas completas com os valores de cada peça ensaiada podem ser consultadas no Anexo I, e no disquete fornecido com o trabalho.

Feito isso, partiu-se para as simulações das peças realizadas em 2D e em 3D, de acordo com os procedimentos apresentados nos apêndices A, B e C.

As curvas MPC 2 e 3 utilizadas são tabeladas e mostradas a seguir na Tabela 5, e na Figura 17, respectivamente.

Tabela 5 – Valores de MPC para o corpo de prova e para o coxim(aproximada).

Corpo de Prova – MPC 2			Coxim (aproximação) – MPC 3	
Tensão (kgf/cm ²)	Deformação (%)		Tensão (kgf/cm ²)	Deformação (%)
-9,7333463	-0,280814		-10,9231	-0,1830
-7,0746776	-0,187209		-8,3401	-0,1973
-4,2483146	-0,093605		-5,7570	-0,0915
0	0		-3,1739	-0,0457
4,24831456	0,0936047		0	0
7,07467756	0,1872094		3,1739	0,0457
9,73334631	0,2808141		5,7570	0,0915
			8,3401	0,1973
			10,9231	0,1830

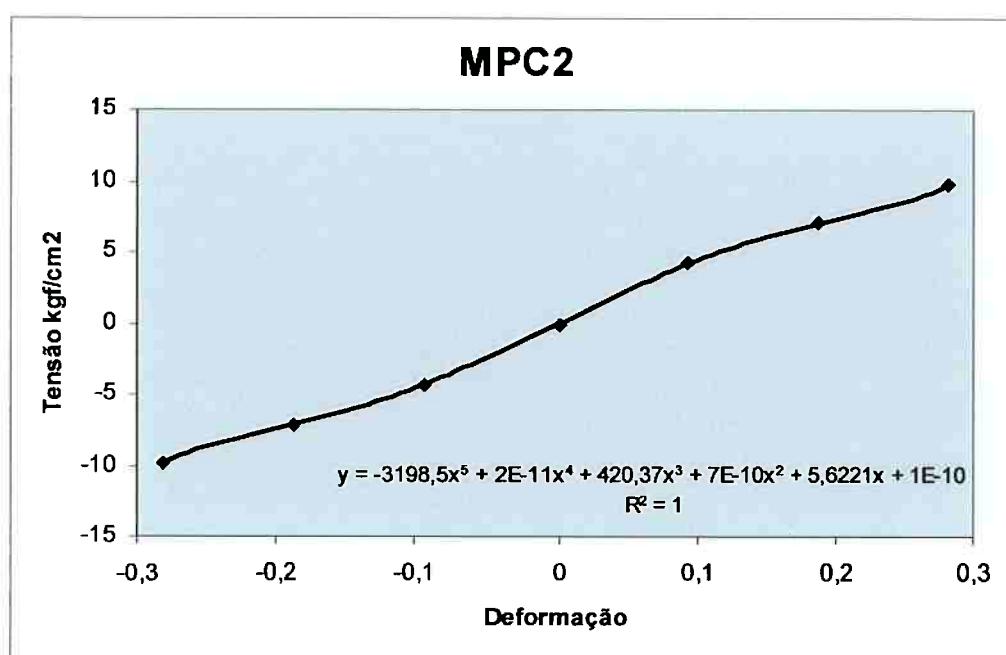


Figura 17 – Curva MPC 2 padrão para ser utilizada nas simulações.

Obtidas as curvas MPC do material, partiu-se então para o próximo passo, o modelamento computacional por FEM.

3.4 – Modelamento Matemático

O Modelamento foi realizado de duas maneiras distintas, utilizando-se de programas com dois tipos de interfaces e linguagem de programações diferentes.

Os aplicativos foram os COSMOS GeoSTAR, cujo tipo de programação é realizada em linhas de código, e fornece uma simulação 2D da peça, e o COSMOS DesignSTAR, que trabalha com uma interface gráfica integrada, e desenhos pré-preparados em aplicações CAD.

Os tipos de saída de ambos os programas são os mesmos e neste trabalho, o intuito de se utilizar ambos os tipos foi o de comparar, ao mesmo tempo em que a veracidade da simulação da peça, a probabilidade de erros ou acertos utilizando-se dois programas com dimensões diferentes.

Na referência [4], foi desenvolvido a seqüência de comando a ser utilizada na simulação através do aplicativo GeoSTAR, adequada logicamente ao coxim presente. Qualquer semelhança na lógica de programação é evidenciada por este motivo. O material dominante neste caso foram compostos elastoméricos, e algumas adaptações ao código também tiveram de ser feitas. Outra alteração foi a realizada na lógica de desenho onde foram feitas parte a parte para garantir a simetria do corpo, devido a diferentes secções presentes no mesmo.

Já para a simulação em 3D, primeiramente foram preparados ambos os desenhos do corpo de prova de acordo com a referência [9], e do corpo de prova em aplicativo CAD, cujo procedimento para a criação do desenho do coxim está discriminado no Apêndice A, e é facilmente adaptado à criação do desenho do corpo de prova.

Logo depois o desenho foi exportado ao DesignSTAR, e programado de acordo com o Apêndice C, para enfim obter-se os resultados desejados para comparação.

Um fator importante a ser observado é a total coerência das unidades a fim de se obter resultados consistentes e dentro dos limites tolerantes. Neste presente trabalho foram preferidos a utilização de valores de tensão em Kgf/cm^2 , e os valores dimensionais em cm, fornecendo na obtenção de resultados, valores em kgf, sendo necessária a transformação posterior para Newton, unidade fornecida pelo ensaio.

3.4.1 – GeoSTAR

Os códigos base utilizados no GeoSTAR tanto para o corpo de prova quanto para o coxim são listados a seguir, nos Quadros 1 e 2 respectivamente, lembrando que a rotina e a lógica de programação está toda explicada no Apêndice B, onde está esquematizada a programação em GeoSTAR.

Quadro 1 – Código para programação do corpo de prova
GEO-CP1.TXT.

```
PT,1,0,0,0
PT,2,.5,0,0
PT,3,.5,2.45,0
PT,4,0,2.45,0
VIEW,0,0,1,0
SCALE,0
SF4PT,1,1,2,3,4,0
M_SF,1,1,1,4,4,12,1,1
NMERGE,1,121,1,0.0001,0,0,0
NCOMPRESS,1,121
EGROUP,1,PLANE2D,0,2,1,0,4,2,0,0
MPROP,1,NUXY,.499,
MPCTYP,1,1
MPC,1,0,1,-.2808,-9.7400,-.2089,-
07.7132,-.1472,-
5.8931,0,0,.1472,5.8931,.2089,07.7
13,0.2808,9.7400,
TIMES,0,4,1
CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,2.5e-01
DCR,1,AL,0,1,1
DCR,2,UY,-.621,2,1
NL_CONTROL,0,1
NL_PLOT,1,100,1,0
R_CHECK
R_NONLINEAR
```

Quadro 2 – Código para programação do corpo de prova
GEO-CP2.TXT.

```
PT,1,0,0,0
PT,2,.5,0,0
PT,3,.5,2.45,0
PT,4,0,2.45,0
VIEW,0,0,1,0
SCALE,0
SF4PT,1,1,2,3,4,0
M_SF,1,1,1,4,4,12,1,1
NMERGE,1,121,1,0.0001,0,0,0
NCOMPRESS,1,121
EGROUP,1,PLANE2D,0,2,1,0,4,2,0,0
MPROP,1,NUXY,.499,
MPCTYP,1,1
MPC,1,0,1,-.2808,-9.7333,-.1872,-
07.0746,-.0936,-
4.2483,0,0,.0936,4.2483,.1872,07.0
746,0.2808,9.7333,
TIMES,0,4,1
CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,2.5e-01
DCR,1,AL,0,1,1
DCR,2,UY,-.621,2,1
NL_CONTROL,0,1
NL_PLOT,1,100,1,0
R_CHECK
R_NONLINEAR
```

Pequenas alterações existem entre eles devido às variações de tipo de MPC obtidas neste trabalho, que foram 3. Todos os resultados obtidos com cada uma das curvas serão demonstrados no próximo capítulo deste presente trabalho.

Todos os ensaios tiveram seus 4 passos analisados, de forma a verificar a veracidade da simulação computacional executada.

O tipo de saída do programa foi para cada $d\Phi$ da secção transversal de cada peça, no caso de simulação axisimétrica, e no caso da simulação por espessura, o resultado já saía direto para comparação.

Os deslocamentos para cada passo foram obtidos com a análise de estados plotados para cada passo ensaiado.

Quadro 3 – Código para programação do coxim GEO-COXIM1.TXT.

```
PT,1,0,0,0
PT,2,2.0,0,0
PT,3,2.0,.6,0
PT,4,1.7,1.3,0
PT,5,1.7,2.7,0
PT,6,2.0,3.4,0
PT,7,2.0,4.0,0
PT,8,0,4.0,0
PT,9,0,3.4,0
PT,10,0,2.7,0
PT,11,0,1.3,0
PT,12,0,.6,0
VIEW,0,0,1,0
SCALE,0
SF4PT,1,2,3,12,1,0
SF4PT,2,3,4,11,12,0
SF4PT,3,4,5,10,11,0
SF4PT,4,5,6,9,10,0
SF4PT,5,6,7,8,9,0
M_SF,1,5,1,4,2,4,1,1
NMERGE,1,75,1,0.0001,0,0,0
NCOMPRESS,1,75
EGROUP,1,PLANE2D,0,2,1,0,4,0,0,0
MPROP,1,NUXY,.499,
MPCTYP,1,1
MPC,1,0,1,-.2808,-9.7400,-.2089,-
07.7132,-.1472,-
5.8931,0,0,.1472,5.8931,.2089,07.7
13,0.2808,9.7400,
TIMES,0,4,1
CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,2.5e-01
DCR,3,AL,0,3,1
DCR,16,UY,-.6232,16,1
NL_CONTROL,0,1
NL_PLOT,1,100,1,0
R_CHECK
R_NONLINEAR
```

Quadro 4 – Código para programação do coxim GEO-COXIM1.TXT.

```
PT,1,0,0,0
PT,2,2.0,0,0
PT,3,2.0,.6,0
PT,4,1.7,1.3,0
PT,5,1.7,2.7,0
PT,6,2.0,3.4,0
PT,7,2.0,4.0,0
PT,8,0,4.0,0
PT,9,0,3.4,0
PT,10,0,2.7,0
PT,11,0,1.3,0
PT,12,0,.6,0
VIEW,0,0,1,0
SCALE,0
SF4PT,1,2,3,12,1,0
SF4PT,2,3,4,11,12,0
SF4PT,3,4,5,10,11,0
SF4PT,4,5,6,9,10,0
SF4PT,5,6,7,8,9,0
M_SF,1,5,1,4,2,4,1,1
NMERGE,1,75,1,0.0001,0,0,0
NCOMPRESS,1,75
EGROUP,1,PLANE2D,0,2,1,0,4,0,0,0
MPROP,1,NUXY,.499,
MPCTYP,1,1
MPC,1,0,1,-.2808,-9.7333,-.1872,-
07.0746,-.0936,-
4.2483,0,0,.0936,4.2483,.1872,07.0
746,0.2808,9.7333,
TIMES,0,4,1
CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,2.5e-01
DCR,3,AL,0,3,1
DCR,16,UY,-.6232,16,1
NL_CONTROL,0,1
NL_PLOT,1,100,1,OR_CHECK
R_NONLINEAR
```

Como o objetivo deste trabalho é a simulação do corpo de prova a partir de uma curva de propriedade do material (MPC), característica do material que a compõe, o próximo passo foi fornecer os mesmos valores ao aplicativo de FEM. Partiu-se então para a programação, encontrada no Quadro 2, e a simulação do coxim pode ser realizada de modo satisfatório como poderá ser visto a seguir.

Todas as demonstrações, resultados e plotagens estarão contidas nos próximos tópicos.

3.4.2 – DesignSTAR

Para a simulação através do DesignSTAR, foram criados estudos diferentes para cada nível de carregamento. Este valor de entrada foi fornecido no comando LOADS, do DesignSTAR, como mostra sua janela de configuração na Figura 18 abaixo.

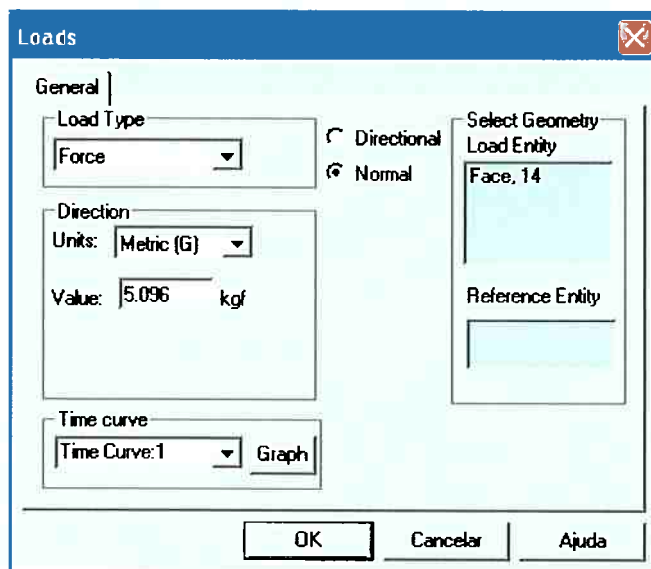


Figura 18 – Janela de entrada para carregamento solicitado

O DesignSTAR fornece os seus resultados plotados na Figura em 3D, possibilitando uma análise bastante apurada dos focos de tensão localizadas ao longo da peça. Na Figura 19, são mostradas como exemplo, as deformações ao longo do corpo de prova simulado.

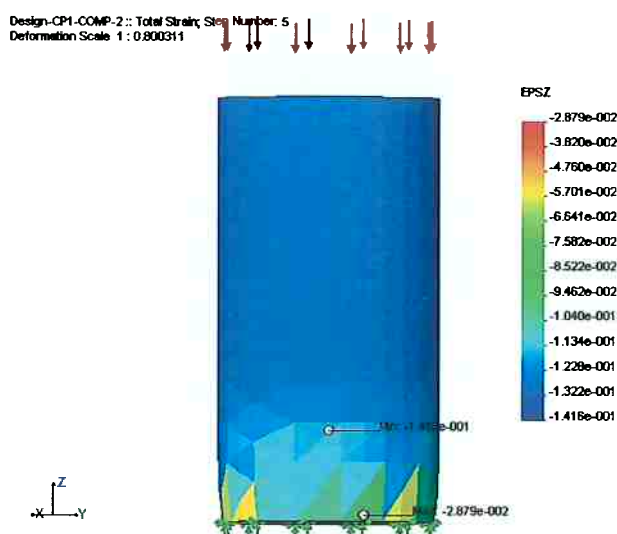


Figura 19 – Deformações resultantes da simulação com carregamento aplicado de 5.096 kgf.

A forma de obtenção dos resultados e subseqüentes comparações neste aplicativo foram realizadas através da comparação dos valores de deslocamento ao

A forma de obtenção dos resultados e subseqüentes comparações neste aplicativo foram realizadas através da comparação dos valores de deslocamento ao longo do comprimento, ocasionado pela pressão uniforme aplicada. O eixo z então foi analisado com cada um dos três tipos de carregamento que forneceram forças de reação e deslocamento respectivas para análise posterior com a calculada na planilha como explicado na seção 3.3 deste presente trabalho.

3.4.3 – Área de secção transversal aproximada

Uma alternativa à confecção do corpo de prova segundo a norma DIN mencionada anteriormente, foi o cálculo da MPC com uma aproximação da área (valor encontrado na Tabela 3 – MPC3).

A curva MPC correspondente a esta aproximação está representada na Figura 20 abaixo. O método é o mesmo para o corpo de prova, entretanto esta curva só foi utilizada para simulação do coxim.

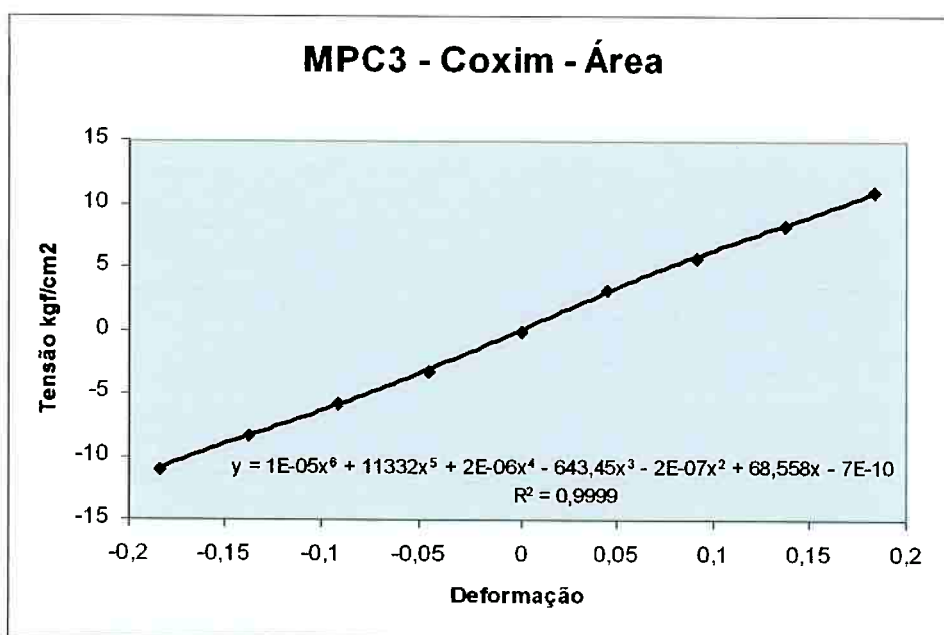


Figura 20 – Curva MPC 3 obtida a partir de valores aproximados da área da secção transversal do coxim.

Todos os resultados e suas respectivas dissertações se encontram no próximo tópico deste presente trabalho.

4 – Resultados e discussão

Realizados todas as simulações descritas no tópico anterior, foi feita uma reunião dos valores mais significativos para serem comparados e discutidos a fundo neste momento.

Como já mencionado no tópico anterior, foram utilizados diferentes tipos de análises e, conseqüentemente, obtidos diferentes tipos de resultados, além da utilização de três curvas *tensão x deformação* (MPC) características em todas as alternativas utilizadas.

4.1 – Validação das curvas MPC

Para realizar tal validação, foi ensaiado o corpo de prova cilíndrico em esforços de compressão via FEM, como o realizado pelo sistema MTS, fornecido gentilmente pelo professor orientador deste trabalho, Ronald Plaut.

Primeiramente, utilizando o código *GEO-CP1.TXT* encontrado no disquete fornecido neste trabalho, o aplicativo GeoSTAR foi programado de maneira a ensaiar o corpo de prova axisimetricamente. Utilizando-se então a curva MPC 1, como na Figura 16, através do comando *DISLIST,1,4,1,9,0,0*, foi obtido a primeira série de forças de reação para o primeiro nível de deslocamento.

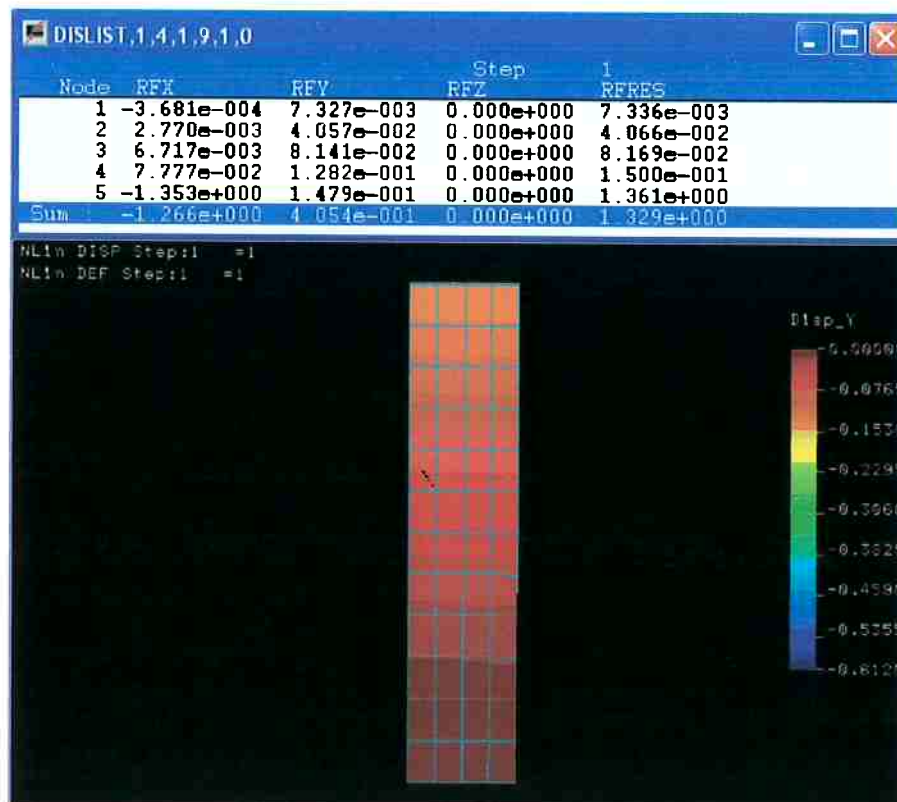


Figura 21 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 1 da simulação do corpo de prova e seu deslocamento MPC1.

A Figura 21, revela o início do deslocamento no eixo Y do corpo de prova, e as forças de reação para os nós 1,3,5,7,9, para um $d\Phi$ da secção transversal da base do mesmo.

Para se obter os outros deslocamentos e subseqüentes valores de RRFY, foi variado no comando já mencionado, a opção referente ao passo de ensaio. No comando *DISLIST,1,4,1,9,0,0*, variou-se o número em negrito de 1 a 4

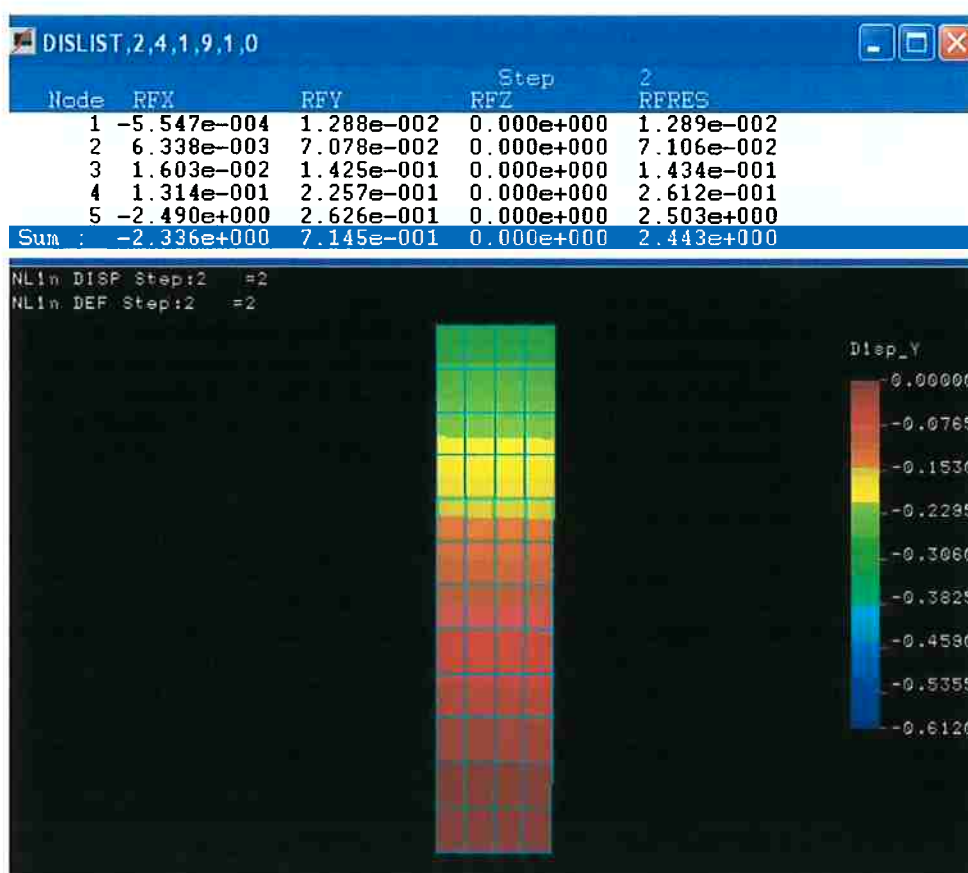


Figura 22 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 2 da simulação do corpo de prova e seu deslocamento MPC1.

Na Figura 22, foi possível observar o início de uma deformação mais acentuada na região dos elementos próximos a base. Isso se deve ao fato do aumento do deslocamento em relação ao primeiro passo.

Percebe-se também uma maior liberdade de deformação na região central do corpo de prova.

Entretanto neste passo, acontece a maior discrepância em relação ao valor encontrado com a simulação via MTS. Como o corpo de prova é muito pequeno, e seu composto elastomérico não muito duro, este desvio pode ser justificado, pois causa uma certa confusão no leitor da máquina.

Na Figura 23, pode ser observado além do aumento da deformação, que a resultante das forças começam a se aproximar novamente da curva *Carregamento X Deslocamento* experimental, obtida pelo MTS.

Não deve ser esquecido que esta simulação foi realizada axisimetricamente, o que causa a plotagem somente de meia secção transversal do corpo de prova, e com isso, as “ondas” de deslocamento plotadas, tendem a “cair” para um lado, sem simetria, nas Figuras plotadas.

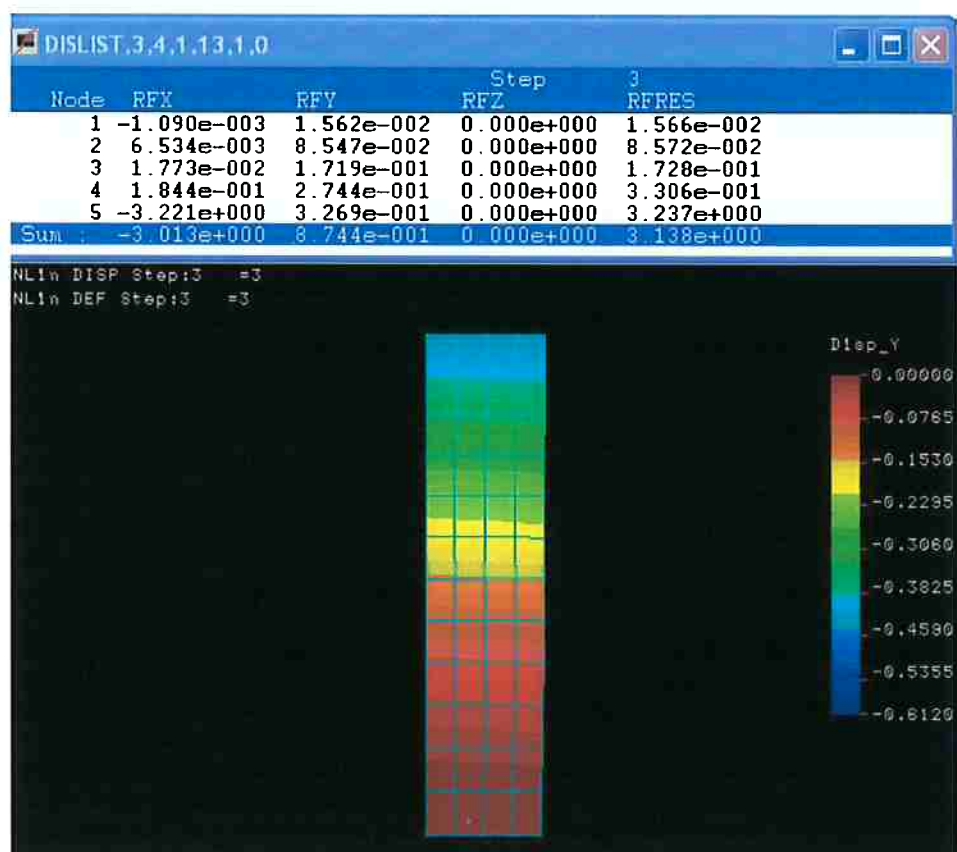


Figura 23 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 3 da simulação do corpo de prova e seu deslocamento MPC1.

Na Figura 24 a seguir, está plotada a última fase do deslocamento no corpo de prova, e foi curiosamente a que mais se aproximou do ensaio pelo MTS, cerca de 2% de diferença, valor justificado pelas condições ambientes do ensaio, que não foram configuradas nesta simulação para evitar maiores complicações, e aumento de variáveis.

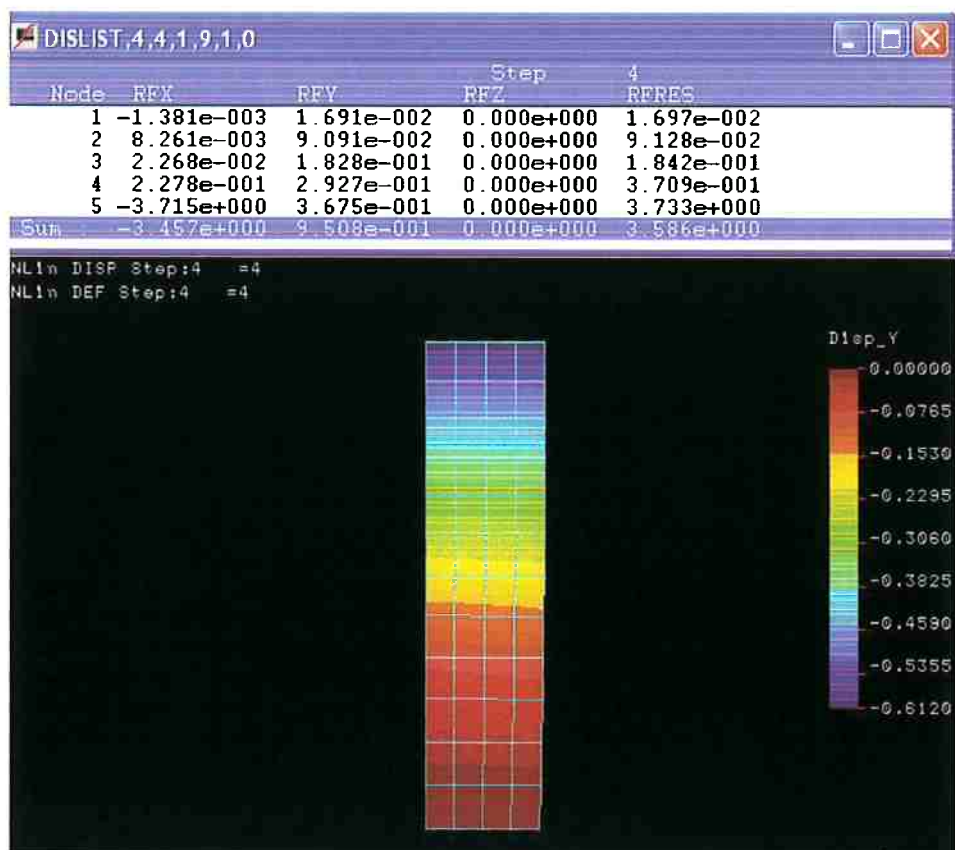


Figura 24 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 4 da simulação do corpo de prova e seu deslocamento MPC1.

As Figuras plotadas para todos níveis de tensão normal e deslocamento na peça durante o ensaio, se encontram no Anexo I deste trabalho.

Os valores para a curva MPC1 de RRFY e deslocamento, encontram-se na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Resultantes das forças no eixo Y encontradas para a curva MPC1 no corpo de prova.

STEP	Deslocamento (cm)	RRFY1 lido (kgf)	RRFY1 (kgf)
4	0,612	0,9508	5,97405
3	0,459	0,8744	5,49402
2	0,306	0,7145	4,48934
1	0,153	0,4054	2,5472

Os valores da última coluna RFY1, são obtidos multiplicando a coluna de valores lidos no aplicativo por $2 \cdot \pi()$, possibilitando que seja abrangido toda a área da secção transversal. Este recurso é utilizado para todos os valores de “Reaction Forces” obtidos neste trabalho.

A seguir foi feita a simulação com a curva MPC 2 (código *GEO-CP2.TXT*), caracterizada na Tabela 4, e um perfil de tensões encontradas ao longo do eixo Y do corpo de prova, pode ser visualizado na Figura 25 a seguir.

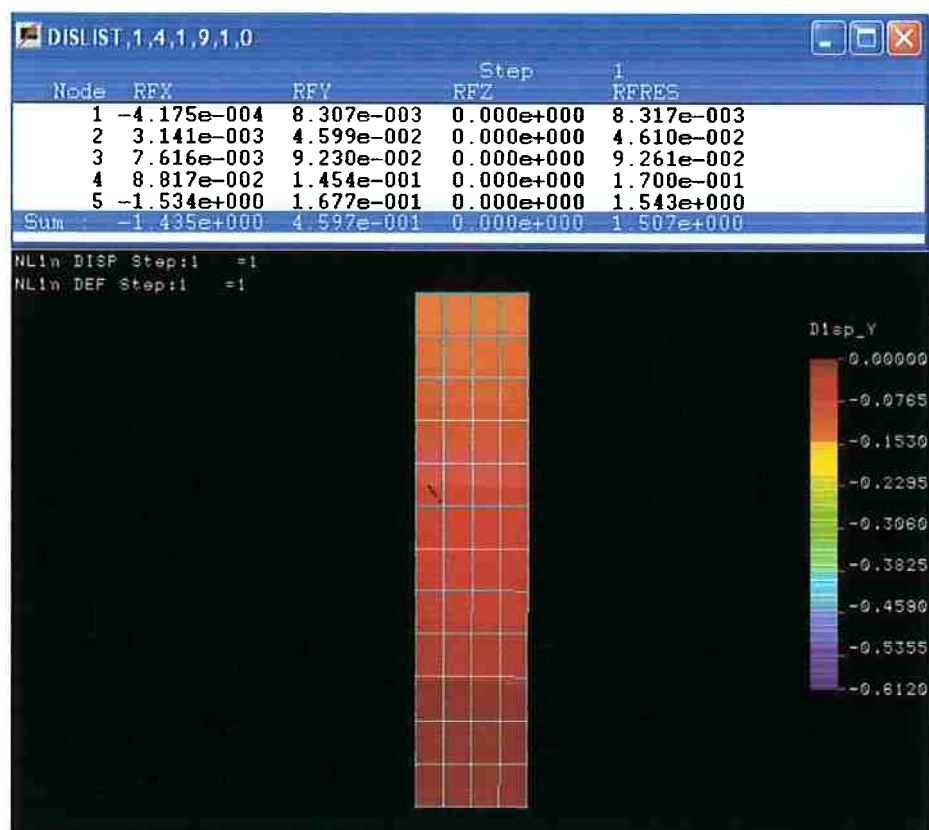


Figura 25 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 1 da simulação do corpo de prova e seu deslocamento MPC2.

Diferentemente dos valores obtidos por MPC1, as forças de reação para este passo, com a MPC2, diferiram muito em relação ao esperado, cerca de 17%, enquanto o ensaio com a MPC1 alcançou aproximadamente 3% de diferença. A Figura 25 representa o deslocamento para o passo 1 da simulação com MPC2.

Na Figura 26, é possível observar o deslocamento para o passo 2 utilizando a curva MPC2. Entretanto, o valor de RRFY não foi também muito próximo do esperado, apesar de próximo do valor obtido com a curva MPC1, a discrepância aumentou em relação ao resultado experimental.

Desta vez, a diferença foi em torno de 20%, bastante grande, se considerado que os valores para serem considerados devem assumir uma diferença em torno de 7% do valor experimental.

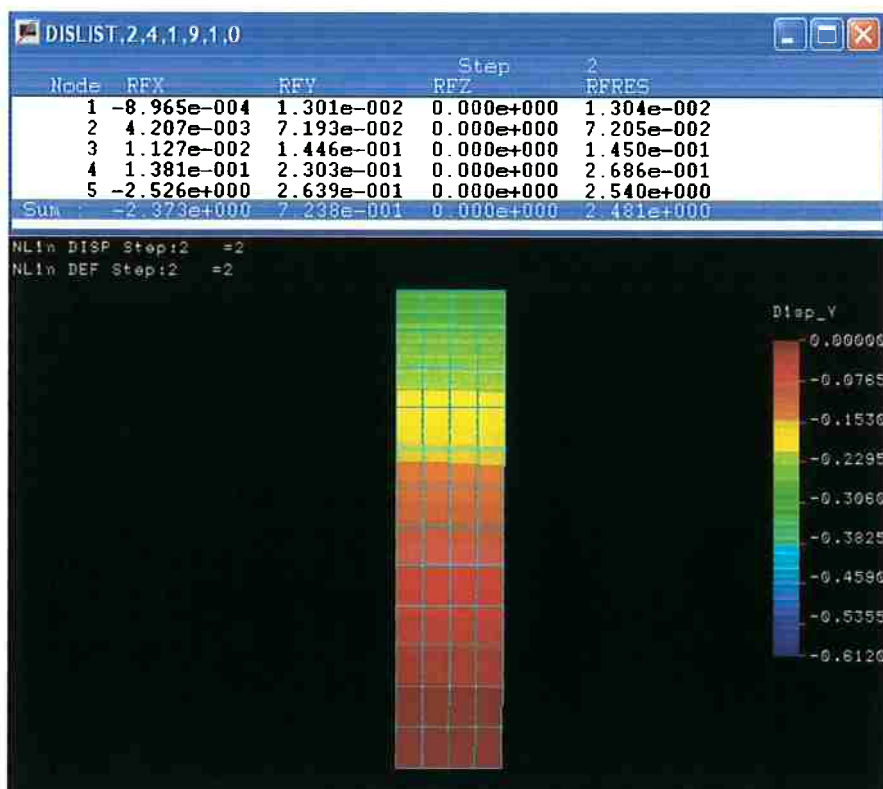


Figura 26 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 2 da simulação do corpo de prova e seu deslocamento MPC2.

Os valores obtidos para o passo 3, não diferiram em quantidade significativa dos obtidos para a curva MPC1, e com isso mantiveram uma diferença de aproximadamente 9% do valor experimental

Com relação ao passo 4, novamente a curva se aproximou da experimental, e ficou em torno de 3% distante da mesma.

Com o mesmo procedimento utilizado para a curva MPC1, foram obtidos os valores de carregamento para cada deslocamento no aplicativo COSMOS GeoSTAR, possibilitando logo após uma comparação entre as duas curvas. Estes valores são encontrados na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 – Resultantes das forças no eixo Y encontradas para a curva MPC2 no corpo de prova.

STEP	Deslocamento (cm)	RRFY2 lido (kgf)	RRFY2 (kgf)
4	0,612	0,9499	5,9684
3	0,459	0,8727	5,48334
2	0,306	0,7238	4,54777
1	0,153	0,4597	2,88838

As figuras representando os níveis de tensão normal e deslocamento plotados para o corpo de prova utilizando a curva MPC2, se encontra no Anexo I deste presente trabalho.

Uma comparação primária entre os resultados obtidos com as duas curvas, dá uma idéia de que os dois métodos de obtenção da curva apresentam pouca variação entre os valores obtidos, conforme mostra o gráfico da Figura 27.

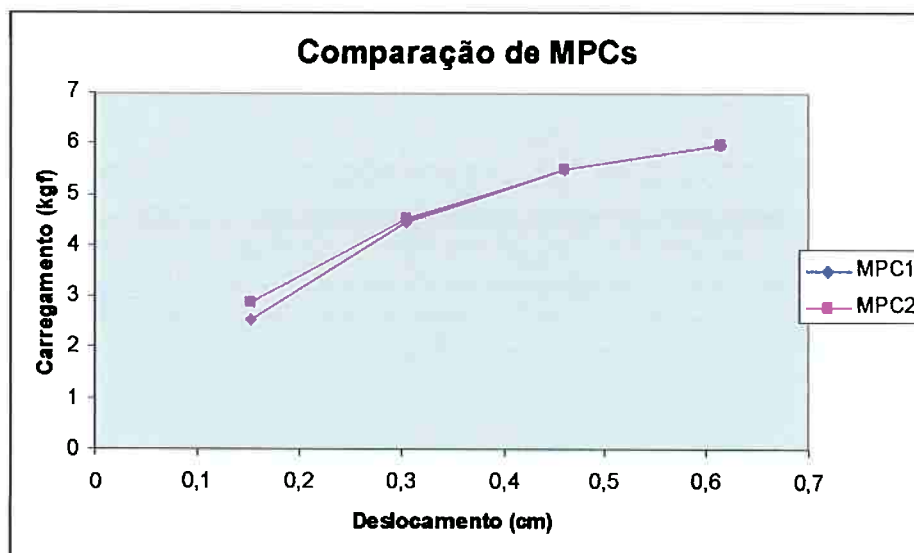


Figura 27 – Comparação entre os resultados de RRFY obtidos para as curvas MPC1 e MPC2.

Entretanto a parte crítica se caracteriza pelo primeiro valor de ambas as curvas, e que causam a maior disparidade em comparação com os valores calculados a partir do ensaio.

Para tal, construiu-se uma curva *Carregamento x Deslocamento* (Figura 28), a partir dos valores obtidos com o ensaio dinâmico, e a partir da equação desta curva, foi possível obter os valores do carregamento para cada deslocamento encontrado nos 4 passos da simulação, e com isso ter os valores obtidos pela MTS.

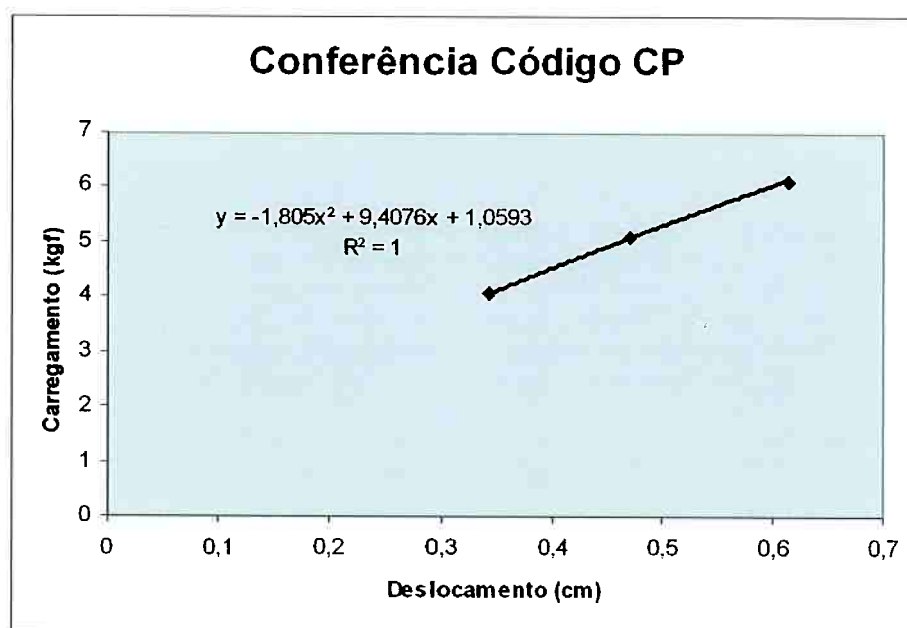


Figura 28 – Curva obtida com os valores obtidos com o ensaio MTS, para o corpo de prova.

Com a equação da curva (Figura 28), como mencionado anteriormente, obteve-se então a Tabela 8 a seguir, onde se encontram os valores de RRFY calculados com o MTS, os resultantes da simulação com a curva MPC1 e com a curva MPC2.

Tabela 8 – Comparação de valores ensaiados com os simulados.

STEP	Desl (cm)	RRFY MTS (kgf)	RRFY1 lido (kgf)	RRFY1 (kgf)	%	RRFY2 lido (kgf)	RRFY2 (kgf)	%
4	0,612	6,140661826	0,9508	5,97405	-2,71321	0,9499	5,9684	-2,8053
3	0,459	4,997088127	0,8744	5,49402	9,9444	0,8727	5,48334	9,7306
2	0,306	3,769003256	0,7145	4,48934	19,112	0,7238	4,54777	20,662
1	0,153	2,456407214	0,4054	2,5472	3,6963	0,4597	2,88838	17,586

Foram então comparados os valores em forma de gráfico para fornecer uma melhor visualização da diferença encontrada entre as simulações. O gráfico representado na Figura 29 possibilitou uma melhor análise entre os métodos.

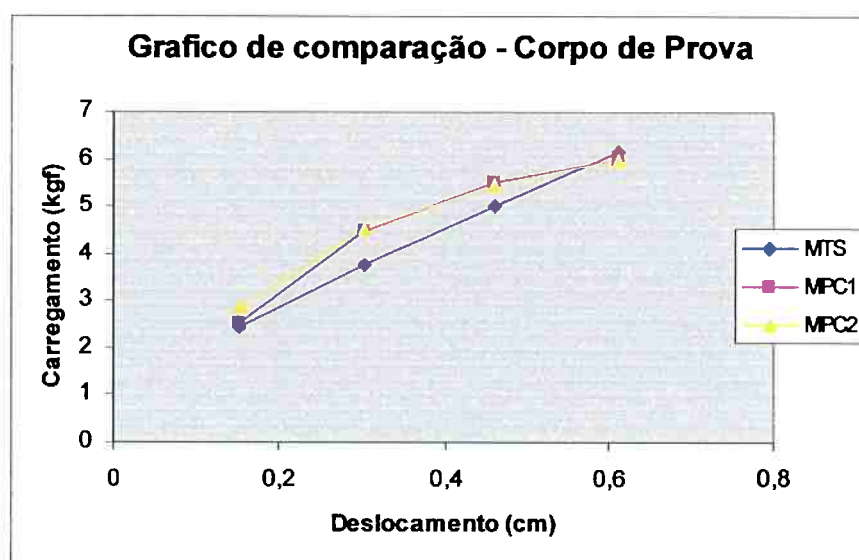


Figura 29 – Curva de comparação dos carregamentos obtidos com a simulação e o MTS.

A partir deste gráfico foi possível validar a curva MPC 1 e a curva MPC 2, e com isso possibilitar a utilização das mesmas curvas no ensaio do coxim, que virão na sequência.

Percebeu-se que a linearidade dos valores ensaiados foi deixada de lado pela simulação e a proximidade dos valores existiu de forma acentuada nos extremos dos 4 valores obtidos. Entretanto nos dois valores intermediários, a não-linearidade se fez valer e a proximidade não existiu como nos valores extremos. Isto tornou possível a obtenção de uma curva *Carregamento x Deslocamento* característica e

confiável de elastômeros com o aparecimento inclusive de um patamar a partir do último ponto.

Como não se diferiram muito entre si, foi decidido por realizar o ensaio com ambas as curvas MPC1 e MPC2, para verificar qual seria a consequência desta diferença da curva experimental, na simulação do coxim.

4.2 – Simulação do coxim por FEM

A seguir serão demonstrados os resultados e suas respectivas considerações na sequência.

4.2.1 – GeoSTAR

A simulação então foi realizada para o coxim, utilizando-se primeiramente o código presente no Quadro 3 (GEO-COXIM1.TXT). O procedimento foi o mesmo realizado para o corpo de prova.

Na Figura 30, a representação do deslocamento aplicado no coxim para o passo 1, com a curva MPC1, percebe-se que pra pequenas deformações, esta curva não representou de forma muito leal a curva experimental obtida com o MTS para o coxim.

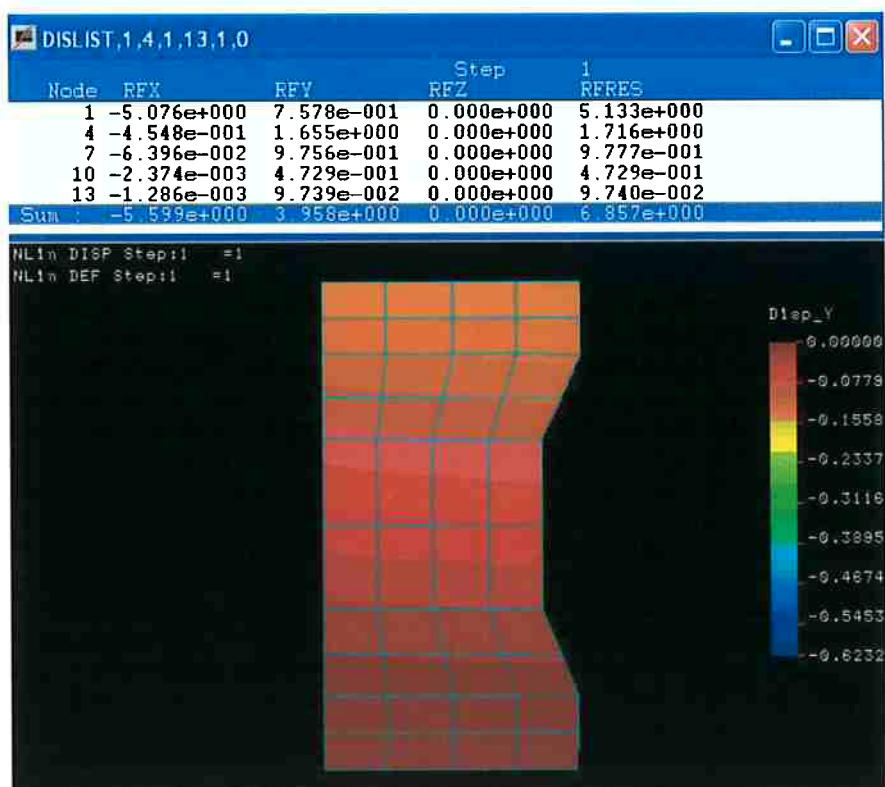


Figura 30 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 1 da simulação do coxim e seu deslocamento MPC1.

Totalmente contra o esperado, sendo que o valor para o corpo de prova foi muito próximo, a RRFY obtida ficou cerca de 14% fora da curva experimental.

Entretanto para os outros passos, a proximidade com a curva experimental existiu de maneira mais forte que para o corpo de prova, fatos que podem ser visualizados na Tabela 12, que concentra todos os resultados.

Através do comando *DISLIST,4,4,1,13,0,0*, e variando o valor em negrito entre 1 e 4, o aplicativo forneceu os valores de RRFY, que para a curva MPC1, estão tabelados a seguir (Tabela 9).

Tabela 9 – Resultantes das forças no eixo Y encontradas para a curva MPC1 no coxim.

STEP	Deslocamento (cm)	RRFY1 lido (kgf)	RRFY1 (kgf)
4	0,6232	14,88	93,4938
3	0,4674	11,83	74,3301
2	0,3116	7,917	49,744
1	0,1558	3,958	24,8688

Os valores da coluna RRFY1 foram obtidos pela multiplicação da coluna anterior por $2\pi()$, pela mesma razão do caso do corpo de prova.

As plotagens de deslocamentos e tensões normais no coxim estão presentes no Anexo II, no final deste trabalho.

A seguir, a programação foi feita com o código do Quadro 4, referente a curva MPC2 (GEO-COXIM2.TXT).

Apesar da forte proximidade do ensaio com a curva MPC1 com a curva experimental, o ensaio com a curva MPC2, se mostrou melhor em relação a todos os 4 pontos.

Logo no primeiro passo, com o mínimo deslocamento, e utilizando a curva MPC2 que foi a que menos se aproximou da curva experimental, quando no ensaio do corpo de prova, o valor retornado de forças de reação foi algo em torno de 2,5% menor que o valor encontrado com o MTS.

O valor pode ser visualizado juntamente com o deslocamento causado na Figura 31 a seguir.

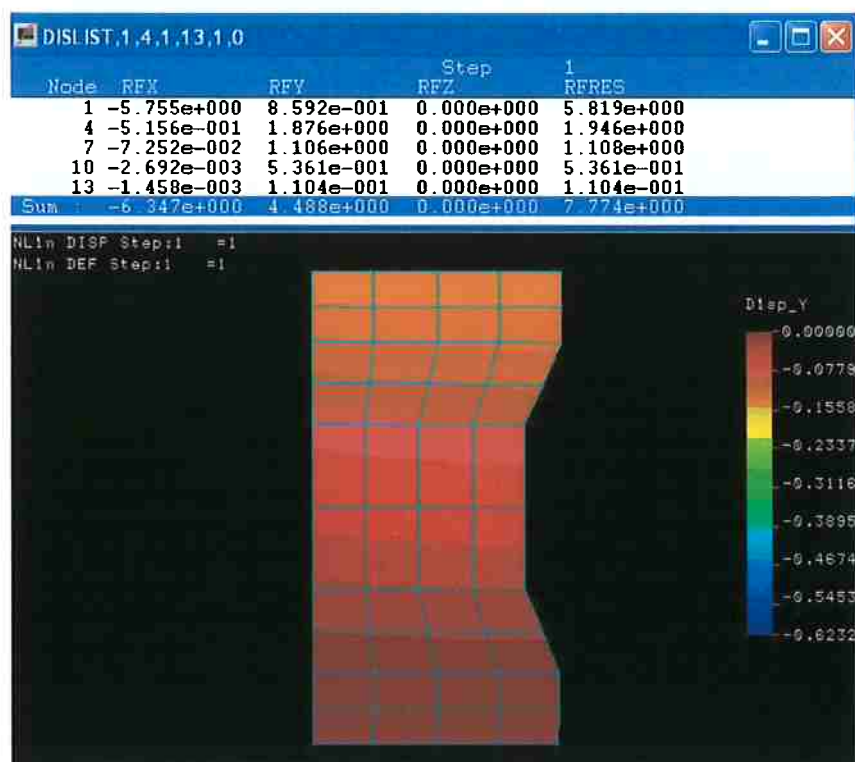


Figura 31 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 1 da simulação do coxim e seu deslocamento MPC2.

Para o passo seguinte, 3, o valor foi um pouco mais distante da curva experimental do que o passo 3 com a MPC1, mas mesmo assim, se distanciou cerca de 6%, e no passo 2, o mesmo ocorreu, e a distância foi de 4%.

No último passo, a distância para a curva obtida com o MTS quase não existiu, e como pode ser visto na Figura 32, o valor de RRFY ficou cerca de 0,5% distante, quase da mesma maneira que para a curva MPC1.

Os valores tabelados (Tabela 10) para a curva MPC2 se encontram a seguir.

Tabela 10 – Resultantes das forças no eixo Y encontradas para a curva MPC2 no coxim.

STEP	Deslocamento (cm)	RRFY2 lido (kgf)	RRFY2 (kgf)
4	0,6232	14,87	93,431
3	0,4674	11,91	74,8327
2	0,3116	8,866	55,7067
1	0,1558	4,488	28,1989

As figuras representando as plotagens de ambos deslocamentos e tensões normais, se encontram discriminadas no Anexo II.

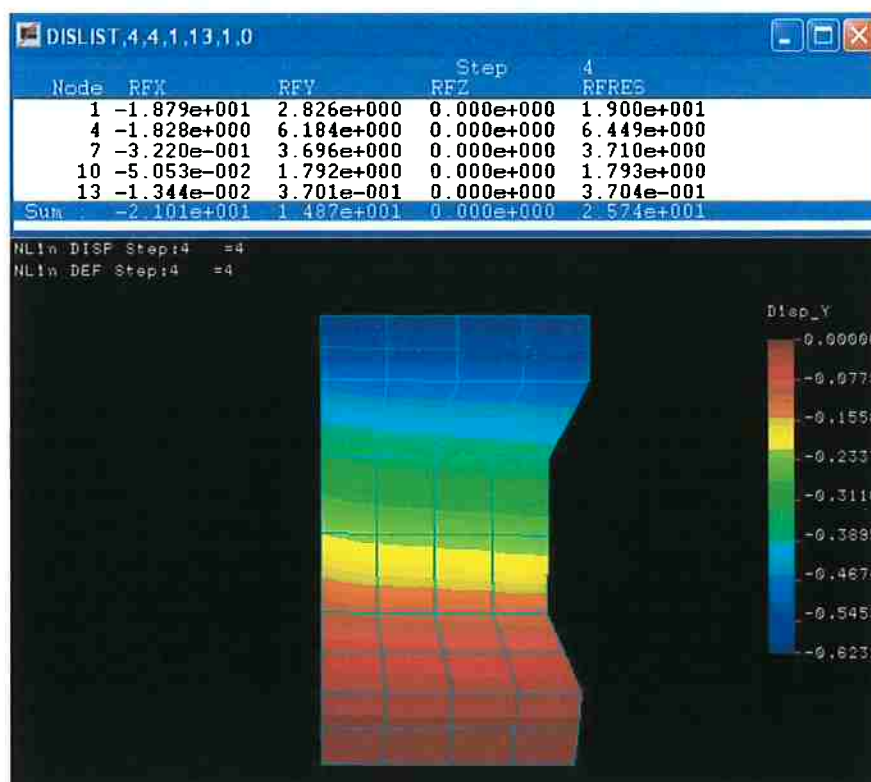


Figura 32 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 4 da simulação do coxim e seu deslocamento MPC2.

Para o coxim, foi aproximada uma curva MPC3, a partir de uma área aproximada, e o código utilizado também sofreu modificações.

O código GEO-COXIM-AREA.TXT, se encontra no Quadro 5 abaixo, e suas modificações se caracterizam principalmente pelo formato desenhado, não somente metade da peça.

A simulação foi feita de maneira a utilizar a opção em Element Groups do Cosmos GeoSTAR, para o método “Plane Stress” e com isso, se introduziu no código o comando RCONST, responsável pela definição de uma espessura da peça. O aplicativo cria um tipo de paralelepípedo, com o formato da peça, e a referida espessura.

Por este motivo, a simulação fica um pouco prejudicada, pois não se tem uma área de secção transversal uniforme ao longo da peça, porém os resultados não foram tão ruins assim.

Quadro 5 – Código para programação do coxim GEO-COXIM-AREA.TXT.

```

PT,1,2.0,0,0
PT,2,2.0,.6,0
PT,3,1.7,1.3,0
PT,4,1.7,2.7,0
PT,5,2.0,3.4,0
PT,6,2.0,4.0,0
PT,7,-2.0,4.0,0
PT,8,-2.0,3.4,0
PT,9,-1.7,2.7,0
PT,10,-1.7,1.3,0
PT,11,-2.0,.6,0
PT,12,-2.0,0,0
VIEW,0,0,1,0
SF4PT,1,1,2,11,12,0
SF4PT,2,2,3,10,11,0
SF4PT,3,3,4,9,10,0
SF4PT,4,4,5,8,9,0
SF4PT,5,5,6,7,8,0
M_SF,1,5,1,4,2,4,1,1
NMERGE,1,75,1,0.0001,0,0,0
NCOMPRESS,1,75
EGROUP,1,PLANE2D,0,2,0,0,4,0,0,0
MPROP,1,NUXY,.499,
RCONST,1,1,1,2,2.68,0
MPCTYP,1,1
MPC,1,0,1,-.1830,-10.9232,-.1372,-
08.3401,-.0915,-05.7570,-0.0457,-
03.1739,0,0,0.0457,3.1739,0.0915,0
5.5750,0.1372,8.3401,0.1830,10.923
1
DCR,3,AL,0,3,1
DCR,47,UY,-.6232,55,1
TIMES,0,4,1
CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,2.5e-01
NL_CONTROL,0,1
NL_PLOT,1,100,1,0
R_CHECK
R_NONLINEAR

```

No caso deste tipo de simulação, apesar de existirem variáveis que aumentariam a incerteza do resultado, a proximidade com o valor obtido no MTS foi bastante próxima em todos os passos, inclusive nos passos 2 e 3, que foram os que mais se distanciaram quando utilizadas as curvas MPC1 e MPC2.

Na Figura 33, é possível observar o perfil de deslocamento para o passo 2, que foi o que mais se aproximou dentre os 3 ensaios. Ficou a aproximadamente 3,4% do valor experimental.

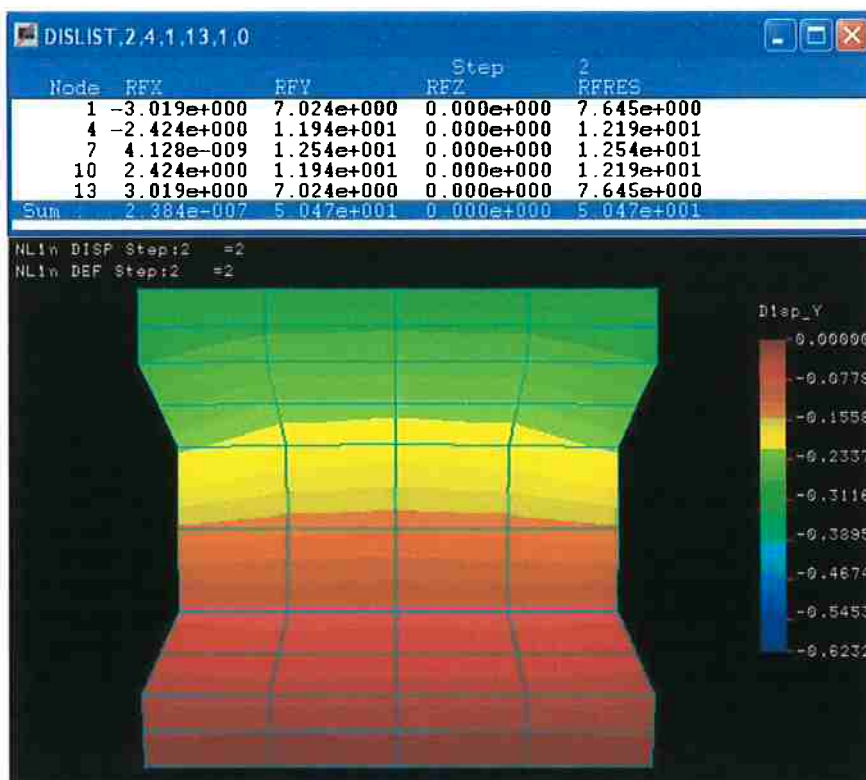


Figura 33 – Resultante das forças no eixo Y para o passo 2 da simulação do coxim e seu deslocamento MPC3.

Percebe-se também, a diferença da plotagem, caracterizada pela programação diferente considerando a aplicação de esforço de tensão no plano XZ.

Os valores obtidos com a curva MPC3 aproximada estão representados na Tabela 11 a seguir.

Tabela 11 – Resultantes das forças no eixo Y encontradas para a curva MPC3 no coxim.

STEP	Deslocamento (cm)	RRFY3 (kgf)
4	0,6232	95,09
3	0,4674	72,78
2	0,3116	50,47
1	0,1558	27,42

A partir destes valores encontrados nas tabelas 8, 9 e 10, foi construído um gráfico para comparação dos 3 métodos (Figura 34).

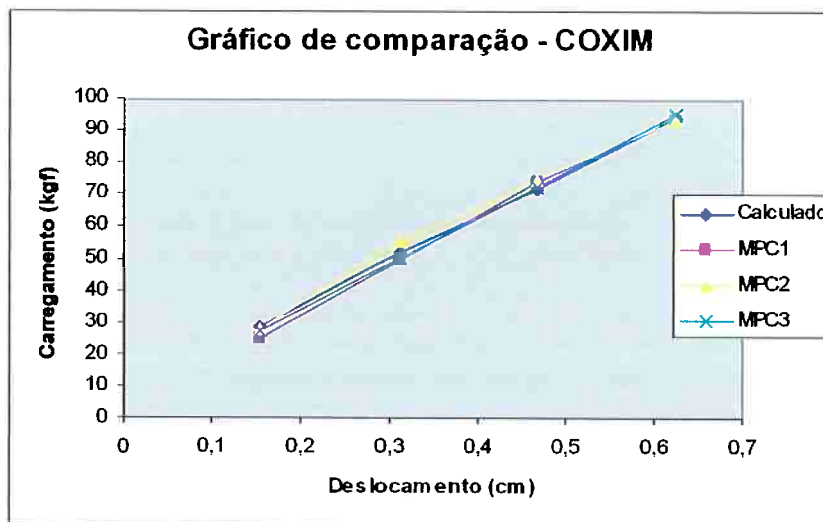


Figura 34 – Comparação entre os resultados de RRFY obtidos para as curvas MPC1, MPC2 e MPC3.

Da mesma maneira que para o corpo de prova, foi necessário levantar uma curva *Carregamento x Deslocamento* a partir dos valores obtidos no ensaio, para obter então os valores calculados necessários para comparação com os valores obtidos nas três simulações aqui realizadas. O gráfico está representado na Figura 35 a seguir.

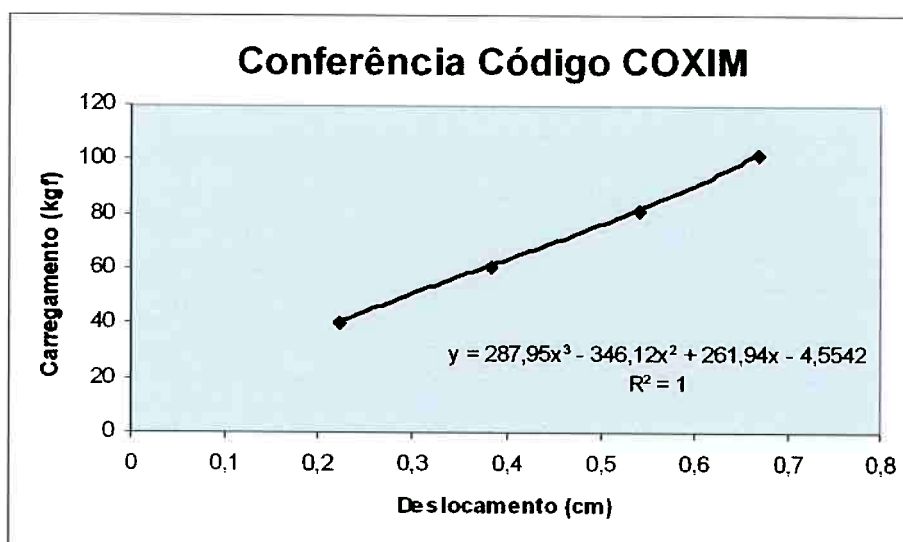


Figura 35 – Curva obtida com os valores obtidos com o ensaio MTS, para o corpo de prova.

A partir da equação obtida, fornecendo os valores de deslocamento para cada "STEP", foi possível calcular os valores de carregamento necessários para a comparação. Os valores calculados e os simulados estão presentes na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12 – Comparação de valores ensaiados com os simulados para o coxim.

STEP	Desl (cm)	RRFY MTS (kgf)	RRFY1 lido (kgf)	RRFY1 (kgf)	%	RRFY2 lido (kgf)	RRFY2 (kgf)	%	RFY3 (kgf)	%
4	0,6232	93,9559	14,88	93,4938	0,49191	14,87	93,431	0,55879	95,09	-1,207
3	0,4674	71,6646	11,83	74,3301	-3,7193	11,91	74,8327	-4,4207	72,78	-1,5563
2	0,3116	52,1717	7,917	49,744	4,65345	8,866	55,7067	-6,7756	50,47	3,26185
1	0,1558	28,9434	3,958	24,8688	14,0778	4,488	28,1989	2,57227	27,42	5,2635

Então, construiu-se um gráfico (Figura 36) para comparar os três métodos utilizados com o ensaio dinâmico.

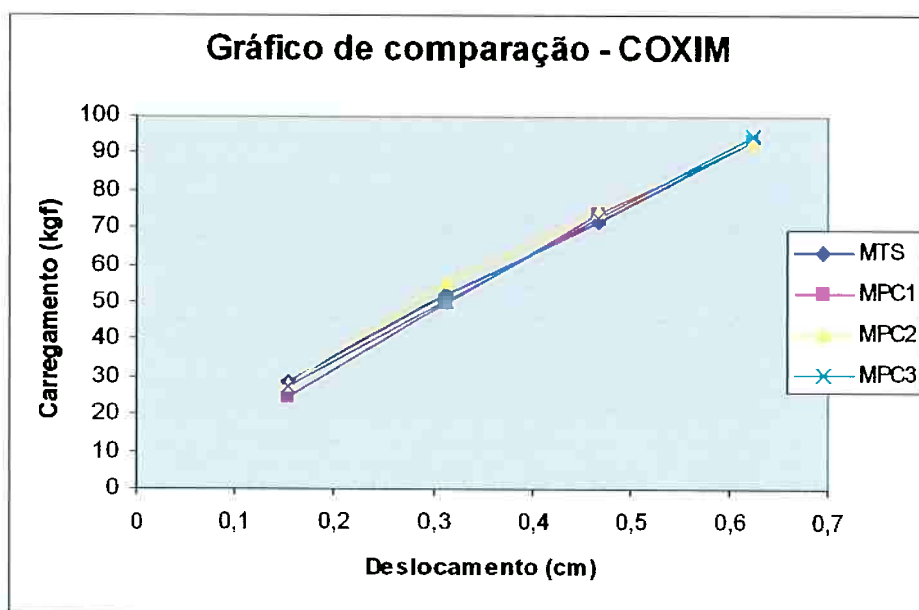


Figura 36 – Curva de comparação dos carregamentos obtidos com a simulação e o MTS para o coxim.

Segundo a comparação do gráfico anterior, percebeu-se que a aproximação com a área foi a que apresentou maior aderência, entretanto, isso aconteceu devido também à linha de código definindo a espessura como a calculada na planilha referente ao coxim, para os cálculos subsequentes e necessários de tensões e deformações.

Entretanto, para a sequência do estudo, a curva que melhor se aproximou da calculada a partir do MTS, foi a MPC2, já que manteve um desvio em torno de 6% para todos os valores, não somente nos extremos como na comparação do corpo de prova.

A curva se ajustou muito melhor para o cálculo do coxim do que para o corpo de prova, e isso representa um incentivo a utilização do GeoSTAR para a simulação de peças a partir de uma curva MPC definida.

4.2.2 – DesignSTAR

Conforme a metodologia explicitada no tópico anterior, foram realizados as simulações nos três casos e obtidas as RRFZ e os respectivos deslocamentos para cada nível de carregamento aplicado.

Primeiramente foi programado para o corpo de prova, (instruções em Apêndice A e Apêndice B) a MPC 2, que mais se aproximou para o Coxim no método do GeoSTAR.

Utilizou-se uma mesh com 2,2 mm, gerando no equacionamento 2840 nós, 1745 elementos e 8520 equações, e a solução por Sparse Solver.

As propriedades do material caracterizado são listadas na Tabela 13 e são utilizadas tanto para o corpo de prova quanto para o coxim.

Tabela 13 – Propriedades de entrada para a simulação.

Propriedade	Descrição	Valor
NUXY	Número de Poisson	0,499
ALPX	Coef. Expansão térmica	0,0067K ⁻¹

Os tempos de simulação foram de aproximadamente 2 minutos para cada nível de carregamento simulado.

Na Tabela 14 estão presentes os valores de entrada de força em (kgf), o valor do carregamento calculado a partir do deslocamento obtido na simulação, com a equação da curva da Figura 28, o valor de RRFZ, e a comparação entre os dois valores.

Tabela 14 – Comparação de valores ensaiados com os simulados para o corpo de prova.

STEP	Carregamento Fornecido (kgf)	Deslocamento (cm)	RRFZ MTS (kgf)	RRFZ lido (kgf)	%
4	6,140661826	0,5140	5,403431305	6,14	11,9962
3	4,997088127	0,4674	4,486376806	4,9967	10,2132
2	3,769003256	0,3116	3,455879462	3,7688	8,30292
1	2,456407214	0,1558	2,575581156	2,4562	4,63512

Com este cálculo foi possível fazer uma comparação gráfica (Figura 37) entre o MTS e a simulação do DesignSTAR e com isso fazer uma avaliação da curva MPC para a simulação subsequente do coxim.

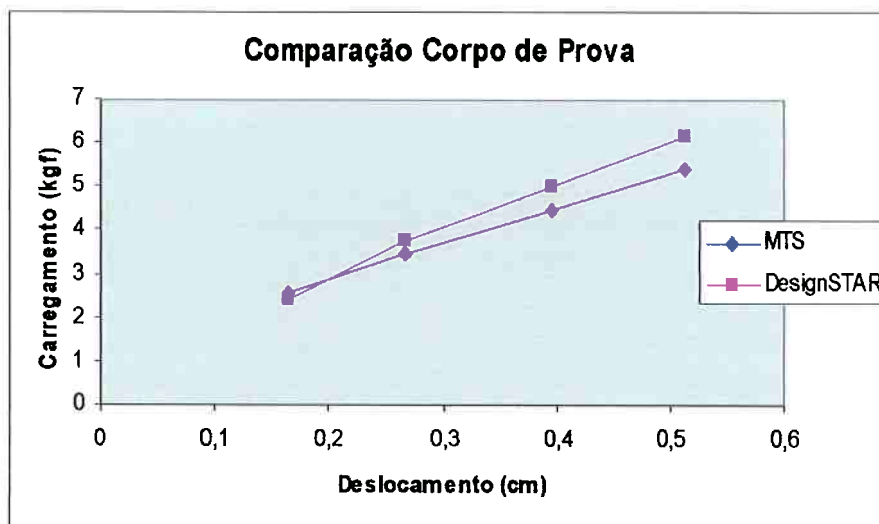


Figura 37 – Curva de comparação dos carregamentos obtidos com a simulação DS e o MTS para o corpo de prova.

Foi possível concluir que para valores de baixa deformação, a simulação foi como esperado, entretanto, a partir do terceiro nível de carregamento (Figura 38), os valores começam a se separar, e uma diferença de 10% apareceu entre as duas curvas. Isso pode ter-se dado devido ao fato da malha ser um pouco grosseira, 2,0mm entre elementos, o que pode ter diminuído a precisão dos resultados, entretanto fatores como coeficientes de atrito não especificados na configuração do ensaio podem também ter influenciado neste comportamento.

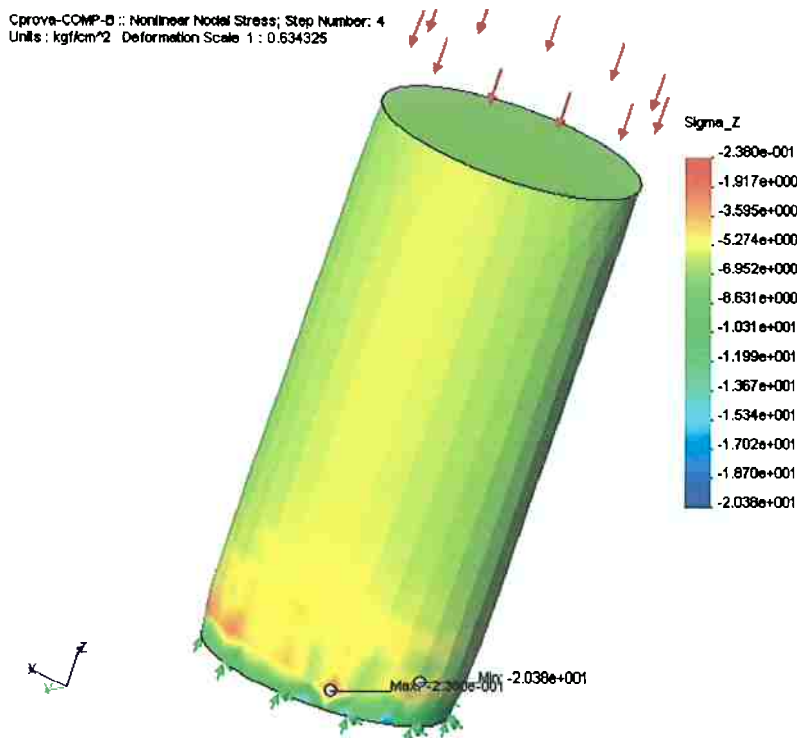


Figura 38 – Perfil de tensões no corpo de prova durante o STEP 3 no DesignSTAR.

No Anexo III, encontram-se as figuras representando os deslocamentos e níveis de tensões para o corpo de prova.

Partiu-se então para a simulação do coxim pelo mesmo programa, utilizando-se também a curva MPC2, padrão. A metodologia utilizada foi a mesma para o corpo de prova, alterando-se entretanto os valores referentes a malha. Foi utilizada uma malha de 5.0mm, para otimizar os cálculos. A malha criou 4858 elementos, com 3107 nós e 14574 equações a serem resolvidas pelo Sparse Solver. Utilizou-se também o auxílio do incremento automático que aproximou o tempo de solução para 15 minutos.

Na Tabela 15 estão presentes os valores de entrada de força em (kgf), e da mesma maneira que anteriormente, o valor do carregamento calculado a partir do deslocamento obtido na simulação. Com a equação da curva da Figura 35, calculou-se o valor de RRFZ, e a comparação entre os dois valores.

Tabela 15 – Comparação de valores ensaiados com os simulados para o coxim MPC2.

STEP	Carregamento Fornecido (kgf)	Deslocamento (cm)	RRFY MTS (kgf)	RRFY lido (kgf)	%
4	93,95597763	0,9863	193,372597	93,955	105,81
3	71,66465431	0,6698	102,139863	70,467	44,947
2	52,17176565	0,3928	62,3837905	46,978	32,794
1	28,94343857	0,195	35,4980003	23,4589	33,9149

Percebeu-se que os valores não se aproximaram muito e tiveram a mesma tendência de aumentar a distancia da curva experimental a partir do passo 3, como aconteceu anteriormente para o corpo de prova. Isso pode ter ocorrido por uma falta de aprimoramento da curva MPC2, possibilitando a real simulação para o coxim.

Na Figura 39 a seguir pode-se verificar que para a mesma tensão aplicada no ensaio no MTS, cujo deslocamento foi da ordem de 0,6cm, causou na simulação um deslocamento de 0,98cm, valor bem mais alto do que o real.

Os valores só começaram a se aproximar da realidade com a diminuição do carregamento aplicado. Para um carregamento de 5,8kgf, o deslocamento relativo foi de 0,0475cm, e se comparado com o carregamento real para este deslocamento que seria de 7,2kgf, a diferença foi de 1%, a menor encontrada.

coxim-Comp_A :: Nonlinear Displacement; Step Number: 4
Units : cm Deformation Scale 1 : 0.71

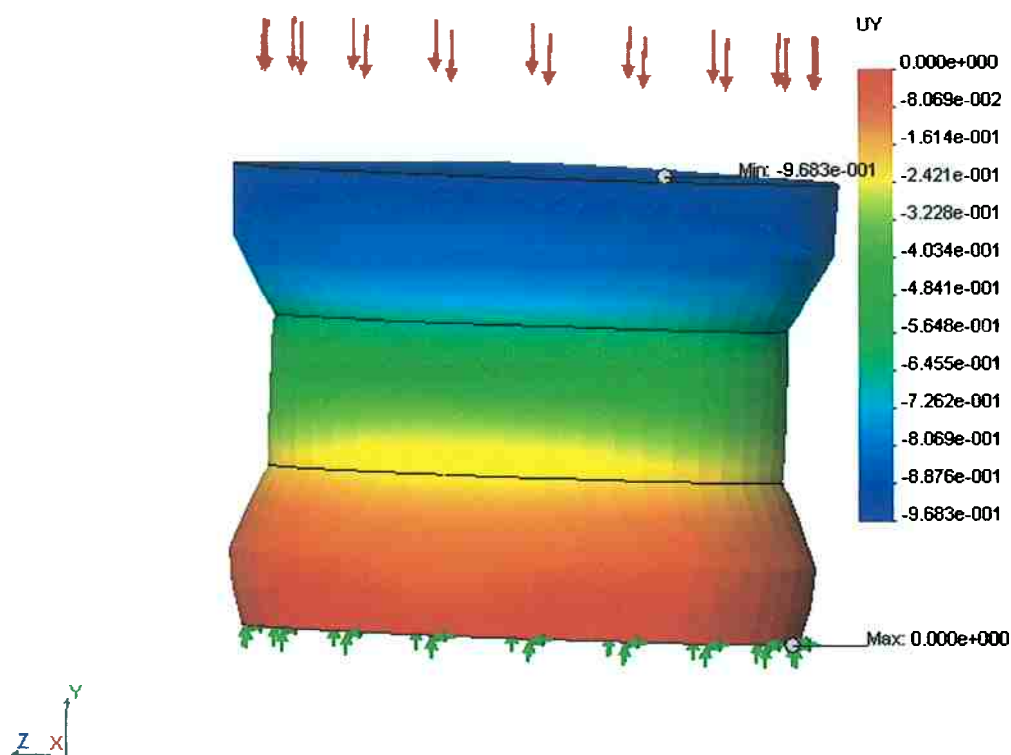


Figura 39 – Perfil de deslocamentos no coxim durante o STEP 4 no DesignSTAR.

O gráfico da Figura 40 mostra que a proximidade realmente não existiu em nenhum momento, apenas a linearidade da curva foi obedecida até ser extrapolada quando no passo 4.

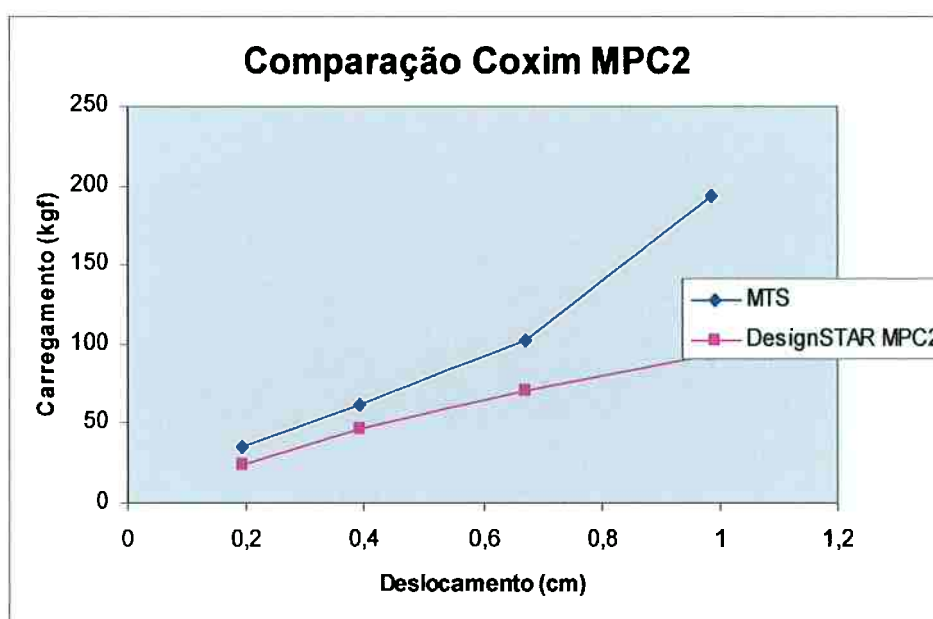


Figura 40 – Comparação entre os valores experimentais e os obtidos com a curva MPC2 para carregamentos aplicados.

Em seguida, com as mesmas configurações de malha e equacionamento, foram fornecidos os valores da curva MPC3 para o programa, que forneceu os seguintes valores (Tabela 16).

Tabela 16 – Comparação de valores ensaiados com os simulados para o coxim MPC3.

STEP	Carregamento Fornecido (kgf)	Deslocamento (cm)	RRFY MTS (kgf)	RRFY lido (kgf)	%
4	93,955	0,5717	85,87560821	93,9	8,54568
3	71,664	0,418	65,4915714	70,4673	7,06105
2	52,171	0,2646	45,85658164	46,978	2,38711
1	23.483	0,125	23,34257734	23,489	0,6273

Com a curva de área aproximada (MPC3), foi possível validar o programa para peças com áreas conhecidas, já que o ensaio forneceu valores muito próximos do experimental, entretanto com a mesma tendência dos dois últimos ensaios, uma fuga de proximidade a partir do passo 3, mas neste caso sem comprometer a porcentagem tolerável de distância entre a curva experimental e a teórica.

A seguir, na Figura 41, é mostrada o perfil de tensões normais no coxim para o passo 1, que melhor se aproximou da situação real quando ensaiado com a curva MPC3.

coxim3-Comp_A :: Nonlinear Nodal Stress; Step Number: 1
Units : kgf/cm² Deformation Scale 1 : 1

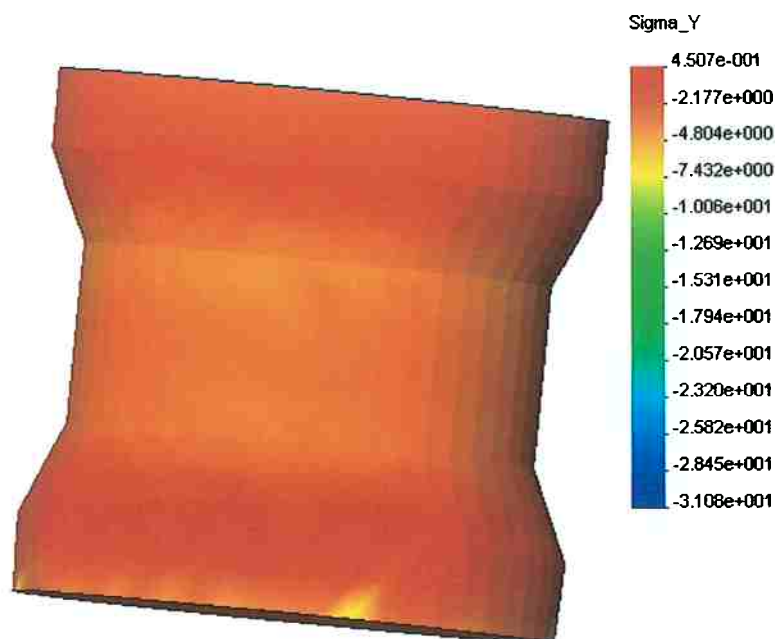


Figura 41 – Plotagem do nível de tensões normais para o coxim no passo 1 utilizando a curva MPC3.

Com este cálculo foi possível fazer uma comparação gráfica (Figura 42) entre o MTS e a simulação do DesignSTAR e com isso fazer uma avaliação da curva MPC para a simulação subsequente do coxim.

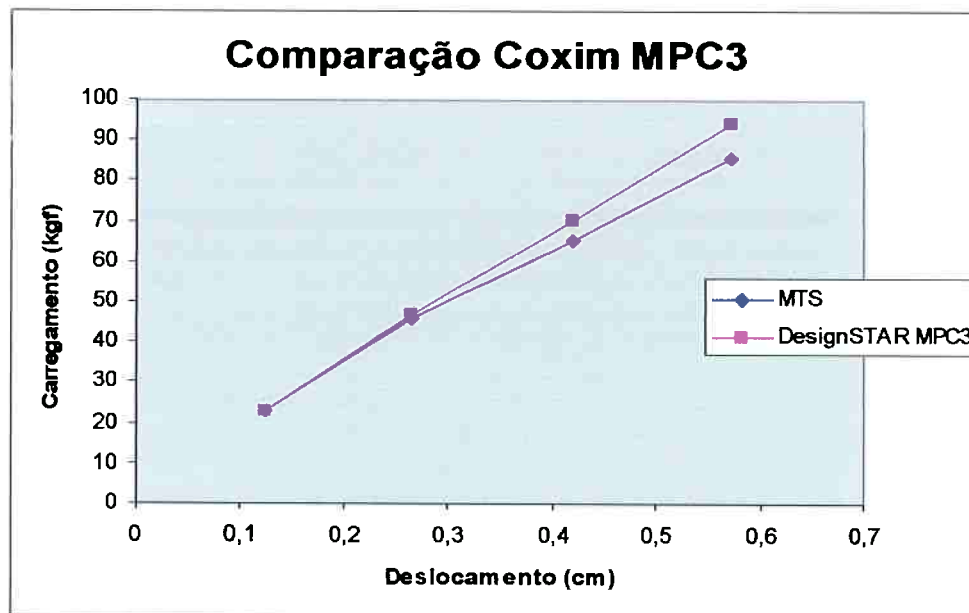


Figura 42 – Curva de comparação dos carregamentos obtidos com a simulação DS com MPC3 e o MTS para o coxim.

Todas as figuras que representam o coxim ensaiado no DS estão presentes no Anexo IV deste trabalho.

Considerando todos os métodos realizados, foi possível construir uma relação de proximidade de resultados de cada método com o resultado ensaiado. A Tabela que relaciona todas as alternativas para o corpo de prova é mostrada na Tabela 17, enquanto que a Tabela 18 refere-se aos dados para o coxim.

Tabela 17 – Comparação de todos os métodos de simulação do corpo de prova.

STEP	Deslocamento (cm)	RRFY MTS (kgf)	RRFY GEO1 (kgf)	RRFY GEO2 (kgf)	RRFY DSTAR (kgf)
4	0,612	6,140661826	5,97405	8,54568	6,893131
3	0,459	4,997088127	5,49402	7,06105	5,661196
2	0,306	3,769003256	4,48934	2,38711	4,131779
1	0,153	2,456407214	2,5472	0,6273	2,30488

Tabela 18 – Comparação de todos os métodos de simulação do coxim.

STEP	Desloca. (cm)	RRFY MTS (kgf)	RRFY GEO1 (kgf)	RRFY GEO2 (kgf)	RRFY GEO3(kgf)	RRFY DSTAR2 (kgf)	RRFY DSTAR3 (kgf)
4	0,6232	93,95	93,4938	93,430	95,09	67,49087	101,2283
3	0,4674	71,66	74,3301	74,832	72,78	53,24034	78,31408
2	0,3116	52,17	49,744	55,706	50,47	37,18284	54,16346
1	0,1558	28,94	24,8688	28,198	27,42	19,31836	28,77643

Então fica possível construir um gráfico analisando todas as simulações e visualizar realmente qual o desvio de cada curva para a experimental. A curva da Figura 43 mostra a situação para o corpo de prova, enquanto que a curva da Figura 44 mostra a situação para o coxim.

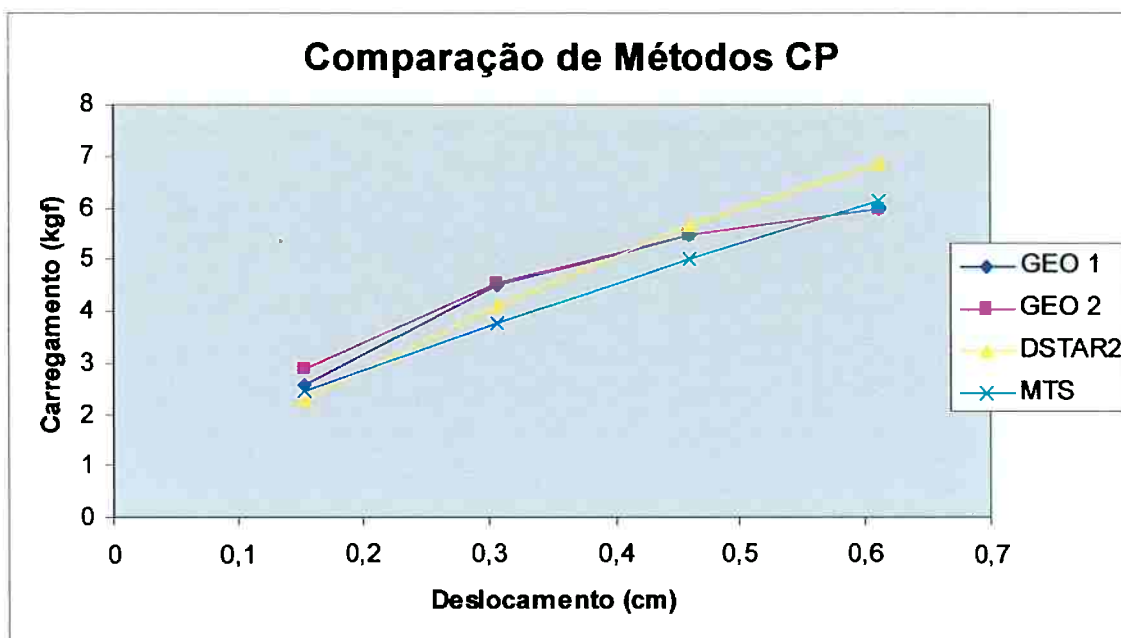


Figura 43 – Curva de comparação de todos os métodos utilizados para o corpo de prova em relação ao MTS.

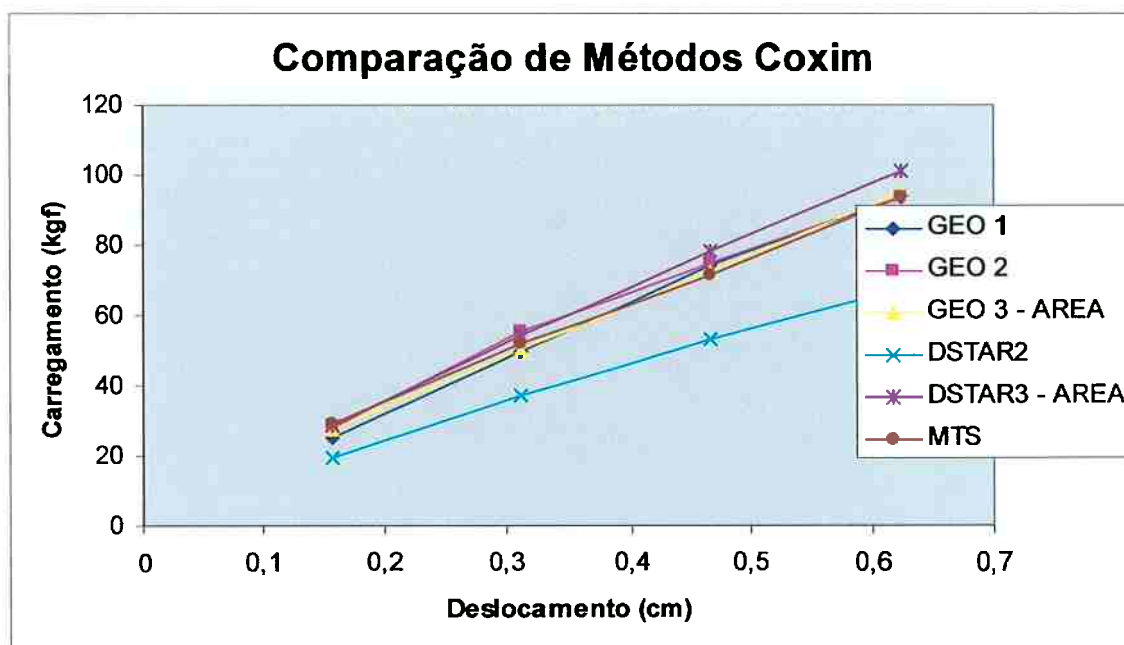


Figura 44 – Curva de comparação de todos os métodos utilizados para o coxim em relação ao MTS.

Com estes dois gráficos foi possível uma melhor análise sobre cada método, o que fez-se concluir que para o corpo de prova, os métodos do GEOSTAR foram os

que mais se aproximaram, apesar da linearidade mantida em relação à experimental quando ensaiado no DesignSTAR.

Inicialmente, para o coxim, o ensaio com a curva MPC2 no DesignSTAR deveria ser desprezado, já que obteve índice de distância de quase 100%, entretanto todos os outros métodos, tanto no GeoSTAR quanto no DesignSTAR foram satisfatórios com uma leve tendência para os programados no primeiro, e por este motivo partiu-se para um ensaio estático com o coxim, para tentar justificar o motivo dessa discrepância de valores no DesignSTAR. Esta alternativa foi tomada devido a outros tipos de esforços presentes no ensaio MTS, e por se tratar de uma simulação por esforços de pressão, os esforços de atrito teriam que ser, certamente, considerados certamente para se obter mais um grau de liberdade.

Então, no DesignSTAR, iniciou-se outro estudo com configurações e parâmetros diferentes do ensaio não-linear anterior. Criou-se um estudo de compressão estático, considerando variáveis de atrito, grande deslocamento, já que se trata de composto elastomérico, e um último valor fornecido foi o módulo elástico E , obtido através da tangente na curva *Tensão x Deformação*, construída anteriormente para o corpo de prova.

$$E = \operatorname{tg} \alpha = 58,9 \text{ kgf/cm}^2$$

Além de se tratar de um ensaio Linear elástico isotrópico.

A metodologia foi semelhante ao ensaio não-linear, sendo fornecidos os mesmos carregamentos, e verificando as forças de reação e deslocamentos subseqüentes encontrados.

Os deslocamentos e níveis de tensões podem ser encontrados representados nas figuras do Anexo IV.

Para o primeiro passo considerando o coeficiente de atrito, o deslocamento foi 14% abaixo do esperado, considerando os resultados do MTS, entretanto, nos subseqüentes passos, os valores tornaram a se aproximar da curva real.

Deve-se lembrar que tal coeficiente não pode ser considerado no ensaio do tipo dinâmico no aplicativo DesignSTAR.

Após os ensaios foram tabelados (Tabela 18) os valores de entrada de carregamento, e os respectivos valores de saída para cada um deles.

Tabela 19 – Comparação de valores ensaiados com os simulados para o coxim no ensaio estático.

STEP	Carregamento Fornecido (kgf)	Deslocamento (cm)	RRFY MTS (kgf)	RRFY lido (kgf)	%
4	93,955	0,5896	88,5832474	93,355	5,11141
3	71,664	0,4422	68,493579	70,467	2,80049
2	52,171	0,2948	49,9627826	46,978	-6,3536
1	23.483	0,1474	27,4578567	23,489	14,4544

Neste momento, com o atrito sendo considerado, verificou-se uma diminuição do deslocamento, já que um grau de liberdade para a deformação foi retirado, e com isso aconteceu uma maior e mais criteriosa proximidade dos valores obtidos experimentalmente.

Para o corpo de prova não foi realizado o ensaio estático pela proximidade dos resultados encontrados com os obtidos experimentalmente. Isso pode ser explicado pelas pequenas dimensões presentes no corpo de prova, onde o coeficiente de atrito comprometeu muito pouco nos resultados. Portanto foi descartada a hipótese de recálculo e reavaliação de métodos, já que a intenção do corpo de prova é, de justamente fornecer uma curva MPC padrão dos resultados.

Abaixo se encontra um gráfico que representa a comparação entre o ensaio real e a curva obtida pelo ensaio estático (Figura 45).

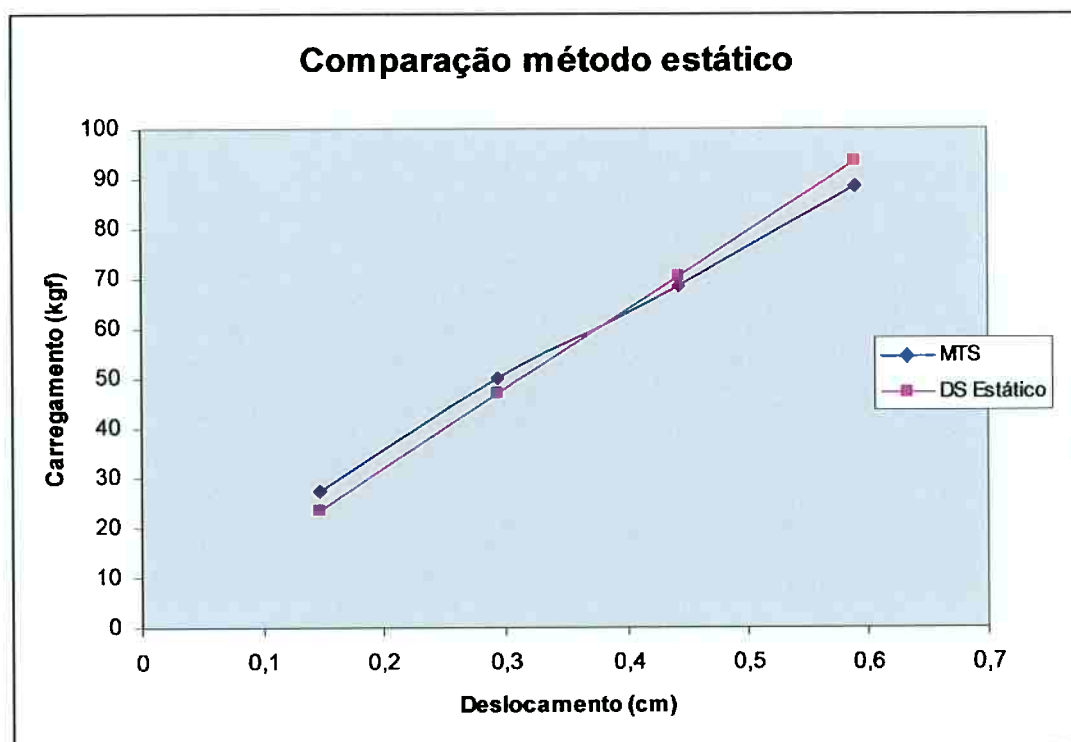


Figura 45 – Curva de comparação do método estático com o método Real (MTS).

A partir destes resultados foi possível comparar então todos os resultados obtidos nas simulações deste trabalho e chegar a uma conclusão mais conceituada sobre o aplicativo DesignSTAR.

Com os valores das tabelas 18 e 19, foi possível a construção do gráfico a seguir (Figura 46), e então relacionar os métodos confiáveis nos dois aplicativos utilizados neste estudo.

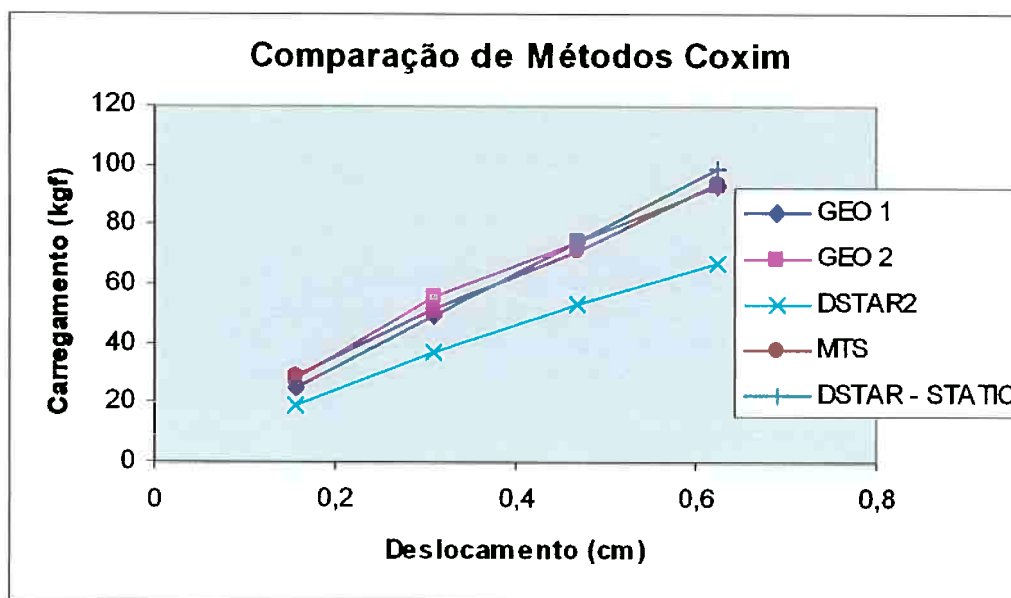


Figura 46 – Curva de comparação de todos os métodos confiáveis utilizados no ensaio do coxim.

A partir deste gráfico pôde ser percebido a diferença do ensaio estático para o ensaio dinâmico no DesignSTAR, e verificado que o ensaio corresponde ao experimental.

4.3 – Discussões Finais

Com uma avaliação geral dos dois métodos foi possível destacar algumas peculiaridades que são descritas na sequência como algumas discussões finais..

4.3.1 – GeoSTAR

No caso do GeoSTAR, na simulação do corpo de prova, uma coisa curiosa aconteceu, pois a curva que deveria ser melhor aproximada, e com isso fornecer os melhores resultados, com passos uniformes de aplicação de tensão, foi a que menos se aproximou na situação real. A curva MPC calculada logo após o ensaio, com os valores obtidos, forneceu um ajuste melhor de resultado, em relação à simulação do corpo de prova.

Já com o coxim, o inverso aconteceu, e a melhor aproximação se deu com a curva MPC calculada para deslocamentos e passos constantes, facilitando a interpretação dos softwares, já que o coxim sofre deformações proporcionais maiores que o corpo de prova. O resultado foi muito satisfatório com uma proximidade da curva obtida pelo MTS da ordem de 5%, realmente próximo, e se for desconsiderado que condições ambientes do ensaio com o corpo de prova, e do próprio coxim, já que tais variáveis não entraram na simulação, esse erro diminuirá e ficará muito mais próximo do real.

Outra rápida análise se fez com a área aproximada do coxim, coisa que normalmente nem é possível calcular, devido à alta complexidade e variedade de formatos das peças que suprem o mercado automobilístico. Entretanto, ela se fez necessária para validar ainda mais a prática de FEM com o aplicativo GeoSTAR, e os resultados obtidos foram muito satisfatórios, tendo em vista que foram feitas aproximações já na fase de obtenção da curva de propriedades de material, fornecida ao aplicativo. Os erros variaram em torno de 6%, valor muito baixo, considerando todas as variáveis em questão. Com isso, foi possível obter uma terceira curva de propriedade de material, só não é tão confiável quanto à primeira e à segunda, por possuir esta variável área de secção transversal aproximada ao longo do comprimento do coxim.

O modelamento por elementos finitos se deu mais fácil e mais criterioso na sua forma 2D, através do aplicativo GeoSTAR. Isso, conseqüentemente, forneceu resultados melhores e muito próximos dos obtidos com o ensaio experimental, o MTS. Seu código é de fácil familiarização e bastante intuitivo. O maior problema em relação a este tipo de simulação se deu com o método de integração utilizado, de forma a convergir as informações e fornecer resultados seguros, e também no que diz respeito à captação e identificação dos nós específicos para realizar por completo o ensaio. Entretanto, nada que uma rápida consulta ao “help”, ou manuais de software não resolvessem, pois o próprio aplicativo possui recursos e ferramentas próprias pra resolver esses e outros problemas que possam vir a aparecer.

Isso se faz concluir que o programa GeoSTAR é uma ferramenta confiável no que diz respeito a simulações realizadas a partir de curvas de material padronizadas por um corpo de prova, e com isto, se torna sugestivo o aumento desta prática no setor industrial.

Numa avaliação mais breve sobre o método e sua ferramenta, o GeoSTAR está apto a receber testes maiores, e mais complexos seguindo a mesma metodologia aplicada neste trabalho, para autopeças de CE.

4.3.2 – DesignSTAR

Com relação ao DesignSTAR, um fator importante deve ser mencionado que foi o fato de ter sido necessário a utilização de um método de simulação onde fatores adicionais ao ensaio fossem considerados e com isto aproximado e melhor relacionado aos valores experimentais. Neste caso, foram considerados fatores de atrito como coeficientes no momento do ensaio do coxim. Diferentemente do corpo de prova, em que os valores tiveram uma considerável aproximação para valores pequenos de deformação. A simulação realizada com a curva MPC3, também forneceu valores bem próximos dos experimentais, entretanto por motivos já mencionados e explanados anteriormente, ela não pôde ser considerada como um método geral.

Neste aplicativo, a forma de programação sem dúvida foi mais visível, e mais interativa, dando uma noção melhor do que estava sendo corrigido no código da simulação, entretanto, o programa tem muito mais recursos de configuração de ensaios, aumentando a chance de erros e discrepâncias. Entretanto, nada que não possa ser considerado deve comprometer o resultado, como visto quando foi utilizado o método estático.

Por se tratar de uma ferramenta em 3D, a simulação tomou mais tempo, e algumas análises feitas por motivo de informação duraram até 30 min na resolução de equações diferenciais, mas em contrapartida a plotagem foi muito mais demonstrativa que a forma 2D utilizada.

Da mesma forma que o GeoSTAR, o DesignSTAR pode certamente ser utilizado de modo criterioso e implementado a partir de agora para peças maiores, e de geometrias diversas, sempre que programado de forma coerente e correta.

4.4 – Fabricação com poliuretano (sugestão oferecida)

Os coxins são peças altamente submetida a esforços múltiplos e aleatórios de tração e compressão, necessitando de um tipo de material que tenha propriedades

excelentes em relação a esses tipos de esforços mecânicos. Uma sugestão que se faz neste trabalho é a da utilização de poliuretano como alternativa.

O Poliuretano poderá ser utilizado em ensaios futuros e até mesmo com a bagagem de conceitos fornecida neste trabalho. Por possuir uma grande capacidade de amortecimento, e levando em conta que a aplicação em questão necessita piamente desta propriedade, torna-se um grande atrativo o estudo da viabilidade não somente em questão de funcionabilidade, mas também na questão comercial.

Uma das grandes barreiras ainda a ser quebrada é a grande vantagem que a borracha natural possui em relação a resinas de PU no quesito de resistência a água. E isso se torna um fator delicado quando se fala de indústria automobilística, já que o automóvel está sujeito ao intemperismo e isso se torna um agravante. Entretanto, essa barreira pode ser ultrapassada com o desenvolvimento de novas resinas.

Sua simulação deve ser realizada para justamente descobrir e definir quais os limites deste material na substituição da borracha natural.

Neste presente trabalho, este ensaio não se tornou possível devido ao alto preço do material e a falta de patrocínio e/ou doações por parte de fabricantes deste tipo de material. Somente para caráter de conhecimento, dentre as quatro fabricantes contactadas, entre elas, Chemtura (antiga Crompton), Cytek e PetroPasy, a média de preço por Kg de material foi de US\$10, sendo que a cota mínima de comercialização era de 20kg, não levando em conta o curativo, impossibilitando a realização totalmente da fabricação, sem qualquer apoio.

Para realizações futuras, foram procuradas resinas PU, com dureza entre 50-70 SHORE A, e boas propriedades mecânicas, que poderiam ser curadas com 1,4-butanodiol.

5 – Conclusões

O coxim foi ensaiado como esperado e seus resultados reais serviram de parâmetros para comparação com os valores simulados a partir do corpo de prova fabricado com o mesmo composto elastomérico nas mesmas condições de fabricação.

Os testes dinâmicos foram suficientes para a realização das simulações realizadas no aplicativo GeoSTAR, enquanto que o ensaio estático, considerando o coeficiente de atrito, foi necessário para validar por completa a simulação no aplicativo DesignSTAR.

Os métodos de comparação entre os resultados experimentais e os obtidos através de simulações por FEM foram bastante proveitosos, e suficientes para validar a metodologia utilizada neste trabalho.

As ferramentas de elementos finitos tendem a ser de enorme importância para o setor industrial de autopeças, num momento que a redução de custos se faz extremamente necessária. Esta é uma alternativa excelente que pode começar a surgir nas pequenas e grandes fábricas que utilizam compostos elastoméricos em suas peças.

As ferramentas de FEM possuem a praticidade ao seu lado, já que reduziriam a quantidade de testes mecânicos, sendo realizados apenas para conferência dos resultados das simulações, ou seja, uma inversão de fatores, além de funcionar não somente para os elastômeros, mas também para outros tipos de materiais, como metais e compósitos.

Portanto, cabe agora ao setor industrial enxergar melhor esta alternativa que poderia ser muito mais e melhor aproveitada, devido ao grande potencial que possui, causando um desenvolvimento direto da produção com sua utilização, seja na escala de tempo, seja na escala de lucros.

6 – Referências Bibliográficas

- 1 – OHM, ROBERT F; R.T. Vanderbilt Company; *The Vanderbilt rubber handbook*; Norwalk, CT : Published by R.T. Vanderbilt Company, Inc., c1990.
- 2 – DIAS VILAR, WALTER; *Química e Tecnologia dos Poliuretanos*; 3a. edição; Rio de Janeiro, Editora Vilar Consultoria, Dez/2002.
- 3 – THRON, GUSTAVO H. N.; *Caracterização dinâmica de compostos elastoméricos : conceitos e ensaios laboratoriais*; São Paulo : EPUSP, 2003.
- 4 – PLAUT, RONALD L.; *Aspectos relativos à caracterização dinâmica de compostos elastoméricos e modelos matemáticos para a área de contato de prensas úmidas de máquinas de papel*; São Paulo, EPUSP 1999.
- 5 – LIPPINCOTT & PETO P; “1993 – *Blue Book*”; *Rubber World Mag.*; Publ., 1993.
- 6 – BRYDSON, J. A.; *Rubber chemistry*; London : Applied Science Publishers, c1978.
- 7 – ROMA BORRACHAS; *Lista de formulações*; consulta em Setembro de 2005.
- 8 – **Norma ASTM D 2084**
- 9 – **Norma DIN 53513**
- 10 – PLAUT, RONALD L; *Apostila de método de elementos finitos*.
- 11 – CELENTANO, DIEGO J.; CABEZAS, EDUARDO E.; *Characterization of the mechanical behaviour of materials in the tensile test: experiments and simulation*; Universidad de Santiago de Chile; Chile, 2004.
- 12 – WEIBECK, HÉLIO; *Reciclagem do Plástico*; Editora MM; São Paulo, 2004.
- 13 – Notas de aula da matéria PMT2419 – Conformações mecânicas dos materiais; Profº Drº Ronald Lesley Plaut

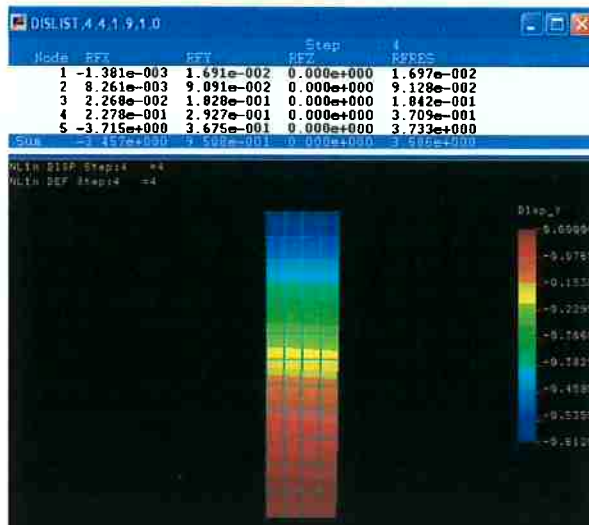
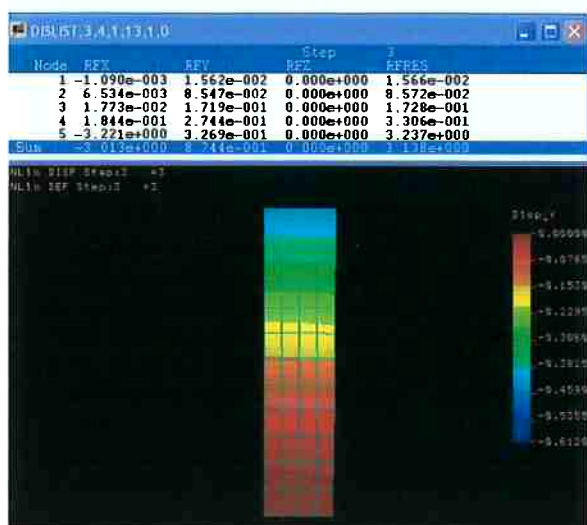
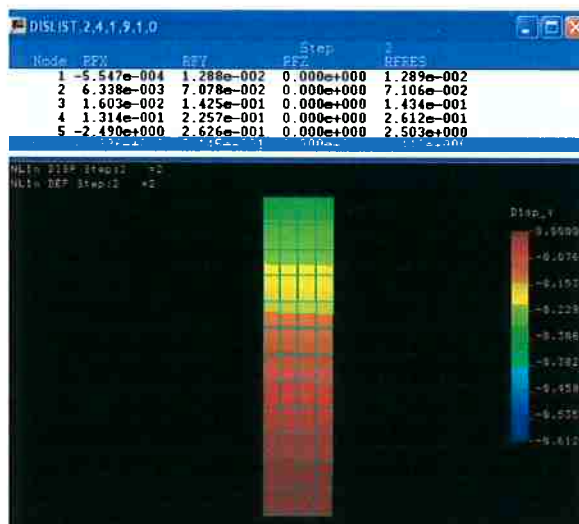
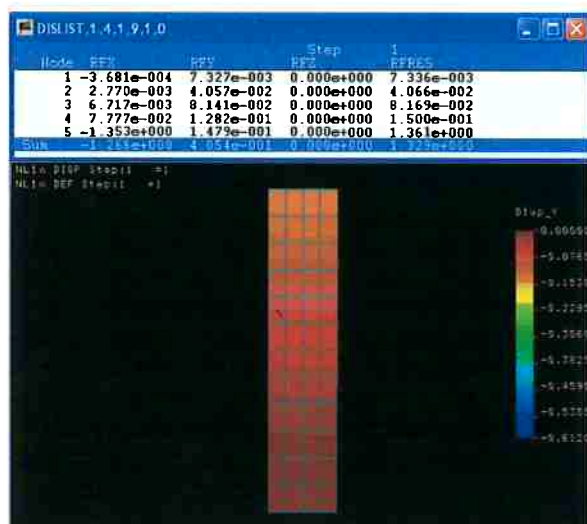
7 – Anexos

Anexo I

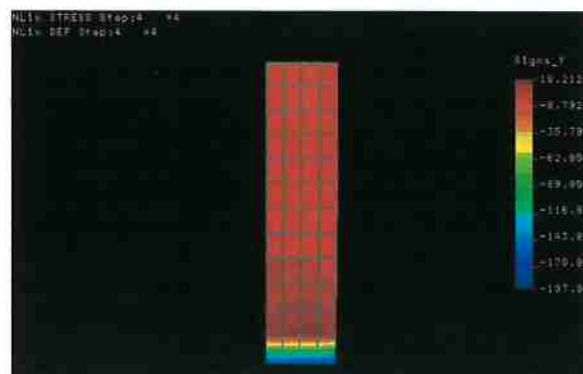
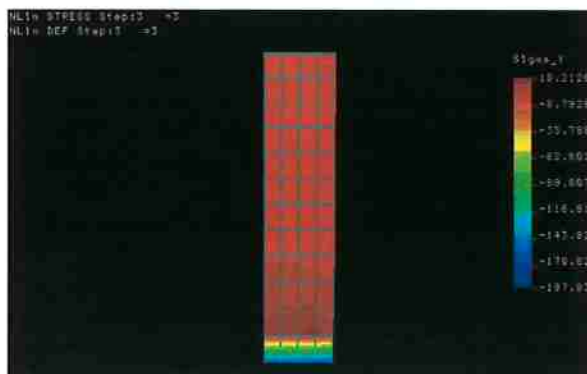
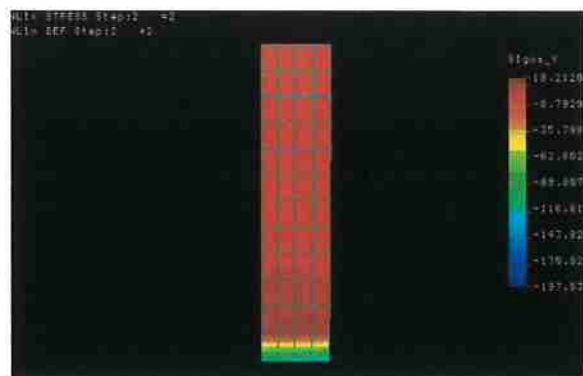
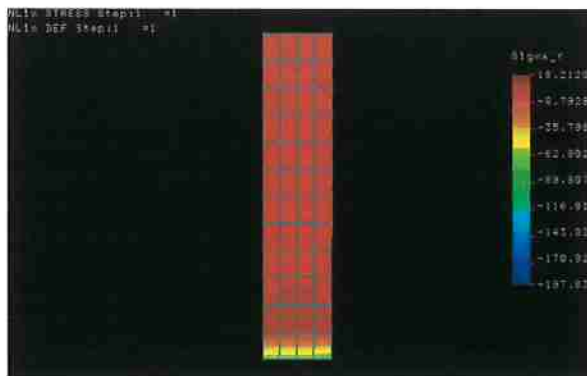
Plotagens no GeoSTAR do Corpo de Prova utilizado

A seguir estão presentes as Figuras representando os deslocamentos sofridos pelo corpo de prova, com sua simulação no aplicativo mencionado. Estão discriminadas as curvas utilizadas, as legendas e também os passos referentes a cada Figura. Estão separados por ordem de realização e de tipo de análise.

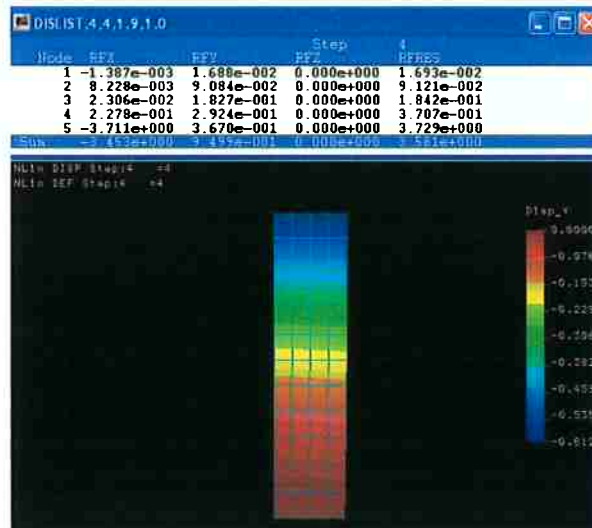
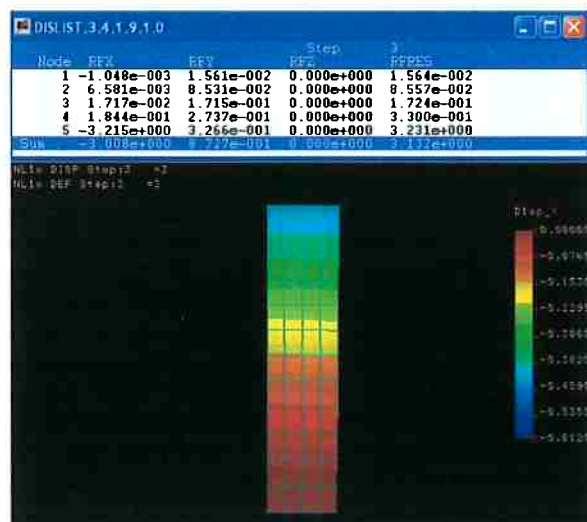
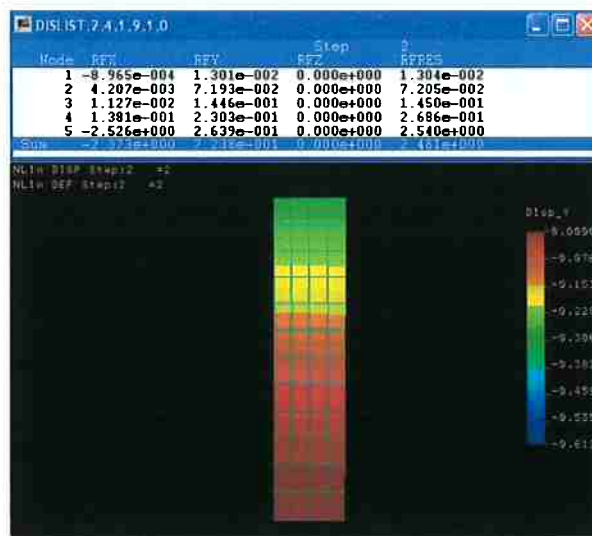
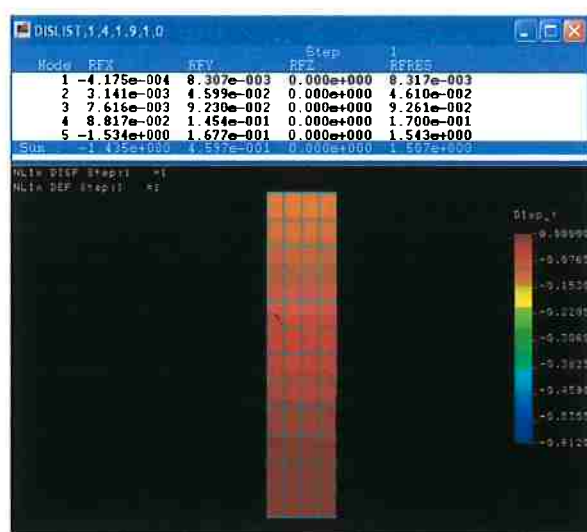
MPC1 - Deslocamentos



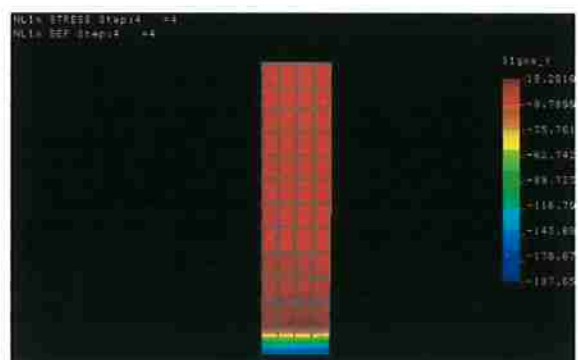
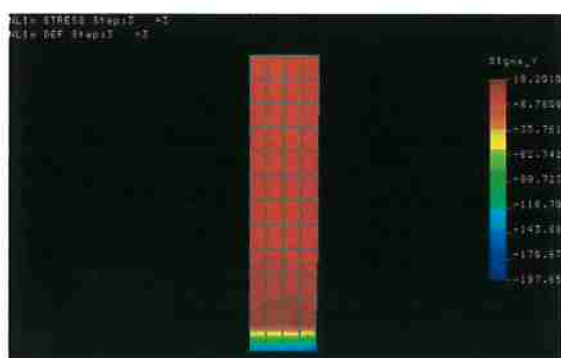
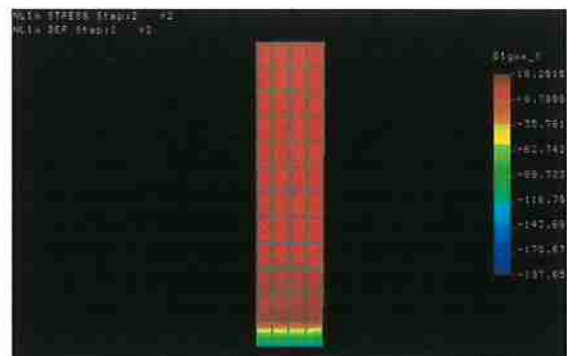
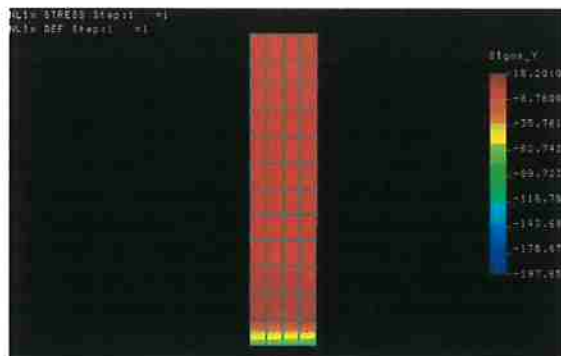
MPC1 – Tensões Normais



MPC2 – Deslocamentos



MPC2 – Tensões Normais

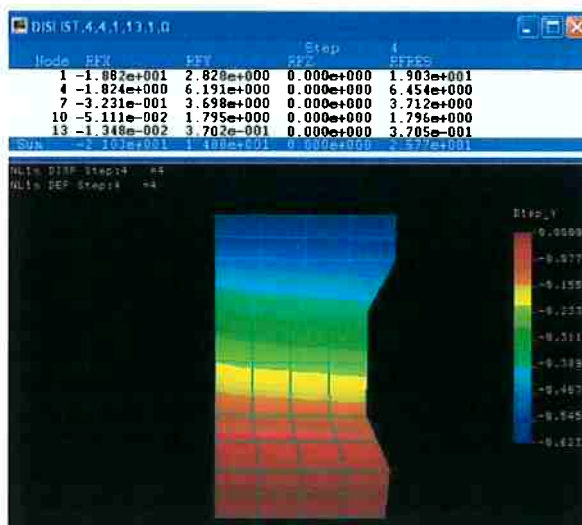
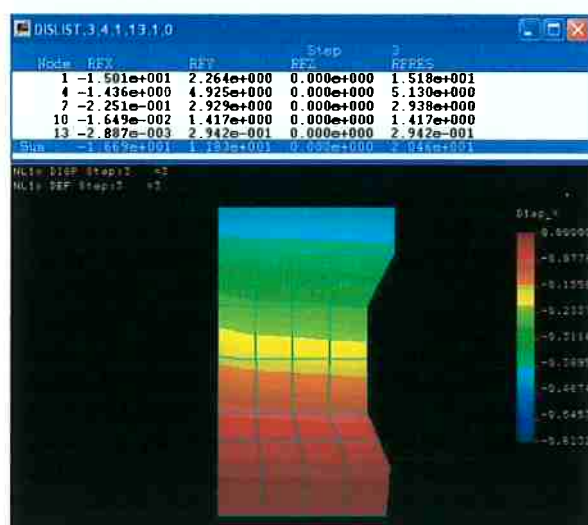
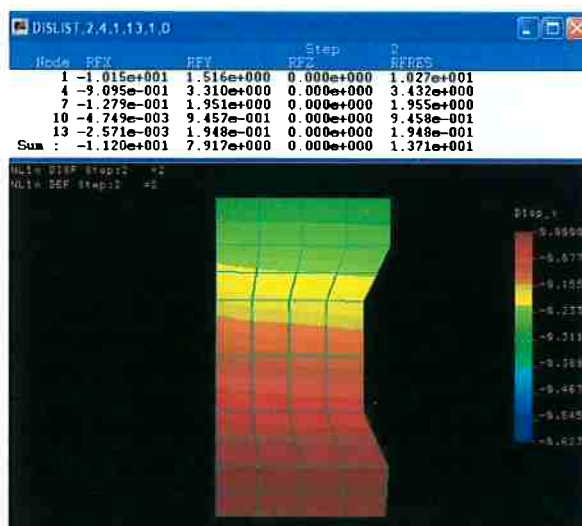
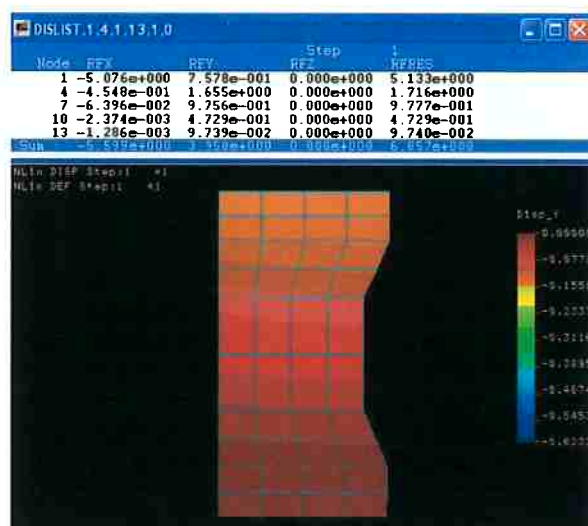


Anexo II

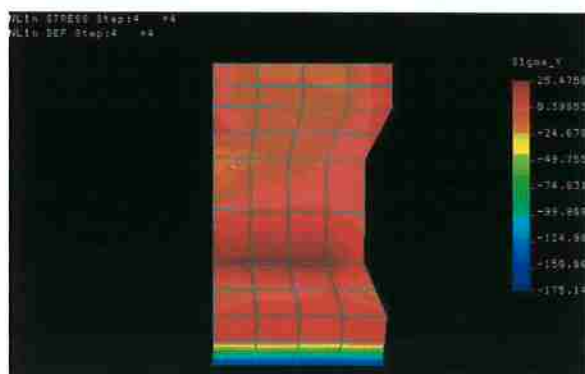
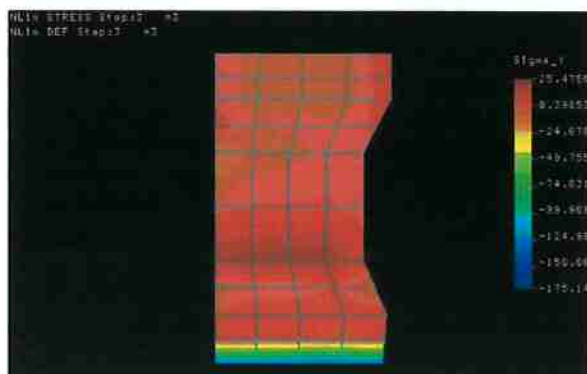
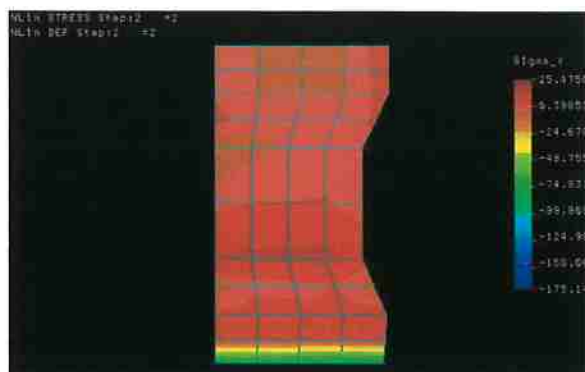
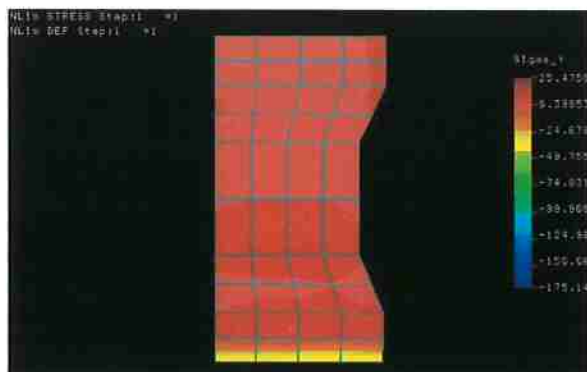
Plotagens no GeoSTAR do Coxim ensaiado

A seguir estão presentes as Figuras representando as tensões normais e os deslocamentos sofridos pelo coxim, com sua simulação no aplicativo mencionado. Estão discriminadas as curvas utilizadas, as legendas e também os passos referentes a cada Figura. Estão separados por ordem de realização e de tipo de análise.

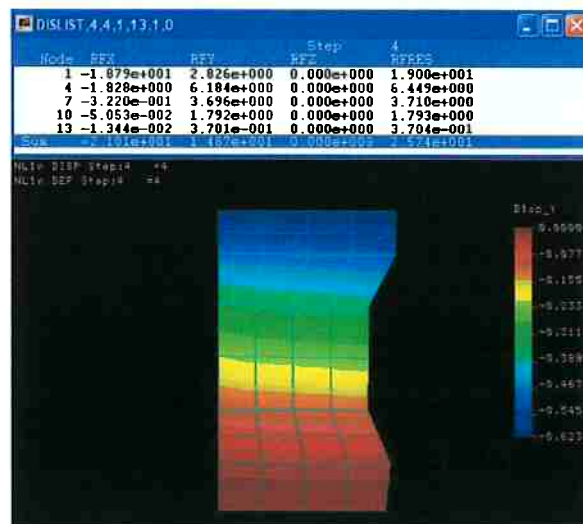
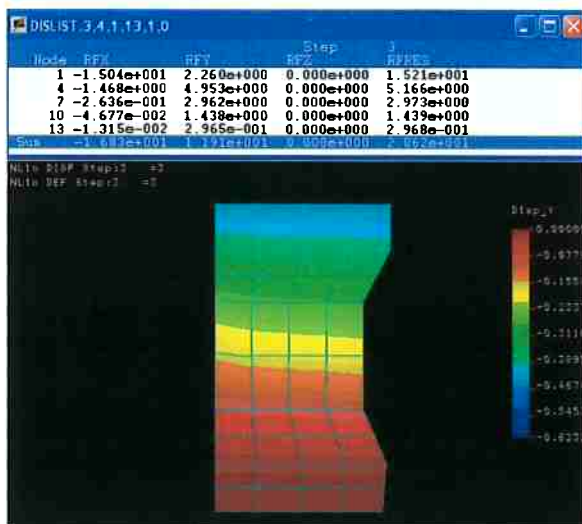
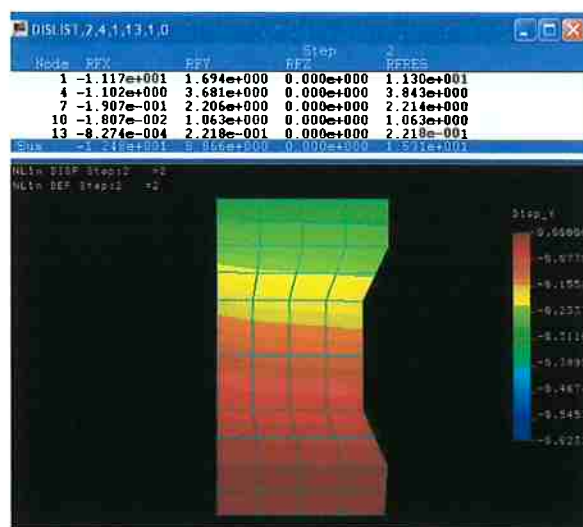
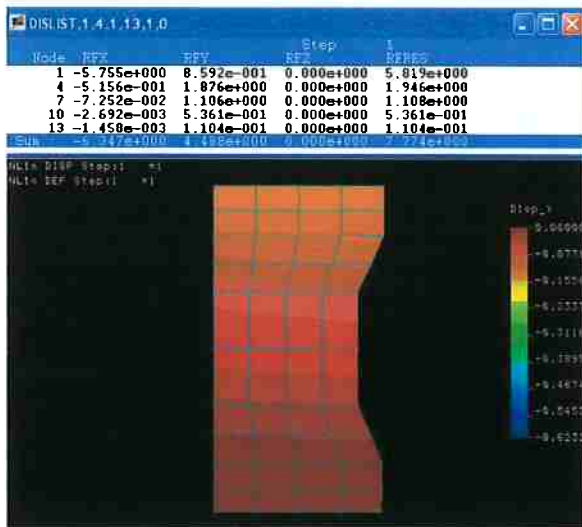
MPC1 - Deslocamentos



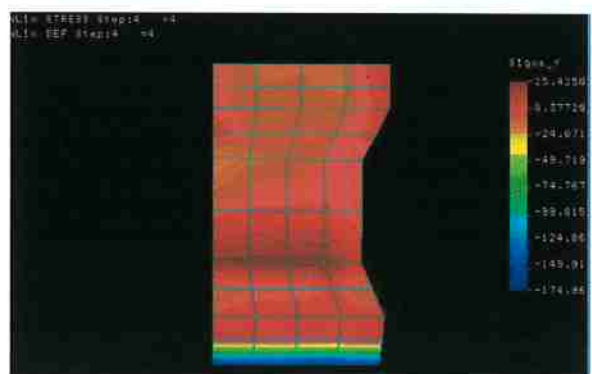
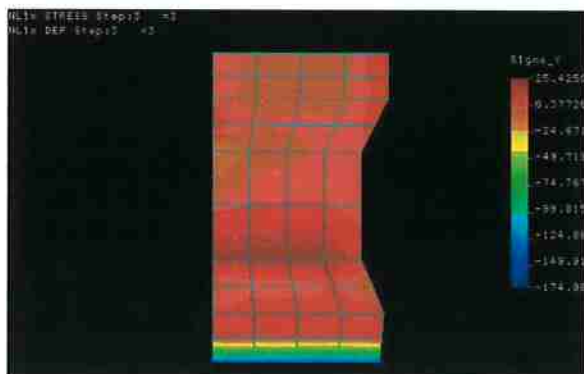
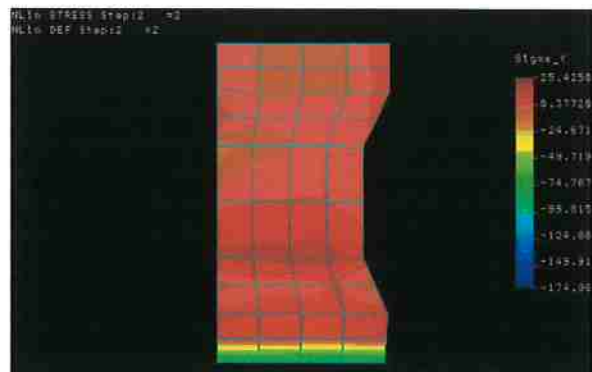
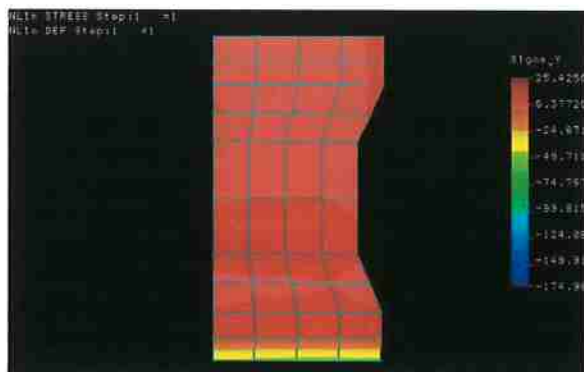
MPC1 – Tensões Normais



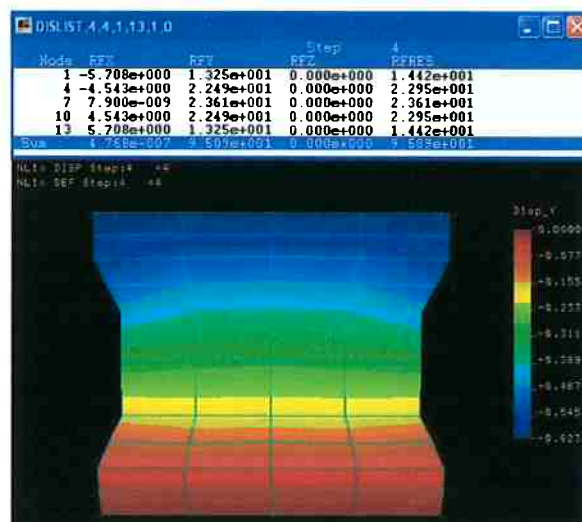
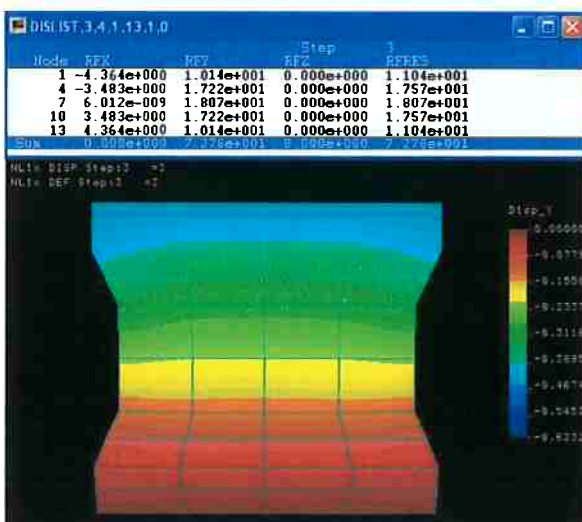
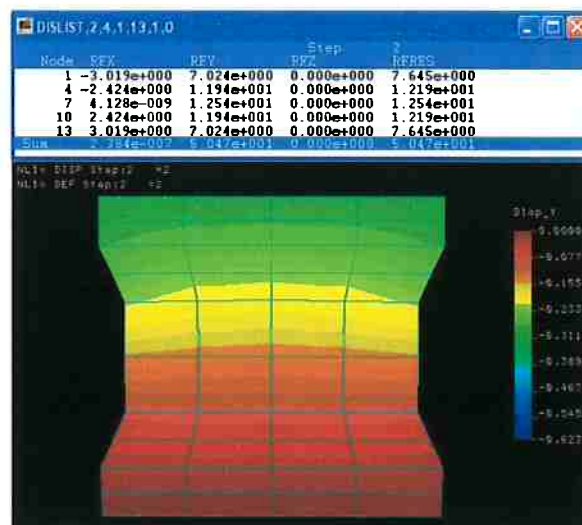
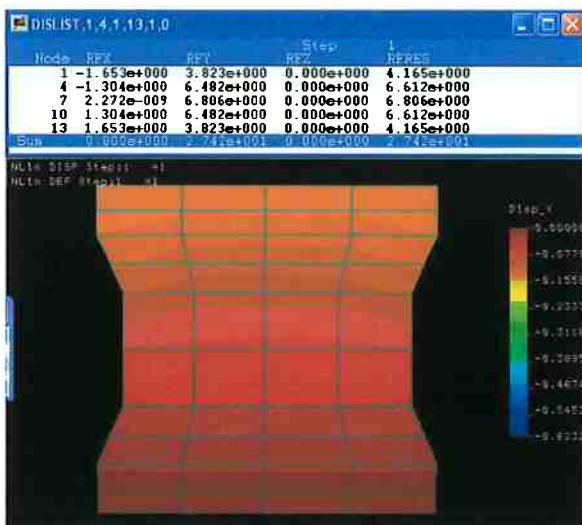
MPC2 - Deslocamentos



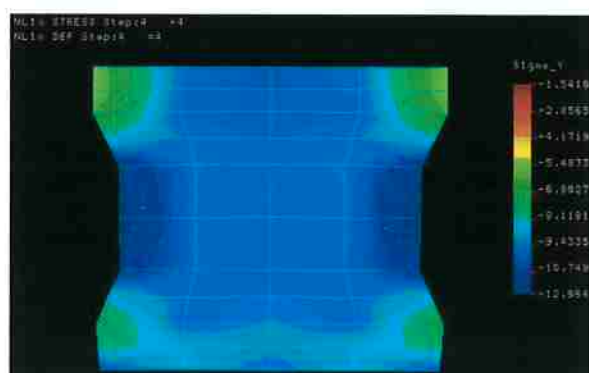
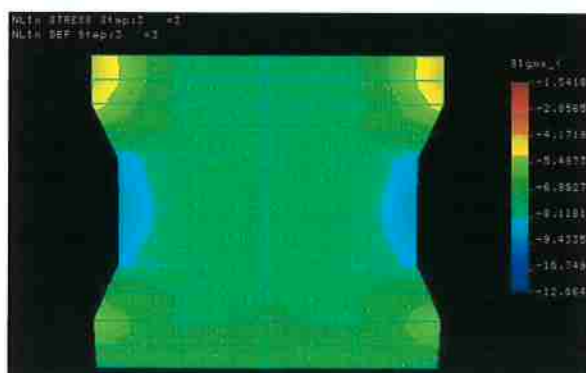
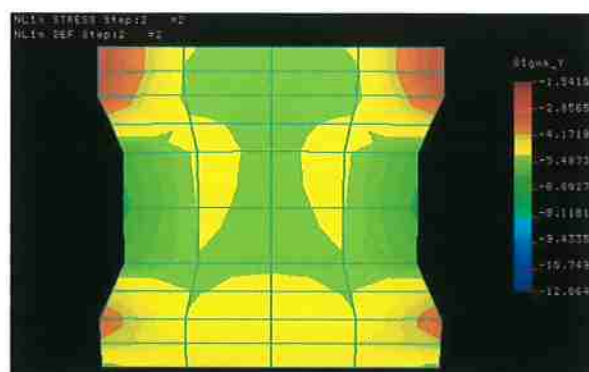
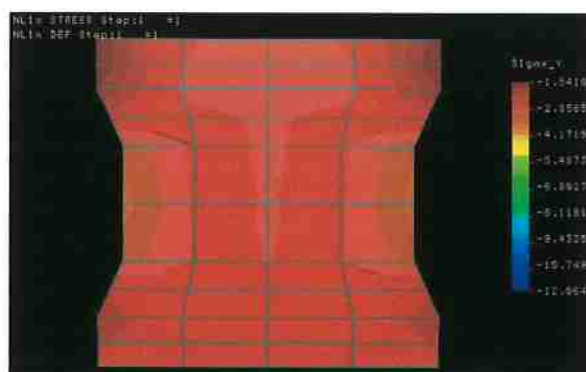
MPC2 – Tensões Normais



MPC3 – Deslocamentos



MPC3 – Tensões Normais

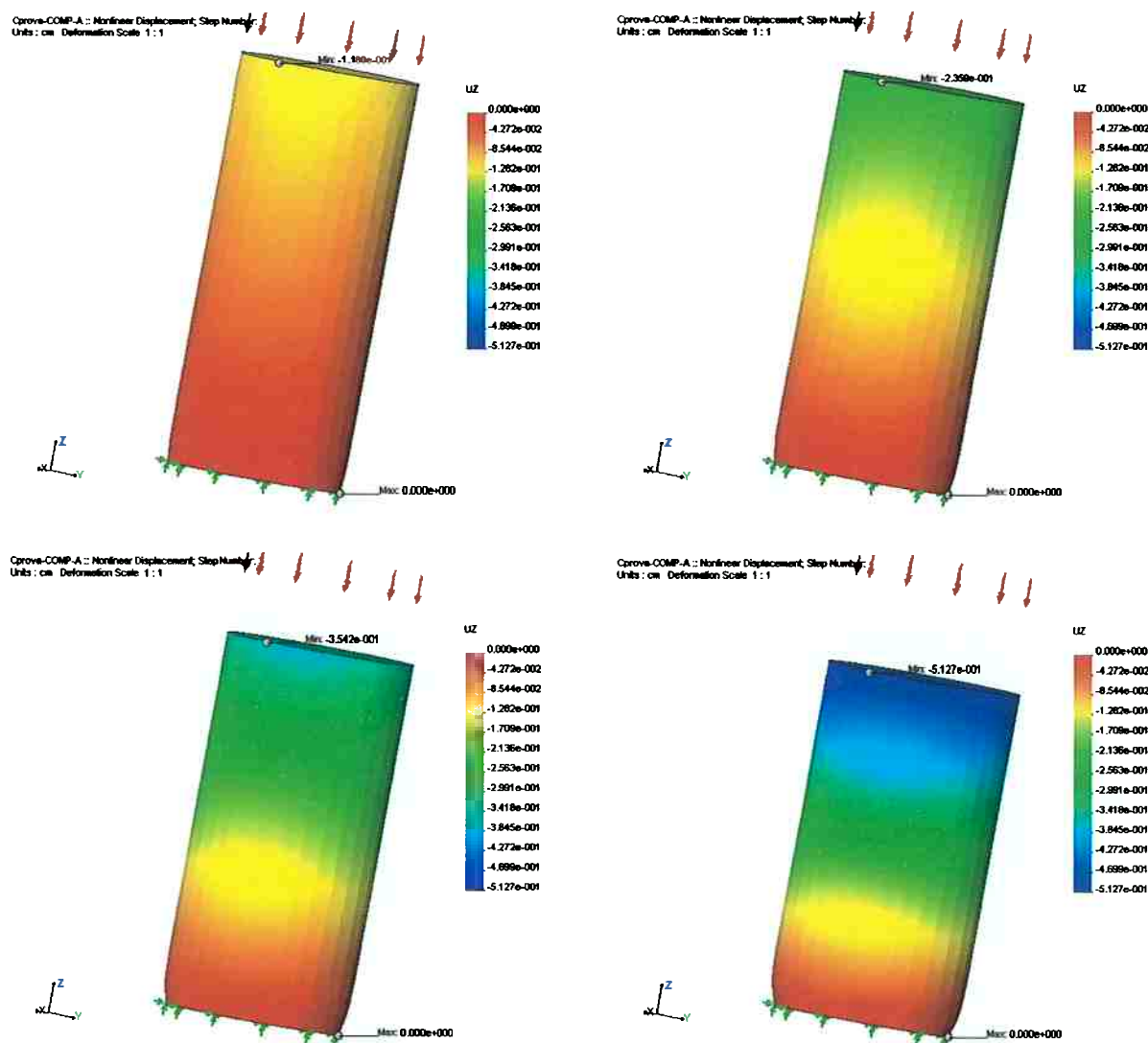


Anexo III

Plotagens no DesignSTAR do CP ensaiado

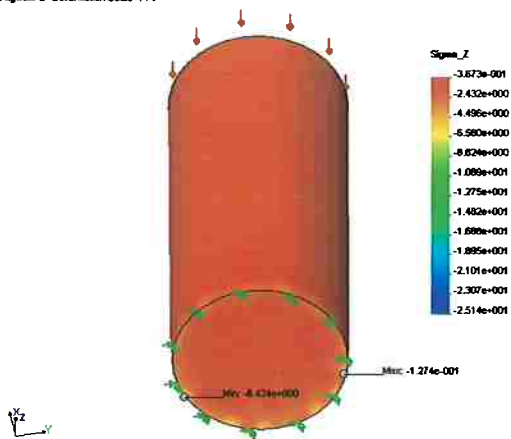
A seguir estão presentes as Figuras representando os deslocamentos sofridos pelo corpo de prova, com sua simulação no aplicativo mencionado. Estão discriminadas as curvas utilizadas, as legendas e também os passos referentes a cada Figura. Estão separados por ordem de realização e de tipo de análise.

MPC2 - Deslocamentos

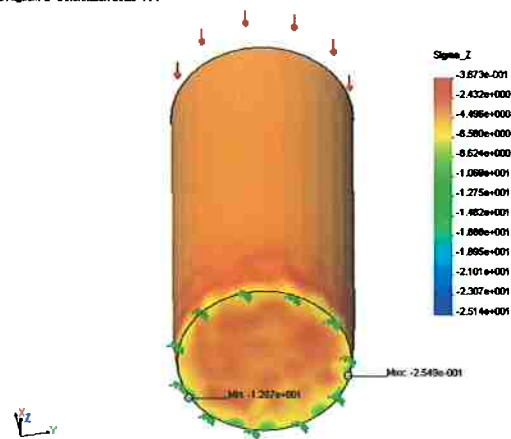


MPC2 – Tensões Normais

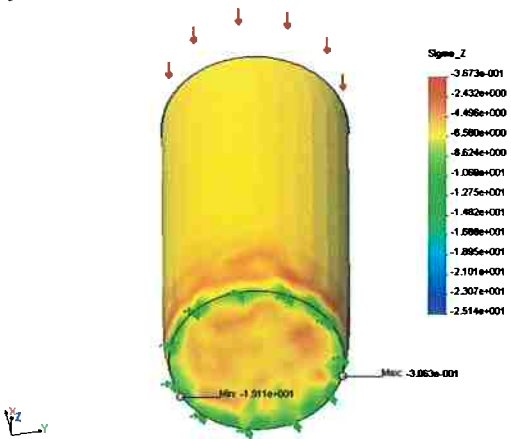
Corvus-COMP.A : Nonlinear Model Stress; Step Number: 1
Units : kgf/cm² Deformation Scale 1 : 1



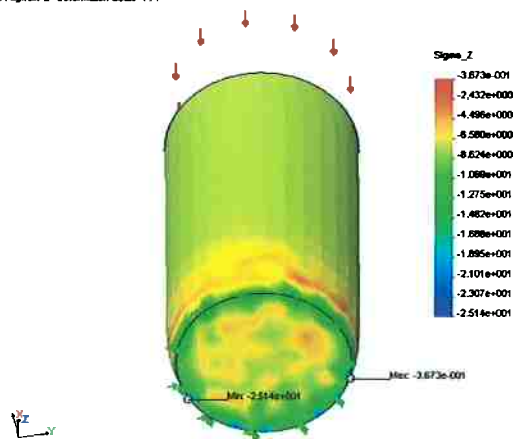
Corvus-COMP.A : Nonlinear Model Stress; Step Number: 2
Units : kgf/cm² Deformation Scale 1 : 1



Corvus-COMP.A : Nonlinear Model Stress; Step Number: 3
Units : kgf/cm² Deformation Scale 1 : 1



Corvus-COMP.A : Nonlinear Model Stress; Step Number: 4
Units : kgf/cm² Deformation Scale 1 : 1



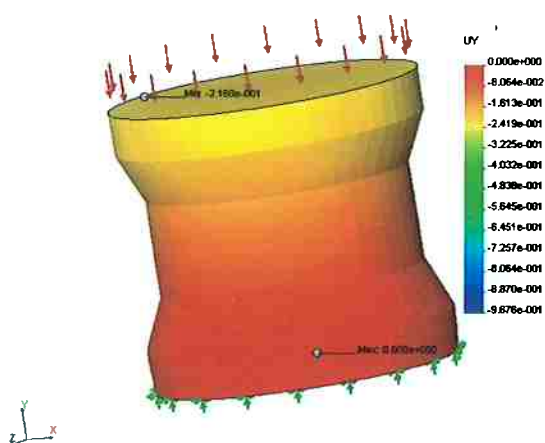
Anexo IV

Plotagens no DesignSTAR do Coxim ensaiado

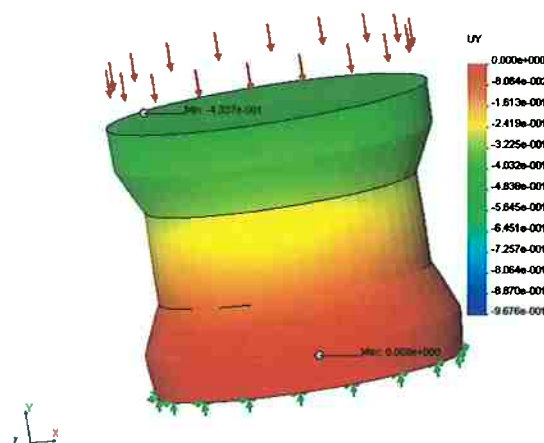
A seguir estão presentes as Figuras representando as tensões normais e os deslocamentos sofridos pelo coxim, com sua simulação no aplicativo mencionado. Estão discriminadas as curvas utilizadas, as legendas e também os passos referentes a cada Figura. Estão separados por ordem de realização e de tipo de análise.

MPC2 - Deslocamentos

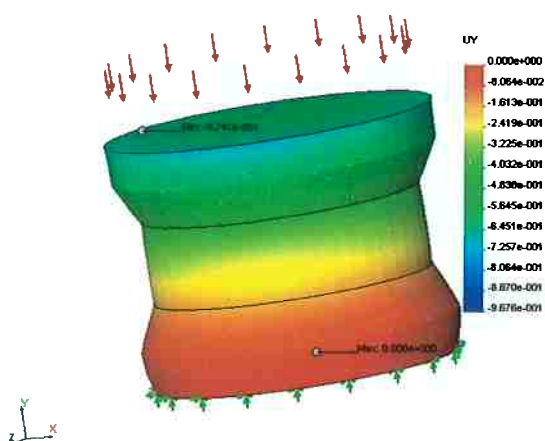
cosim2-Comp_A :: Nonlinear Displacement; Step Number: 1
Units : cm Deformation Scale 1 : 1



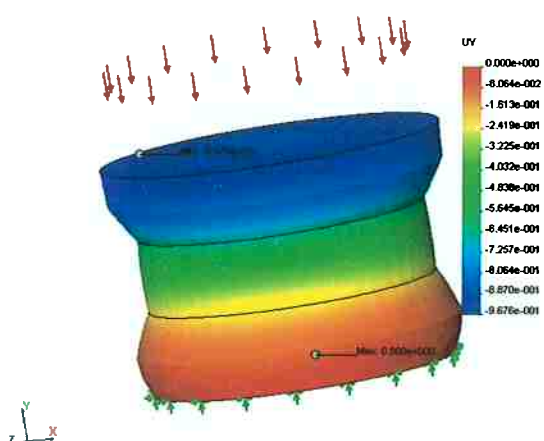
cosim2-Comp_A :: Nonlinear Displacement; Step Number: 2
Units : cm Deformation Scale 1 : 1



cosim2-Comp_A :: Nonlinear Displacement; Step Number: 3
Units : cm Deformation Scale 1 : 1

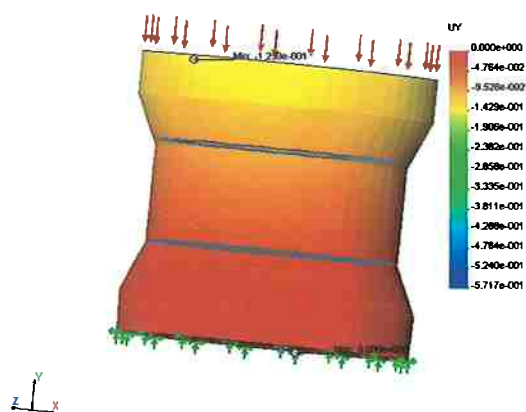


cosim2-Comp_A :: Nonlinear Displacement; Step Number: 4
Units : cm Deformation Scale 1 : 1

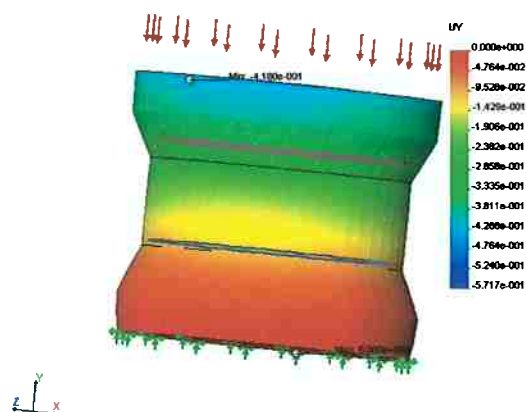


MPC3 – Deslocamentos

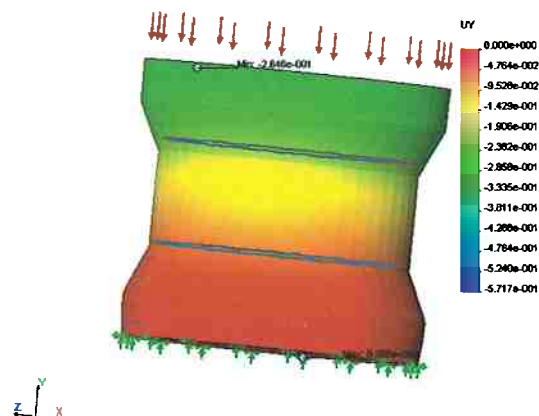
cosin3-Comp_A : Nonlinear Displacement, Step Number: 1
Units : cm Deformation Scale 1 : 1



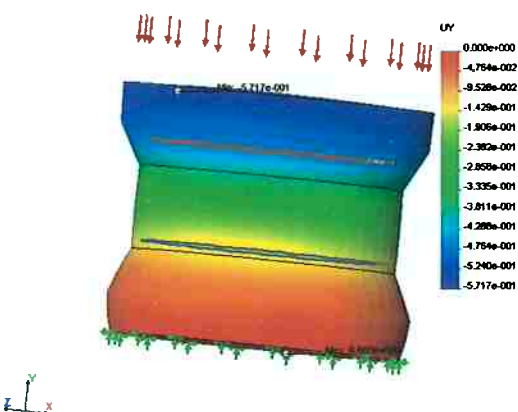
cosin3-Comp_A : Nonlinear Displacement, Step Number: 3
Units : cm Deformation Scale 1 : 1



cosin3-Comp_A : Nonlinear Displacement, Step Number: 2
Units : cm Deformation Scale 1 : 1

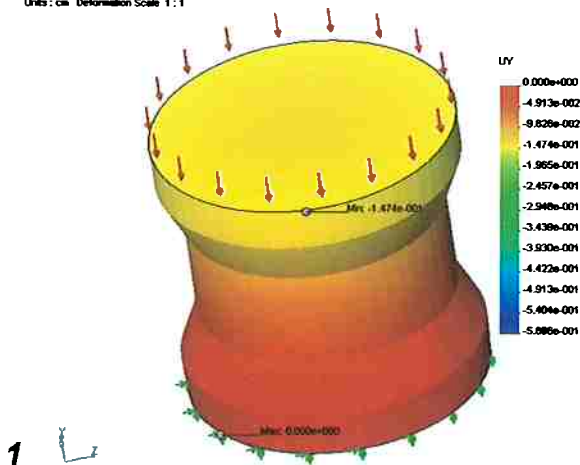


cosin3-Comp_A : Nonlinear Displacement, Step Number: 4
Units : cm Deformation Scale 1 : 1

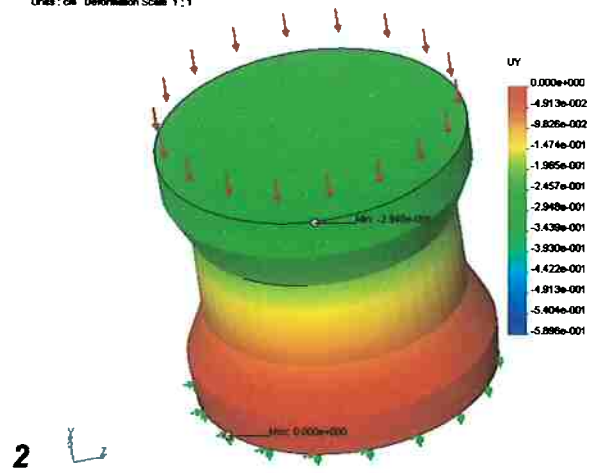


Estático – Deslocamentos

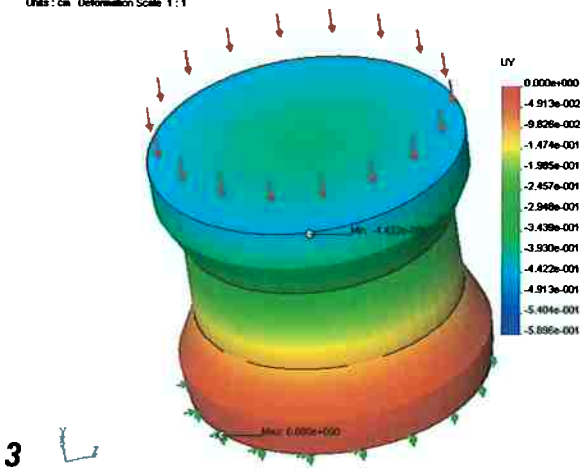
codim2-ConvSH :: Static Displacement
Units : cm Deformation Scale 1 : 1



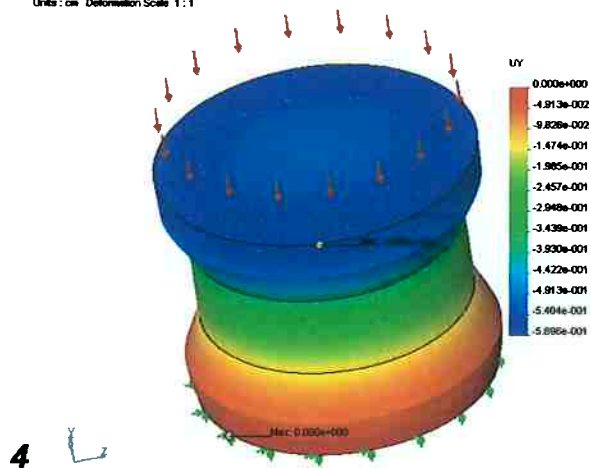
codim2-ConvSH :: Static Displacement
Units : cm Deformation Scale 1 : 1



codim2-ConvSH :: Static Displacement
Units : cm Deformation Scale 1 : 1

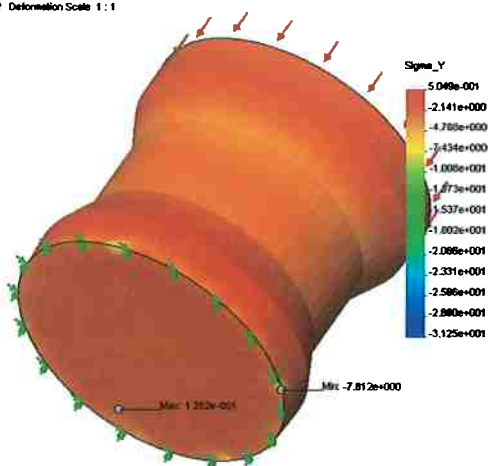


codim2-ConvSH :: Static Displacement
Units : cm Deformation Scale 1 : 1



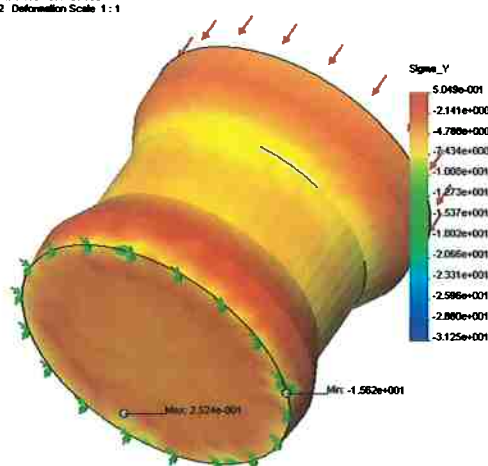
Estático – Tensões Normais

cosim2-ComSM :: Static Model Stress
Units : kgf/cm² Deformation Scale 1 : 1



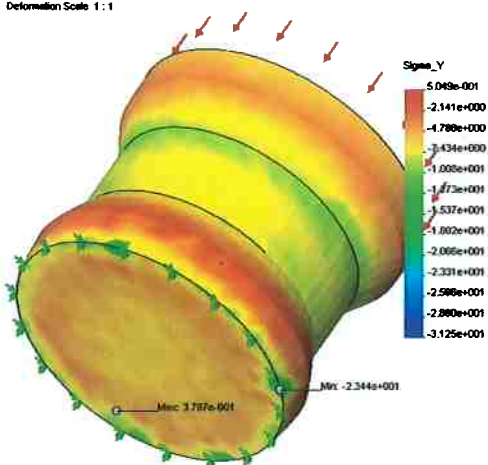
1

cosim2-ComSM :: Static Model Stress
Units : kgf/cm² Deformation Scale 1 : 1



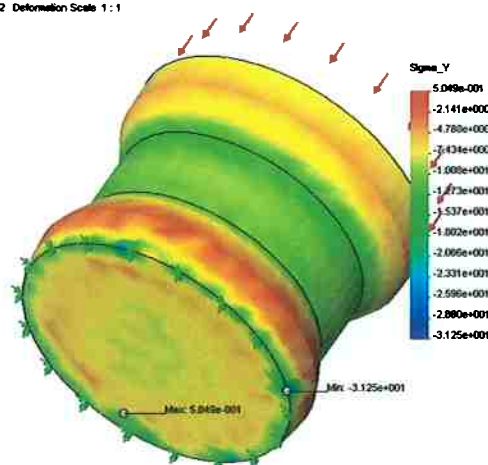
2

cosim2-ComSM :: Static Model Stress
Units : kgf/cm² Deformation Scale 1 : 1



3

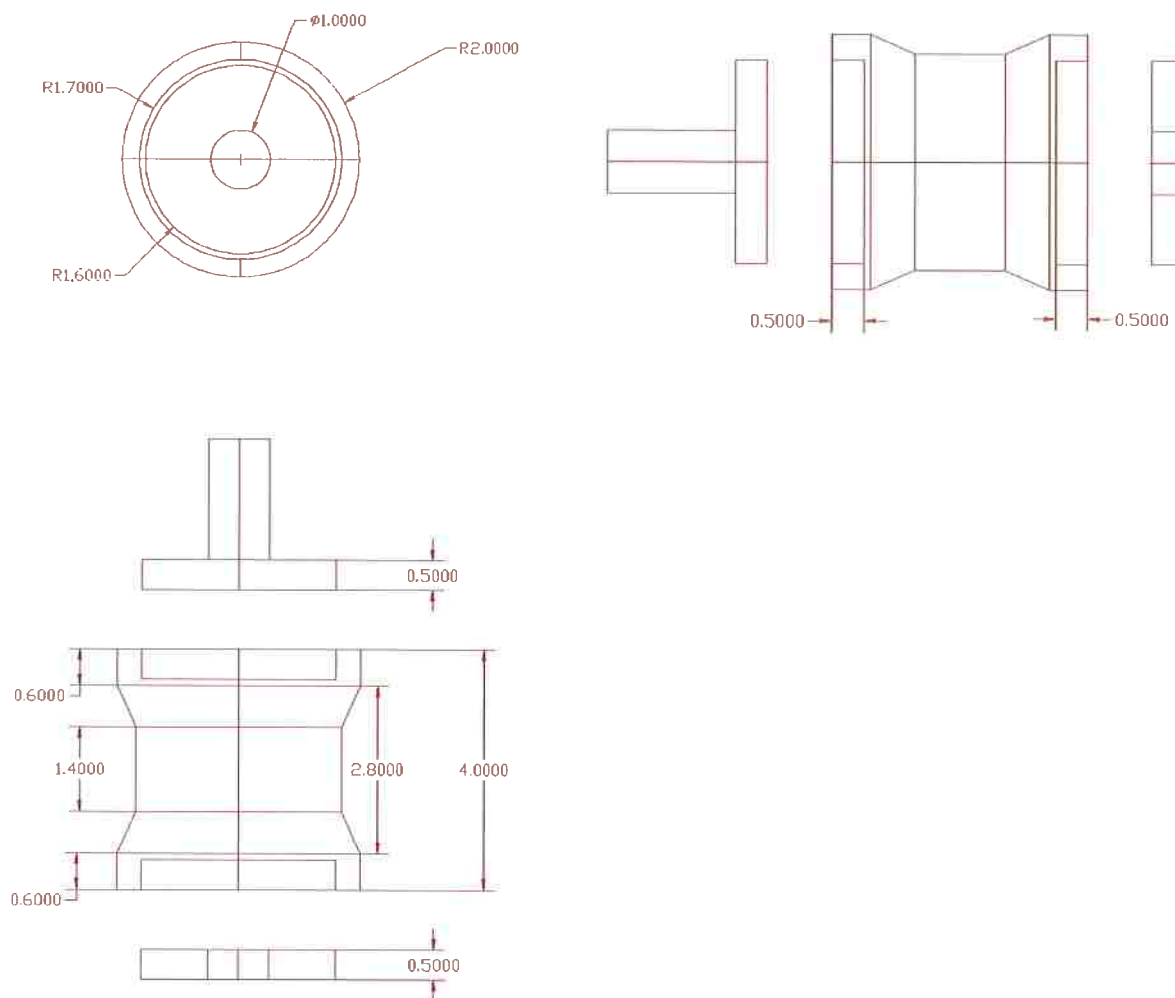
cosim2-ComSM :: Static Model Stress
Units : kgf/cm² Deformation Scale 1 : 1



4

Anexo V

Desenho técnico do Coxim utilizado.



Apêndices

Apêndice A

Desenho da Peça em Autodesk AutoCAD versão 2005

Tomadas as medidas da peça em questão, deve ser feito um desenho em duas dimensões simples com as respectivas cotas para facilitar na transposição das dimensões para o programa de desenho técnico, como na Figura A.1 abaixo.

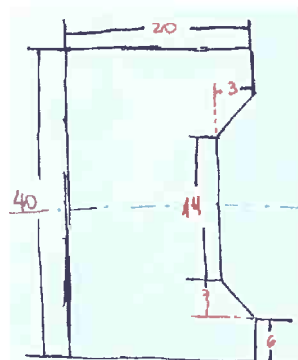


Figura A.1 – Cotas para programação em CAD.

Feito isso, inicia-se o programa, e um novo projeto, e uma tela se abre para a realização do desenho.

A técnica para este coxim é muito simples, e foi feito a partir de uma única linha, partindo-se de um ponto, e chegando a este mesmo ponto. Isso facilita um passo posterior, de rotação, gerando a peça em três dimensões.

Para criar a linha, clique na ferramenta Line, como na Figura A.2, e clique em algum lugar da tela para começar o desenho.

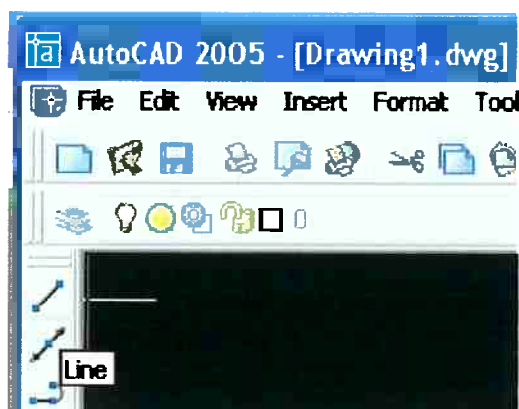


Figura A.2 – Ferramenta Line.

Feito isso, alinhe a guia que aparece paralela ao eixo X, e digite o tamanho da cota, no caso 60, e o número aparecerá no campo da linha de comando (Figura A.3), como ponto oposto, então pressione ENTER. Lembre-se que a consistência das unidades é muito importante, então entre sempre com valores de mesma unidade. A linha se faz, e o desenho continua da extremidade desta linha.

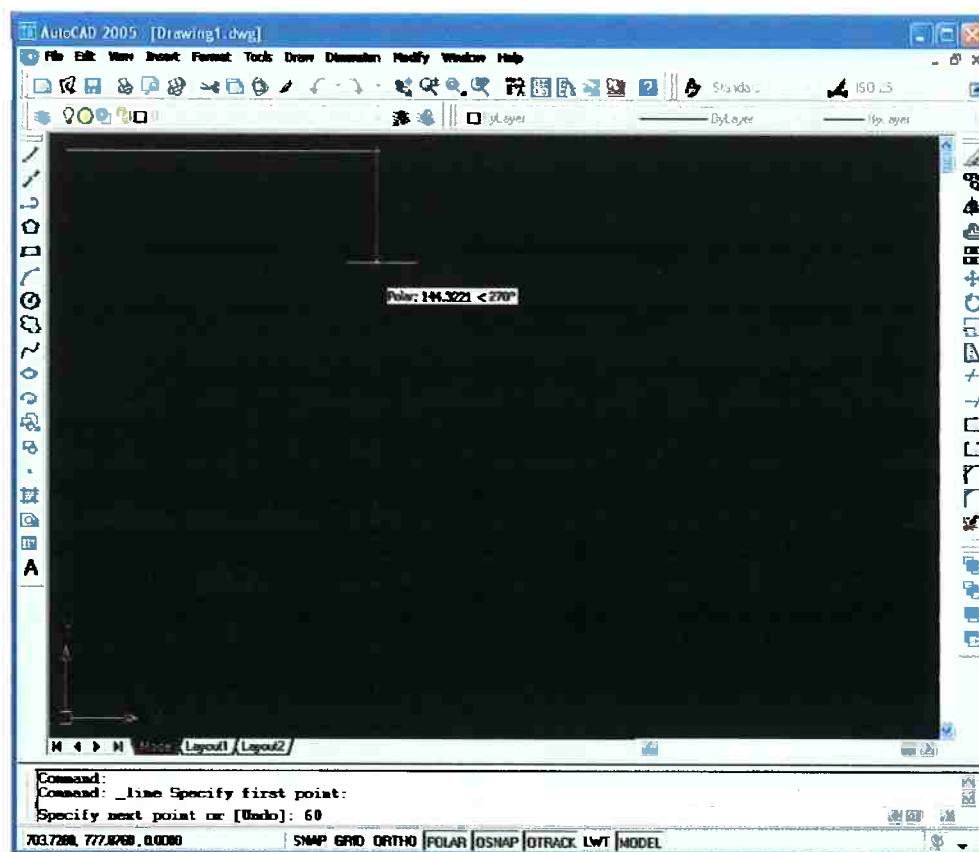


Figura A.3 – Procedimento para desenho da peça, com cota na linha de comando.

O procedimento para o resto do desenho é o mesmo, alinha-se a guia ao eixo desejado e entra com o tamanho.

Para fazer a inclinação, tendo os valores de ambas profundidades, como no desenho acima com as cotas, entre primeiro com o valor da linha paralela ao eixo X e pressione duas vezes enter. A linha se finaliza, então clique na extremidade da linha, e três quadrados guia aparecem (Figura A.4). Selecione a extremidade a ser inclinada, e clique na mesma, alinhe o eixo, e digite a medida que deve ser “esticada” para formar a inclinação. Então selecione a ferramenta linha novamente, e clique na extremidade da inclinação, e a partir daí, vá desenhando a peça da mesma maneira até chegar no formato de meia seção transversal como o desenho com cotas mostrou anteriormente.

A peça desenhada deve parecer com a próxima Figura A.5.

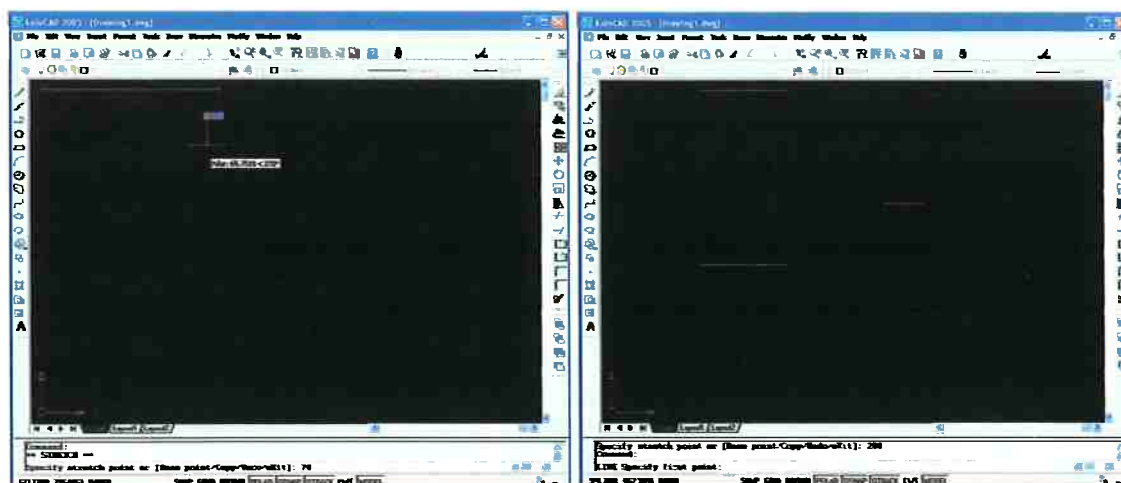


Figura A.4 e A.5 – Procedimento para fazer a inclinação (4) e peça finalizada (5).

O próximo passo é realizar a rotação, e finalizar a peça, para deixá-la pronta para a exportação.

Primeiramente, defina uma região, clicando no menu DRAW, e logo após em Boundary, não modifique nenhuma opção, e clique em OK, a janela sumirá e agora deve-se clicar em um ponto dentro da região da peça, ela vai ser selecionada, como na Figura A.6, e então pressione ENTER. A mensagem “Boundary created 1 Polyline” é exibida na linha de comando.

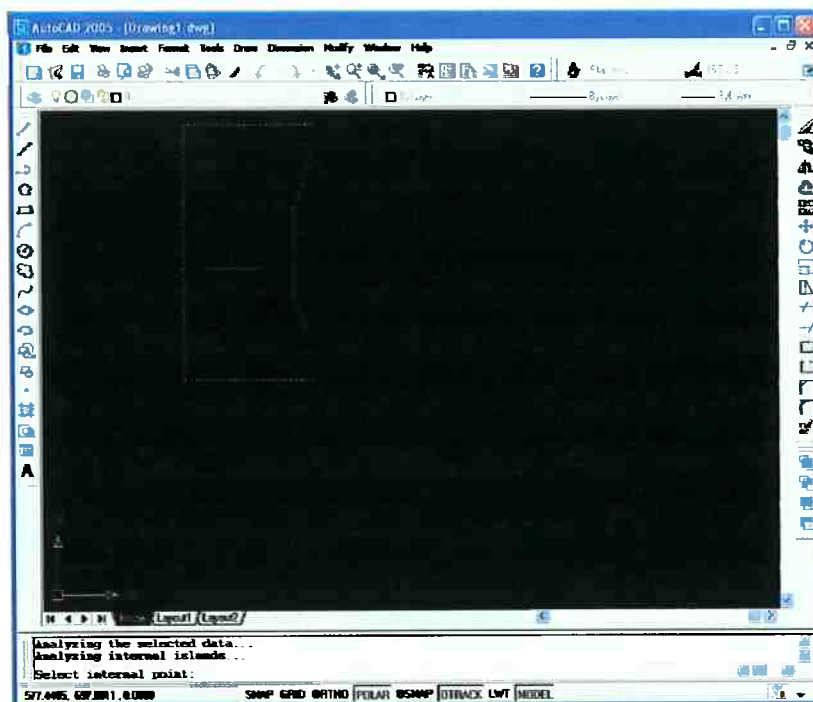


Figura A.6 – Criação da região da seção transversal do coxim.

Selecione agora o menu DRAW, e em seguida Solids, e Revolve (Figura A.7). Em seguida, selecione o objeto a ser revolucionado, clique em qualquer linha do

desenho, ele será selecionado, então pressione ENTER. Agora selecione o eixo de revolução, no caso o eixo Y. Para tal, clique numa das extremidades do eixo Y a ser revolucionado, e depois clique na outra extremidade, como mostra a Figura A.8, com ambas selecionadas. Você acabou de desenhar o eixo que deve servir de referência, e o próximo passo é entrar o ângulo de rotação, digite 360 e aperte ENTER.

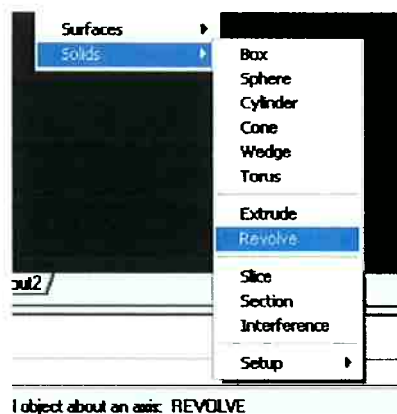


Figura A.7 – Menu revolve.

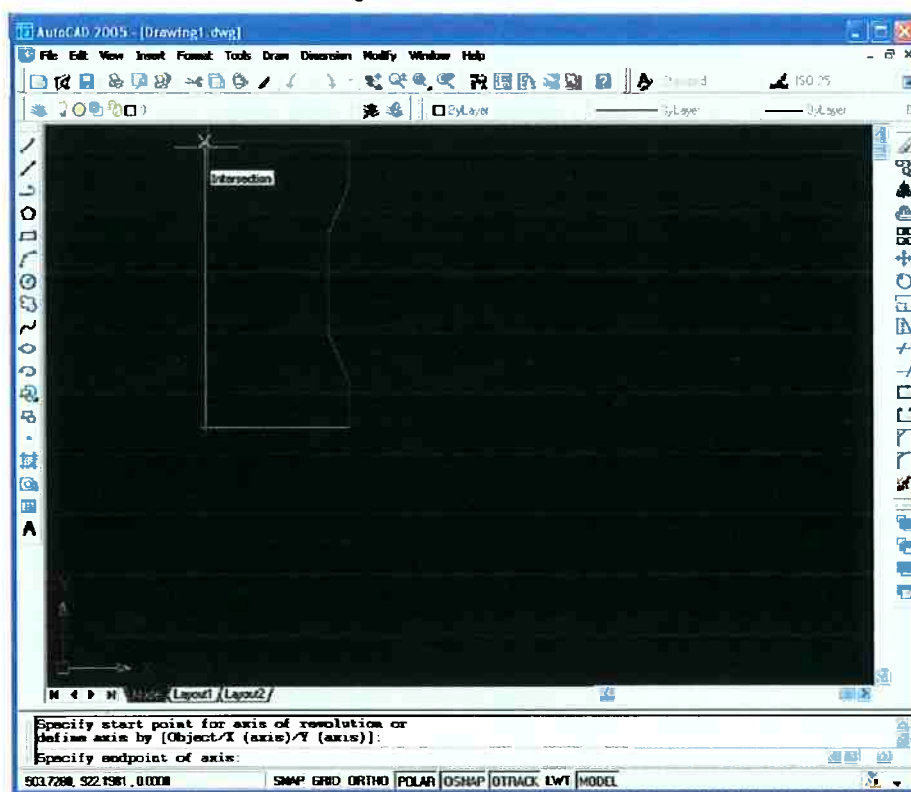


Figura A.8 – Eixo Y selecionado para comando Revolve.

PRONTO!! A tela deverá exibir uma tela como a Figura A.9 mostra a seguir.

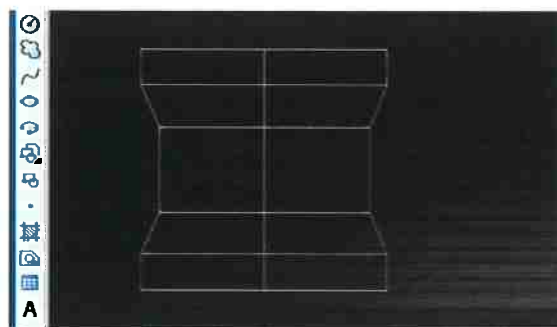


Figura A.9 – Figura finalizada, pronta para exportação.

Salve o seu trabalho como DWG, clicando em salvar, e em seguida digite o comando ACISOUTVER e como valor de entrada 16. Feito isso, clique no menu FILE, e Export... que uma janela de salvamento aparecerá. Selecione a opção ACIS (.SAT), como mostra a Figura A.10 e digite um nome de arquivo, e clique então em Salvar. A janela com a peça espera a seleção do objeto para completar a exportação.

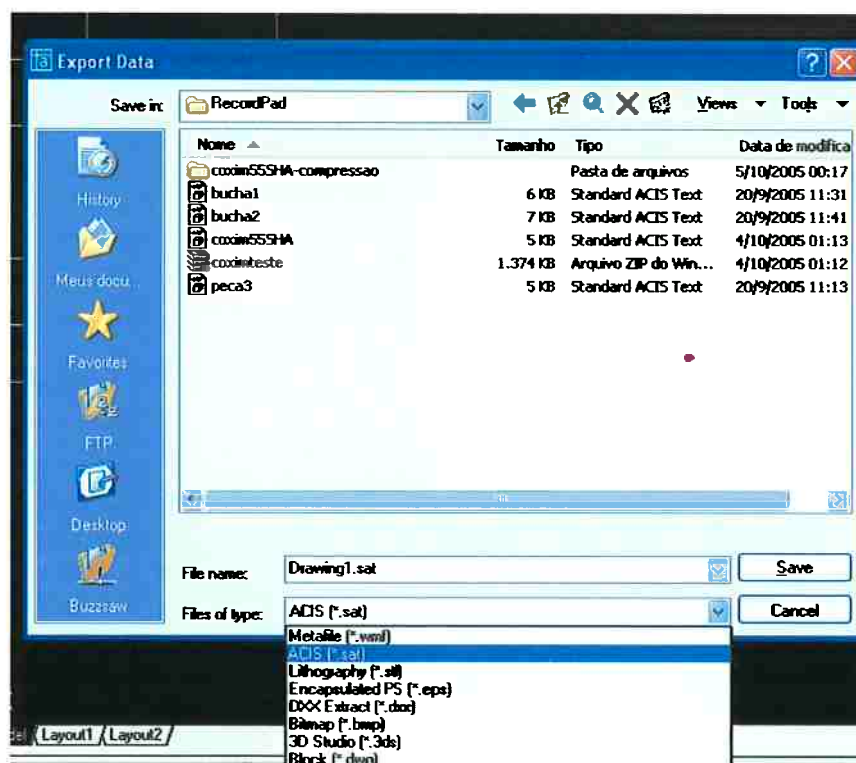


Figura A.10 – Janela de exportação.

Clique em qualquer ponto das linhas que formam a peça e ela se tornará tracejada, aperte ENTER e confirme a seleção.

Sua peça está salva e pronta para exportação no aplicativo Cosmos DesignSTAR. Para saber como proceder, consulte o Anexo C, referente à simulação pelo DesignSTAR.

Apêndice B

Programação em COMOS GeoSTAR 256K - Rotina

O Aplicativo GeoSTAR trabalha com codificação em linha, como uma linguagem de programação normal, e maiores detalhes sobre suas sintaxes devem ser procurados na seção de HELP do próprio aplicativo.

Neste tutorial será mostrada a rotina de programação do programa, desde as linhas de programação, explicadas por funções desejadas, até a obtenção dos resultados para comparação com os obtidos por método de cálculos. Com a planilha de MPC calculada, como explicada anteriormente neste trabalho, parte-se para a programação em GeoSTAR, a seguir, a linha de comando utilizada para a programação em questão:

```
PT,1,2.0,0,0
PT,2,2.0,.6,0
PT,3,1.7,1.3,0
PT,4,1.7,2.7,0
PT,5,2.0,3.4,0
PT,6,2.0,4.0,0
PT,7,-2.0,4.0,0
PT,8,-2.0,3.4,0
PT,9,-1.7,2.7,0
PT,10,-1.7,1.3,0
PT,11,-2.0,.6,0
PT,12,-2.0,0,0
VIEW,0,0,1,0
SCALE,0
SF4PT,1,1,2,11,12,0
SF4PT,2,2,3,10,11,0
SF4PT,3,3,4,9,10,0
SF4PT,4,4,5,8,9,0
SF4PT,5,5,6,7,8,0

M_SF,1,5,1,4,2,4,1,1
NMERGE,1,75,1,0.0001,0,0,0
NCOMPRESS,1,75
RCONST,1,1,1,2,2.68,0

EGROUP,1,PLANE2D,0,2,0,0,4,0,0,0
MPROP,1,NUXY,.499,
MPCTyp,1,1
MPC,1,0,1,-.1830,-10.9232,-.1372,-
08.3401,-.0915,-05.7570,-0.0457,-
03.1739,0,0,0.0457,3.1739,0.0915,05.5750,
0.1372,8.3401,0.1830,10.9231
DCR,16,UY,-.6232,16,1,

DCR,3,AL,0,3,1

TIMES,0,4,1
CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,2.5e-01

NL_CONTROL,0,1
NL_PLOT,1,100,1,0
```

Definição dos pontos para desenhar meia secção transversal do coxim. Foram feitos 12 pontos para facilitar a criação da mesh.

Criação das superfícies para criação da malha de pontos. Foram criadas 5 superfícies.

Criação do MESH, e subsequente compressão de pontos para não existir duplicidade, e espessura.

Definição de propriedades do material entrada da curva MPC, e definição do deslocamento máximo.

Definição do engaste.

Definição do tempo de análise.

Parâmetros da análise.

Feita a programação, é preciso salvar o arquivo como texto simples, no NOTEPAD, e abri-lo no GeoSTAR. Para tal, após iniciar o aplicativo, vá ao menu FILE, e escolha LOAD. Clique em Find... no campo Input filename, e escolha o arquivo salvo em TXT anteriormente. Em seguida, clique em OK, e a rotina da programação será carregada no aplicativo e automaticamente executada. Sua tela deverá estar assim após o carregamento (Figura B.1):

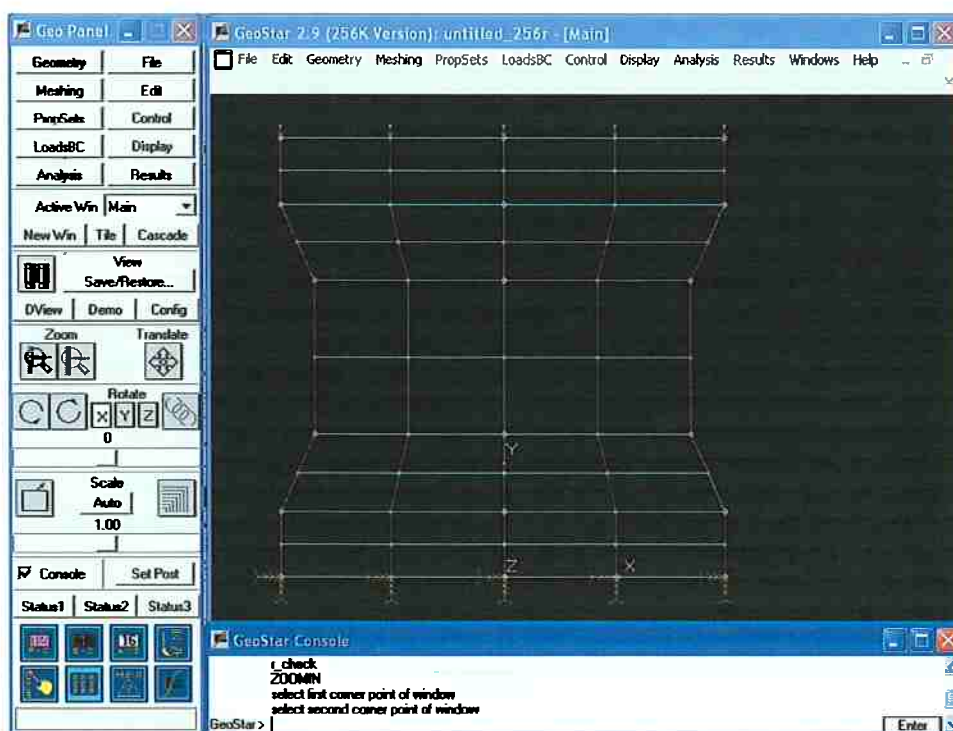


Figura B.1 – Tela pronta após a programação.

O Próximo passo é rodar uma análise para garantir a consistência da programação. Para isso execute o comando R_CHECK e escolha a opção NONLINEAR, já que a análise está sendo não-linear.

Caso não ocorra nenhum problema, a tela após sumir, voltará da mesma forma, com o console pronto para entrar a próxima instrução. Caso aconteça qualquer problema, uma janela de erro aparecerá e você poderá verificar o que aconteceu escolhendo a opção de exibir o LOG de erro.

Após essa verificação, o comando a ser utilizado é o que finalizará e iniciará a ferramenta de análise de elementos finitos, a análise não linear. Para tal, execute R_NONLINEAR, e aperte ENTER, e aguarde as iterações do programa se finalizarem. Este passo é acompanhado através da seguinte janela (Figura B.2):

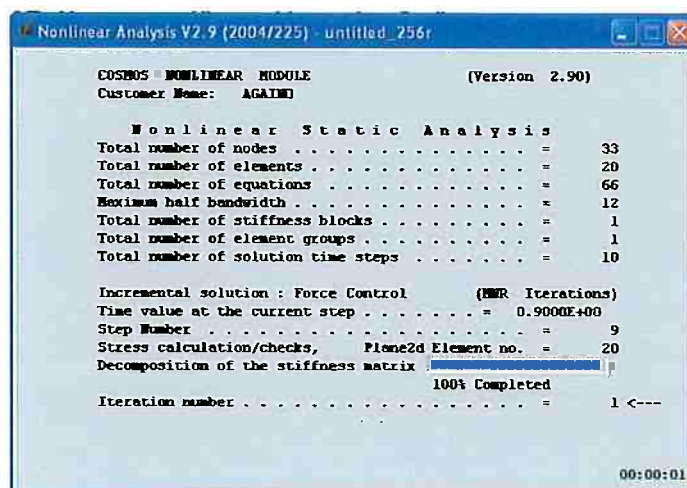


Figura B.2 – Janela com os passos a serem seguidos pelo aplicativo.

A seguir, a mesma janela de programação aparece, e já é possível conferir os resultados obtidos pela análise FEM.

Para a conferência, utiliza-se o menu Results e suas opções PLOT, LIST e EXTREMES, dependendo do resultado desejado.

A seguir encontra-se uma Tabela (Tabela B.1) que relaciona qual comando escolher para cada resultado desejado:

Tabela B.1 – Tipos de opção possíveis para retomar resultados para comparação.

Opção	Tipo de análise	Escolha	Resultado
PLOT (Graficamente)			
	Stress	SY: Normal Stress	Tensão no corpo
	Displacement	UY: Displacement	Deslocamento no corpo
LIST (Dados Listados)			
	Displacement/Response/Reaction	4: Reaction Forces	Somatória das Cargas

Se acontecer algum problema na obtenção dos resultados, digite a linha de comando referente ao deslocamento. Existe um BUG no aplicativo no qual ele pula o comando na hora da iteração, entretanto se você digitar este comando agora, ele obedece à instrução e lhe dá os resultados corretos. Um exemplo de resultado é mostrado na Figura B.3 a seguir, onde é mostrado o deslocamento em cada ponto da secção e na Figura B.4, em que são mostradas as forças resultantes de compressão, e sua somatória.

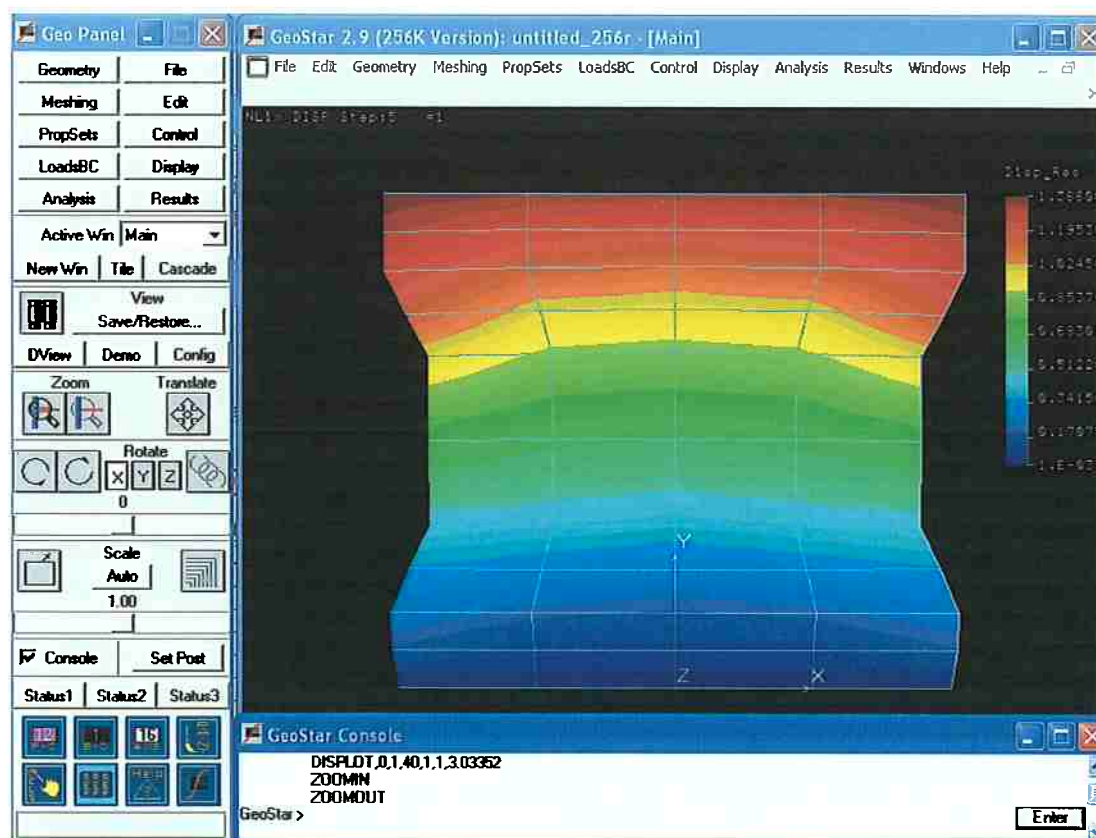


Figura B.3 – Deslocamento localizado na secção da peça.

DISLIST,10,4,1,33,1,0

Node	RFY	RFZ	Step	10
			RFZ	RFRES
1	2.991e+000	1.248e+001	0.000e+000	1.283e+001
2	-2.676e-001	1.767e+001	0.000e+000	1.767e+001
3	-2.723e+000	8.788e+000	0.000e+000	9.201e+000
31	0.000e+000	-1.140e+001	0.000e+000	1.140e+001
32	0.000e+000	-1.982e+001	0.000e+000	1.982e+001
33	0.000e+000	-7.712e+000	0.000e+000	7.712e+000
Sum	0.000e+000	0.000e+000	0.000e+000	0.000e+000

Figura B.4 – Listagem das cargas de compressão, e sua somatória.

Os campos em destaque na Tabela correspondem aos que devem ser comparados na tabela calculada mencionada anteriormente neste trabalho, e seus valores para estarem coerentes, devem estar com um erro ao redor de 7%.

Com isto a análise pelo GeoSTAR está finalizada e pronta para ser discutida.

OBS: Resultados neste apêndice são para motivo único de demonstração.

Apêndice C

Programação em DesignSTAR 4.5 - Rotina

O Aplicativo DesignSTAR, diferentemente do GeoSTAR, trabalha com interface visual, de forma graficamente, e nele será utilizada a peça criada no AutoCAD, explicada no anexo respectivo.

Primeiramente, se deve importar o desenho da peça, salva anteriormente como arquivo tipo ACIS (extensão .SAT), abrindo um novo projeto, e selecionando no tipo de arquivo, a opção ACIS Files (.SAT), e após sua seleção, clicando em OK. Confirme as unidades em mm, e sua tela deverá aparecer como a seguinte Figura (Figura C.1).

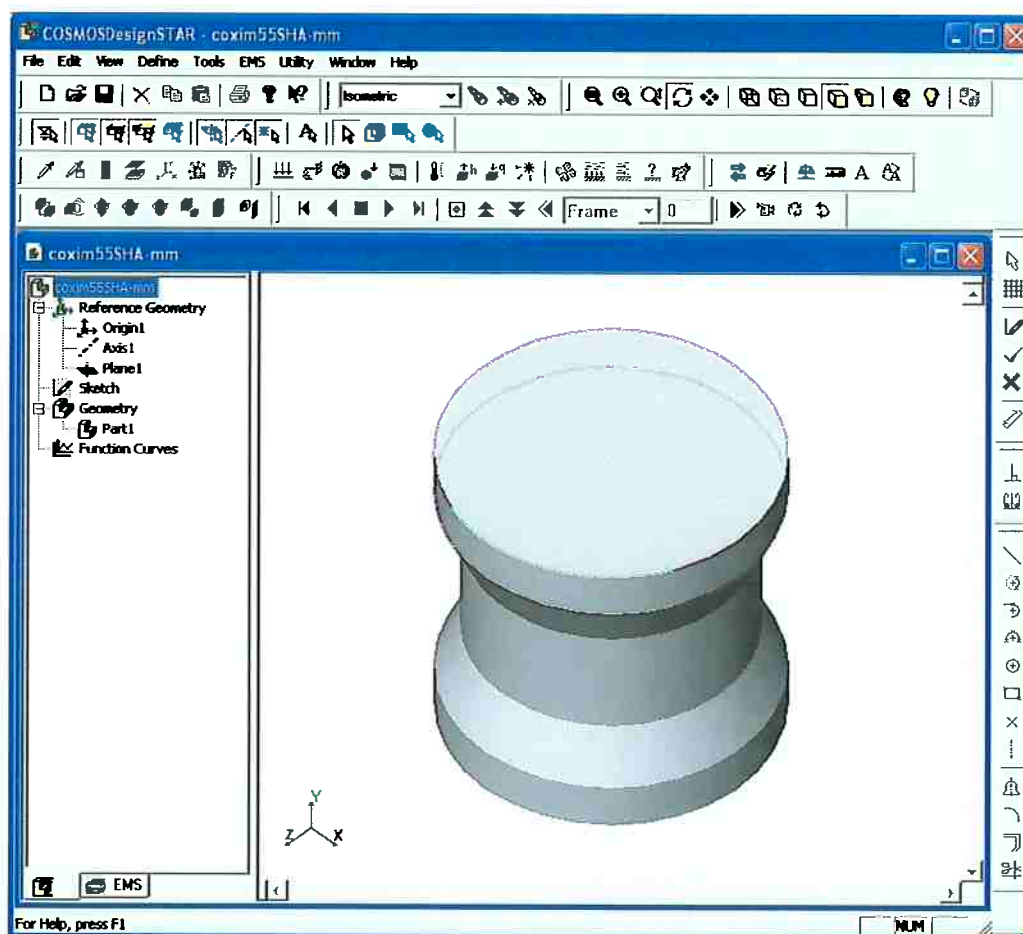


Figura C.1 – Tela com a peça recém exportada.

O passo seguinte é definir um estudo a ser realizado na peça, para isso, escolha no menu Define, a opção Study... e, em seguida clique em Add, criando um nome para o estudo, neste caso COMPRESSÃO e o tipo de análise, NONLINEAR e clique em OK.

Criado o estudo, o próximo passo é definir as curvas de tempo e de propriedades do material. Novamente no menu Define, escolha a opção Function Curves.... Para a curva de tempo, no campo Type, escolha Time Curve e entre com os valores para o intervalo de iterações, como mostra a Figura C.2.

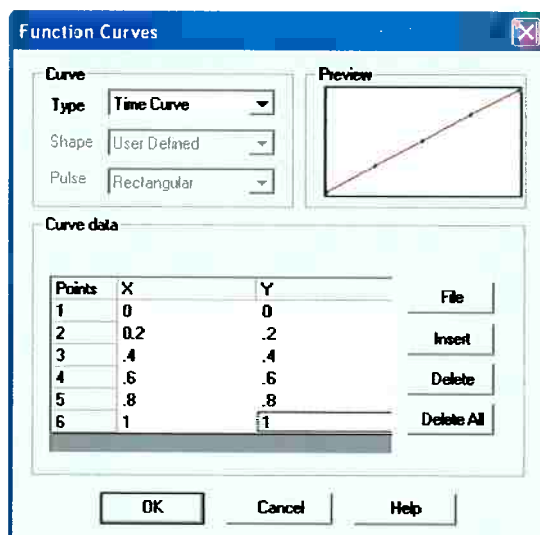


Figura C.2 – Definição da curva TIMES.

Para definir a curva de propriedades do material, escolha no mesmo menu, para a opção Type, Material Curve, e entre com os valores de tensão e deformação (valores simétricos) para construir a curva, ela deve parecer como a Figura C.3 a seguir. Lembre-se de conferir as unidades, e colocá-las corretamente com a definida no campo Unity.

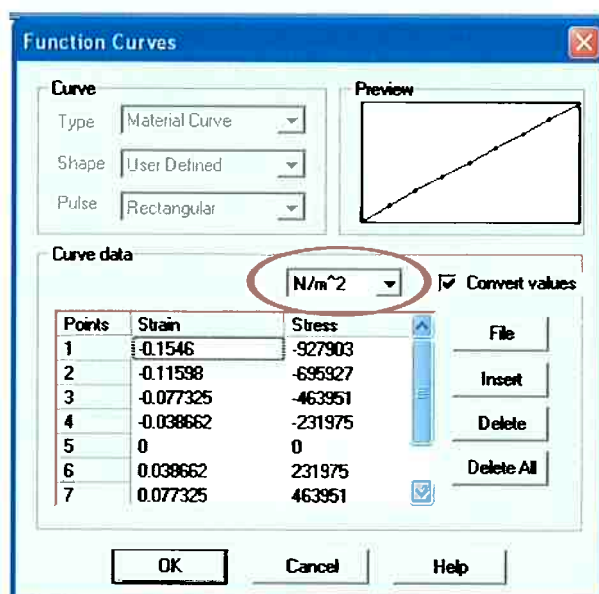


Figura C.3 – Definição da Material Properties Curve (MPC). Obtenção desta curva é explicada anteriormente neste trabalho.

Sua tela terá agora no menu à esquerda da peça, em formato de árvore, a informação do estudo e das curvas definidas. O próximo passo é definir as propriedades do material, escolhendo o tipo que está sendo estudado. Clique no menu Define, em Components, e escolha a opção Apply Material to ALL..., e uma janela com diversas opções aparecerá. Na coluna de tipo de material, dentro da pasta Other Non-metals, escolha a opção Rubber, e todas suas propriedades aparecerão, se não existir o tipo de material, selecione a opção Input, onde o usuário seleciona as propriedades manualmente. No campo Material Model, escolha Nonlinear Elastic, já que este é o tipo de ensaio utilizado para a análise neste caso. Não se esqueça de associar a curva tensãoxdeformação (*material curve:1*) ao material (Figura C.4). Se a biblioteca não constar, os valores a serem preenchidos são: $\text{NUXY}=0,49$, $\text{ALPX}=0.00067\text{K}^{-1}$, $\text{DENS}=1000\text{Kg/m}^3$, sempre observando as unidades corretamente.

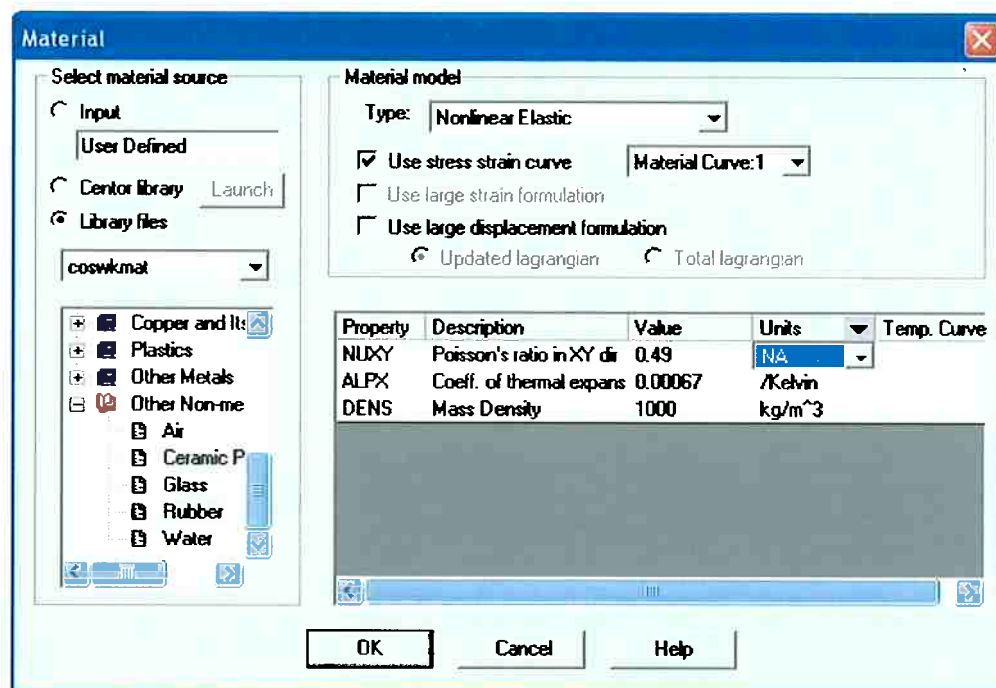


Figura C.4 – Definição do tipo de material que compõe a peça.

Em seguida, as restrições como carregamento e engastes são definidas. No menu Define, dentro da opção Loads/BC, escolha Restraint..., com o tipo Fixed, e então clique com o mouse na face que deverá ser engastada. Para confirmar, rotacione a peça e veja se a face correta foi selecionada. Ao terminar, setas verdes representarão na peça o engaste (Figura C.5). Para definir o carregamento, no mesmo menu Define/Loads/BC, escolha agora Load.... No tipo selecione Force, entre com o valor do carregamento máximo, relacione a curva de tempo (Time

Curve:1) no campo Time Curve, e por fim selecione a face da mesma maneira quando selecionou para o engaste, clicando diretamente na peça. Ao confirmar, a peça possuirá setas vermelhas, na direção da compressão indicando o carregamento solicitado (Figura C.5).

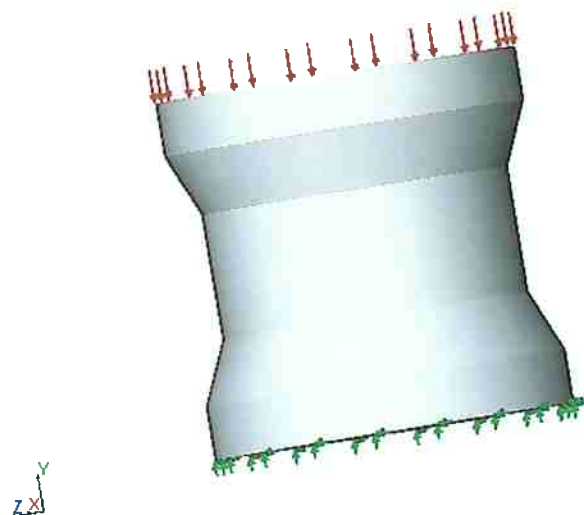


Figura C.5 – Engastamento e carregamento já presentes na peça.

Feito essas restrições, o ultimo passo é criar a malha que possibilitará a realização da simulação. Para isso, clique no menu Define/Mesh, e escolha a opção Create. Uma janela aparecerá perguntando quão grosseira ou fina a malha será, para computadores mais lentos, recomenda-se malhas grosseiras (Coarse), pois envolvem muitas iterações em detrimento de um resultado mais fino, já para máquinas mais avançadas, uma malha fina é a ideal. Confirme e a malha é criada na peça da tela, e seu estudo já pode ser rodado.

Antes de rodar, verifique se sua tela tem o menu à esquerda, em formato de árvore, com todas as informações fornecidas para esta simulação, conforme a Figura C.6 a seguir.

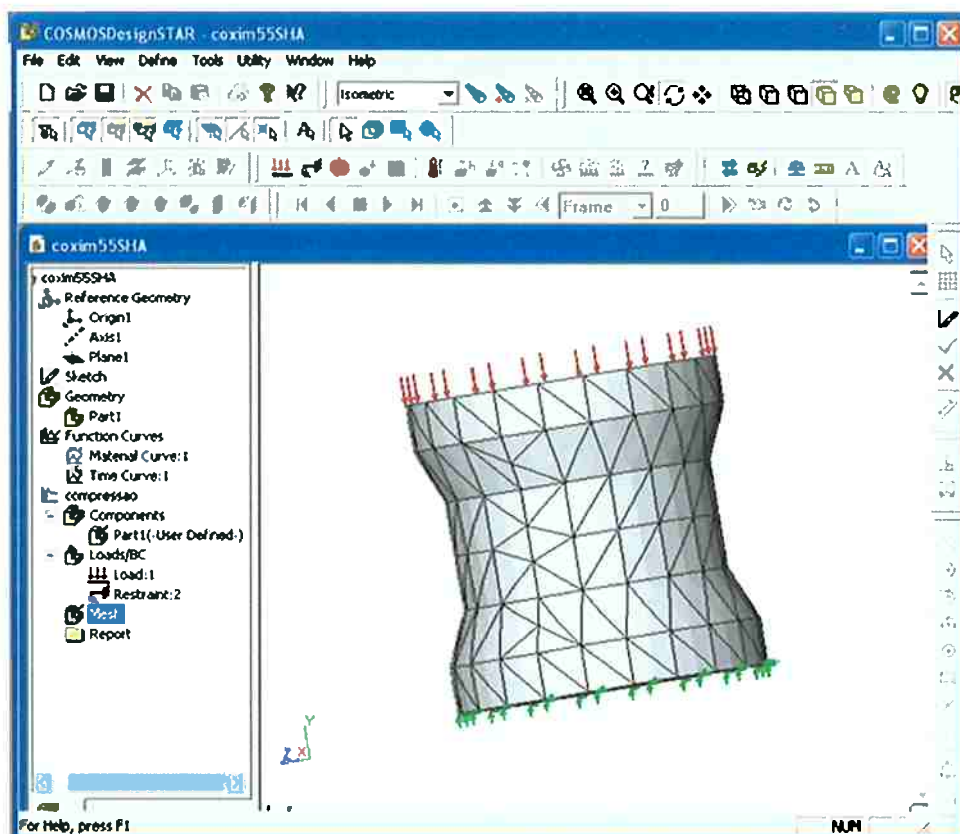


Figura C.6 – Peça pronta para início da simulação.

Agora, conferidos todos os parâmetros do ensaio, deve-se iniciar a simulação escolhendo a opção Run no menu Define. Uma tela como representada na Figura C.7 deverá aparecer, e o tempo de simulação deve ser de aproximadamente 5 minutos, se a malha escolhida for bem grosseira.

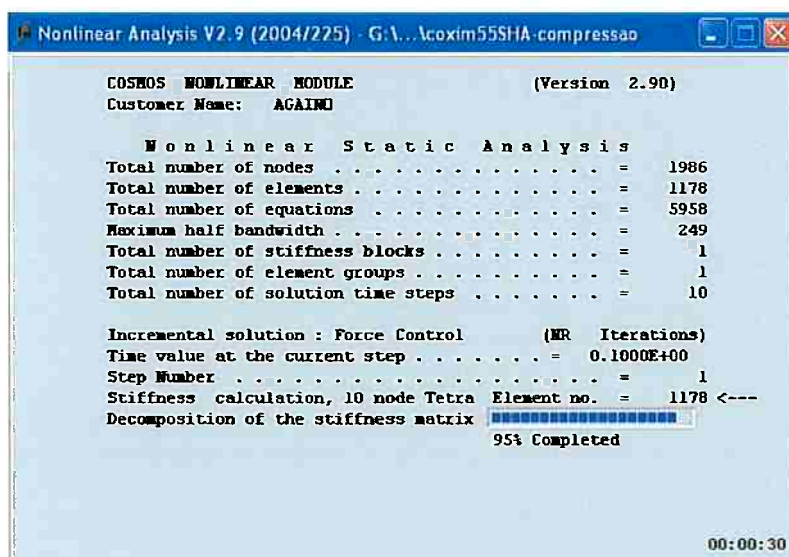


Figura C.7 – Representação da simulação ocorrendo.

Feita a simulação, os resultados estarão disponíveis na pasta report no menu do lado esquerdo. As opções serão descritas na tabela C.1 a seguir.

Tabela C.1 – Tipos de opção possíveis para retornar resultados para comparação.

Opção	Tipo de análise	Tipo de saída	Resultado
PLOT (Graficamente)			
	Stress	SY: Normal Stress	Tensão no corpo
	Displacement	UY: Displacement	Deslocamento no corpo
LIST (Dados Listados)			
	Displacement	RFY: Reaction Forces	Somatória das Cargas

Para consultar estas opções de resultado, vá ao menu Define/Result Plots, e escolha o tipo de análise, se tensão ou deslocamento, ou então clique com o botão direito do mouse sobre a pasta do menu-árvore a esquerda da peça, e selecione o tipo de análise desejada. Abrirão janelas diferentes para cada tipo, entretanto selecione o tipo de saída correto, e o resultado será exibido diretamente no corpo de prova. A seguir é exibido um exemplo (Figura C.8) de como sua tela deverá estar após criar os resultados.

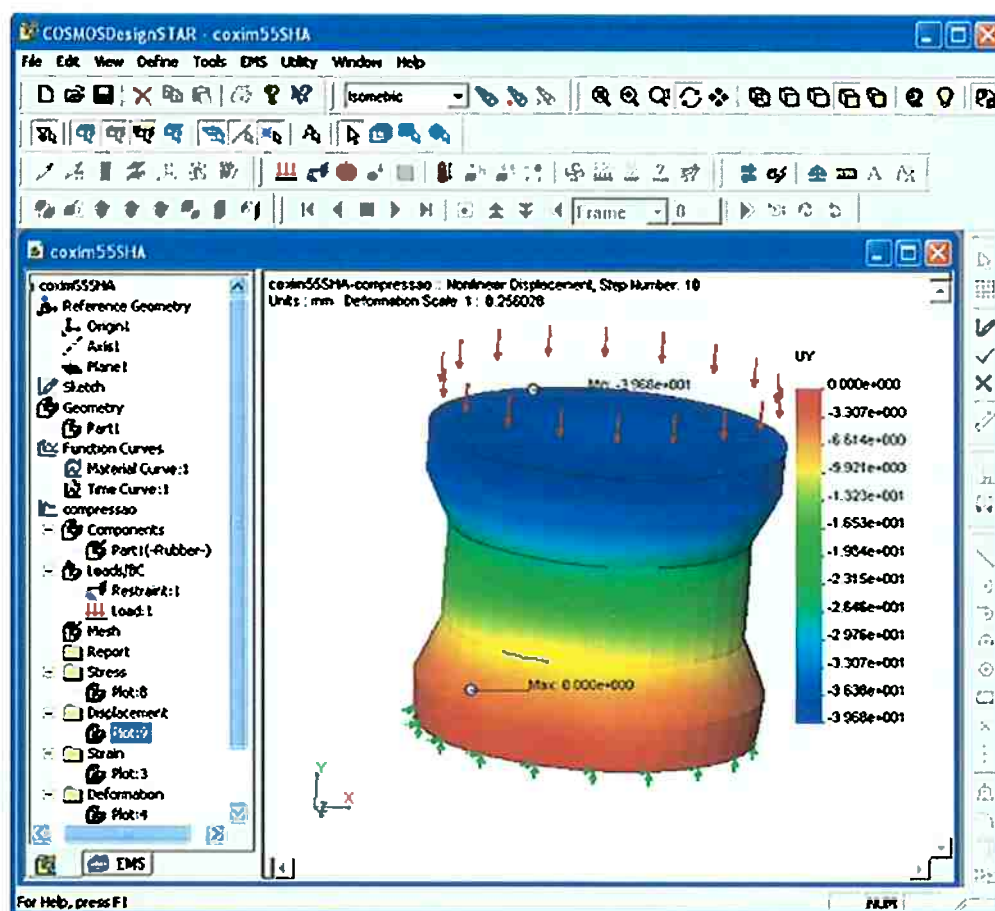


Figura C.8 – Tela completa com todas saídas, e mostrando a deformação resultante.

Para listar os resultados, vá ao menu Define/Results List, e escolha o tipo de análise novamente, e configure o tipo de saída desejado.

O último passo é salvar e partir para a comparação de resultados conforme a sua necessidade, neste caso, por exemplo, os resultados em **negrito** na Tabela C.1, são comparados com a tabela calculada anteriormente no trabalho.

OBS: Resultados neste apêndice são para motivo único de demonstração.