



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Comparação entre Resultados de Ensaios de Compressão e de Modelos Matemáticos (Elementos Finitos) Desenvolvidos para Compostos Elastoméricos

Trabalho de Formatura para
Graduação na Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Autora: Erica Shiroma
Orientador: Prof. Dr. Ronald Lesley Plaut

São Paulo

2006

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE TABELAS	iv
1. OBJETIVOS	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. Elastômeros	2
2.1.1. Características básicas.....	2
2.1.2. Vulcanização	5
2.1.3. Aditivos de elastômeros	7
<i>Agentes reticulantes</i>	8
<i>Aceleradores de vulcanização</i>	8
<i>Ativadores e retardantes de vulcanização</i>	8
<i>Antidegradantes</i>	9
<i>Auxiliares de processamento</i>	9
<i>Cargas</i>	9
<i>Agentes de extensão</i>	10
<i>Agentes de pegajosidade ("tack")</i>	10
<i>Pigmentos</i>	10
<i>Agentes especiais</i>	10
2.1.4. Processamento.....	12
2.2. Propriedades dinâmicas dos elastômeros	14
<i>Ensaio dinâmico oscilatório</i>	16
<i>Viscoelasticidade</i>	16
2.3. Método dos Elementos Finitos	18
2.4. Equipamento e Características de Ensaio Dinâmico de Elastômeros	25
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
3.1. Corpo de prova de 1 P & J	27
3.2. Corpo de prova de 3 P&J	34
4. CONCLUSÕES	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

RESUMO

O presente trabalho consiste de uma revisão, entendimento e desenvolvimento dos modelos matemáticos existentes na área de materiais elastoméricos, relativos aos ensaios (normalizados) de compressão.

O trabalho visa fazer uma comparação e avaliação de resultados de ensaios de compressão de compostos elastoméricos obtidos em experiências já realizadas com resultados de modelamentos em elementos finitos na versão Cosmos/M.

Serão analisados dois compostos elastoméricos de durezas diferentes na qual em um será estudado o efeito da variação de tensão e em outro será estudado o efeito do aumento de temperatura.

ABSTRACT

The present work consists of a review, understanding and development of analytical and numerical models for elastic materials, related of normalized compression testing.

This work intends to make a comparison and evaluation of compression testing results for elastic materials obtained from experimental results and simulations with finite element models using the Cosmos/M version.

Two elastic materials of different hardness will be analyzed in terms of stress variation and the effects of temperature increase.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tensão Nominal x alongamento	3
Figura 2 - Variação do módulo de elasticidade com a temperatura. Regiões: 1 – Estado vítreo, 2 – Faixa da T _g , 3 – Platô elastomérico, 4 e 5 – Amolecimento e Fusão (Não se aplicam a elastômeros)...	4
Figura 3 – Efeito da densidade das ligações cruzadas em algumas propriedades mecânicas do elastômero.	6
Figura 4 - Desenho esquemático representando o processamento de um composto elastomérico	13
Figura 5 – Modelos de Maxwell (a) e Voigt (b) para entendimento da viscoelasticidade dos elastômeros	15
Figura 6 – Componentes do modelamento de elementos finitos	20
Figura 7 – Sistema MTS – servo-hidráulico	25
Figura 8 – Esquema básico da máquina de ensaios	26
Figura 9 - Curvas de histerese para o composto de 1 P&J mostrando efeito da tensão.....	28
Figura 10 - Curva tensão (N/mm ²) x deformação (mm/mm) para o composto de 1 P&J	28
Figura 11 - Curva força dinâmica (N) x deslocamento (mm) para o composto de 1 P&J obtida pela MTS.....	29
Figura 12 - Modelo estrutural do corpo de prova no Cosmos/M	31
Figura 13 - Força reativa para o corpo de prova de 1 P&J em compressão	32
Figura 14 - Resultados experimentais e calculados pelo FEM.....	34
Figura 15 - Curvas de histerese para o composto de 3 P&J (t constante)	35
Figura 16 - Curvas tensão (N/mm ²) x deformação (mm/mm) para as diferentes temperaturas para o composto de 3 P&J	36
Figura 17 - Modelo estrutural em FEM do corpo de prova de 3 P&J	43
Figura 18 - Forças de reação para o composto de 3 P&J	44
Figura 19 - Resultados encontrados por FEM para o composto de 3 P&J	45
Figura 20 - Módulo dinâmico (N/mm ²) x Temperatura (°C) para o composto de 3 P&J	46
Figura 21 - Resultado gráfico do deslocamento em Y para o composto de 3 P&J.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Formulação de um composto elastomérico	11
Tabela 2 - Exemplos de elastômeros e suas características principais	12
Tabela 3 - Dados de tensão e deformação para o composto de 1 P&J	29
Tabela 4 - Resultados de força (N) obtidos no Cosmos/M para cada etapa	32
Tabela 5 - Resumo das informações relativas ao ensaio de compressão para o composto de 1 P&J	33
Tabela 6 - Valores de tensão (N/mm ²) e deformação (mm/mm) para o composto de 3 P&J nas temperaturas ensaiadas	37
Tabela 7 - Valores de força (N) encontrados por FEM para as temperaturas às quais o composto de 3 P&J foi ensaiado	44

1. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

- Realizar uma revisão de literatura sobre elastômeros e suas propriedades dinâmicas;
- Realizar uma revisão de literatura sobre o método de elementos finitos aplicados a compostos elastoméricos;
- Desenvolver modelos matemáticos no programa Cosmos/M que simulem um ensaio de compressão em dois compostos elastoméricos de durezas diferentes;
- Analisar e comparar os resultados obtidos por simulação com os resultados obtidos experimentalmente;
- Discutir os resultados obtidos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Elastômeros

2.1.1. Características básicas

A norma ASTM D 1566-90 define os elastômeros como "materiais macromoleculares que apresentam um rápido retorno até aproximadamente as dimensões e formas originais, após terem sido submetidos a substancial deformação através da atuação e remoção de uma pequena tensão ³. É um material capaz de se recuperar de grandes deformações de maneira rápida e que pode, ou ainda, já se encontra modificado em um estado em que se apresenta insolúvel (porém, podendo inchar), em um solvente tal como: benzeno, metilcetona e tolueno".

Elastômeros (ou borrachas, como é dito mais coloquialmente) são polímeros amorfos dotados de grande elasticidade (alta deformabilidade), baixa rigidez, alta capacidade de acumular energia, alta histerese e são dependentes da temperatura e da taxa de deformação. Podem, assim como os polímeros, ser subdivididos em termofixos e termoplásticos.² Os elastômeros possuem grande resistência, principalmente quando submetidos a esforços estáticos (estados de tensão ou esforços de cisalhamento e compressão) ou a esforços dinâmicos. São considerados materiais únicos que apresentam propriedades elásticas e viscosas (neste caso podem atuar como isolador de choques e vibrações, pois dissipam energia). Através da polimerização do monômero, uma molécula de cadeia longa é criada. Quanto maiores as cadeias destes segmentos, maior será a massa molecular e a viscosidade do polímero. Para aplicações onde o polímero está sujeito a altas cargas, uma alta massa molecular é essencial, pois elas se entrelaçam e aumentam a resistência.

O termo elastômero é utilizado quando se faz referência ao material elastomérico puro, sem nenhum aditivo. O elastômero puro é de pouca utilidade industrial, e para que ele adquira propriedades desejáveis na prática, alguns aditivos devem ser adicionados formando assim um composto elastomérico (CE). Os compostos podem ser conformados em diferentes formas, tamanhos e têm boa adesão com outros materiais.

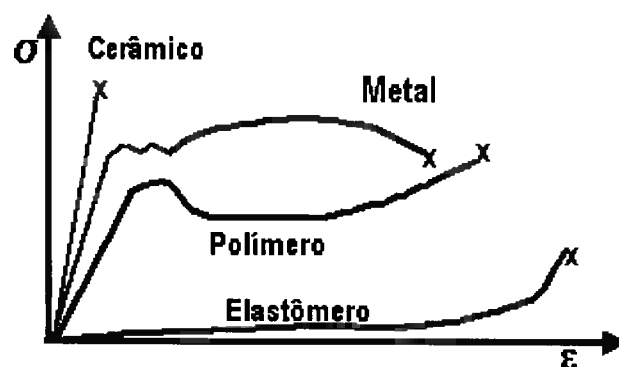


Figura 1 - Tensão Nominal x alongamento

A principal propriedade dos elastômeros é o seu comportamento elástico (não-linear), como podemos notar na Figura 1. É possível, por exemplo, alongar um elastômero até que ele alcance dez vezes o seu tamanho e quando a tensão for removida ele voltará ao seu tamanho original (em condições ideais). Apresentam resistência à abrasão maior que a do aço, impermeabilidade ao ar e à água, e na maioria dos casos uma boa resistência ao inchamento em solventes. As principais características de um CE são: baixo módulo de elasticidade, alta elongação, baixa ou nenhuma cristalinidade, temperatura de utilização acima da T_g (temperatura de transição vítrea) e embora seja resiliente apresenta elevado amortecimento.

A T_g é uma das temperaturas mais importantes para os polímeros. Ela separa os dois principais estados dos polímeros amorfos. Abaixo da T_g os polímeros amorfos estão no chamado “estado vítreo”, (região 1 da Figura 2), pois têm um comportamento parecido com o do vidro (ficam sólidos e rígidos e tendem a apresentar fratura frágil) e apenas as moléculas menores apresentam algum movimento (não afetando as propriedades do polímero). Conforme a temperatura aumenta, os átomos passam a possuir uma energia térmica maior e então moléculas maiores passam a se movimentar coordenadamente, até que, próximo da faixa da T_g moléculas relativamente longas passam a se movimentar e elas entram em um “estado viscoso” onde apresentam um comportamento elastomérico cuja principal característica é sua grande elasticidade.⁴

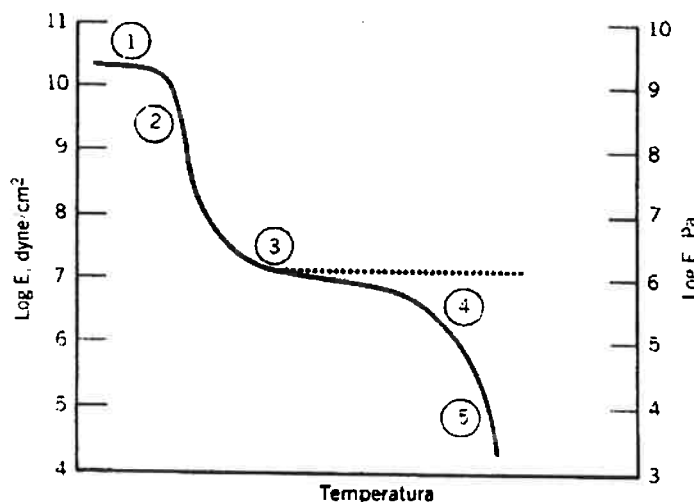


Figura 2 - Variação do módulo de elasticidade com a temperatura. Regiões: 1 – Estado vítreo, 2 – Faixa da Tg, 3 – Platô elastomérico, 4 e 5 – Amolecimento e Fusão (Não se aplicam a elastômeros).

Muitas das propriedades dos polímeros mudam a esta temperatura: o módulo de elasticidade, o coeficiente de expansão térmica, a capacidade calorífica, amortecimento mecânico e resistência ao impacto. Podemos, então, dar uma definição complementar de elastômero: "Um elastômero é um polímero amorfo e reticulado, cuja temperatura de trabalho está acima de sua Tg".⁴

Quando se fala em Tg de compostos elastoméricos, devemos ter cuidado, pois os valores encontrados na literatura geralmente são para o elastômero-base, ou no máximo alguma formulação consagrada. Devemos mencionar também, que a Tg pode ser ampliada ou deslocada através dos meios físicos e químicos. Estes incluem o uso de plastificantes, cargas, fibras ou pela formação de uma rede interpenetrante de polímeros. Todos eles modificam de alguma maneira a estrutura química, a polaridade molecular, a simetria molecular, a massa molecular e a densidade de ligações cruzadas dos elastômeros, alterando assim a Tg.

O perfil de propriedades que pode ser obtido com um composto elastomérico depende basicamente de quatro fatores: escolha do elastômero-base, formulação do composto, processo de produção e da forma e desenho do produto.

As propriedades que fazem jus ao nome elastômero só podem ser conseguidas através de uma formulação com os aditivos corretos e subsequente vulcanização. Dependendo do nível de aditivos em um composto e do grau de vulcanização, um

dado composto elastomérico pode produzir vulcanizados com propriedades consideravelmente diferentes com respeito à dureza, elasticidade e resistência mecânica.

2.1.2. Vulcanização

Também conhecida como cura. É um processo de reticulação, isto é a formação de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas. Um elastômero não-reticulado é um líquido de elevada massa molecular com baixa resistência mecânica. A cura é o processo no qual as cadeias são quimicamente conectadas de modo a formar uma rede. Durante este processo ocorrem reações químicas que introduzem ligações cruzadas no elastômero transformando assim o líquido elastomérico em um sólido elástico.

A vulcanização introduz estabilidade dimensional, reduz a tendência à fratura por escoamento viscoso (*viscous flow*), aumenta a resistência mecânica e química, aumenta a resiliência, a elasticidade, reduz a plasticidade e a histerese e permite a manufatura de uma grande gama de artigos elastoméricos. Sem a vulcanização, o elastômero não possui estrutura e tende a escoar com o tempo (fenômeno chamado *creep* - fluência).

O tipo de vulcanização mais amplamente utilizado até hoje, ainda é a feita por adição de enxofre (por causa disso, antigamente, a vulcanização era tida como sinônimo de reticulação). Para a vulcanização ser efetiva, as partículas de enxofre devem ser bem distribuídas no composto elastomérico. Uma dispersão incompleta causa heterogeneidades no vulcanizado final, que podem atuar como iniciadores de falhas durante o uso do produto. A dispersão é facilitada se houver alta solubilidade do enxofre no elastômero.¹

O grau de vulcanização pode ser medido através do número de ligações cruzadas no material. O comportamento mecânico de um composto elastomérico depende fortemente da densidade de ligações cruzadas. Isto é mostrado esquematicamente na Figura 3, onde temos várias propriedades físicas em função dessa densidade. Para entender este comportamento, deve-se primeiro considerar a

fratura de um elastômero não-reticulado, e então discutir as mudanças no mecanismo de fratura à medida em que as ligações cruzadas forem sendo introduzidas.¹

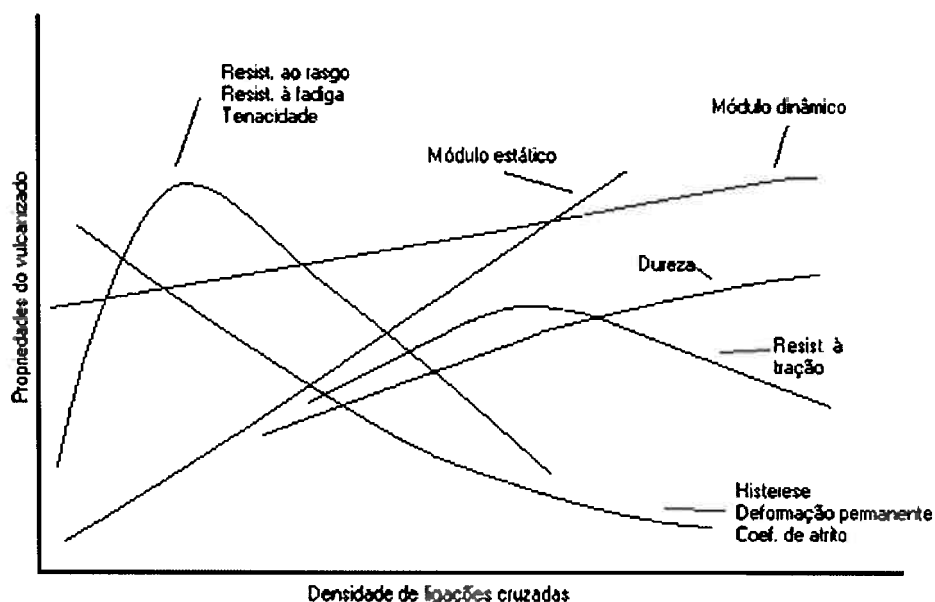


Figura 3 – Efeito da densidade das ligações cruzadas em algumas propriedades mecânicas do elastômero.

Quando um elastômero não-reticulado é submetido a esforços de tensão sob altas taxas, as cadeias deslizam umas sobre as outras e se desembaraçam. Com a aplicação de tensão a taxas mais baixas, a fratura passa a ocorrer por escoamento viscoso sem a quebra de ligações químicas. O efeito das ligações cruzadas é aumentar a massa molecular criando moléculas ramificadas e uma distribuição molecular mais ampla. É mais difícil para estas moléculas ramificadas se desembaraçarem, portanto a resistência mecânica aumenta. Aumentando-se mais ainda a densidade de ligações cruzadas, chega-se a ponto de gel, isto é o ponto onde uma rede tridimensional (todas as moléculas do elastômero ficam conectadas entre si) é formada. Então a resistência mecânica é ainda maior no ponto de gel, dado que as ligações químicas devem ser quebradas para a criação de superfície de fratura. Entretanto, a resistência não aumenta indefinidamente com o aumento de densidade de ligações cruzadas, já que a histerese diminui. Quando um elastômero é deformado por uma força externa, parte da energia aplicada, é estocada elasticamente nas cadeias e fica disponível (será liberada diante o crescimento da trinca) como uma energia favorável para a fratura. O restante da energia é dissipado sob forma de calor

através de movimentos moleculares e desta maneira não fica disponível para ser usado na quebra das cadeias. Em níveis muito altos de reticulação, o movimento das cadeias torna-se restrito, e esta cadeia mais fechada e coesa é capaz de dissipar pouquíssima energia. Isto resulta em uma fratura frágil, relativamente fácil de ocorrer mesmo em baixos alongamentos. Então, o nível de reticulação deve ser alto o suficiente para prevenir a falha por escoamento viscoso, mas baixo o bastante para evitar a fratura frágil.¹

A densidade de ligações cruzadas é diretamente relacionada à dureza do elastômero, sendo esta última mais utilizada industrialmente. Portanto, a dureza é um bom indicador da vulcanização de um composto elastomérico.

Deve-se observar, porém, que as propriedades analisadas nesta Figura 3 não são função exclusiva da densidade de ligações, mas, também, da natureza do elastômero empregado, do tipo e quantidade de carga de reforço empregada, entre outros aspectos.

2.1.3. Aditivos de elastômeros

As borrachas podem ser divididas em dois tipos: termoplásticos e termofixos. As borrachas termofixas apresentam redes tridimensionais, que absorvem solventes e incham, porém não se dissolvem. Não podem ser reprocessados por simples aquecimento. Já as borrachas termoplásticas não podem ser endurecidas, se dissolvem em solventes e podem ser repetidamente reprocessadas.¹

Alterando a composição das borrachas com a adição de alguns compostos químicos podemos obter um composto elastomérico que possui características industriais desejáveis. Isto só é conseguido através da composição do elastômero-base com certos aditivos. Nos elastômeros termoplásticos não há necessidade desses materiais, pois eles possuem domínios heterogêneos que propiciam a elasticidade e tenacidade desses materiais.

Agentes reticulantes

Um dos componentes mais importantes em um composto elastomérico depois do próprio elastômero é o agente reticulante. Como discutido anteriormente, o mais utilizado é o enxofre, mas também outros agentes podem ser utilizados, como por exemplo, os peróxidos (peróxido de dicumila). A cura por peróxido ocorre pelo mesmo mecanismo de formação dos radicais livres (mecanismo de início, propagação e término de H^*) que efetuam a ligação carbono-carbono na cadeia, formando vulcanizados de maior estabilidade térmica, quando comparados a compostos vulcanizados com enxofre.

Aceleradores de vulcanização

Para aumentar a taxa e a eficácia da vulcanização por enxofre, são adicionados aceleradores. Eles são bases orgânicas e podem ser divididas em cinco grandes categorias: Guandinas, Tiazóis (mais utilizados), Ditiocarbamatos, Xantenos (ultra-aceleradores muito ativos) e Tiuramas.²

Ativadores e retardantes de vulcanização

Com aceleradores de vulcanização orgânicos é necessário usar ativadores para que eles atinjam todo o seu potencial. O mais importante destes aditivos é o ZnO . Os ativadores, em geral, tendem a melhorar a resistência mecânica dos vulcanizados e diminuem o tempo de vulcanização.²

Os retardantes (como o anidrido ftálico, por exemplo) servem para dar mais segurança ao processamento do material elastomérico, e seu principal uso é evitar o *scorch* (vulcanização prematura) da massa elastomérica.²

Antidegradantes

Estes aditivos são adicionados aos elastômeros-base para prevenir degradações que geralmente ocorrem em um longo período de tempo sem a ação de produtos químicos que possam acelerar o processo. Esta deterioração é iniciada através da presença de oxigênio, ozônio, calor, luz ultravioleta, catálise metálica (cobre, cobalto e manganês) ou ainda, flexão mecânica, que conduzem à cisão das cadeias, ou quebra do encadeamento.²

Eles atuam nas reações que geram essa degradação. Os antidegradantes mais usados são os fenóis, as aminas e os fosfitos. “O mecanismo de deterioração está associado à formação, em cadeia, autocatalítica, de radicais livres (remoção de hidrogênio da cadeia)”.¹

Auxiliares de processamento

Estes aditivos são adicionados ao composto elastomérico para facilitarem as operações de processamento, tais como: mistura, calandragem, extrusão e moldagem. Eles auxiliam o processo, diminuindo o gasto de energia causado principalmente pelo atrito, pois diminuem a viscosidade do material, tornando mais fácil seu manuseio. Os principais auxiliares de processamento são os plastificantes (também reduzem custos, mas podem ocasionar desempenho insuficiente) e os peptizantes (reduzem a massa molecular).¹

Cargas

As cargas são adicionadas ao composto principalmente para melhorar suas propriedades físicas em geral e reduzir custos de produção. O tamanho da partícula afeta diretamente as propriedades de resistência à abrasão, de geração de calor, de resiliência, de resistência ao rasgo e de limite de resistência. Já a estrutura das partículas afeta a dureza e o inchamento na saída da matriz da extrusora.¹

A carga mais comum para uso em elastômeros é uma carga escura chamada negro-de-fumo, que se apresenta na forma de partículas de grafita quase esféricas. Há outros tipos de cargas como as cargas brancas que compreendem principalmente o

caulim (carga semi-reforçante), carbonato de cálcio (usada para reduzir custos, aumentando o volume final do produto), sílica precipitada (carga reforçante), óxido de titânio (carga e pigmento).¹

Agentes de extensão

Os agentes de extensão são usados para reduzir custos. Geralmente seu uso resulta em uma redução das propriedades físicas, o que acaba por limitar a quantidade a ser usada. Algumas argilas e o carbonato de cálcio são exemplos.¹

Agentes de pegajosidade ("tack")

A pegajosidade é a habilidade de dois materiais resistirem à separação depois de estarem em contato por um curto período de tempo, sob baixa pressão. Estes agentes são usados para aumentar a pegajosidade do composto elastomérico e prevenir a degradação do mesmo. Os mais usados são as resinas e parafinas naturais, derivados do coque de petróleo (cumarona), óleos alifáticos leves e resinas fenólicas (fenol-formaldeído).¹

Pigmentos

Os pigmentos são utilizados em compostos elastoméricos onde não é usado o negro-de-fumo. Podem ser inorgânicos ou orgânicos. Os inorgânicos são geralmente óxidos como, por exemplo, óxidos de ferro, cromo e titânio. Os orgânicos são de maior custo mas proporcionam maior brilho e variedade de tons.²

Agentes especiais

Os agentes especiais conferem características únicas ao elastômero de acordo com sua aplicação. Para uma aplicação em que o elastômero pode estar sujeito à chama, utiliza-se um aditivo antichama. Da mesma forma existem aditivos que tornam o aroma do produto final mais agradável, outros que são antimicrobiais, para ser usados na composição de luvas e botas.²

A seguir, temos, na Tabela 1, exemplos de formulação de um composto elastomérico. Deve-se notar que as quantidades dos ingredientes do composto são dados em PHR (*Parts per hundred of rubber*) que significa literalmente “partes por cem de borracha”, isto é, para cada 100 unidades de massa de borracha natural, deve-se utilizar o número dado para cada ingrediente na tabela na mesma unidade de massa do elastômero.

Tabela 1 - Formulação de um composto elastomérico

Componente	Quantidade (PHR)
Borracha Natural	100
Auxiliar de processo	2
Ácido Esteárico	2
Óxido de zinco	5
Antioxidante (Fenilamina)	2
Enxofre	2,75
Acelerador – Benzotiazil Dissulfeto	1
Acelerador – Tetrametil Tiurama Dissulfeto	0,1
Negro-de-fumo	25
TOTAL	139,85

A tabela abaixo mostra exemplos de compostos elastoméricos de formulações consagradas e suas características principais.

Tabela 2 - Exemplos de elastômeros e suas características principais

Elastômero	Vantagens	Desvantagens	Tg	Vulcanização
Elastômeros de uso geral				
NR – Borracha Natural	Excelentes resiliência, resistência à tração, à abrasão e boa adesão. Baixo custo.	Baixa resistência às intempéries e à resistência a solventes (hidrocarbonetos e óleos).	-70	Enxofre
IR – Poliisopreno sintético	Excelente resiliência, resistência à tração, à abrasão, boa adesão e ausência de odor.	Baixa resistência às intempéries e à resistência a solventes (hidrocarbonetos e óleos).	-	Enxofre
SBR – Borracha de Estireno-Butadieno	Excelente resistência ao impacto, à abrasão. Boa resiliência e flexibilidade. Baixo custo.	Baixa às intempéries e à resistência a solventes (hidrocarbonetos e óleos).	-55	Enxofre
Elastômeros Especiais				
CR-Policloropreno	Boa resistência à chama, excelente adesão a substratos polares, boa resistência à intempéries	Baixa resistência a solventes aromáticos e oxigenados, flexibilidade limitada em baixas temperaturas.	-50	Zn ou Mg
NBR – Borracha Nitrílica (Butadieno-Acrilonitrila)	Excelente resistência a óleos e gasolina, ampla faixa de temperatura de trabalho, boa resistência a solventes de hidrocarbonetos.	Baixa resistência ao ozônio, à luz solar e ao envelhecimento natural. Baixa resistência à solventes oxigenados	-30	Enxofre
IIR – Borracha Butílica	Excelente impermeabilidade a gases e vapor, boa resistência às intempéries.	Alta deformação permanente na compressão, baixa resiliência.	-70	Enxofre
EPDM – Etileno-Propileno-Dieno	Excelente resistência às intempéries, boa resistência à água e vapor, excelente estabilidade de cor.	Baixa resistência a óleos, gasolina e solventes de hidrocarbonetos.	-60	Peróxidos ou enxofre
MQ- Borracha de silicone	Excelente resistência a altas temperaturas, excelente flexibilidade em baixas temperaturas, boa resistência a intempéries. Boa biocompatibilidade	Baixa resistência à abrasão, rasgamento e crescimento de trinca, baixa resistência à tração.	-127	Peróxido

No geral, os elastômeros sintéticos (de custo mais elevado) apresentam maior resistência à degradação devido ao calor, oxidação, ou ataque de óleos. A presença de ingredientes em quantidades crescentes faz com que a Tg tenha tendência a subir, fazendo com que o CE se torne duro e com tendência de se tornar quebradiço.⁶

2.1.4. Processamento

As propriedades térmicas e reológicas do CE definirão o seu processamento. Assim, a própria fabricação tem influência sobre as propriedades anisotrópicas

(dependem da temperatura e condições de fabricação) finais, tais como: retração, empenamento, densidade, resistência e tenacidade, entre outras.²

Deve-se prestar bastante atenção nas temperaturas durante todo o processo. O principal problema que pode ocorrer é o *scorch* (vulcanização prematura).

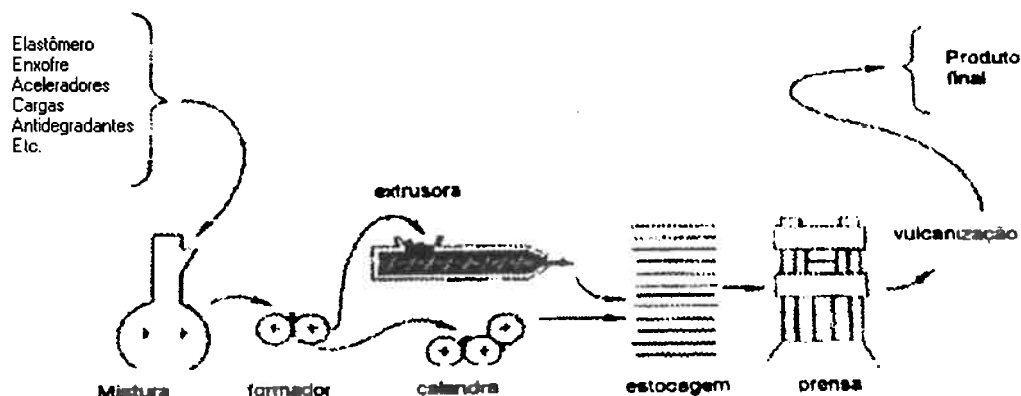


Figura 4 - Desenho esquemático representando o processamento de um composto elastomérico

O processamento de um material elastomérico segue os passos:

- a. *Mastigação*: onde o elastômero tem suas cadeias rompidas para torná-lo receptivo a cargas e aditivos;
- b. *Mistura*: onde são adicionados os aditivos para que sejam incorporados à massa elastomérica. O agente de vulcanização (reticulante) é adicionado por último como forma de prevenir o *scorch*;
- c. *Formação*: onde a massa elastomérica é remisturada, para uma distribuição uniforme dos aditivos;
- d. *Extrusão*: estágio intermediário usado para transformar o elastômero em pelotas (*pellets*) para facilitar o transporte e posterior conformação;
- e. *Calandragem*: estágio intermediário utilizado para transformar o elastômero em blocos para posterior conformação, dependendo do processo;
- f. *Estocagem*: esta parte do processo é onde se deve ter bastante cuidado, uma vez que a vulcanização pode ocorrer à temperatura ambiente apesar de ser de forma bastante lenta;
- g. *Conformação*: geralmente feita por prensagem;

- h. *Vulcanização*: o processo mais comumente utilizado é o de vapor saturado, onde a peça é colocada em uma câmara fechada preenchida com vapor d'água para aumentar a pressão e também fornecer calor uniformemente à peça.⁸

2.2. Propriedades dinâmicas dos elastômeros

O termo propriedades "mecânico-dinâmicas" dos elastômeros refere-se ao comportamento destes materiais quando sujeitos a deformações e tensões que variam com o tempo e temperatura. As propriedades dinâmicas são largamente dependentes da temperatura, da frequência, da presença de cargas ou reforços, e também do grau de deformação, se este for elevado (conduzindo à viscoelasticidade não-linear).²

Um sólido linear obedece à lei de Hooke, onde a tensão é proporcional à deformação. Um líquido viscoso obedece à lei de Newton, onde a tensão é proporcional à taxa de mudança de deformação com o tempo. Muitos materiais, como os elastômeros têm propriedades intermediárias entre estes dois casos. O comportamento destes materiais, que não agem como sólidos ou líquidos ideais, é chamado viscoelástico. Um sólido hookeano pode ser ilustrado por uma mola e a lei de Hooke pode ser escrita na forma: ¹

$$F = k \cdot x \text{ ou } \sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{Equação 2.2.2})$$

Onde F é a força (σ é a tensão que é igual a força sobre a área da secção transversal original), x (ε) é a deformação e k é a constante da mola (E é o módulo de elasticidade). A lei de viscosidade de Newton pode ser escrita da seguinte forma:

$$F = c \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right) \text{ ou } \sigma = \eta_e \cdot \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right) \quad (\text{Equação 2.2.3})$$

Onde c é o coeficiente de amortecimento viscoso, η_e é o coeficiente da viscosidade newtoniana na tensão e $\frac{d\varepsilon}{dt}$ é a taxa de deformação. O comportamento

newtoniano viscoso é usualmente ilustrado por um elemento viscoso chamado amortecedor. Os resultados obtidos por extensão podem ser convertidos para cisalhamento. Da teoria da elasticidade de corpos isotrópicos:

$$E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G \quad (\text{Equação 2.2.4})$$

Onde ν é o coeficiente de Poisson e G é o módulo de cisalhamento. Para o caso especial de materiais que podem ser comprimidos a volume constante, como os elastômeros, temos $\nu \sim 0,499$ resultando em $E = 2 \cdot (1 + 0,499) \cdot G$ e finalmente $E \approx 3 \cdot G$.¹

Tradicionalmente, o comportamento viscoelástico pode ser descrito através de modelos que somam a Lei de Hooke e a lei de Newton. Os modelos de Maxwell (coloca em série as duas leis) e Voigt (coloca em paralelo as duas leis) (Figura 5) conseguem explicar esse comportamento.

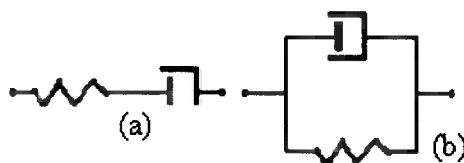


Figura 5 – Modelos de Maxwell (a) e Voigt (b) para entendimento da viscoelasticidade dos elastômeros

A maioria dos materiais exibe um comportamento mais complexo que o dos dois modelos acima representados, por isso é necessário usar modelos generalizados para descrever quantitativamente o comportamento viscoelástico de um material. Ambos os modelos são equivalentes e, em teoria qualquer um deles pode ser usado para descrever comportamentos viscoelásticos lineares. A viscoelasticidade linear significa que o princípio da superposição de Boltzmann se aplica, isto é, deformação total causada pela soma de um certo número de tensões é igual à soma de todas as deformações causadas por cada tensão separadamente. Na prática, é mais conveniente descrever experiências de relaxamento de tensão pelo modelo de Maxwell e fluência pelo de Voigt.

Ensaio dinâmico oscilatório

Um ensaio dinâmico oscilatório difere do ensaio de fluência e do ensaio de relaxamento de tensão em dois aspectos: a escala de tempo é determinada pelo inverso da frequência de deformação senoidal e tensão e deformação não estão em fase. Esta defasagem depende da viscosidade dinâmica.¹

Para uma mola perfeita tensão e deformação estão em fase, e para um amortecedor a deformação é atrasada de $\pi/2$ radianos, portanto para um sólido viscoelástico o ângulo de fase será intermediário entre 0 e $\pi/2$.¹

O valor δ é definido como a defasagem entre tensão e deformação no corpo submetido a variações cíclicas de tensão, portanto usa-se o parâmetro $\tan\delta$ para se medir a perda mecânica.²

Viscoelasticidade

Quando o módulo de perda é alto, como por exemplo, na região de transição vítrea, os polímeros tornam-se capazes de amortecer ruídos e vibrações que são nada menos que uma forma particular de movimento dinâmico-mecânico. Se uma tensão aplicada varia com o tempo de uma forma senoidal, esta tensão senoidal pode ser descrita como:

$$\sigma = \sigma_o \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (\text{Equação 2.2.5})$$

Onde, ω = frequência angular ($2\pi \cdot \text{frequência}$). Para sólidos hookeanos, sem energia dissipada pela deformação é dada por:

$$\varepsilon = \varepsilon_o \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (\text{Equação 2.2.6})$$

Para materiais reais a tensão e a deformação não estão em fase, a deformação fica defasada em relação a deformação pelo ângulo de fase δ .²

As relações entre os componentes em fase e fora de fase da tensão (σ' e σ'') são dadas por:

$$\sigma' = \sigma_o \cdot \cos \delta \quad (\text{Equação 2.2.7})$$

$$\sigma'' = \sigma_o \cdot \sin \delta \quad (\text{Equação 2.2.8})$$

O módulo dinâmico (E^*) pode ser descrito da forma:

$$E' = \frac{\sigma'}{\varepsilon_o} = E^* \cdot \cos \delta \quad (\text{Módulo elástico}) \quad (\text{Equação 2.2.9})$$

$$E'' = \frac{\sigma''}{\varepsilon_o} = E^* \cdot \sin \delta \quad (\text{Módulo viscoso}) \quad (\text{Equação 2.2.10})$$

$$E^* = \frac{\sigma_o'}{\varepsilon_o} = (E'^2 + E''^2)^{1/2} \quad (\text{Módulo complexo}) \quad (\text{Equação 2.2.11})$$

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (\text{Equação 2.2.12})$$

A principal causa da resposta atrasada em elastômeros é a viscosidade interna entre as cadeias moleculares. Esta propriedade é fortemente afetada pela temperatura. Ela depende primariamente de uma taxa ϕ (uma forma de representar o movimento molecular e tem relação direta com a viscosidade), que representa a mudança de pequenos segmentos das moléculas para novas posições como resultado de um movimento browniano aleatório. O valor de ϕ aumenta fortemente com a temperatura, e como consequência, temos uma diminuição da viscosidade. A viscosidade interna e a dissipação de energia ficam mais reduzidas em altas temperaturas.¹ A fórmula abaixo relaciona ϕ com a temperatura T:

$$\ln \left(\frac{\phi(T)}{\phi(T_g)} \right) = \frac{A \cdot (T - T_g)}{B + T - T_g} \quad (\text{Equação 2.2.13})$$

Onde A e B são constantes, tendo aproximadamente o mesmo valor, 40°C e 50°C, para uma grande faixa de elastômeros. Em diversas aplicações dinâmicas, o movimento molecular é requerido a frequências mais altas que $1/10\text{s}^{-1}$. Por exemplo, para absorção de impacto, precisa-se de uma resposta em relação ao impacto da ordem de 1ms, porém esta resposta só pode ser alcançada quando o valor de ϕ alcança 1000 saltos (cada salto representa uma mudança de posição de um segmento da molécula para um novo local), o que ocorre a uma temperatura de aproximadamente 16°C mais alta que a Tg.¹

Novamente devemos ter em mente que o procedimento acima descrito é dependente da Tg do elastômero e, portanto utilizado para elastômeros puros. Este estudo no caso de compostos elastoméricos envolve muitas variáveis interdependentes, o que o torna, portanto, inviável na prática.

2.3. Método dos Elementos Finitos

O termo FEM – Finite Element Method surgiu em 1960 através de R.W.Clough (Boeing Aeroplane Co.) e teve singular impulso graças à presença de computadores digitais e linguagens de programação que surgiram naquela época.

Atualmente, há dezenas de programas computacionais (Abaqus, Adina, Algor, Ansys, Cosmos/M, Mark, Nastran, Nonsap, Patran, Sap, Sinda, Teap, Texgap, etc.) comerciais de uso corrente em diversas áreas do conhecimento que utilizam esse método para análises linear e não-linear ². Neste trabalho usaremos o programa Cosmos/M.

O método de elementos finitos é um método numérico empregado na solução de problemas de engenharia e física.

O FEM envolve o modelamento de uma estrutura qualquer, empregando elementos interconectados (elementos finitos). Problemas típicos nestas áreas, que encontram solução através do FEM, incluem: análise estrutural, transferência de calor, mecânica dos fluidos, transporte de massa e potencial eletromagnético.

Para problemas que envolvam complexas geometrias, carregamentos, propriedades dos materiais, normalmente não é possível obtermos soluções matemáticas analíticas (que podem envolver equações diferenciais parciais), as quais podem se tornar muito complexas ou, até, impossíveis de solucionar, devido a geometria, carregamento ou propriedades dos materiais envolvidos ¹.

Assim, métodos numéricos, como o FEM, podem trazer soluções aproximadas aceitáveis. Da formulação do FEM, resulta um sistema de equações algébricas simultâneas, em vez de equações diferenciais. Do método numérico obtemos valores aproximados das grandezas, em pontos discretos do contínuo.

Para entender o FEM, alguns termos devem ser definidos e entendidos:

- a) *Elemento*: A estrutura a ser analisada é *quebrada* (subdividida) em vários pedaços chamados elementos, que geralmente são triângulos ou quadriláteros. Quando esses elementos são agrupados, eles formam uma malha que descreve inteiramente a geometria do componente a ser analisado (Figura 6a)
- b) *Nó*: Um nó é o ponto onde os elementos são unidos. Há sempre um nó na ponta de um elemento, e alguns elementos também possuem nós intermediários, que precisam ser especificados (Figura 6a)
- c) *Grau de Liberdade*: Cada nó possui certo grau de liberdade. Isso significa que o nó é capaz de se mover em várias direções, dependendo das condições de contorno impostas a eles. Estes movimentos consistem de deslocamentos em três direções perpendiculares e reações entre esses três eixos, no total de 6 graus de liberdade (Figura 6b).
- d) *Malha*: Este termo se refere aos elementos agrupados que parece uma "malha" (Figura 6a)
- e) *Condições de contorno*: As condições de contorno descrevem as cargas a serem aplicadas no componente, incluindo deflexões, pressões, forças e carregamentos térmicos.

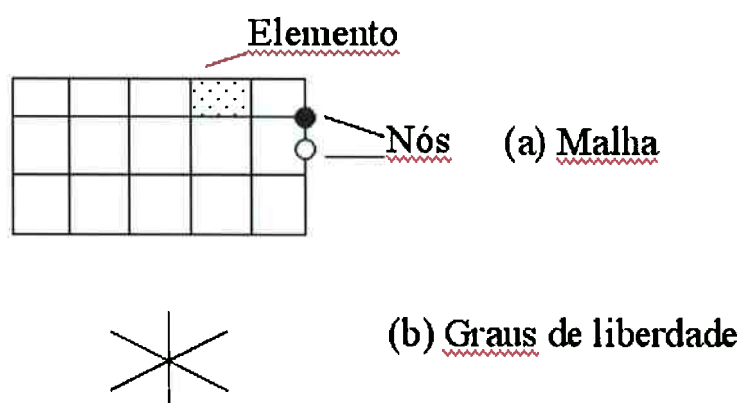


Figura 6 – Componentes do modelamento de elementos finitos

Quatro tipos de métodos de elementos finitos podem ser construídos dependendo do componente a ser analisado e das capacidades do programa a ser usado. O modelo mais comum é o de seção transversal 2-D, com um eixo de simetria (Figura 6a). Este também é chamado de modelo axissimétrico. O segundo tipo é o modelo de deformação planar, que também considera a seção transversal, mas ele não possui, necessariamente, um plano de simetria como o primeiro. O terceiro tipo é o modelo de tensão planar, que é análogo ao modelo de deformação planar. O quarto tipo de modelo de FEM e o mais complexo é o modelo tridimensional (3D). Este tipo não possui plano de simetria. Um modelo 3D é difícil de construir e requer conhecimento e interpretação cuidadosa dos resultados.¹

O passo inicial ao resolver problemas usando o FEM é analisar a geometria do componente e *quebrá-la* em elementos que irão descrever precisamente a geometria (discretização). Este passo é executado localizando cada nó em um sistema de coordenadas e conectando os nós, para formar os elementos. Durante essa operação, o tipo de material é especificado (constantes reais e propriedades dos materiais). É preciso ter cuidado para se utilizar uma malha fina em regiões que irão ter altos gradientes de deformação. Geralmente, elas se encontram em descontinuidades, como os cantos e bordas do corpo de prova.

Depois disso, deve-se escolher o sistema de coordenadas (cartesiano, cilíndrico ou esférico) e as coordenadas dos nós.

Depois da malha ser gerada, as condições de contorno são aplicadas. Para todos os tipos de análise de FEM, as condições de contorno devem ser aplicadas com

precaução. O FEM de compostos elastoméricos requer cuidados acentuados devido a natureza especial desses materiais.

Com as condições de contorno processadas, deve-se, então, definir as forças (cargas) que atuam em cada nó (forças ou pressões). Assim, fechando a simulação, pede-se o cálculo das forças reativas, gravitacionais, etc.

Para a resolução de problemas utilizando o FEM, existem dois métodos de cálculos numéricos.

O primeiro conhecido por **método das forças** (ou de flexibilidade), emprega as forças internas como incógnita do problema. Inicialmente, as equações de equilíbrio são estabelecidas e, em seguida, as equações associadas às condições de contorno. O resultado é um conjunto de equações que permitem resolver as forças incógnitas do problema.²

O segundo método, conhecido por **método do deslocamento** (ou da rigidez), emprega o deslocamento dos nós como incógnita do problema. Condições de compatibilidade entre os nós estabelecem a conectividade entre os nós, contornos e / ou superfícies, antes da aplicação da carga. Através dos deslocamentos dos nós, temos a deformação associada e as correspondentes tensões através da lei constitutiva (entre tensão e deformação). Esse é o método utilizado pelo *software* Cosmos/M.

O que acontece neste caso é que uma função deslocamento está acoplada a cada elemento finito. Como cada elemento está conectado através dos nós, o conjunto de equações que descreve o equilíbrio dos deslocamentos de cada nó, pode ser descrito de maneira matricial:

$$[K] \cdot [u] = [F] \quad (\text{Equação 2.3.1})$$

Onde $[K]$ é a matriz de rigidez ($A \cdot E/l$), $[u]$ é a matriz de deslocamento e $[F]$ é a matriz de força. Partindo dos deslocamentos verificados, resultam determinadas as correspondentes deformações e tensões.

Estes dois métodos resultam em diferentes incógnitas (forças e deslocamentos, respectivamente) e correspondentes tipos de matrizes, na sua formulação. Para efeitos computacionais, tem sido demonstrado que o método de

deslocamentos é mais versátil e simples para a maioria dos problemas de análise estrutural, acrescentando-se que a maioria dos programas comercialmente disponíveis, empregam o método do deslocamento.²

Vários gráficos podem ser obtidos pelos resultados do FEM. O uso de gráficos para a análise dos resultados é altamente desejável, devido à grande quantidade de dados que é gerado. Uma figura da malha promove a verificação de que o modelo foi bem construído. Este tipo de gráfico também pode ser usado para verificar as condições de contorno, para mostrar o nome dos elementos, a localização de materiais específicos e para verificar se todos os elementos estão conectados corretamente.

Gráficos de contorno de todos os componentes de tensão e deformação podem ser mostrados no modelo. Isto irá indicar os locais de valor maior de tensão e deformação, assim como o fluxo de carga através do componente. Gráficos desse tipo podem mostrar também as reações ao longo da superfície, que irá permitir uma análise mais precisa da estrutura adjacente.

Como todo método numérico, o FEM apresenta também estes dois aspectos, a saber: ²

Vantagens: possibilidade de modelar corpos irregulares; aplicar diferentes carregamentos; modelar corpos compostos de diferentes materiais; aplicar diferentes tipos de condições de carregamento; variar os tamanhos dos elementos; efetuar alterações no modelo de maneira rápida e eficiente; aceitar o comportamento não-linear existente em deformações de sistemas que empregam materiais não-lineares.

Limitações: obtém-se uma solução numérica para um problema específico, não fornecendo, portanto, soluções que permitam um estudo analítico dos efeitos através da variação dos parâmetros envolvidos.

No projeto de componentes elastoméricos, torna-se imperativo, durante análise através do FEM, o conhecimento das propriedades do material (tensão / deformação / frequência e temperatura), bem como, se devemos efetuar análise empregando a característica linear ou não-linear.

A análise linear é normalmente associada a pequenas deformações, enquanto que a análise não-linear é necessariamente empregada para elevadas deformações.

Como a maioria dos elastômeros não apresenta uma linearidade entre a tensão e a deformação, é necessário que se efetue uma análise sobre os métodos disponíveis para análise não-linear.

Sistema Cosmos/M de análise por FEM

Produzido pela SRACTM (*Structural Research and Analysis Corporation*, Santa Mônica - Califórnia) o *software* Cosmos/M é um bom representante dos programas que utilizam o Método dos Elementos Finitos para análises das mais diversas estruturas.

Devido a excelente qualidade e desempenho, o Cosmos/M permite a realização de análises estática e dinâmica de estruturas reticuladas planas e espaciais (vigas, treliças, grelhas, pórticos), análise de placas, cascas, estruturas tridimensionais, análises térmicas, análises de fadiga, etc. Ele possui várias características, entre elas:

Moldável à necessidade do usuário: O programa tem uma variedade de opções e de configurações, que podem ser escolhidas pelo seu usuário, dependendo das necessidades que ele precisa: análise linear estática, térmica, análise de fadiga, não linear, etc.

Análise de tensão: O *software* possui uma extensa biblioteca com elementos 1D, 2D e 3D que suportam compostos isotrópicos, ortotrópicos, anisotrópicos, anisotrópicos e materiais cujas propriedades dependem da temperatura (como os elastômeros).

Avançada análise não-linear: O Cosmos/M é muito adequado para problemas que exibem materiais ou geometrias não lineares, em ambientes estáticos ou dinâmicos. As aplicações incluem: plasticidade, materiais elastoméricos, etc.

O programa é oferecido em módulos diversos que são acoplados aos módulos do sistema básico: geração, pré e pós-processador e estático, vindo assim atender ao cliente em suas necessidades específicas:

A (Astar) – Dinâmico Avançado
 N (Nstar) – Não-Linear
 H (Hstar) – Térmico
 E (Estar) – Eletromagnético
 F (Fstar) – Fadiga
 Flow (Flowstar) – Fluxo de fluidos
 Geostar – Módulo pré e pós-processador
 Optstar – Otimização de projetos.

No caso do presente trabalho, o Cosmos/M utilizado (versão 2.9 256K – 2004) para a programação de ensaio de compressão utiliza o Geostar, um pré e pós-processador para o Cosmos/M. Ele fornece ao usuário uma interface gráfica que o ajuda a desenvolver facilmente seus modelos.

Neste módulo, constrói-se o modelo geométrico (empregando as ferramentas associadas à geração de pontos, linhas, superfícies e volumes), criam-se malhas, aplicam-se cargas e condições de contorno, bem como a análise do conjunto. Neste ponto, sai-se do Geostar e liga-se o módulo de análise (linear ou não-linear) requerido. Após completar a análise, o programa retorna automaticamente ao Geostar, agora em ambiente gráfico, para o necessário pós-processamento e eventual interação com outros programas de edição gráfica (PZP, PSP, CAD, etc.), ou ainda, com outros programas de FEM.

O código do COSMOSM™ é uma linguagem de notações seqüenciais mnemônicas, através da qual podemos descrever o processo computacional.¹³

O conjunto de comandos irá providenciar a interação com o programa, possibilitando ao usuário uma maneira simples, quase intuitiva da montagem do problema, bem como da análise dos resultados obtidos.

Para a programação, é preciso entender bem o ensaio que se deseja simular. É primordial estudar todas as forças que agem no corpo de prova, para que os resultados possam ser analisados corretamente.

A programação no Cosmos/M se divide em etapas, sendo elas:

1 – Determinação do sistema de coordenadas

- 2 – Desenho do corpo
- 3 – Determinação da malha
- 4 – Determinação do grupo de elementos ao qual o corpo pertence
- 5 – Definição das propriedades do material
- 6 – Aplicação das condições de contorno
- 7 – Definição das constantes reais
- 8 – Definição do tipo de material para a curva tensão-deformação
- 9 – Definição dos parâmetros para o modelamento matemático

2.4. Equipamento e Características de Ensaios Dinâmicos de Elastômeros

Para a obtenção dos resultados experimentais, o equipamento utilizado para o ensaio dinâmico foi um sistema MTS – servo-hidráulico como ilustra a Figura 7.



Figura 7 – Sistema MTS – servo-hidráulico

O esquema básico da máquina de ensaios é ilustrado abaixo.

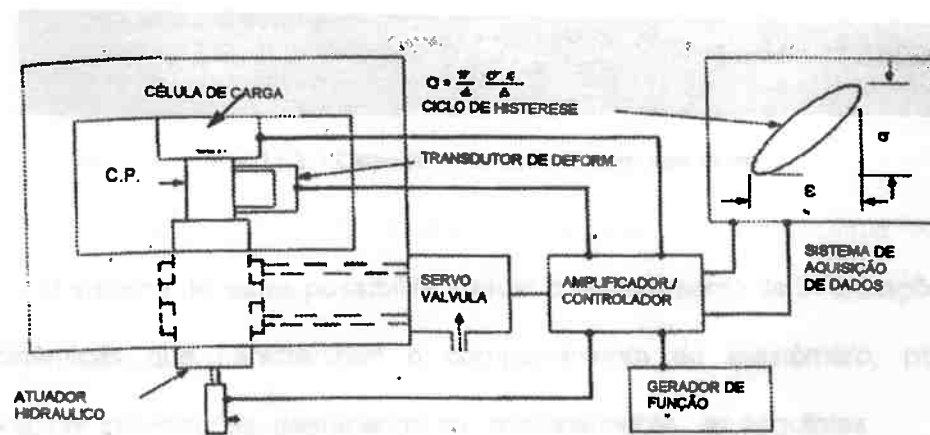


Figura 8 – Esquema básico da máquina de ensaios

Este sistema possui uma célula de carga (15 kN), atuadores hidráulicos, servo-válvulas, controle digital, computador dedicado com software e saídas gráficas em impressora e plotter. O sistema pode trabalhar com frequência de até 200 Hz para caracterização de elastômeros submetidos a diferentes condições de carregamento, para simular as suas reais condições de uso.

Os principais dados que o sistema fornece são:

- Curva tensão x deformação;
- Curva força x deslocamento;
- Módulos: complexo (E^*), elástico (E') e viscoso (E'');
- Módulo de rigidez (K^*) e tangente delta ($\tan \delta$);
- Amortecimento (C), energia total (W), energia dissipada por ciclo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram selecionados dois compostos elastoméricos de durezas 1 e 3 P&J para serem simulados pelo método dos elementos finitos.

Os dois corpos de prova foram ensaiados no sistema MTS descrito anteriormente.

Os dois compostos elastoméricos são à base de acrilonitrila, negro de fumo e aditivos estabilizantes.

O composto de 1 P&J possui as seguintes dimensões:

Diâmetro = 12,63 mm

Altura = 26,25 mm

Para este composto foi estudado o efeito da tensão, sendo esta variada de 20 a 70 N/mm². A temperatura foi mantida constante e a frequência foi de 30 Hz.

O composto de 3 P&J possui as seguintes dimensões:

Diâmetro = 12,3 mm

Altura = 25,34 mm

Para este composto foi estudado o efeito da temperatura, sendo esta variada de 60 a 140°C. A tensão foi mantida constante e a frequência foi de 30 Hz.

A seguir são apresentados os resultados experimentais, os modelos matemáticos implementados no programa Cosmos/M e a posterior comparação entre ambas para os dois compostos elastoméricos.

3.1. Corpo de prova de 1 P & J

Este composto foi submetido às seguintes tensões: 20, 30, 40, 50, 60 e 70 N/mm².

Os seguintes gráficos foram obtidos do ensaio experimental no sistema MTS.

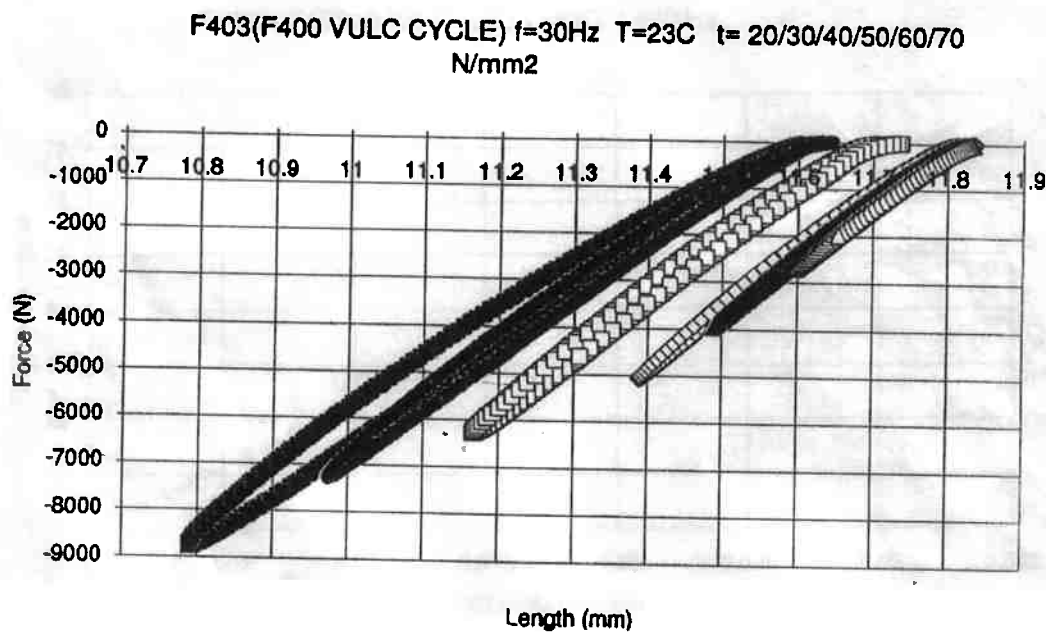


Figura 9 - Curvas de histerese para o composto de 1 P&J mostrando efeito da tensão

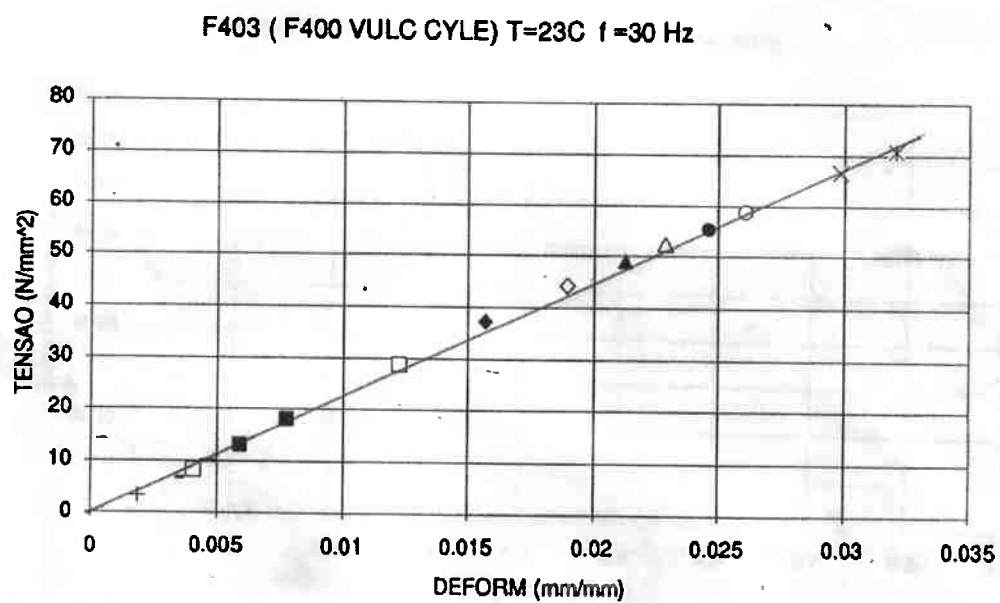


Figura 10 - Curva tensão (N/mm²) x deformação (mm/mm) para o composto de 1 P&J

A partir da Figura 10, foram obtidos os seguintes dados para a tensão e deformação (Tabela 3)

Tabela 3 - Dados de tensão e deformação para o composto de 1 P&J

Deformação (mm/mm)	Tensão (N/mm ²)
0	0
0,005	11,8
0,01	25
0,015	34
0,02	45
0,025	56
0,03	67

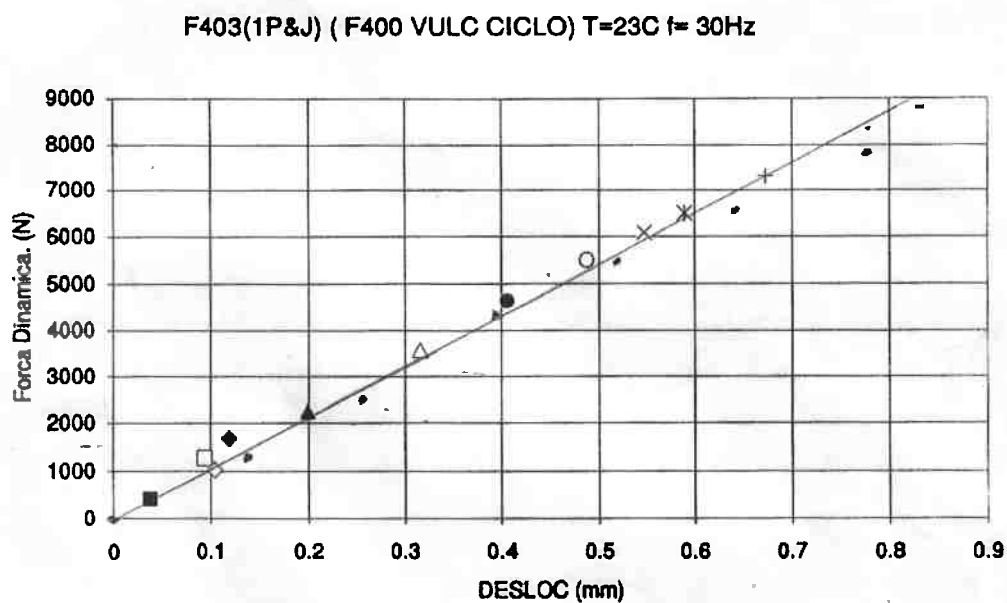


Figura 11 - Curva força dinâmica (N) x deslocamento (mm) para o composto de 1 P&J obtida pela MTS

O passo seguinte foi a simulação em elementos finitos. O código do programa para o Cosmos/M é apresentado abaixo.

C*	
C* "Compressão composto 1 P&J / MTS"	Observações
PT,1,0,0,0	
PT,2,6.315,0,0	
PT,3,6.315,26.25,0	
PT,4,0,26.25,0	Dimensões do corpo de prova
VIEW,0,0,1,0	(axissimétrico)
SF4PT,1,1,2,3,4,0	
SCALE,.8	
EGROUP,1,PLANE2D,0,2,1,0,4,2,0,0	
MPROP,1,NUXY,.499	Características do elemento
RCONST,1,1,1,2,0,0	
M_SF,1,1,1,4,4,12,1,1	Formação da rede
MPCTYP,1,1	
MPC,1,0,1,-0.03,-67	
MPC,1,0,2,-0.025,-56	
MPC,1,0,3,-0.02,-45	
MPC,1,0,4,-0.015,-34	
MPC,1,0,5,-0.01,-25	
MPC,1,0,6,-0.005,-11.8	Curva tensão – deformação do
MPC,1,0,7,0,0	composto
MPC,1,0,8,0.005,11.8	
MPC,1,0,9,0.01,25	
MPC,1,0,10,0.015,34	
MPC,1,0,11,0.02,45	
MPC,1,0,12,0.025,56	
MPC,1,0,13,0.03,67	
DCR,1,UY,0,1,1	
DCR,2,UY,-0.788,2,1	Deslocamentos
TIMES,0,6,1	

CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,0.166666,2,0.333333,		Controles de processamento
3,0.5,4,0.666666,5,0.833333,6,1		
NL_CONTROL,0,1		Observações
NL_PLOT,1,100,1,0		
C* R_NONLINEAR		

O modelo estrutural do corpo de prova no programa Cosmos/M é apresentado abaixo.

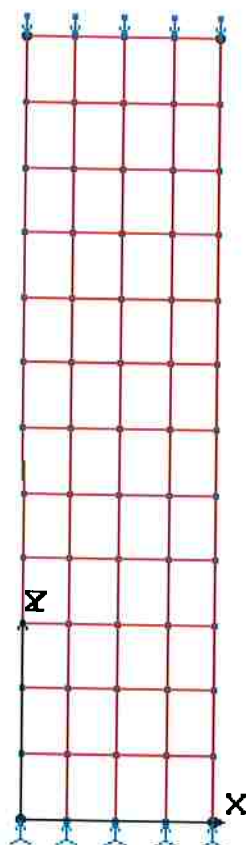
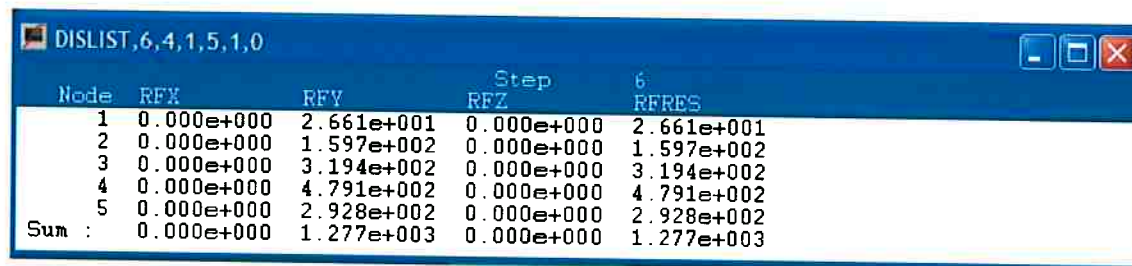


Figura 12 - Modelo estrutural do corpo de prova no Cosmos/M

No programa, as propriedades do material (curva tensão-deformação do composto) são inseridas no comando MPROP.

Neste ensaio, foi imposto uma deformação de 0,788 mm (3% da altura do cilindro)

A Figura 13 ilustra uma tabela resumo fornecida pelo Cosmos/M referente às forças reativas para a condição de deformação imposta.



Node	RFx	RFy	Step RFz	6 RFRES
1	0.000e+000	2.661e+001	0.000e+000	2.661e+001
2	0.000e+000	1.597e+002	0.000e+000	1.597e+002
3	0.000e+000	3.194e+002	0.000e+000	3.194e+002
4	0.000e+000	4.791e+002	0.000e+000	4.791e+002
5	0.000e+000	2.928e+002	0.000e+000	2.928e+002
Sum :	0.000e+000	1.277e+003	0.000e+000	1.277e+003

Figura 13 - Força reativa para o corpo de prova de 1 P&J em compressão

Para se encontrar a força final em cada etapa, multiplica-se a força resultante por 2π . Assim, neste caso para o etapa 6 temos: $F = 2\pi \cdot 1277 = 8024 \text{ N}$

O mesmo procedimento foi adotado para todas as etapas. Logo, foram encontrados os resultados abaixo.

Tabela 4 - Resultados de força (N) obtidos no Cosmos/M para cada etapa

Deslocamento (mm)	Força (N)
0.131	1468
0.263	3086
0.394	4172
0.525	5474
0.657	6761
0.788	8024

A Tabela 5 apresenta o resumo das principais informações relativas ao ensaio.

Tabela 5 - Resumo das informações relativas ao ensaio de compressão para o composto de 1

P&J

MATERIAL.....C1P&J
 DIÂMETRO.....12.63 (mm)
 ALTURA.....25.34 (mm)
 DUREZA.....1 (P&J)
 TEMPERATURA.....23 (°C)
 FREQUÊNCIA.....30 (Hz)

DESLOCAMENTO (mm)	MTS (N)	COSMOS (N)
0	0	0
0.131	1258	1468
0.263	2657	3086
0.394	4451	4172
0.525	5752	5474
0.657	7067	6761
0.788	8395	8024

O resultado da comparação entre o valor experimental e o simulado pode ser observado no gráfico da Figura 14.

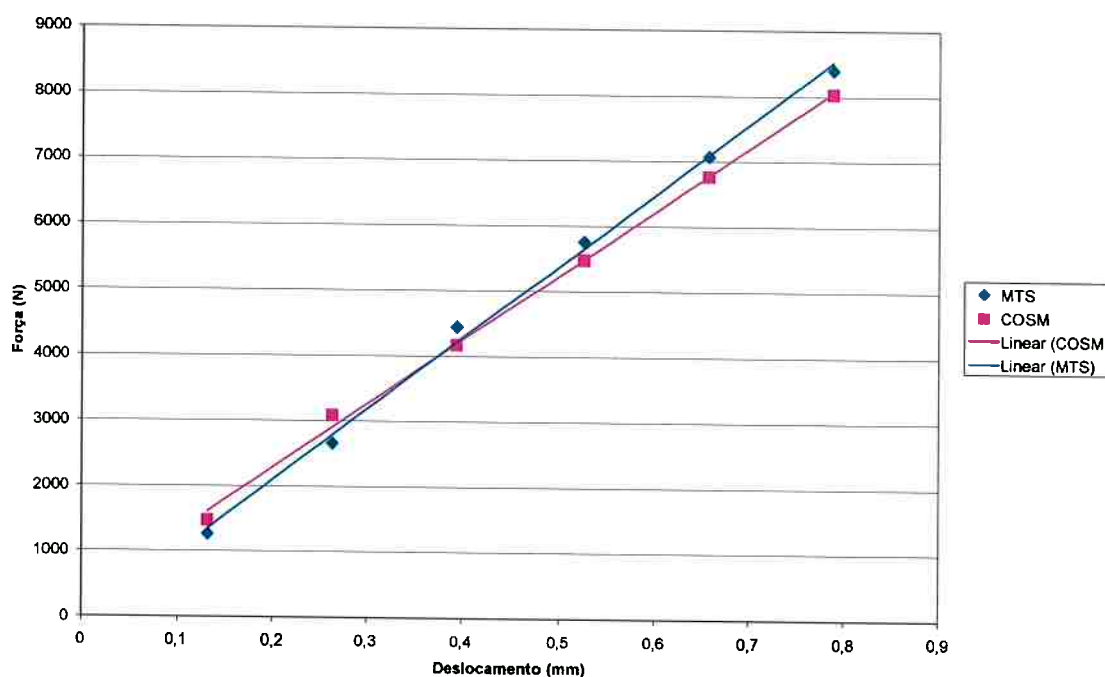


Figura 14 - Resultados experimentais e calculados pelo FEM

Verificamos assim que a metodologia utilizada é válida uma vez que os valores encontrados para força dinâmica por simulação ficam bem próximos dos valores experimentais.

Com o levantamento da curva característica tensão-deformação do composto podemos nos certificar da equivalência entre o resultado experimental e o simulado.

3.2. Corpo de prova de 3 P&J

O composto de 3 P&J foi submetido às seguintes temperaturas: 60, 80, 100, 120 e 140°C.

A partir do ensaio na MTS foram obtidos os gráficos abaixo.

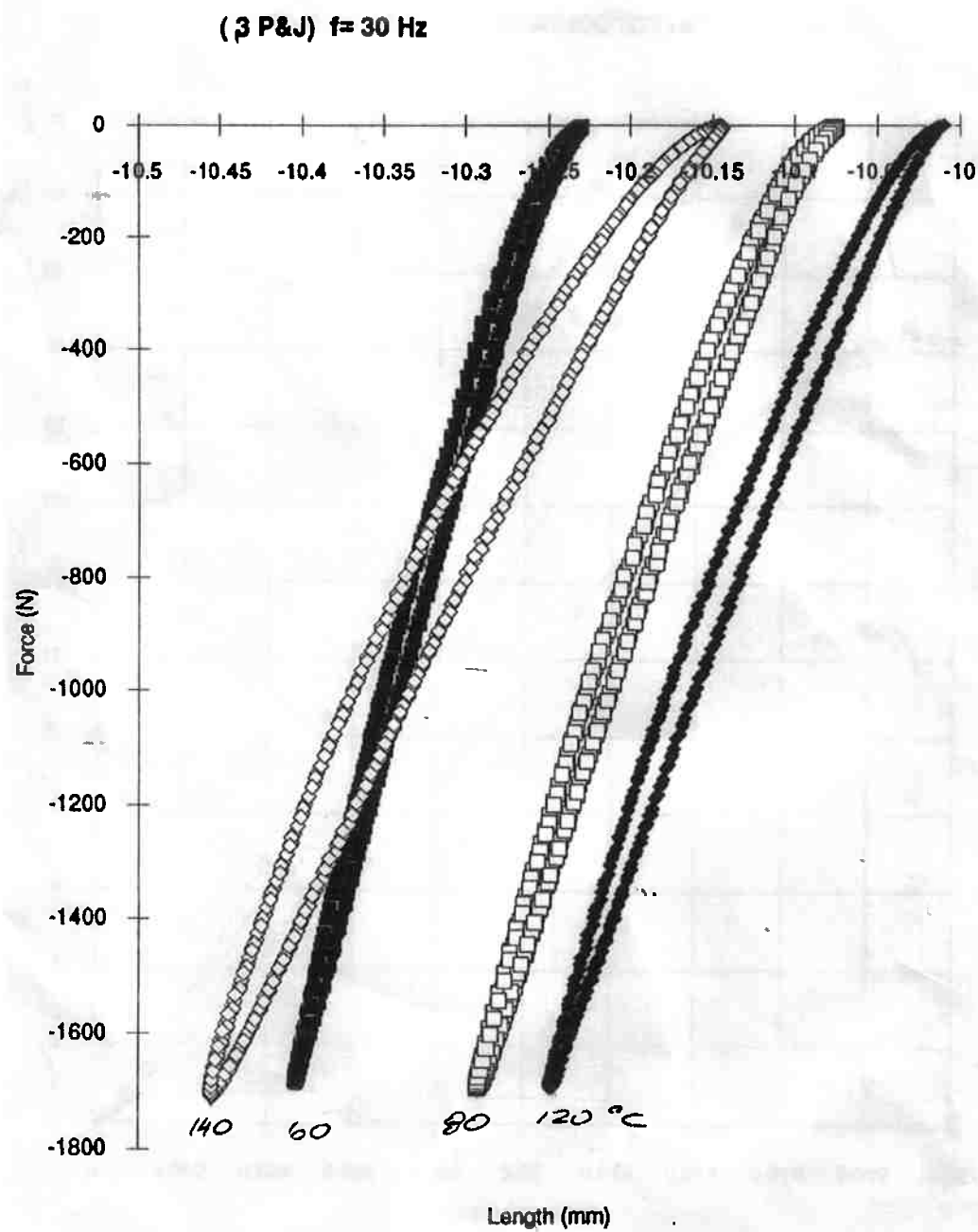


Figura 15 - Curvas de histerese para o composto de 3 P&J (t constante)

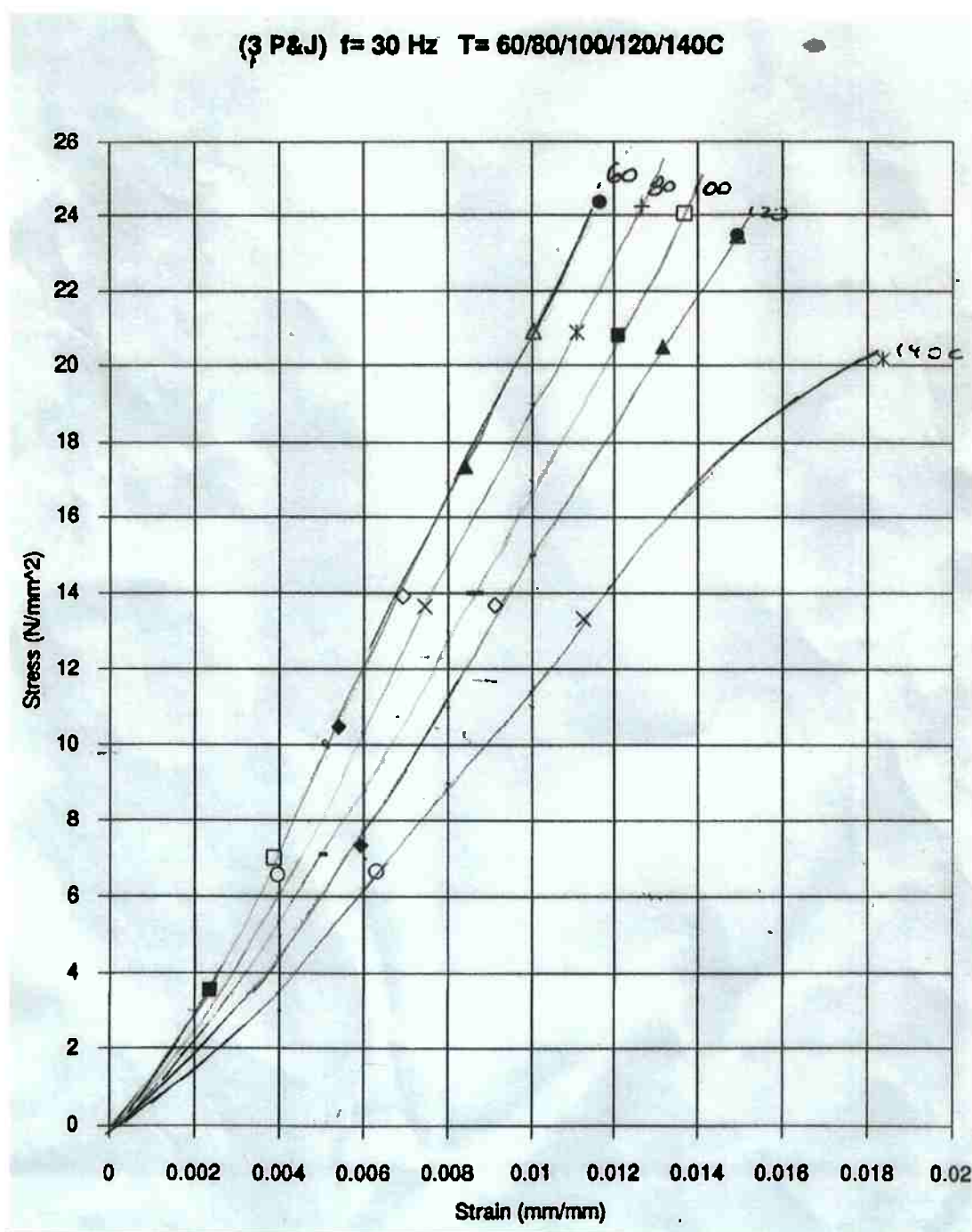


Figura 16 - Curvas tensão (N/mm^2) x deformação (mm/mm) para as diferentes temperaturas para o composto de 3 P&J

A partir da Figura 16 obtém-se a Tabela 6 abaixo com os valores de tensão e deformação para cada temperatura ensaiada.

Tabela 6 - Valores de tensão (N/mm²) e deformação (mm/mm) para o composto de 3 P&J nas temperaturas ensaiadas

Temperatura(°C)	60	80	100	120	140
Deformação (mm/mm)	Tensão (N/mm ²)				
0	0	0	0	0	0
0,002	2,9	2,5	2,2	1,8	1,4
0,004	7,1	6,1	5,3	4,4	3,4
0,006	12	10,3	8,8	7,7	6,2
0,008	16,7	14,8	12,7	11,2	8,8
0,01	20,8	18,8	16,7	15	11,3

A partir dos dados de tensão e deformação foram implementados programas de simulação no Cosmos/M para cada temperatura ensaiada. Esses valores foram inseridos no comando MPROP que caracteriza o material.

Assim, os seguintes códigos Cosmos/M foram obtidos:

Composto de 3 P&J a 60 °C:

PT,1,0,0,0
PT,2,6.15,0,0
PT,3,6.15,25.34,0
PT,4,0,25.34,0
VIEW,0,0,1,0
SF4PT,1,1,2,3,4,0
SCALE,.8
EGROUP,1,PLANE2D,0,2,1,0,4,2,0,0
MPROP,1,NUXY,.499
RCONST,1,1,1,2,0,0
M_SF,1,1,1,4,4,12,1,1
MPCTYP,1,1
MPC,1,0,1,-0.01,-20.8
MPC,1,0,2,-0.008,-16.7

MPC,1,0,3,-0.006,-12
 MPC,1,0,4,-0.004,-7.1
 MPC,1,0,5,-0.002,-2.9
 MPC,1,0,6,0,0
 MPC,1,0,7,0.002,2.9
 MPC,1,0,8,0.004,7.1
 MPC,1,0,9,0.006,12
 MPC,1,0,10,0.008,16.7
 MPC,1,0,11,0.015,20.8
 TIMES,0,6,1
 CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,0.166666,2,0.333333,3,0.5,4,0.666666,5,0.833333,6,1
 DCR,1,UY,0,1,1
 DCR,2,UY,-0.253,2,1
 NL_CONTROL,0,1
 NL_PLOT,1,100,1,0
 R_NONLINEAR

Composto de 3 P&J a 80 °C:

PT,1,0,0,0
 PT,2,6.15,0,0
 PT,3,6.15,25.34,0
 PT,4,0,25.34,0
 VIEW,0,0,1,0
 SF4PT,1,1,2,3,4,0
 SCALE,.8
 EGROUP,1,PLANE2D,0,2,1,0,4,2,0,0
 MPROP,1,NUXY,.499
 RCONST,1,1,1,2,0,0
 M_SF,1,1,1,4,4,12,1,1
 MPCTYP,1,1

MPC,1,0,1,-0.01,-18.8
 MPC,1,0,2,-0.008,-14.8
 MPC,1,0,3,-0.006,-10.3
 MPC,1,0,4,-0.004,-6.1
 MPC,1,0,5,-0.002,-2.5
 MPC,1,0,6,0,0
 MPC,1,0,7,0.002,2.5
 MPC,1,0,8,0.004,6.1
 MPC,1,0,9,0.006,10.3
 MPC,1,0,10,0.008,14.8
 MPC,1,0,11,0.015,18.8
 TIMES,0,6,1
 CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,0.166666,2,0.333333,3,0.5,4,0.666666,5,0.833333,6,1
 DCR,1,UY,0,1,1
 DCR,2,UY,-0.253,2,1
 NL_CONTROL,0,1
 NL_PLOT,1,100,1,0
 R_NONLINEAR

Composto de 3 P&J a 100 °C:

PT,1,0,0,0
 PT,2,6.15,0,0
 PT,3,6.15,25.34,0
 PT,4,0,25.34,0
 VIEW,0,0,1,0
 SF4PT,1,1,2,3,4,0
 SCALE,.8
 EGROUP,1,PLANE2D,0,2,1,0,4,2,0,0
 MPROP,1,NUXY,.499
 RCONST,1,1,1,2,0,0

M_SF,1,1,1,4,4,12,1,1
 MPCTYP,1,1
 MPC,1,0,1,-0.01,-16.7
 MPC,1,0,2,-0.008,-12.7
 MPC,1,0,3,-0.006,-8.8
 MPC,1,0,4,-0.004,-5.3
 MPC,1,0,5,-0.002,-2.2
 MPC,1,0,6,0,0
 MPC,1,0,7,0.002,2.2
 MPC,1,0,8,0.004,5.3
 MPC,1,0,9,0.006,8.8
 MPC,1,0,10,0.008,12.7
 MPC,1,0,11,0.015,16.7
 TIMES,0,6,1
 CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,0.166666,2,0.333333,3,0.5,4,0.666666,5,0.833333,6,1
 DCR,1,UY,0,1,1
 DCR,2,UY,-0.253,2,1
 NL_CONTROL,0,1
 NL_PLOT,1,100,1,0
 R_NONLINEAR

Composto de 3 P&J a 120 °C:

PT,1,0,0,0
 PT,2,6.15,0,0
 PT,3,6.15,25.34,0
 PT,4,0,25.34,0
 VIEW,0,0,1,0
 SF4PT,1,1,2,3,4,0
 SCALE,.8
 EGROUP,1,PLANE2D,0,2,1,0,4,2,0,0

MPROP,1,NUXY,.499
 RCONST,1,1,1,2,0,0
 M_SF,1,1,1,4,4,12,1,1
 MPCTYP,1,1
 MPC,1,0,1,-0.01,-15
 MPC,1,0,2,-0.008,-11.2
 MPC,1,0,3,-0.006,-7.7
 MPC,1,0,4,-0.004,-4.4
 MPC,1,0,5,-0.002,-1.8
 MPC,1,0,6,0,0
 MPC,1,0,7,0.002,1.8
 MPC,1,0,8,0.004,4.4
 MPC,1,0,9,0.006,7.7
 MPC,1,0,10,0.008,11.2
 MPC,1,0,11,0.015,15
 TIMES,0,6,1
 CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,0.166666,2,0.333333,3,0.5,4,0.666666,5,0.833333,6,1
 DCR,1,UY,0,1,1
 DCR,2,UY,-0.253,2,1
 NL_CONTROL,0,1
 NL_PLOT,1,100,1,0
 R_NONLINEAR

Composto de 3 P&J a 140 °C:

PT,1,0,0,0
 PT,2,6.15,0,0
 PT,3,6.15,25.34,0
 PT,4,0,25.34,0
 VIEW,0,0,1,0
 SF4PT,1,1,2,3,4,0

```

SCALE,.8
EGROUP,1,PLANE2D,0,2,1,0,4,2,0,0
MPROP,1,NUXY,.499
RCONST,1,1,1,2,0,0
M_SF,1,1,1,4,4,12,1,1
MPCTYP,1,1
MPC,1,0,1,-0.01,-11.3
MPC,1,0,2,-0.008,-8.8
MPC,1,0,3,-0.006,-6.2
MPC,1,0,4,-0.004,-3.4
MPC,1,0,5,-0.002,-1.4
MPC,1,0,6,0,0
MPC,1,0,7,0.002,1.4
MPC,1,0,8,0.004,3.4
MPC,1,0,9,0.006,6.2
MPC,1,0,10,0.008,8.8
MPC,1,0,11,0.015,11.3
TIMES,0,6,1
CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,0.166666,2,0.333333,3,0.5,4,0.666666,5,0.833333,6,1
DCR,1,UY,0,1,1
DCR,2,UY,-0.253,2,1
NL_CONTROL,0,1
NL_PLOT,1,100,1,0
R_NONLINEAR

```

Em todos os casos o código fonte é o mesmo a não ser pelos dados do comando MPC, pois se trata do mesmo corpo de prova, porém ensaiado a diferentes temperaturas. O que muda então para cada temperatura é a curva tensão x deformação.

O modelo estrutural para o composto de 3 P&J pode ser visto abaixo.

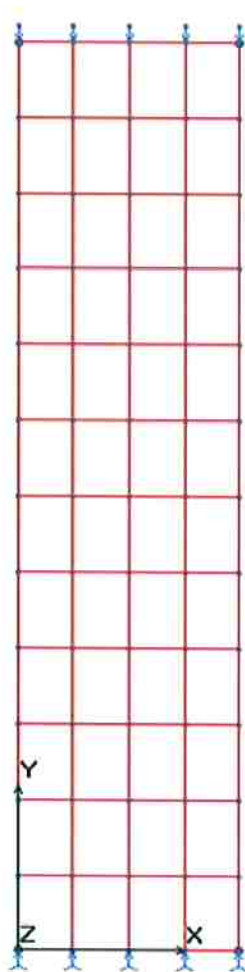


Figura 17 - Modelo estrutural em FEM do corpo de prova de 3 P&J

Para este composto foi imposto uma deformação de 0,253 mm (1% de 25,34 mm) e foram determinadas seis etapas de processamento no comando TIMES.

O mesmo procedimento adotado para o composto de 1 P&J para se determinar as forças foi adotado para o composto de 3 P&J, em cada temperatura.

Observa-se na Figura 18 a tabela de resultados para a etapa 3 do composto de 3 P&J a 80°C.

Node	RFX	RFY	RFZ	RFRES
1	0.000e+000	3.198e+000	0.000e+000	3.198e+000
2	0.000e+000	1.919e+001	0.000e+000	1.919e+001
3	0.000e+000	3.837e+001	0.000e+000	3.837e+001
4	0.000e+000	5.756e+001	0.000e+000	5.756e+001
5	0.000e+000	3.518e+001	0.000e+000	3.518e+001
Sum :	0.000e+000	1.535e+002	0.000e+000	1.535e+002

Figura 18 - Forças de reação para o composto de 3 P&J

Efetuada-se os cálculos das forças para todas as etapas de todas as temperaturas foi obtida a tabela abaixo (Tabela 7).

Tabela 7 - Valores de força (N) encontrados por FEM para as temperaturas às quais o composto de 3 P&J foi ensaiado

Temperatura (°C)	60	80	100	120	140
Deslocamento (mm)	Força (N)				
0,042	286	246	217	177	138
0,084	672	578	503	417	322
0,126	1123	964	829	711	564
0,168	1592	1384	1184	1040	829
0,211	2037	1811	1564	1383	1079
0,253	2430	2196	1949	1750	1319

Com os dados da Tabela 7 foi obtido o gráfico abaixo (Figura 19).

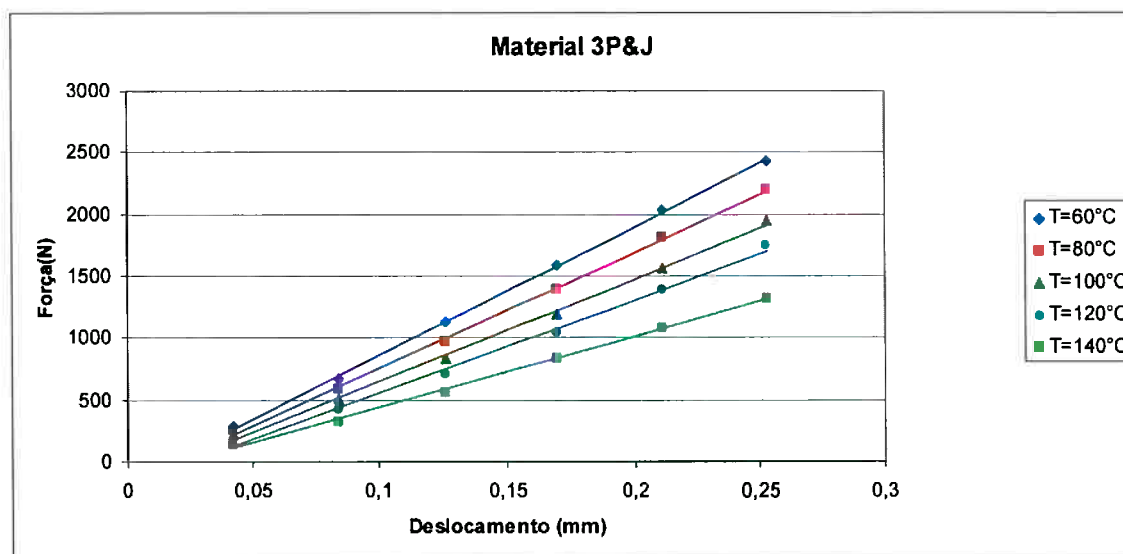


Figura 19 - Resultados encontrados por FEM para o composto de 3 P&J

Na Figura 19 se observa que o método de simulação por elementos finitos é válido no estudo do efeito da temperatura para um composto elastomérico a uma dada tensão e frequência.

Pode-se notar a queda da força com o aumento da temperatura. Nas temperaturas de 60 a 120°C podemos dizer que a queda é proporcional. Porém a 140°C, nota-se uma queda mais acentuada da força, o que torna o material mais instável.

Através dos dados da Figura 19 de tensão e deformação para as diferentes temperaturas do material, foram encontrados os valores do módulo dinâmico E^* do material e obtido o seguinte gráfico (Figura 20).

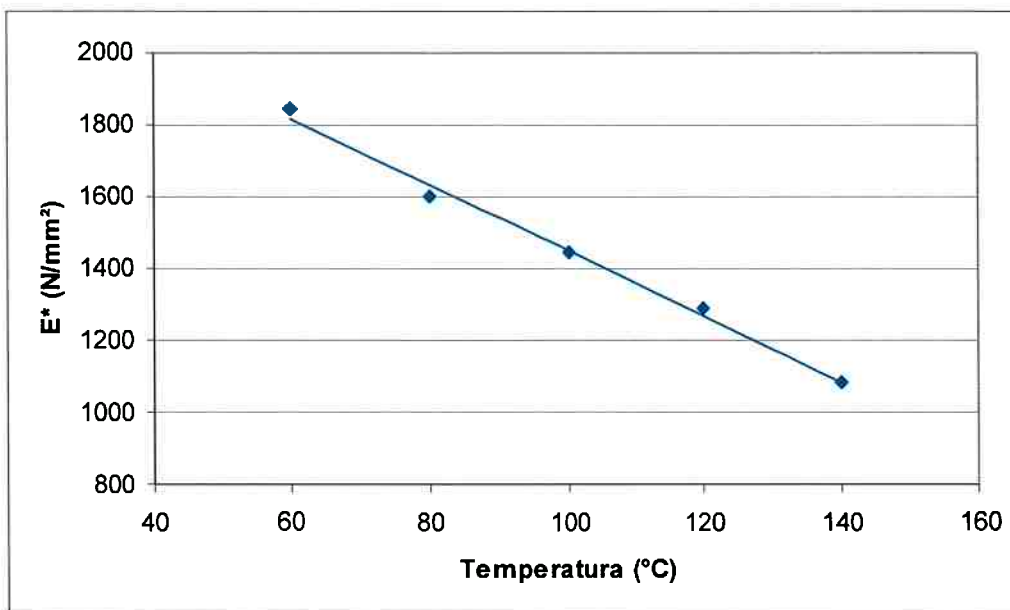


Figura 20 - Módulo dinâmico (N/mm²) x Temperatura (°C) para o composto de 3 P&J

Nota-se a queda do módulo dinâmico com o aumento da temperatura. Com isso podemos analisar a estabilidade de um composto. Ou seja, quanto maior a variação de E^* com a temperatura, mais o material altera suas características de amortecimento e elasticidade com a temperatura.

Além de forças reativas o Cosmos/M fornece outros resultados como “plotagem” de tensão, deformação, deslocamento, forças reativas e outros.

Um exemplo de variação do deslocamento em Y ao longo do corpo de prova pode ser visto na Figura 21.

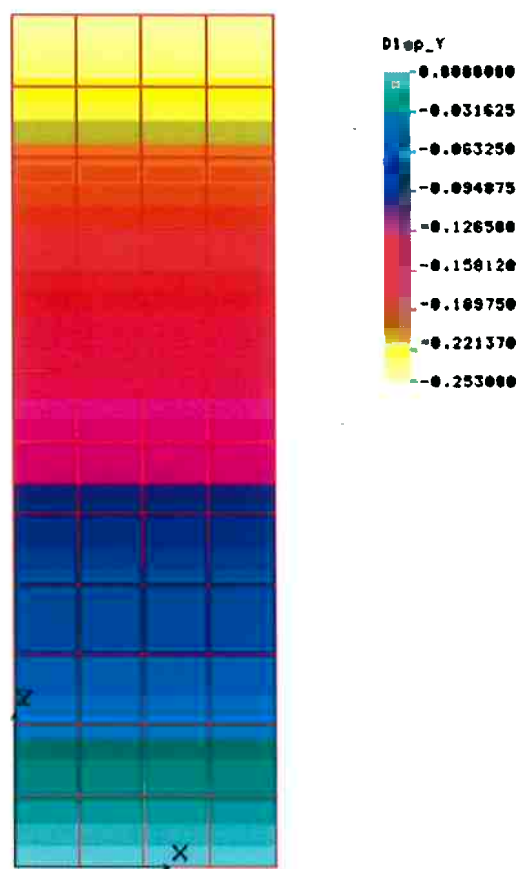


Figura 21 - Resultado gráfico do deslocamento em Y para o composto de 3 P&J

4. CONCLUSÕES

- A curva tensão x deformação obtida experimentalmente é usada como a identificação do material na simulação, ou seja, é ela quem determinará as propriedades do material.
- Para o composto de 1 P&J, comprova-se a equivalência entre o resultado experimental e o simulado.
- Para o composto de 3 P&J é verificado o efeito da temperatura sobre o composto. Por ser um material duro, o material se comporta com “estabilidade” até a temperatura de 120oC, a partir daí o material muda suas características de amortecimento e elasticidade, por “sobre-vulcanização”.
- A simulação por FEM pode ser expandida para outras geometrias e outras composições de materiais elastoméricos, mostrando-se uma poderosa ferramenta para o estudo do comportamento de um corpo elastomérico sob determinadas condições de trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GENT, A. N. **Engineering with Rubber**. Hanser Publ. cap.9, 1992
2. PLAUT, R. L. **Aspectos Relativos à Caracterização Dinâmica de Compostos Elastoméricos e Modelos Matemáticos para a Área de Contato de Prensas Úmidas de Máquinas de Papel**. Tese de livre docência, USP. p.2, 1999
3. NORMA ASTM D 1566-90
4. SPERLING, L. H. **Introduction to Physical Polymer Science**. John Wiley & Sons Publ. cap. 8-9, 1992
5. RUDD, G. E. **Mechanical design properties and testing of plastics and elastomers**. Westinghouse Science & Technology Center, Pittsburgh, Pennsylvania
6. LONG, H. **Basic Compounding and Processing of Rubber**. Rubber Division Publ., cap. 1, 1985
7. CORAN, A. Y. **Vulcanization: Convetional and Dynamic**. Rubber Chem. and Tech. v.68, n.3, p.351-375, jul-ago, 1995
8. OHM, R. F. **The Vanderbilt Rubber Handbook**. R. T Vanderbilt Company Publ. p496-518, 1990
9. COURANT, R. **Variational Methods for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibration**. Bull. Am. Math. Sot., Vol. 49, pp. 1-23, 1943
10. TURNER, M., CLOUGH, R. W., MARTIN, H. C. **Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures**. J. Aer. Sci., Vol. 23, pp. 805-823, 1956
11. CLOUGH, R. W. **The Finite Element Method in Plane Stress Analysis**. Proc. of the American Soc. of Civil Engineers, 2nd Conference on Electronic Computation, Pittsburgh, pp. 345-378, 1960
12. NIELSEN, L. E. **Mechanical Properties of Polymers and Composites**. Dekker Publ. p.134, 1994
13. **Cosmos/M**. Structural Research & Analysis Corp., 2ª ed., Ver. 1.71, 4 volumes, 1994
14. HOFFMAN, W. **Rubber Technology Handbook**. Hanser Publ. p.7, 1980

15. THRON, G. H. N. **Caracterização Dinâmica de Compostos Elastoméricos: Conceitos e Ensaio Laboratoriais.** Trabalho de Formatura, USP, 2003