

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Trabalho de Formatura 2005

GUSTAVO HENRIQUE RAFAEL HOEHNE FURLAN

Orientador: Prof. Dr. Ronald Lesley Plaut

GUSTAVO HENRIQUE RAFAEL HOEHNE FURLAN

***Simulação de anel (o-ring) para aplicação automotiva
de composto elastomérico.***

Orientador: Prof Dr. Ronald Lesley Plaut

São Paulo
2005

Dedicatória

Aos meus pais, que me deram o suporte necessário para chegar até aqui e alcançar um futuro na profissão que escolhi, pelo amor que me dedicaram durante todos esses anos. À Amanda que esteve ao meu lado durante a execução deste trabalho, agradeço pela paciência e pelo companheirismo demonstrados.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a equipe da Retec Vedações Técnicas LTDA, na figura dos Srs. Cláudio César Horwath e Ricardo Zampolli, e aos Srs. Rogério Celso Laki e Mauro Lungarez Pinto e toda a equipe da RoMa Tecnologia em Borracha LTDA. Pelo suporte, e por acreditarem em meu trabalho.

RESUMO

O-rings são peças de segurança, cuja falha pode acarretar danos desastrosos. São amplamente utilizadas pela indústria, e devem ser projetadas com precaução, analisando todas as variáveis que seriam prejudiciais ao seu desempenho.

Esta vedação de borracha de composição homogênea é moldada em peça única na configuração de um toróide de seção circular sendo utilizada como vedação dinâmica ou estática.

Neste trabalho simula-se um ensaio de compressão de peças de composto elastomérico pelo método dos elementos finitos, que consiste na divisão de uma peça em um sistema de pequenos corpos ou unidades (elementos finitos), interconectados em pontos comuns a dois ou mais elementos (nós), e/ou linhas de contorno e/ou superfícies.

Os corpos de prova foram simulados em programas de elementos finitos e sendo aplicadas as propriedades do modelamento em peças de geometria mais complexa, no caso um anel. Comparou-se o resultado da simulação com a curva tensão x defomação encontrada em laboratório.

ABSTRACT

O-rings are security parts which fail could cause serious damages. They are widely used by the industry, and must be carefully projected, analyzing all possible variables that could harm it's performance.

This elastomeric seal of homogeneous composition is molded in a single part of toroidal configuration with circular cross section, been used as dynamic or static sealing.

In this work will be simulated a compression test of elastomeric compounds parts, by the finite element method, that consists in dividing the part in a series of small elements or units (finite elements), interconnected by common points to two or more elements (nodes), and/or boundary lines and/or surfaces.

The proof bodies were simulated in finite element method programs an it's properties were used in more complex geometry, the o-ring, modeling. And the results were compared with the force x displacement curve found in laboratory.

ÍNDICE

Dedicatória	I
Agradecimentos	II
Resumo	III
Abstract	IV
1. Introdução	01
2. Propriedades Físicas	02
2.1. Propriedades Estáticas	02
2.2. Propriedades Dinâmicas	04
2.3. Temperatura de Transição Vítreá	07
2.4. Superposição Tempo-Temperatura	08
2.5. Propriedades dos O-ring	09
3. Composto Elastomérico	10
3.1. Elastômeros	10
3.1.1. Borracha Natural (NR)	10
3.1.2. Borracha Poliisopreno (IR)	11
3.1.3. Borracha Nitrílica (NBR)	11
3.1.4. Borracha de Etileno-Propileno (EPDM)	11
3.1.5. Borracha de Estireno-Butadieno (SBR)	12
3.1.6. Borracha Butílica (IIR)	12
3.1.7. Borracha Polibutadieno (BR)	12
3.1.8. Borracha Policloropreno (CR)	13
3.1.9. Borracha de Silicone (MQ)	13
3.1.10. Borracha Fluorocarbonada (FKM)	13
3.1.11. Poliuretano (PU)	14
3.2. Aditivos	14
3.2.1. Cargas	14
3.2.1.1. Cargas Reforçantes	14
3.2.1.1.1. Negro de Fumo	14
3.2.1.1.2. Sílicas	16
3.2.1.1.3. Cargas de Enchimento (Inertes)	16
3.2.2. Auxiliares de Processamento	16
3.2.3. Agentes Reticulantes	16

3.2.4. Aceleradores	18
3.2.5. Ativadores e Retardantes de Vulcanização	19
3.2.5.1. Retardantes	19
3.2.5.2. Ativadores	19
3.2.6. Antidegradantes	20
3.2.6.1. Antioxidantes	20
3.2.6.2. Antiozonantes	21
3.2.7. Agentes de Pegajosidade	21
3.2.8. Agentes de Expansão	22
4. Falha	22
5. Objetivos	28
6. Materiais e Métodos	28
7. Resultados	32
7.1. Corpos de Prova	32
7.2. Anel	36
8. Discussão	44
9. Conclusão	45
10. Referências Bibliográficas	47
ANEXO 1Tabela de Propriedades Gerais das Borrachas	
ANEXO 2 Ensaio com os Compostos Elastoméricos	
ANEXO 3Norma de Testes para o-ring	
ANEXO 4 Dados de entrada para o Autocad e o Cosmos Design Star	
ANEXO 5Brochura MTS 810	

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 2.1. Modelos Propostos por Maxwell e Voigt para Materiais Viscoelásticos	03
Figura 2.2. Comportamento dos diferentes tipos de material nos ensaios de fluência e relação de tensões	04
Figura 2.3. Relação entre Tensão x Tempo para um Material Elástico e Viscoelástico	05
Figura 2.4. Curvas características da Relação Tensão x Deformação para diferentes materiais.....	05
Figura 2.5. Estágios do polímero com a variação da temperatura: região 1 estado vítreo, região 2 temperatura de transição vítrea, região 3 platô borrachoso, região 4 extensão do platô borrachoso para materiais com ligações cruzadas, região 5 fusão do polímero.....	08

Capítulo 3

Figura 3.1.– Etapas da reação de vulcanização.....	17
--	----

Capítulo 4

Figura 4.1. Falha por Extrusão e Mordedura	23
Figura 4.2. Falha em Espiral	23
Figura 4.3. Falha por Abrasão	24
Figura 4.4. Falha por Deformação Permanente	24
Figura 4.5. Trincas de Ozônio	25
Figura 4.6. Endurecimento por Oxidação	25
Figura 4.7. Falha por Extração do Plastificante	26
Figura 4.8. Falha por Instalação Imprópria	26
Figura 4.9. Falha por Descompressão Explosiva.....	27

Capítulo 6

Figura 6.1. Corpos de Prova da Esquerda para a Direita: NR, FKM, PU.....	28
Figura 6.2. Desenho Técnico das Medidas dos Corpos de Prova: NR, FKM à esquerda e PU à direita	29

Figura 6.3. Medida de Dureza com Durômetro Shore A	29
Figura 6.4. Máquina Universal de Ensaaios MTS 810 utilizada na caracterização das peças	31
Figura 6.5. Anéis O-ring de NR e FKM	31
Figura 6.6. Desenho Técnico do Anel O-ring	32

Capítulo 7

Figura 7.1. Resultado do GeoStar da simulação do ensaio de compressão no corpo de prova NR sem deformação à esquerda e deformado à direita	33
Figura 7.2. Resultado do DesignStar da Simulação do Ensaio de Compressão no Corpo de Prova NR antes e depois da aplicação da carga	34
Figura 7.3. Comparação entre o Ensaio de Compressão Real e Simulada de um Corpo de Prova NR.....	34
Figura 7.4. Comparação entre o ensaio de Compressão Real e Simulado de um Corpo de FKM.....	35
Figura 7.5. Comparação entre o ensaio de Compressão Real e Simulado de um Corpo de Prova PU.....	35
Figura 7.6. Anel e Placa no Programa Cosmos GeoStar antes de fazer a Simulação	39
Figura 7.7. Simulação da Compressão sem Atrito do Anel	39
Figura 7.8. Simulação da Compressão Atrito do Anel.....	40
Figura 7.9. Anel e Placa antes da Simulação do Programa Cosmos DesignStar	40
Figura 7.10. Resultado da Tensão de Von Mises no Anel em Compressão contra a Placa	41
Figura 7.11. Resultado da deformação para a Simulação não linear de compressão do Anel	41
Figura 7.12. Resultado do Deslocamento da Simulação não Linear do Anel de 40 lados	42
Figura 7.13. Resultado do Programa do Anel de 40 lados sem a Placa	42
Figura 7.14. Comparação entre a Curva de Forças versus Deslocamento Real e a obtida pela Simulação para a Borracha Natural.....	43
Figura 7.15. Comparação entre a Curva de força versus deslocamento real e a obtida pela simulação para a borracha natural.....	43

Figura 7.16. Comparação entre os resultados dos modelos não linear e estático	44
--	-----------

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 2.1. Equação da Lei de Hooke e da Lei de Newton	03
--	----

Capítulo 3

Tabela 3.1. Influência das Características do Negro de Fumo nas Propriedades do Material	15
--	----

Tabela 3.2. Tipos de aceleradores	18
---	----

Capítulo 6

Tabela 6.1. Composição da Amostra NR	30
--	----

Tabela 6.2. Composição da Amostra FKM.....	30
--	----

Tabela 6.3. Composição da Amostra PU.....	30
---	----

1- Introdução

Vedações são peças amplamente utilizadas pela indústria, pois a grande maioria das máquinas opera com a presença de dutos de fluídos que devem estar cuidadosamente isolados. As peças de vedação devem ser projetadas com precaução, pois sua falha seria desastrosa.

O-rings são vedadores de borracha de composição homogênea, moldados em uma peça única, na configuração de um toróide de seção circular. O anel o-ring é usado como vedação dinâmica ou estática geralmente instalado em um alojamento usinado. ⁰¹

Eles são versáteis devido à simplicidade de sua geometria e por ocupar pouco espaço. Um o-ring é uma vedação bi-direcional. Geralmente são fabricados de materiais elastoméricos, mas podem ser feitos com outros materiais, por exemplo, PTFE ou metais. A vedação ocorre pela deflexão da seção transversal do anel quando submetida à pressão de fechamento. ⁰²

Quanto à aplicação, são divididos em duas categorias: estático, quando a vedação não se move, exceto pela variação de pressão do fluido e dinâmico, cuja vedação está sujeita a movimento.

Para especificar um anel o-ring é necessário conhecer o diâmetro interno, o diâmetro da seção transversal, e o composto elastomérico deve ser considerado como um fluido viscoso, incompressível, com grande tensão superficial.

A dureza apropriada do material será determinada pela fricção e pressão que a vedação será submetida, assim como as dimensões de seção transversal da vedação. Um fator de grande importância é a variação de temperatura de superfícies adjacentes e do meio.

Anéis submetidos a aplicações estáticas devem estar sujeitos à força de compressão radial entre o fundo da cavidade de vedação e a parede do cilindro para uma melhor vedação. A forma da ranhura não é importante, desde que ela forneça uma compressão apropriada.

O projeto do anel deve considerar: ⁰³

- Compatibilidade entre o fluido de serviço e o material da vedação.

- Outros fluidos que estarão em contato com a vedação, como lubrificantes e fluidos de limpeza.
- Capacidade para suportar extremos de temperatura.
- Presença de contaminantes abrasivos.
- Lubrificação correta e apropriada do anel e seu par na montagem da unidade;
- Não permitir que o anel fique folgado, a ponto de se mover solidariamente ao membro rotativo;
- Evitar a presença de cantos vivos na cavidade do anel.

2- Propriedades Físicas

2.1 - Propriedades Estáticas

As borrachas são materiais compostos de longas moléculas flexíveis enroladas de maneira aleatória. Quando estas moléculas são submetidas a uma força, elas desenrolam-se e adquirem uma geometria mais específica, possuindo assim menor entropia. Como o estado de entropia maior é mais estável, ao retirarmos a força, as moléculas tendem a retornar ao seu estado inicial.

Quando um elastômero puro é tensionado, as moléculas deslizam umas sobre as outras e ocorre uma fratura por escoamento plástico sem quebra de ligações químicas. As primeiras ligações cruzadas aumentam o peso molecular, dificultando o movimento relativo das moléculas.

O aumento no número de ligações cruzadas leva o elastômero a ponto de gel, formando uma rede tridimensional, onde parte da energia é armazenada e parte é dissipada na forma de calor gerado pelo movimento das moléculas. Portanto, o polímero é um material que possui uma parte elástica e uma parte viscosa. O comportamento deste tipo de material, chamado de viscoelástico, pode ser explicado pelos modelos propostos por Maxwell e Voigt da associação de dois elementos mecânicos, uma mola e um amortecedor, representando a flexibilidade e o escorregamento entre as moléculas respectivamente.

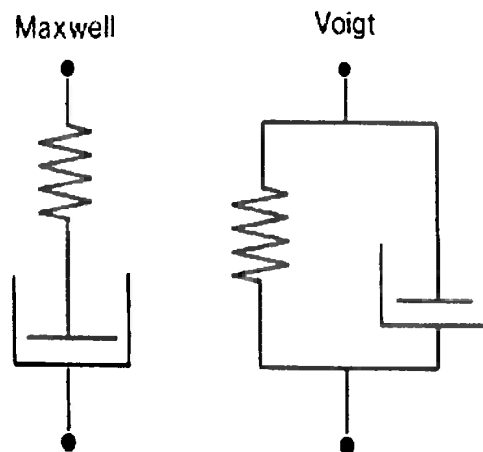


Figura 2.1 – Modelos propostos por Maxwell e Voigt para materiais viscoelásticos. ⁰²

Materiais perfeitamente elásticos seguem a lei de Hooke, e fluídos perfeitamente viscosos seguem a lei de Newton. Os materiais viscoelásticos têm um comportamento intermediário.

Tabela 2.1 – Equações da Lei de Hooke e da Lei de Newton

	Materiais Elásticos	Fluídos Viscosos
Força	$F = k.x$ (Eq. 2.1); $\gamma = x/h$ (Eq. 2.2)	$F = c \left(\frac{dx}{dt} \right)$ (Eq. 2.3)
Tensão	$\sigma = E.\varepsilon$; (Eq. 2.4) $\sigma = G.\frac{\Delta x}{h}$ (Eq. 2.5)	$\sigma = \eta_e \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)$ (Eq. 2.6)

Sendo F a força, x a deformação, k a constante elástica, γ a força de cisalhamento, h a altura, c o coeficiente de amortecimento viscoso, t o tempo, σ a tensão, ε a deformação, E o módulo de elasticidade G o módulo de cisalhamento e η_e o coeficiente da viscosidade newtoniana.

Da teoria da elasticidade temos: $E = 2.(1+\nu)G$ (Eq. 2.7), onde E é o módulo de elasticidade, ν o coeficiente de Poisson e G o módulo de cisalhamento. Geralmente os compostos elastoméricos são materiais isotrópicos e possuem $\nu \approx 0,499$, portanto conclui-se que $E \approx 3.G$ para os compostos elastoméricos.

2.2 - Propriedades Dinâmicas

Propriedades dinâmicas são aquelas que medem o comportamento do material em um determinado intervalo de tempo. Por exemplo, o ensaio de fluência mede a variação da deformação quando aplicada uma carga constante, o ensaio de relaxação de tensão mede a variação da tensão sob uma deformação constante. Estes ensaios são importantes para anéis submetidos a tensões estáticas.⁰²

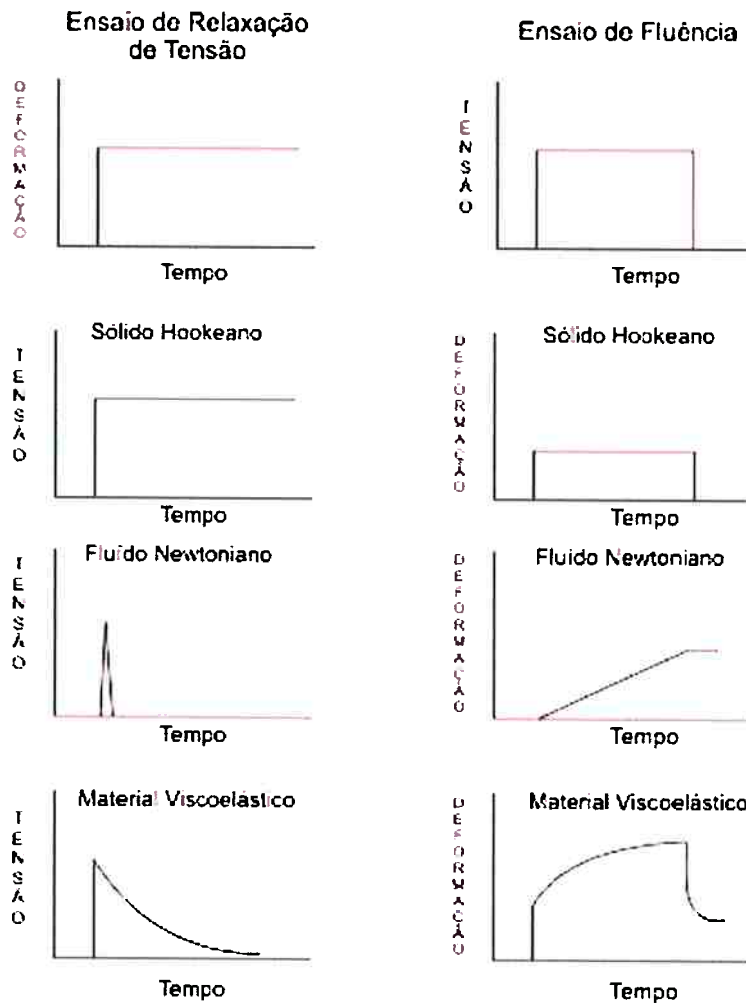


Figura 2.2 – Comportamento dos diferentes tipos de material nos ensaios de fluência e relaxação de tensões.

Existem também os ensaios onde o corpo de prova é submetido a esforços cíclicos. Neste tipo de ensaio, o esforço aplicado segue uma curva senoidal. Uma mola, ou seja, a parte elástica do material apresenta resposta em fase com o esforço. Um amortecedor fica defasado em $\pi/2$ radianos. O

material viscoelástico apresenta um ângulo de defasagem δ intermediário $0 < \delta < \pi/2$. A tangente de δ determina as perdas mecânicas.

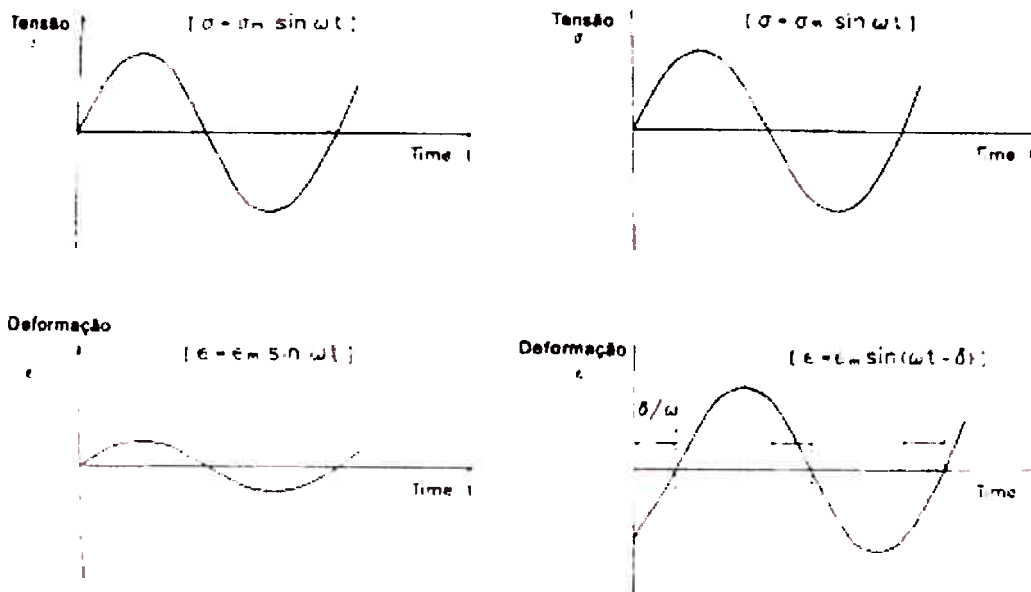


Figura 2.3 – Relação entre tensão x tempo e deformação x tempo para um material elástico (à esquerda) e viscoelástico (à direita).⁰²

A tensão aplicada é $\sigma = \sigma_0 \cdot \text{sen}(\omega.t)$ (Eq. 2.8), onde ω é a frequência angular ($\omega = 2.\pi.f$) (Eq. 2.9), f é a frequência.

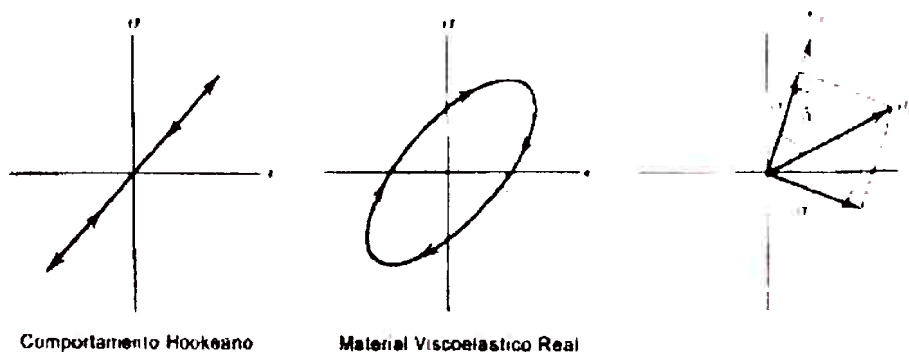


Figura 2.4 - Curvas características da relação tensão x deformação para diferentes materiais.⁰²

A tensão dinâmica pode ser associada a dois módulos, de armazenamento E' e de perda E'' , que representam a parte elástica e a parte viscosa do material. ⁰⁴

$$\sigma' = \sigma_0 \cdot \cos \delta \quad (\text{Eq. 2.10})$$

$$\sigma'' = \sigma_0 \cdot \text{sen} \delta \quad (\text{Eq. 2.11})$$

O módulo dinâmico fica então com a seguinte forma:

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = (E'^2 + E''^2)^{1/2} \quad (\text{Eq. 2.12})$$

$$\text{Onde: } E' = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0} = E^* \cdot \cos \delta \quad (\text{Eq. 2.13})$$

$$E'' = \frac{\sigma''}{\varepsilon_0} = E^* \cdot \text{sen} \delta \quad (\text{Eq. 2.14})$$

Escrevendo na forma complexa:

$$E^* = E' + iE'' \quad (\text{Eq. 2.15}), \text{ sendo } \tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (\text{Eq. 2.16})$$

O decréscimo logarítmico Δ pode ser definido como o logaritmo natural da variação de amplitude entre vibrações sucessivas e representa o amortecimento do material.

$$\Delta \cong \pi \cdot \tan \delta \quad (\text{Eq. 2.17})$$

A energia térmica gerada por ciclo devido à histerese do material é calculada pela seguinte fórmula:

$$H = \pi \cdot E'' \cdot \varepsilon_0^2 \quad (\text{Eq. 2.18}), \text{ onde } \varepsilon \text{ é a amplitude máxima.}$$

A perda e o decréscimo logarítmico são proporcionais à taxa de energia dissipada por ciclo sobre a máxima energia potencial estocada durante o ciclo. Estas perdas são máximas na faixa de temperatura próxima à temperatura de transição vítrea.

Esta propriedade é interessante na fabricação de materiais que são usados para amortecimento de vibrações. Para materiais que são submetidos a esforços cíclicos como pneus, é importante que a perda de calor seja pequena, pois pode causar superaquecimento.

2.3 – Temperatura de transição vítrea

A temperatura de transição vítrea (T_g) caracteriza a mudança de comportamento dos materiais poliméricos, principalmente os amorfos. Abaixo da T_g os polímeros amorfos estão no chamado “estado vítreo” (região 1 da figura 2.5), pois são rígidos e tendem a apresentar fratura frágil; acima dela, eles passam para um “estado viscoso” cuja principal característica é sua grande elasticidade. Os elastômeros são compostos cujas propriedades físicas de interesse estão acima da T_g .

Microscopicamente, a T_g pode ser explicada da seguinte forma: em temperaturas baixas com o material no estado vítreo, apenas as moléculas menores apresentam algum movimento (cadeias de poucas unidades de átomos); esta movimentação de moléculas não afeta significativamente as propriedades do polímero, pois estatisticamente o número de moléculas desta ordem de grandeza é muito baixo. Conforme a temperatura aumenta, os átomos passam a possuir uma energia térmica maior e então moléculas maiores passam a movimentar-se coordenadamente e até que próximo a T_g moléculas relativamente longas (cadeias com algumas dezenas ou centenas de átomos, dependendo do material) passam a se movimentar. Esta liberdade de movimento das moléculas maiores repercute fortemente nas propriedades mecânicas do material, que passa a ter um módulo de elasticidade menor. A partir daí o material entra no estado elastomérico.⁰⁵

O platô borrachoso (região 3 da figura 2.5) é uma região de estabilização do módulo de elasticidade após uma queda acentuada durante a faixa de T_g (região 2 da figura 2.5). O tamanho do platô depende em primeiro lugar da massa molecular do polímero, quanto maior a massa molecular mais longo será esse platô. Para polímeros reticulados deve ser observado o comportamento descrito pela linha pontilhada na qual o módulo de elasticidade praticamente não muda com o aumento da temperatura até a degradação do polímero (região 4 da figura 2.5).⁰⁶

O aumento no número de ligações cruzadas representa um aumento na T_g , pois as ligações cruzadas representam pontos de restrição aos movimentos moleculares.

É preciso ser cuidadoso ao falar em T_g de compostos elastoméricos, pois os aditivos utilizados em sua formulação alteram significativamente a T_g do composto final.

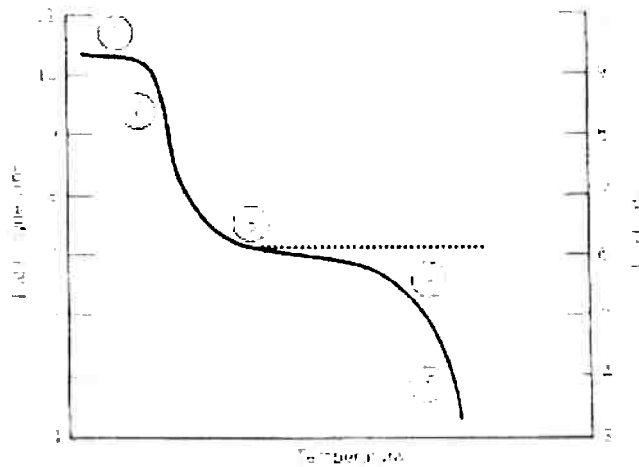


Figura 2.5 – Estágios do polímero com a variação da temperatura: região 1 – estado vítreo, região 2 – temperatura de transição vítrea, região 3 – platô borrachoso, região 4 – extensão do platô borrachoso para materiais com ligações cruzadas, região 5 – fusão do polímero.

2.4. - Superposição tempo temperatura

A resposta do material viscoelástico depende do tempo de aplicação da força. Para solicitações de curta duração, o material tem comportamento elástico e para solicitações de longa duração, o material tem comportamento viscoso. Para definir se o tempo de aplicação da força é curto ou longo, utiliza-se o número de Deborah.

$$D_e = \frac{\tau}{t} \quad (\text{Eq. 2.19})$$

Onde D_e é o número de Deborah, τ é o tempo de relaxação do material e t o tempo de solicitação mecânica.

Quando a temperatura de um polímero aumenta, os movimentos moleculares são mais rápidos e o tempo de relaxação é menor. Quando o tempo de solicitação é menor, a relaxação das moléculas é mais rápida (tempo de relaxação menor). Portanto, existe uma equivalência entre o inverso do tempo de solicitação e a temperatura.

Então, para simular um ensaio de longa duração basta fazer o ensaio em diversas temperaturas e sobrepor as curvas que são relacionadas pela equação de William –Landel – Ferry:

$$\log_{10} a_t = -a_1(T_g - T_0)/(a_2 + T_g - T_0) \quad (\text{Eq. 2.20})$$

Onde a_t é o deslocamento da curva, a_1 e a_2 são constantes, T_g a temperatura de transição vítrea, T_0 a temperatura de realização do ensaio.

2.5 – Propriedades dos O-ring

Um anel deve ter as seguintes propriedades físicas para ter um bom desempenho:

- Resistência a altas temperaturas.
- Resistência química.
- Resistência ao relaxamento de tensões.
- Dureza apropriada.
- Suportar mudanças bruscas de tensões em curtos períodos de tempo.
- Em aplicações dinâmicas, apresentar um período de recuperação menor do que a frequência de oscilação.⁰²

O tempo de resposta do material depende do módulo de armazenamento G' , portanto, quanto mais elástico o material, melhor será a sua resposta.

O atrito do anel gera um aumento de calor, causando falha prematura devido ao envelhecimento do material. Algumas formulações de borracha têm elevadas quantidades de grafite. É falsa a idéia de que o grafite é usado para reduzir o atrito, pois sua função é aumentar a condutividade térmica afastando o calor da superfície atritada.

A tendência da indústria automotiva é aumentar a quantidade de rotações do motor elevando, assim, a temperatura dos óleos e exigindo maior desempenho das peças de vedação.

A durabilidade do componente é determinada através do molhamento da superfície pelo lubrificante. A energia da superfície é determinada pelos grupos funcionais. Por exemplo, o NBR possui grupos nitrila polares que aumentam a

energia da superfície, potencializando a molhabilidade e assim lubrificando melhor; já o silicone, tem baixa energia de superfície, desgastando-se mais por falta de lubrificação.

3- Composto Elastomérico

O polímero da borracha puro tem propriedades limitadas. Para melhorar suas propriedades, ele necessita de aditivos e, assim, passa a ser rentável comercialmente. O conjunto elastômero com aditivo é chamado de composto elastomérico (CE).

A borracha é caracterizada por ser um material capaz de recuperar-se de grandes deformações rápida e forçadamente; retrai em menos de 1 minuto para menos de 1,5 vezes o seu tamanho original; depois de ter sido esticada e mantida por 1 minuto, à temperatura ambiente, para o dobro de seu tamanho.⁰⁷

O primeiro passo no desenvolvimento de uma peça de CE é a seleção do elastômero base, pois é ele que dita as características finais da peça.

A escolha do elastômero base deve considerar as condições de aplicação da peça e é o polímero que determinará quais as propriedades físico-químicas finais.

Na tabela do Anexo 1 serão descritas as propriedades gerais como guia na escolha do elastômero mais apropriado.

3.1 - Elastômeros

3.1.1 - Borracha Natural (NR)

É extraída de vegetais que apresentam secreção leitosa, chamada látex, tendo em sua composição uma suspensão de diversos materiais sólidos, sendo o mais importante deles o polímero da borracha.

O processo para produção da borracha natural é feito através da coagulação do látex extraído da seringueira. Após a coagulação, ela é classificada para efeito de comercialização, e sua qualidade varia de acordo com o grau de impureza contida na sua composição.

A borracha natural apresenta como características principais:

- Grande pegajosidade.
- Melhor processamento.
- Baixa geração de calor.

- Alta resistência à tração.
- Resistência à abrasão.
- Resistência ao crescimento de trincas.

3.1.2 - Borracha Poliisopreno (IR)

É o equivalente sintético da borracha natural e apresenta propriedades muito semelhantes. Porém, alguns aspectos são ligeiramente superiores, como a resistência às intempéries, por possuir composição mais homogênea que a da borracha natural.

3.1.3 - Borracha Nitrílica (NBR)

Possui excelente estabilidade química, resistindo ao ataque de hidrocarbonetos como gasolina, graxas e solventes minerais. Os tipos de NBR são determinados pelo teor de acrilonitrila na sua composição, que pode variar de 15% a 45%. Quanto maior o teor de acrilonitrila, maior a resistência mecânica e a resistência a óleos e solventes, porém menor a elasticidade e a flexibilidade.

Quando misturada ao PVC forma uma blenda que possui resistência às intempéries, sem sacrificar a sua resistência a óleos. Outro método de impedir a degradação da borracha é utilizar a borracha nitrílica hidrogenada, que é menos insaturada, bloqueando mecanismos como o ataque por ozônio, que será discutido em mais detalhes no item sobre aditivos.

3.1.4 – Borracha de Etileno-Propileno (EPDM)

É um tipo particular do grupo de borrachas de etileno-propileno (EPR), adicionadas a um dieno que possibilita a sua vulcanização. Por ser saturado, tem elevada resistência ao ataque de ozônio e oxigênio. Suas características são:

- Auto-vulcanização, resultando em maior economia para a transformação.
- Boa processabilidade, pois permite alta dosagem de cargas e plastificante.
- Resistência às intempéries entre elas o oxigênio, ozônio e luz.

- Capacidade de absorver níveis superiores de carga, sem deterioração de propriedades, quando comparada à maioria das outras borrachas, resultando em formulações de custo mais reduzido.

3.1.5 – Borracha de Estireno-Butadieno (SBR)

É a borracha que possui o preço mais reduzido; substitui a borracha natural em grande parte das suas aplicações. O SBR é um elastômero de alta histerese. Aumentando a quantidade de estireno no copolímero, aumentamos sua dureza e resistência à abrasão.

Suas principais características são:

- Resistência à abrasão.
- Resistência ao calor e a envelhecimento pelo calor.
- Extrudados mais lisos.

3.1.6 - Borracha Butílica (IIR)

Possui impermeabilidade elevada a gases. Por ser insaturado, resiste a ataques químicos de substâncias corrosivas como cetonas e ácidos minerais. A insaturação confere-lhe também boa resistência ao ozônio, porém prejudica sua processabilidade por tornar difícil a quebra do material durante a mistura.

Características principais:

- Resistência ao ozônio
- Resistência a agentes químicos.
- Baixa permeabilidade aos gases.

3.1.7 – Borracha Polibutadieno (BR)

É recomendada para aplicações a baixa temperatura, pois possui a menor Tg dentre os elastômeros mais utilizados. É difícil de ser processada devido à sua baixa recuperação elástica; geralmente é utilizada em blendas com outros elastômeros.

Suas principais propriedades são:

- Resistência à abrasão.
- Menor geração de calor.
- Baixa deformação permanente por compressão.

3.1.8 – Borracha Policloropreno (CR)

O cloro presente em sua fórmula estrutural confere propriedades interessantes como resistência ao calor, à propagação de chamas, boa adesão ao substrato. A marca mais conhecida deste produto é o neoprene.

Propriedades:

- Resistência à chama.
- Resistência às intempéries.
- Grande adesão a tecidos e metais.
- Resistência à abrasão e à trinca por flexão.
- Resistência a álcalis e ácidos.

3.1.9 - Borracha de Silicone (MQ)

Este composto não possui carbono em sua cadeia, mas siloxanos, que lhe conferem propriedades mecânicas em temperaturas extremas. Por possuir um custo muito elevado, é utilizada apenas em casos especiais.

Características:

- Resistência a temperaturas extremas.
- Flexibilidade a baixas temperaturas.
- Resistência a intempéries.
- Baixa deformação permanente.

3.1.10 - Borracha Fluorocarbonada (FKM)

É o elastômero que possui a maior resistência a altas temperaturas; também é resistente a óleos combustíveis, ácidos e solventes. Possui custo elevadíssimo, portanto só é recomendada para situações extremas.

Propriedades principais:

- Retardação de chama.
- Resistência a solventes em temperaturas elevadas.
- Baixa permeabilidade a gases.
- Resistente às intempéries.

3.1.11 - Poliuretano (PU)

Possui excelente resistência à abrasão e ao rasgamento; sua estrutura combina dureza e flexibilidade. Pode ser um poliéster ou um poliéter, sendo o primeiro mais resistente à abrasão e ao calor, e o segundo mais flexível em baixas temperaturas.

Características:

- Resistência à abrasão e ao rasgamento.
- Alta adesão a metais e tecidos.
- Boa resistência a óleos.
- Resistência a tração com alta elongação.

3.2 – Aditivos

Os aditivos têm a função de melhorar as propriedades limitadas do polímero da borracha. Em seguida serão explicados alguns tipos de aditivos e sua função:

3.2.1 - Cargas

As cargas são materiais adicionados à borracha e têm como função:

- 1) reforçar e aumentar sua resistência mecânica;
- 2) expandir e diluir;
- 3) colorir;
- 4) baixar custos;
- 5) modificar características do processamento. ⁰⁸

3.2.1.1 - Cargas Reforçantes

3.2.1.1.1 - Negro de fumo

A principal carga de reforço utilizada é o negro de fumo. Este termo é empregado para identificar uma ampla variedade de materiais de carbono finamente divididos (na forma de pós), produzidos através da decomposição térmica controlada (e incompleta) de hidrocarbonetos, geralmente diesel. É largamente utilizado como agente de reforço para compostos de borracha, pigmentos para indústrias de tintas e de plásticos, protetor contra degradação por U.V. em certos polímeros.

Em borrachas reforçadas, a fração de negro de fumo pode chegar a mais de um quarto do peso total do composto, aumentando significativamente o módulo de elasticidade e a durabilidade de peças de CE.

O negro de fumo protege o material, absorvendo a radiação ultravioleta transformando-a em calor que é dissipado sem causar quase nenhum dano.

De acordo com as propriedades das partículas de negro de fumo (tamanho, estrutura, configuração e natureza química da superfície das partículas), há mudança na capacidade do reforço, veja a tabela 3.1:

Tabela 3.1 – influência das características do negro de fumo nas propriedades do material.

Diminuição do Tamanho de Partícula	
Aumenta: A profundidade da cor, o poder de tingimento e a proteção contra radiação ultravioleta.	Diminui: A facilidade de dispersão
Obs.: Tamanho de partícula (t_p): $t_p > 10\mu\text{m}$ gera concentração de tensões; $1 < t_p < 10\mu\text{m}$ não altera as propriedades do vulcanizado (ex. cal e argilas); $0,1 < t_p < 1\mu\text{m}$ atua como semi-reforço; $0,01 < t_p < 0,1\mu\text{m}$ são partículas de reforço.	
Aumento da estrutura	
Aumenta: A facilidade de dispersão, a condutividade térmica, a demanda de veículo e a viscosidade.	Diminui: A profundidade da cor e o poder de tingimento.
Aumento de porosidade	
Aumenta: A condutividade térmica, a demanda de veículo e viscosidade.	Permite: Menor carga em aplicações condutivas.
Maior funcionalidade da superfície	
Aumenta: A capacidade de umectação pelo veículo	Diminui: A condutividade térmica, a viscosidade dos sistemas líquidos.

3.2.1.1.2 - Sílicas

As cargas normalmente chamadas de sílicas correspondem a partículas micrométricas de areia, que são incorporadas à borracha.

Elas passam por tratamento químico e posterior processamento mecânico para adequação de suas características como carga de reforço. É necessária a utilização de silano que atua como agente de ligação da superfície sílica/borracha.

3.2.1.1.3 - Cargas de Enchimento (Inertes)

São adicionadas à borracha para aumentar peso (gravidade específica), diminuir custos e melhorar textura e acabamento. São comumente empregados: asfalto, grafite, pó de borracha (regenerado), caulim, carbonato de cálcio, celulose e derivados, e amianto.

3.2.2 – Auxiliares de processamento

Correspondem aos componentes que promovem a plastificação por ação física e agem como lubrificantes intermoleculares. Podem ter como efeito, aumento da histerese (geração de calor) da massa.

Suas principais características são:

- Reduzir trabalho mecânico, diminuindo o consumo de energia, reduzindo a geração de calor a evitar queima prematura do composto.
- Facilitar a adição de cargas a ingredientes em pó.
- Fornecer às misturas muito carregadas suficiente plasticidade para uma fácil moldagem.
- Aumentar propriedades adesivas.

Óleos parafínicos, naftalênicos e aromáticos podem ser usados para expandir a borracha e baixar custos sem afetar as propriedades. Como exemplo de produtos comerciais temos: o Hyprene e o MoldPro⁰⁹. Para tanto, deve haver boa compatibilidade entre o óleo e a borracha.

3.2.3 – Agentes reticulantes

Antigamente, os produtos de borracha não tinham muita aplicação, pois suas propriedades mecânicas eram muito baixas. Houve uma revolução da

indústria de artefatos de borracha depois da descoberta da reação de vulcanização pelo método Goodyear.

No início, a reação era catalisada por chumbo, posteriormente foi substituído pelo óxido de zinco. Até o começo do século XX, a reação de vulcanização demorava horas, mas com a descoberta dos aceleradores a reação leva minutos para ocorrer.

A reação de vulcanização ocorre em 3 etapas:

- Indução: os curativos reagem entre si preparando a reação de ligação entre as cadeias.
- Vulcanização: formação de ligações cruzadas.
- Reversão: perda de ligações cruzadas por exposição excessiva ao calor.

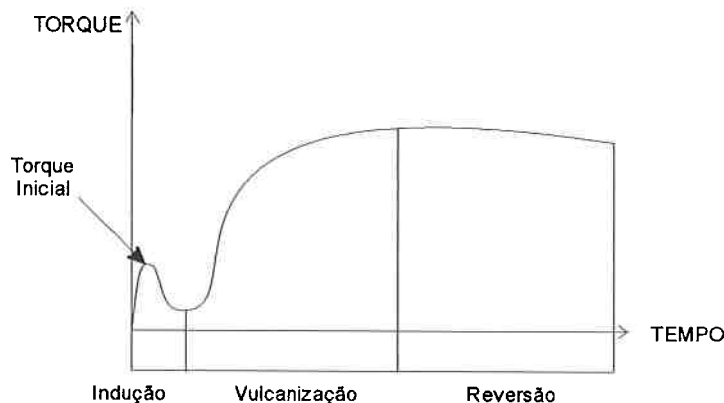


Figura 3.1 – Etapas da reação de vulcanização.

Existem sistemas alternativos de cura por peróxidos que ligam polímeros saturados e insaturados produzindo ligações carbono-carbono termicamente estáveis. Contudo, possuem como desvantagem a baixa resistência à tração e ao cisalhamento, custo elevado e incapacidade de ser utilizado juntamente com alguns antioxidantes.

O mecanismo de reação de vulcanização por peróxidos consiste na decomposição de radicais pelo calor, que seqüestram um hidrogênio do elastômero e geram um radical polimérico que se combina formando ligações cruzadas.

3.2.4 – Aceleradores

Aceleradores são compostos adicionados ao CE, para catalisar a reação de vulcanização. Quanto maior a insaturação do monômero mais fácil a cura. As propriedades mecânicas melhoram se a peça for vulcanizada em temperaturas mais baixas. Existem diversos tipos de aceleradores, cada um com uma velocidade de aceleração:

Tabela 3.2 – Tipos de aceleradores. ¹⁰

Classe	Denominação Usual	Velocidade
Aldeído - aminas	HMT	Lenta
Guanidinas	DPG, DOTG	Média
Tiazóis	MBT, MBTS	Semi – rápida
Sulfenamidas	CBS, MBS	Rápida, ação retardada
Thiurams	TMTD, TETD, TMTM	Muito rápido
Ditiocarbamatos	ZMDC, ZEDC	Super rápido

Quando mais de um tipo de acelerador é utilizado, eles atuam com efeito sinérgico.

A quantidade de ligações cruzadas melhora as propriedades físicas de uma maneira geral. Exceto a resistência mecânica à tração, que alcança um máximo em aproximadamente uma ligação cruzada para cada 150 unidades de monômero.

A quantidade de acelerador em relação ao enxofre influencia no comprimento das ligações cruzadas. Quanto maior a quantidade de acelerador, menor o comprimento da ligação. ⁰⁸

O comprimento das ligações cruzadas também afeta as propriedades físicas. Ligações cruzadas longas, polisulféticas, melhoram a resistência à tração, ao cisalhamento e à fadiga. Por outro lado, ligações cruzadas curtas melhoram a estabilidade térmica e oxidativa e diminuem a deformação permanente. ⁰⁸

O CE, quando submetido ao excesso de calor, pode sofrer uma supervulcanização chamada, pela indústria, de queima ou scorch. Este fenômeno leva à decomposição do material antes de sua fabricação.

A queima do CE está relacionada com a velocidade em que o acelerador é transformado em seu sal. A adição de bases catalisa a formação de sal

diminuindo o intervalo, para que ocorra uma vulcanização prematura chamada de segurança de queima (scorch safety).

Em borrachas que exigem grande quantidade de aceleradores como o EPDM, o acelerador ou o enxofre pode atingir o seu limite de solubilidade ocorrendo o fenômeno de exudação ou afloramento. A solução para esse problema é usar uma mistura de aceleradores ou enxofre insolúvel.

3.2.5 – Ativadores e retardantes de vulcanização

3.2.5.1 - Retardantes

Durante o processamento ou conformação das peças de borracha, devido o atrito mecânico durante o processamento, pode existir a queima prematura por efeito térmico. Os retardantes agem inibindo a queima, ou seja, prolongam o tempo de armazenagem de compostos já acelerados e diminuem a quantidade de refugos ou perdas. Exemplo: ácido benzóico, DOP DLC-A, Elastomag, Satogard PVI.⁰⁹

3.2.5.2 - Ativadores

São substâncias utilizadas para aumentar a velocidade de vulcanização pela ativação do acelerador, fazendo com que o acelerador atue de forma mais eficiente. Os ativadores empregados na vulcanização são geralmente um óxido metálico na proporção de 2 a 5 partes, e um ácido graxo, na proporção de 0,5 a 3 partes.

A combinação do óxido de zinco e ácido esteárico é o sistema mais utilizado; porém, outros óxidos e ácidos podem ser empregados tais, como: o litargírio, óxido de chumbo, óxido de magnésio, e os ácidos oléico, láurico, palmítico, dentre outros.

No sistema onde o óxido de zinco é utilizado como ativador de cura juntamente com o ácido esteárico. O primeiro deve ser utilizado logo após a adição do ácido esteárico, pois no processo inverso sua incorporação é mais lenta.

Para evitar o retardamento da cura quando são utilizadas cargas minerais ácidas, é recomendável a utilização de ativadores específicos, como a utilização de glicóis ou receptores ácidos. Tais materiais são a trietanolamina, dietileno glicol, polietileno glicol dentre outros.

O mecanismo da reação é representado abaixo:



3.2.6 – Antidegradantes

Antidegradantes são compostos adicionados à borracha para retardar sua deterioração. Fatores como a luminosidade, temperatura, e a presença dos gases ozônio e oxigênio, aceleram a degradação dos CEs. Os principais tipos de antidegradantes são os antioxidantes e os antiozonantes:

3.2.6.1 – Antioxidantes

A oxidação é uma típica reação em cadeia que possui as seguintes etapas:

- Iniciação: $R-R \rightarrow 2R\bullet$
- Propagação: $R\bullet + O_2 \rightarrow ROO\bullet$ Passo 1: Formação de radicais peróxi.
- $R-H + ROO\bullet \rightarrow R\bullet + ROOH$ Passo 2: Subtração de H.
- $ROOH \rightarrow RO\bullet + HO\bullet$ Passo 3: Decomposição do hidroperóxido.

A reação inicia-se pela quebra de cadeias por causa de solicitações mecânicas durante a fabricação ou utilização do material. Para a maioria das borrachas, os radicais formados durante a reação combinam-se, formando mais ligações cruzadas, causando o endurecimento do CE, provocando fragilização. A exceção é a borracha natural, cujas ligações cruzadas desses radicais são contraídas por causa do volume do grupo lateral metila.

Aditivos antioxidantes são compostos que seqüestram os radicais livres antes que ocorra a reação do passo 1, são chamados de antioxidantes primários. Outros compostos eliminam os hidroperóxidos formados no passo 3, estes são chamados antioxidantes secundários. O uso dos dois, primário e secundário, tem um efeito sinérgico. Como exemplo de antioxidantes temos: Vanox, Stangard PC, Renogran MBI-80.⁰⁹

3.2.6.2 - Antiozonantes

A degradação por ozônio ocorre apenas quando o CE está sujeito à tensão de tração. Essa reação age pela quebra de ligações duplas. As borrachas que mais sofrem são as mais saturadas como NR, SBR, BR e NBR; compostos de IIR e CR têm degradação moderada; e borrachas de EPDM sofrem pouco com esse fenômeno.

As formas de prevenir esta reação são:

- Recobrimento superficial.
- Adição de antiozonante químico na formulação.
- Alívio de tensões internas pela adição de polímeros resistentes ao ozônio.

Certos tipos de ceras formam uma camada protetora superficial no CE, porém ela se rompe quando submetida à flexão; portanto, este tipo de proteção não é indicado para aplicações dinâmicas.

Os antiozonantes químicos criam uma barreira de produto atacado, preservando a borracha intacta, mas eles podem provocar manchas em borrachas mais claras, que não tenham a adição de negro de fumo. Quando eles não podem ser usados, uma blenda com aproximadamente 30 partes de polímero resistente a ozônio é utilizada. Ela atua aliviando as tensões na ponta da trinca.

Pneus usam uma combinação de ceras com antiozonantes químicos, pois ficam muito tempo sob tensões estáticas, quando o carro fica parado, e dinâmicas, quando o carro está em movimento. Por exemplo de antiozonante temos: Santoflex 134, PolyBound 310 NBC 90, Flexzone 11L, Recco Sun Cheking Wax.⁰⁹

3.2.7 – Agentes de pegajosidade

A pegajosidade é a propriedade de um material colar rapidamente a uma superfície, sob leve pressão de contato. Esta propriedade é interessante quando a adesão é uma propriedade necessária. As substâncias mais utilizadas são resinas e parafinas naturais, derivados de coque e de petróleo (cumarona), óleos alifáticos leves e resinas fenólicas (fenol-formaldeído). Como por exemplo: Tartac, Polyfin, Drimix.⁰⁹

3.2.8 – Agentes de expansão

São produtos adicionados às composições de borracha, liberam gases quando submetidos a temperatura de vulcanização, sendo utilizados para se obter artigos de borracha expandidos ou esponjosos.

Artigos expandidos são obtidos completando-se inicialmente o volume do molde e o material cresce sob pressão, apresentando estrutura microporosa e baixa absorção de água.

Artigos esponjosos são aqueles que durante o processo, são obtidos com baixa pressão na cavidade do molde, isto é, o molde é carregado com volume de material inferior ao volume final da peça, pois o material irá crescer até completar o artigo. Neste caso a peça final apresenta poros abertos, deste modo possui alta absorção de água.

Basicamente os esponjantes dividem-se em orgânicos e inorgânicos. Os esponjantes orgânicos apresentam a vantagem de possuírem uma maior segurança de trabalho e uma estrutura de poros mais uniforme. Para se obter artigos microporosos ou expandidos, utilizam-se os agentes de base orgânica, principalmente os que geram N_2 , que é menos permeável que o CO_2 .

Os esponjantes inorgânicos são mais utilizados para artigos de células abertas (guarnições), pois neste produto o composto não é submetido à pressão, sendo assim, mais efetivo e econômico. Exemplo: Blo-Foam, Celogen, Expancel, Unicell, Kempore.⁰⁹

4- Falha

As causas de falhas mais comuns em anéis o-ring sua origem e possíveis correções são:⁰³

- **Extrusão e mordedura:** é um padrão típico de sistemas de alta pressão. É identificado pela presença de grande quantidade de pequenas mordeduras no lado de menor pressão do o-ring. Origem: folga, pressão excessiva no sistema, material muito mole, degradação do material pelo fluido do sistema, espaços irregulares devido à excentricidade, presença de cantos vivos, o-ring muito grande para a cavidade. Soluções: Diminuir as folgas, usar anéis de reforço para prevenir a extrusão, empregar anéis duros, revisar a

compatibilidade do elastômero, aumentar a concentricidade, eliminar arestas afiadas, ou instalar um o-ring de tamanho apropriado.

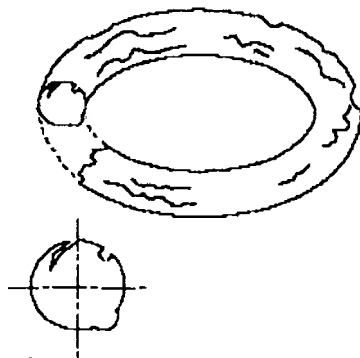


Figura 4.1 – Falha por extrusão e mordedura

- **Falha em espiral:** encontrada em pistões. A superfície do o-ring apresenta uma série de cortes profundos e espiralados a 45 graus. Origem: quando o o-ring se prende a um componente excêntrico ou à parede do cilindro, causando torção de partes do anel. Solução: verificar a existência de cavidades cilíndricas, diminuição no intervalo de folga, melhorar o acabamento superficial, aumentar a lubrificação, usar anéis auto-lubrificantes, empregar anéis de reforço, ou em casos severos, um selo T.

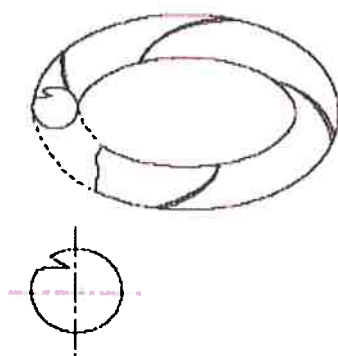


Figura 4.2 – Falha em espiral

- **Abrasão:** ocorre geralmente em vedações dinâmicas. Esse tipo de falha pode ser identificado pela presença de uma superfície achatada de um lado da seção transversal do o-ring ou linhas de desgaste na seção transversal paralela ao movimento. Origem: acabamento superficial, falta de lubrificação, temperaturas excessivas ou contaminação do sistema por abrasivos. Solução: utilizar acabamento superficial adequado, fornecer a lubrificação adequada,

verificar a compatibilidade do material com as temperaturas de serviço, eliminar contaminação por abrasivos, com filtros.

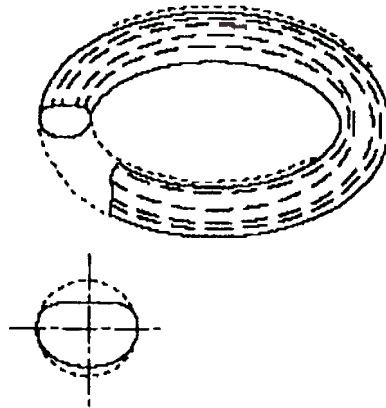


Figura 4.3 – Falha por abrasão

○ **Deformação permanente:** comum aos dois tipos de vedação: estática e dinâmica. A falha por deformação permanente achata os lados da seção transversal do O-ring que estão sujeitos à compressão. Origem: seleção de um CE com alta deformação permanente, pressão excessiva, aquecimento por atrito, vulcanização inadequada do material, temperatura do sistema muito elevada, inchamento do material pelo fluido. Correção: mudar a especificação do material, rever a compatibilidade com o fluido, diminuir a força de compressão.

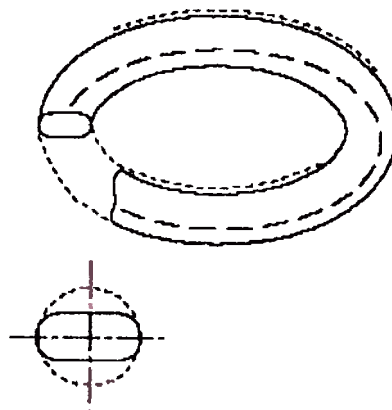


Figura 4.4 – Falha por deformação permanente

○ **Trincamento por ozônio:** Ocorre em vedações estáticas e dinâmicas que estão em contato com o ozônio e outros poluentes atmosféricos. Esse tipo de falha é caracterizado pelo aparecimento de várias pequenas

trincas perpendiculares à direção de tensão. Origem: ataque do ozônio às ligações duplas de algumas cadeias poliméricas. Solução: adição de anti-ozonante.

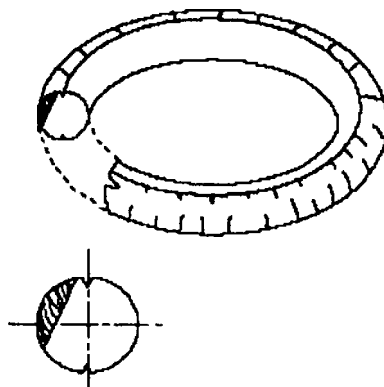


Figura 4.5 – Trincas de ozônio

○ **Endurecimento por calor e oxidação:** a superfície do anel apresenta rachaduras e cavidades em sua superfície, geralmente acompanhadas de grande deformação permanente. Origem: excesso de temperatura causando o endurecimento do CE, evaporação do plastificante e fratura por oxidação. Solução: Reduzir a temperatura de operação ou modificar o material utilizado.

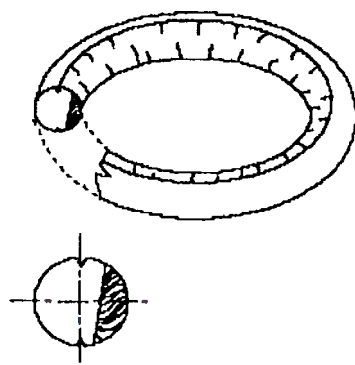


Figura 4.6 – Endurecimento por oxidação.

- **Extração do plastificante:** ocorre em sistemas de vedação de combustível. É caracterizada por pequenas trincas e perda de volume do material. Origem: extração do plastificante por fluidos ou por componentes químicos do sistema. Solução: Empregar um material compatível.

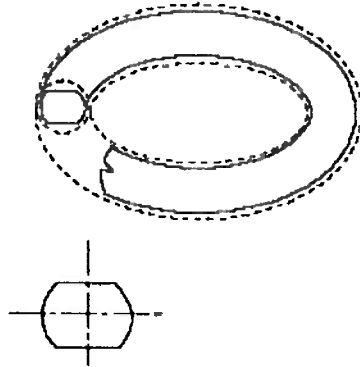


Figura 4.7 – Falha por extração do plastificante.

- **Danos durante a instalação:** Caracterizado por pequenos cortes e rachaduras na superfície externa do anel. Origem: Contato com cantos vivos durante a colocação ou operação, superdimensionamento ou subdimensionamento do anel, torção do anel durante a instalação ou falta de lubrificação. Solução: retirada de superfícies cortantes em contato com o material, proteção contra partes afiadas durante a instalação, instalação de anéis de tamanhos adequados e utilização de lubrificante durante a instalação.

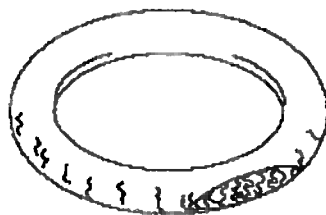


Figura 4.8 – Falha por instalação imprópria.

- **Descompressão explosiva:** caracterizada por rupturas no interior da seção transversal do anel. A superfície do anel pode estar coberta de pequenas trincas. Origem: absorção de gás pelo material em sistemas de alta pressão e um decréscimo repentino na pressão, causando fissuras, dentro da seção do anel, por causa do gás à procura de um caminho de saída. Solução: aumentar o tempo de descompressão, aumentar a dureza do

material, diminuir a seção transversal do anel ou especificar materiais especiais resistentes à descompressão.

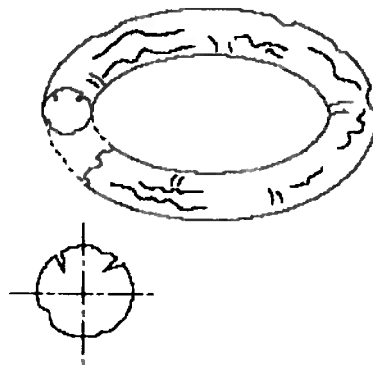


Figura 4.9 – Falha por descompressão explosiva.

Resumindo, as propriedades do anel o-ring dependem da escolha do elastômero adequado às condições de trabalho, e aditivos que conferem ao material as características que tornem sua aplicação viável e rentável.

O desempenho do anel depende de sua aplicação: a resistência à fluência tem maior importância em aplicações estáticas e suportar a variação de forças, em aplicações dinâmicas; procurando sempre observar as condições de uso, como lubrificação adequada, temperatura e a existência de cantos vivos que possam danificar a borracha.

Em seguida será discutido o modelamento dos anéis pelo método dos elementos finitos, este método consiste na divisão de uma peça em um sistema de pequenos corpos ou unidades (elementos finitos), interconectados em pontos comuns a dois ou mais elementos (nós), e/ou linhas de contorno e/ou superfícies.

Com este método, ao invés de solucionar o problema para o corpo todo em uma única operação, formulam-se equações de cada elemento finito que combinadas obtêm a solução para todo o corpo. Existem dois métodos de solução:

O método das forças (ou de flexibilidade) emprega as forças internas como incógnitas do problema. Inicialmente, definem-se as equações de equilíbrio e, em seguida, as equações associadas às condições de contorno. O resultado é um conjunto de equações que permitem resolver as forças incógnitas.

O segundo é conhecido como método do deslocamento (ou de rigidez), ele emprega o deslocamento dos nós como incógnita do problema. As condições de compatibilidade entre os nós estabelecem sua conectividade antes da aplicação da carga. Através dos deslocamentos dos nós, temos a deformação associada e as correspondentes tensões através de lei constitutiva (entre tensão e deformação).

Para efeitos computacionais mostrou-se que o método dos deslocamentos é mais versátil e simples para a maioria dos problemas de análise estrutural, acrescentando que a maioria dos programas comercialmente disponíveis empregam o método do deslocamento.¹¹

5- Objetivos

Simular o comportamento de anéis o-ring através do método dos elementos finitos.

Fabricar corpos de prova e anéis de compostos elastoméricos, e caracterizar as propriedades físicas do material.

Modelar os corpos de prova, para obter os parâmetros necessários à realização do modelamento do anel.

Comparar os resultados do modelo com os testes realizados no anel real.

6- Materiais e Métodos

Para o ensaio de caracterização dinâmica utilizaram-se três corpos de prova de compostos elastoméricos diferentes. Um de borracha natural, um de fluorelastômero e um de poliuretano.



Figura 6.1. – Corpos de prova da esquerda para a direita: NR, FKM, PU.

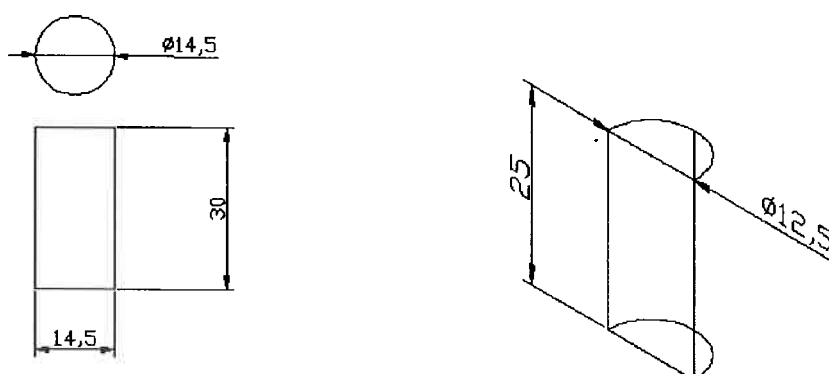


Figura 6.2 – Desenho técnico das medidas dos corpos de prova: NR, FKM à esquerda e PU à direita.

Os compostos elastoméricos utilizados têm composições padrão, amplamente utilizada pela indústria e foram cedidos pela empresa Retec Vedações Técnicas LTDA, sua composição básica é apresentada nas tabelas 6.1, 6.2 e 6.3. Os compostos foram caracterizados em ensaios cujos resultados estão apresentados no Anexo 2. A dureza foi medida por um durômetro manual de escala Shore A, como pode ser observado na Figura 6.3.



Figura 6.3 – Medida de dureza com durômetro Shore A.

Tabela 6.1 – Composição da amostra NR.

Composto NR – Borracha Natural - 80 shore A		
Componente	PHR	%
Elastômero	100	49
Auxiliar de processamento	2	1,0
Ativadores: ZnO	5	2,5
Estearina	2	1,0
Antioxidante	1	0,5
Agente de vulcanização		
Enxofre	2,75	1,3
Aceleradores		
Primário	1	0,5
Secundário	0,1	0,05
Negro de fumo	90	44,15
TOTAL	203,85	100

Tabela 6.2 – Composição da amostra FKM.

Composto FKM –Fluorelastômero – 80 shore A		
Componente	PHR	%
Elastômero	100	69,4
Negro de fumo	15	10,4
Hidróxido de cálcio	6	4,2
Óxido de Magnésio	3	2,1
Sulfato de Bário	20	13,9
TOTAL	144	100

Tabela 6.3 – Composição da amostra PU.

Composto PU – Poliuretano – 86 shore A		
Componente	PHR	%
Poliuretano Líquido	100	86
Moca (4,4'-metileno-bis-orto-cloroanilina)	16	14
TOTAL	116	100

Levantou-se a curva reológica dos compostos relacionados acima em um reômetro de placas paralelas do fabricante TEAM modelo TE-100, para determinar o tempo e a velocidade de vulcanização, os resultados estão relacionados no Anexo 2.

Os corpos de prova foram testados em ensaios dinâmicos à frequência de 1 hz, em máquina de ensaios universal marca MTS modelo 810, cuja brochura está no Anexo 5. Os resultados deste ensaio encontram-se no Anexo 2.

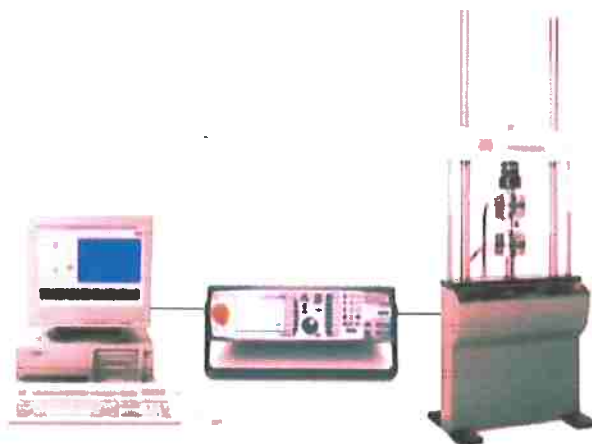


Figura 6.4 – Máquina universal de ensaios MTS 810 utilizada na caracterização das peças.

Além dos corpos de prova, também foram produzidos anéis o-ring com estas composições. Estes anéis são utilizados na vedação de sistemas hidráulicos de caminhões.

Para garantir a reprodutibilidade dos resultados, os anéis foram fabricados por prensagem em molde metálico com material do mesmo lote, e prensados simultaneamente, para assegurar que ambos tenham as mesmas condições de tempo e temperatura de vulcanização. Fabricou-se o corpo de prova de poliuretano por derramamento, o anel de poliuretano não foi fabricado por falta de tempo.

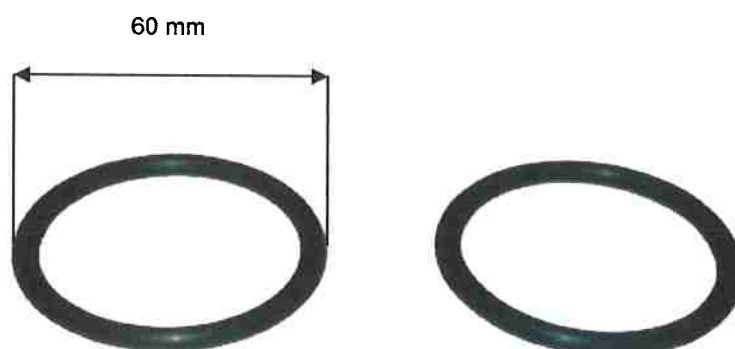


Figura 6.5 – Anéis o-ring de NR e FKM.

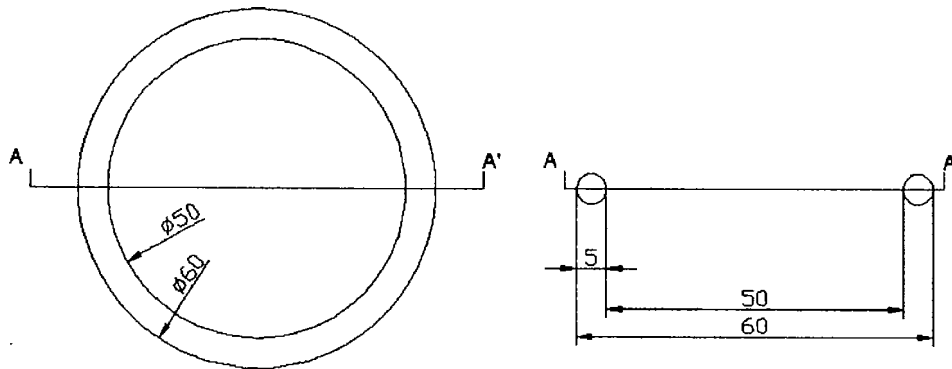


Figura 6.6 – Desenho técnico do anel o-ring.

Para a simulação, utilizaram-se os programas Autocad® da Autodesk® versão 2005, onde desenhou-se tridimensionalmente as peças. Os programas Cosmos DesignStar 4.5 ® e GeoStar 256K ® da empresa Solid Works®, que fazem o modelamento pelo método dos elementos finitos também foram usados.

7- Resultados

Com os resultados dos ensaios dinâmicos (Anexo 2), obteve-se uma curva de tensão x deformação para os corpos de prova e uma para os anéis. Com estes dados modelou-se o corpo de prova. Encontrou-se uma curva padrão no programa de simulação para ajustar os resultados do programa aos resultados reais.

7.1. - Corpos de prova

O exemplo a seguir mostra um dos programas de simulação do corpo de prova para o Cosmos e comenta as funções utilizadas.

```

C*
C* COSMOSM GeoStar 2.9 (256K Version)
C* Problem : comp_cp_nr2      Date : 10-06-2005 Time : 18:35:20
C*
C* MUDA A VISÃO
VIEW,0,0,1,0,
C* CRIA UMA SUPERFÍCIE COM A GEOMETRIA DA PEÇA
PT,1,0,0,0,
PT,2,7.25,0,0,
PT,3,7.25,30,0,
PT,4,0,30,0,
SF4PT,1,1,2,3,4,0

```

```

C* DEFINE AS PROPRIEDAS DO MATERIAL
C* A OPÇÃO 4 SIGNIFICA QUE ENTRAREMOS COM A CURVA
TENSÃOXDEFORMAÇÃO
EGROUP,1,PLANE2D,0,0,1,0,4,2,0,0
C* NUXY É O COEFICIENTE DE POISSON E EX É O MÓDULO DE ELASTICIDADE
MPROP,1,NUXY,.499,EX,1
C* DEFINE O TIPO DE GEOMETRIA NESTE CASO AXISIMÉTRICA
RCONST,1,1,1,2,0,0
C* CRIA A MALHA
M_SF,1,1,1,4,8,8,1,1
C* ENTRADA DA CURVA TENSÃOXDEFORMAÇÃO
MPCTYP,1,1
MPC,1,0,1,-0.20,-45,-0.15,-35
MPC,1,0,3,-0.10,-20
MPC,1,0,4,-0.05,-6
MPC,1,0,5,0,0
MPC,1,0,6,0.05,6
MPC,1,0,7,0.10,20
MPC,1,0,8,0.15,35
MPC,1,0,9,0.20,45
C* DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DO PROGRAMA
TIMES,0,1,.1
CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,1
C* UNE DOIS NÓS COINCIDENTES
NMERGE,1,80,1,.1,0,0,0
NCOMPRESS,1,75
C* CRIA UM ENGASTAMENTO
DCR,1,UY,0,1,1,
C* DEFINE O DESLOCAMENTO MÁXIMO
DND,73,UY,-5.88,81,1,

```

A imagem mostra o resultado gráfico de deslocamentos criado pelo programa, a escala de cor define o deslocamento de cada nó da malha.

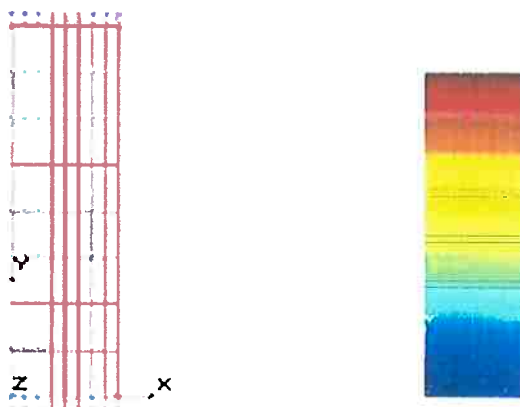


Figura 7.1 – Resultado do GeoStar da simulação do ensaio de compressão no corpo de prova NR sem deformação à esquerda e deformado à direita.

Este ensaio também foi realizado no programa Cosmos DesignStar com a curva de propriedades do material que foi extraída.

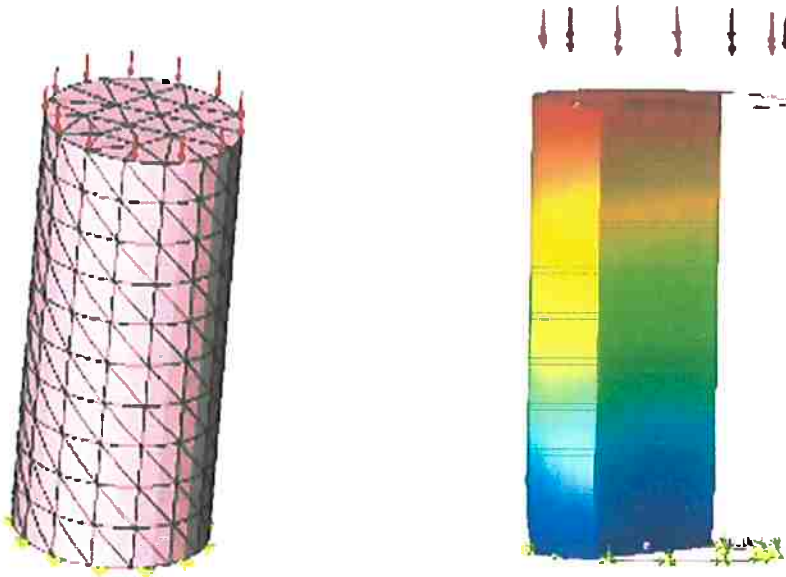


Figura 7.2 – Resultado do DesignStar da simulação do ensaio de compressão no corpo de prova NR antes e depois da aplicação da carga.

Os gráficos 01, 02, 03 mostram a comparação das curvas tensão x deformação para os três corpos de prova ensaiados em compressão.

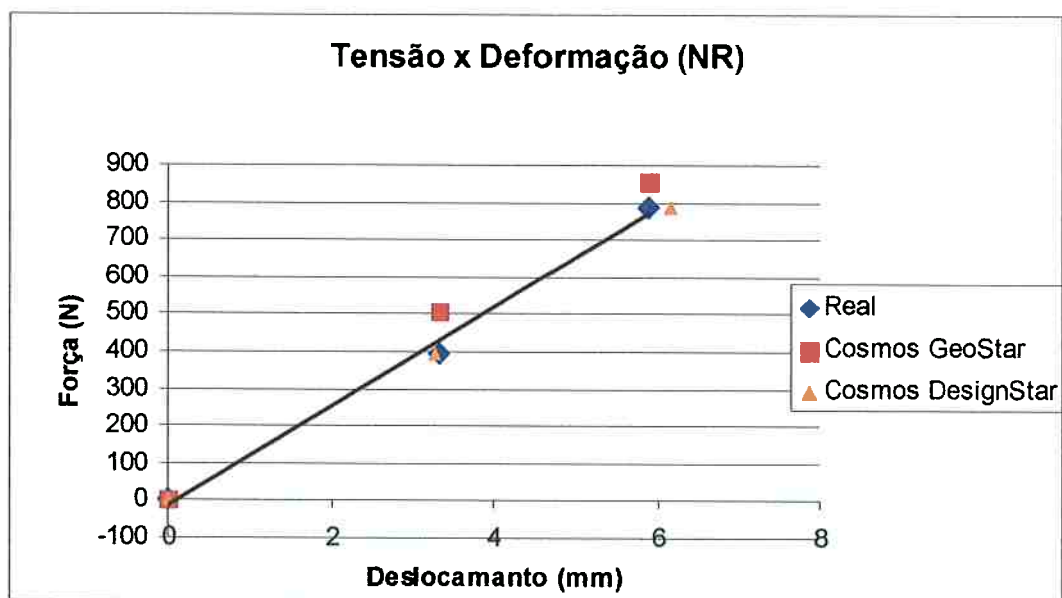


Figura 7.3 – Comparação entre o ensaio de compressão real e simulado de um corpo de prova NR.

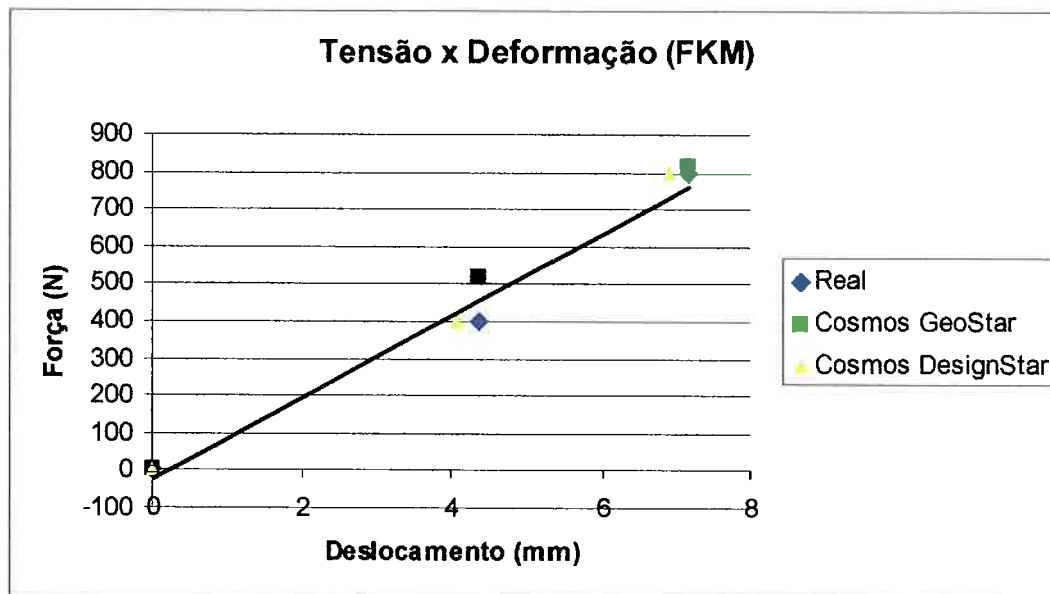


Figura 7.4 – Comparação entre o ensaio de compressão real e simulado de um corpo de FKM.

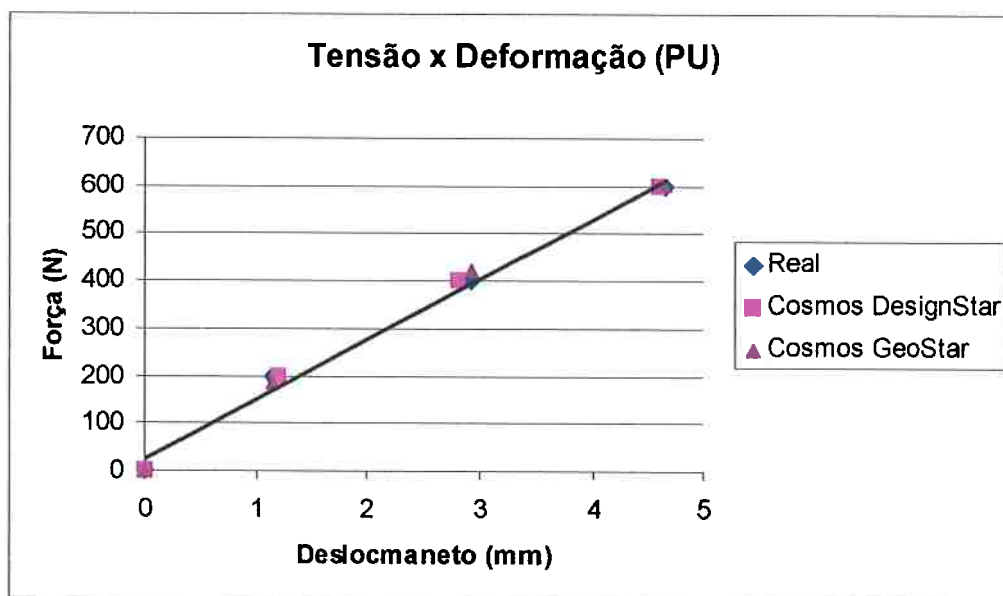


Figura 7.5 – Comparação entre o ensaio de compressão real e simulado de um corpo de prova PU.

Com estes resultados foram obtidos os padrões do material para o programa de simulação que irá modelar o anel.

7.2. - Anel

Com a curva de propriedades realizou-se a primeira tentativa de modelar o anel no programa Cosmos GeoStar. Ele permite criar uma superfície circular que é comprimida entre duas placas controlando a existência de atrito entre o anel e as placas. O código para o programa do anel sem atrito é:

```

C*
C* COSMOSM GeoStar 2.9 (256K Version)
C* Problem : comp_anel_nr      Date : 10-12-2005 Time : 12:25:15
C*
C* FILE,"D:\ARQUIVOS PESSOAIS\Gustavo\POL\ITF\Disquete\Ns80a.geo",1,1,&
C* 1,1
TITLE, NS80a: Rubber O-Ring Squeezed between Two Steel Plates
VIEW,0,0,1,0
PLANE,Z,0,1
C* ESTE COMANDO DEFINE CONSTANTES QUE DEVEM SER MUDADAS PARA
CADA PEÇA
C* X1 É O RAIOS DA SEÇÃO TRANSVERSAL
PARASSIGN,X1,REAL,2.5
PARASSIGN,X2,REAL,0
C* X3 E X4 DEFINEM O TAMANHO DA PLACA E DA GUIA
PARASSIGN,X3,REAL,15
PARASSIGN,X4,REAL,15
C* X5 É A DISTÂNCIA DO CENTRO DO ANEL AO CENTRO DA SEÇÃO
TRANSVERSAL
PARASSIGN,X5,REAL,55
PARASSIGN,X6,REAL,5*X1
PARASSIGN,N1,INT,5
PARASSIGN,N2,INT,11
PARASSIGN,N3,INT,5
PARASSIGN,P,REAL,1
PARASSIGN,K,REAL,1
PARASSIGN,E1,REAL,80
PARASSIGN,E2,REAL,20
PARASSIGN,X7,REAL,15
C*PRIMEIRAMENTE CRIA-SE UM ARCO DE CÍRCULO
PT,1,X1+X5,0,0
PT,2,2*X1+X5,0,0
CRPCIRCLE,1,1,2,X1,X7,1
SFPTCR,1,1,1,0
C*DEFINE-SE AS PROPRIEDADES DO MATERIAL
EGROUP,1,PLANE2D,0,2,1,0,4,2,0,0
MPROP,1,EX,10
MPROP,1,NUXY,0.49
MPCTYP,1,1
MPC,1,0,1,-0.20,-45,-0.15,-35
MPC,1,0,3,-0.10,-20
MPC,1,0,4,-0.05,-6
MPC,1,0,5,0,0
MPC,1,0,6,0.05,6
MPC,1,0,7,0.10,20
MPC,1,0,8,0.15,35
MPC,1,0,9,0.20,45
C*CRIA-SE A MALHA

```

M_SF,1,1,1,8,1,N1,1,2

ACTDMESH,SF,1

C*O ARCO É GIRADO CRIANDO METADE DE UM ANEL

SFGEN,11,1,1,1,1,0,0,X7

NMERGE,1,336,1,0.0001,0,1,0

ACTSET,CS,0

C*CRIA A PLACA QUE FARÁ A COMPRESSÃO

PT,15,0,X1+X2,0

PT,16,X1+X5+X6,X1+X2,0

PT,17,X1+X5+X6,X1+X2+X3,0

PT,18,0,X1+X2+X3,0

SF4PT,13,15,16,17,18,0

C* DEFINE AS PROPRIEDADES DA PLACA DE COMPRESSÃO

EGROUP,2,PLANE2D,0,2,1,0,0,2,0,0

MPROP,2,EX,30E6

ACTKEEP,PT,1

SFDEL,13,13,1

SF4PT,13,15,16,17,18,0

M_SF,13,13,1,8,5,1,1,1

C* CRIA A GUIA DA PLACA

PT,19,0,X1+X2+X3+X4,0

PT,20,X1+X5+X6,X1+X2+X3+X4,0

CRLINE,31,18,19

CRLINE,32,17,20

C* DEFINE AS PROPRIEDADES DA GUIA

EGROUP,3,TRUSS2D,0,0,0,0,0,1,0,0

MPROP,3,EX,K

RCONST,3,1,1,4,1,0,0,0

M_CR,31,32,1,2,1,1

NMERGE,315,346,1,0.0001,0,1,0

C* DEFINE OS ENGASTAMENTOS DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO

DPT,19,AU,0,20,1,

DCR,29,UX,0,29,1,

DCR,3,UY,0,25,22,

C*ESTE BLOCO DEFINE UMA RELAÇÃO ENTRE OS PONTOS DO ANEL E DA

PLACA

EGROUP,4,GAP,1,2,0,1,3,0,0,0

C*DEFINE AS CONDIÇÕES DE ATRITO NA INTERFACE

RCONST,4,2,1,2,0,.01

EL,68,PT,0,1,3,0,0,0,0,0,0

EL,69,PT,0,1,73,0,0,0,0,0,0

EL,70,PT,0,1,30,0,0,0,0,0,0

EL,71,PT,0,1,74,0,0,0,0,0,0

EL,72,PT,0,1,31,0,0,0,0,0,0

EL,73,PT,0,1,75,0,0,0,0,0,0

EL,74,PT,0,1,32,0,0,0,0,0,0

EL,75,PT,0,1,76,0,0,0,0,0,0

EL,76,PT,0,1,33,0,0,0,0,0,0

EL,77,PT,0,1,33,0,0,0,0,0,0

EL,78,PT,0,1,77,0,0,0,0,0,0

EL,79,PT,0,1,34,0,0,0,0,0,0

EL,80,PT,0,1,78,0,0,0,0,0,0

EL,81,PT,0,1,35,0,0,0,0,0,0

EL,82,PT,0,1,79,0,0,0,0,0,0

EL,83,PT,0,1,36,0,0,0,0,0,0

EL,84,PT,0,1,80,0,0,0,0,0,0

EL,85,PT,0,1,37,0,0,0,0,0,0

EL,86,PT,0,1,81,0,0,0,0,0,0

EL,87,PT,0,1,38,0,0,0,0,0,0

EL,88,PT,0,1,82,0,0,0,0,0,0

```

EL,89,PT,0,1,39,0,0,0,0,0,0
NL_GS,1,323,321,322,0
NL_GS,2,325,323,324,0
NL_GS,3,321,319,320,0
EDEL,76,76,1
C*DEFINE OS RESULTADOS QUE SERÃO EXIBIDOS NO ARQUIVO DE SAÍDA
PRINT_NDSET,1,323,323
PRINT_ELSET,1,26,26
PRINT_NDSET,1,34,34
NL_NRESP,1,34,0
NL_PLOT,1,12,1,0
C*DEFINE OS PARÂMETROS DE EXECUÇÃO
CURDEF,TIME,1,1,0,0,6.,-0.01735
ACTSET,TC,1
C*APLICA UMA PRESSÃO UNIFORME NA PLACA
PCR,28,1,28,1,1,4
C*DEFINE AS CONFIGURAÇÕES DO MODO NÃO LINEAR
A_NONLINEAR,S,1,1,50,0.001,0,N,0,0,1e+010,0.001,0.01,0,1,0,0
NL_CONTROL,1,1,323,UY
TIMES,0,6,.5
C*VERIFICA SE HÁ ERROS
R_CHECK
C*EXECUTA O PROGRAMA
R_NONLINEAR

```

No programa com atrito, apenas a parte onde são definidas as relações entre a placa e o anel são alterados:

```

RCONST,4,2,1,2,0.01
EL,68,PT,0,1,3,0,0,0,0,0,0
EL,69,PT,0,1,73,0,0,0,0,0,0
EL,70,PT,0,1,30,0,0,0,0,0,0
EL,71,PT,0,1,74,0,0,0,0,0,0
EL,72,PT,0,1,31,0,0,0,0,0,0
EL,73,PT,0,1,75,0,0,0,0,0,0
EL,74,PT,0,1,32,0,0,0,0,0,0
EL,75,PT,0,1,76,0,0,0,0,0,0
EL,76,PT,0,1,33,0,0,0,0,0,0
EL,77,PT,0,1,33,0,0,0,0,0,0
EL,78,PT,0,1,77,0,0,0,0,0,0
EL,79,PT,0,1,34,0,0,0,0,0,0
EL,80,PT,0,1,78,0,0,0,0,0,0
EL,81,PT,0,1,35,0,0,0,0,0,0
EL,82,PT,0,1,79,0,0,0,0,0,0
EL,83,PT,0,1,36,0,0,0,0,0,0
EL,84,PT,0,1,80,0,0,0,0,0,0
EL,85,PT,0,1,37,0,0,0,0,0,0
EL,86,PT,0,1,81,0,0,0,0,0,0
EL,87,PT,0,1,38,0,0,0,0,0,0
EL,88,PT,0,1,82,0,0,0,0,0,0
EL,89,PT,0,1,39,0,0,0,0,0,0
C* Undefined Node 1
C* Undefined Node 1
C* Undefined Node 1

```

As figuras 7.7 e 7.8 mostram os resultados dos programas com e sem atrito entre o anel e a placa metálica.

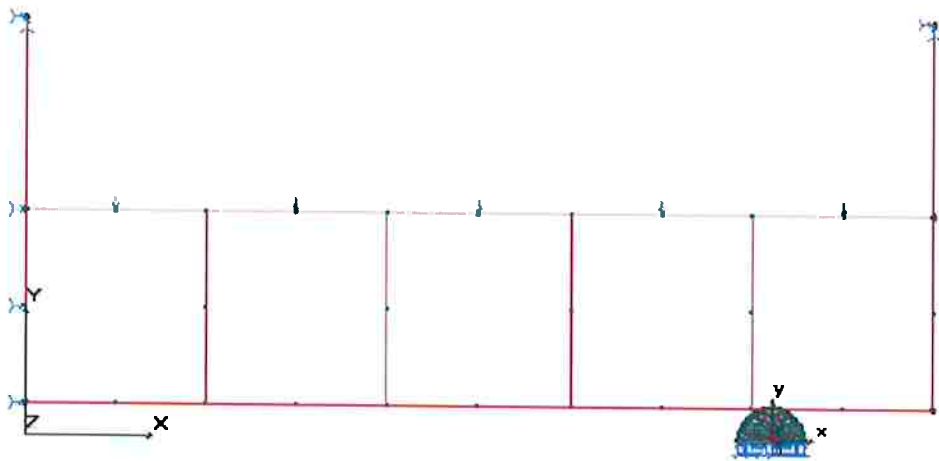


Figura 7.6 – Anel e placa no programa Cosmos GeoStar antes de fazer a simulação.

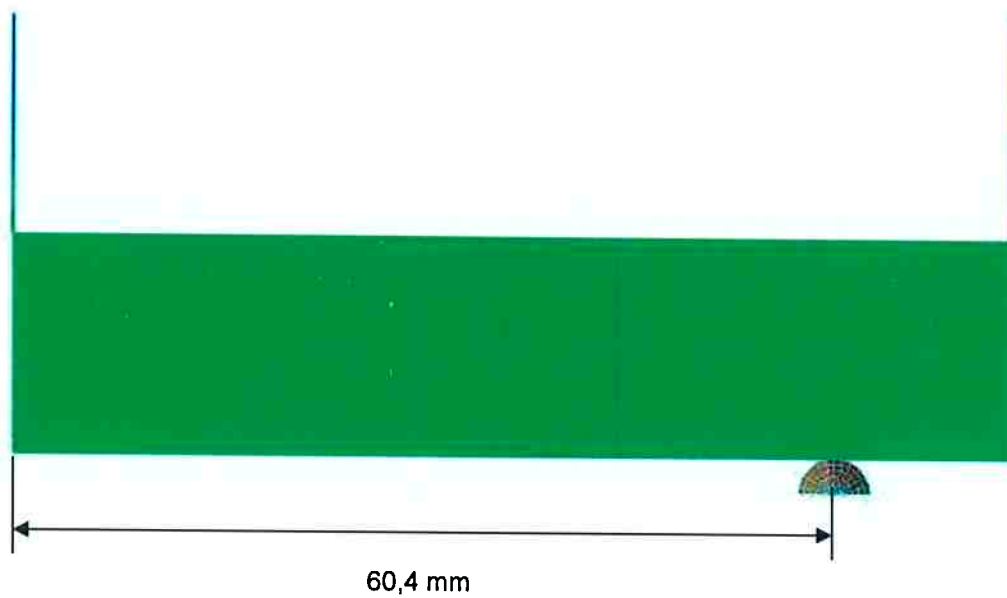


Figura 7.7 – Simulação da compressão sem atrito do anel.

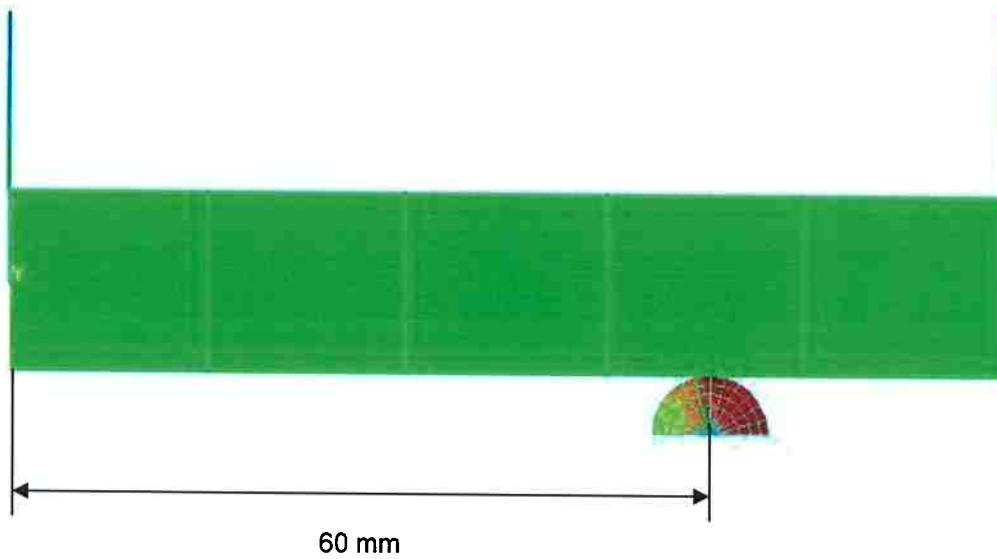


Figura 7.8 – Simulação da compressão atrito do anel.

Na etapa seguinte criou-se o modelo do anel no DesignStar, cujos dados de entrada estão no Anexo 4 deste trabalho. Como o anel de seção circular não possui uma face para que seja aplicada a força; houve erros durante a execução do programa, pois havia uma divergência na força. Várias tentativas foram feitas, até obter um resultado satisfatório com um anel de 40 lados.

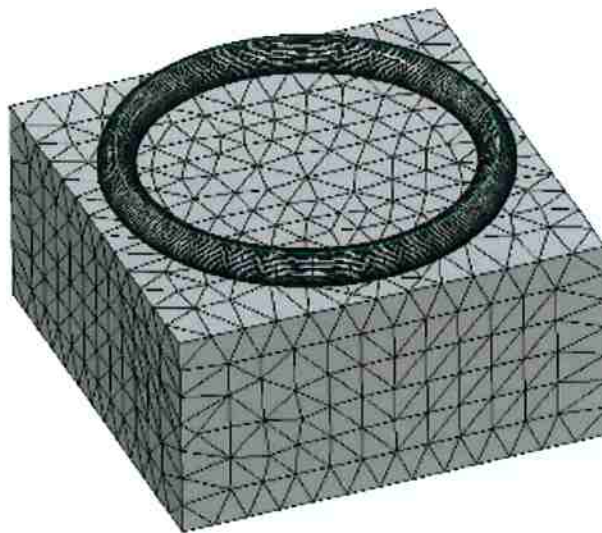


Figura 7.9 – Anel e placa antes da simulação do programa Cosmos DesignStar.



Figura 7.10 – Resultado da tensão de Von Mises no anel em compressão contra a placa.

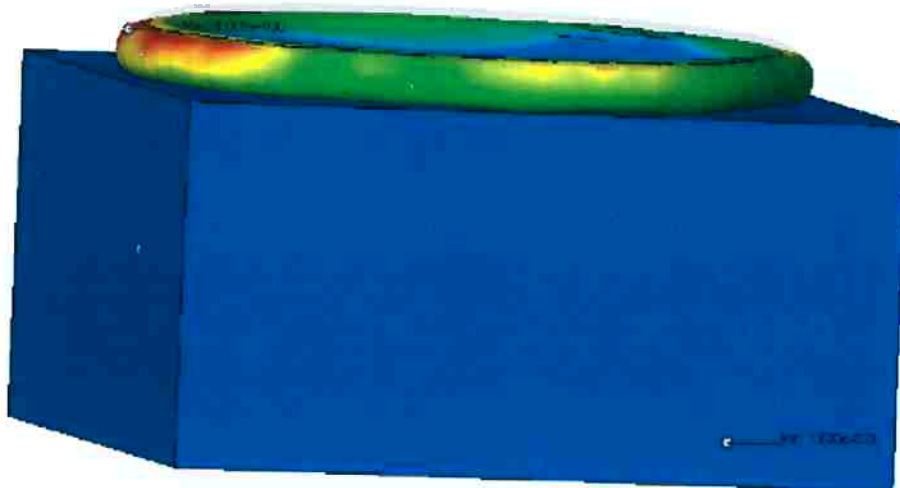


Figura 7.11 – Resultado da deformação para a simulação não linear de compressão do anel.

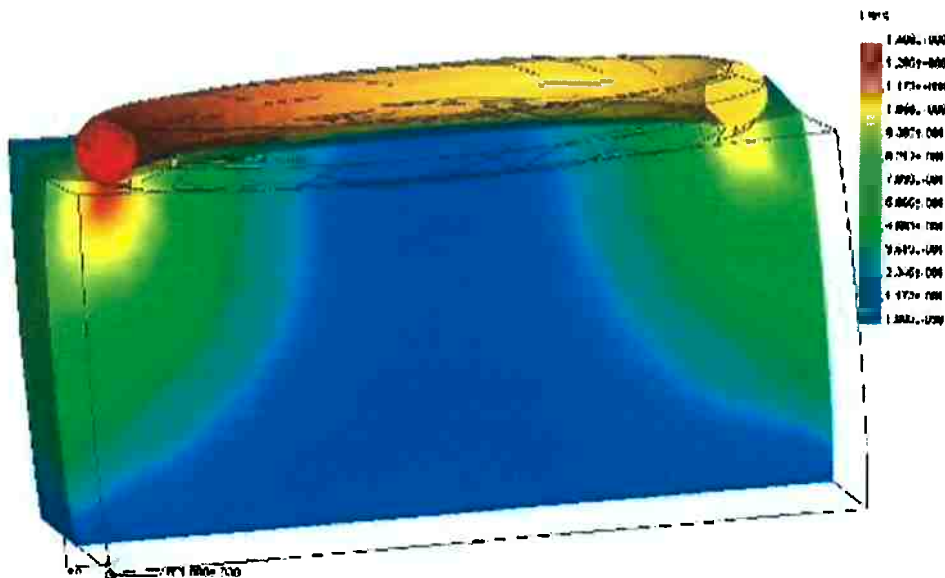


Figura 7.12 – Resultado do deslocamento da simulação não linear do anel de 40 lados.

Na figura 7.12 nota-se que a placa também sofre deformação, para forças maiores que 600 N. Portanto, foi feita uma tentativa sem a placa de apoio.

007g_40-anel18R : Anular Displacement Escalado
 2.42 m Deformação Escalada 1.28756

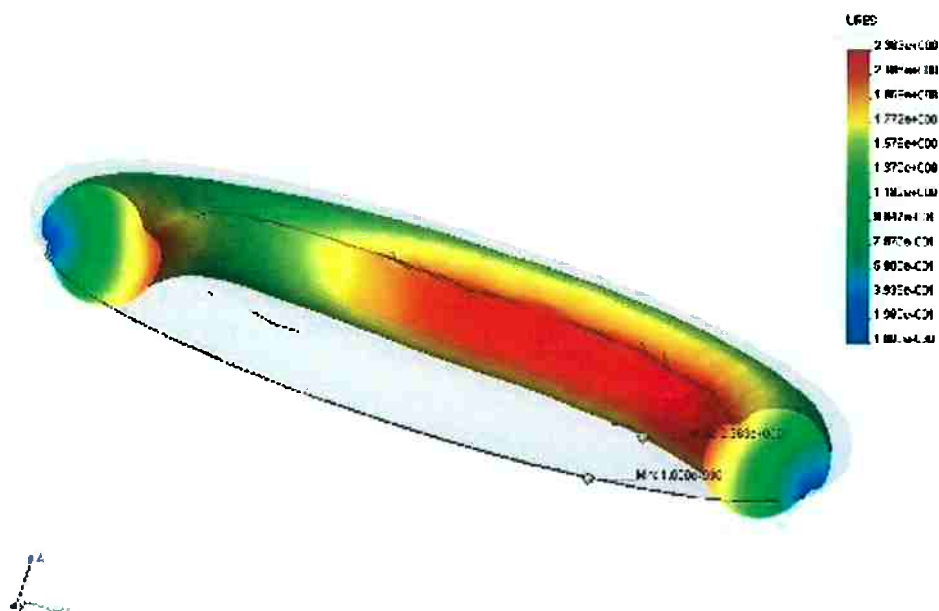


Figura 7.13 – Resultado do programa do anel de 40 lados sem a placa.

Observa-se na figura 7.13, o anel se deforma completamente e este modelo foi descartado. Os gráficos 7.14 e 7.15 mostram uma comparação entre a curva força versus deslocamento real, e a obtida pelo programa. A deformação utilizada usualmente de um o-ring é de 5%, mas os ensaios foram feitos com até 10 % de deformação.

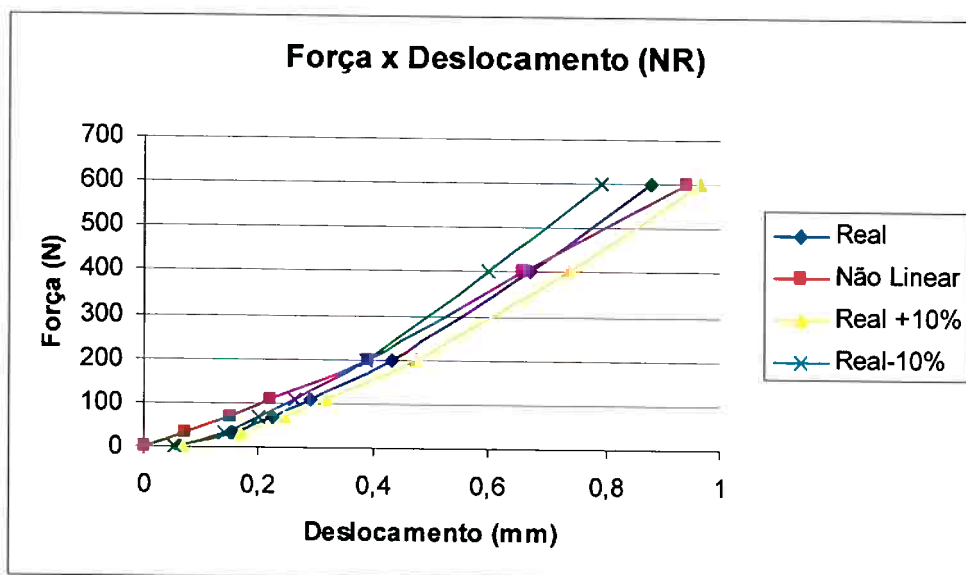


Figura 7.14 – Comparação entre a curva de força versus deslocamento real e a obtida pela simulação para a borracha natural.

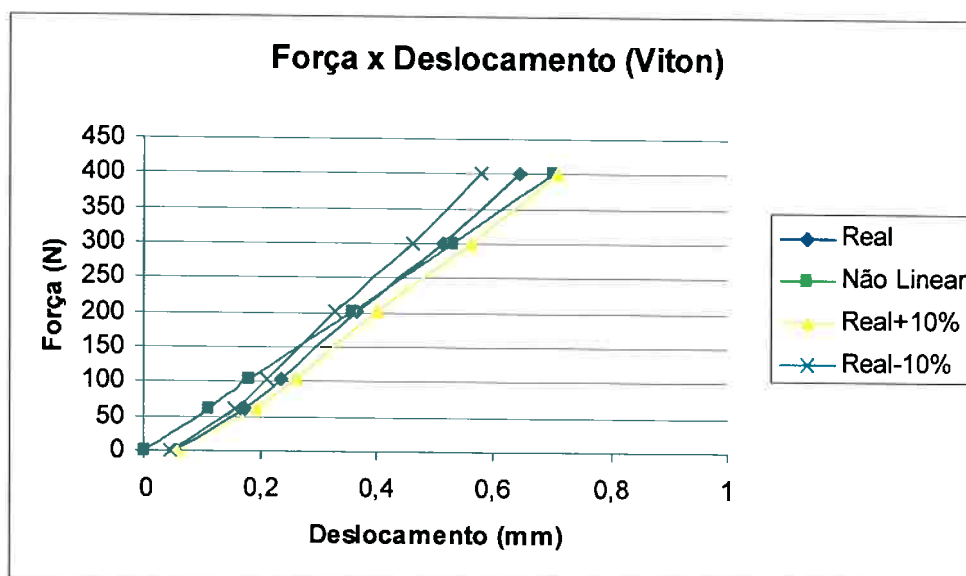


Gráfico 7.15 – Comparação entre a curva de força versus deslocamento real e a obtida pela simulação para a borracha natural.

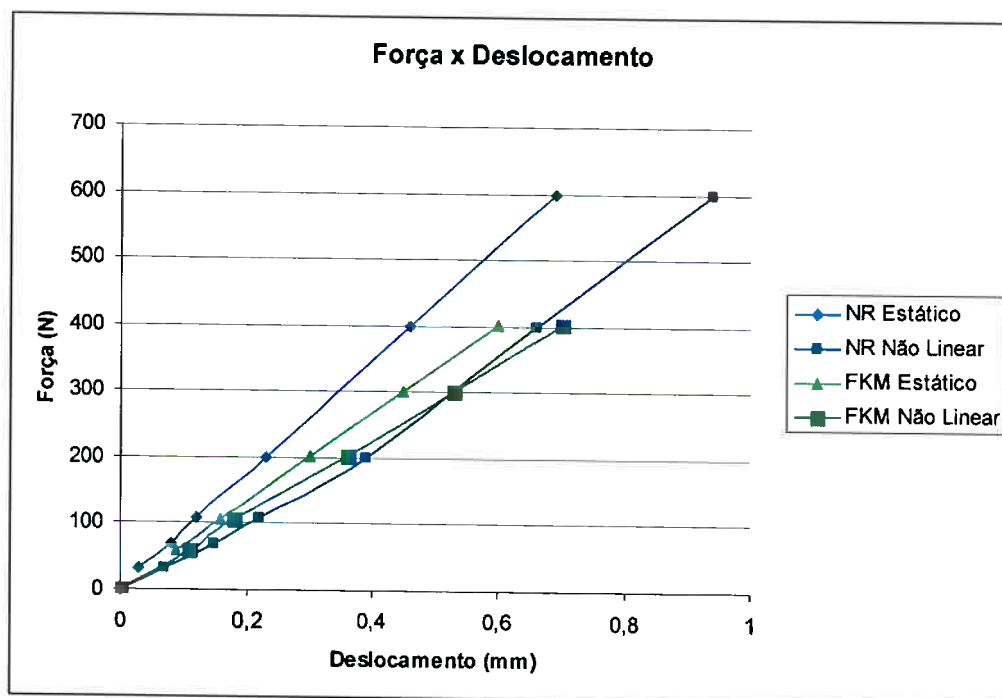


Figura 7.16 – Comparação entre os resultados dos modelos não linear e estático.

Como soluções alternativas para o problema de deformação da placa, simularam-se estaticamente os anéis para que a placa de aço não sofresse deformação, para tanto se utilizou o módulo elástico encontrado nos ensaios dinâmicos. As comparações encontram-se na figura 7.16.

8- Discussão

Observa-se nas figuras 7.3, 7.4 e 7.5, que o programa Cosmos DesignStar é mais preciso que o programa GeoStar no modelamento dos corpos de prova, não obstante o resultado de ambos ser próximo aos resultados reais. Nota-se também, que o resultado do corpo de prova de poliuretano é mais próximo da realidade para ambos os programas, pois havia mais pontos experimentais da curva tensão x deformação, permitindo um ajuste mais preciso.

O modelo do anel no programa GeoStar não funcionou pois os materiais escolhidos na fabricação dos anéis eram muito moles causando uma deformação muito grande durante a simulação e colapsando a malha criada na discretização. Como o programa só funcionou para cargas de até 10 N, não foi possível comparar este resultado com o real.

No programa DesignStar, testou-se diversas geometrias, a que apresentou melhores resultados foi a do anel de 40 lados. Quanto maior o número de lados da figura revolucionada para criar o anel, melhor foi o resultado, pois a peça se aproxima mais de um anel circular, porém com um número muito grande de lados fica difícil saber em qual face será aplicada a força para que esta seja perpendicular à placa.

A simulação que utilizou o modelo não linear para o material elastomérico, também considera o aço como sendo um material não linear, causando deformações na placa. Para tentar solucionar este problema foi feita uma tentativa de retirar a placa e engastar o anel, mas o resultado também não foi satisfatório, pois a deformação não foi uniforme.

Como solução alternativa, criou-se um programa com modelo estático utilizando o módulo de elasticidade encontrado pelo ensaio dinâmico, mas o resultado não linear ainda mostrou-se mais próximo à realidade.

O modelo do Cosmos DesignStar, foi o que apresentou resultado mais satisfatório, porém no início da curva o resultado diverge do real, pois quando são aplicadas pequenas forças o anel escorrega em relação à placa, fixando-se em forças maiores. Este fenômeno, no entanto não é simulado pelo programa.

Esta é a desvantagem do programa Cosmos DesignStar. A desvantagem do programa Cosmos GeoStar, é que ele não funcionou para os materiais estudados devido a instabilidades na rede.

9- Conclusão

- Fabricaram-se corpos de prova e anéis com compostos elastoméricos de ampla utilização pela indústria, e levantadas suas principais características físicas: módulo de elasticidade, ângulo de fase, módulo de armazenamento, módulo de perda, amortecimento, energia dissipada por ciclo, curva reométrica da reação de vulcanização, dureza shore A.

- Aplicando uma força com mesma intensidade nos compostos de durezas semelhantes, o poliuretano sofre menor deformação seguido da borracha natural e o fluorelastômero foi o composto que apresentou maior deformação.

- Comparando os materiais utilizados, concluiu-se que: a borracha natural não é recomendada para a fabricação de anéis o-ring, devido à sua alta histerese e à sua baixa resistência a óleos e gasolina. As propriedades do fluorelâstomero são muito semelhantes às do poliuretano, porém seu custo é mais elevado, fazendo com que este só seja utilizado em aplicações que exijam sua característica de suportar temperaturas muito elevadas.

- Foram utilizados dois programas de simulação pelo método dos elementos finitos para simular o comportamento viscoelástico do corpo de prova. Os programas Cosmos DesignStar e Cosmos GeoStar foram capazes de simular o comportamento do corpo de prova em compressão, sendo o CosmosDesign Star mais próximo à realidade.

- Para a simulação do anel, o programa Cosmos GeoStar tem a vantagem de considerar ou não o atrito na interface do anel, mas a simulação não funcionou devidamente. Isto se deve ao fato de que o composto empregado é de baixa dureza, implicando no colapso prematuro da rede de elementos finitos. Este problema pode ser contornado com a mudança de dispositivo da rede ou da geometria não circular de um anel.

- O programa Cosmos DesignStar foi capaz de apresentar um resultado próximo ao real, mas no início da curva de tensão x deformação, chamada de região mole, onde o atrito é baixo, o resultado se afasta da realidade por considerar o anel preso à placa.

- Os resultados empregando o programa Cosmos DesignStar foram satisfatórios em um intervalo de compressão até o dobro da usual em anéis de vedação, comprovando a validade do modelo proposto.

10- Referências Bibliográficas

01. ASTM D1414. - "Standard Test Methods for Rubber O-Rings" ASTM International.
02. GENT, A. N. – "Engineering with Rubber". Hanser Publ. cap.1, 1980.
03. PRECISION O-RING TECHNICAL MANUAL. Disponível em: <http://o-ring.info/en/technical-manual>. Acesso em: 20 out. 2005.
04. THRON, G. N. – "Caracterização Dinâmica de Compostos Elastoméricos: Conceitos e Ensaio Laboratoriais". EPUSP. Cap. 6, 2003.
05. SPERLING, L. H. – "Introduction to Physical Polymer Science". John Wiley & Sons Publ. cap. 8-9, 1992
06. HOFFMANN, W. – "Rubber Technology Handbook". Hanser Publ. p.7, 1980.
07. ASTM D1566-05b – "Standard Terminology Relating to Rubber" ASTM International.
08. OHM, R. F. "The Vanderbilt Rubber Handbook". R. T. Vanderbilt Company Publ. p496-518, 1990.
09. LIPPINCOTT, J.H., SMITH, D.R., GORDON, B. "Blue Book: Materials, Compounding, Ingredients, Machinery and Services for Rubber". Lippincott & Peto Inc. pp. 17 à 345. 1996
10. ACELERADORES: INTRODUÇÃO. Disponível em: <http://www.vulcanizar.com.br>. Acesso em 15 out. 2005.
11. 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". EPUSP. Cap. 6, 1999.

Anexo 1

Tabela de Propriedades Gerais das Borrachas

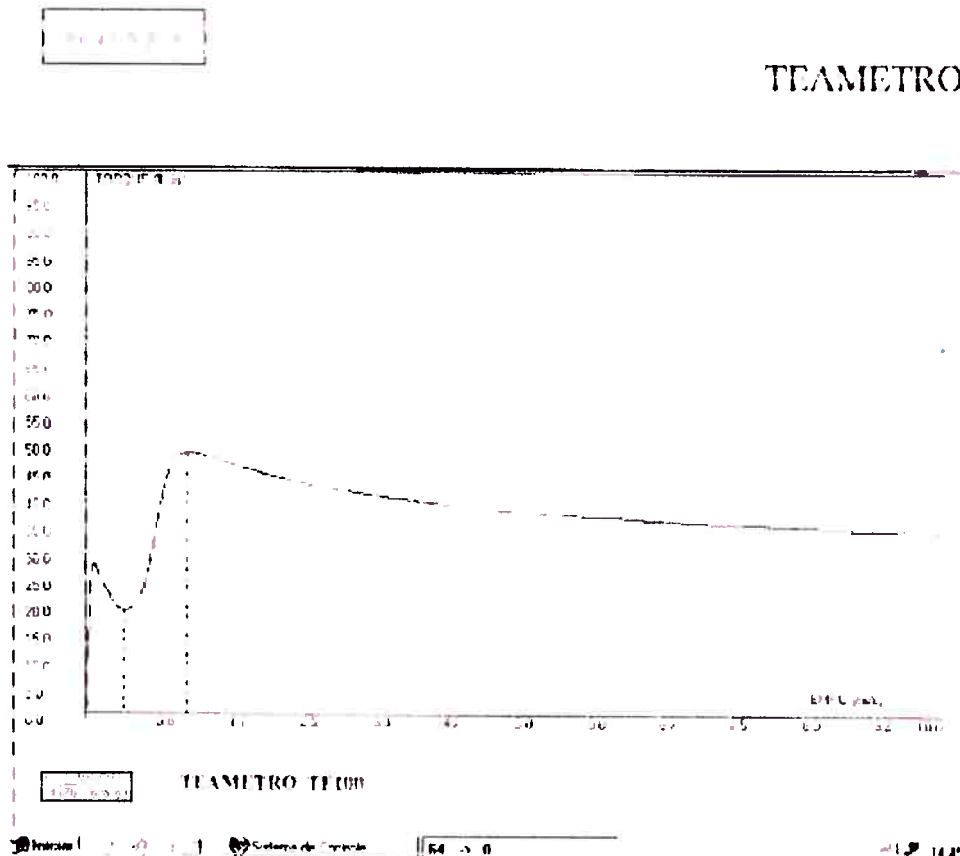
TABELA DE PROPRIEDADES DA BORRACHA		BORRACHA NATURAL	BORRACHA NATURAL SINTÉTICA	SBR	NEOPRENE	NITRÍLICA	HYPALON	THIOL	BUTÍLICA	EPDM	ACRÍLICA	SILICONE	URETANO	VITON
DESIGNAÇÃO ASTM		NR	IR	SBR	CR	NBR	CSM	T	IIR	EPDM	ACM	MQ	PU	FKM
DENSIDADE		0,93	0,93	0,94	1,23	1	1,1	1,3	0,92	0,86	1,09	1,1-1,6	1,2	1,85
TEMPERATURA DE TRABALHO		-60 / 80	-60 / 80	-40 / 80	-30 / 100	-20 / 110	-20 / 120		-60 / 120	-40 / 130		-90 / 230	-30 / 80	-20 / 230
PREÇO (US\$/ Kg)		0,88	1,44	1,32	2,56	2,2	2,6		1,6	2		8,8	7,4	18,5
RESISTÊNCIA À RUPTURA	Pura	210	210	70	210	70	150	15	105	28	30	-	350	140
	Reforçada	210	210	190	210	140	196	90	140	210	130	70		140
DUREZA SHORE A		20 – 100	20 – 100	40 – 100	20 – 95	20 – 100	45 – 95	20 – 80	40 – 75	40 – 90	40 – 90	10 – 85	15 – 100	60 – 95
RESILIÊNCIA	Fria	E	E	B	MB	B	B	F	S	MB	MB	MB	E	B
	Quente	E	E	B	MB	B	B	F	MB	MB	MB	MB	B	E
RESISTÊNCIA AO RASGO		E	E	F	B	F	F	P	B	B	P	P	O	F
RESISTÊNCIA À ABRASÃO		E	E	B	E	B	E	F	B	B	F	P	O	B
RESISTÊNCIA INTEMPÉRIE		E	E	MB	E	B	E	E	MB	E	E	E	B	E
OXIDAÇÃO		E	B	B	E	B	E	E	E	E	E	E	B	O
OZÔNIO		B	F	P	MB	P	O	E	B	E	B	E	E	O
CALOR		F	B	B	B	MB	MB	F	B	E	E	O	F	O
FLEXIBILIDADE EM BAIXAS TEMPERATURAS		E	E	B	B	B	F	B	B	E	P	O	E	B
DEFORMAÇÃO PERMANENTE		B	B	B	F	B	F	P	F	MB	B	MB	B	MB
CHAMA		P	P	P	O	P	F	P	P	P	P	F	F	B
ÁCIDOS DILUÍDOS		E	E	F	MB	B	E	B	E	E	F	F	F	E
ÁCIDOS CONCENTRADOS		F	F	F	B	B	E	F	E	B	F	F	F	E
ÁGUA		MB	MB	MB	B	B	B	F	MB	E	B	B	B	MB
SOLV. ALIFÁTICOS		P	P	P	B	E	B	E	P	P	E	P	B	E
SOLV. AROMÁTICOS		P	P	P	F	B	F	B	P	P	F	P	F	E
CETONAS		B	B	B	P	P	P	F	B	B	P	F	F	P
ÓLEO E GASOLINA		P	P	P	B	E	B	E	P	P	B	F	B	E

Anexo 2

Ensaaios com os Compostos Elastoméricos

A reometria tem a função de indicar o tempo de duração de cada etapa da reação de vulcanização, indicados por T1, T50 e T90, tempo de início da reação, tempo de 50% de reação e tempo de 90% da reação respectivamente.

Estes parâmetros são utilizados para controlar o tempo de permanência da peça na prensa. A partir do T90 começa a ocorrer a reação de reversão, observada claramente na Figura 1.



Amostra :
 Cliente : GUSTAVO
 Operador : DAVI
 Data : 16/09/15
 Codlen : NR 80
 N° lote : TESTE 1
 Arco : | °
 Temp. Plato Inf : 180 °C
 Temp. Plato Sup : 180 °C
 Mx. Tempo : 10 min
 Mx. Torque : 100 lb/in

Propriedades Físicas

Dureza :
 Tensão de Ruptura :
 Alongamento :
 Módulo a 100% :
 Módulo a 200% :
 Módulo a 300% :
 Densidade :
 Abrasão :
 Resiliência :

Torque em T1 :	20.70 lb/in.	Tempo T1 :	0 min 35 seg.
Torque em T2 :	21.70 lb/in.	Tempo T2 :	0 min 38 seg.
Torque em T50 :	33.74 lb/in.	Tempo T50 :	0 min 49 seg.
Torque em T90 :	48.19 lb/in.	Tempo T90 :	0 min 50 seg.
Torque Mínimo :	19.20 lb/in.		
Torque Máximo :	48.20 lb/in.		

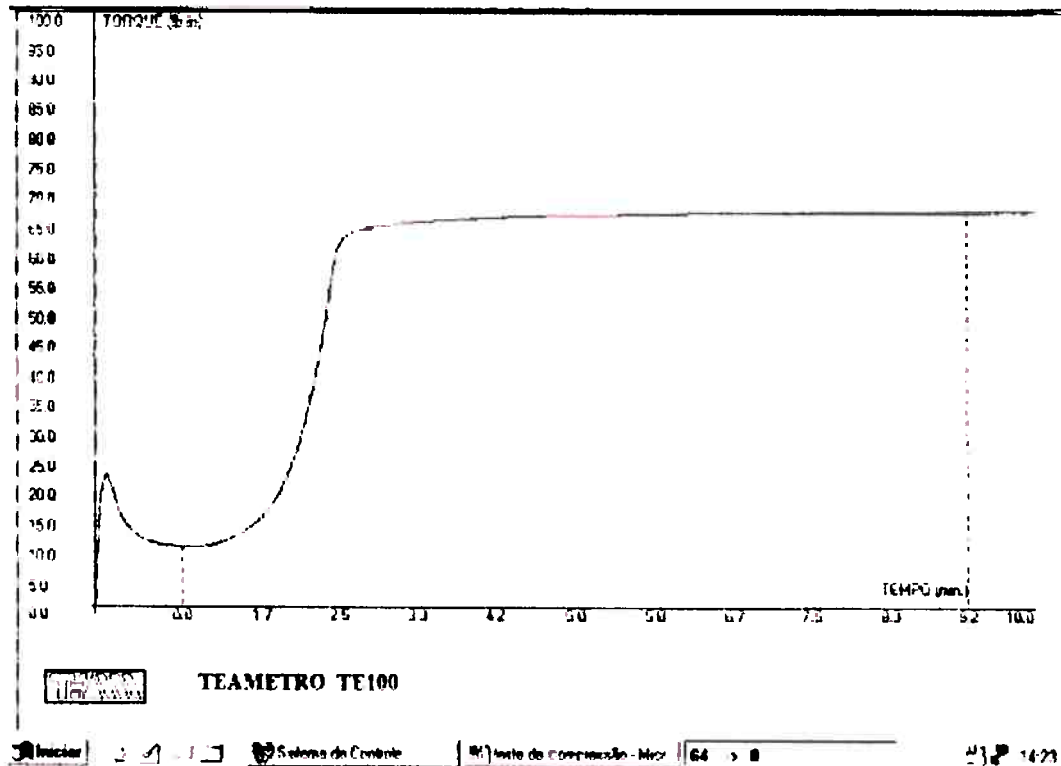
CONDICIONAL : Aprovado

Figura 1 – Ensaio reológico do composto NR.



LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
 Engenharia de Materiais - INCD 0010 - 0900

TEAMETRO



Amostra :

Cliente : GUSTAVO

Operador : DAVI

Data : 16/09/05

Código : VITON 80

Nº Lote : TESTE 1

Arco : 1 °

Temp. Plato Inf: 180 °C

Temp. Plato Sup: 180 °C

Máx. Tempo : 10 min.

Máx. Torque : 100 lb/in.

Propriedades Físicas

Dureza :

Tensão de Ruptura :

Alongamento :

Módulo a 100% :

Módulo a 200% :

Módulo a 300% :

Densidade :

Abração :

Resiliência :

Torque em T1 : 11.10 lb/in. Tempo T1 : 1 min 22 seg.

Torque em T2 : 12.10 lb/in. Tempo T2 : 1 min 30 seg.

Torque em T50 : 38.50 lb/in. Tempo T50 : 2 min 21 seg.

Torque em T90 : 61.22 lb/in. Tempo T90 : 2 min 37 seg.

Torque Mínimo : 10.10 lb/in.

Torque Máximo : 66.90 lb/in.

CONDICIONAL: Aprovado

Figura 2 – Ensaio reológico do composto FKM.

As Figuras 3 a 9, mostram os ensaios de caracterização dinâmica dos compostos elastoméricos. Observando a forma da curva podemos ter uma idéia da viscoelasticidade do material, como comentado no item 2.2, figura 2.4.

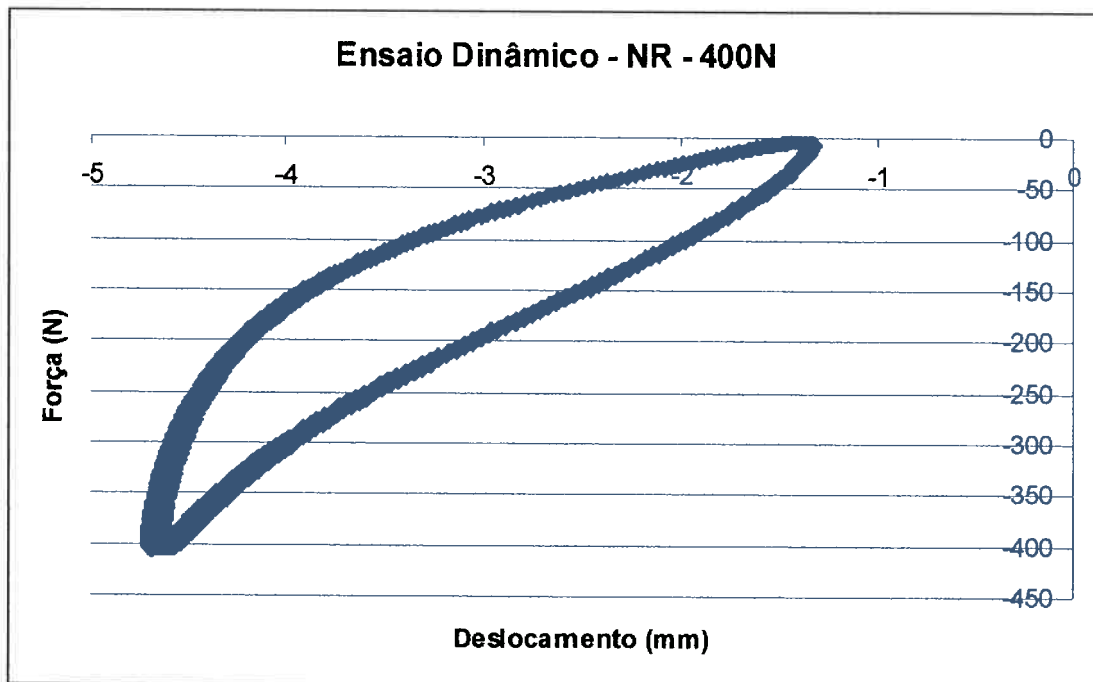


Figura 3 – curva de histerese do composto NR a uma carga de 400N.

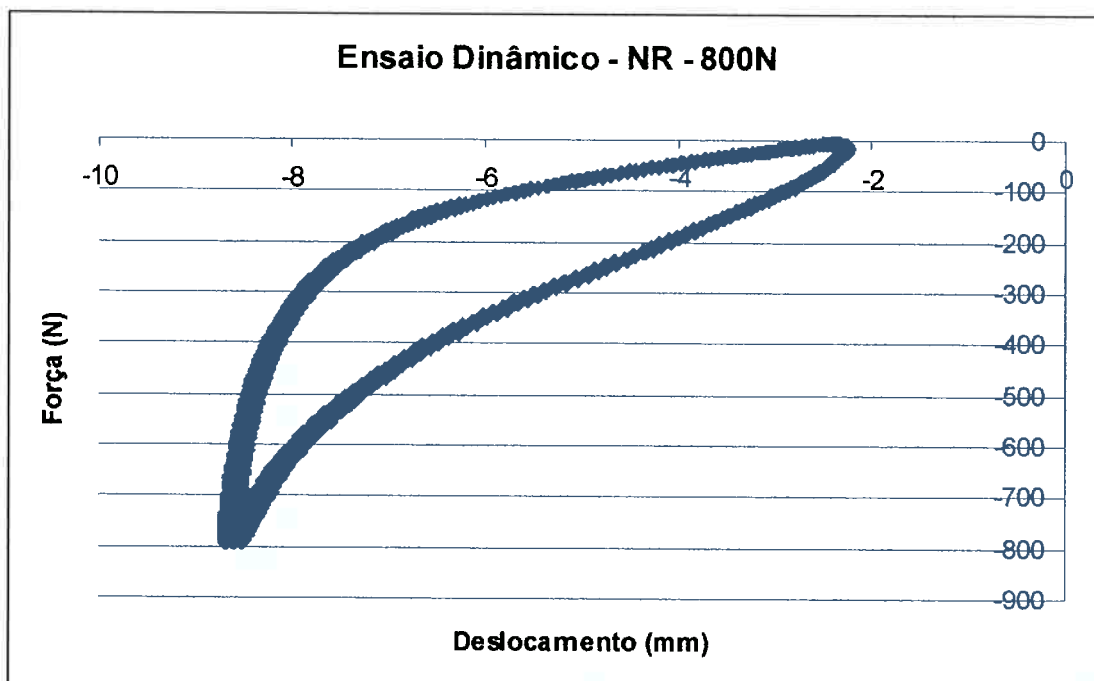


Figura 4 – curva de histerese do composto NR a uma carga de 800N.

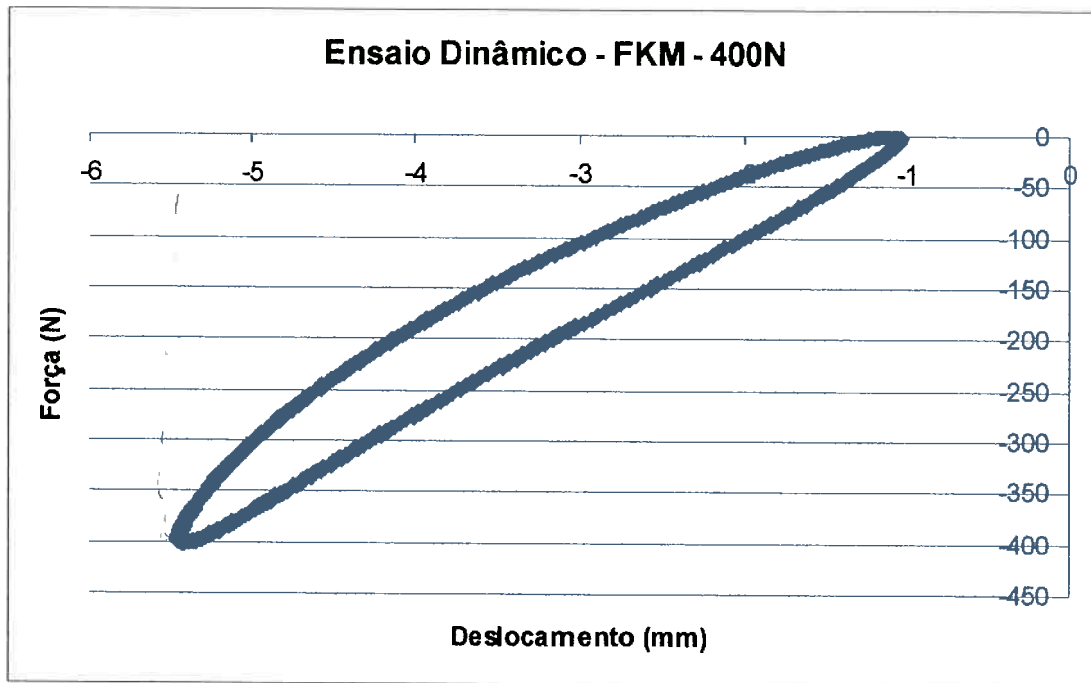


Figura 5 – curva de histerese do composto FKM a uma carga de 400N.

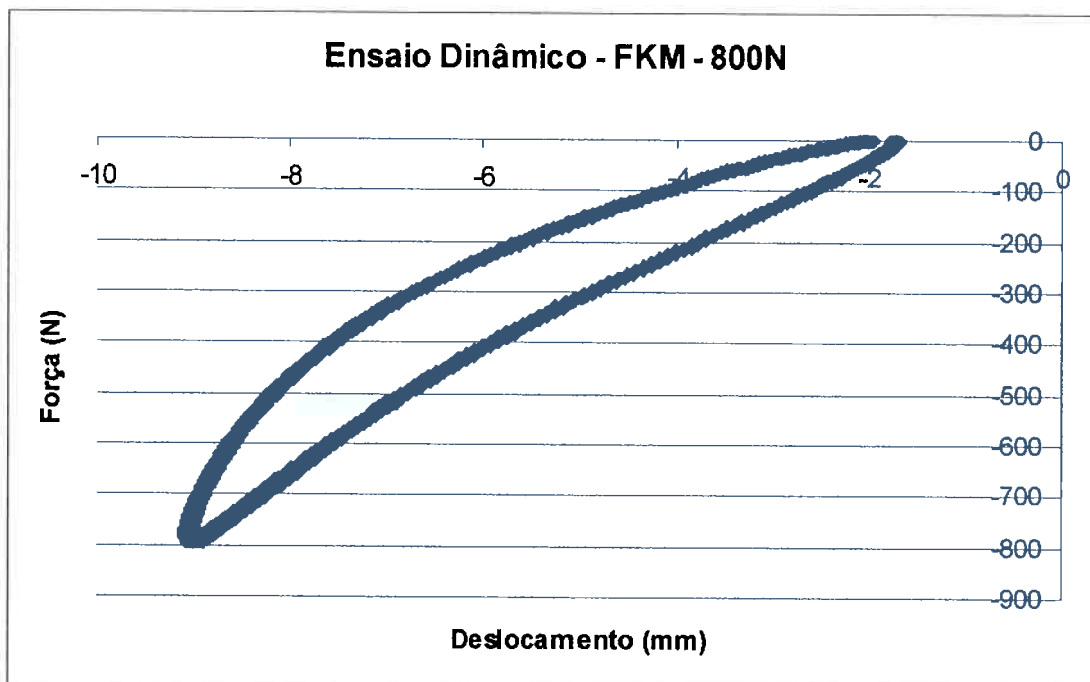


Figura 6 – curva de histerese do composto FKM a uma carga de 800N.

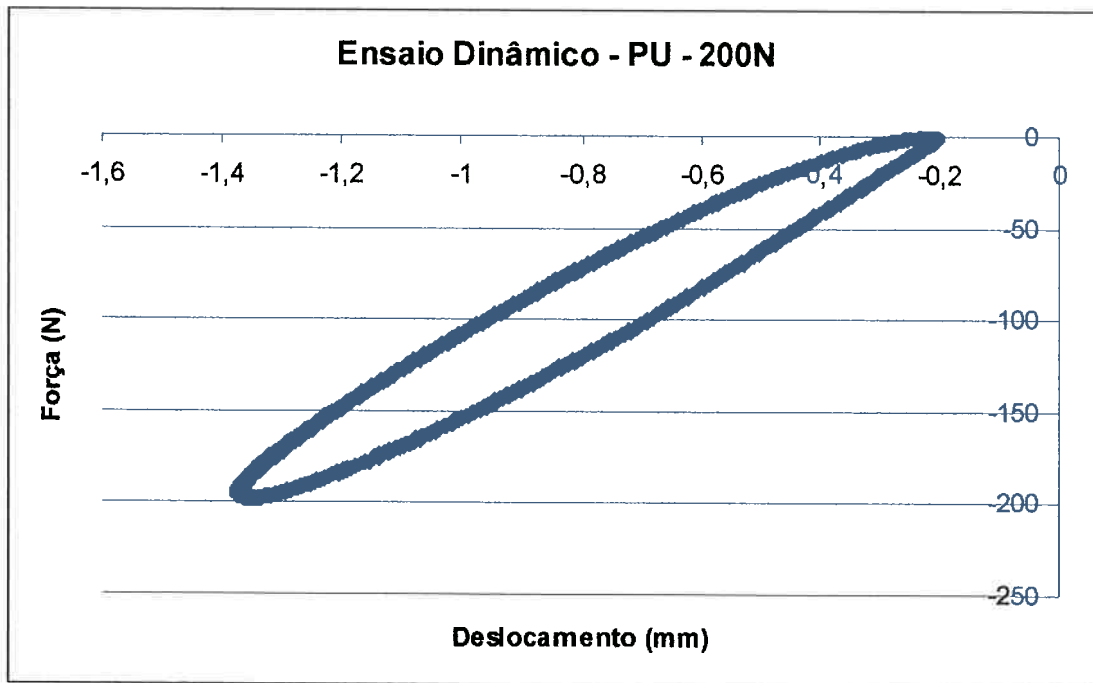


Figura 7 – curva de histerese do composto PU a uma carga de 200N.

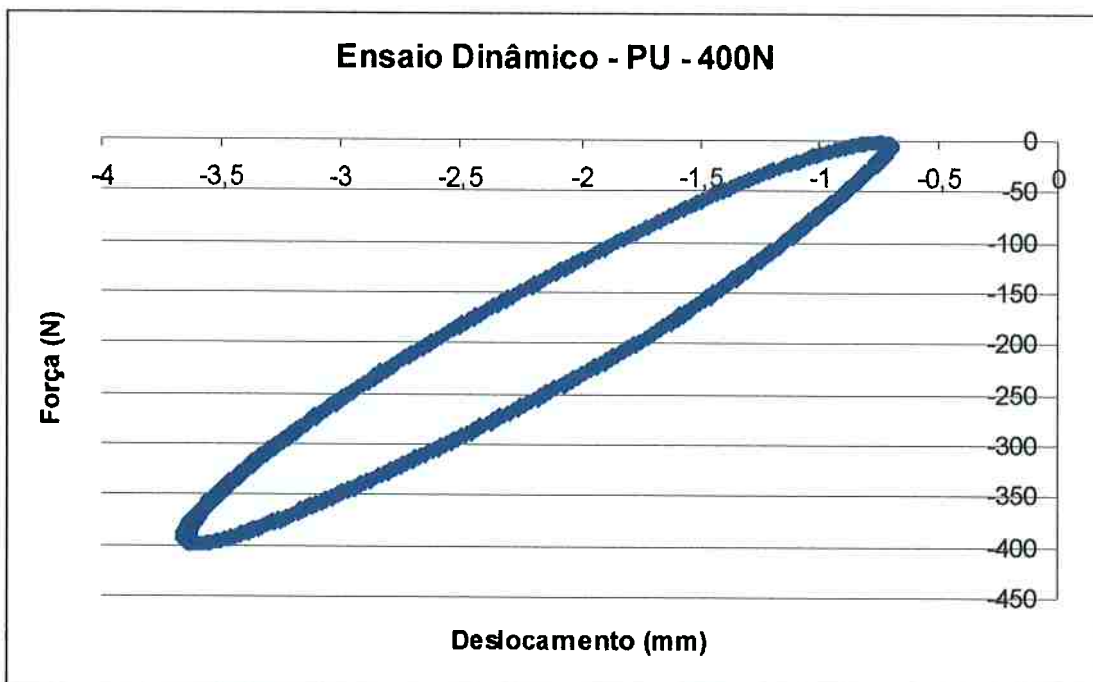


Figura 8 – curva de histerese do composto PU a uma carga de 400N.

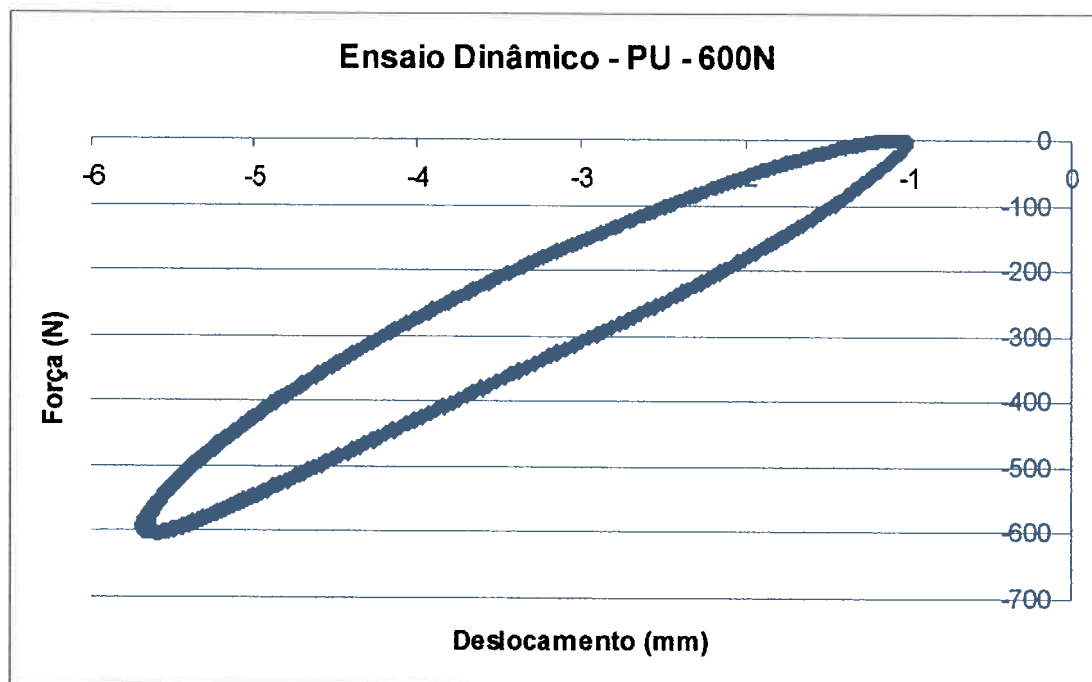


Figura 9 – curva de histerese do composto PU a uma carga de 800N.

Através dos parâmetros gráficos é possível estabelecer características físicas do material, Figura 10.

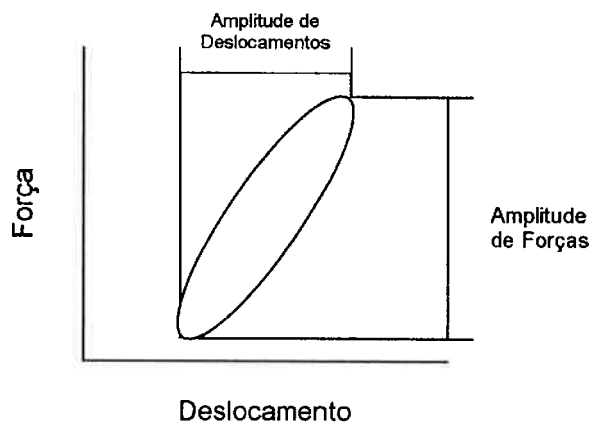


Figura 10 – Curva de histerese típica.

O módulo de elasticidade E^* é calculado da seguinte maneira.

$$E^* = \frac{\text{Amplitude_Força}}{\text{Amplitude_Deslocamento}} \quad (\text{Eq. 1})$$

A fase ϕ é calculada pela área da figura, e é obtida utilizando a integral pelo método dos trapézios. Obtêm-se então em função destas as propriedades do material:

Tabela 1 – Propriedades dos compostos elastoméricos a 400N.

Propriedade	Equação	Composto		
		NR	FKM	PU
Módulo de elasticidade (N/mm ²)	E^*	21,6	16,6	26,8
Ângulo de fase (°)	ϕ	21,1	12,9	16,1
Módulo de armazenamento (N/mm ²)	$E' = E^* \cdot \cos \phi$ (Eq. 2)	20,2	16,1	25,8
Módulo de perda (N/mm ²)	$E'' = E^* \cdot \sin \phi$ (Eq. 3)	7,8	3,7	7,4
Amortecimento	$A = \frac{E^* \cdot \sin \phi}{2 \cdot \pi \cdot f}$ (Eq. 4)	3,2	2,6	4,1
Energia dissipada por ciclo (N-mm/mm ³)	$Wd = \frac{\sigma \cdot \epsilon \cdot \pi}{4} \cdot \sin \phi$ (Eq. 6)	0,07	0,06	0,08

Comparando as propriedades dos compostos, concluímos que o composto de borracha natural tem um ângulo de fase muito elevado, além disso, suas características químicas de resistência a óleos não são apropriadas para a aplicação deste o-ring. Comparando os outros dois compostos, o fluorelastômero leva vantagens nas propriedades físicas sobre o poliuretano, mas o seu custo elevado pode tornar o último uma escolha interessante como material para vedação. Ao menos que as temperaturas sejam muito elevadas e levem a degradação do PU, tornando o FKM a melhor solução.

Anexo 3

Norma de Testes para o-ring



Standard Test Methods for Rubber O-Rings¹

This standard is issued under the fixed designation D 1414; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

These test methods have been approved by agencies of the Department of Defense as part of Federal Test Method Standard No. 601. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

1. Scope

1.1 These test methods describe the procedures for determining the physical properties of O-rings and changes in these properties due to aging.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

1.3 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- D 297 Test Methods for Rubber Products—Chemical Analysis²
- D 395 Test Methods for Rubber Property—Compression Set²
- D 412 Test Methods for Rubber Properties in Tension³
- D 471 Test Method for Rubber Property—Effect of Liquids²
- D 573 Test Method for Rubber—Deterioration in an Air Oven²
- D 865 Test Method for Rubber—Deterioration by Heating in Air (Test Tube Enclosure)²
- D 1329 Test Method for Evaluating Rubber Property—Retraction at Low Temperatures (TR Test)²
- D 1415 Test Method for Rubber Property—International Hardness²
- D 2240 Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness²
- D 4483 Practice for Determining Precision for Test Method Standards in the Rubber and Carbon Black Industries³

3. Terminology

3.1 Definition:

3.1.1 *O-ring*—a rubber seal of homogeneous composition molded in one piece to the configuration of a torus with

circular cross section. The O-ring is used as a dynamic or static seal usually installed in a machined groove.

4. Significance and Use

4.1 These test methods provide acceptable procedures for quality control purposes and for the determination of engineering characteristics.

5. General Methods

5.1 Except as otherwise specified in these test methods for rubber O-rings, the following ASTM test methods applicable in general to vulcanized rubber, shall be complied with as required and are hereby made a part of these test methods:

- 5.1.1 *Tension Test*—Test Methods D 412.
- 5.1.2 *Compression Set*—Test Methods D 395.
- 5.1.3 *Low Temperature*—Test Method D 1329.
- 5.1.4 *Density*—Test Methods D 297.
- 5.1.5 *Fluid Aging*—Test Method D 471.
- 5.1.6 *Heat Aging*—Test Methods D 865 and D 573.
- 5.1.7 *Hardness*—Test Methods D 2240 and D 1415.

5.2 In case of conflict between the provisions of these test methods and those of detailed procedures herein, the latter shall take precedence.

6. Test Conditions

6.1 The temperature of the testing room shall be $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$). The specimens to be tested shall be kept in this room for a minimum of 30 min previous to the time of testing. For referee tests the minimum time for conditioning shall be 16 h. In cases where this temperature cannot be obtained, the actual temperature shall be reported.

7. Dimensional Measurements

7.1 Thickness:

7.1.1 The thickness or cross section may be measured by one of the following methods: (a) a hand micrometer equipped with 6-mm (0.25-in.) diameter hemispherical tips (ballpoint or tubing micrometers), (b) dial indicators that have a maximum contact force of 0.29 N (29 gf), or (c) an electronic micrometer with a spring force of 0.1 N (10 gf) maximum. Better accuracy can be obtained with a 0.05-N (5-gf) spring or with no spring. In case of referee tests, both laboratories shall use the same spring force.

7.1.2 The O-ring specimen shall be measured at four points equally distributed around the circumference in both the radial and axial direction. An average reading shall be used for calculation.

7.2 *Diameter*—A stepped cone or optical comparator

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee D-11 on Rubber and are the direct responsibility of Subcommittee D11.36 on Seals. Current edition approved April 27, 1990. Published June 1990. Originally published as D 1414 - 56. Last previous edition D 1414 - 78 (1987) ϵ^2 .

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 09.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vols 09.01 and 09.02.

may be used for measuring the inside diameter of small rings. The diametric intervals of the stepped cone shall not exceed 2% of the diameter to be measured (see Fig. 1).

8. Tension Testing

8.1 *Testing Machine*—The testing machine shall conform to the requirements specified in Section 3 of Test Methods D 412, with the exception of the grips. Grips for testing rings shall consist of ball-bearing spools at least 9 mm (0.35 in.) in diameter, and be capable of being brought within 19 mm (0.75 in.) center-to-center distance at closest approach. Stresses within the specimen shall be minimized by (1) rotating one spool one full revolution for each 150 mm (6.0 in.) of travel of the power-driven grips or (2) lubricating the contact surface of the spools with castor oil. Grips for testing straight specimens may be of any type provided breaks do not occur in a portion of the specimen that has been at any time in contact with the grips. For specimens smaller than 25 mm (1 in.) in inside diameter, spools of smaller diameter and closer approach may be employed.

8.2 *Test Specimen:*

8.2.1 The test specimen shall consist of an entire O-ring except in the following cases: (1) when the diameter is too large to permit a break within the limits of travel of the testing machine, (2) when the specimen has been previously cut open to permit an aging test, and (3) when the specimen is unaged but is to be compared with an aged specimen as described in (2). For these cases a specimen cut from a ring shall be employed.

8.2.2 Specimens that exhibit obvious flaws at any point on the surface, such as might result from imperfect molding or flash removal, shall not be tested.

8.3 *Procedure for Determination of Tensile Strength, Ultimate Elongation, and Tensile Stress:*

8.3.1 Bring the grips close enough together so the specimen can be installed without stretching. Set the machine for a speed of 500 ± 50 mm (20 ± 2 in.)/min, set the chart recorder, and engage the clutch. (If a recorder is not used, note the spool center-to-center distance continually by means of a suitable scale). The stressed inside circumference, *L*, is equal to twice the distance between spools plus the circumference of one spool. Record the breaking force value, *F*, at the elongation specified for tensile stress and at the time of rupture. Measure the center-to-center distance between the spools at rupture to the nearest 2.5 mm (0.1 in.) and record as the value for *D*.

8.3.2 For the application of bench marks to segmented specimens as described in 8.2, hold the piece as straight as possible being careful not to apply excessive stress. Follow the procedure described in 8.3.1. Discard results for any specimen that breaks at a point that has at any time contacted the grip, and test an additional specimen. A suitable extensometer may be employed for elongation determination.

8.4 *Calculations:*

8.4.1 *Tensile Strength*—Calculate the tensile strength as follows:

8.4.1.1 For O-rings on spool grips:

$$T = F/A \tag{1}$$

where:

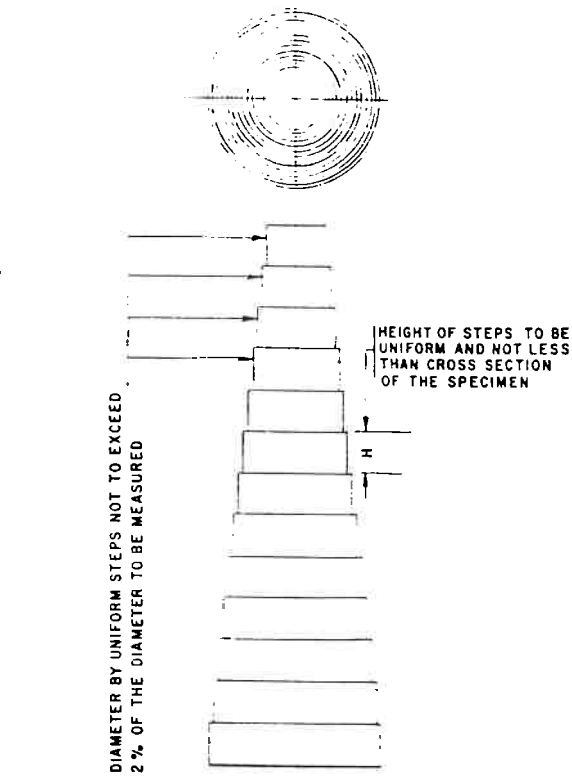


FIG. 1 Stepped Cone Gauge

T = tensile strength,

F = breaking force, and

A = twice the cross-sectional area calculated from axial thickness, *W*, as follows:

$$A = \pi W^2/2 = 1.57 W^2 \tag{2}$$

therefore:

$$T = F/1.57 W^2 \tag{3}$$

8.4.1.2 For straight or single-strand specimens:

$$A = 0.785 W^2 \tag{4}$$

$$T = F/0.785 W^2 \tag{5}$$

8.4.2 *Ultimate Elongation*—Calculate the ultimate elongation as follows:

8.4.2.1 For rings:

$$\text{Ultimate elongation, \%} = [(2D + G - C)/C] \times 100 \tag{6}$$

where:

D = distance between centers of the spool grips at the time of rupture of specimen,

G = circumference of one spool (spool diameter × 3.14), and

C = inside circumference of the specimen (or inside diameter × 3.14).

8.4.2.2 For straight or single-strand specimen cut from an O-ring:

$$\text{Ultimate elongation, \%} = [(L - L_o)/L_o] \times 100 \tag{7}$$

where:

L = observed distance between bench marks of stressed specimen, and

L_o = original distance between bench marks.

8.4.3 *Tensile Stress*—Calculate the tensile stress as in the case of tensile strength except the stress is reported at a predetermined elongation below the ultimate elongation. Calculate the center-to-center distance of the spool grips, D , where the prescribed elongation, E , occurs, as follows:

$$D = 1/2[(EC/100) + C - G] \quad (8)$$

NOTE 1—This value of tensile stress at a predetermined elongation is based upon inside circumference and differs from that determined by Test Methods D 412, which is based on the mean circumference.

8.5 *Characteristics of Sample Tested*—The median of the values for three specimens shall be taken as the characteristics of the sample tested, except that under the following conditions the median of the values for five specimens (two additional) shall be used:

8.5.1 If one or more values do not meet the specified requirements when testing for compliance with specifications.

8.5.2 If referee tests are being made.

8.6 *Report*:

8.6.1 The report shall include the following:

8.6.1.1 Results calculated as in 8.4.

8.6.1.2 Date of test.

8.6.1.3 Temperature of test room if other than provided for in Section 6.

8.6.1.4 Type of testing machine used, including diameter of spool grip if other than standard, and speed, if other than 8.3 ± 0.8 mm (20.0 \pm 2 in.)/min, and

8.6.1.5 Type of specimen (ring or straight).

9. Tension Set Test

9.1 *Procedure*:

9.1.1 Stretch the O-ring specimens to 100 % elongation and hold at this strain for 10 min. At the end of this period release the specimen and allow it to recover for 10 min. At the end of this recovery period, measure the inside diameter with a step gage reference in 7.2 and shown in Fig. 1.

9.1.2 Apply the strain by (1) stretching the specimen over a tapered cone which has a step at the required 100 % elongation, or (2) by means of a tension test machine stopping the machine at 100 % elongation, or (3) by the use of any special fixture capable of holding the O-ring over two spools at constant distance between spool centers.

9.2 *Calculation*—Calculate tension set as follows:

$$\text{Tension set, \%} = [(L_1 - L_o)/L_o] \times 100 \quad (9)$$

where:

L_1 = diameter after testing, and

L_o = original diameter.

9.3 Straight specimens cut from large O-rings may be tested and calculated in accordance with Test Methods D 412.

10. Compression Set Test

10.1 *Nature of Test*—The compression set of O-ring specimens shall follow the general procedures of Method B of Test Methods D 395, with the following exceptions:

10.2 *Apparatus*:

10.2.1 *Spacers*—The spacers shall be adjusted to within 0.025 mm (0.01 in.). This can be done by employing shim stock of various thickness.

10.2.2 *Measurement*—The cross section before and after test shall be measured in the same marked location with a ball-point (tubing) micrometer or other method as described in 7.1.

10.3 *Test Specimen*—The specimen shall be a suitable section cut from the sample O-ring. A 52-mm (2-in.) section has been found to be satisfactory on sample O-rings of 17-mm (0.67-in.) or larger inside diameter. On smaller O-rings, a section of approximately 3 mm ($1/8$ in.) shall be cut from the sample and discarded.

NOTE 2—Testing a whole O-ring for compression set is always avoided because air trapped inside the O-ring results in a different set of conditions on the inside and outside surface of the specimen.

10.4 *Procedure*—Measure the actual specimen to within 0.025 mm (0.001 in.) and calculate the spacer to be 75 % of this thickness, to within 0.025 mm (0.001 in.). Close the plates, employing a sufficient number of bolts to prevent deflection upon heating. At the end of the heating period, release the plates as soon as possible and allow the specimens to cool to room temperature under the conditions described in Test Methods D 395.

11. Compression Set in Liquids

11.1 Compression set may be conducted immersed in any liquid provided a suitable container is available. The container needs to be large enough to hold the plates and withstand the vapor pressure of the liquid at test temperature.

11.2 The specimen is prepared in accordance with 10.3, and at the termination of the heating period the plates are released immediately and the specimens are allowed to cool to room temperature for 30 min in a fresh cool portion of the test liquid. Measurement and reporting are the same except the type of liquid is listed in the report.

12. Low-Temperature Test

12.1 *Nature of Test*—The TR-10 or Temperature Retraction Test shall be in accordance with Test Method D 1329 with the exceptions given in 12.2 to 12.4.

12.2 *Test Specimen*—The test specimen shall be an O-ring of 1.5 to 3.8-mm (0.06 to 0.15-in.) cross-sectional diameter and of sufficient length to reach from clamp to clamp when the ring is cut and held in straight position.

12.3 *Procedure*—Stretch the mounted specimen 50 % as standard. If a greater or lesser stretch is used, report the actual stretch.

12.4 *Report*—The report shall include the following:

12.4.1 Testing elongation, in percent, and

12.4.2 Temperature at which the specimen retracts 10 %, designated as TR-10 and at other points, such as 30, 50, or 70 %, or all, if required.

13. Relative Density Test

13.1 *Test Specimen*—Any O-ring, O-rings, or segment of an O-ring may be considered as the specimen. The minimum mass of the specimen shall be 0.005 N (0.5 gf). In the case of very small O-rings, two or more pieces may be used as the specimen to accomplish this total minimum mass.

13.2 *Procedure*—Employ the procedure outlined in Test Methods D 297, density hydrostatic method.

NOTE 3—Extreme accuracy is required in making relative density determinations on small O-rings 0.001 N (1 g or less). The surface tension on the suspending wire is critical: this wire should be of the smallest diameter corrosion-resistant wire that will support the specimen weight. This surface tension on the wire and the elimination of small air bubbles on the surface of the specimen can be reduced by the addition of a few drops of wetting agent to the water in the weighing beaker.

14. Immersion Test

14.1 *Nature of Test*—For determination of the changes in physical properties after liquid immersion, the definitions, standard test liquid descriptions, and general technique shall be in accordance with Test Method D 471. The detailed procedure for O-rings, outlined in this section however, shall take precedence in case of conflict.

14.2 *Apparatus:*

14.2.1 The apparatus specified in Test Method D 471 for volatile liquids shall be used.

14.2.2 *Standard Heating Device* shall be an aluminum block heater or oil bath heater. The temperature shall be maintained within $\pm 1^\circ\text{C}$ (1.8°F).

14.3 *Test Specimens*—The test specimen shall consist of an entire O-ring when the outside diameter is small enough to permit installation in a test tube with the fluid level adjusted in accordance with 14.2.2. For sizes too large in circumference to insert as described, the O-ring shall be cut into segments. The specimen shall be a segment 90 ± 2 mm (3.5 ± 0.08 in.) in length. All tests for hardness, tension, elongation, and volume change shall be made in triplicate. The same three specimens may be used for all tests with hardness and volume determinations made prior to stress-strain tests. In the case of liquids that are volatile at room temperature, the specimen must be quickly placed back into the test liquid after hardness and volume test and prior to tension testing.

14.4 *Procedure:*

14.4.1 Suspend three specimens at one level in the test tube by the use of corrosion-resistant wire: separate the specimens by bending small loops in the wire or by the use of corrosion-resistant washers. For whole O-rings 6 mm (0.25 in.) in cross section and larger, place one specimen in each test tube. For cross-section sizes less than 4 mm (0.16 in.) place three specimens in each test tube.

14.4.2 Suspend the specimens vertically so that 25 mm (1.0 in.) of liquid is between the lower extremity of the specimen and the bottom of the tube. Add enough liquid to cover the specimens to a depth of 25 mm (1.0 in.) over the upper extremity of the specimens.

NOTE 4—For liquid mixtures, where the volume percent of the most minor constituent is known, the liquid volume of that constituent shall be 15 times the volume of the test piece.

For liquid mixtures where the volume percent of the most minor constituent is not known, then that volume is assumed to be 1%, and the volume of the test liquid will be 1500 times the volume of the test pieces.

If the above procedure is used, operators should be aware that the test tube specified in Test Method D 471 may not be adequate and alternative containers and heating system may be required.

NOTE 5—A problem that can occur with large whole specimens is cracking at the point of maximum bend at the upper or lower portion, or both, of the specimen. When cracking is observed upon removal from the oil, or when breaks occur at these points during tension tests, a retest shall be made on segments cut from an O-ring.

14.4.3 Make volume change determinations on a minimum specimen weight of 0.005 N (0.5 gf). This may be accomplished by using two or more pieces for the specimen in the case of very small O-rings (see Note 2).

15. Heat Aging Test

15.1 *Procedure*—The general procedures for heat aging O-rings shall be in accordance with Test Method D 573, with the following exception: When required by the material specification, or when agreed upon by the purchaser and the seller, the procedure shall be in accordance with Test Method D 865. The report shall state which method was employed.

16. Hardness Test

16.1 *Nature of Test*—It is difficult to obtain reliability in testing hardness of O-rings due to the curved surface and relatively small cross section thickness. With certain precautions and proper technique the following test methods may be employed. It is recommended that for O-rings of cross-sectional thickness less than 6 mm (0.25 in.) the microtester specified in Test Method D 1415 be employed.

16.2 *Procedure:*

16.2.1 *Test Method D 2240*—This procedure was developed to test rubber articles of 6-mm (0.25-in.) thickness minimum and employs an indenter point 2.5 mm (0.1 in.) in length. Use caution (1) to center the specimen so the point of the indenter reads on the center or thickest portion, and (2) to apply just enough pressure to bring the base of the instrument in close contact with the specimen without compressing the specimen. A holding fixture may be employed which will provide (1) limitation of travel of the durometer head and (2) a self-centering feature to eliminate alignment difficulties. A fixture that accomplishes these requirements is shown in Fig. 2. Any fixture or design principle that will accomplish the stipulations of (1) and (2) above may be employed. Do not make hardness determinations on the parting or "flash" line.

NOTE 6—The durometer as described in Test Method D 2240 is not recommended for testing O-rings with cross section of less than 6 mm (0.25 in.). If hardness measurements are made with this instrument on O-rings of smaller cross section, the values obtained may be different from those obtained on a standard specimen. Fixtures as shown in 16.2.2 should be employed for such determinations. For O-rings of less than 3-mm (0.12-in.) cross section, the fixture should be designed, double depth, to hold vertically two cross-section thicknesses of the specimen. This is to increase the total thickness to greater than the length of the indenter point. The total depth of the groove must be adjusted to a depth that will reduce within ± 2 the hardness of a standard specimen of the same material.

16.2.2 *Test Method D 1415*—This test method, using a micro tester (see 3.3 of Test Method D 1415) permits the testing of very small specimens to 1-mm (0.04-in.) minimum thickness. This test method is recommended for determining the hardness of O-rings with a cross-sectional thickness of 6 mm (0.25 in.) and smaller.

NOTE 7—Values obtained with the micro hardness tester may differ from durometer values due to the difference in methods. The surface effect from aging or curing is more pronounced with the micro tester.

17. O-Ring Mold Shrinkage Test

17.1 *Nature of Test*—This test method involves the molding of various rubber materials in cavities of standard

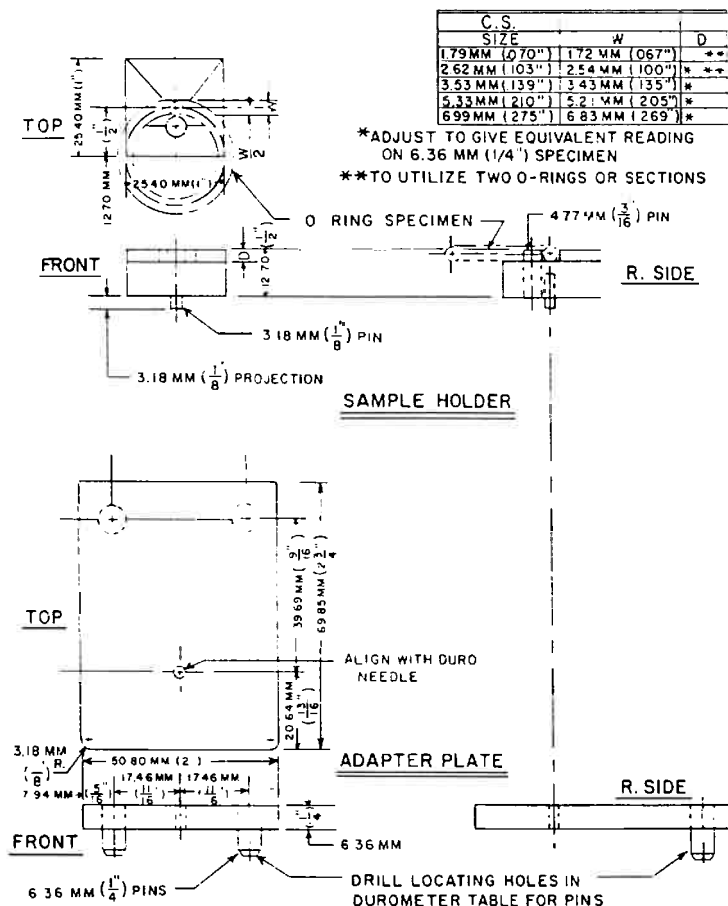


FIG. 2 Holding Fixture for Durometer in Hardness Test

dimensions representative of typical O-ring configurations. The specimens are then measured for inside diameter and cross-sectional thickness within 0.025 mm (0.001 in.) to determine actual mold shrinkage as a means of process control.

17.2 Apparatus:

17.2.1 *Shrinkage Mold*—Most critical is the shrinkage mold. Great care must be taken in both the manufacture and maintenance of this mold. Care must be taken not to dent, scratch, or otherwise damage the cavity. The mold cavities must be kept clean. Harsh mechanical or chemical methods that would dull the “cut off” or increase the cavity size must be avoided. The surface finish must be the best commercial practice.

17.2.2 *Calipers and Micrometers*—Cavity measurement shall be made by the use of vernier calipers and depth micrometers as follows:

17.2.2.1 Align the edges of the vernier with the inside diameter of the cavity “with magnification.” Take a reading that is the outside diameter of the cavity.

17.2.2.2 Open the calipers to align the outside diameter of the cavity. This gives the width of the cross section.

17.2.2.3 Use depth micrometers to check the depth of the cavity. Check each half for depth. The total of the two halves gives the total depth of the cavity.

17.2.2.4 Dimensions for the cavity of a recommended test

size are 3.6-mm (0.142-in.) cross section by 25-mm (1.0-in.) inside diameter.

NOTE 8—Other test sizes varying the cross section and inside diameter may be preferred and are permitted. This size is recommended merely as the median standard cross section in a diameter easily molded and measured. Some laboratories may prefer a larger size, the important consideration being that the seller and the manufacturer use the same or comparable size for control work. It has been found important to use a test mold cross-section size as close as possible to the cross-section size of the production mold being considered.

17.3 Test Specimen:

17.3.1 Preparation of preforms is by the die-cut method unless otherwise specified. Sample stock shall be prepared by sheeting on a standard laboratory mill to a thickness of approximately 20 to 25 % greater than the cavity depth. Milling time should be the minimum required to obtain a smooth sheet. The sheet shall be allowed to rest for 30 to 60 min after which preforms shall be cut out with a suitable die. Other types of preforming, such as a spliced extrusion or slice from a tube may give slightly different results. If an alternative method is used it must be noted in the report.

17.3.2 The preforms shall be placed in the shrinkage test mold which is maintained at curing temperature $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ($\pm 3.6^{\circ}\text{F}$) in a suitable press. The mold shall be closed quickly and brought to a pressure equal to a minimum of 3.4 MPa (500 psi) across the mold for the optimum curing time of the material being tested. This curing time and temperature shall be noted in the report. Curing time and especially tempera-

D 1414

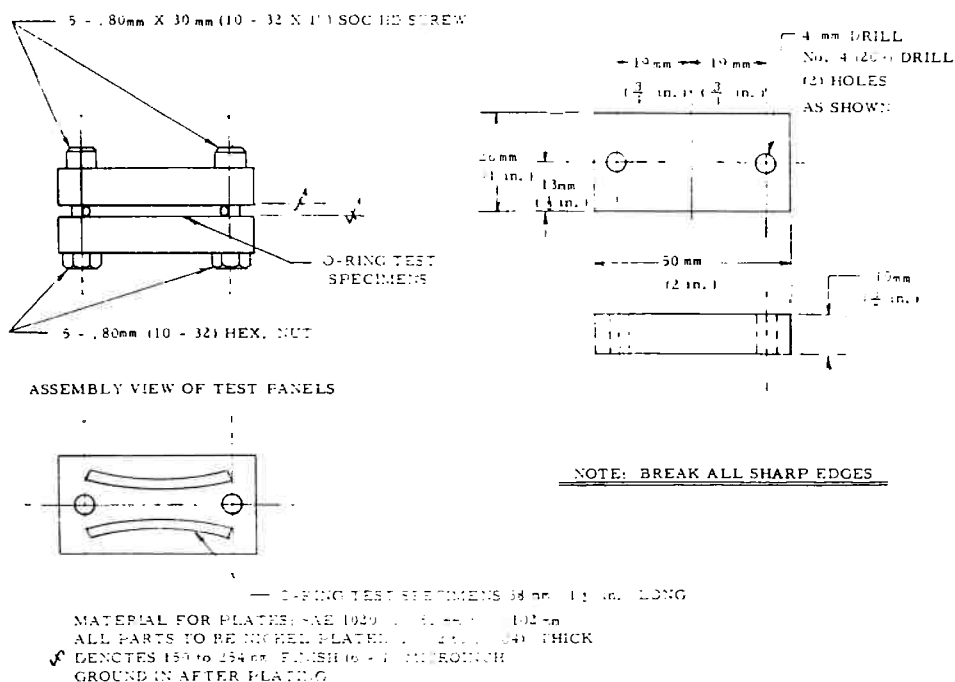


FIG. 3 Corrosion Test Panels

ture are very critical in shrinkage consideration.

17.3.3 After curing is complete the specimens shall be allowed to rest for a minimum of 16 h at a temperature of $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$). Flash removal shall be done individually and carefully so as not to disturb the basic dimensions of the specimen. An abrasive paper or sand-stick of fine grade is usually employed for the operation. Excess flash on the inside diameter must be avoided since this will alter the inside diameter measurement.

17.3.4 Specimen rings obtained must be free of all major defects, such as nonfills, backrind, etc., as these factors may affect true shrinkage determination. Care must be exercised to ensure proper closing of the mold to prevent erroneous cross-section shrinkage results.

17.4 Procedure:

17.4.1 Measure the cross section by the use of tubing micrometers or other method as described in 7.1. Determine actual shrinking by subtracting the average or mean cross section of the specimen from the actual mold cavity size. Measurement of the cross section in inside diameter, outside diameter, and side-to-side axes is desirable. This provides a check on the accuracy of the mold cavity radius and true roundness of cross section. Some materials, such as silicones, may create an imbalance on the two cross-section axes due to inherent shrinkage characteristics, thus producing an out-of-round cross section.

17.4.2 Measure inside diameter by the use of a suitable step gage as shown in Fig. 1, or a suitable taper gage (see 7.2). One or more gages may be necessary to cover a wide range of shrinkage. Take care not to force the specimen on the step gage. Use only enough pressure to be certain the inside diameter is in intimate contact with the gage. Determine actual linear shrinkage of the inside diameter by subtracting the average or mean inside diameter value of the specimens from the actual mold cavity inside diameter. The resultant

value divided by the mold inside diameter and multiplied by 100 is the percent shrinkage. An alternative method of expression is in units such as millimetres per millimetre or inches per inch.

17.4.3 An alternative method of measuring the inside diameter and cross section is the shadowgraph or comparator. This instrument is very accurate, but if the O-ring is unsupported the diameter must be taken in two directions and averaged. To prevent any out-of-roundness, a special cone can be used in conjunction with the comparator. The comparator is also used to determine roundness of cross section by measuring thin slices of the cross-sectional area.

17.5 Report—The report shall include the following:

- 17.5.1 Method of preforming.
- 17.5.2 Number of specimens measured, and
- 17.5.3 Average shrinkage, expressed as a percentage.

18. Corrosion Test

18.1 This test is intended to give a fast and relatively reproducible rating of the corrosion potential for an O-ring.

18.2 Apparatus:

18.2.1 The apparatus shall consist of any chamber that is corrosion-proof, can be sealed, and is of convenient size for the work load.

NOTE 9—A laboratory desiccator jar is commonly used.

18.2.2 The test panels unless otherwise specified shall be made of SAE-1020 steel. The panels shall be made in accordance with the drawings in Fig. 3.

18.2.3 Relative humidity of 100 % is maintained by the use of a solution of 85 % distilled water and 15 % USP glycerin. This solution should be added to a depth equal to at least 20 % of the depth of the chamber.

18.2.4 A corrosion-proof shelf shall be employed to hold the fixtures close above but not touching the solution.

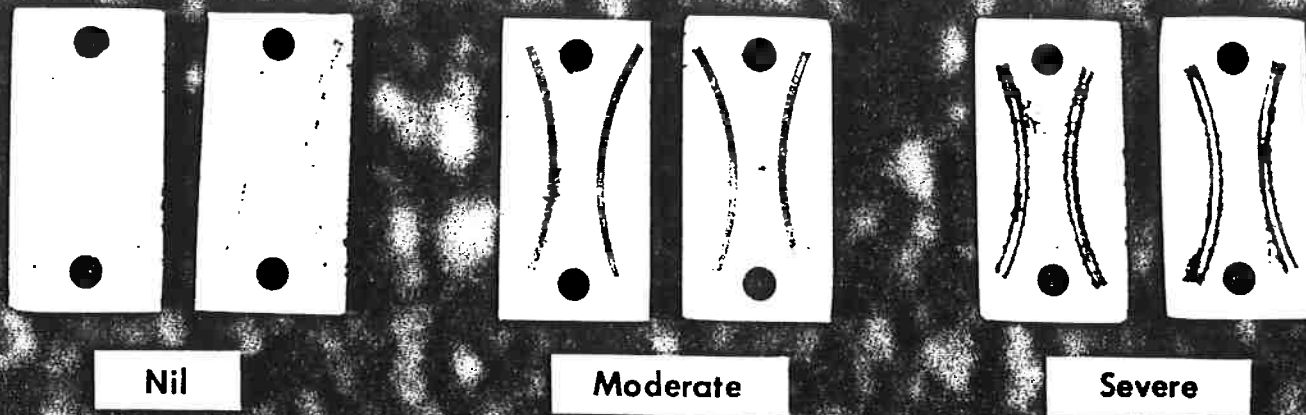


FIG. 4 Examples of Corrosion Test Results

18.3 *Test Specimen*—The test specimens shall consist of two segments 38 mm (1.5 in.) in length, cut from the sample O-ring. If the sample O-ring is smaller than 38 mm in circumference, two whole O-rings may be used.

18.4 *Procedure:*

18.4.1 Clean the panels with toluene or other solvent system that will produce a clean dry surface free from film.

18.4.2 Remove the cover and place the individual specimens and test panels into the open chamber for 1 h of preconditioning.

18.4.3 After this 1 h preconditioning, assemble the specimens with panels as shown in Fig. 3. Apply sufficient pressure to cause a deflection of 15 % of the original cross-sectional diameter of the specimens.

18.4.4 Place the assembled fixture on a watchglass and

insert it into the test chamber.

18.4.5 Cover the chamber and allow it to stand for 96 h at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$).

18.4.6 Remove the specimens, wash the panels with toluene or other suitable solvent system, and wipe with a lint-free cloth. If superficial rust or adhering particles from the specimen are still present, a light buffing with crocus cloth, steel, or brass wool is permitted.

18.5 Compare the results to the examples shown in Fig. 4. The rating shall be nil, moderate, or severe.

19. Precision and Bias

19.1 Precision statements in accordance with Practice D 4483 have not been prepared for the test methods unique to this document. The precision statements in the test methods listed in Sections 2 and 5 do apply.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.

Anexo 4

Dados de entrada para o Autocad e o Cosmos Design Star

Para fazer a simulação do anel no programa Cosmos DesignStar primeiramente foi feito o desenho da peça no programa AutoCAD. As linhas que devem ser digitadas no prompt de comando para a criação do corpo de prova e do anel com a placa no AutoCAD são:

- Corpo de prova:

`_cylinder` → este comando cria um cilindro.

0,0,0 → define o centro do cilindro.

7.25 → define o raio do cilindro.

30 → define a altura do cilindro.

- Anel:

`_polygon` → cria um polígono.

40 → quantidade de lados do polígono.

2.5,0,0 → define o centro do polígono.

I → define se o polígono será inscrito ou circunscrito em um circunferência neste caso será inscrito.

2.5 → raio da circunferência.

`_revolve` → revoluciona o objeto.

Selecione com o mouse o polígono e pressione Enter.

30,0,0 → define o primeiro ponto do eixo de revolução que é o centro do anel.

30,5,0 → define o segundo ponto do eixo de revolução.

360 → define o ângulo de revolução em graus, neste caso uma volta completa.

`_rectang` → cria um retângulo.

-45,-45,-2.5 → define o primeiro ponto do retângulo.

45,45 → define o segundo ponto do retângulo, neste caso o programa não pede a coordenada z.

`_extrude` → cria um objeto extrudado, no caso a placa.

Selecione com o mouse o retângulo e pressione Enter.

-30 → define a altura da placa.

0 → define o ângulo de rotação da extrusão.

Após criar os objetos, digite o comando `_acisoutver` e digite 16, para definir a versão do arquivo ACIS de exportação, o DesignStar reconhece a versão 16. **Selecione os objetos que deseja exportar** e selecione File>Export... nomeie o arquivo e selecione ACIS (*.sat) na opção Files of Type (Figura 1).

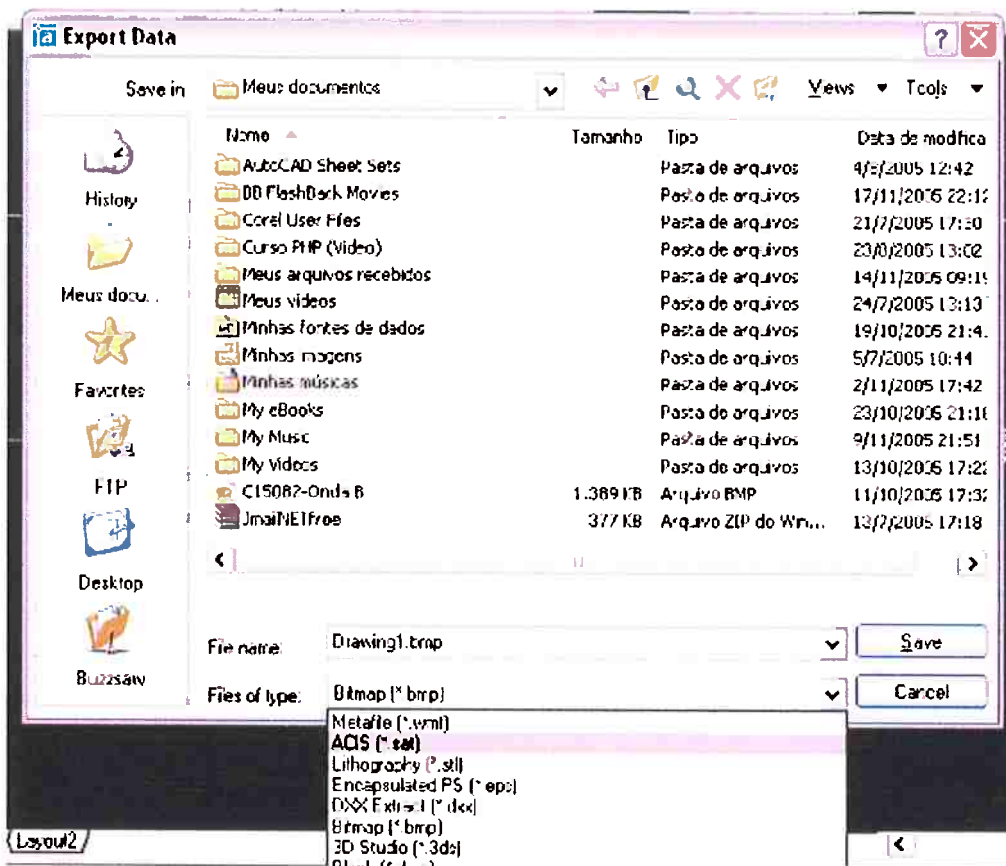


Figura 1 – Tipo de arquivo de exportação do AutoCAD suportado pelo Cosmos DesignStar

Abra o arquivo .sat no Design Star, File>Open e no campo Files of type selecione ACIS Files (*.sat). No canto superior esquerdo clique com o botão direito do mouse em cima do nome do arquivo e selecione Study (Figura 2).

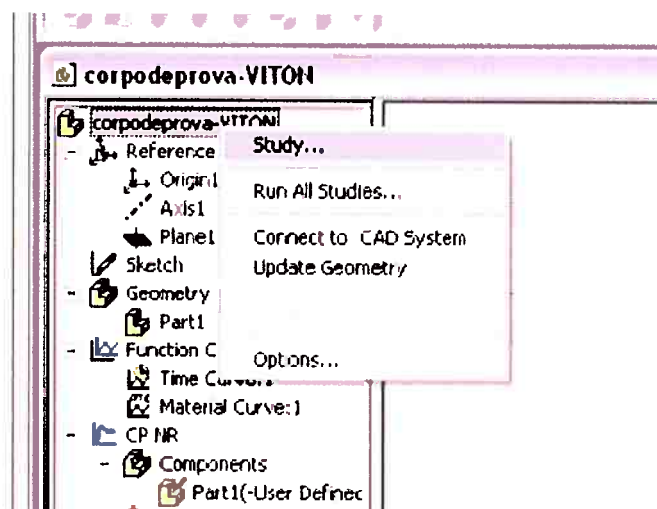


Figura 2 – Criando um novo estudo.

Clique em Add, nomeie o estudo e selecione o tipo. No caso, não linear. Em seguida selecione Function Curves com o botão direito e selecione Define. Selecione tempo e crie a curva de tempo de 0 a 1, com intervalos de 0.25. Clique em Function Curves>Define novamente e selecione Material Curve, digite a curva de propriedades MPC do seu material.

Selecione as partes 1 e 2 com o botão direito, vá em Define Material, selecione o material, no caso da placa utilize o aço AISI 1020, para os elastômeros, selecione a opção User Defined e a curva Material Curve 1, digite o coeficiente de Poisson, e a densidade do material.

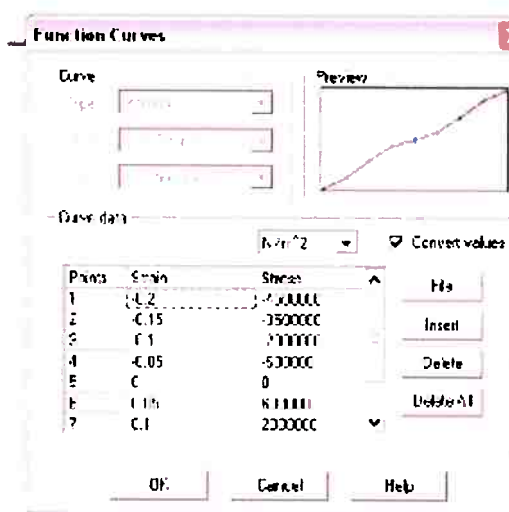


Figura 3 – Curva de propriedades do material.

Clique com o botão direito em Loads/BC, selecione restraint para criar um engastamento, e selecione a face que deseja engastar. Para aplicar uma força, clique em Loads/BC>Load defina a face cuja carga será aplicada e defina o valor da força.

Para criar a malha selecione com o botão direito em Mesh>Generate e selecione a espessura da malha.

Clique com o botão direito sobre o estudo que você criou e selecione Run. Depois de completar a simulação o programa criará as pastas: Stress, Displacement, Strain, Deformations, selecione com o botão direito o gráfico que deseja ver e selecione Edit Definiton. Escolha as opções do gráfico e visualize os resultados.

Anexo 5

Brochura MTS 810

MTS 810 FlexTest™ Material Testing Systems



Versatile, multipurpose
servohydraulic testing systems
for static and dynamic tests



The MTS 810 Material Testing System

The 810 Advantage

Flexibility

Whether you need to study the fracture mechanics properties of advanced materials, compression properties of composites, or perform other, more traditional materials tests, the MTS 810 material testing system can be configured to meet those needs.

Superior value

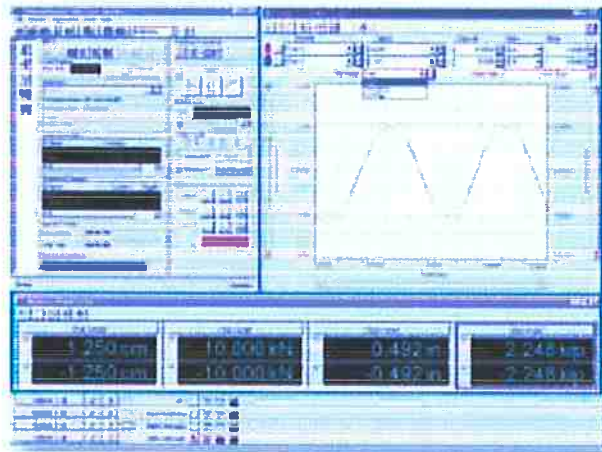
The design of FlexTest controllers is based on decades of MTS expertise in servohydraulic structural and material testing. FlexTest SE and GT controllers employ the same proven, VME-based MTS Model 493 hardware used daily in thousands of digital controllers around the globe to deliver high-speed closed-loop control, data acquisition, function generation, and transducer conditioning to address the full spectrum of material and component testing needs.

Software and accessories

The MTS 810 material testing system offers a wide range of optional, application-specific software packages. In addition, MTS offers an extremely wide range of accessories to tailor each system to your specific needs.

Accuracy

Superior axial and lateral stiffness are achieved through an integral actuator design, stiff, but low-mass crosshead, and specially designed force transducers. Load unit alignment accuracy is attained through precision machined columns, factory assembly, and alignment using a laser. The actuator rod is precisely machined, and the actuator is integrally mounted to maintain alignment.



The MTS 810 system is completely integrated to let you easily obtain information about the mechanical properties of your materials or components. With the wide range of load unit, test control, and test accessory options, it is easily configured to meet your exact testing needs.

The system's FlexTest™ SE and GT controllers feature intuitive, graphical interfaces that make it easy to set up and run your tests. As a result, you spend less time setting up tests and more time running tests. In addition, because the controller is completely software driven, new capabilities can be added easily and economically, simply by upgrading the software.

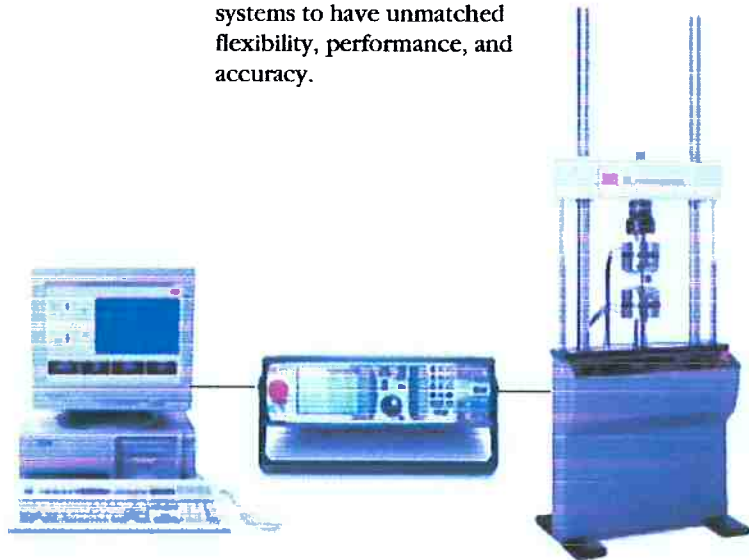
A wide variety of optional software packages are offered for FlexTest SE and GT controllers. These include our Multi-Purpose TestWare® testing package, TestWorks™ 4 monotonic testing package, and a variety of application-specific software packages that let you run your tests with ease. These tightly integrated packages assure consistent, repeatable testing and accurate test results.

This document highlights the major components that make up a FlexTest SE or GT system. It includes important details on the unique features that enable these systems to have unmatched flexibility, performance, and accuracy.

FlexTest SE Plus

Coupled with a PC running MTS 793 software, the FlexTest SE Plus is a high capacity control solution for demanding single-channel, single-station materials tests. It supports many hardware and software options allowing you to:

- ▶ Take advantage of a wide array of proven MTS test application software to run a wide variety of tests
- ▶ Customize and automate test procedures
- ▶ Acquire and store test data
- ▶ Generate test reports
- ▶ Network to other PCs
- ▶ Monitor test status from remote PCs



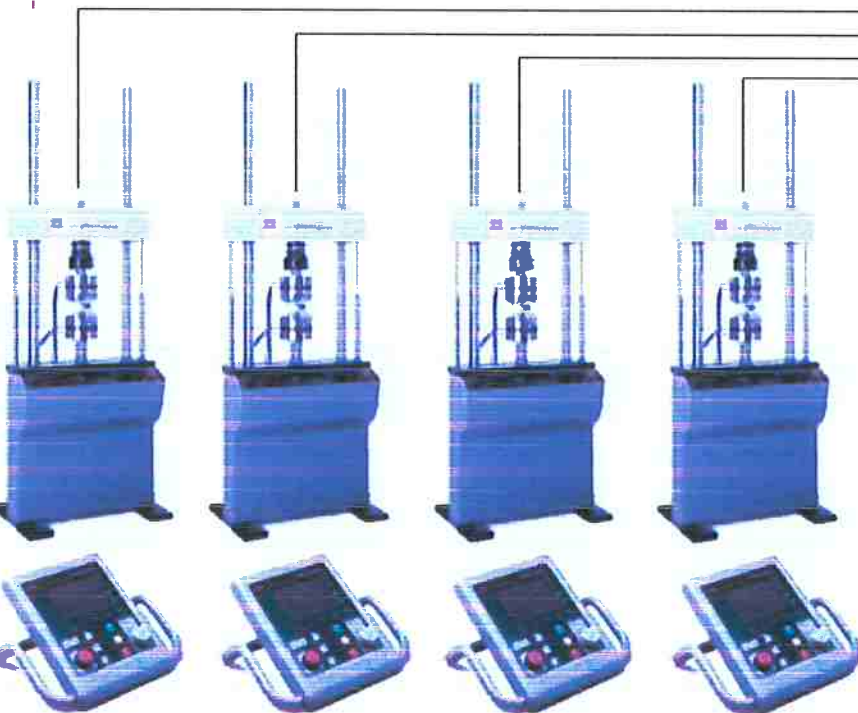
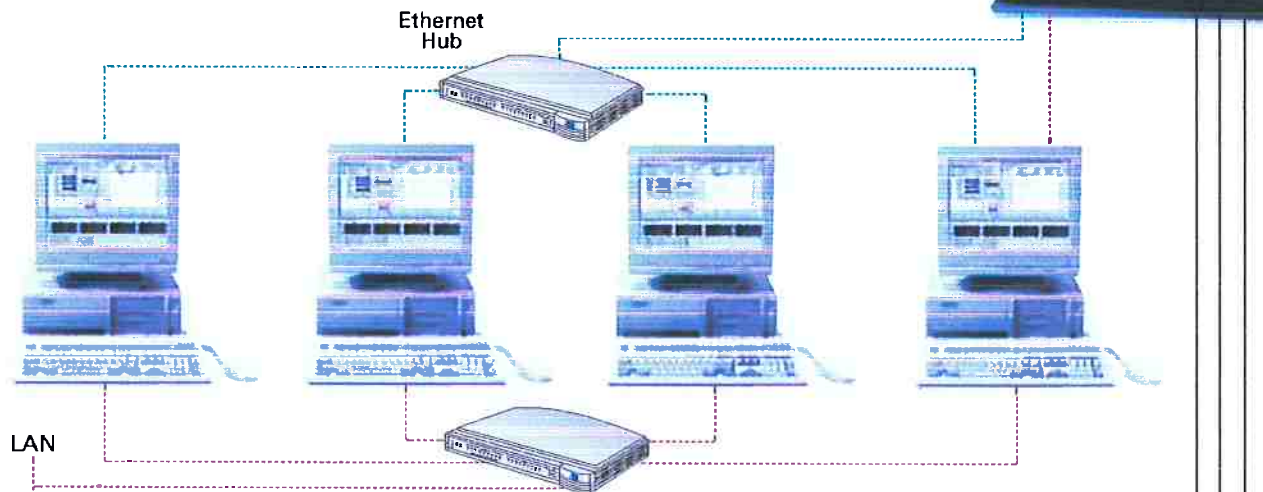
Test Systems Tailored to Your Needs

MTS 810 systems are highly integrated testing packages that can be configured to meet your exact testing needs. Each includes a Model 318 load unit with integrally mounted actuator and servovalves, a hydraulic power unit, and the MTS FlexTest SE or GT control system.

The FlexTest SE and GT control system includes the MTS Model 793 system software running on a personal computer, the digital controller, and (optionally) a remote station control panel. These function together to provide you with fully automated test control. Optional application software packages let you further tailor the system

to automate most any standard or custom test procedure.

System performance is tailored to your requirements by selecting from a variety of load frame force capacities, servovalve flow ratings, and pump capacities. You, in turn, can choose from a broad range of MTS testing accessories—including grips, fixtures, extensometers, furnaces and load cells—to fine-tune your system to your particular test requirements.



FlexTest GT

The FlexTest GT is a proven control solution for performing complex materials and component testing. Capable of supporting up to 8 channels and multiple stations, the FlexTest GT enhances productivity by allowing you to manage several stations from one PC screen. Or, if you prefer, the PC-per-Station option enables you to employ additional PCs so different operators can run their respective test stations without having to share a PC. This option also makes it possible to support test stations in different locations. The FlexTest GT runs with MTS 793 software and a multitasking Windows™ operating system, allowing you to take advantage of the full array of proven MTS test application software.

The Flexibility to Perform Most Any Material or Component Test

Fatigue life studies

MTS 810 systems have been employed in fatigue life studies on nearly every type of material—from titanium to advanced ceramics to plastics. A very stiff load frame design, integral actuator, and precise, laser alignment minimize errors from bending strains, while TestStar digital control algorithms and patented MTS grips assure consistent loading and repeatable results.



If you run standard HCF or LCF tests, our cyclic fatigue test software package can save you time and increase your testing efficiency. It includes templates for fast, accurate execution of ASTM E606 Room Temperature, Isothermal LCF tests, and E466 HCF test standards. In addition, an Advanced LCF test supports transition from LCF to load-controlled HCF testing so you can collect critical LCF data, then quickly test to failure.

For non-standard tests, our MultiPurpose TestWare package provides powerful capabilities for designing your own test procedures.

Crack propagation and fracture mechanics studies

The 810 system is ideal for crack propagation and fracture mechanics studies. A large test space accommodates a variety of test samples. And a full range of MTS grips, bending fixtures, COD gages, and extensometers assures precise test control and data acquisition.



crack growth test software lets you easily set up and run tests to accurately measure crack growth rate. It includes ΔK control, for better and more evenly distributed data, as well as computer compliance and visual measurement of crack length.

Our fracture toughness test software provides templates for ASTM E399 K_{Ic} , K-R curve, and J_{Ic} fracture toughness test standards. It includes routines to quickly and accurately precrack your specimens. Parameter changes are supported during precracking and test execution for added flexibility.

MTS offers two application software packages specifically for crack growth studies. Our fatigue

Tensile, compression, and bend testing

The MTS 810 system can perform monotonic tests, such as tension, compression, and bending, as well as creep and fatigue. All of these tests can be run in load control and strain control (using an extensometer as the control device), as well as in displacement control. In fact, with an appropriate low-force load cell, the system is capable of accurately testing



the properties of soft biomaterials. And, the high actuator velocity achievable with servohydraulics gives the 810 the capability to run tests over a wide range of strain rates.

The MTS TestWorks 4 package offers an array of features to make basic monotonic testing fast and productive. The Define section lets you change the test flow to easily create new tests. A built-in calculation library includes formulas for most applicable ASTM, ISO, and DIN standards, or you can create your own. A built-in graphics package lets you choose how data is displayed and allows you to input your own judgement for calculated properties such as modulus, yield, and break.

Asphalt, soil, and geomechanics testing

The MTS 810 system can be configured for the precise characterization of soil and asphalt materials used in the construction of roadways and airfields. Compatible with both research and production testing environments, it will allow you to quickly obtain accurate test results. The system can be used to measure the resilient modulus and creep proper-



ties of soils and asphalt mixtures. It can also be used to test the strength of geotextiles.

Optional accessories available from MTS include test fixtures, instrumentation, triaxial cells, and environmental chambers specifically developed for asphalt and soil tests.

Testing in extreme environments

MTS offers a complete line of accessories for testing in the harshest of environments. For example, this MTS Model 653.02 high-temperature furnace, equipped with MTS high-temperature grips and extensometer, is setting new standards for tensile testing at temperatures up to 1400°C. This new furnace design lets you heat your specimen



without heating the grips, thus accelerating the process of testing a large batch of samples.

Whether your needs are standard or demanding, we can equip your 810 material testing system with the grips, fixtures, extensometers, furnaces, load cells, and other environmental control or sensing devices you need for your test. And we have the expertise on staff to tailor them into a testing system that functions as a fully integrated testing package.

Component testing

The 810 system can be used for fatigue life and durability studies on a wide variety of components, including switches and connectors, biomedical implants, automotive parts, fasteners, springs, appliance parts, tools, sporting equipment, etc. Using MTS servohydraulic technology for these applications results in better control and repeatability at higher test frequencies than



mechanical or pneumatic equipment can provide.

The 810 system is capable of applying both static loads and cyclic loads with amplitude control. If more complex loading is required, you can take advantage of our optional MultiPurpose TestWare package to create unique solutions specific to your test activity. Examples include tests with block loading, spectrum loading, or a combination of monotonic and cyclic loads.

MultiPurpose TestWare has great flexibility, enabling you to quickly create your own tests with any sequence of command generation and data acquisition. New test requirements can be satisfied in a few minutes by designing a new test and saving it for future use.

The FlexTest SE & GT Control Options

MTS 810 systems include your choice of FlexTest SE or GT digital servocontrollers. The Controllers are reliable, flexible and easy-to-use and are designed to address the full spectrum of material and component testing needs. With a common set of proven and reliable hardware and software, and capabilities ranging from one to eight channels and one to four stations, this family of digital controllers provides the pricing flexibility to accommodate a broad range of budgets, as well as a comprehensive set of features for performing the material testing application specific to your particular testing needs.

Both FlexTest GT and PC driven FlexTest SE controllers employ proven MTS Model 793 Software - used daily on thousands of MTS controllers worldwide. This powerful control package features a Windows multi-tasking operating system that allows you to define new tests, acquire data, and analyze results of prior and current tests while other tests are still in progress. Model 793 Software makes it easy to integrate your FlexTest control system into your organization's computer networks and to share data with other networked equipment. It also allows you to take advantage of the full array of proven MTS test application software.

FlexTest SE Plus

A high capacity control solution for more demanding single-channel, single-station material and component testing

The PC driven FlexTest SE Plus digital controller delivers real-time closed-loop control of demanding single-channel, single-station tests. FlexTest SE Plus hardware includes a high-power VME processor capable of yielding a 6kHz update rate, a single 2- or 3-stage valve driver, up to 5 digital universal conditioners (DUCs), an encoder interface board, and a set of 6 auxiliary input channels. The Plus model is also capable of supporting a temperature control system via serial communications. Additional capabilities include:

- ▶ Bumpless start
- ▶ Hydraulics-on mode-switching
- ▶ Auto-zeroing
- ▶ Auto-tuning

Typical FlexTest SE Plus Configuration

- ▶ One valve driver (2-stage or 3-stage)
- ▶ Two digital universal conditioners (DUCs)
- ▶ One analog input - for data signal or external program
- ▶ Three analog outputs
- ▶ Digital inputs and outputs for interlock and user-defined use

Popular Options

- ▶ Basic TestWare, MultiPurpose TestWare, TestWorks 4, and Fatigue and Fracture Software
- ▶ Up to three additional DUCs
- ▶ Set of six additional A/D inputs
- ▶ On-line scope
- ▶ Adjustable arm or stand

- ▶ Saving and restoring PID settings
- ▶ On-line scope to observe signals
- ▶ Digital display of measurements
- ▶ Full-range calibrations
- ▶ Integrates with third party data acquisition and program generation

Integral Front Panel Controls

The FlexTest SE model features front panel system controls that supplement the PC interface to facilitate convenient test monitoring and specimen handling, eliminating the need for an additional Remote Station Control pendant.

This intuitive front panel combines a sharp, multi-color display with easy-to-read graphics and an array of controls including dedicated menu keys, a keypad, HPS, HSM, program run-stop-hold, E-stop, and a rotary adjustment knob.



Portability and Convenience

Lightweight FlexTest SE controllers are designed for portability, featuring a multiposition handle to facilitate easy transport to other test locations. Additionally, there are a variety of ways to position a FlexTest SE controller either on or near a load frame: it can be secured to an adjustable arm attached to the load frame itself; mounted on a portable, adjustable stand near the load frame; or it can simply be placed on a table or cart.

FlexTest GT

A proven control solution for complex multichannel, multistation material and component testing

The FlexTest GT digital controller features the power and flexibility to deliver high speed, real-time closed-loop control, data acquisition, function generation, and transducer conditioning for multichannel, multistation applications, allowing several test systems to be driven from one controller. It accommodates up to 32 modules that can be distributed among 8 channels and 4 stations as required, with the option to add 16 user programmable digital inputs and digital outputs.

Hardware Driven Flexibility

The flexible design of the FlexTest GT lets you reconfigure the system easily as your needs change. By adding hardware modules you can expand your system's capabilities and customize it for a wide range of tests. This includes the ability to use externally conditioned signals as control modes. In addition, you can use D/A signals as low-rate control channels for signals like pressure or temperature.

Portable Remote Station Control

The optional Remote Station Control (RSC) provides a convenient, portable control interface for carrying out simple operations, such as specimen handling and test setup. The FlexTest GT requires an RSC to comply with CE safety standards for material testing applications. The RSC simplifies many operations, including operating the hydraulic controls, moving the actuator to mount specimens, and starting and stopping tests. In addition



to hydraulic controls and an interlock indicator, it provides run, stop, and hold controls; a display screen and function keys; and an actuator positioning control for specimen loading. Once a specimen is loaded, transducers can be auto-zeroed from the computer, or from the RSC. For multichannel systems the actuator command toggles between axes. Multistation configurations require a dedicated RSC per station. The lightweight RSC can be located on the PC table or cart if this is near the load frame, or it can be mounted on a stand by the load frame if the PC is not located nearby.

Remote Station Control Option



Typical FlexTest GT Configurations

- ▶ One valve driver (2-stage or 3-stage) per control channel
- ▶ Two digital universal conditioners (DUCs) per control channel
- ▶ Digital inputs and outputs for HSM and HPU interlock

Popular Options

- ▶ Basic TestWare, MultiPurpose TestWare, TestWorks 4, and Fatigue and Fracture Software
- ▶ Additional DUCs
- ▶ Auxiliary A/D inputs
- ▶ Set of 16 digital inputs and 16 digital outputs for user-defined operation

Components of the 810 System

Load Unit Assembly

MTS Model 318 Load Unit Assemblies are utilized in the 810 system, the product of more than 30 years of MTS design experience. They offer unmatched performance for precise material and component testing.

Accuracy

- ▶ Superior axial and lateral stiffness are achieved through an integral actuator design, stiff, but low-mass crosshead, and special force transducers.
- ▶ Load unit alignment accuracy is attained through precision-machined columns and actuator rod, factory assembly, and alignment using a laser.
- ▶ MTS load cells are designed to be highly accurate, with low hysteresis and long-term stability.
- ▶ An LVDT is mounted co-axially with the actuator for precise actuator position measurement.

Performance

- ▶ The light-weight crosshead and stiff load frame components reduce load frame deflections and increase the performance envelope of the system.
- ▶ MTS servovalves offer the highest response and most accurate control. They come in a variety of flow capacities to match your testing needs.

- ▶ Hydraulic service manifolds with close-coupled accumulators improve the response of the actuator. They are available in several configurations, one of which provides smooth ramping of system pressure from low to high for precise control when turning on the system.
- ▶ Load unit stiffness and extremely low friction actuators ensure the highest possible test control and resolution, making these systems ideal for both dynamic and monotonic testing applications.
- ▶ With proper operation and maintenance, your load frame will provide many years of reliable service.

Flexibility

- ▶ Hydraulic lifts and locks allow the crosshead to be easily positioned. Lift and lock controls are placed right where you need them.
- ▶ No special mounting or foundation is required for the load unit.
- ▶ Configure the unit to suit your needs by selecting actuator stroke length, force capacity, servovalve, and hydraulic performance combinations.
- ▶ All MTS load units are fully fatigue rated.
- ▶ Monotonic tests with unbeatable accuracy can be performed on the same load unit used for dynamic test applications.

Hydraulic Power Unit

MTS has a hydraulic power unit (HPU) that fits your needs. We offer units with flow ratings from 5.6 to 114 Lpm (1.5 to 30 gpm) or even higher if you need it.

The HPU most commonly used with the 810 test system is the SilentFlo™ model 505.07. This super-quiet pump operates at an amazingly low 58 dB(A). That's as quiet as your typical office photocopier—no pump room required!

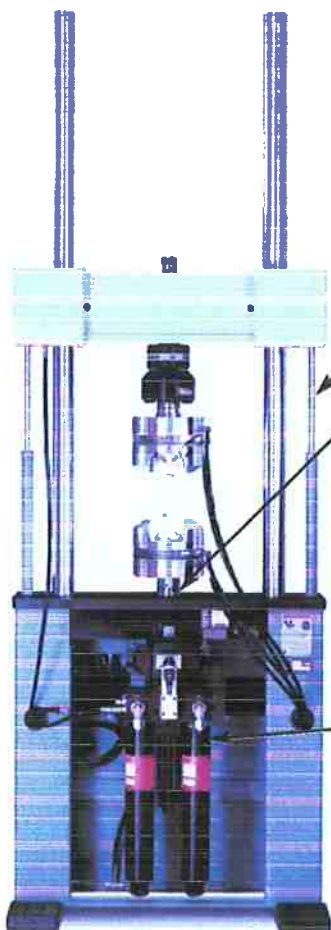
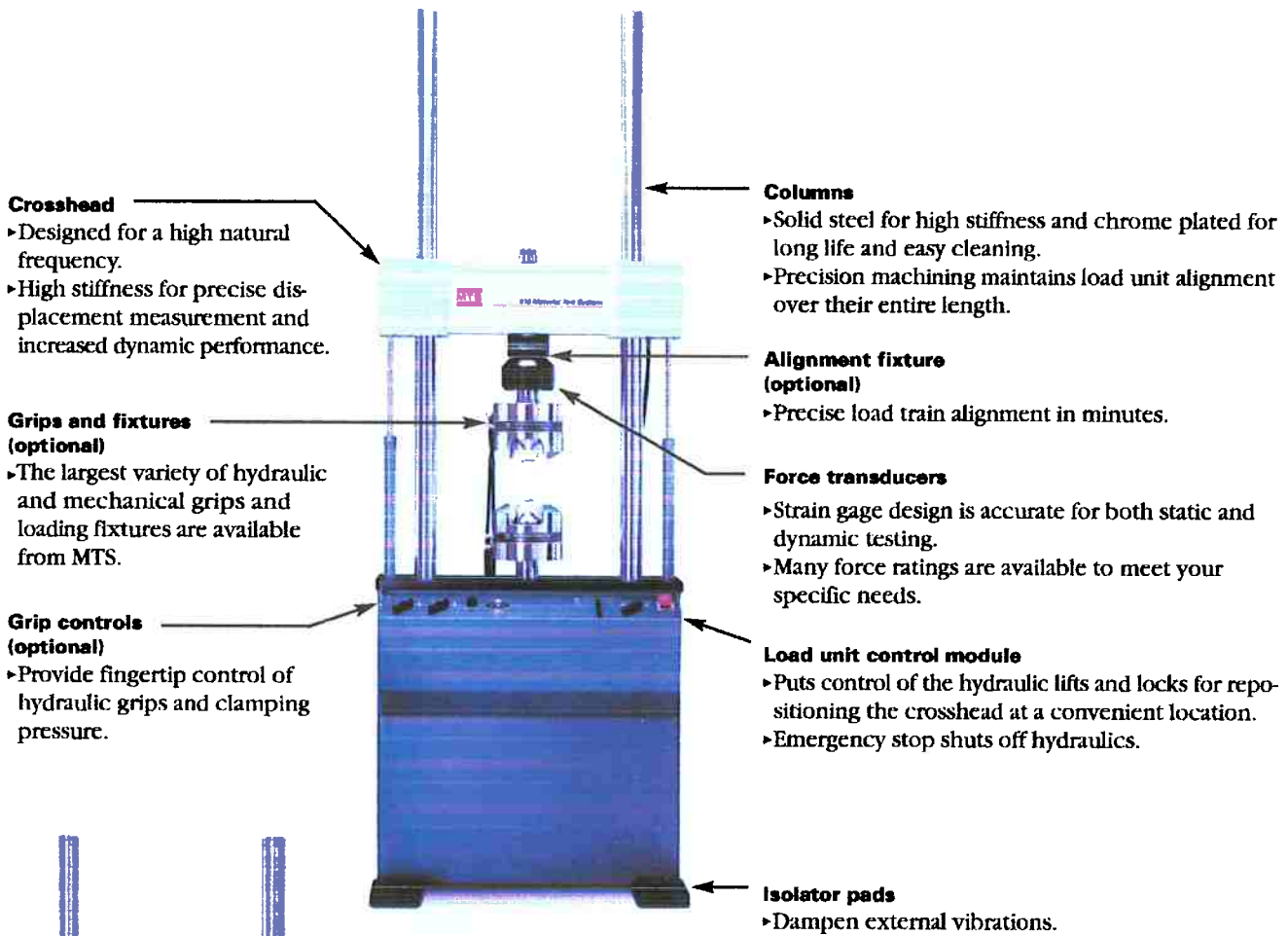
The SilentFlo 505.07 HPU provides continuous pressure of 210 bar (3000 psi) and a flow rating of 26.5 Lpm (7 gpm). The SilentFlo HPU is a fully integrated system including not only the hydraulic system components but also fuses, electrical disconnect, motor starters, and control logic. Simply connect electric power and water to the unit and it's ready to run.

SilentFlow HPUs feature advanced systems and integrated controls that make them easy to use. They utilize variable displacement pump units for maximum electrical efficiency, automatic interlocks that protect against low oil level and high



The SilentFlo 505.07 hydraulic power unit

temperature conditions, and 3-micron return line filtration designed specifically for servohydraulic testing system use.



Hydraulic lifts and locks

- ▶ Allow easy repositioning of the crosshead and fast crosshead locking/unlocking.

Hydraulic actuator

- ▶ Integrally mounted in the base plate to shorten the force train for increased stiffness, better side load capability, and more accurate test results.
- ▶ Available in a variety of force ratings and stroke lengths.
- ▶ Includes a co-axially mounted displacement transducer for precision displacement control and measurement.

Actuator manifold

- ▶ Provides mounting for up to two servovalves of equal or different sizes.
- ▶ Mounted on the actuator for the highest possible response and most accurate test control.
- ▶ Available with close coupled accumulators that help minimize hydraulic pressure fluctuations for improved test control and data accuracy.

Options for MTS 318 Load Unit Assemblies

- ▶ Air bag vibration isolators
- ▶ Alignment adjustment fixtures
- ▶ Extended length columns
- ▶ Actuator stroke lengths
- ▶ Test area guard
- ▶ Crosshead actuator mounting
- ▶ Hydrostatic actuator bearings
- ▶ Actuator anti-rotate
- ▶ Low force load transducers
- ▶ Low force actuator/high stiffness load unit combinations
- ▶ Actuator rod bellows

System Service from MTS

A comprehensive set of system services is included with each 810 material testing system to ensure that manufacturing and installation go according to plan. These services include:

- ▶ A trained MTS technician performs installation and operational checkout of the system at your site. Informal, one-on-one training on operation and maintenance occurs during this time.
- ▶ A twelve month system warranty is included. This warranty starts from the date of acceptance or 15 months from the date of shipment, whichever occurs first. Extended warranty contracts are also available.
- ▶ System documentation is provided with each system, which includes hardware, software, and user information.



Additional Services to Suit Your Needs

Field service



A worldwide network of trained MTS service representatives assure ongoing support for your system. A variety of service contracts are available, including calibration, preventative maintenance, extended system warranty and software maintenance. In addition, in the U.S. or Canada, a single toll-free number (listed on the back of this brochure) connects you with a host of MTS support services, including: hardware technical support, sales and application engineering support, order services, software support and scheduling field support. These same services are available outside North America by calling your local MTS representative or our general number.

Training

We provide extensive, regularly scheduled training programs—at MTS or your facility—to help you get the most out of your investment. These include classes on operation and maintenance of system hardware and software.

Maintenance Enhancement and Support

Our optional Maintenance, Enhancement, and Support contract makes it easy and cost-effective for you to keep pace with our rapidly changing software technology.

Systems are CE certified and meet other relevant European and U.S. standards.  

Basic Specifications

Load unit specifications

Model	318.10		318.25		318.50	
Force capacity	100 kN	22 kip	250 kN	55 kip	500 kN	110 kip
Column spacing	534 mm	21 in	635 mm	25 in	762 mm	30 in
Test space*	1296 mm	51 in	1625 mm	64 in	2108 mm	83 in
Stiffness†	2.6 x 108 N/m	1.5 x 106 lb/in	4.3 x 108 N/m	2.4 x 106 lb/in	7.5 x 108 N/m	4.3 x 106 lb/in
Weight	540 kg	1100 lb	960 kg	2000 lb	1900 kg	3900 lb

*Test space is the maximum distance between the load cell and the actuator with the actuator fully retracted.

†Determined at each load unit's full fatigue rating with its crosshead raised 1270 mm (50 in.) above the base plate.

Hydraulic power supply specifications

Model	505.07		505.11		505.20		505.30	
	lpm	gpm	lpm	gpm	lpm	gpm	lpm	gpm
At 50 Hz	22.7	6	41.6	11	62.5	16.5	100.7	26.6
At 60 Hz	26.5	7	41.6	11	75	20	113	30

Servo valve specifications

Model	252.21	252.22	252.23	252.24	252.55
Flow rating lpm (gpm)	4.0 (1.0)	9.5 (2.5)	19 (5.0)	37 (10)	56 (15)

Hydraulic actuator manifold specifications

Model	298.10	298.11	298.12
Station pressure control	none	off/high	off/low/high
Accumulators	1 liter (1 qt) pressure and return	1 liter (1 qt) pressure and return	1 liter (1 qt) pressure and return

FlexTest SE and FlexTest GT Controllers

	FlexTest SE				FlexTest GT
	BASIC with 2kHz processor	BASIC with 6kHz processor	PLUS	2-Channel	
PC Automation	Opt ^A	Opt ^{A,B}	Yes	Yes	Yes
Max update rate	2kHz	6kHz	6kHz	6kHz	6kHz
Built-in A/D inputs	1	1	1	1	0
Built-in D/A outputs	3	3	3	3	0
Valve Drivers	1	1	1	2	up to 8
Conditioners	up to 3 ^C	up to 3 ^C	up to 5	up to 6 ^C	up to 24 ^C
DIO	4 pair ^D	4 pair ^D	4 pair ^D	4 pair ^D	Opt ^E
Basic TestWare	Opt ^F	Opt ^F	Yes	Yes	Yes
MultiPurpose TestWare	Opt ^F	Opt ^F	Opt	Opt	Opt
Testworks 4	No	Opt ^F	Opt	Opt	Opt
Fatigue & Fracture	No	Opt ^F	Opt	Opt	Opt
Remote Station Control	No	No	No	No	Opt
Remote Setpoint Adjust	Opt ^{F,G}	Opt ^{F,G}	Opt ^G	Opt ^G	Opt ^G
Temp Control ^H	No	Opt ^F	Yes	Yes	Yes

A Can upgrade with PC Automation in the field.

B If PC automation is included use PLUS or 2-Channel model column information.

C Pending other hardware options selected.

D One pair dedicated to hydraulic interlock, three pair definable by user.

E Set of 16/16 Digital Inputs/Outputs are available as an option.

F Requires PC automation.

G Requires available IO Carrier slot and encoder interface board.

H Via serial communications to appropriate temperature control system, for non-TMF applications.



Solutions that start with you

REGIONAL BUSINESS CENTERS

THE AMERICAS

MTS Systems Corporation
14000 Technology Drive
Eden Prairie, MN 55344-2290
USA
Toll Free 1-800-944-1687
Fax: 1-952-937-4515
E-mail: info@mts.com
Internet: www.mts.com

MTS Systems Corporation
Nano Instruments Innovation Center
1001 Larson Drive
Oak Ridge, TN 37830-8014
USA
Telephone: 1-865-481-8451
Fax: 1-865-481-8455
E-mail: nano@mts.com

EUROPE

MTS Systems
58, rue Auguste Perret
Europarc
94000 Créteil
France
Telephone: 33 (1) 58 43 90 00
Fax: 33 (1) 58 43 90 01
E-mail: contact.france@mts.com

MTS Systems GmbH
Hohentwielsteig 3
14163 Berlin
Germany
Telephone: 49-30-81002-178
Fax: 49-30-81002-100
E-mail: euoinfo@mts.com

MTS Systems S.R.L.
Corso Cincinnato, 228/b
I-10151 Torino
Italy
Telephone: 39-011-45175-11
Fax: 39-011-45175-00.01
E-mail: mtstorino@mtsitaly.com

MTS Systems Norden AB
Södra Långebergsgatan 16
SE-421 32 Västra Frölunda
Sweden
Telephone: 46 31 68 69 99
Fax: 46 31 68 69 80
E-mail: norden@mts.com

MTS Systems Ltd. UK
Brook House
Somerford Court
Somerford House
Cirencester
Glos. GL7 1TW UK
Telephone: 44-1285-648800
Fax: 44-1285-658052

ASIA/PACIFIC

MTS Japan—Tokyo
2-12-3 Midori Sumida-ku
Tokyo 130-0021
Japan
Telephone: 81-3-5624-6101
Fax: 81-3-5624-6106
E-mail: mtsj-info@mts.com

MTS Systems (Korea) Inc.
5th Floor, Core Building
8-1 Sunae-Dong, Bundang-Gu
Seongnam City,
Gyeonggi-Do 463-825,
Korea
Telephone: 82-31-714-7151
Fax: 82-31-714-7198

MTS Systems (China) Inc.
Unit 23-02, Landmark Bldg.
No. 8 North Dong
San Huan Road
Chaoyang District
Beijing 100004, PRC
Telephone: 86-10-65900931
Fax: 86-10-65900942
E-mail: mtsbj@163bj.com

MTS Systems (Hong Kong) Inc.
Rm 602, Golden Gate
Commercial Building
136-138 Austin Road
Tsim Sha Tsui,
Kowloon
Hong Kong
Telephone: 852-2301-2200
Fax: 852-2722-7240
E-mail: anthony@mtshk.com.hk

SALES AND SERVICE LOCATIONS

NORTH AMERICA

Canada
Laval, Quebec
Ottawa, Ontario
Toronto, Ontario
Windsor, Ontario
Mexico
Mexico City
Monterrey
United States
Akron, OH
Albany, NY
Albuquerque, NM
Alexandria, IN
Atlanta, GA
Austin, TX
Berlin, NJ
Boston, MA
Celina, OH
Charlotte, NC
Chicago, IL
Cincinnati, OH
Dallas/Fort Worth, TX
Dayton, OH
Denver, CO
Detroit, MI
Enfield, CT
Fredericksburg, VA
Hollister, CA
Houston, TX
Huntsville, AL
Huntsville, OK
Los Angeles, CA
Loveland, CO
Minneapolis, MN
Newark, NJ
Oak Ridge, TN
Peoria, IL
Philadelphia, PA
Phoenix, AZ
Pittsburgh, PA
Research Triangle
Park, NC
Richmond, VA
San Francisco, CA
Seattle, WA
St Louis, MO
Wichita, KS
Wilmington, DE

CENTRAL AND SOUTH AMERICA

Argentina
Buenos Aires
Brazil
Sao Paulo
Chile
Santiago
Colombia
Bogota
Costa Rica
San Jose
Ecuador
Quito
Peru
Lima
Venezuela
Caracas

EUROPE

Bulgaria
Sofia
Czech Republic
Brno
Prague
France
Le Chesnay
Paris
Germany
Berlin
Delmenhorst
Munich
Rastatt
Greece
Athens
Hungary
Budapest
Italy
Pianezza
Torino
Netherlands
Gouda
Poland
Warsaw
Portugal
Amadora
Póvoa De Santa Iria
Romania
Bucharest
Russia
Moscow
Spain
Barcelona
Madrid
Sweden
Askim, Gothenburg
Switzerland
Hallau
Turkey
Istanbul
United Kingdom
Northamptonshire
Stroud, Gloucester
Surrey

AFRICA AND THE MIDDLE EAST

Egypt
Heliopolis
Israel
Tel Aviv
Jordan
Amman
Kuwait
Kuwait City
Morocco
Casablanca
Oatar
Doha
Saudi Arabia
Dhahran
South Africa
Johannesburg
Tunisia
Tunis
United Arab Emirates
Dubai

ASIA/PACIFIC

Hong Kong
Hong Kong
India
Bombay
Indonesia
Jakarta
Japan
Hiroshima
Nagoya
Tokyo
Malaysia
Selangor
People's Republic of China
Beijing
Shanghai
Pakistan
Karachi
Philippines
Manila
Republic of Korea
Daejeon
Seoul
Singapore
Singapore
Taiwan
Kaohsiung
Taichung
Taipei
Thailand
Bangkok

AUSTRALIA AND NEW ZEALAND

Australia
Melbourne
Sydney

MTS, TestWare, and TestWorks are registered trademarks, and FlexTest and SmartFlo are trademarks of MTS Systems Corporation. RTM No. 211177. Windows is a trademark of Microsoft Corporation.

MTS Systems Corporation
14000 Technology Drive
Eden Prairie, MN 55344-2290 USA

ISO 9001 CERTIFIED

©2004 MTS SYSTEMS CORPORATION
100-027-556a 810 Material PRINTED IN U.S.A. 3/04