RONALD LESLEY PLAUT

ASPECTOS RELATIVOS À CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE COMPOSTOS ELASTOMÉRICOS E MODELOS MATEMÁTICOS PARA A ÁREA DE CONTATO DE PRENSAS ÚMIDAS DE MÁQUINAS DE PAPEL

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para concurso de Professor Livre Docente junto ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1999

RONALD LESLEY PLAUT

ASPECTOS RELATIVOS À CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE COMPOSTOS ELASTOMÉRICOS E MODELOS MATEMÁTICOS PARA A ÁREA DE CONTATO DE PRENSAS ÚMIDAS DE MÁQUINAS DE PAPEL

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para concurso de Professor Livre Docente junto ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1999

AGRADECIMENTOS

O constante apoio recebido da 1001 - Indústria de Artefatos de Borracha Ltda., na pessoa de seu diretor-presidente, Sr. Romeu F. Leite Jr., bem como de todos funcionários que, de maneira direta ou indireta, vêm contribuindo para a melhoria da qualidade e aprofundamento dos conhecimentos na complexa ciência-arte de revestimentos elastoméricos (mesmo dentro de um quadro econômico complexo a nível nacional e internacional), deve ser reconhecido e agradecido.

A constante participação e discussão de diferentes aspectos mecânicos (vibração) com o Prof. Dr. José Sotelo Jr. (EPUSP- Mecânica); elementos finitos (bem como extensometria) com o Prof. Dr. Odair Caltabeloti (EPUSP-Naval), foram fundamentais para o desenvolvimento e aprofundamento no entendimento dos diferentes aspectos relativos à interação entre o comportamento de compostos elastoméricos e máquinas, em particular, prensas úmidas de máquinas de papel.

A imensa paciência de minha esposa, Hirma, pela cuidadosa revisão das progressivas edições deste trabalho e de sua forma final, à qual dedico esta Tese.

RESUMO

Na seção de prensas úmidas de máquinas de papel, é contínua a preocupação com a melhoria da qualidade superficial, bem como interna dos diferentes tipos de papel, principalmente para os constantes aumentos de velocidade periférica, temperatura e de pressão (e impulso), demandando novos desenvolvimentos em termos de equipamentos, materiais e processos.

Prensas úmidas são um sistema dinâmico complexo formado por : cilindro metálico- revestimento elastomérico-feltro- papel. Dentro deste sistema o revestimento elastomérico visa, entre vários aspectos, propiciar principalmente uma distribuição uniforme da pressão no arco de contato (*nip*).

Este trabalho descreve os principais aspectos relativos ao "estado-da-arte" do projeto e construção de revestimentos para prensas úmidas de papel , características intrínsecas e aspectos de processo relativos a revestimentos elastoméricos e correspondentes propriedades mecânico-dinâmicas.

Estas propriedades, para os complexos compostos elastoméricos empregados em revestimentos de prensas úmidas , são analisadas em profundidade em termos da caracterização dinâmica dos compostos, na faixa de 1 a 30 P&J de dureza.

Modelos matemáticos analíticos e numéricos (método de elementos finitos) para materiais elastoméricos de característica não-linear, aplicados para a região de contato destas prensas , são analisados e os resultados calculados são validados, relativos à distribuição da pressão (medida), para o caso real de uma prensa tipo "Jumbo" , dotada de "furos cegos", duplamente feltrada .

A interface metal-composto elastomérico é analisada em termos microestruturais e de tensões térmicas residuais, em particular para um composto elastomérico de elevada dureza.

ABSTRACT

In the wet section of paper machine presses there is a continuous concern about surface and internal paper quality mainly due to the ever increasing speed, temperature and pressure (and impulse) , demanding new developments in terms of equipment, materials and processes.

Wet presses are a complex dynamic system formed by : metal roll- elastomeric covering-felt-paper . Within this system the elastomeric covering has various functions, the main one being to provide uniform presure distribution in the nip.

This work describes the main aspects related to the "state-of-the-art" of the project and construction of coverings for paper wet presses , intrinsic characteristics and process related aspects of elastomeric coverings and corresponding dynamic properties .

These properties, related to the complex elastomeric coverings employed in wet presses , are analyzed in depth for compounds in the 1 to 30 P&J hardness range.

Analytic and numerical models (FEM) for non-linear elastic materials, applied in the nip region, are analyzed and the calculated results are validated relative to the pressure distribution (measured) for a double-felted, blind-drilled "Jumbo"press.

The metal-elastomeric compound interface is analyzed in terms of microstructure and thermal residual stresses, in particular for a hard elastomeric compound.

ÍNDICE

Resumo i

Abstract iii

Índice iv

Índice de Figuras vii

Índice de Tabelas xiii

1 INTRODUÇÃO 1

2 OPERAÇÃO DE PRENSAGEM DE PAPEL 4

2.1- Introdução 4

2.2- Fundamentos da pressão no "nip" 8

2.3- Nip entre cilindros revestidos 11

2.4- Fatores que influem na remoção de água na prensa de papel 27

3 ASPECTOS GERAIS DE VIBRAÇÃO EM PRENSAS DE MÁQUINAS DE PAPEL 31

4 REVESTIMENTOS ELASTOMÉRICOS 36

4.1- Introdução 36

4.2- Elastômeros: sua classificação 45

4.3- Tipos de elstômeros 47

4.4- Compostos elastoméricos 48

4.5- Vulcanização 66

4.6- Propriedades físicas (convencionais), em elastômeros 69

4.7- Efeitos da vulcanização sobre as propriedades físicas do produto vulcanizado 72

4.8- Parâmetros relacionados ao processo de vulcanização. 74

4.9- O estado elastomérico 77

4.10- Viscoelasticidade 78

4.11- Os modelos de mola e amortecedor 83

5 PROPRIEDADES MECÂNICO-DINÂMICAS EM MATERIAIS ELASTOMÉRICOS 86

6 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)APLICADO AOS COMPOSTOS ELASTOMÉRICOS..... 93

6.1- Introdução..... 93

6.2- Metodologia.do FEM..... 94

6.3- Vantagens e limitações do FEM 95

6.4- Estágios da resolução do FEM..... 96

6.5- O sistema COSMOS/M de análise por FEM..... 97

6.6- Aplicação do FEM em compostos elastoméricos..... 99

7 ARCO DE CONTATO (NIP)- MODELAMENTO 101

8 ASPECTOS GERAIS RELATIVOS À ADESÃO METAL / COMPOSTO ELASTOMÉRICO..... 106

8.1- Mecanismos..... 106

8.2- Requisitos básicos..... 107

8.3- Falhas 109

8.4- Interface metal / elastômero..... 109

9 TENSÕES TÉRMICAS EM REVESTIMENTOS..... 111

10 OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO 113

11 EQUIPAMENTO E CARACTERÍSTICAS DE ENSAIO DINÂMICO DE ELASTÔMEROS..... 115

11.1- Equipamento..... 115

11.2- Características do ensaio..... 117

12 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO 120

12.1- Corpo-de-prova de tração..... 121

12.2- Ensaios de compressão..... 124

12.3- Anel elastomérico..... 127

12.4- Ensaios de corpos-de-prova em diferentes durezas .. 132

12.4.1- Dureza de 30 P&J..... 132

12.4.2- Dureza de 12 P&J..... 137

12.4.3- Dureza de 1 P&J..... 140
12.5- Coeficiente de Poisson..... 149
12.6- Ensaios de caracterização de revestimentos com furações..... 152
12.7- Avaliação do *nip* em uma prensa úmida - Modelo matemático e sua validação 159
12.8- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)..... 179
13 COMENTÁRIOS ADICIONAIS..... 190
14 CONCLUSÕES..... 200
Referências bibliográficas..... 205

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Evolução da drenagem na máquina de papel..... 4
Figura 2.2- Variáveis básicas que afetam a remoção de água na prensa úmida 6
Figura 2.2.1-Ilustração das quatro fases da prensagem..... 10
Figura 2.3-Sistema: rolo metálico-revestimento-feltro-papel..... 11
Figura 2.4- Efeito da presença do revestimento..... 12
Figura 2.5- Carga linear, pressões e largura de *nip* em diferentes tipos de prensas..... 14
Figura 2.6- Distribuição de pressões e coroamento de cilindros..... 15
Figura 2.7- Efeito do achatamento entre cilindros..... 16
Figura 2.8- Curva de coroamento semelhante à curva cosseno 16
Figura 2.9- Abaulamento para ângulo θ = 70 graus..... 17
Figura 2.10- Medição e interpretação de impressão de *nip* estático..... 18
Figura 2.11- Metodologia para efetuar a medição dinâmica do *nip*..... 19
Figura 2.13- Rolos de coroamento hidráulico..... 20
Figura 2.14- Drenagem e curva de pressão no *nip* com "furo cego"..... 21
Figura 2.15- Seção transversal do sistema de drenagem 22
Figura 2.16- Largura do *nip* ,carga linear e presença do feltro..... 22
Figura 2.17- Planta e seção transversal do perfil de"furo cego"..... 24
Figura 2.18- Planta e seção transversal do revestimento da prensa de sucção.. 25
Figura 2.19- Distribuição da pressão no *nip* de prensa de sucção..... 26
Figura 2.20- Planta e seção transversal de prensa ranhurada..... 27
Figura 2.21- Efeito do impulso sobre a % a seco na saída do *nip* 28
Figura 2.22- % a seco e temperatura da folha..... 29
Figura 2.23- Parâmetros operacionais e % a seco 29
Figura 2.24- Relação entre pressão e tempo de residência e índice de umidade. 30
Figura 3.1- Modelagem do sistema 33
Figura 3.2- "Assinatura" de rolo sem revestimento..... 35
Figura 3.3- "Assinaturas "de rolos com revestimento 35

Figura 4.1- Classificação geral dos polímeros..... 36
Figura 4.2- Variação do volume específico com a temperatura..... 40
Figura 4.3- Dependência das propriedades do polímero - Tm e Tg e Mm..... 41
Figura 4.4- Módulo elástico, nível de ligação cruzada e Tg..... 42
Figura 4.6.1- Módulo de elasticidade estático para elastômeros de diferentes durezas (P&J) , medidas a 30°C..... 70
Figura 4.7.1- Efeito da vulcanização sobre as propriedades físicas..... 72
Figura 4.8.1- Representação esquemática do processo de manufatura..... 74
Figura 4.8.2- Curva característica de reômetro para elastômeros..... 75
Figura 4.10.1- Curva tensão-deformação típica de um composto elastomérico.. 78
Figura 4.11.1- Modelos básicos de mola e de amortecedor..... 83
Figura 4.11.2- Modelos de elastômeros,segundo Voigt e Maxwell..... 84
Figura 5.1- Modelos de material viscoelástico..... 88
Figura 5.2- Efeito da freqüência sobre o módulo elástico e viscoso 90
Figura 5.3- Módulo dinâmico E' e tg δ versus freqüência para duas temperaturas 91
Figura 7.1- Relação entre adimensionais no arco de contato..... 103
Figura 11.1- Sistema MTS- servo-hidráulico..... 115
Figura 11.2- Esquema básico da máquina de ensaios..... 115
Figura 11.3- Dispositivo de aquecimento controlado.....116
Figura 11.4- Tensão-deformação em ensaios cíclicos de composto elastomérico 118
Figura 11.5-Ciclo de histerese típico e definições..... 118
Figura 12.1.1-Região do pescoço do CP-tração..(FEM)..... 121
Figura 12.1.2- Informação relativa à força de reação para λ= 1.5 122
Figura 12.1.3- Informação relativa à força de reação para λ=2.0 122
Figura 12.1.4- Comparação de dados experimentais de Treolar e do FEM..... 123
Figura 12.1.5- Posição "inicial/final "do corpo-de-prova de tração..... 123
Figura 12.2.1- Ensaio de compressão de cilindro na MTS.....124
Figura 12.2.2-Modelo FEM do corpo-de-prova em compressão..... 125
Figura 12.2.3-Força reativa para corpo-de-prova em compressão..... 126

Figura 12.2.4- Resumo das informações do ensaio de compressão..... 126
Figura 12.2.5-Resultados experimentais e calculados por FEM..... 127
Figura 12.3.1-Curva característica de composto (17 P&J).....128
Figura 12.3.2- "Anel" sendo ensaiado na MTS..... 129
Figura 12.3.3- Esquema básico de aplicação de cargas do ensaio "Anel" 129
Figura 12.3.4- Deslocamento em y 130
Figura 12.3.5- Tensões radiais(y)..... 130
Figura 12.3.6- Tensões radiais (x)..... 131
Figura 12.3.7- Deslocamento radial.....131
Figura 12.3.8- Valores experimentais e calculados- "Anel".....132
Figura 12.4.1- Ciclo de histerese para composto de 30 P&J (T=23°C f= 0.1Hz).. 133
Figura 12.4.2- Curva tensão-deformação (ref. à fig.12.4.1)..... 133
Figura 12.4.3- Efeito da freqüência no composto de 30 P&J..... 134
Figura 12.4.4- Efeito do número de ciclos de ensaio..... 134
Figura 12.4.5- Efeito do número de ciclos em freqüências elevadas..... 135
Figura 12.4.6- Efeito da temperatura e da freqüência (30 P&J)..... 135
Figura 12.4.7- Efeito da freqüência sobre o valor de E* (30 P&J).... 136
Figura 12.4.8- Perda histerética em função da freqüência e temperatura(30P&J) 136
Figura 12.4.9-Ciclo de histerese (12 P&J)..... 137
Figura 12.4.10-Efeito da temperatura sobre o ciclo de histerese(12P&J).... 137
Figura 12.4.11- Efeito da temperatura nas curvas tensão-deformação(12P&J). . 138
Figura 12.4.12- Efeito da tensão e da temperatura sobre o módulo dinâmico..... 138
Figura 12.4.13- Efeito da temperatura e da tensão sobre o módulo dinâmico... 139
Figura 12.4.14- Efeito da temperatura sobre E*, E' e E"(12 P&J)..... 139
Figura 12.4.15- Efeito da tensão e da T sobre a perda histerese específica..... 140
Figura 12.4.16- Ensaio estático de compressão(1P&J).. 140
Figura 12.4.17- Ciclos de histerese (1P&J)..... 141
Figura 12.4.18- Efeito da temperatura sobre o ciclo de histerese(1P&J)..... 141
Figura 12.4.19- Diferença de fases (força e deslocamento)a 160° C (1P&J) 142
Figura 12.4.20- Curva força-deslocamento (1P&J).. 142

Figura 12.4.21- Cuva tensão-deformação (1 P&J).. 143
Figura 12.4.22- Efeito da tempertura sobre a curva tensão-deformação (1 P&J) 143
Figura 12.4.23- Efeito da direcionalidade do C.P. 144
Figura 12.4.24- Efeito da tensão e da temperatura sobre E* (1 P&J).... 144
Figura 12.4.25- Efeito da temperatura e freqüência sobre E* (1P&J). 145
Figura 12.4.26- Efeito da temperatura sobre E*, E'e E"(1 P&J).. 145
Figura 12.4.27- Efeito da tensão e da temperatura sobre E*(1 P&J)... 146
Figura 12.4.28- Efeito da temperatura e da tensão sobre E*(1 P&J) 146
Figura 12.4.29- Efeito da tempertura sobre tg δ (1 P&J)..... 147
Figura 12.4.30- Efeito da tensão e da temperatura sobre tg δ (1 P&J)... 147
Figura 12.4.31- Efeito da tempertura sobre a perda histerética (1P&J).. 148
Figura 12.4.32- Efeito da temperatura sobre tg δ e a transmissibilidade..... 148
Figura 12.5.1- Corpo-de-prova para determinação do valor de ν (1 P&J)..... 149
Figura 12.5.2- Deformações axial e transversal (Poisson)..... 150
Figura 12.5.3- Coeficiente de Poisson (1 P&J)..... 150
Figura 12.5.4- Curvas força-deslocamento(axial) (1 P&J) 151
Figura 12.6.1- "Flat" para ensaios sem e com furações(12 P&J).... 153
Figura 12.6.2- Detalhe do ensaio "Flat"..(furo cego) 154
Figura 12.6.3- Impressões de *nip* (FUJI film) 154
Figura 12.6.4- Ensaio "Flat " na MTS 155
Figura 12.6.5- Modelo em elementos finitos do "Flat"..... 155
Figura 12.6.6- Relação tensão-deformação : sem e com furações 157
Figura 12.6.7- Curvas força-deslocamento para, sem e com furações..... 157
Figura 12.6.8- Curvas de "pressão máxima -força" experimental e calculada.(c.f)..158
Figura 12.7.1- Dimensões básicas da prensa úmida com furo cego(12P&J)..... 160
Figura 12.7.2- Esquema de ½ *nip* para (FEM)..... 161
Figura 12.7.3-Tensões radiais (FEM) para C= 360 kN/m..... 162
Figura 12.7.4- Curva de pressão no nip (FEM)..... 163
Figura 12.7.5- Tensões de cizalhamento na base do revestimento(FEM)..... 163
Figura 12.7.6- Tensões radiais de compressão e de cizalhamento (FEM)..... 164

Figura 12.7.7- Forças reativas no "gap" (FEM)..... 164
Figura 12.7.8- Pressão ao longo do *nip* (FEM)..... 165
Figura 12.7.9- Deformação elástica do cilindro metálico.....165
Figura 12.7.10- Esquema do modelo FEM- "viga".....166
Figura 12.7.11- Deflexão elástica como "viga" FEM)..... 167
Figura 12.7.12- Forças reativas para a "viga"(FEM)..... 168
Figura 12.7.13- Esquema do modelo"FEM - "ovalização"..... 168
Figura 12.7.14- Ilustração da ovalização (FEM).. 169
Figura 12.7.15- Força de reação na "ovalização"(FEM).. 169
Figura 12.7.16- Semelhança de rigidez 170
Figura 12.7.17- Esquema do modelo FEM- coroamento..... 171
Figura 12.7.18- Detalhe da figura 12.7.17..... 173
Figura 12.7.19- Deflexão do cilindro metálico..... 174
Figura 12.7.20- Forças reativas do modelo- sem "coroamento"..... 174
Figura 12.7.21 e 22- Distribuição de pressão - sem coroamento..... 175
Figura 12.7.23- Deflexão do cilindro revestido - com coroamento..... 176
Figura 12.7.24- Forças reativas e pressão ao longo do coroamento..... 176
Figura 12.7.25- Efeito do coroamento na distribuição das pressões 177
Figura 12.7.26- Comparação do valor calculado e medição "em campo"..... 178
Figura 12.8.1 e 2 - Interface NR- aço latonado ..... .180
Figura 12.8.3- Esquema do filme oxidado no aço trefilado latonado..... 181
Figura 12.8.4- Esquema de sulfetos na interface NR- latão 181
Figura 12.8.5- MEV- interface latão/ composto 1P&J (410x)... 183
Figura 12.8.6.- MEV- detalhe da figura 12.8.5.(4,75 Kx) 184
Figura 12.8.7.- EDS- ponto 1 da fig. 12.8.6 184
Figura 12.8.8- EDS- ponto 2 da fig. 12.8.6..... 185
Figura 12.8.9- EDS - ponto 3 da fig .12.8.6..... 185
Figura 12.8.10- MEV da interface aço / composto elastomérico (1P&J). 186
Figura 12.8.11 e 12 - MEV detalhe da fig.12.8.10..... 186
Figura 12.8.13- EDS- Região da interface da fig. 12.8.11.....187

Figura 12.8.14- EDS- Região da interface da fig. 12.8.12.....187
Figura 12.8.15- EDS da região do composto elastomérico..... 187
Figura 12.8.16- EDS da região do aço..... 188
Figura 13.1- E* em função da temperatura para diferentes durezas e tensões 190
Figura 13.2- E* e dureza 191
Figura 13.3- E* e freqüência para diferentes durezas..... 191
Figura 13.4- DSC típica 192
Figura 13.5- DSC para NBR+40 phr S.....193
Figura 13.6- Efeito das tensões residuais em cilindro com composto 1P&J.....194
Figura 13.7- Medições de tensão residual no cilindro DE= 320*mm*..... 195
Figura 13.8- Variação da tensão residual ao longo da espessura.....196
Figura 13.9- Efeito da velocidade de resfriamento e do diâmetro sobre
a tensão residual 197
Figura 13.10- Relação entre a carga e o *nip* adimensionais 199

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Objetivos de % a seco em prensas úmidas de máquinas de papel.. 5

Tabela 2.2- Carga linear máxima recomendada para diferentes categorias de prensas..... 14

Tabela 2.3- Principais variáveis associadas à remoção de água na prensa úmida..... 28

Tabela 4.1- Elastômeros: subgrupo dos materiais poliméricos (Tg) 42

Tabela 4.2- Temperatura máxima de operação dos elastômeros..... 60

Tabela 12.1- Componentes principais dos compostos elastoméricos..... ensaiados..... 120

Tabela 12.8.1- Resumo dos principais elementos analisados por EDS na interface aço-composto elastomérico (1P&J).... 188

1- INTRODUÇÃO

É fato notório que "a indústria de celulose e papel é uma das maiores demandadoras de capital de todo setor industrial" [1.1].

A nível mundial, a produção de papel para o ano 2000 é prevista em 300 milhões de toneladas [2.1], sendo que o consumo dos diferentes tipos de papel [3.1] vem crescendo a uma taxa anual de 3,5%.

A preocupação constante com a melhoria da qualidade superficial e interna dos diferentes tipos de papel, aumento de produção, com conseqüente aumento das velocidades operacionais, bem como correspondentes aumentos de pressão e temperaturas de trabalho, particularmente no setor de prensas úmidas das máquinas de papel, tem exigido constantes pesquisas e novos desenvolvimentos de equipamentos, materiais e processos.

Na seção de prensas úmidas das máquinas de papel, encontra-sè um sistema complexo, formado por : cilindros metálicos - revestimento elastomérico - feltros - papel, o qual visa ser otimizado em si próprio, como em seus efeitos colaterais, em termos de vibração do conjunto, balanço energético, além de aspectos econômicos e ambientais entre outros.

O projeto e a construção de revestimentos elastoméricos para prensas de máquinas de papel têm se caracterizado como sendo mais uma arte do que uma ciência multidisciplinar. De fato, a tecnologia associada abrange áreas diversas, como mecânica (projeto e construção de cilindros metálicos submetidos a cargas estáticas e dinâmicas, com os correspondentes problemas de vibração); ciência dos materiais (*metais e elastômeros* submetidos a carregamentos dinâmicos, *fibras* :

sintéticas (feltros) e naturais (celulose) , adesão(metal/elastômero), corrosão(metal / elastômero); química (processos de condicionamento da pasta de celulose), para citar apenas alguns aspectos relevantes.

Em correspondência, a literatura é esparsa e limitada, carente na sistematização e racionalização das informações qualitativas existentes, procurando torná-las mais quantitativas , passíveis de serem manuseadas em "bancos de dados" informatizados, na forma de sistemas "inteligentes ", que possam fazer parte de "sistemas de redes neurais ". Uma das contribuições do presente trabalho consiste em efetuar uma sistematização da análise dos problemas associados ao projeto e a produção de revestimentos elastoméricos para prensas úmidas de máquinas de papel.

Como o foco do presente trabalho está centrado no estudo do comportamento dinâmico de compostos elastoméricos para revestimentos de prensas úmidas de máquinas de papel, bem como nos parâmetros associados à obtenção de uma pressão uniforme no arco de contato do sistema : cilindro metálico - revestimento elastomérico - feltro - papel , o problema apresenta aspectos diversos e interdependentes, que serão apresentados nos capítulos seguintes, a saber:

- Operação de prensagem do papel.
- Aspectos gerais de vibração em prensas de máquinas de papel.
- Revestimentos elastoméricos.
- Propriedades mecânico-dinâmicas de revestimentos elastoméricos.

Por outro lado, a técnica de análise por elementos finitos (FEM), tem apresentado substancial evolução na área de estruturas metálicas, e, mais recentemente, na área de materiais poliméricos. Esta técnica será revista brevemente, tanto do ponto de vista do método, como de sua aplicação no caso de compostos elastoméricos, e, em particular, para o arco de contato de prensas de máquinas de papel, objetivando uma "pressão uniforme" .

Aspectos fundamentais relativos à interface do revestimento elastomérico e o substrato metálico serão analisados conjuntamente.

O presente trabalho visa, através de uma revisão das principais informações disponíveis , analisar a inter-relação de alguns dos aspectos acima abordados, principalmente os relacionados à caracterização dinâmica dos revestimentos, os modelos matemáticos relativos ao projeto de revestimentos e a interface revestimento / cilindro metálico.

2- OPERAÇÃO DE PRENSAGEM DE PAPEL

2.1 Introdução

A função primária da seção de prensagem da máquina de papel é a de efetuar a máxima remoção de água, consolidar a folha, melhorar a lisura da folha, melhorar as propriedades físicas da folha enquanto úmida, efetuando seu condicionamento para a seção seguinte (secagem), tendo como meta primordial o aumento de produção (controlabilidade = *runnability*), diminuição de energia e melhoria da qualidade interna e superficial do produto.

A capacidade da prensa em efetuar estas funções, sem causar danos ao papel, como: ruptura, marcação, esmagamento, perda de finos, rearranjo de fibras, enrugamento, depende do sistema máquina-revestimento-feltro.

O papel é fornecido da seção de formação da folha - *Fourdrinier-* [2.1 e 2.2], em cima de uma série de feltros e rolos transportadores para uma ou mais prensas e, em seguida, para a secagem, terminando com a calandragem, como ilustra a figura 2.1.

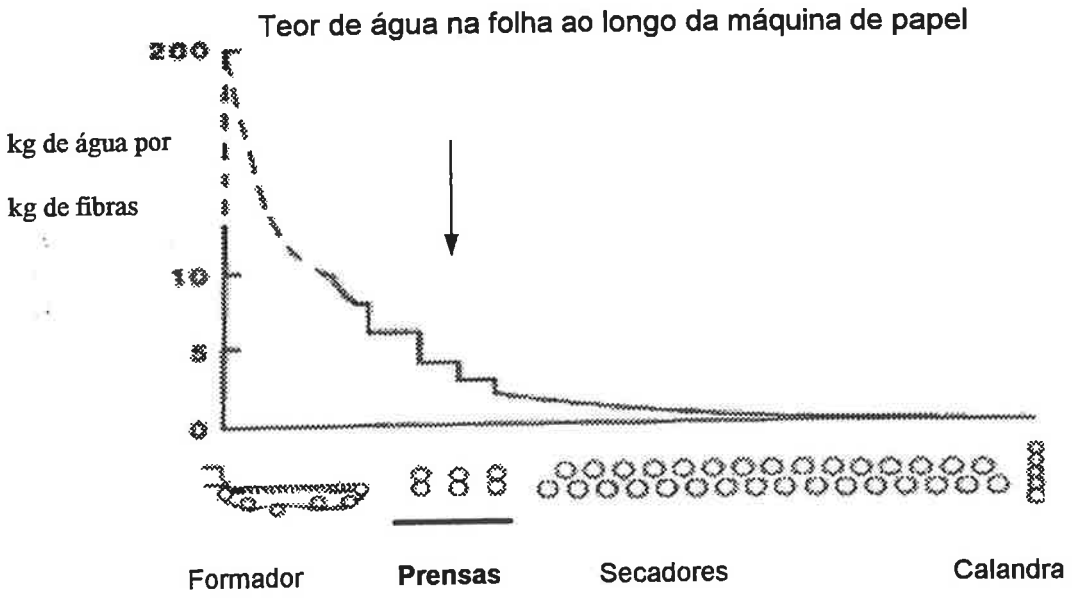


Fig. 2.1 - Evolução da drenagem na máquina de papel. [2.13]

A operação de prensagem pode ser considerada uma extensão da remoção de água, iniciada na seção formadora. Em termos econômicos [2.4], é mais interessante efetuar a remoção desta água de maneira mecânica do que através da evaporação, efetuada na seção de secagem. Desta maneira, os fabricantes de papel procuram, sistematicamente, métodos que aumentem a eficiência da prensagem e que reduzam a participação da secagem no processo produtivo.

O problema torna-se de extrema relevância, tendo em conta que, atualmente, existem máquinas com até 10*m* de largura, trabalhando com velocidades de até 3000 *mpm* .

Nestas condições, a remoção da água deve ser uniforme na direção transversal da máquina (c.d.), de modo que a folha tenha um perfil de umidade controlado, ao entrar na seção de secagem .

Os teores de umidade, durante a prensagem, normalmente, são dados em termos de porcentagem seca (ou em termos de grau de drenagem), objetivando-se um aumento da % a seco no setor de prensas (aumentando, gradativamente, a resistência mecânica do papel), como dado na tabela 2.1.

local (para folha)	% seco - entrada	% seco - saída
1ª. prensa	15-20	28-35
2ª. prensa	28-35	32-38
3ª. prensa	32-38	40-45
prensa de sapata (papelão) (ENP)	15-20	47-50

Tabela 2.1 - Objetivos de % a seco em prensas úmidas de máquinas de papel.

As variáveis básicas que afetam a remoção de água na prensa úmida são apresentadas na figura 2.2.

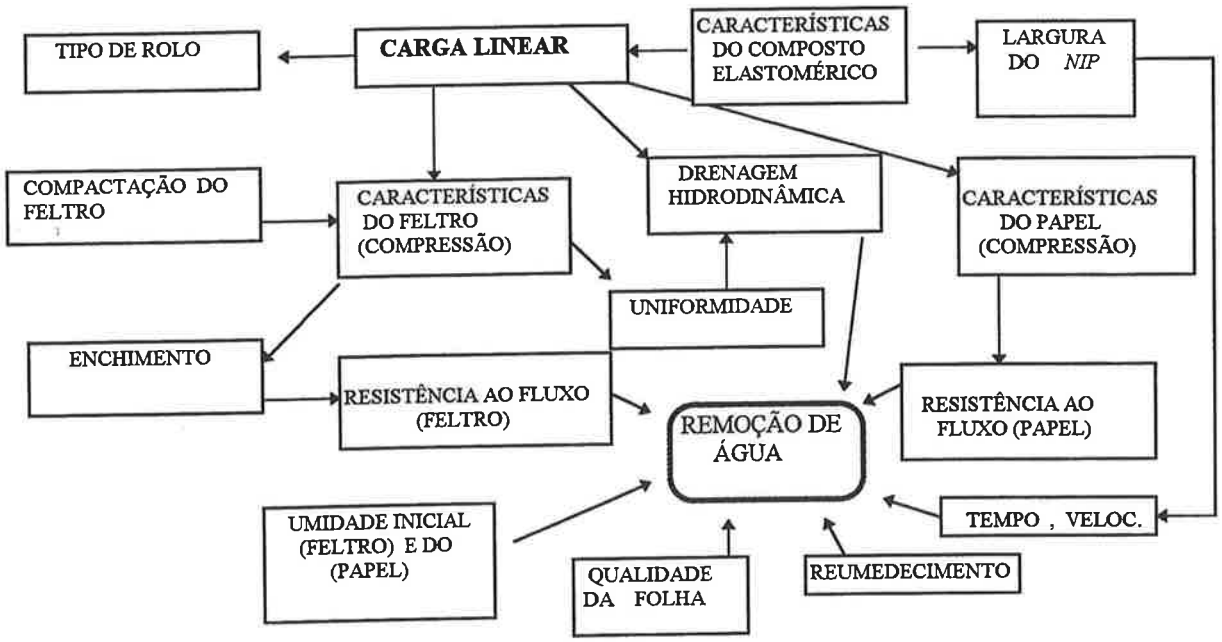


Fig. 2.2 - Variáveis básicas que afetam a remoção de água na prensa úmida.

Em uma máquina de papel, podem ser empregados oito tipos diferentes de prensas úmidas, cada qual com suas vantagens e limitações, levando-se em consideração a máquina, o material a ser processado e o tipo do produto final. Sem entrarmos nos detalhes [2.9] [2.15] de cada tipo, temos:

- prensa lisa
- prensa de sucção
- rolo furo cego
- rolo ranhurado
- prensa de tecido
- rolo encapado
- prensa de alta intensidade (de sapata) (ENP)
- prensas de alto impulso (a quente).

No presente trabalho, será dado destaque para as três primeiras, bem como combinações destas, por serem de uso mais freqüente na indústria de papel .

Nas prensas lisas, a folha de papel vindo da seção de formação é transportada pelo feltro e passa através do *nip* (arco de contato), formado por dois cilindros, expelindo a água em sentido contrário ao do movimento do feltro, ao longo da superfície do rolo inferior, sendo recolhida em tanque específico (de águas brancas). Nas prensas de sucção, cujo objetivo primordial é o de aumentar o desaguamento no *nip*, o núcleo metálico é de bronze (85 Cu - 5 Sn) , bronze - alumínio (85 Cu - 9,5 Al), ou, ainda, de aço inoxidável (AISI 304L,316L), e o revestimento é elastomérico, com espessura aproximada de 25*mm* .

Este conjunto recebe uma malha de furos em toda sua extensão (furos com dia. 3*mm*, tipicamente). No interior do rolo existe um sistema de vácuo, aderente à superfície interna do rolo metálico, estacionário (caixa de vácuo), contando com "elementos seladores" , entre as superfícies (rotativa / fixa) .

Em conseqüência, estes tipos de rolos têm limitações quanto à carga aplicada e dificuldades quanto aos furos ficarem desobstruídos de finos do papel, resinas e aditivos químicos, além da corrosão por frestas que ocorre na interface elastômero/ metal-base.[2.21) (2.22) (2.23)]

Visando superar as dificuldades dos dois tipos acima, o rolo de furo cego detalhado mais adiante , objetiva aumentar o desaguamento (através de uma malha de furos no revestimento), sem que haja necessidade de perfurar a "camisa" do rolo, além de não necessitar do complexo sistema de vácuo.

Combinações de prensa lisa/sucção, prensa lisa/furo cego, ou combinação com os outros tipos acima mencionados (além de termos um ou dois feltros no "*nip*"), são freqüentes na indústria de papel/papelão, como será visto veremos mais adiante.

Os rolos da prensa devem ter um coroamento (ao longo do seu comprimento), de modo a obter uma pressão uniforme, bem como um perfil de umidade na transversal da folha. Este coroamento é obtido através da retífica de um perfil no diâmetro externo do rolo revestido, visando compensar a deflexão elástica do rolo devido à carga aplicada, bem como do peso próprio. Este coroamento decresce continuamente do centro para as laterais do revestimento, como será discutido em breve.

Como método alternativo deste coroamento mecânico, existem prensas especiais dotadas de sistema hidráulico interno ao rolo que permitem efetuar a compensação, conhecidas por prensas de coroa variável (com diferentes nomes comerciais, segundo cada fabricante), que também será visto adiante.

2.2 Fundamentos da pressão no "*nip*"

A pressurização do papel no *nip* nos aparenta ser uma operação simples de redução volumétrica do papel, envolvendo compressão da folha, do feltro e do revestimento. Quanto maior a compressão, maior a remoção de água das fibras.

Aqui vale a primeira observação, pois na prensa retiramos apenas a água que se encontra no espaço entre as fibras. Somente nos estágios finais da fabricação do papel, na calandragem, é que começamos a retirar a água situada no interior destas fibras. [2.3]

Na região do *nip,* ocorre um quadro complexo de interações, analisado, brevemente, a seguir.

Assume-se, no arco de contato ou *nip*, o estado plano de deformação ($\varepsilon_z = 0$) e condição de atrito aderente. [2.4][2.5][2.6][2.7][2.8]

Como ilustra a figura 2.2.1 [2.9], a carga aplicada é balanceada pelas forças geradas no feltro e na folha de papel, sendo a área sob a curva de pressão equivalente à carga linear aplicada (kN/m).

Como pode-se observar, a pressão aplicada pode ser dividida em dois componentes: pressão hidráulica, devido ao fluxo de água para fora do feltro e do papel, bem como a pressão mecânica requerida para a compressão do feltro e do papel.

A somatória destas pressões, em cada ponto ao longo do *nip*, fornece a pressão total.

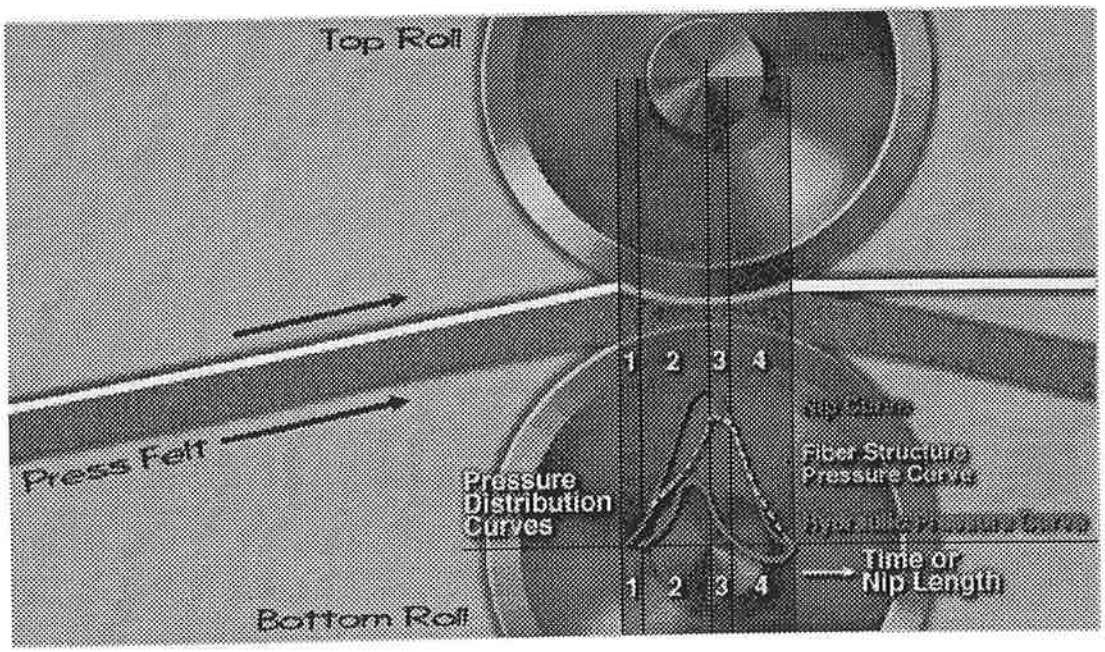
O *nip* pode ser dividido em quatro regiões (ou fases) distintas [2.10] de pressurização, no tocante às participações da pressão hidráulica e mecânica.

Assim, temos:

Fase 1 - O ar é removido da folha e do feltro até a saturação da folha, de modo que não haja mais ar presente. Não se verifica nenhuma pressão hidráulica, com nenhuma variação na % a seco da folha .

Fase 2 - Na folha saturada, inicia-se a compressão hidráulica, causando o movimento da água do papel para o feltro. Quando este também atinge a saturação, verifica-se a saída de água do feltro. Esta fase continua até aproximadamente o ponto médio do *nip,* onde a pressão atinge seu valor máximo.

Fase 3 - Há expansão do *nip* até que a pressão da água no papel volte a ser nula. Neste ponto, o papel atinge seu grau máximo de % a seco.



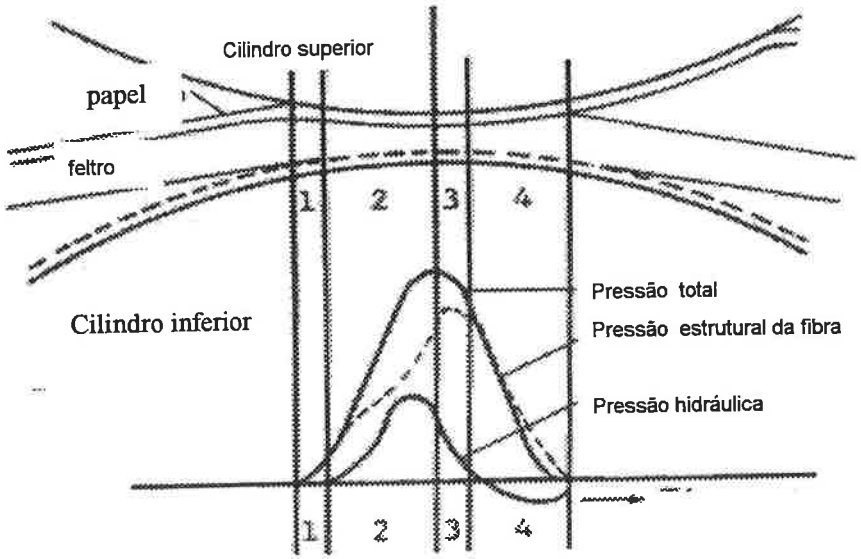


Fig. 2.2.1 - Ilustração das quatro fases da prensagem. [2.9]

Fase 4 - O papel, bem como o feltro, se expandem, e o papel torna-se insaturado, com a possibilidade de reumedecimento do mesmo através dos seguintes mecanismos: capilaridade, vácuo na folha ou, ainda, arraste mecânico. Esta fase constitui-se em uma das limitações inerentes ao processo, procurando-se

envidar esforços para rapidamente separar a folha do feltro, seja por mecanismos externos, seja por característica do revestimento - conhecida por "soltura de folha ".

Desta análise, pode-se verificar a importância dos diferentes mecanismos envolvidos e correspondentes características desejáveis. Assim, o feltro deve ter baixa resistência ao fluxo da água que está sendo comprimida (associado ao volume de vazios, compressibilidade , resiliência , não retenção de finos, no feltro).

No revestimento, destacam-se a largura do *nip* (associada à característica dinâmica), compressibilidade e resiliência do composto elastomérico, resistência à abrasão contra o feltro, resistência aos produtos químicos normalmente empregados na limpeza do feltro (endurecem ou amolecem o composto), "soltura da folha", resistência a óleos (lubrificação da máquina), resistência a ozona (motor elétrico próximo) , resistência ao calor (calor externo, bem como o gerado pela histerese) , resistência à hidrólise (dissolução parcial na água), e boa adesão à base metálica.

2.3 *Nip* entre cilindros revestidos

Os componentes do *nip* (arco de contato) são apresentados na figura 2.3.[2.12]

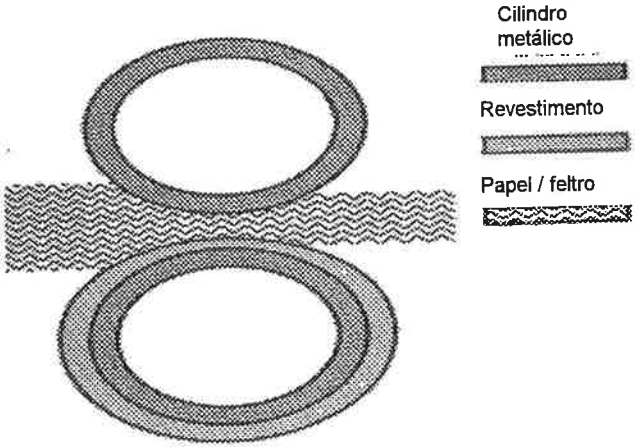


Fig. 2.3 - Sistema: rolo metálico / revestimento / papel / feltro. [vista na direção da máquina (m.d.)] [2.12]

O contato é do tipo *não-hertziano* (pois a teoria de Hertz assume que no contato elástico entre as superfícies não tenha atrito e que não transmitam forças trativas tangenciais através destas superfícies, ao passo que a presença de material elastomérico na formação do *nip*, implica em deslocamentos tangenciais elevados). (2. 11).

A presença da folha, do feltro, bem como do revestimento, implica em um "espalhamento" da pressão de contato, por aumento do tamanho do *nip*, diminuindo a pressão de pico , como apresentado na figura 2.4.

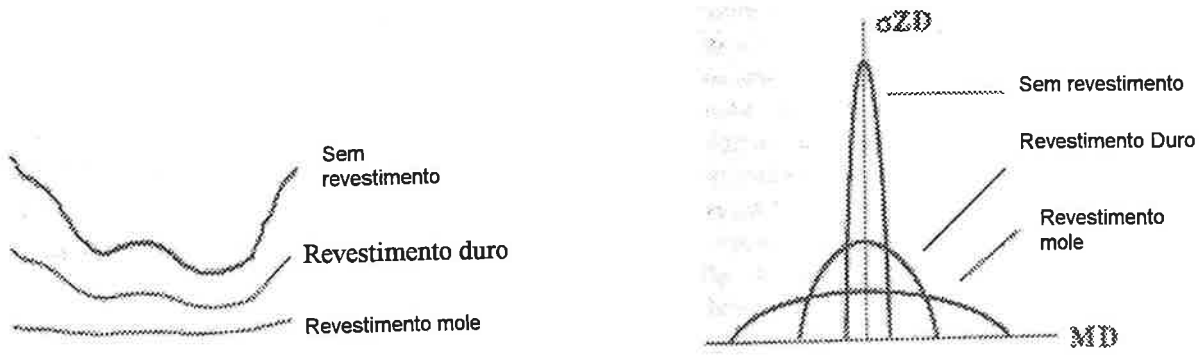


Fig. 2.4 - Efeito da presença do revestimento (2.12).

Observa-se que o efeito básico do revestimento é o de "equalizar "a pressão, bem como de aumentar o tempo de contato, ou tempo de residência no *nip ("dwell time").*

Complexidade adicional é dada pela característica de que as curvas tensão - deformação do material do revestimento são do tipo não-linear e histerético, variáveis em função de sua formulação, temperatura e freqüência.

Em máquinas de papel que empregam um feltro, um dos lados da folha encontra-se em contato com uma prensa (ou rolo) lisa, de elevada dureza, enquanto que o outro lado da folha está em contato com o feltro e este em contato com um

revestimento de resiliência tal que o *nip* seja "mole" (mais largo), para o caso de papéis de maior gramatura, isto é, peso por unidade de área (> 120 g/m^2) e, para o caso de papéis de baixa gramatura (~ 40 a 120 g/m^2) , a dureza é mais elevada , objetivando um *nip* "duro" (menos largo). [1.3]

Analisa-se, em seguida, alguns dos principais aspectos do *nip* .

Observando-se na direção do movimento da máquina de papel - **m.d.** na região do *nip,* destacam-se as seguintes variáveis básicas:

1 - carga linear - (C.L.) dada pela relação entre a força total aplicada e a largura do rolo revestido, dado em kN/m (ou N/mm).

(Obs: pli / 5,7 = kN/m),(*pounds per linear inch* = pli).

2 - pressão média no *nip* (sy_m) - dada pela relação entre a carga linear e a largura do *nip* (MPa ou N/mm^2).

3 - pressão de pico (sy_{max}) - valor da pressão no ponto central do *nip,* com $sy_m = (\pi / 4) . sy_{max}$ (Mpa ou N/mm^2) [2.5].

4 - tempo de residência no *nip* (t_r) - dado pela relação entre a largura do *nip* e a velocidade periférica da prensa (mseg).

5 - impulso - área sob a curva de pressão no *nip* x largura do *nip* .

$$I = \int_{t_i}^{t_f} s_y(t) \, dt = s_{ym} . (t_f - t_i) \quad [\text{Mpa . seg.}] \text{ ou } \{\text{psi. sec}\}$$

onde : t_i = tempo no início do *nip* e t_f = tempo no fim do *nip*

Para as diferentes prensas empregadas na fabricação de papel, a figura 2.5 resume uma interdependência entre pressão média, carga linear e largura de *nip*.

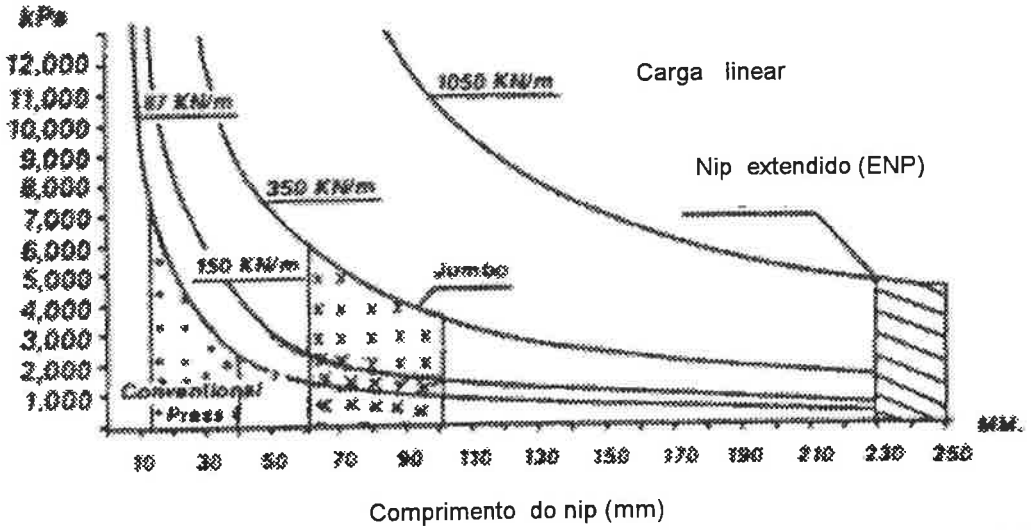


Fig. 2.5 - Carga linear, pressões e larguras de *nip* para diferentes tipos de prensas. (2.13)

Baseado nestes dados, as recomendações práticas de carga linear máxima , para diferentes tipos de prensas, são dadas na tabela 2.2.

CATEGORIA DE PRENSA	C.L.(kN/m)	C.L.(pli)
ROLO SUCÇÃO	140	800
PRENSA LISA	280	1600
PRENSA "JUMBO"	440	2500
PRENSA DE SAPATA (ENP)	1050	6000

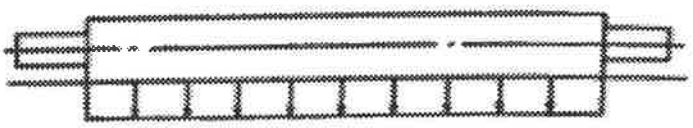
Tabela 2.2 - Carga linear máxima recomendada para diferentes categorias de prensas . (2.13)

Observemos, agora, alguns aspectos principais do *nip*, na direção transversal ao movimento da máquina de papel (**c. d.**).

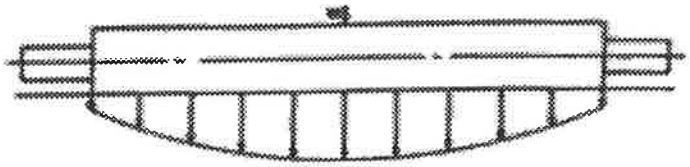
Dado que os rolos sofrem deflexão sob ação da carga, torna-se necessário efetuar um "coroamento" (igual ao dobro da deflexão ao longo da linha neutra do rolo), também chamado de abaulamento, em um ou em ambos os rolos, de modo a atingirmos o objetivo básico de uniformizar o perfil da pressão ao longo das faces em contato. (2. 12) (2 .14)

O valor deste coroamento é função do diâmetro do rolo, espessura de parede do rolo, comprimento, material de construção do rolo e da carga aplicada. Assim, o efeito de um coroamento é válido apenas para uma faixa restrita de carregamentos.

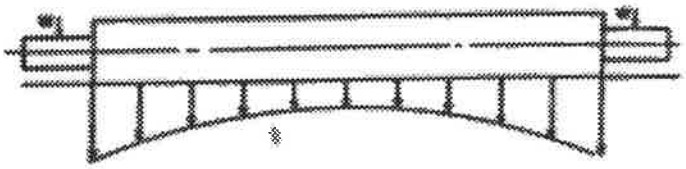
A figura 2.6 ilustra a distribuição de pressões e o efeito do coroamento.[2.15]



Distribuição uniforme de pressão



Distribuição de pressão equivalente ao sobrecoroamento



Distribuição de pressão equivalente ao subcoroamento

Fig. 2.6 - Distribuição de pressões e coroamento de cilindros . [2.12]

A determinação do correto coroamento é mais crítica para rolos com revestimentos de maior dureza (maiores pressões), do que para os de menor dureza, dado a maior "acomodação das pressões" (menores), como visto acima.

Os coroamentos obedecem a especificação TAPPI - TIS 0420-06 "*Roll Crown Specifications and Definitions*" .

Em prensas onde a carga linear é maior, tipo "Jumbo", por exemplo, além da deflexão, devemos considerar também o achatamento elástico entre as faces (*shell oil - canning*) [2.12], como ilustrado na figura 2.7, a qual implica em correção suplementar no coroamento (abaulamento).

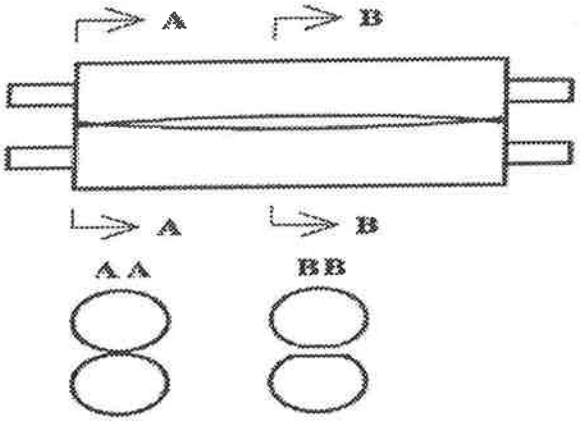


Fig. 2.7 - Efeito de achatamento entre cilindros (*shell oil - canning*). [2. 12]

O coroamento é normalmente dado em retífica provida de comando numérico, de modo que o seu perfil se assemelhe ao de uma curva cosseno , como ilustrado na figura 2. 8 [2. 12].

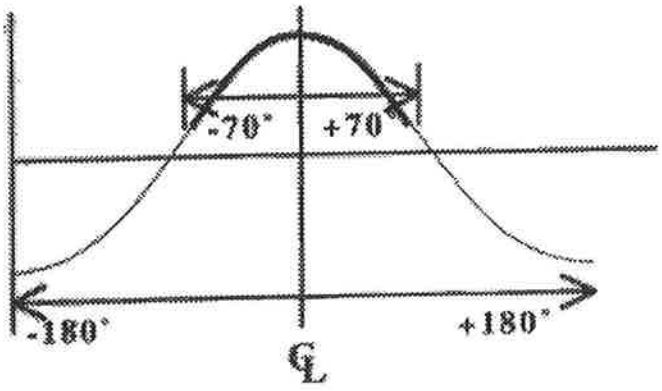


Fig. 2.8 - Curva de coroamento semelhante à curva cosseno. [2.12]

O semicomprimento da geratriz (ou da face revestida) é dividido em 10 "estações ou postos de medida", como ilustra a figura 2.9.

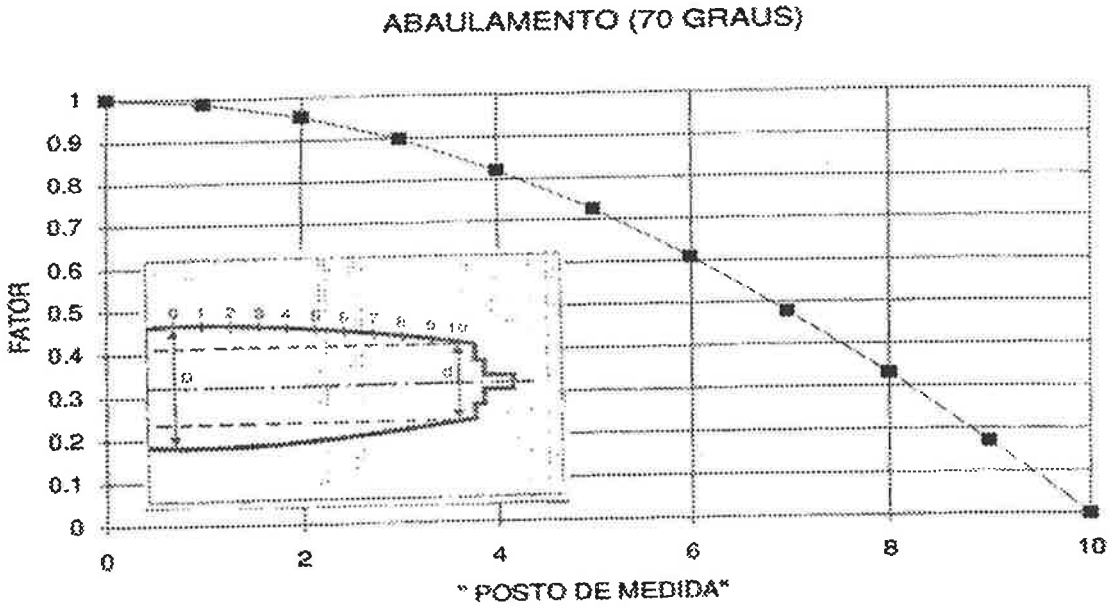


Fig. 2.9 - Abaulamento para ângulo θ = 70 graus. [2.14]

O "FATOR" é dependente do ângulo da função cosseno, dado por:

$$\text{"FATOR"} = 1 - \{ [\ 1 - \cos (\theta \cdot N / 10)]\ /\ (1 - \cos \theta)\}$$

onde N = "posto de medida"

A nível de "chão de fábrica" [2.16], o controle deste *nip* é efetuado através da "impressão de *nip*", a qual é ainda dividida em dois tipos, a saber; "*nip* estático" e "medição dinâmica do *nip*".

No primeiro, coloca-se um "papel sensível", tipo folha de alumínio, ou ainda, papel carbono, com o objetivo de verificar a distribuição da largura de *nip*, de acordo com os critérios ilustrados na figura 2.10. [2.12]

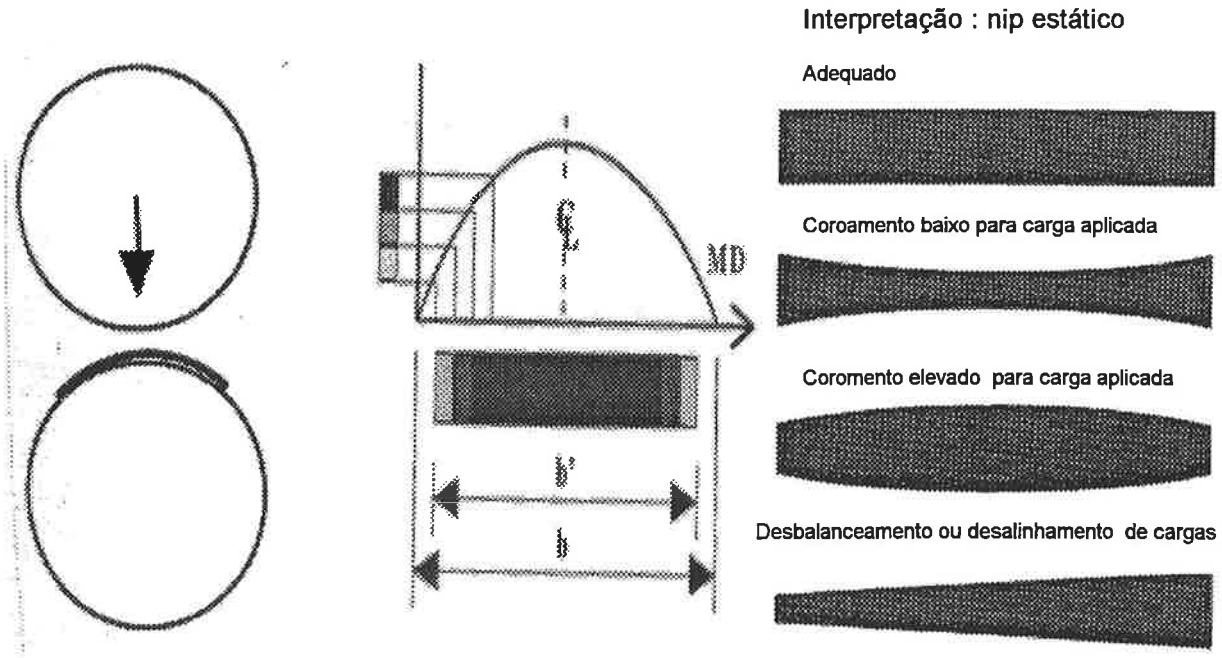


Fig. 2. 10 - Medição e interpretação de impressão de *nip* estático. (2.12)

No segundo método, emprega-se um papel especialmente desenvolvido pela FUJI Film, denominado "*Prescale Film* ", o qual é baseado na pressurização de dois filmes justapostos (filme a- de PET- polietileno tereftalato com microcápsulas de tinta na sua superfície e do filme b- do mesmo PET, com líquido revelador na superfície).

De acordo com o aumento da pressão na interface, haverá maior número de microcápsulas "fraturadas" e "reveladas", sendo a intensidade das mesmas avaliada por um densitômetro. Para cada tipo de filme, há curvas de calibração - densidade medida x pressão efetiva. Esta técnica tem largo emprego na construção mecânica, na medição de pressões de interfaces em geral .

A medição dinâmica do *nip* é efetuada de acordo com o esquema da figura 2.11 e sua interpretação de acordo com a figura 2.12 . (2. 12)

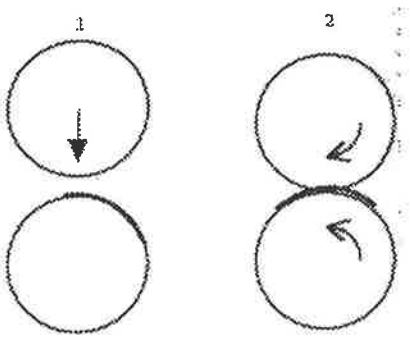


Fig. 2.11 - Metodologia para efetuar a medição dinâmica do *nip* (FUJI PRESCALE film)

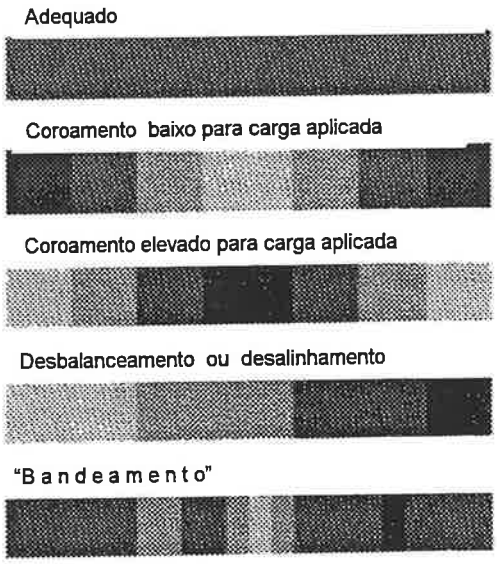


Figura 2.12 - Interpretação da medição dinâmica do *nip*. (2.12)

É importante salientar-se que as medidas de *nip* acima mencionadas, de largo emprego na indústria papeleira, são essencialmente de caráter estático e que a medição dinâmica do *nip* (que mede s y $_{max}$) acima mencionada, difere do conceito de *nip* dinâmico, (decorrente das propriedades viscoelásticas do revestimento), fazendo com que o *nip* "estático" seja maior em 5 a 10% do que o *nip* "dinâmico", de medição bem mais complexa (cilindro instrumentado com transdutores de pressão na sua superfície). (2. 17)

No caso de máquinas de papel onde haja extensa faixa de gramaturas na linha de fabricação, o uso do coroamento não é eficaz, havendo necessidade de se introduzir as prensas de coroa variável, de acordo com a carga específica e

correspondente *nip* solicitados. Existem vários projetos destes tipos de rolos (prensas especiais, de acordo com os diferentes fabricantes), geralmente dotados de pistões hidráulicos, atuando contra uma viga de reação, situada no interior no rolo, como ilustram os exemplos da figura 2.13 . [2.15]

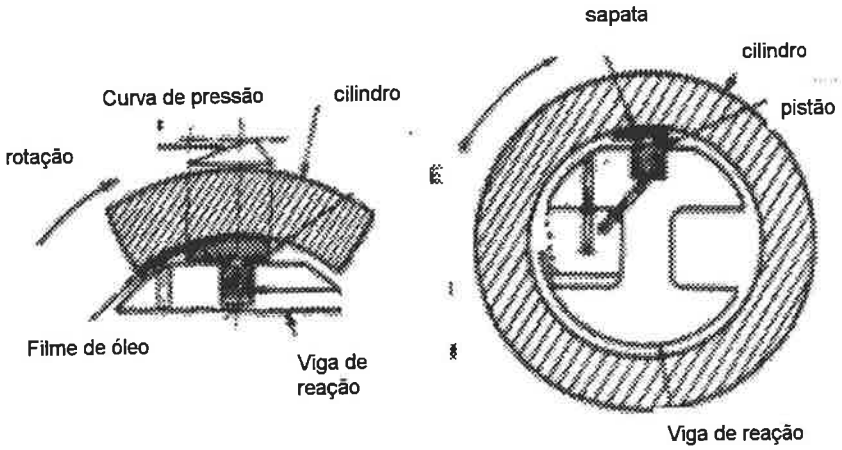
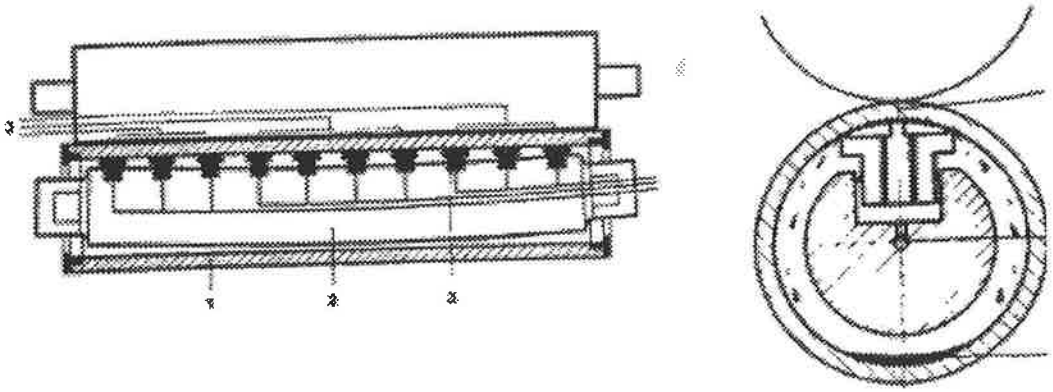


Fig. 2.13 - Rolos de coroamento hidráulico [2.15]



Além da prensa lisa, acima discutida, passemos a apresentar, em maior detalhe, especificamente, os tipos "furo cego ", "ranhurado " .e "sucção ".

A figura 2.14 apresenta, esquematicamente, a distribuição da drenagem e das pressões no revestimento elastomérico de uma prensa de "furo cego". [2.19]

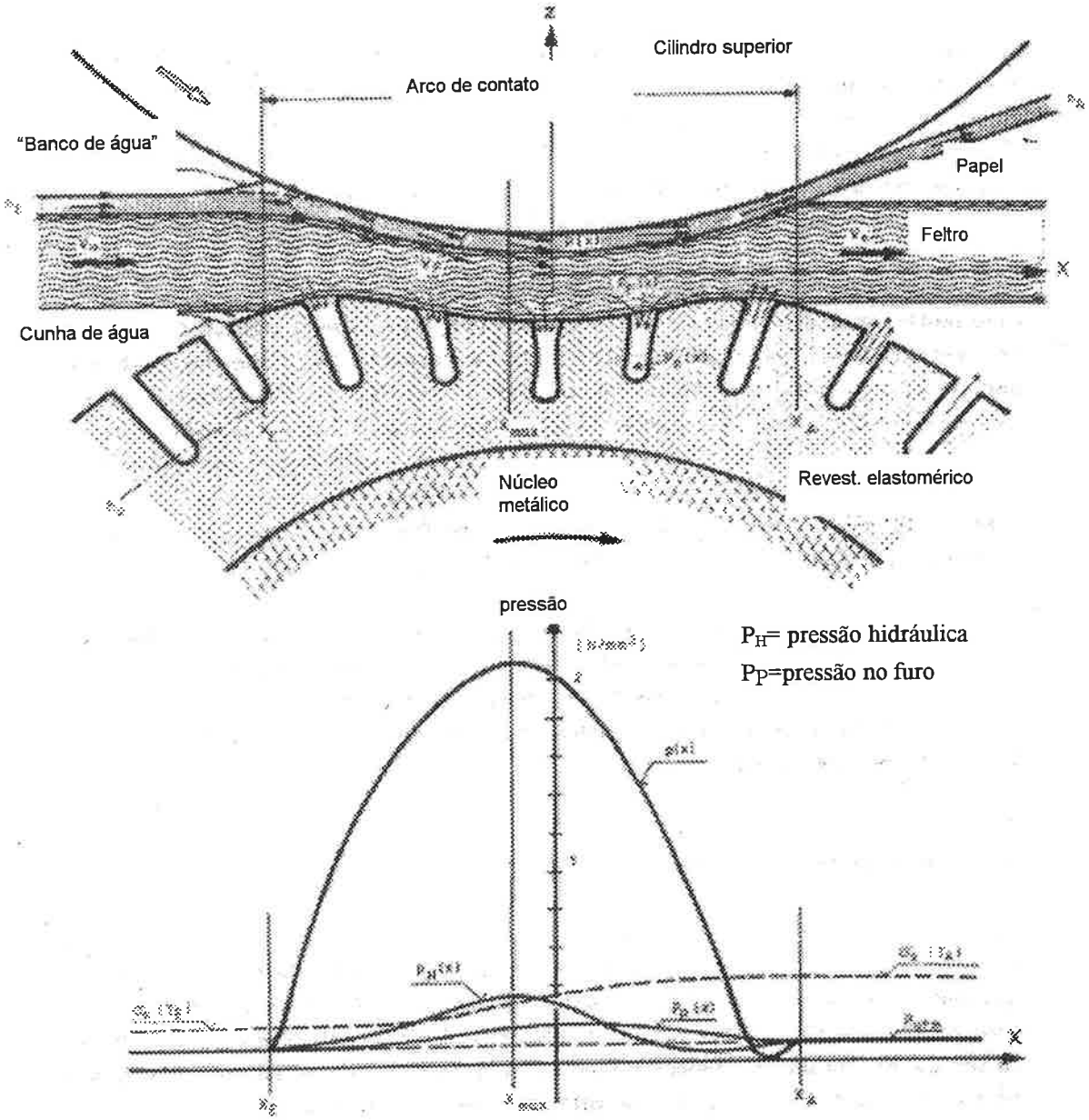


Fig. 2.14 - Drenagem e curva de pressão no *nip* com "furo cego". (2.18)

Decorrente da carga linear aplicada, a pressão correspondente produzirá uma largura de *nip* que depende da característica dinâmica do composto elastomérico, sua espessura, temperatura e freqüência de trabalho.

No perfil de drenagem, contando com a presença do feltro, o panorama passa a ser como é o ilustrado na figura 2.15.

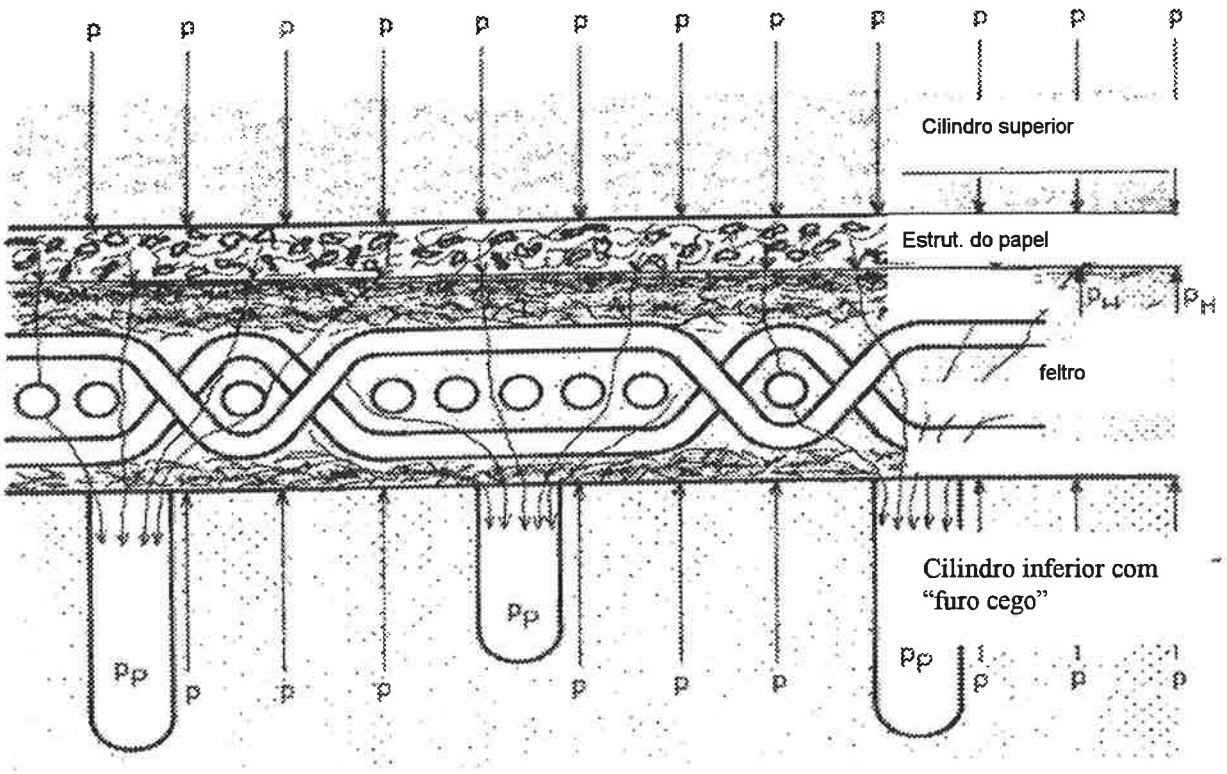


Fig. 2.15 - Seção transversal do sistema de drenagem: rolo de dureza elevada - papel - feltro - rolo de "furo cego " . (2.18)

Decorrente da presença do feltro, verifica-se um aumento da largura do *nip* , como apresentado na figura 2.16.

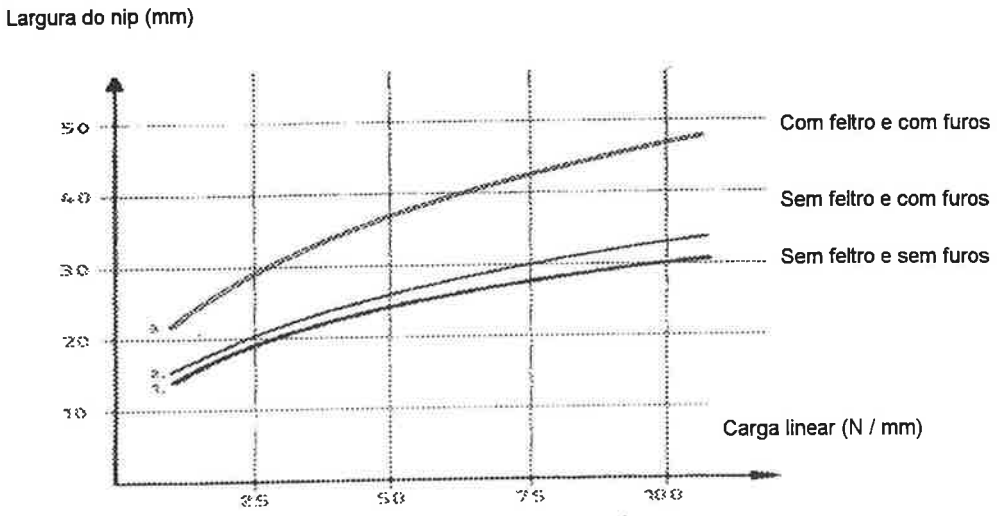


figura 2.16 - Largura do *nip* , carga linear e presença do feltro (2.19)

O papel tem um resistência estrutural σ_p (N/mm2) (resistência à compressão na direção da espessura), a qual aumenta à medida que se aproxima do ponto máximo de desaguamento, diminuindo a pressão efetiva no papel para $p(x) - \sigma_p$ ($p(x)$ = pressão mecânica aplicada).

Na figura 2.14 , enquanto se verifica que : $p(x) - \sigma_p > p_H$, nota-se que há remoção de água de dentro dos poros e interstícios do papel para dentro do feltro. Esta observação continua válida, enquanto $p_H > p_P$ (relativa à pressão no furo do revestimento), até o ponto de % a seco máximo quando, então, haverá expulsão da água retida no furo.

Observe-se, ainda, que à medida que se aproxima do final do *nip* , a pressão hidráulica vai diminuindo, chegando a ser inferior à atmosférica (0,1 N/mm^2), ou seja, teremos um efeito de sucção, uma das fontes do reumedecimento do papel.

Torna-se, portanto, claro, que o perfil hidráulico característico , verificado ao longo do *nip*, tem uma componente significativa decorrente das propriedades do feltro, tais como: construção, espessura, permeabilidade, rigidez, peso por unidade de área, umidade retida quando de sua entrada no *nip* e grau de utilização (vida).
(2.13) (2.20)

À medida que as máquinas de papel vão aumentado sua velocidade de operação, o volume de água transportado pela prensa para dentro do *nip* vai aumentando, restringindo, portanto, o fluxo de saída, formando-se uma "cunha" hidráulica dentro do feltro, em região que antecede a entrada no *nip* , de modo que a pressão exercida pela prensa (que, também, objetiva-se ser cada vez mais aumentada, como será visto adiante), conduz à "fratura em máquina", do papel ("*paper crushing*"), com conseqüente "parada de linha".

Este problema é crítico no caso de prensas do tipo lisa, sendo atenuado nos demais casos de "furo cego", "ranhurado" e "sucção".

No caso do "furo cego", um perfil característico é apresentado na figura 2.17.

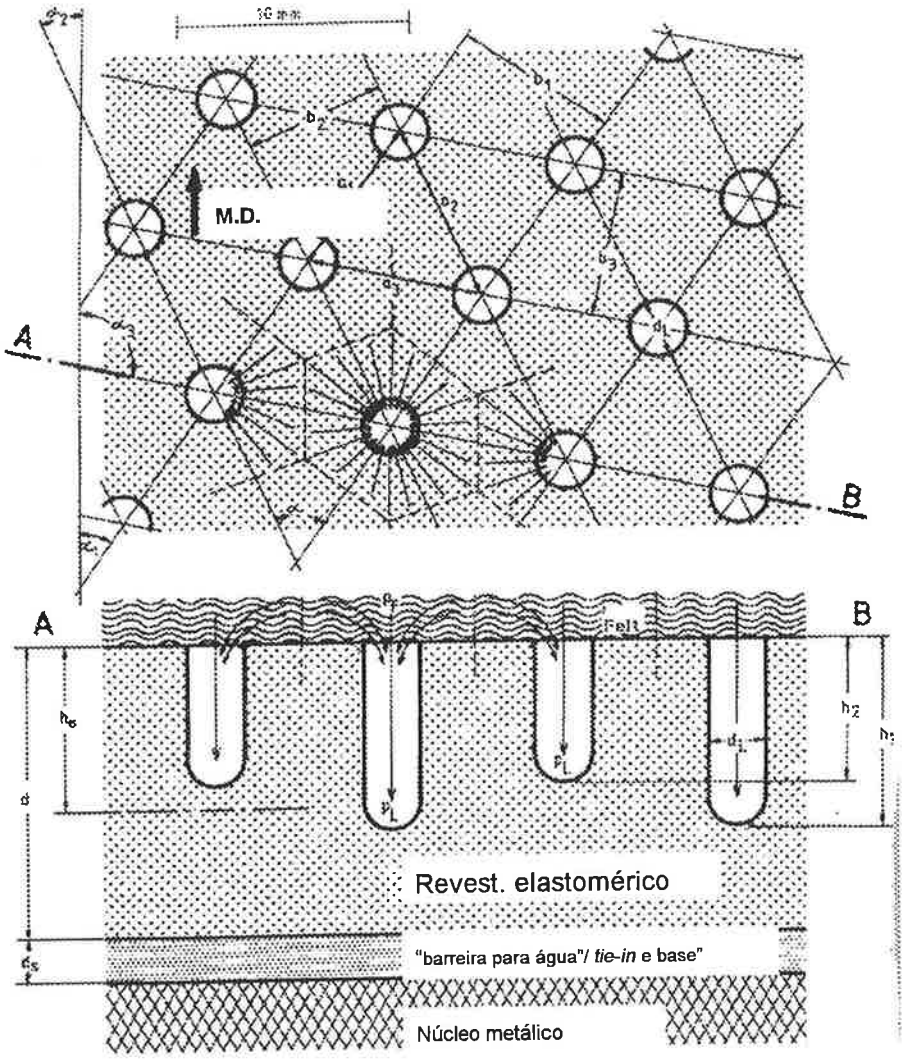


Fig. 2.17 - Planta e seção transversal do perfil "furo cego". (2.18)

A diferença de profundidades, nas furações, é especialmente importante para que se evite criar uma "linha contínua" que conduz ao enfraquecimento no revestimento. No caso da "prensa de sucção", um perfil característico é apresentado na figura 2.18.

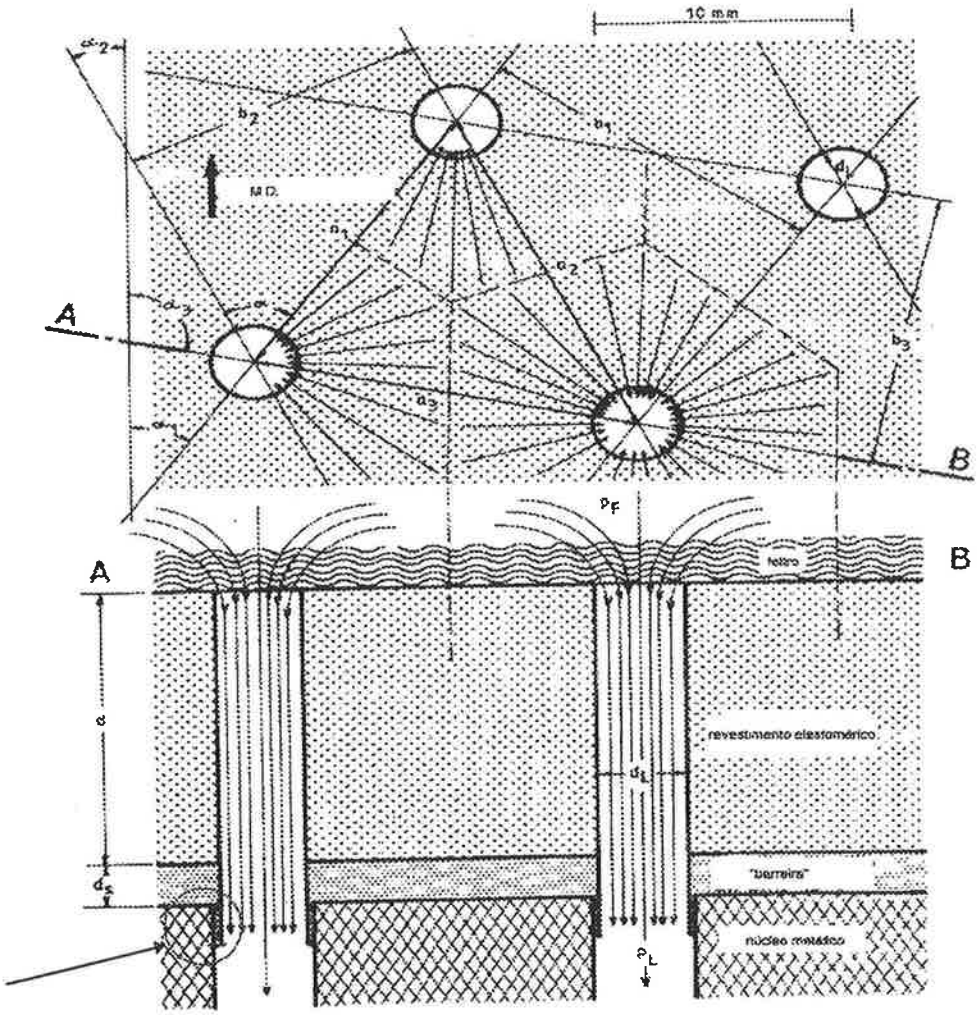


Fig. 2. 18 - Planta e seção transversal do revestimento sucção em prensa de sucção. (2.18)

Neste tipo de prensa, particular atenção deve ser dada para a base do revestimento, pois constitui-se na "barreira elastomérica" à presença de água, colocada logo acima do rolo metálico.

A distribuição de pressão no *nip* típica é apresentada na figura 2.19. (2. 20)

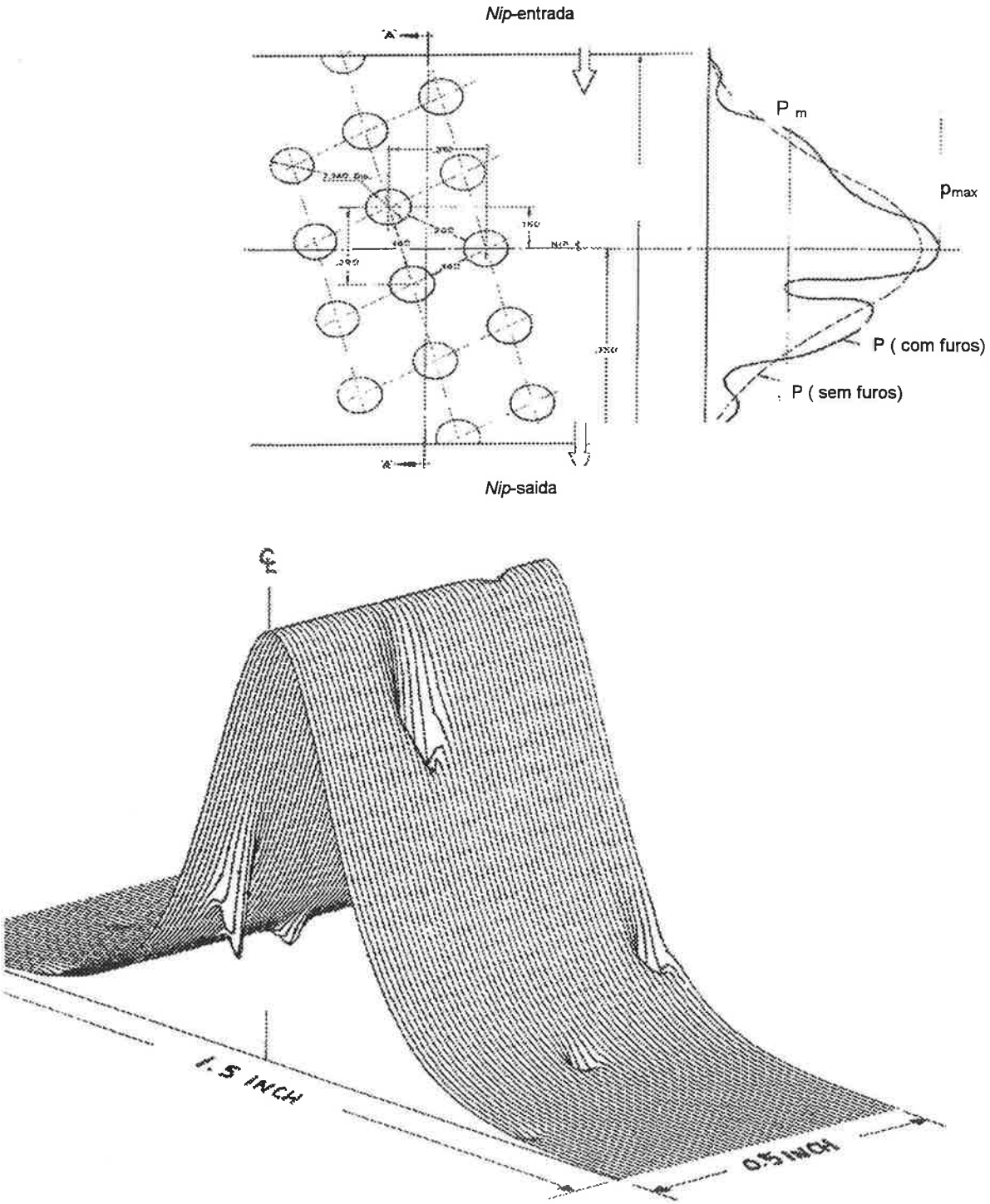


Fig. 2.19 - Distribuição da pressão no *nip* de prensa de sucção. (2.20)

(Observar a distribuição das pressões sem e com furações)

No caso de "prensas ranhuradas", um perfil característico é dado na figura 2.20. (2.18)

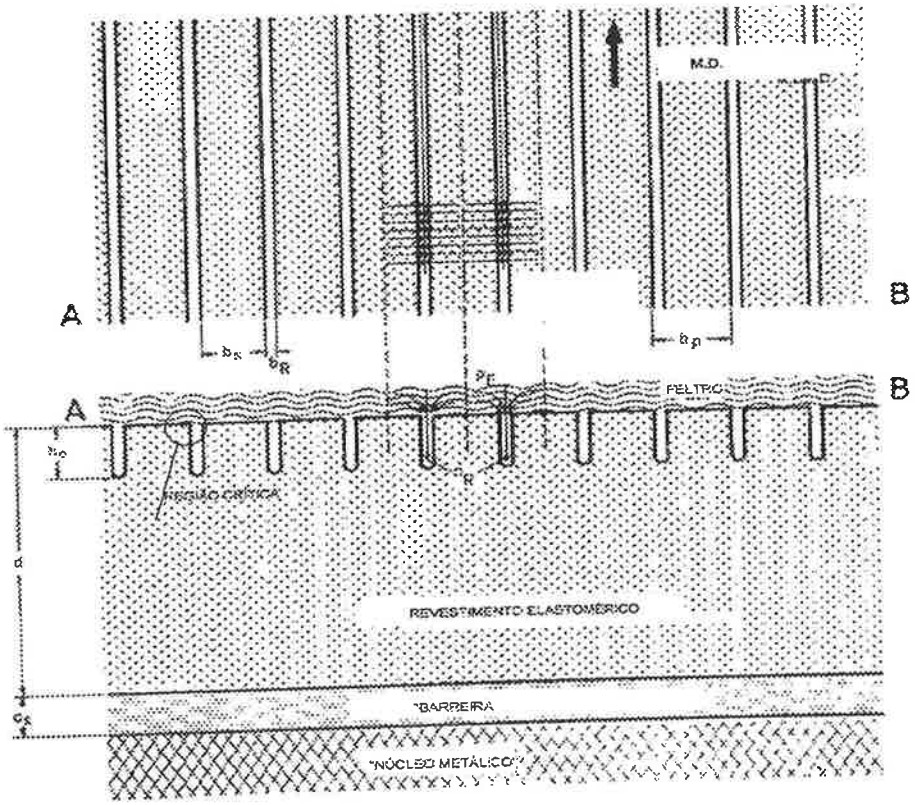


Fig. 2.20 - Planta e seção transversal de prensa ranhurada [2.18]

Estudos detalhados, decorrentes da geometria de furos, suas distâncias e teor seco na saída do *nip,* bem como de diferentes tipos de projetos de ranhuras, combinações de ranhuras e furo cego ou ranhuras e sucção, foram detalhados por *Gudehus.* [2. 18]

2.4 Fatores que influem na remoção da água na prensa de papel

Vários autores compilaram listas dos fatores que estão envolvidos com a remoção da água na prensa de papel. Em 1976, [2.13] listavam 10 variáveis, já em 1981, [2.13] listavam quase 40 variáveis. A tabela 2. 3 resume apenas as variáveis consideradas mais importantes dentro deste elenco. [2.13]

VARIÁVEIS PRIMÁRIAS	VARIÁVEIS SECUNDÁRIAS
IMPULSO(PRESSÃO x TEMPO)	RESISTÊNCIA AO FLUXO NO FELTRO
GRAMATURA DO PAPEL	UMIDADE INICIAL DO FELTRO
CARACTERÍSTICAS DA POLPA	PERFIL DE PRESSÃO : REVESTIMENTO
FELTRAGEM (SIMPLES x DUPLA)	SISTEMA DE FURAÇÃO / RANHURAS
TEMPERATURA DA FOLHA	
UMIDADE INICIAL DA FOLHA	
UNIFORMIDADE DE PRESSÃO NO *NIP*	
REUMEDECIMENTO	

Tabela 2.3 - Principais variáveis associadas à remoção de água na prensa úmida. (2.13)

Dentro das variáveis primárias, destaca-se o impulso como sendo fator marcante sobre % a seco da folha, como apresentado na figura 2.21.

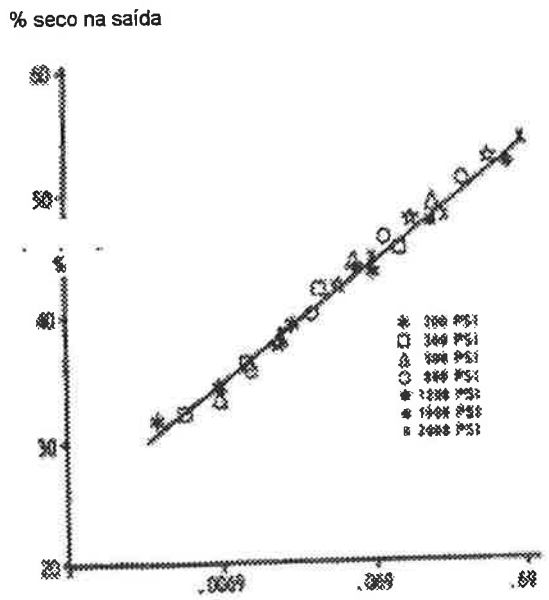


Fig. 2.21 - Efeito do impulso sobre a % a seco na saída do *nip* (2.13)

Deve-se destacar que, para o caso de papelão, a compactação de natureza dinâmica (do feltro+papel+água) no *nip* é controlada pelo fluxo de água retirado, ao passo que, para os papéis de baixa gramatura, a compactação é controlada pela pressão exercida. (2. 13)

A temperatura em que a folha está sendo pressionada no *nip* tem efeito marcante sobre a % a seco na saída do *nip*, como pode ser visto na figura 2.22. O aumento de temperatura tem efeito direto sobre a diminuição da viscosidade da água, bem como sobre a diminuição de sua tensão superficial, diminuindo a resistência ao fluxo desta, através do sistema folha/feltro.

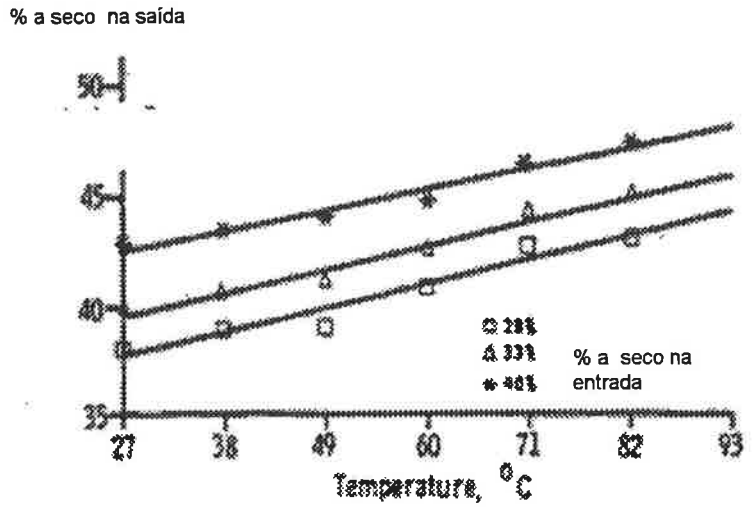


Fig. 2.22 - % a seco e temperatura da folha (2.13)

A inter-relação entre a pressão no *nip*, largura no *nip* , temperatura da folha e a % seco da folha na saída do *nip* é apresentada na figura 2.23 .

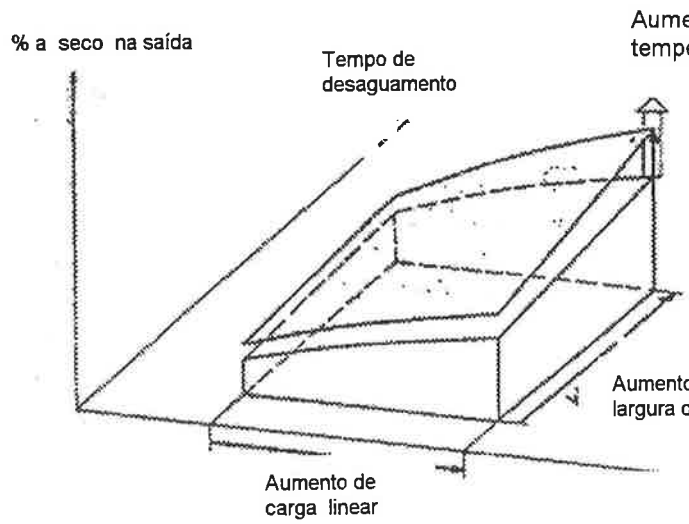
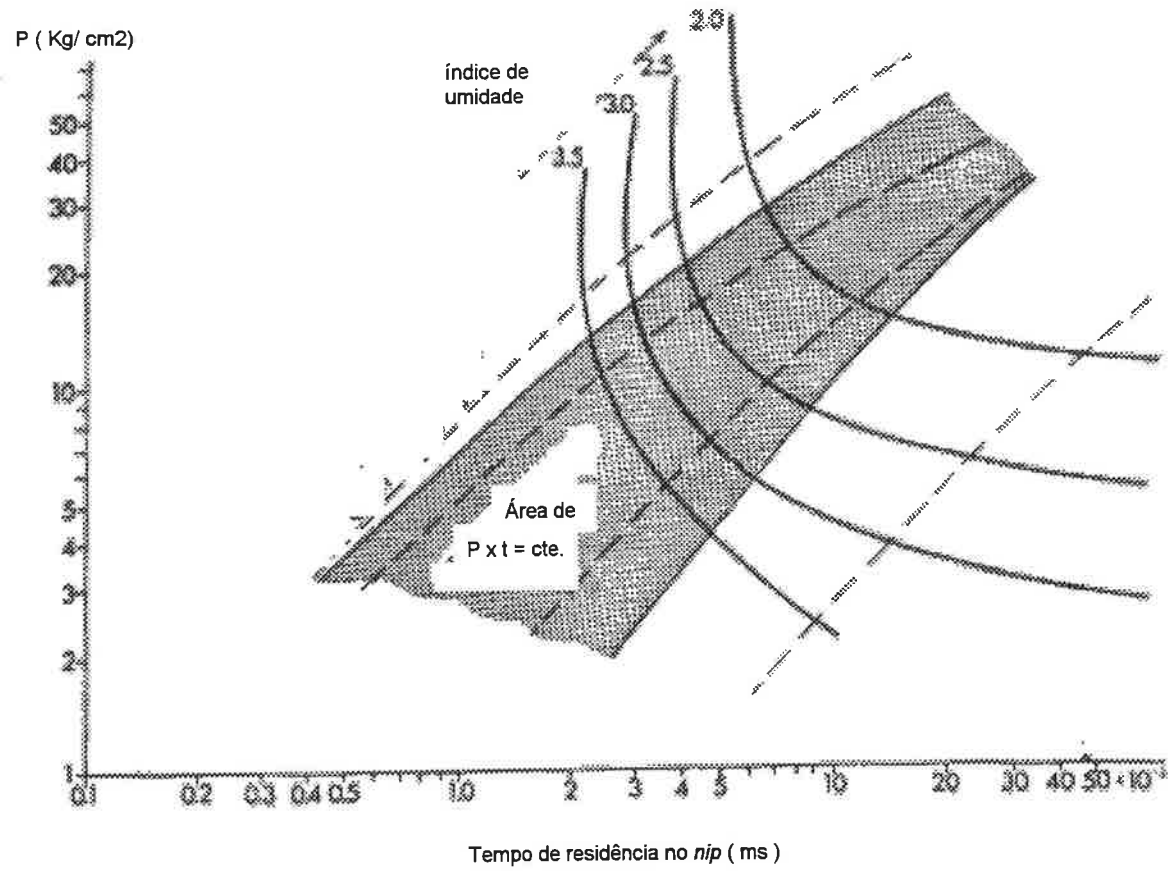


Figura 2.23 - Parâmetros operacionais e % a seco. (2.13)

Objetiva-se aumentar a % a seco na saída através dos aumentos na carga linear, na largura do *nip*, no tempo de residência e na temperatura da folha.

A figura 2.24 relaciona a pressão, o tempo de residência e ao índice de umidade (dado por *g* H_2O retido na folha / *g* polpa processada). (2.10)



Tempo de residência no *nip* (ms)

Fig. 2. 24 - Relação entre pressão e tempo de residência e indice de umidade da folha .
(Objetiva-se diminuir o índice de umidade da folha através do aumento do Impulso.)

Das variáveis secundárias, destaca-se o reumedecimento como sendo função da cinética de recuperação do papel, da permeabilidade do papel (na interface), tempo de contato feltro/papel após saída do *nip*, velocidade periférica do cilindro e, mais uma vez, da uniformidade de aplicação de pressão ao longo da largura do rolo.

3 - ASPECTOS GERAIS DE VIBRAÇÃO EM PRENSAS DE MÁQUINAS DE PAPEL

A vibração é um fenômeno com o qual os fabricantes de papel convivem, nas suas diferentes fases de fabricação. Ela se encontra presente em diferentes níveis em equipamentos mecânicos e hidráulicos, decorrente das imperfeições no equipamento e anormalidades nas condições operacionais. O problema torna-se mais acentuado à medida que aumenta a velocidade operacional, pelo aumento da amplitude da vibração (e conseqüente ruído), ao ponto de o equipamento tornar-se inseguro para operação normal, além de potencialmente danificar (ou encurtar a vida) do equipamento, seus componentes, acessórios e o próprio produto (no caso deste trabalho - papel), implicando na parada do equipamento para efetuar a necessária manutenção (com conseqüente perda de produção e custos de reposição do material danificado/deteriorado).

As causas mais comuns de vibração em máquinas rotativas, em particular de prensas de máquinas de papel, são: empenamento do eixo, folgas e solturas mecânicas, variações no torque elétrico dos motores, desalinhamentos, variações na dureza do revestimento elastomérico, variações na velocidade periférica do rolo ou/e acessórios, desbalanceamento (estático e dinâmico), entre outros. [2.12] [3.1] [3.2] [3.3] [3.4] [3.5].

A identificação da causa da vibração e a atenuação de seus efeitos nas prensas, ou em outras partes da máquina de papel, constitui-se em um dos problemas mais complexos da engenharia industrial papeleira.[3.7].

Foge ao objetivo do presente trabalho entrar em maiores detalhes relativos aos conceitos de vibração, sua terminologia, métodos de medição e interpretação de

resultados e medidas corretivas, por se tratar de assunto extensamente desenvolvido na literatura especializada [3.4], bem como (no caso de prensas de máquinas de papel), terem sido publicados, pelo autor, artigos específicos .[3.8] [3.9] [3.10] [3.11] [3.12] [3.13] [3.14] [3.15] [3.16]

As recomendações de projeto e de operação, relativas aos "níveis de aceitação de vibração mecânica " , são dadas por normas, tais como a VDI - 2056 (G), DIN 2056, ou ainda a ISO 3945, as quais relacionam a freqüência e a amplitude considerada "aceitável" (em termos de "severidade da vibração").

As recomendações quanto aos graus de desbalanceamento dinâmico em máquinas rotativas são dadas pela norma BS 6861 [objetivando-se, nas máquinas de papel, o grau G 2,5 (*mm/s*) e, no máximo, G 6.3 (*mm/s*)] .

Aqui, procuremos apenas destacar alguns aspectos relevantes ao entendimento e relacionamento deste problema de vibrações, com os aspectos deste trabalho.

Neste sentido, além dos problemas relativos à vibração induzida pelos rolamentos situados nas extremidades dos rolos da prensa da máquina de papel, desalinhamento deste rolos (vibrações axiais), vibrações de transmissão (dos motores, redutores e outros equipamentos periféricos), procuremos salientar aqueles relativos à prensagem do papel em si.

Em particular, procura-se analisar os aspectos principais associados à modelagem da dinâmica de cilindros revestidos, [3.12] como mostra a figura 3.1.

Neste modelo simplificado, o rolo metálico atua como sendo a massa, sendo que o revestimento e o feltro atuam como mola e amortecedor (em paralelo). Irregularidades, tais como a passagem do feltro no *nip* (na região da junta ou

costura transversal do feltro) conduzem a transitórios, ou seja, uma resposta oscilatória ao pulso provocado, e este será tanto maior quanto maior a dureza do revestimento elastomérico (que apresenta menor tolerância a pequenas não-uniformidades na entrada do *nip* se comparadas as de durezas menores).

A resposta proveniente do pulso provocado, tende a ser atenuada e decair como tempo, como função direta da característica do amortecimento do composto elastomérico e de sua histerese. Em outras palavras, o revestimento atua como uma mola não-linear, ou como um material viscoelástico, como será discutido mais adiante.

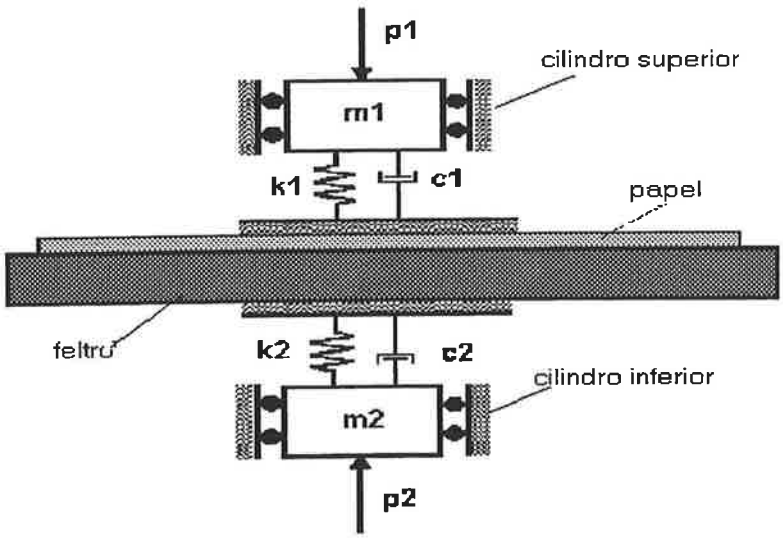


Fig. 3.1 - Modelagem do sistema (com um grau de liberdade)

Assim, à medida que aumentamos a velocidade operacional do rolo revestido, aumentamos sua "rigidez" (módulo dinâmico do composto), alterando a largura do *nip,* bem como a pressão local. O problema complica-se, pois a histerese do composto elastomérico (aquecimento por atrito interno), acrescido de eventual emprego de vapor (para aumentar a temperatura do papel), altera as propriedades

viscoelásticas do composto elastomérico, na direção oposta, ou seja, tende a diminuir esta rigidez, ou, ainda melhor, o módulo dinâmico do composto.

É importante lembrar que nos casos reais não existe a excitação, devido apenas ao pulso acima mencionado (normalmente de curta duração), como também existem excitações cíclicas, conduzindo a respostas do tipo harmônicas. Estas, por sua vez, dependem do fator de amplificação dinâmica do conjunto[3.12], o qual é função da frequência. Nos casos em que há pequeno amortecimento, existe a possibilidade de termos amplitudes elevadas, principalmente em freqüências de excitação que estejam próximas das freqüências naturais do conjunto cilindros-revestimento-feltro.

Por conseguinte, há interesse elevado no estudo do isolamento da vibração, visando minimizar a conseqüente atuação de forças no sistema (equipamento), através da determinação e minimização da transmissibilidade (Tr) dinâmica, dada pelo quociente entre a força de reação máxima e a amplitude da força excitadora. Em outras palavras, o composto elastomérico deve atuar como redutor da transmissão da vibração, evitando, com isto, entre outros aspectos, afetar a qualidade do papel,[3.3] pela não uniformidade temporal das pressões envolvidas no *nip*.

Em estudo anterior, [3.12] foi possível demonstrar experimentalmente (a nível de "chão de fábrica"), que as "assinaturas típicas das prensas" (respostas vibratórias às excitações) , ou seja, os espectros em freqüência, eram bastante atenuadas quando da comparação entre um mesmo rolo sem e com revestimento, como ilustram as figuras 3.2 e 3.3.

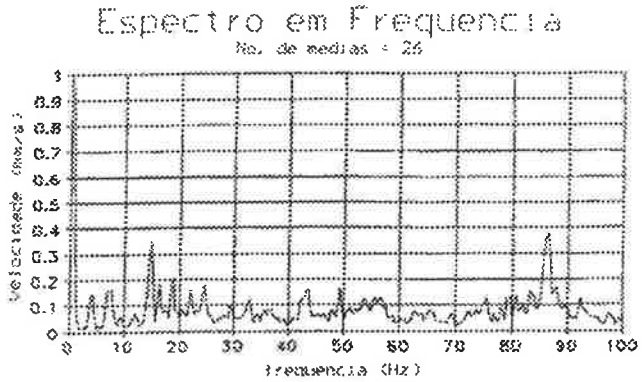
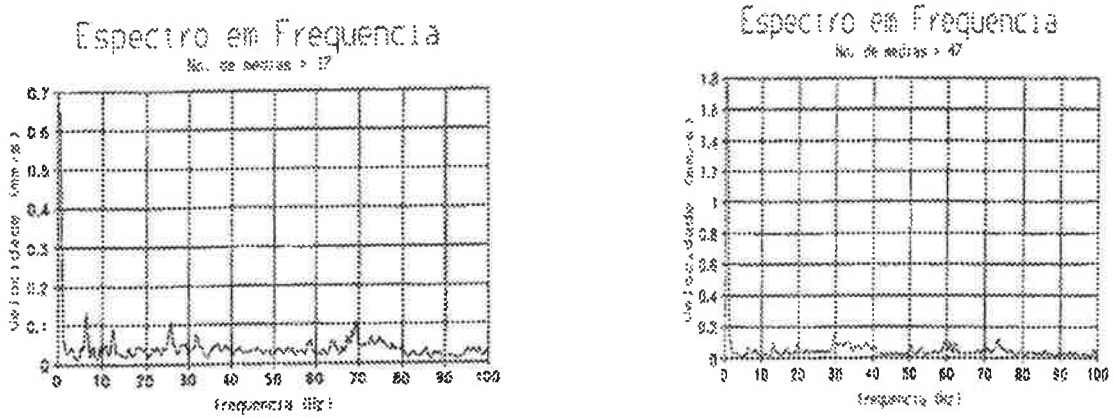


Fig. 3.2 - "Assinatura de rolo" sem revestimento



Figuras 3.3 - "Assinaturas" de rolos com revestimentos de diferentes graus de utilização [3.12]

As vibrações conduzem, por sua vez, a outras complicações, destacando-se a corrugação do feltro e a excentricidade, "elipse" (desgaste desigual) e "degraus" (deformação repetitiva localizada) do revestimento elastomérico. Assim, para rotações próximas de múltiplos inteiros da rotação da prensa, haverá a possibilidade da formação de amassamentos localizados na superfície do revestimento e conseqüente corrugação do feltro, bem como o surgimento de uma retro-alimentação dos defeitos (*feed-back*) do sistema feltro / revestimento, na atuação de pulsos.

4- REVESTIMENTOS ELASTOMÉRICOS

4.1 Introdução

Os polímeros podem ser classificados em três grupos distintos, a saber : termoplásticos, elastoméricos e termofixos. [4.1]

Os termoplásticos podem ser subdivididos em cristalinos e amorfos. São lineares ou ramificados, e fundem ao serem aquecidos.

Os termofixos, no outro extremo, são rígidos, devido à elevada ligação cruzada, e degradam ao serem aquecidos, em vez de fundirem.

Os elastômeros, também podem ser subdivididos em termoplásticos e termofixos [4.2] , tendo ligações cruzadas que propiciam ao material apresentar propriedades elásticas, intermediárias aos apresentados acima .

A figura 4.1, resume a classificação geral dos polímeros.

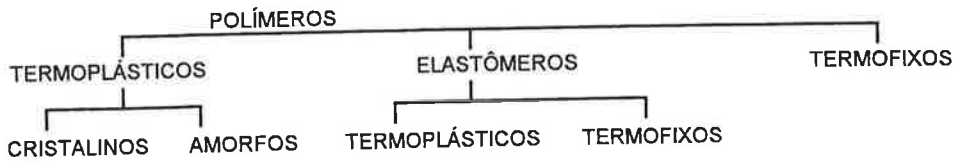


Fig. 4.1 - Classificação geral dos polímeros.

Na categoria dos termoplásticos, de maneira ampla, incluem-se o **PS**-poliestireno, como o de maior consumo (*comodity*), **PET** - polietileno tereftalato, de consumo intermediário, **PA** - poliamida, para aplicações estruturais, e o **PEEK**-polieteretercetona, de alto desempenho. [4.3]

Na categoria dos termofixos, incluem-se as resinas: fenólicas, uréia-formaldeido , melaminas (fórmica), epoxes, para citar apenas algumas. [4.3]

Na categoria elastômeros temos, também de maneira ampla, as borrachas **NR**-naturais e sintéticas, de uso geral, tais como: **SBR**-copolímero estireno butadieno, **IR**-isopreno, ou especiais, tais como: **CR**-policloropreno, **NBR**-acrilonitrila-butadieno, **HNBR**-nitrílica hidrogenada, **IIR**-borracha butílica, **EPDM**-copolímero etileno-propileno, **MQ**- borrachas de silicone, **CSM**- polietileno clorosulfonado, **PU**-poliuretanos, etc.

Alguns autores, [4.4] classificam as borrachas como subgrupo dos polímeros termofixos.

Para atender as demandas específicas associadas a revestimentos de cilindros metálicos empregados na fabricação de papel e celulose, como visto no capítulo 2, os materiais elastoméricos têm apresentado um conjunto de propriedades/custo que se destacam em relação aos polímeros termofixos; e, em terceiro plano, estão os termoplásticos.

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

Os termos "borracha" e "elastômero" podem ser tomados como sendo intercambiáveis, sendo que o termo elastômero é considerado mais técnico, ao

passo que o termo borracha é mais coloquial, derivado de seu emprego histórico, na forma de borracha natural, como apagador. [4.4]

Os elastômeros (naturais ou sintéticos), são polímeros amorfos, aos quais são adicionados vários ingredientes, criando um "composto". Após a vulcanização, estes materiais "compostos" tornam-se elastoméricos, apresentando um comportamento de "borracha".

Deve-se salientar que, não somente se tornam elásticos, como também dissipam energia devido à sua natureza viscoelástica. Apresentam, também, elevada resistência ao cizalhamento e à compressão, porém, podem falhar, como todo componente que seja submetido a uma carga mecânica, quando submetidos a condições de fadiga. Assim, torna-se importante a previsão da durabilidade dos componentes elastoméricos.

Neste sentido, torna-se importante o estabelecimento de critérios de projeto e análise. O emprego do CAD - "*Computer Aided Design*" e análises decorrentes (FEM - *Finite Element Method*), é de elevado interesse tecnológico, tanto no estágio de desenvolvimento do produto, como na análise de eventuais falhas no desempenho em uso. Associam-se a estes requisitos as especificações técnicas, ensaios convencionais e especiais no sentido de estabelecer o controle da qualidade do produto. Estes ensaios estabelecem as constantes físicas, por intermédio das quais caracterizamos o composto elastomérico como material de Engenharia.

Para entendermos a caracterização dinâmica de compostos elastoméricos de média e elevada dureza (densidade de ligação cruzada = *cross- link density*), associado a uma análise em modelos para uso em CAD, devemos analisar

inicialmente pelo posicionamento dos compostos elastoméricos no campo dos materiais de engenharia, com suas propriedades características, seguido de uma análise dos métodos de avaliação das propriedades dinâmicas, em paralelo com uma análise do método de elementos finitos aplicado a materiais elastoméricos.

Devemos salientar, ainda, que, para um bom projeto de um composto elastomérico (ou polimérico em geral), devemos ter um bom entendimento da interdependência da estrutura, propriedades do material, processamento e uso final. O entendimento dos fundamentos da estrutura do polímero permite que se possa efetuar previsões quanto ao seu comportamento. Por outro lado, as propriedades térmicas e reológicas determinam o processo de fabricação. Assim, o próprio processamento tem influência sobre as propriedades finais, tais como: retração, empenamento, densidade, resistência e tenacidade, entre outras. Acrescente-se que estas propriedades são anisotrópicas e dependem da temperatura e condições de processamento.

Devido ao fato de que as propriedades finais são altamente dependentes de tão diferentes variáveis, torna-se claro o grau de dificuldade associado ao estabelecimento de dados confiáveis e relevantes para o projeto de componentes poliméricos, mormente quando suas propriedades são dependentes do tempo, temperatura e do meio em que atuam.

Os materiais poliméricos, à semelhança dos materiais metálicos e cerâmicos, são também sensíveis a variações de temperatura. Assim, polímeros apresentam temperaturas nas quais temos a fusão e/ou transição vítrea. Tais temperaturas podem ser determinadas através da variação na curva do volume específico, em função da temperatura, como ilustra esquematicamente a figura 4.2.

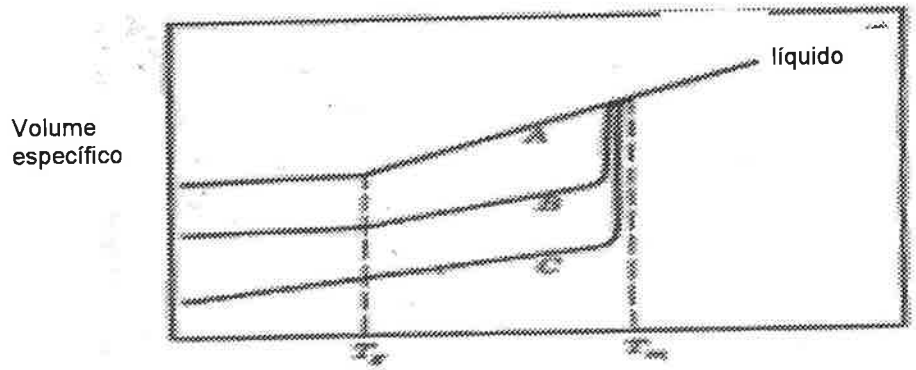


Fig. 4.2 - Variação do volume específico com a temperatura [4.5]

As curvas A e C são típicas para um polímero amorfo e para um polímero cristalino, respectivamente. Verificamos uma descontinuidade acentuada no material cristalino, associada a temperatura de fusão Tm. Para o caso de um material polimérico amorfo, no presente caso um material elastomérico, verificamos que a curva é contínua no esfriamento, porém há uma diminuição no gradiente da temperatura de transição vítrea (Tg). Abaixo da temperatura de transição vítrea, o material é considerado como sendo amorfo, sólido e rígido, ao passo que acima de Tg ele constitui-se em um material sólido elástico e, para temperaturas maiores, tende para um líquido viscoso.

Portanto, para polímeros amorfos quando aquecidos, a temperatura de transição corresponde à transformação do material rígido para um material que tem características de "borracha".

A temperatura de transição vítrea depende de componentes estruturais que influenciam a mobilidade das moléculas (vibração e rotação). Acrescente-se que esta mobilidade também está associada à rigidez da cadeia, a qual aumenta com a introdução de cadeias ramificadas, laterais, restringindo assim a mobilidade. A

figura 4.3 ilustra a dependência dos valores de Tm e Tg em relação à massa molecular.

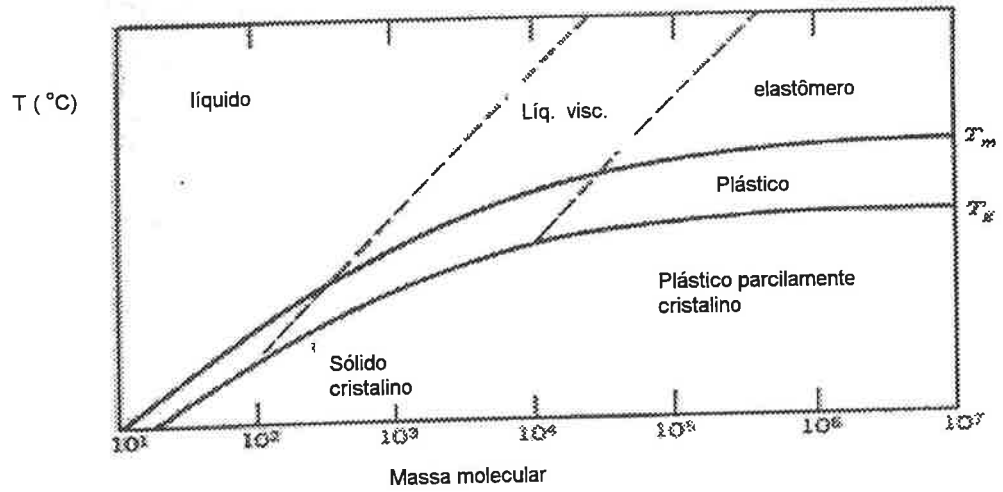


Fig. 4.3 - Dependência das propriedades do polímero e das temperaturas Tm e Tg, em função massa molecular .[4.5]

A temperatura de transição vítrea "Tg" também aumenta com a densidade de encadeamento (ou ligação cruzada) e, como conseqüência, aumenta o módulo e diminui o alongamento. Polímeros com alta densidade de encadeamento apresentam pequena fluência (*creep*), mesmo para testes realizados em longos tempos .

Se a temperatura ambiente estiver acima de "Tg", o comportamento será elastomérico. Por outro lado, se a temperatura ambiente estiver bem abaixo de "Tg", a resposta do material será duro e frágil. [4.6]

Normalmente, a temperatura de transição ocorre em uma faixa de temperaturas, sendo que "Tg" encontra-se no centro desta faixa. Além da variação do volume específico, outras propriedades apresentam descontinuidade na "Tg" , tais como: módulo elástico, coeficiente de expansão linear, capacidade térmica,

amortecimento e resistência ao impacto. A figura 4.4 exemplifica a variação típica do módulo elástico, para diferentes níveis de ligação cruzada. [4.7]

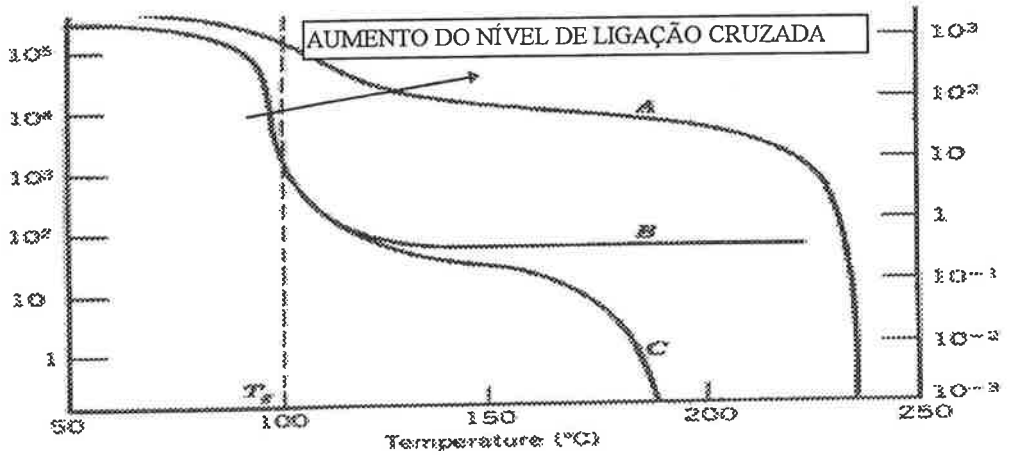


Fig. 4.4 - Módulo elástico, nível de ligação cruzada e Tg. [4.7]

A tabela 4.1 resume os valores de "Tg" para alguns plásticos e elastômeros, mais comuns. [4.5] [4.8]

MATERIAL (**PLÁSTICO**)	Tg (°C)	MATERIAL (**ELASTÔMERO**)	Tg (°C)
PE-BD	-110	NBR(ACN VARIAVEL)	-72 A -20
PE-AD	-90	SBR	-50
PVC	105	EPDM	-55
PTFE	-90	H-NBR	-30
PP	-20	CR	-45
PS	100	BR	-112
PC	150	PU	-35

Tabela 4.1 - Elastômeros: subgrupo dos materiais poliméricos. [4.5]

Historicamente, Staudinger [4.9], nos anos de 1920, desenvolveu as idéias associadas ao conceito de macromolécula do polímero, conhecido mais comumente por borracha, podendo ser representado por $(C_5 H_8)_{20\,000}$.

Nos anos de 1950, os químicos começaram a entender o detalhe da estrutura dos polímeros e, através do emprego de catalizadores especiais (Ziegler),

conduziram ao desenvolvimento de vários polímeros, entre os quais a borracha sintética. [4.9]

A ligação entre os átomos é covalente e é a principal responsável pela formação das estruturas macromoleculares, enquanto a ligação intercadeias, que mantém as macromoléculas unidas, é fraca (Van der Waals). [4.9]

De um modo genérico, polímeros são materiais compostos de moléculas formadas de várias repetições (poli) de uma mesma unidade (mero), formando estruturas uni, bi ou tridimensionais.

Elastômeros são essencialmente gases supercondensados, pois a maioria de seus precursores monoméricos são gases que contêm átomos de carbono e hidrogênio (hidrocarbonetos).

As cadeias destes átomos C-H, tendem a formar grupos básicos, nos quais é freqüente observar-se a substituição dos átomos de hidrogênio por outros elementos ou grupos, formando um novo grupo. Estes grupos básicos reagem entre si na forma "cabeça-rabo" da cadeia, conduzindo a formação das macromoléculas. Os grupos básicos são denominados de monômeros e, quando unidos na forma "cabeça-rabo" (quando polimerizam), são chamados de polímeros. Quando dois grupos distintos reagem entre si formando um novo grupo, denominamos este de copolímero. Com o aumento desta cadeia, ou seja, a polimerização, tanto o peso molecular como a viscosidade aumentam, resultando na solidificação de um produto cujas propriedades ainda estão aquém daquelas necessárias para uma aplicação em Engenharia.

Quando o peso (massa) molecular é baixo, as tensões mecânicas aplicadas tendem a propiciar o escorregamento relativo entre as moléculas umas sobre as

outras, separando-as. O sólido correspondente apresentaria, em conseqüência, uma baixa resistência mecânica e, portanto, tem baixo interesse estrutural. Com o aumento da massa molecular, as moléculas se entrelaçam e as forças atrativas entre as mesmas tendem a aumentar e, em correspondência, sua propriedade mecânica. Objetiva-se, então, que a soma dos entrelaçamentos com as forças atrativas intermoleculares se adicionem (e que sejam maiores que) as forças covalentes formadoras da espinha dorsal do polímero. A maioria dos processos industriais requer polímeros de massa molecular elevada, pois necessitam de elevada resistência durante a conformação (sem que haja ruptura), como é o caso de extrusão, calandragem ou, ainda, na injeção por sopro.

Um dos monômeros básicos é o etileno gasoso, o qual, quando polimerizado, torna-se no bem conhecido polímero - o polietileno. Este, por sua vez, é a base para muitos outros monômeros, tais como estireno, acrilonitrila, isobutileno, cloreto de vinila, os quais, por sua vez, podem ser polimerizados formando o poliestireno, poliacrilonitrila, polisobutileno, etc.

Outro monômero básico é o butadieno, o qual é também a base para outros monômeros, tais como o isopreno e o cloropreno. A reação destes grupos de monômeros resultam nos copolímeros butadieno-estireno, butadieno-acrilonitrila, isopreno-isobutileno, os quais constituem a base dos elastômeros de interesse industrial.

4.2 Elastômeros: sua classificação

Existem várias maneiras de classificar os elastômeros que incluem o processo de polimerização, os elementos que compõem o monômero, estrutura cristalina, etc.

Na Engenharia de Materiais, no entanto, a classificação de maior interesse está associada às propriedades, ou ao seu uso final. Uma das classificações mais importantes, encontra-se baseada na resistência ao calor e a solventes. Assim, temos dois tipos extremos que conduzem à classificação dos elastômeros em: termoplásticos e termofixos (termorrígidos, ou ainda, termoestáveis).

Elastômeros que amolecem e escoam (reversivelmente) quando aquecidos ou tratados com solvente apropriado, são denominados de termoplásticos.

Os termofixos são formados por reticulados tridimensionais que não amolecem uma vez curados, enquanto que os termoplásticos podem ser aquecidos e fundidos. Os termofixos podem absorver solventes (inchando), porém, não se dissolvem no mesmo e não podem ser reprocessados pelo simples aquecimento, como é o caso dos termoplásticos.

O processo de adição de diferentes produtos químicos ao elastômero básico, visando melhoria das propriedades é chamado de "formulação do composto elastomérico".

Ingredientes críticos e típicos incluem agentes de cura (ou curativos), cargas de reforço, antidegradantes, agentes de processamento, extensores, aditivos especiais (agentes de pegajosidade, agentes de sopro, corantes).

Nos elastômeros termoplásticos não há necessidade destes materiais, pois possuem domínios heterogêneos que propiciam a elasticidade e tenacidade.

Após a reação de vulcanização dos termofixos, o material apresenta pouca possibilidade de escoamento, por conseguinte são mais adequados para aplicações em temperaturas mais elevadas.

As propriedades dos termofixos são afetadas pela densidade de encadeamento "*cross linking density*", ou, inversamente, pela massa molecular entre os encadeamentos.

Neste ponto, convém abrirmos um pequeno parêntesis e lembrarmos que a indústria da borracha, tradicionalmente, tem-se ocupado em processar borrachas naturais.

Por outro lado, as indústrias químicas, quando designam polímeros específicos para a indústria de borracha, estas têm-se preocupado com dois aspectos básicos, a saber:

1- procurar desenvolver elastômeros sintéticos que substituam a borracha natural com sua inerente elasticidade, e;

2- desenvolver elastômeros que possam ser processados usando o equipamento convencional já existente na indústria da borracha.

Assim, é recente a aceitação de plásticos na indústria de compostos de borracha (anteriormente, os plásticos eram considerados como contaminante), permanecendo, porém, ainda, a tradição de serem indústrias diferenciadas com suas tecnologias específicas.

4.3 Tipos de elastômeros

A literatura técnica, [4.10] relativa aos diferentes tipos de elastômeros disponíveis comercialmente, abrange uma lista de pelo menos 20 tipos/ categorias diferentes, cada qual com suas características básicas, físicas, químicas, específicas e bastante diferenciadas, bem como seus preços de comercialização.

Como no caso dos demais materiais de engenharia, os elastômeros devem ser entendidos e empregados corretamente, dentro de suas vantagens e limitações específicas, permitindo a seleção do material de menor custo e melhor desempenho para a aplicação específica.

Estes elastômeros são o ponto de partida para o desenvolvimento de centenas e até milhares de compostos elastoméricos.

Os materiais elastoméricos apresentam grande variedade química, porém possuem algumas propriedades em comum, a saber:

1- devem apresentar alguma liberdade rotacional;

2- não devem cristalizar com facilidade quando submetidos à deformação;

3- deve haver um mecanismo de encadeamento (*cross-linking*) que una os diferentes monômeros de diferentes cadeias.

A liberdade rotacional deve ser de tal ordem que possa permitir o encolhimento das cadeias (*coil-up*), quando da aplicação de uma força. Este critério muitas vezes conflita com o segundo fato, qual seja, o de não cristalizar com facilidade (pois, pela aplicação de uma deformação, haverá o alinhamento das cadeias e, portanto, maior facilidade para cristalização e formação de um elastômero semicristalino).

O encadeamento (*cross-linking*) é um mecanismo importante na formação de cadeias poliméricas e pode ocorrer no estágio de polimerização ou, mais freqüentemente, em um estágio posterior do processo. Assim, o produto pode ser moldado na sua forma plástica e no estágio posterior ser encadeado (*crosslinked*), objetivando as propriedades elásticas pretendidas. Este encadeamento une cadeias adjacentes formando subcadeias, de modo que a distância seja de algumas unidades estruturais.

Os agentes de encadeamento, comumente conhecidos como agentes de vulcanização, serão discutidos em outro capítulo, porém os mais comumente empregados são o enxofre e os peróxidos.

4.4 Compostos elastoméricos

Os compostos elastoméricos visam, através da combinação do(s) elastômero(s) e aditivos, obter uma mistura (mecânica), cujas propriedades atendam às propriedades químicas e físicas, necessárias no produto final.

A elaboração de compostos elastoméricos visa atender três pontos básicos, a saber:

1 - assegurar a obtenção de propriedades no produto final que satisfaçam os requisitos de aplicação final;

2 - obter características de processamento adequadas e apropriadas ao equipamento disponível;

3 - que as propriedades, bem como a processabilidade objetivadas, sejam atingidas ao menor custo possível, de maneira reprodutível.

Uma formulação de um composto elastomérico possui tipicamente dez ou mais componentes/ingredientes, cada qual tendo sua função específica sobre a propriedade, processabilidade e custo. Dada a existência de centenas de ingredientes [4.10] disponíveis, visando atender aqueles requisitos, é necessário conhecer-se, ao menos, a função específica destes no contexto do composto elastomérico.

Um composto elastomérico possui na sua formulação os seguintes ingredientes básicos:

1 - elastômero(s);
2 - agente de vulcanização;
3 - aceleradores;
4 - ativadores e retardantes;
5 - antidegradantes (antioxidantes, antiozonante, protetivos);
6 - agentes de processamento (peptizantes,lubrificantes);
7 - cargas (negro-de-fumo, outras cargas não-escuras ou claras);
8 - plastificantes, amolecedores e agentes de pegajosidade;
9 - pigmentos,corantes;
10 - agentes especiais (formadores de espuma, desodorantes).

A seguir, apresentamos a função de cada ingrediente, de maneira resumida, necessária para o entendimento de sua função, no que tange principalmente às propriedades mecânicas do composto.

1- Elastômeros

Os elastômeros, quando comparados com outros materiais de engenharia, [4.7] caracterizam-se pela sua alta deformabilidade, baixa rigidez, alta capacidade de acumular energia, possuir curvas tensão-deformação não-lineares, terem alta

histerese, e suas propriedades serem dependentes da temperatura e da taxa de deformação, sendo que sua compressibilidade se assemelha a dos líquidos.

Alguns elastômeros possuem características adicionais em certo grau, tais como: resistência química, resistência aos óleos, ao ozone, bem como outras características que serão discutidas a seguir.

O elastômero constitui a espinha dorsal do composto, pois é o que determina as características básicas do produto final, principalmente as propriedades químicas.Todos elastômeros são elásticos, flexíveis e relativamente impermeáveis ao ar e à água. Além destas propriedades comuns, cada elastômero possui suas características peculiares e únicas, levando-se em conta que possuímos nos dias de hoje, mais de vinte tipos básicos de elastômeros de interesse comercial, para os quais tanto as propriedades, como seus preços, variam substancialmente.

A seguir, apresentam-se os elastômeros mais comumente empregados, bem como suas principais características. A literatura especializada [4.10] apresenta, em detalhe, cada tipo de elastômero.

1.1 NR - BORRACHA NATURAL - (OU POLIISOPRENO)

$$-\left[CH_2 - \underset{\displaystyle CH_3}{\overset{\displaystyle |}{C}} = CH - CH_2 \right]_n -$$

A **NR** apresenta excelente resiliência e baixa histerese (energia absorvida quando o elastômero é deformado). Deve-se lembrar que a resiliência é o recíproco da histerese, ou seja, baixa histerese = alta resiliência e vice-versa). [Obs.: agente de vulcanização = enxofre].

1.2 SBR- ESTIRENO BUTADIENO - $|CH_2\text{-}CH{=}CH{=}CH_2\text{-}|_5 \; |CH_2\text{-}CH\text{-}|_n$ (C_6H_5)

O **SBR** é o elastômero (copolímero) de maior consumo (aproximadamente 60% do total). As proporções entre as partes variam, sendo que o mais comum é de 23% estireno e 77% butadieno. O **SBR** é um elastômero de alta histerese. Aumentando o teor de estireno até 50%, verifica-se um aumento da dureza e resistência a abrasão do composto elastomérico. [Obs.: agente de vulcanização = enxofre].

1.3 IIR - BUTÍLICA : $\left|-CH_2-\underset{CH_3}{\overset{CH_3}{C}}-\right|_{50} \left|-CH_2-\underset{CH_3}{C}=CH-CH_2-\right|$

(isobuteno- isopreno)

Para dar alguma insaturação ao isobuteno, o isopreno é adicionado ao copolímero (0,5 a 3%). O IIR apresenta alta histerese e baixa resiliência.

[Obs.: agente de vulcanização = enxofre.]

1.4 CR - POLICLOROPRENO - $\left|-CH_2-\underset{Cl}{C}=CH-CH_2-\right|_n$

O **CR**, comercialmente, é conhecido por neoprene. A presença do cloro faz com que o composto seja do tipo não-inflamável, resistente às intempéries, ao calor e boa adesão ao substrato. Apresenta resiliência moderada e alguma resistência aos óleos. Apresenta, também, baixa permeabilidade aos gases e à água. [Obs.:agente de vulcanização = óxido de Zn ou Mg.]

1.5 NBR - BORRACHA NITRÍLICA $| -CH_2-CH = CH - CH_2-|_3 \; | -CH_2 - \underset{CN}{CH} - |_n$
(COPOLÍMERO BUTADIENO ACRILONITRILA)

O **NBR** é um elastômero de elevada resistência aos combustíveis e aos óleos minerais. A resistência aumenta com o teor de acrilonitrila (ACN=35 a 40%), tem maior Tg, redução da resiliência, menor inchamento na boca do molde (*die-swell*), menor permeabilidade aos gases e apresenta maior resistência ao calor.

Teores mais baixos (15 a 25% de ACN) são empregados onde a resistência aos óleos é mais importante. O NBR é atacado pela ozona, fato que pode ser contornado pela presença de PVC na blenda elastomérica.

O NBR pode ser hidrogenado, formando o H-NBR [4.34], visando eliminar a sua insaturação, de modo a aumentar a resistência ao envelhecimento (oxidação), principalmente em elevadas temperaturas, e na presença de hidrocarbonetos. [Obs.: agente de vulcanização = enxofre.]

1.6 EPDM - $| -(CH_2-CH_2-)_{37} (- CH_2- \underset{CH_3}{CH} -)_{13} - DIENO-|$
(TERPOLíMERO ETILENO-PROPILENO-DIENO)

0 copolímero etileno-propileno é saturado, portanto apresenta alta resistência à oxidação, intempérie (ou presença de ozona), bem como estabilidade térmica. A presença de um terceiro monômero (dieno conjugado - do tipo etilideno norboneno ou diciclo pentadieno), visa dar certa insaturação, necessária para a vulcanização (porém não incorpora esta insaturação no corpo do elastômero). [Obs.: agente de vulcanização = peróxidos ou enxofre.]

1.7 MQ - BORRACHA DE SILICONE $| \; - \underset{CH_3}{\overset{CH_3}{Si}} - O - |_n$

O **MQ** difere dos elastômeros anteriores, por não ter -C- no corpo e, sim, siloxanas, de elevada flexibilidade, e baixo Tg (-127°C). São empregados onde se necessita elevada resistência a temperaturas elevadas ou baixas, porém, apresentam baixa resistência mecânica. [Obs.: agente de vulcanização = peróxidos.]

1.8 FKM - BORRACHA FLUORCARBONADA $| CH_2\text{-}CF_2)_x (CF_2\text{-}CF)_y|$ com CF_3

(COPOLÍMERO FLUORETO DE VINILIDENO- HEXAFLUORPROPILENO)

O **FKM** se destaca por ser o elastômero de maior custo e também o mais inerte. Suporta temperaturas até 240°C , é pouco afetado por ácidos, bases, ou solventes aromáticos. No entanto, cetonas e acetatos podem vir a atacar o material. Comercialmente, são os conhecidos Viton, Teflon, Fluorel, etc.

1.9- PU POLIURETANOS HO | - P - OCONHRNHCOO-|$_n$ P- OH

[P =POLIÉSTER OU POLIETER]

Dos polímeros sintéticos de emprego industrial, os PU são os que envolvem uma variada e complexa química, tendo em consideração as reações principais e as laterais. Estas reações conduzem a peças integralmente aceitáveis, ou a uma total rejeição.

Apresentam-se na forma de produtos líquidos que reagem (RIM - R*eaction Injection Molding* - em proporção estequiométrica), uma parte sendo o elastômero-base (macroglicol - ou poliol do tipo OH-R'-OH), e a outra o agente de vulcanização (diisocianato - OCN-R-NCO). Existem também os PU-sólidos, para serem calandrados (*millable gum polyurethanes)*

Os poliuretanos se caracterizam pela elevada resistência a abrasão (~1/3 a 1/10 do **NR** a temperatura ambiente), bem como elevada resistência à oxidação, permitindo ainda a incorporação de fibras de vidro, carbono, aramidas, metais, cargas minerais e pigmentos. A adição de outros componentes visa à proteção contra a ação de radiação UV, hidrólise, termoxidação, ataque microbiológico, entre outros processos de degradação.

2 - Agentes de vulcanização

O chamado sistema de cura, composto dos agentes de vulcanização e dos aceleradores (a seguir discutidos), constituem o segundo fator (após a seleção do elastômero), mais importante na seleção dos ingredientes/componentes do composto elastomérico.

Um elastômero, por si próprio, como sintetizado, é um líquido de alta massa molecular, com baixa resistência mecânica. Embora suas cadeias estejam entrelaçadas, estas podem se desentrelaçar rapidamente, através da aplicação de tensão, ocasionando a fratura por fluência viscosa.

A vulcanização (ou cura) é o processo pelo qual as cadeias são unidas quimicamente, formando um reticulado espacial, no qual se verifica a transformação do líquido elastomérico em um sólido elástico. A resistência mecânica, bem como o módulo, aumentam, ao passo que a deformação permanente e a histerese diminuem, como será visto adiante, em maior detalhe.

Os agentes de vulcanização (enxofre, peróxidos, óxidos metálicos) são produtos que devem estar presentes no composto para causarem a reação química que resulte no encadeamento (*cross-linking*) das moléculas do elastômero.

Através da vulcanização (encadeamento), o elastômero é, portanto, convertido de uma massa termoplástica, moldável e pegajosa, em um produto termorrígido, elástico, com dureza variável (proporcional à concentração do agente de vulcanização).

O enxofre é o agente mais comumente empregado, na forma de enxofre elementar. No entanto, para que este seja efetivo no processo de encadeamento, é necessário que o elastômero contenha ligações duplas - dienos (insaturados), encontradas em elastômeros, tais como: estireno -butadieno (SBR), butadieno-acrilonitrila (NBR) e isopreno (IR), por exemplo.

A pureza do enxofre para aplicação em elastômeros deve ser de 99,5% min (com cinzas $\leq$ 0,5%) [4.11] e deve ser isento de acidez (pois a acidez retarda a cura). A dispersão do enxofre na massa do elastômero deve ser uniforme, caso contrário, haverá variações nas propriedades do produto vulcanizado e conseqüente implicação na qualidade do produto .

O enxofre recomendado para aplicação em elastômeros é o do tipo amorfo (insolúvel na borracha, como em solventes - é enxofre contendo 60-95% CS_2), [4.11] pois este evita o "afloramento" com as conseqüentes dificuldades encontradas por ocasião da construção do produto (falta de adesão entre camadas do elastômero). No entanto, também é necessário que, durante a construção do produto, não sejam empregadas temperaturas acima de 120^{0}C, para evitar que haja reversão do enxofre (tornando-se rômbico), isto é, tornando-o "solúvel" e, portanto, vindo a "aflorar".

Para aplicações em produtos com baixa dureza, o teor de enxofre encontra-se na faixa de 0,25 a 5 partes por 100 partes de elastômero (5 phr = *5 parts per*

hundred of rubber), ao passo que, em materiais de elevada dureza (conhecidos por "ebonites"), o teor gira em torno de 25 a 50 phr. [4.11]

Em produtos espessos, contendo elevado teor de enxofre e, dado que a reação é exotérmica (acima de ~140°C),[4.12] é necessário efetuar-se a vulcanização destes produtos em temperaturas mais baixas que as convencionais, de modo a se evitar uma reação exotérmica violenta, com eventual destruição do equipamento (autoclaves).

O encadeamento com enxofre, por si próprio é insuficiente, requerendo tempos de cura de algumas horas, como será discutido em maior detalhe no item 4.5 (vulcanização), mais adiante .

Doadores de enxofre caracterizam-se por sofrer decomposição na temperatura de vulcanização e liberar radicais que ativam a ligação cruzada, formando 1 a 2 átomos de S por ligação cruzada, porém, não formando S-cíclico de baixa eficiência. Destacam-se, neste grupo, o TMTD- tetrametil tiurame bisulfeto e o DTDM - ditiodimorfolina. [4.11] [4.31]

3 - Aceleradores de vulcanização

Para aumentar a velocidade e eficiência do enxofre no processo de encadeamento, empregam-se os aceleradores de vulcanização, os quais são essencialmente bases orgânicas (contendo nitrogênio e enxofre), e divididas em cinco categorias , a saber [4.13]:

- guanidinas (como o difenil guanidina = DPG) ,
- tiazóis (como o disulfeto de benzotiazil= MBTS) ,
- ditio carbamatos (como o zinco dimetil ditio carbamato = ZDMC),[4.33]

- xantanes (como o dissulfeto de dibutilxantane) e
- tiurames (como o dissulfeto de tetrametil tiurame= TMTD).

Estes aceleradores são empregados isoladamente, ou na forma de combinações destes.

As guanidinas fornecem a menor velocidade de aceleração ao passo que os mais rápidos são os xantanes. [4.14]

De todos estes, os mais comumente empregados são os da família dos tiazóis (sulfenamidas), pois eles aceleram e, no entanto, não conduzem à vulcanização prematura (que dificulta o processamento), conhecida também com o nome técnico em língua inglesa de **"scorch".**

4- Ativadores e retardantes

A eficiência da vulcanização, empregando enxofre e os aceleradores acima mencionados, é ainda aumentada com a presença de ativadores do acelerador . Nesta categoria, temos o óxido de zinco e o ácido esteárico, os quais se combinam [4.2] dando origem a íons solúveis de zinco que ativam as reações intermediárias associadas a reação de encadeamento (*cross-linking*).

Em contrapartida, existem os retardadores, cuja função básica é a de evitar o "*scorch*", destacando-se o anidrido ftálico, o ácido salicílico, o acetato de sódio (que também retardam a cinética da cura), enquanto que, para o controle somente do *scorch* emprega-se mais comumente o cyclohexil-tioftalamida-CTP (conhecido também por Santogard - PVI) .[4.15]

Além do enxofre, existem outros "sistemas de cura " para elastômeros, para os quais o requisito de ligação dupla (exigência para a vulcanização por enxofre), não é necessária.

Nestes casos, associados a elastômeros "saturados", tais como o etileno-propileno (EPDM) e os silicones (MQ), empregam-se os peróxidos (R-O-O-R) (tais como o peróxido de dicumila = Dicup). [4.11] A cura por peróxido ocorre pelo mecanismo de formação de radicais livres (mecanismo de início, propagação e término do H*) que efetuam a ligação carbono-carbono na cadeia, formando produtos vulcanizados de maior estabilidade térmica, quando comparados aos vulcanizados com enxofre. [4.2] [4.16]

Outros elastômeros, tais como o policloropreno (neoprene), podem ser curados através do emprego de óxidos metálicos (óxido de zinco, óxido de magnésio ou mistura destes (sinergismo).

No caso dos elastômeros butílicos, empregam-se resinas fenólicas, em conjunto com cloretos metálicos. [4.2]

5 - Antidegradantes

Os antidegradantes são ingredientes empregados para retardar a deterioração dos compostos elastoméricos. Esta deterioração é iniciada através da presença de oxigênio, ozone, calor, luz, catálise metálica, ou ainda, flexão mecânica,[4. 11] que conduzem à cisão das cadeias, ou quebra do encadeamento.

Os antidegradantes, formados de antioxidantes e antiozonantes, são necessários para se obter boas propriedades mecânicas no composto e manter estas ao longo da vida útil do componente. Este produtos atuam química - ou fisicamente - seja por reação química com os degradantes, ou por interferir na seqüência de reações que conduzam a degradação.

Os tipos mais comuns destes materiais, mais amplamente chamados de protetivos, são as aminas, fenóis e fosfitos. [4.10]

Quanto à proteção física, destacam-se as ceras, que são empregadas com o objetivo de fornecer uma proteção superficial efetiva (através da migração desta até a superfície, se houver compatibilidade com o elastômero-base), dando proteção contra ozone (bastam alguns ppm de ozone para romper a ligação carbono-carbono e 1 a 2% de oxigênio para deteriorar um produto elastomérico). [4.2] A oxidação é, ainda, acelerada pela presença de calor, luz ultra-violeta e, ainda, metais como: cobre, cobalto e manganês, além da tensão aplicada.

Em compostos vulcanizados por enxofre, a cinética de oxidação aumenta à medida que o teor de enxofre aumenta na formulação do composto. O mecanismo de deterioração está associado à formação, em cadeia, autocatalítica, de radicais livres (remoção de hidrogênio da cadeia).

Na seleção de um antidegradante, devemos levar em consideração :

- o tipo de proteção desejada;
- a atividade química;
- a persistência (volatilidade e extratividade);
- descoloração e tendência ao manchamento;
- custo.

A tabela 4.2 resume o efeito do oxigênio sobre os elastômeros. [4.11]

SIGLA (ASTM D1418)	DESIGNAÇÃO	EFEITO DA OXIDAÇÃO	TEMP. MÁXIMA DE OPERAÇÃO (°C)
NR	BORRACHA NATURAL	AMOLECE	100
CR	CLOROPRENO	ENDURECE	107
SBR	ESTIRENO-BUTADIENO	ENDURECE	121
NBR	ACRILONITRILA BUTADIENO	ENDURECE	135
EPDM	ETILENO PROPILENO DIENO	ENDURECE	149
PU	POLIURETANO	ENDURECE	100
FPM	FLUORADA	ENDURECE	232
IIR	ISOBUTILENO-ISOPRENO	AMOLECE	100

Tabela 4.2 - Temperatura máxima de operação dos elastômeros.

6 - Auxiliares de processamento (plastificantes)

Os auxiliares de processamento são ingredientes associados ao elastômero visando auxiliar as operações de processamento, tais como: mistura, calandragem, extrusão [4.29] e moldagem, através da redução da viscosidade (reduzir a demanda de energia).

Os tipos mais comuns de auxiliares de processamento incluem os peptizantes (empregados para reduzir a massa molecular do elastômero, devendo ter uso restrito, pois interfèrem na resistência do produto vulcanizado), e os plastificantes (óleos, ácidos graxos e ésteres). [4.10]

Na seleção do plastificante, é importante levarmos em consideração a compatibilidade deste com o elastômero básico, resistência ao manchamento e custo. Se o plastificante não for compatível com o elastômero, o primeiro irá "sangrar", causando perda de propriedades mecânicas, além de tornar a superfície manchada mesmo após a vulcanização, portanto imprópria para a aplicação final desejada.

De um modo geral, os plastificantes (óleos aromáticos ou parafínicos na sua maioria), tendem a reduzir a dureza do produto vulcanizado. [4.11]

7 - Cargas de reforço

As cargas são os ingredientes empregados para melhoria/reforço das propriedades físicas do elastômero básico (cerca de 10 vezes), bem como para melhorar certas propriedades de processamento, como corante, ou ainda, para reduzir custos dos compostos elastoméricos.

A carga de reforço aumenta a dureza, a tensão, o módulo e a resistência à abrasão do composto elastomérico.

A seleção da carga é o terceiro elemento fundamental de escolha na definição do composto, seguido da seleção do elastômero e do sistema de cura.

Para que a carga atue como um reforço eficiente, é necessário que tenha elevada superfície específica (área/massa), isto é, deve ser pequena (< 1 μm), de modo a interagir com o elastômero e diminuir a distância entre partículas. Por outro lado, quanto menor a partícula, maior a dificuldade de processamento do composto elastomérico.

As cargas são constituídas de cargas escuras (negro-de-fumo) e cargas brancas (silicas). [4. 11]

A carga mais freqüentemente utilizada em elastômeros é o negro-de-fumo. Este material apresenta-se na forma de partículas de grafita quasi-esféricas, com diâmetro de 10 a 500*nm* (visíveis no *TEM/SEM*),[4.18] na forma de partículas isoladas ou aglomeradas. O aglomerado, chamado de estrutura secundária,onde

atuam as forças de Van der Waals, tem sua morfologia característica, que lhe dá um volume consideravelmente maior do que o que daria um conjunto de esferas individuais e perfeitas. Este aumento de volume é conhecido por "estrutura" - baixa ou elevada - do negro-de-fumo. Uma estrutura elevada permite uma maior oclusão do elastômero no negro-de-fumo.

A ASTM D1765 descreve a classificação dos negros-de-fumo, sendo que os mais comuns são: N110 , N220, N330, N358, N660 e N762. Os índices maiores estão associados ao maior tamanho de partículas, portanto de baixo potencial de reforço. [4.14] [N229 com 24*nm* e N660 com 55*nm*] [4.26]

Um composto elastomérico ao qual foi adicionado o negro-de-fumo tem suas propriedades e processabilidade determinadas pelo tamanho da partícula (área superficial) e estrutura do tipo de negro-de-fumo empregado. [4.11]

O grau de reforço aumenta com a diminuição do tamanho de partícula, porém, quanto menor o tamanho desta, é necessário uma maior energia para efetuar a dispersão desta no elastômero e, portanto, maior será a dificuldade de processamento.

O tamanho da partícula é fundamental na determinação da resistência mecânica (reforço) do composto elastomérico, pois afeta a resistência à abrasão,à geração de calor, à resiliência, ao limite de resistência e ao rasgo. Por sua vez, a estrutura afeta o módulo, a dureza e o inchamento na saída da matriz da extrusora. [4.11]

Por outro lado, partículas grosseiras de negro-de-fumo possibilitam aumentar a resistência ao *scorch* , enquanto que partículas de elevada estrutura

(aglomeradas), porém de pequeno tamanho, normalmente tendem a diminuir a resistência ao *scorch*.

A área superficial dos negros-de-fumo também deve ser levada em consideração, pois esta define quanta superfície encontra-se disponível para interagir com outros materiais presentes no composto elastomérico.[4.32] Normalmente, uma pequena partícula de negro-de-fumo apresenta uma elevada superfície; contudo, a textura ou natureza desta superfície pode igualmente influenciar a área superficial, normalmente situada na faixa de 9 a 300m^2/g (ASTM - método D 3037- empregando dibutil ftalato). [4.18]

Uma fração significativa dos elastômeros sintéticos é comercializada na forma de pré-misturas, conhecidas por "*master batch*", nas quais o negro-de-fumo é misturado com o látex, ou com uma solução do elastômero, antes da coagulação ou remoção do solvente, visando uma melhor incorporação, porém, não obtendo necessariamente uma melhor dispersão do negro-de-fumo no elastômero.

O negro-de-fumo tem uma contribuição significativa na histerese verificada durante a deformação do composto elastomérico. Assim, para baixas deformações, uma estrutura baixa fornece menores valores de histerese, enquanto que para tensões maiores, a estrutura elevada fornece menores deformações e, portanto, menor histerese. [4.19] O efeito do negro-de-fumo quanto à sua superfície (área), estrutura e quantidade, tem influência marcante sobre a processabilidade - tempo de incorporação na mistura, tempo para dispersão, viscosidade e inchamento (na saída da extrusora), bem como sobre as propriedades do vulcanizado[4.25] (dureza, módulo, histerese, resistência mecânica, alongamento e resistência à abrasão). [4.9]

As cargas brancas (ou não-escuras) incluem as argilas - tipo caolin (como cargas semi-reforçantes), o carbonato de cálcio (como carga extensora), silica precipitada (como reforçante = melhoria de propriedades físicas, tais como: o limite de resistência ao rasgo, ou,ainda, à abrasão), e óxido de titânio (que atua também como carga e pigmento). O tamanho destas encontra-se na faixa de 0,01 microns até 10 microns. A argila, normalmente, é empregada, visando reduzir a histerese do composto elastomérico, bem como a velocidade de cura. [4.9]

Outros materiais também encontram aplicação em compostos elastoméricos, porém, somente aqueles que apresentam partículas relativamente pequenas são empregadas como cargas de reforço em níveis que se assemelham ao do emprego do negro-de-fumo. A maioria é empregada para diluir os custos associados do composto, ou, ainda, como objetivar propriedades especificas.[4.9]

A seleção de um tipo específico de carga dependerá das características de processamento, bem como das propriedades físicas desejadas, do custo, e acima de tudo, do desempenho objetivado do produto final. [4.28]

8 - Agentes de extensão e de pegajosidade

Os agentes de extensão são adicionados ao composto elastomérico, basicamente para reduzir o seu custo, porém, com simultânea perda nas propriedades físicas. Óleos são comumente empregados, permitindo o uso de elastômeros de maior peso molecular, além de poderem conter elevada participação de cargas (de reforço).

Os agentes de pegajosidade (conhecidos por "*tack*") visam resistir à separação de dois materiais, após estarem em contato por um breve período de tempo e baixa pressão. Nesta categoria de materiais, destacam-se as resinas e parafinas naturais (tratadas), derivados de coque de petróleo (cumarona), óleos alifáticos leves, resinas fenólicas (fenol-formaldeído), etc. [4.10]

9 - Pigmentos

Os pigmentos são ingredientes empregados para colorir os compostos que não contêm negro-de-fumo. Os pigmentos são inorgânicos (óxidos de ferro, cromo, titânio, sulfetos de cádmio, antimônio, etc) e orgânicos complexos, de maior custo, porém, estes conferem maior brilho e variabilidade de tons. [4.11]

Normalmente, emprega-se uma combinação de pigmentos inorgânicos e orgânicos para suportar melhor as condições de trabalho.

10 - Agentes especiais

Para reduzir a tendência à combustão, são adicionados retardantes antichama, dependendo do polímero ter ou não na sua cadeia a presença de átomos halógenos (naturalmente retardantes).

Agentes especiais não são comumente adicionados ao composto, porém, somente em aplicações específicas, tais como os agentes espumantes, desodorantes, fungicidas, etc. [4.11]

Um composto elastomérico, em borracha natural, para aplicação geral, por

exemplo, é formado por:

INGREDIENTE	QUANTIDADE (PHR)
BORRACHA NATURAL	100
AGENTE DE PROCESSAMENTO	2
ÁCIDO ESTEÁRICO(ATIVADOR)	2
ÓXIDO DE ZINCO(ATIVADOR)	5
ANTIOXIDANTE	3
ENXOFRE(AGENTE VULCANIZANTE)	1
ACELERADOR 1	1
ACELERADOR 2	0.1
TOTAL	114.1

Para esta formulação básica, acrescentando o negro-de-fumo (carga), temos:

NEGRO-DE-FUMO (TIPO N 550, PHR)	DUREZA (SHORE A)
25	51
50	62
75	72

4.5 Vulcanização

A vulcanização é um processo irreversível no qual um composto elastomérico é convertido, através de um processo químico de encadeamento (*cross-linking*), de um termoplástico em um termofixo ou termorrígido, que possui propriedades elásticas.

O processamento de um composto elastomérico vulcanizável é dividido em dois estágios. O primeiro estágio constitui-se na moldagem ou conformação do material enquanto se encontra na forma ou estado termoplástico. O segundo estágio constitui-se na conversão química do material conformado em sua forma final de um termofixo.

O termo vulcanização deriva, historicamente (Charles Goodyear, em 1839), da descoberta associada a de que polímeros naturais podiam ser tratados na presença de calor e enxofre, resultando em um material com propriedades características únicas de deformação, elasticidade, com razoável estabilidade térmica e impermeabilidade à água e ao ar.

Dos tempos mitológicos, o deus Vulcano era identificado com o deus do fogo e da pedra-do-fogo (esta última, conhecida pelos povos anglo-saxônicos por *brimstone* ou *brennstein*, ou, ainda, *brinnen ston*). [4.20] Hoje, esta pedra é conhecida por enxofre. Assim, a conversão do termoplástico para um termofixo, através ou não do enxofre, é conhecida por vulcanização.

Todos elastômeros vulcanizáveis têm em comum o fato de terem certo grau de insaturação em sua estrutura molecular, ou, em outras palavras, contam com ligações duplas de átomos de carbono ao longo da cadeia carbônica, de maneira periódica. Os elastômeros, neste estado, têm propriedades termoplásticas, ou seja, o material quando aquecido (por temperaturas e tempos, limitados, porém, pelo tempo de "*scorch*"), amolece, retornando ao seu estado inicial .

Devido a este comportamento, os elastômeros podem ser misturados (mecanicamente), com outros ingredientes, de maneira eficiente. A conformação do composto pode ser efetuada forçando o material através de uma matriz (extrusão), ou, ainda, na forma de lâminas (obtidas em laminadores do tipo *trios* - chamados de calandras).

Até este ponto, não se verifica nenhuma distinção marcante entre o processamento de um plástico convencional e o de um composto elastomérico. Mais adiante, porém, o material plástico é simplesmente resfriado, o que completa o ciclo de fabricação, ao passo que para o material elastomérico é necessário efetuar a vulcanização e esfriamento para completar este ciclo.

As reações de vulcanização são as que promovem o ataque das ligações duplas de carbono-carbono. Durante a vulcanização, estas ligações duplas

rompidas permitem que haja a reação com outros materiais ou ingredientes portadores de enxofre, conduzindo a união de cadeias adjacentes, ou, ainda, promovendo a união de ligações simples tipo enxofre-enxofre, carbono-carbono, formação de radicais orgânicos polivalentes, ou, ainda, formação de íons metálicos polivalentes conduzindo, assim, a um grau de encadeamento complementar. (4.12)

Uma vez completada esta reação, o processo é irreversível, ou seja, há uma modificação permanente do material elastomérico, formando uma estrutura tridimensional. O material elastomérico deixa de apresentar sua pegajosidade e torna-se insolúvel em solventes, e torna-se mais resistente à deterioração, normalmente causada pelo calor, luz e outros agentes do envelhecimento.

A vulcanização é o processo pelo qual há aumento de elasticidade e diminuição da plasticidade. Assim, a força reativa necessária para resistir à deformação é proporcional à densidade de ligações intercadeias por unidade de volume.

Foge, aos objetivos do presente trabalho, a discussão pormenorizada dos aspectos químicos associados ao mecanismo da vulcanização, os quais encontram-se extensivamente detalhados na literatura especializada. (4.12) (4..27)

Objetiva-se aqui, porém, concentrar a atenção nos efeitos da vulcanização sobre as propriedades físicas dos compostos elastoméricos, aspectos estes que deverão fazer parte das discussões dos resultados experimentais deste trabalho.

Neste sentido, efetua-se inicialmente uma rápida revisão dos principais ensaios mecânicos (convencionais), característicos na área de elastômeros, para, em seguida, voltar a analisar o efeito da vulcanização sobre estas propriedades.

4.6 Propriedades físicas (convencionais), em elastômeros

Os elastômeros, que são materiais orgânicos, reagem de maneira diferençada dos metais, e os termos comumente empregados na engenharia de elastômeros diferem daqueles aos quais estamos habituados, e, portanto, necessitam ser detalhados .

A seguir, apresentamos aqueles que são de maior relevância para o presente trabalho, relacionados com os ensaios físicos convencionais (pois os relativos aos ensaios especiais serão tratados em capítulo específico) :

- RESISTÊNCIA À TRAÇÃO: (ASTM D412) para os elastômeros, é dada pela relação entre a força e a seção transversal original do corpo-de-prova. A velocidade do travessão é de 500± 50 *mm/min.*

Em si, não se trata de uma propriedade importante, porque, normalmente, os elastômeros não são empregados em condições onde prevalece a tensão de tração. No entanto, é um indicador de outras propriedades correlatas a esta, tais como: resistência ao rasgo, resiliência, fluência, relaxamento de tensões.

- ALONGAMENTO: é a máxima extensão verificada por ocasião da ruptura.

- DUREZA: é um índice da resistência à deformação, imposta por uma esfera ou ponta aplicada sobre a superfície do composto elastomérico.

O instrumento mais comumente empregado é o de mola calibrada (ASTM D2240) -(escalas Shore A e D - de indentador ou ponta), ou o plastômetro (escala P&J= Pusey & Jones (ASTM D 531) - de esfera dia = 3,17*mm* /1 kg unidade da escala = 0,01*mm*).[4.21]

Para compostos elastoméricos de baixa dureza, emprega-se a escala *Shore,* ao passo que para os de elevada dureza emprega-se a escala *Shore* D, ou o plastômetro P&J (valores baixos nesta escala estão associados a altas durezas, pois, nesta escala, mede-se a profundidade de penetração da esfera no elastômero).

- MÓDULO ESTÁTICO: nos elastômeros, está associado à força por unidade de área (original) para dado alongamento. Para borracha de baixa e média dureza, mede-se o módulo a 300% de alongamento, além de outros valores de alongamentos menores. Deve-se lembrar que não é o módulo de Young, como no caso dos metais, pois o comportamento é do tipo não-linear .

A relação aproximada entre o módulo estático e a dureza (P&J), é dada na figura 4.6.1.

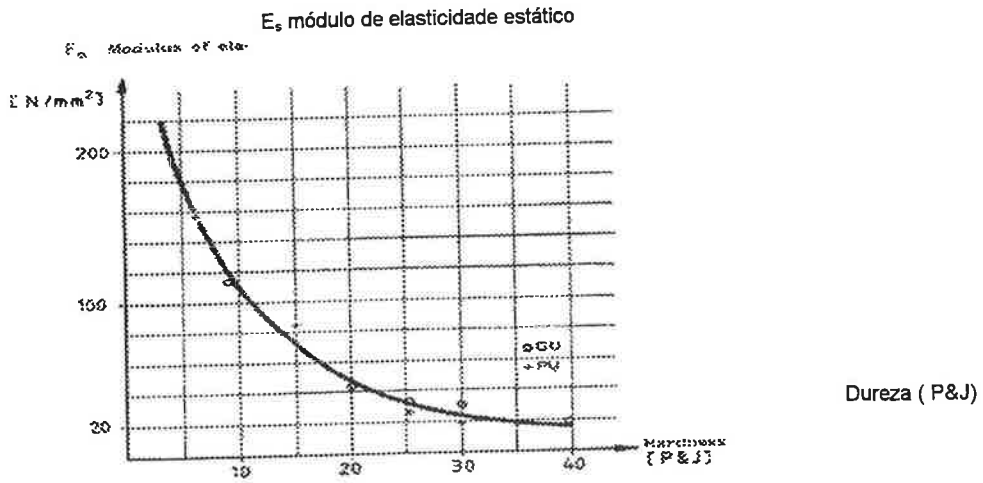


Fig. 4.6.1 - Módulo de elasticidade estático para elastômeros em diferentes durezas (P&J), medidas a 30°C. (2. 18)

Andrews (4.22) aponta para o fato de que o módulo dinâmico (a ser discutido em breve), é igual ou maior que o módulo estático, pois no primeiro o período de vibração é bem menor que o tempo empregado na medição do módulo estático,

ou seja, a diferença entre os módulos depende da magnitude dos tempos de relaxamento, respectivamente associados aos ensaios dinâmico e estático.

- HISTERESE: é a perda de energia por ciclo de carregamento. Esta perda energética é convertida em aquecimento do composto elastomérico, podendo atingir temperaturas que podem vir a destruir o mesmo (oxidação).

- AQUECIMENTO (ASTM D623): É o acréscimo de temperatura resultante da histerese.

- DEFORMAÇÃO PERMANENTE (ASTM D395): É a deformação residual verificada após determinado período de tempo, findo o qual é removida a tensão aplicada.

- RELAXAMENTO DE TENSÃO: é a variação na tensão, quando a deformação é mantida constante .

- FLUÊNCIA: é a variação na deformação quando a tensão é mantida constante.

- RESISTÊNCIA À ABRASÃO: uma das propriedades marcantes, porém, de difícil medição, é a resistência à abrasão. Normalmente, é medida através da perda de material, quando em contato com uma superfície abrasiva em movimento. A perda em peso (ou volumétrica), pode ser comparada contra um composto elastomérico tido como "padrão", porém, a sua correlação com a vida útil do produto é pouco confiável, principalmente, quando na composição do elastômero, contamos com a presença de substâncias que exudem até a superfície. (Ver aditivos especiais,acima.)

- RESISTÊNCIA AO RASGO: mede a tensão necessária no cizalhamento de

uma lâmina de elastômero (com corte inicial).

- RESILIÊNCIA: mede a relação entre a energia que retorna após a deformação e a energia fornecida para efetuar a deformação,ou seja: R(%)=100-histerese (%).

- ENVELHECIMENTO: as propriedades de um elastômero podem ser destruídas através da cisão das cadeias, pela atuação de agentes, tais como: luz solar, calor, oxigênio, ozone, umidade atmosférica, ou, ainda, através do encadeamento excessivo. Assim, alguns elastômeros continuam a endurecer, outros amolecem e outros endurecem e depois amolecem, todos de maneira irreversível.

4.7 Efeitos da vulcanização sobre as propriedades físicas do produto vulcanizado

Os principais efeitos da vulcanização sobre as propriedades fisicas do vulcanizado são ilustradas na figura 4.7.1.[4.15]

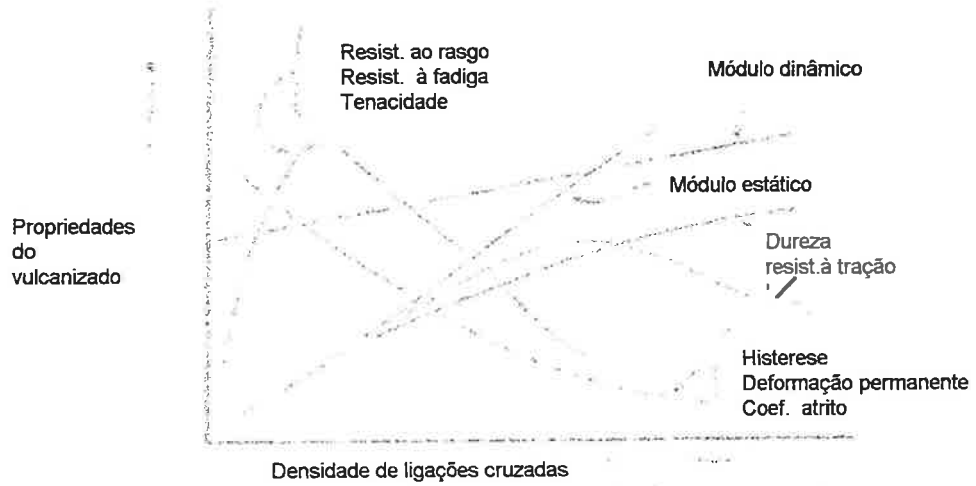


Fig. 4.7.1 - Efeito da vulcanização sobre as propriedades físicas

Inicialmente, deve-se observar que o módulo estático aumenta com a vulcanização a um nível maior que o módulo dinâmico (a ser detalhado em "viscoelasticidade", mais adiante). Em linhas gerais, o módulo dinâmico é composto da característica elástica e viscosa, enquanto que o módulo estático é uma medida isolada da componente elástica, tão-somente.

A resistência ao rasgo, à fadiga e à resiliência, estão relacionadas com a energia na fratura. Estas propriedades aumentam com pequenos aumentos do encadeamento, passam por um máximo, vindo a cair com aumento da densidade de encadeamento. A histerese (medida através da relação entre as componentes dinâmicas: viscosa e elástica) diminui com o aumento do encadeamento e constitui-se em uma medida da energia de deformação, que não é armazenada no interior da cadeia, mas é convertida em calor.

Propriedades que estejam relacionadas com a energia na fratura aumentam, por conseguinte, com o aumento das ligações na cadeia, porém, como a histerese diminui à medida que a densidade de ligações aumenta, as propriedades relacionadas com a energia na fratura atingem um máximo em alguma densidade intermediária de ligações.

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

Em resumo, o nível de encadeamento deve ser elevado o suficiente para prevenir a falha por escoamento viscoso, porém, não tão alto a ponto de propiciar a falha por fragilidade.

4.8 Parâmetros críticos relacionados ao processo de vulcanização

Os parâmetros críticos relacionados ao processo de vulcanização são :

1- o tempo decorrido antes do início da vulcanização;

2- a velocidade / cinética desta reação;

3- a extensão desta reação.

Deve-se ter o tempo suficiente de "atraso" para o início da vulcanização (ou melhor - tempo de resistência ao "*scorch*"), para permitir o processamento, conformação ou moldagem do componente, em condições industriais . Assim, o tempo de processamento e o tempo de resistência ao "scorch" devem ser equilibrados, tendo em conta o processo industrial específico. Se houver qualquer possibilidade de ocorrer o início da vulcanização, em qualquer estágio intermediário do processo, o componente torna-se imprestável.

Observando a figura 4.8.1, [4.15] verifica-se que existem vários estágios de processamento, onde há a possibilidade potencial de início de vulcanização ainda na etapa de processamento, isto é, a vulcanização precoce.

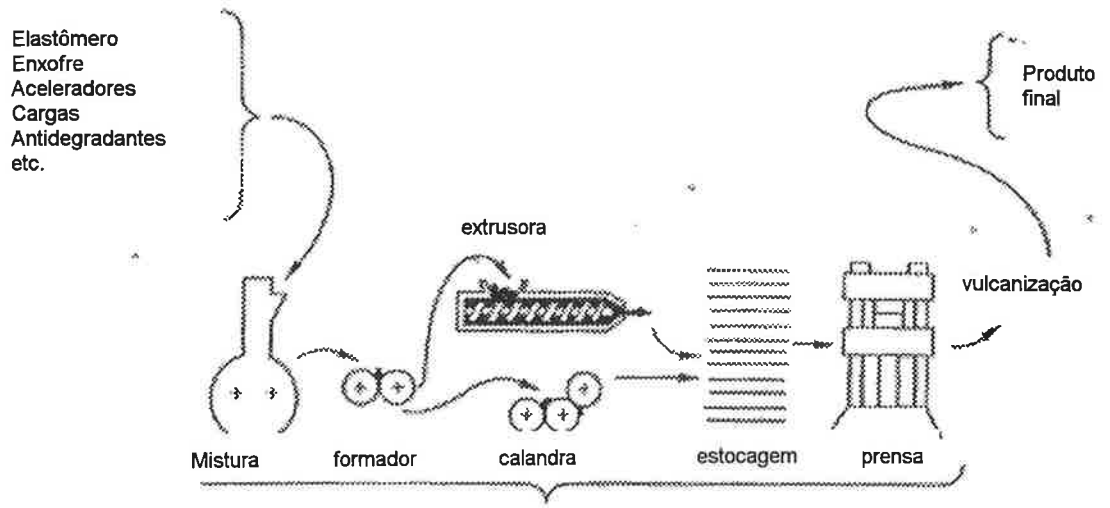


Fig. 4.8.1 - Representação esquemática do processo de manufatura. [4.15] (Obs: *scorch* !)

Por conseguinte, a resistência ao "*scorch*", normalmente medida na temperatura de processamento, é o tempo requerido para o início do encadeamento, o qual é caracterizado pelo aumento do torque do composto elastomérico medido no reômetro.

O reômetro constitui-se em um disco oscilatório, contido em uma cavidade na qual é inserida uma amostra do composto elastomérico não-vulcanizado. Mede-se o aumento de torque (sinônimo de evolução da vulcanização),em função do tempo (min.) e da da temperatura, obtendo-se, em correspondência, a curva em "s" característica .

A figura 4.8.2 apresenta o esquema básico deste equipamento, bem como a curva característica.

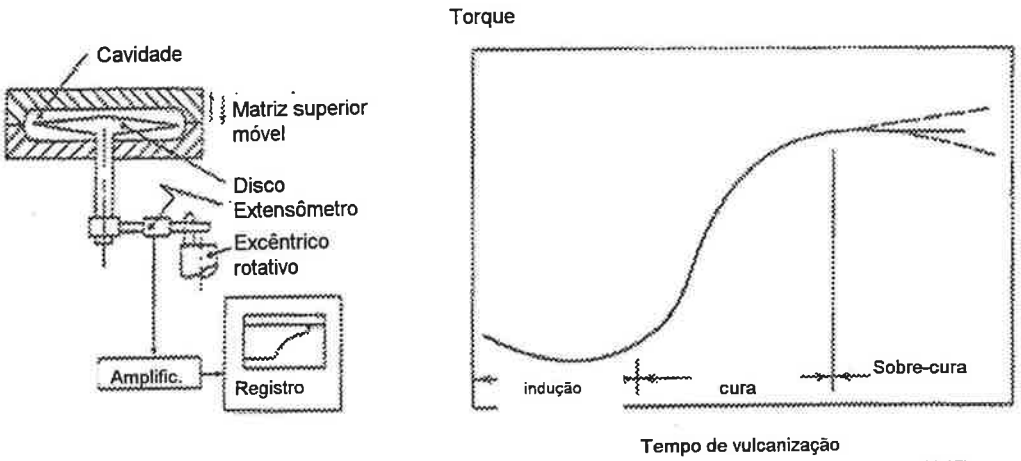


Fig. 4.8.2 - Curva característica de reômetro para elastômeros. (4.15)

Por outro lado, deve-se lembrar que o processo de vulcanização ocorre em conformidade com uma equação do tipo Arrehenius:

$$K = C_o \exp (- Q / RT)$$

onde: K= cinética da vulcanização Q = energia de ativação (J/mol) R = constante dos gases(8.31 J/mol.K) T = temperatura (K) C_o = constante

Este tipo de equação indica que, quanto maior a energia disponível (calor), maior será a cinética de vulcanização. Assim, com o aumento da temperatura, verifica-se um aumento na velocidade da reação de vulcanização. A prática industrial tem empregado a relação de que para cada 10°C de acréscimo na temperatura de vulcanização, haverá, aproximadamente, uma duplicação na cinética da reação. [4.13] Esta energia térmica pode ser fornecida por diferentes métodos: vapor saturado (diretamente relacionado com a pressão reinante na autoclave), ar aquecido, banhos de sal, leito fluidizado, aquecimento infra-vermelho, por microondas, etc. Em processos ditos contínuos, ou por lotes, o processo de vapor saturado é ainda o processo mais largamente empregado [4.2.3] para produtos de grande porte. Os demais processos competem entre si, no caso de grandes produções de pequenas peças (em linha).

Além da temperatura, deve-se ainda levar em conta, durante o processo de vulcanização, os efeitos da espessura e da estabilidade térmica.

Em termos de espessura, sendo os elastômeros maus condutores de calor, é necessário levar em consideração a condutividade, a geometria do componente a ser fabricado, o sistema de troca de calor e as características peculiares do composto elastomérico, principalmente quando as espessuras forem maiores do que aproximadamente 6*mm*. [4.14]

Cada tipo de elastômero possui uma faixa de temperatura que pode ser empregada no processo de vulcanização. Esta faixa advém do fato de que cada elastômero tem sua temperatura máxima associada a tendência à deterioração .

Analisa-se, a seguir, alguns aspectos fundamentais, relacionados à elasticidade dos elastômeros.

4.9 O estado elastomérico

A maioria dos materiais, quando tracionados, apresentam uma região elástica limitada, onde o material retorna à dimensão original, após a remoção das tensões. No caso dos polímeros de cadeiais longas, a situação difere, pois devido à presença de grandes extensões (onde verificamos a ligação covalente), que permitem elevadas deformações, acompanham rearranjos de curto ou longo alcance, cooperativos entre as moléculas, decorrente da rotação em torno dos pontos onde haja ligação cruzada (encadeamento). Vários são os polímeros que apresentam estas características e são denominados elastômeros, por apresentarem os seguintes aspectos:

1- normalmente a temperatura de trabalho é superior a Tg;
2- possuem a propriedade de extensão e contração rápida;
3- o módulo vai aumentando com a tensão;
4- possuem uma fração cristalina insignificante;
5- a massa molar é elevada (grau de polimerização > 10^4), permitindo a formação de redes extensas, passíveis de ligações cruzadas.

Uma das características marcantes dos elastômeros é a de se deformarem elasticamente até elevados valores (centenas %), limitados pela densidade de ligações cruzadas (vulcanização). Esta elevada extensibilidade encontra-se associada ao entrelaçamento das longas cadeias moleculares (deformação das ligações covalentes e secundárias - de Van der Waals). O módulo de elasticidade "estático" oferece uma medida das respectivas frações volumétricas daquelas ligações. [4.7] Em termos mecânicos, este módulo é uma medida da resistência ao "desenrolamento das cadeias moleculares aleatoriamente orientadas" dentro do

elastômero submetido a tensão. A aplicação desta tensão tende a orientar a cadeia, bem como a "endireitar a cadeia enrolada", conduzindo ao aumento gradativo do módulo estático com o aumento da deformação (de maneira não-linear). Com o aumento da temperatura, além dos escorregamentos nos ancoramentos entre cadeias, verifica-se a fusão das ligações secundárias, o material torna-se um líquido viscoso, estimulando a volta à condição de "cadeias enroladas", com conseqüente contração do elastômero. (Obs.: coeficiente de expansão do aço = $11*10^{-6}$ /°C , ao passo que coeficiente de expansão do elastômero = 180 a $250*10^{-6}$ /°C).

A presença de cargas de reforço no polímero elastomérico, para T >Tg , conduz ao "movimento reptante" (como réptil, das moléculas, com conseqüente dissipação de energia (histerese).

4. 10 Viscoelasticidade

Em materiais elastoméricos, devemos destacar as características típicas apresentadas em uma curva tensão - deformação, como apresentado na figura 4.10.1. [4.1.14]

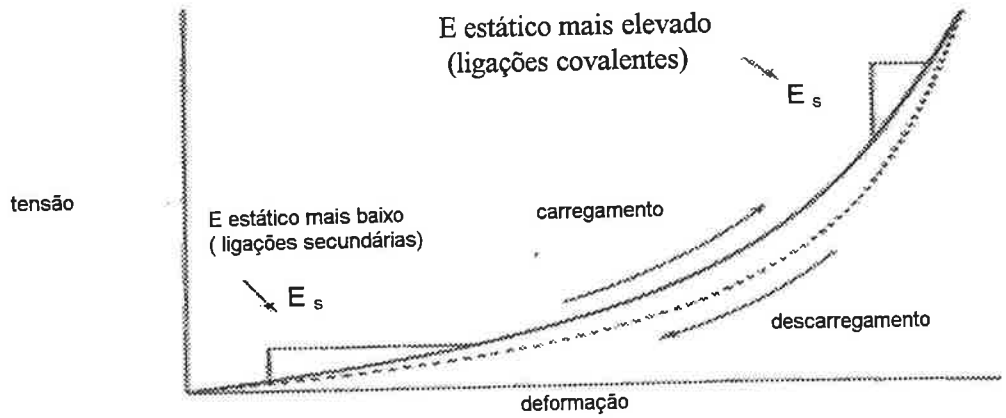


Fig. 4.10.1 - Curva tensão -deformação, típica de um composto elastomérico.

Pode-se observar que o módulo elástico "estático" aumenta com a deformação aplicada. Em baixas deformações, o módulo é baixo, correspondendo a pequenas forças necessárias para superar as ligações fracas ou secundárias, bem como aquelas necessárias para "abrir" a cadeia molecular. Em deformações maiores, o módulo apresenta valores maiores associado às forças necessárias ao alongamento das cadeias moleculares, com suas ligações covalentes.

Ao se retirar as tensões aplicadas, verificamos que o retorno não obedece o mesmo caminho. Este fenômeno é conhecido por histerese, que será mais detalhado em capítulo posterior. Um material linear elástico "ideal" obedece à lei de Hooke (tensão é proporcional à deformação), enquanto que um líquido viscoso "ideal" obedece à lei de Newton (tensão é proporcional à taxa de deformação).

Vários materiais, elastômeros em particular, apresentam propriedades que são intermediárias as estas duas apresentadas. A resposta destes materiais, que não são sólidos ideais nem líquidos ideais, apresentam comportamento viscoelástico.

No projeto de componentes elastoméricos, torna-se imperativo, durante análise efetuada através de FEM (*Finite Element Method*)- (método dos elementos finitos), o conhecimento das propriedades do material (tensão/deformação/freqüência e temperatura), bem como, se devemos efetuar análise empregando a característica linear ou não-linear.

A primeira, normalmente associada a pequenas deformações, enquanto que a última necessariamente empregada para elevadas deformações. Como a maioria dos elastômeros não apresenta uma linearidade entre a tensão e a deformação, é

necessário efetuar-se uma análise sobre os métodos disponíveis para análise não-linear.

Os elastômeros são materiais incompressíveis (módulo de Poisson= 0,4955) e são comumente referidos como sendo materiais Rivlin, ou, ainda, materiais que obedecem o modelo de Mooney-Rivlin, dada por: [4.2]

$$\sigma \; / \; 2 (\lambda - \lambda^{-2}) = C_1 + C_2 / \lambda \qquad \text{(Eq. 4.1)}$$

onde: σ = tensão (de engenharia) dada por força / área original

λ = relação de extensão (L / Lo)

C_1 , C_2 = constantes

Uma das razões mais importantes para o estudo da natureza viscoelástica do material elastomérico está associada ao entendimento de sua resposta (deformação), em relação à aplicação da carga (tensão), em função do tempo e da temperatura.

Um sólido "ideal", perfeitamente elástico, segue a lei de Hooke para baixas deformações, na forma conhecida:

$$\sigma = E_s \; . \; \varepsilon$$

O valor de E_s é o módulo elástico do material e é uma constante (real) .

Por outro lado, a dependência da deformação, em função da tensão, para um sólido viscoelástico, pode também ser descrita por uma expressão matemática, porém, podemos incluir a sua dependência com o tempo, na forma de:

$$\sigma (t) = E_D . \quad \varepsilon (t) \qquad \text{(Eq. 4.2)}$$

E_D= (constante - número complexo) , como será visto adiante.

Deve-se ressaltar que a natureza viscoelástica dos plásticos, não só afeta o módulo do material, como afeta outras propriedades. Devemos mencionar, ainda, que os metais exibem igualmente propriedades viscoelásticas, porém, somente são pronunciadas em temperaturas elevadas, enquanto que, para plásticos, eles podem apresentar este comportamento em temperatura ambiente.

Uma variável típica é a taxa de deformação, isto é, a variação da deformação por unidade de tempo. Devido à natureza viscoelástica dos plásticos, a sua resposta em termos de deformação a uma tensão aplicada, apresenta-se altamente dependente da temperatura e do tempo. Esta dependência, em função do tempo, pode ainda ser subdividida em termos de velocidade, em que esta deformação está sendo efetuada, e da duração da tensão aplicada, bem como a história da tensão aplicada (memória).

A dependência da temperatura será, então, influenciada pelas propriedades térmicas do material que mudam de maneira significativa para materiais termoplásticos amorfos, termoplásticos cristalinos e termorrígidos. As dependências das propriedades viscoelásticas, em função do tempo e da temperatura, podem ser examinadas através de ensaios de *creep*/relaxamento , ou através de ensaios mecânico-dinâmicos.

Os testes de "*creep*" medem a deformação em função do tempo, quando submetidos a carga constante em determinada temperatura, enquanto que os testes de relaxamento de tensão medem o decréscimo da carga aplicada ao material, quando a deformação é mantida constante em dada temperatura. Assim, objetiva-se num ensaio de "*creep*" definir um tempo, uma temperatura e uma tensão, em

função da deformação, enquanto que, no teste de relaxamento de tensão, objetiva-se obter o tempo, a temperatura e a deformação, em função da tensão.

Ensaios mecânico-dinâmicos podem também ser empregados para avaliar a propriedade viscoelástica do material. Tais testes visam avaliar as componentes elástica e viscosa, ou ainda, as componentes de acúmulo ou de dissipação de energia do material plástico. Assim, o módulo elástico relaciona-se com a parcela de energia recuperável disponível do material sólido-deformado, enquanto que, o módulo viscoso, ou de perda, está associado à quantidade de energia não-recuperável, perdida dentro do material deformado.

As medidas podem ser efetuadas por cizalhamento, tensão ou compressão e a amostra sujeita a carregamentos periódicos no tempo. Estes carregamentos periódicos são, normalmente, senoidais e podem ser impostos para faixas de freqüências e amplitudes.

A amostra pode apresentar um comportamento linear viscoelástico para pequenas deformações .

De maneira análoga aos ensaios de "*creep*" e de relaxamento de tensão que estabelecem as funções de dependência de tempo e temperatura, os ensaios mecânico-dinâmicos definem as funções características viscoelásticas do material, em função da freqüência e da temperatura, de maneira linear ou não-linear.

Medidas dinâmicas são efetuadas à temperatura constante, enquanto variamos a freqüência do ciclo ou, de maneira equivalente, a temperatura é variada enquanto mantemos constante a freqüência.

A freqüência [f (Hz)] em um teste dinâmico, relaciona o período T do ciclo de carregamento através da relação $f=1/T$. Dependendo da faixa de freqüência de

interesse, pode-se ainda empregar diferentes técnicas de análise experimental, desde a vibração livre, a vibração em ressonância, ou propagação de ondas. A amplitude dos ciclos é relativamente pequena, de modo a assegurar o comportamento viscoelástico do material e evitar a possibilidade de que uma deformação ou tensão excessiva venha a ocorrer de modo a conduzir à fadiga ou ruptura da amostra.

Estas propriedades medem, respectivamente, a capacidade do material de acumular energia de deformação e de dissipar energia (na forma de calor), esta associada ao atrito interno (amortecimento) de um material.

As equações características serão discutidas mais adiante.

4.11 Os modelos de mola e amortecedor

Para efetuar-se a descrição do comportamento mecânico viscoelástico linear, empregam-se basicamente, de maneira isolada, ou combinada, os modelos de mola e amortecedor, ideais.

Nestes modelos, efetua-se uma cominação em série ou/e em paralelo do componente elástico (mola) e viscoso (amortecedor). Os modelos clássicos elementares são os de Maxwell e o de Voigt-Kelvin , como ilustram as figuras 4. 11. 1 e 4.11.2 . [4.11]

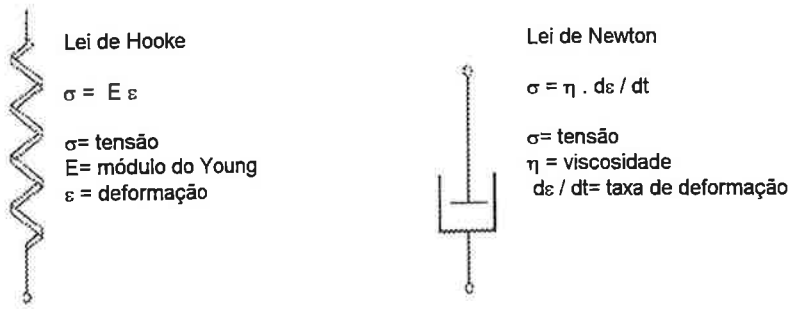
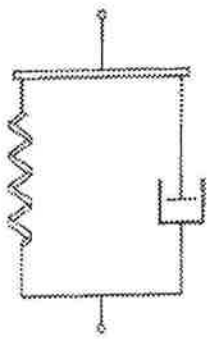


Fig. 4.11.1 - Modelos básicos de mola e de amortecedor (*spring* , *dashpot*)

Deformação
viscoelástica:
$\sigma = E\,\varepsilon + \eta\ d\varepsilon / dt$



Tensão decrescente
em função do tempo

$d\varepsilon / dt = \sigma / E + \sigma / \eta$

Fig. 4.11.2 - Modelos de elastômeros, segundo Voigt e Maxwell.

O comportamento viscoelástico dos elastômeros (e dos plásticos) tem sido descrito, tradicionalmente, através do emprego destes modelos, embora a maioria dos materiais apresente um comportamento bem mais complexo do que qualquer dos dois modelos. Assim, combinações destes, quer em série, ou em paralelo de cada tipo , podem ser usadas para se ter uma melhor aproximação da realidade física.

Tem-se observado na prática, [4.24] que é mais conveniente descrever o fenômeno de relaxamento de tensão através do modelo generalizado de Maxwell, enquanto que, para descrever o fenômeno da fluência (*creep*), o modelo generalizado de Voigt tem sido o mais adequado. Na literatura , o modelo de Voigt (também conhecido por Voigt-Kelvin) tem sido empregado com maior freqüência.

Os modelos para elastômeros necessitam de parâmetros a serem determinados experimentalmente.

Assim, nos ensaios de fluência, mede-se o aumento da deformação com o tempo, mantendo constante a tensão, enquanto que, nos ensaios de relaxamento de tensão, medimos o decréscimo de tensão com o tempo, sob deformação constante. Os ensaios dinâmicos, mais comumente empregados na

caracterização de materiais elastoméricos (e plásticos) são conduzidos impondo-se variações senoidais da tensão e da deformação com o tempo (embora possam ser empregados outros tipos de carregamento).

Assim, em um ensaio dinâmico, além de se medir a tensão e a deformação, deve-se medir a diferença do ângulo de fase.

Este ângulo de fase depende, por sua vez, da viscosidade dinâmica que assume o valor zero para o caso de viscosidade zero, isto é, para um elastômero que se comporta como se fosse uma mola perfeita (ou um sólido metálico em regime elástico). Em outras palavras, para uma mola perfeita, temos a tensão em fase com a deformação (ângulo de fase = zero).

Para o caso de um amortecedor perfeito, tem-se um ângulo de fase = 90 graus (tensão e deformação estão em quadratura).

Um material viscoelástico, como é o caso dos elastômeros, possui um ângulo de fase intermediário (não obstante todos os materiais apresentarem certo grau de viscoelasticidade).

Neste sentido, observa-se que a deformação é atrasada em relação à tensão.

A seguir, analisa-se estes aspectos em maior profundidade.

5- PROPRIEDADES MECÂNICO-DINÂMICAS EM MATERIAIS ELASTOMÉRICOS

Como foi analisado no capítulo 2, as prensas empregadas na fabricação de papel e de celulose, revestidas com material elastomérico, operam, por necessidade produtiva, a velocidades, pressões e temperaturas cada vez mais elevadas.

Assim, a caracterização do composto elastomérico deve necessariamente englobar estas variáveis, efetuada através dos ensaios dinâmicos.

O termo "propriedades mecânico-dinâmicas dos elastômeros" refere-se, portanto, ao comportamento destes materiais quando sujeitos a deformações e tensões que variem com o tempo e temperatura .

As propriedades dinâmicas são largamente dependentes da temperatura, freqüência, da presença de cargas/reforços, e também do grau de deformação, se este for elevado (conduzindo à viscoelasticidade nãolinear).

Para pequenas deformações, como é o caso de revestimentos empregados em cilindros para prensas de papel (onde $\varepsilon < 0,05$), estas propriedades são independentes do grau de deformação, valendo, portanto, o enfoque de viscoelasticidade linear .

Estes ensaios diferem do ensaio de fluência (*creep*), no qual objetiva-se medir o aumento da deformação com o tempo, para uma tensão constante, bem como do ensaio de relaxamento de tensão (*stress relaxation*), onde se mede o decréscimo da tensão para uma deformação constante. [5.1]

Os ensaios dinâmicos diferem, ainda, por dois aspectos, a saber: tempo e relação tensão/deformação. Assim, opera-se no inverso do tempo, isto é, na

freqüência, e, a tensão, não está em fase com a deformação, no caso do ensaio dinâmico, existindo uma diferença do ângulo de fase .

Em uma mola perfeita, a força e a deformação estão em fase, de modo que o ângulo de fase é nulo e, no caso de um amortecedor perfeito, a força antecede a deformação por $\pi/2$ rad. (90°).

Um material viscoelástico tem propriedades, parcialmente, de uma mola e de um amortecedor, tendo, portanto, um ângulo de fase intermediário.

Acrescente-se que a presença de cargas/reforços alteram o valor de Tg do elastômero que faz parte do composto elastomérico, geralmente elevando o valor de Tg. A presença de agentes de vulcanização acentua mais ainda este efeito.

O estudo das propriedades dinâmicas, geralmente, se refere a variações cíclicas de tensões e deformações, normalmente senoidais, embora existindo outras formas não-senoidais, tais como ondas quadradas, triangulares, pulsantes, as quais encontram, também, aplicabilidade prática. Aqui nos ateremos ao caso de variações senoidais.

Existe um paralelo entre a teoria da dinâmica e a de circuitos elétricos com correntes alternadas, pois em "circuitos reativos", voltagem e corrente estão fora de fase (δ graus) e a perda elétrica é dada em termos da " perda elétrica tangencial" (tg δ). De maneira semelhante, determinamos um tg δ como sendo uma "perda de energia mecânica", aproveitando-se, inclusive, boa parte da notação técnica empregada naquela área. Em conseqüência, temos os termos de módulo de elasticidade complexo, com componentes real e imaginária .

Para auxiliar o entendimento, normalmente empregam-se os modelos de Maxwell e de Voigt , ilustrados na figura 5.1.

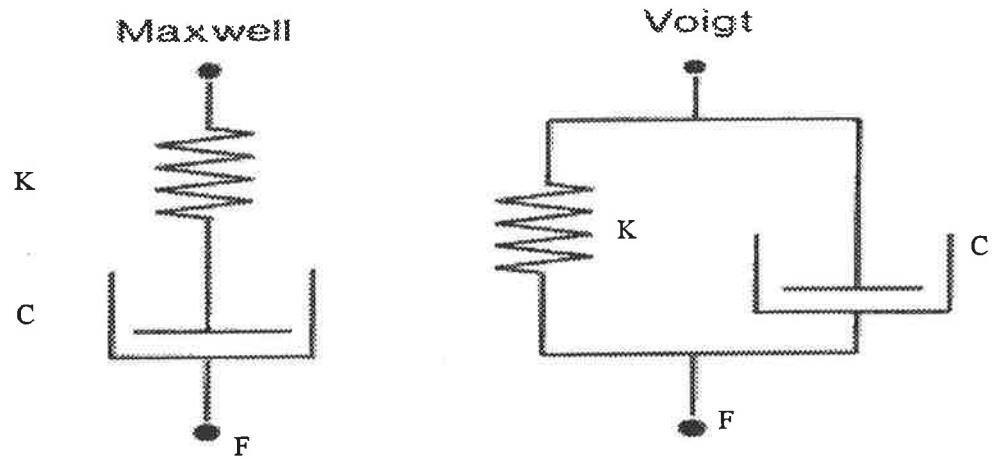


Fig. 5.1 - Modelos de material viscoelástico.

Estes modelos apresentam as características resumidas na tabela abaixo:

característica	Maxwell (série)	Voigt (paralelo)
equação de movimento	dx/dt=1/k*(df/dt) + f/c	f= kx + c *(dx/dt)
termos aditivos	deformações	forças
termos comuns	forças	deformações

Assim, ao considerar o modelo de Voigt para tensões e deformações, tem-se:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot (d\varepsilon / dt) \qquad \text{(eq. 5.1)}$$

onde: σ = tensão aplicada ε = deformação (strain) η = viscosidade

Se a deformação for do tipo : $\varepsilon = \varepsilon_o .\text{sen } \varpi t$, com $\varpi = 2\pi f$

onde ε_o é a amplitude da deformação, teremos :

$\varepsilon = \varepsilon_o . \exp(i \varpi t) = \varepsilon_o . (\cos \varpi t + i \text{ sen } \varpi t)$ com $i = (-1)^{1/2}$

Numero imaginário complexo

logo $d\varepsilon/dt = i \varpi \varepsilon_o \exp(i \varpi t) = i \varpi \varepsilon$

portanto $\sigma = (E + i \varpi \eta) \varepsilon$ (eq. 5.2)

O termo entre parêntesis em (eq. 5.2) é um tipo de módulo (ou ainda "função de transferência"), pois é a relação entre a tensão e a deformação, denotado por um módulo dinâmico complexo, simbolizado por **E*** (podendo ser decomposto em parte real e parte complexa) .

Por conseqüência, tem-se:

E ' - "modulo elástico" e **E"-** "módulo viscoso", valendo a relação do tipo:

$$\sigma = (E' + i E'') \varepsilon \qquad \text{ou, ainda,} \qquad \sigma = \mathbf{E^*}\varepsilon \qquad \text{(eq.5.3)}$$

Em outras palavras :

$$E' = \frac{\text{componente da tensão em fase com a deformação}}{\text{deformação}}$$

$$E'' = \frac{\text{componente de tensão } 90^\circ \text{ fora de fase (em quadratura) com a deformação}}{\text{deformação}}$$

resultando :

$$E^* = \sigma_o / \varepsilon_o = (E'^2 + E''^2)^{1/2} = E' [1 + (tg \delta)^2]^{1/2} \qquad \text{(eq.5.4)}$$

onde $tg \delta = E'' / E'$ (eq.5.5)

Do ponto de vista energético, a energia *Um* acumulada no material, por unidade de volume em meio ciclo, bem como a energia dissipada por ciclo completo *Ud* , por unidade de volume , são dados por [5.4] :

$$Um = \tfrac{1}{2} . E' . \varepsilon_o^2 \qquad \text{e}$$

$$Ud = \pi . E'' . \varepsilon_o^2 = \pi . \sigma_o^2 . tg \delta / E' \qquad \text{(eq.5.6)}$$

A resiliência sendo dada por $R (\%) = 100 \exp (- \pi . tg \delta)$ (% energia que retorna)

$R=1 \rightarrow$ mola

$R=0 \rightarrow$ amortecedor

Em termos de módulo de cizalhamento, temos $G' = E'/2 (1 + \upsilon)$ (eq.5.7)

Como o coeficiente de Poisson para os elastômeros $\upsilon = 0,5$, tem-se:

$G' = E' / 3$ e para $G'' = E'' / 3$ (eq.5.8)

A resposta de um elastômero (ou de um polímero), a um carregamento de deformação senoidal, pode ser resumida de maneira esquemática , na figura 5.2.[5.6]

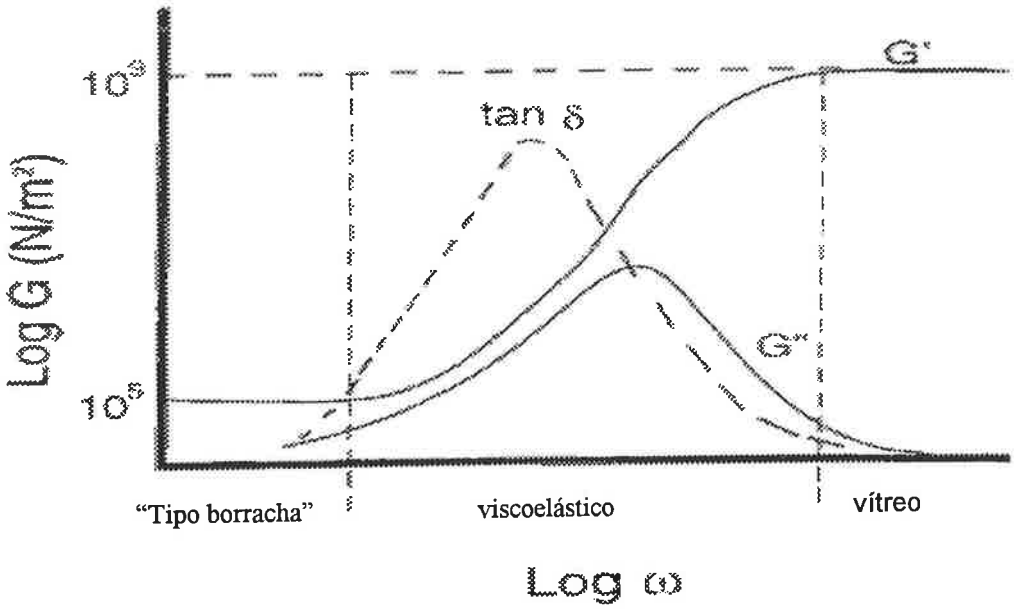


Fig. 5.2 - Efeito da freqüência sobre o módulo elástico e viscoso

Para cada composto elastomérico , em freqüências baixas, a característica é do "tipo borracha" (" rubbery"), isto é , de um material elástico, sendo que, em freqüências intermediárias, é predominante o amortecimento e, portanto, a característica é fortemente viscoelástica e, para altas freqüências, o comportamento é "vítreo" (*glassy*), denotado por baixas deformações para a mesma amplitude de carregamento.

O efeito da temperatura sobre o valor de E' (ou G'), pode ser visualizado na figura 5.3. [5.3]

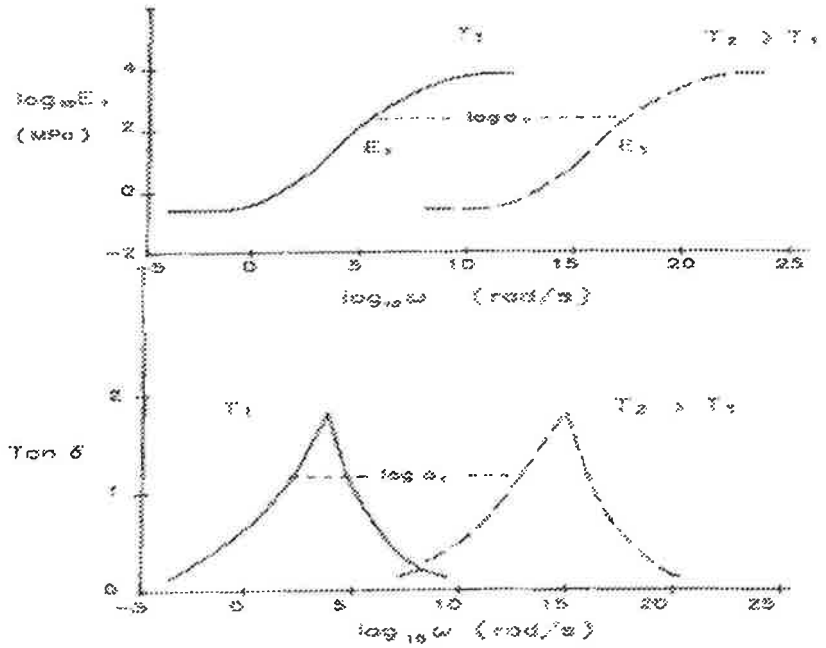


Fig. 5.3 - Módulo dinâmico E' e tg δ versus freqüência para duas temperaturas.

Pode-se observar que, com o aumento da temperatura, há um deslocamento da curva característica em termos de E', bem como de tg δ, em relação à freqüência . Verifica-se, ainda, a existência de um deslocamento constante, dado por log a_t na equação de *Williams- Landel-Ferry - WLF.* (5.5)

$$\log_{10} a_t = \frac{-c_1 (T - Tg)}{c_2 + T + Tg} \qquad \text{com } Tg < T < Tg + 100\,^{\circ}C \qquad \text{(eq. 5.9)}$$

com c_1 e c_2 = coeficientes de WLF, tabelados para cada tipo de elastômero (ou polímero), podendo ser considerados como "constantes universais para polímeros ", os valores de 17,44 e 51,6°C (5.4) , respectivamente (porém, não sendo "constantes" , necessariamente, para os compostos elastoméricos).

Assim, medidas efetuadas em dada temperatura podem ser aplicadas para outra, de modo que uma variação de temperatura é completamente equivalente a uma variação da freqüência.

Conclui-se, do acima exposto, que, para qualquer aplicação envolvendo um composto elastomérico, é necessário que **E*** , **E'** , **E"** e tg δ , sejam conhecidos na freqüência de carregamento, bem como na temperatura de trabalho, uma vez que as propriedades dinâmicas podem ser (e freqüentemente são), totalmente dependentes destas variáveis.

A caracterização dinâmica dos compostos elastoméricos é ponto de partida para quaisquer análises relativas ao comportamento mecânico destes materiais, inclusive no caso de seu emprego em modelos matemáticos , como é o caso do método de elementos finitos , o qual será analisado em seguida.

6 - MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM) APLICADO AO ESTUDO DE REVESTIMENTOS ELASTOMÉRICOS

6.1 Introdução

O FEM é um método numérico empregado na solução de problemas de engenharia e física. Problemas típicos nestas áreas, que encontram solução através do FEM, incluem: análise estrutural, transferência de calor, mecânica dos fluidos, transporte de massa e potencial eletromagnético.

Para problemas que envolvem complexas geometrias, carregamentos, propriedades dos materiais, normalmente não é possível obtermos soluções matemáticas analíticas (que podem envolver equações diferenciais parciais), as quais podem se tornar muito complexas ou, até, impossíveis de solucionar, devido à geometria, carregamento ou propriedades dos materiais envolvidos. [6.1]

Assim, métodos numéricos, como o FEM, podem trazer soluções aproximadas aceitáveis .

Da formulação do FEM, resulta um sistema de equações algébricas simultâneas, em vez de equações diferenciais. Do método numérico obtemos valores aproximados das grandezas, em pontos discretos do contínuo.

O termo FEM - *Finite Element Method* surgiu em 1960, através de R.W. Clough (*Boeing Aeroplane Co.*) e tem tido singular impulso, graças à presença de computadores digitais e linguagens de programação que surgiram naquela época. Nos anos 80, houve intenso desenvolvimento de *softwares* para geração de gráficos (IGES, DXF, etc.), em conjunto com os PC' s . [6.2]

6.2 Metodologia do FEM

O processo de modelamento envolve a execução de uma divisão do corpo em um sistema de pequenos corpos ou unidades (elementos finitos), interconectados em pontos comuns a dois ou mais elementos (pontos nodais ou nós), e/ou linhas de contorno e/ou superfícies. Este processo é chamado de discretização.

No FEM , ao invés de resolver o problema para todo o corpo em uma única operação, formulam-se equações de cada elemento finito e combinam-se estas para obter a solução para todo o corpo. [6.3]

Na resolução de problemas, aplicando o FEM, existem dois métodos.

O primeiro, conhecido por método das forças (ou de flexibilidade), emprega as forças internas como incógnita do problema. Estabelece-se, inicialmente, 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 do problema.

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

Estes dois métodos resultam em diferentes incógnitas (forças e deslocamentos, respectivamente) e correspondentes tipos de matrizes, na sua formulação . Para efeitos computacionais, tem sido demonstrado [6.1) (6.2) (6.3] que o método de deslocamentos é mais versátil e simples para a maioria dos problemas de análise estrutural, acrescentando-se que a maioria dos programas comercialmente disponíveis (*Abaqus, Ansys, Algor, Cosmos/m, Mark, Nastran, Patran, Sap, Sinda, Texgap*, etc.), empregam o método do deslocamento. No presente trabalho, faremos uso do Cosmos/m, por ser mais "user friend".

6.3 Vantagens e limitações do FEM

Como todo método numérico, o FEM apresenta também estes dois aspectos, a saber [(6.2)] :

Vantagens:

1- possibilidade de modelar corpos irregulares (com razoável facilidade);

2- aplicar diferentes carregamentos (sem muita dificuldade);

3- modelar corpos compostos de diferentes materiais (porque as equações dos elementos são estabelecidas individualmente);

4- aplicar diferentes tipos de condições de carregamento;

5- variar os tamanhos dos elementos (de modo a diminuir seu tamanho, onde necessário) ;

6- efetuar alterações no modelo de maneira rápida e eficiente;

7- aceitar o comportamento não-linear existente em deformações de sistemas que empregam materiais não- lineares.

Limitações:

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

6.4 Estágios da resolução do FEM

A análise por FEM envolve tipicamente os seguintes estágios:

1- dividir a estrutura (ou continuo) em elementos finitos (empregando a geração automática de malhas);

2- efetuar a formulação das propriedades de cada elemento, bem como da determinação dos deslocamentos nodais;

3- efetuar a montagem/interligação dos elementos do modelo;

4- efetuar a determinação das condições de contorno;

5- resolver as equações algébricas simultâneas nodais, com os respectivos graus de liberdade;

6- calcular as deformações nodais e respectivos deslocamentos do elemento e, finalmente, calcular as tensões e forças reativas decorrentes destas deformações.

Deve-se observar que o tipo do elemento linear, planar (axissimétrico ou não, com deformação planar ou tensão planar) e o espacial, bem como sua dimensão, tem

influência sobre a precisão do resultado obtido. Acrescente-se a necessidade de se conhecer, principalmente no caso de materiais de comportamento não-linear, as relações tensão - deformação (que é o caso do presente trabalho).

O elemento característico do FEM é a matriz de rigidez (que relaciona os deslocamentos e forças nodais) . Na área térmica, é a matriz de condutividade (pois relaciona temperaturas e fluxos térmicos nodais).

Estas matrizes podem ser obtidas através de 3 métodos básicos [6.3] , a saber:

1- método direto (baseado nos conhecimentos físicos);

2- método variacional (através da análise de energia potencial);

3- método dos resíduos ponderados (para o qual são conhecidas as equações diferenciais, porém não se dispõe das condições de contorno em quantidade suficiente).

No presente trabalho, dispomos de informações que nos possibilitam o emprego do método direto.

6.5 O sistema COSMOS/M de análise por elementos finitos (FEM)

O Cosmos/M, desenvolvido pela Structural Research & Analysis Corp. - na versão 1.71- 1994 - consiste de um módulo de pré- e um de pós-processamento, contendo vários módulos de análise (estrutural, mecânica dos fluidos, fadiga, transferência de calor, eletromagnético, dinâmico), interfaces, tradutores e utilitários, todos vinculados ao programa central chamado *"Geostar"*.

Neste módulo, constrói-se o modelo geométrico, empregando as ferramentas associadas à geração de pontos, linhas, superfícies e volumes, criar malhas, aplicar

cargas e condições de contorno, bem como sujeitar este conjunto a análise. Neste ponto, sai-se do *"Geostar "* e liga-se o módulo de análise (linear ou não-linear) requerido. Após completar a análise, o programa retorna automaticamente ao *"Geostar"*, agora em ambiente gráfico, para o necessário pós-processamento e eventual interação com outros programas de edição gráfica (PZP, PSP , CAD, etc.), ou, ainda, com outros programas de FEM, acima mencionados.

O código do Cosmos/M é uma linguagem de notações seqüenciais mnemônicas, através da qual podemos descrever o processo computacional. (6.4)

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

A estrutura básica consiste em:

1- título;

2-definição do elemento;

3-definição das constantes reais (de acordo com o elemento escolhido);

4-propriedades do material (físicas, térmicas, etc.);

5-sistema de coordenadas (cartesiano, cilíndrico, esférico);

6-coordenadas dos nós;

7-definição dos elementos (conectividade dos nós) do respectivo grupo;

8-definição das condições de contorno e deslocamentos;

9-definição das forças nodais (forças/pressões);

10-solicitação de cálculo de forças reativas, gravitacionais, temperaturas nodais, etc.

6.6 Aplicação do FEM em compostos elastoméricos

O aspecto básico que distingue o FEM aplicado em materiais elastoméricos do FEM aplicado em estruturas metálicas, ou, ainda, aplicado no estudo da deformação plástica de metais, está associado à especial atenção que deve ser dada às propriedades físicas, estáticas e dinâmicas do composto elastomérico.

Neste sentido, é notório o elevado número de informações no "banco de dados", disponível na literatura técnica, relativo à caracterização de ligas metálicas, fato que não ocorre no caso de compostos elastoméricos, dada a sua formulação característica e não-linearidade inerente.

Das várias equações desenvolvidas por Peng, Ogden , Landel , [6.5] [6.6] [6.7] [6.8] [6.9] (relacionando tensão e deformação), a equação de Mooney - Rivlin, dada por

$\sigma = 2 (\lambda - \lambda^{-2}) (c_1 + c_2 \lambda^{-1})$, com $E^* = 6 (c_1 + c_2)$ (para $\nu = 0.5$), (eq. 6.1)

tem-se destacado como sendo a mais utilizada na análise não-linear de compostos elastoméricos.(além da relação de Roth,martin,Stiehler [6.17])

No caso do programa FEM - Cosmos/M, o sistema encontra-se estruturado de modo que os parâmetros M_a e M_b valem , respectivamente : M_a = 0.8 E^* e M_b = 0.2 E^* .

Os modelos mais comumente empregados são do tipo bidimensional (2D), na seção transversal do componente, ou, ainda, axissimétricos, em tensão planar (*plane stress*) . Os modelos em três dimensões (3 D) são difíceis de serem construídos e, principalmente, interpretados.

Assim, modelos envolvendo projetos complexos, necessitam da respectiva validação, efetuada através de modelos parciais ou de medições muitas vezes complexas (e muitas vezes imprecisas), efetuadas no componente final.

Estes modelos têm encontrado larga aplicação no projeto de amortecedores [6.10] [6.16], anéis de vedação, mangueiras, defensas marítimas [6.11], e de cilindros metálicos revestidos, [6.12] [6.13] [6.14] bem como no estudo de propriedades fundamentais. [6.15]

No caso específico de cilindros revestidos com compostos elastoméricos, a avaliação das tensões e deformações localizadas na área de contato tem sido estudada através de modelos analíticos e numéricos, como passaremos a analisar em seguida.

7- ARCO DE CONTATO (NIP) - MODELAMENTO

O problema do contato de dois cilindros pressionados um contra o outro é de grande importância em várias áreas da Engenharia, destacando-se na laminação de produtos planos, produtos têxteis, indústria de papel/papelão, laminados de madeira, etc. O conhecimento dos fatores, tais como arco de contato (*nip*), interferência e pressões de contato, são de fundamental importância, em termos de projeto e operação.

Hertz [7.1] foi o primeiro a analisar o problema de contato entre dois sólidos elásticos, associado a materiais homogêneos e que estejam em contato. No entanto, caso os sólidos em contato sejam formados de diferentes camadas, e/ou materiais, a solução hertziana deixa de ser aplicável. Temos, portanto (tipicamente no caso de cilindros revestidos com material elastomérico), o caso de um contato "não- hertziano". Este aspecto tem recebido também considerável estudo na área de engenharia mecânica. [7.2] [7.3] [7.4] [7.5]

O interesse particular encontra-se no caso do contato de dois cilindros cujos eixos sejam paralelos entre si, sendo que, pelo menos um deles, seja revestido com material elastomérico.

Como, normalmente, o *nip* tem pequena dimensão quando comparado com o raio do rolo, alguns autores formulam o problema em termos de uma indentação de um arco de contato (*nip*) de material duro sobre um material de menor dureza (elastomérico), de várias camadas, como é o caso de rolos revestidos para aplicações litográficas [7.6].

Deshpande [7.6] demonstra que, assumindo a condição de deformação planar

(plain strain , $\varepsilon_z = 0$) , o arco de contato formado (*nip*) , entre os dois rolos, bem como a distribuição da pressão neste *nip,* pode ser dada por :

$$c^2 = 2 F D (1-\upsilon^2) / \pi E \qquad \text{(eq. 7.1)}$$

onde: 2 c = largura do *nip* F= carga linear

D= diâmetro do rolo [$1/d=1/d_1+1/d_2$]

E = módulo de elasticidade (estático) do rolo

ν = coef . de Poisson = ~ 0,5

A pressão ao longo do *nip* pode ser dada por :

$$P(x)= Pmax\ (1-x^2/c^2)^{1/2} \qquad \text{(eq. 7.2)}$$

onde: x = distância ao longo do ½ *nip* (-c < x < c)

P (x) = pressão no ponto x , ao longo do arco de contato

P_{max} = pressão no ponto x= 0 [com $P_{max} = 4 / \pi$ P , sendo P= F / 2 c]

No caso particular de pequenos valores de *nip*, comparados com a espessura do revestimento elastomérico, Deshpande [7.6] desenvolveu equação, na forma de adimensionais, do tipo (semilargura do *nip* / "espessura relativa" do revestimento = c / h) , que relaciona este com a pressão de contato, através de séries de potência expandidas, da forma:

$$p(x) = p_o(x) + p_1(x) . (c/h)^2 + p_2(x). (c/h)^4 + ... \qquad \text{(eq. 7.3)}$$

De maneira idêntica, estabeleceu estas equações para a profundidade de indentação (v_o) e para a carga linear.

Assim, estabeleceu que, para valores de 0 < c/h < 3 vale a relação:

$$(F R / E h^2)^{1/3} = 1{,}32\ (c / h) \qquad \text{(eq. 7.4)}$$

A figura 7.1 apresenta a força e a profundidade de indentação normalizadas, em função da largura de *nip*, também normalizada (válidas para cargas lineares até 4 kN / m).

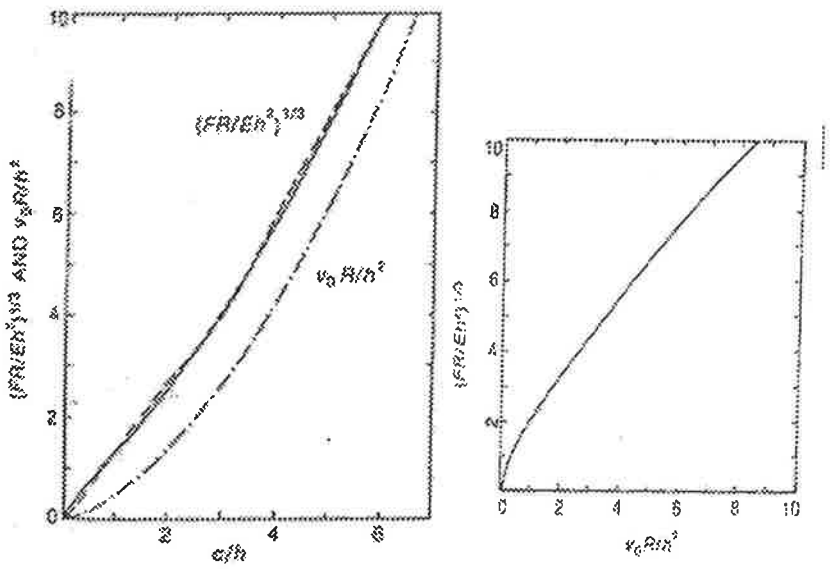


Fig. 7.1 - Relação entre adimensionais no arco de contato. [7.6] (equação 7.4)

Ainda na área de estudos analíticos relativos ao contato entre cilindros metálicos e rolos revestidos com material elastomérico, destaca-se o trabalho de Spengos [7.5], empregando rolos instrumentados com pressiostatos no seu interior. Investigou a curva de pressão no arco de contato, além de analisar o atrito, o escorregamento relativo, bem como a transmissão de forças tangenciais trativas, verificadas na área de contato, demonstrando a existência de condições não-hertzianas entre o rolo metálico e o rolo revestido, corroborando os estudos anteriores de Parish. [7.7] [7.8]

Bentall e Johnson [7.9] [7.10] efetuaram extensivas análises numéricas relativas às três regiões de microescorregamento verificado na região de contato entre rolos de constantes elásticas diferentes, as correspondentes interações com a

distribuição da pressão ao longo do arco de contato, variações na velocidade periférica e coeficiente de atrito dinâmico.

Blackketter e Christensen [7.11] analisaram as tensões de contato verificadas entre dois corpos elásticos retangulares (simulando a situação verificada na direção transversal da laminação), relacionando as pressões e a área de contato através de séries de Fourier e, mais uma vez , indicando a situação hertziana para rolos de elevada rigidez (metálicos) e não-hertziana para rolos que deformam substancialmente na região de contato (rolos com revestimento elastomérico).

Estas equações analíticas têm sua aplicabilidade industrial, porém, com restrições severas quanto à possibilidade de se efetuar estudos mais detalhados relativos às tensões e deformações associadas à compressão, cizalhamento na superfície e no interior do revestimento, na interface metal/revestimento, além de não levarem em conta o caráter viscoelástico deste último. Este aspecto será outra vez levantado por ocasião da discussão dos resultados experimentais.

O modelamento matemático do arco de contato (*nip*) , através do emprego do FEM, tem surgido mais recentemente através dos trabalhos de vários autores [7.12] [7.13] [7.14] [7.15] [7.16] [7.17] na análise de tensões, deformações e evolução da temperatura no interior de revestimentos elastoméricos (poliuretano), demonstrando a elevada versatilidade do método, superando as dificuldades inerentes ao método analítico.

Nestes trabalhos, ficou evidenciada a necessidade de se efetuar a caracterização física mais detalhada do revestimento (muito além da dureza P&J), através das propriedades dinâmicas (E*, E', E", tg δ , entre outros), uma vez que a dureza não varia linearmente com o módulo dinâmico, ou com a perda histerética.

Por conseqüência, um programa 2D - de elementos finitos , termoviscoelástico, para as condições de deformação planar, visa simular o comportamento das tensões e deformações na direção radial, axial e tangencial no cilindro revestido. Este, por sua vez , necessita de dados característicos relativos ao comportamento dinâmico do composto empregado neste revestimento.

O modelo do revestimento deve levar ainda em conta outros fatores, destacando-se a deformação elástica do cilindro metálico, a presença de furação no revestimento (furo cego, ranhuras ou sucção), compressibilidade de feltro(s) [7.18] , bem como características de compressibilidade do próprio papel. [7.19]

Este modelo deve, ainda, possibilitar a análise das tensões na interface revestimento/metal base (cilindro metálico), principalmente no que diz respeito às tensões de cizalhamento, pois é na interface onde verificamos o maior transiente de deformações, e, portanto, é a região crítica determinante do "desempenho" do cilindro revestido, trabalhando como prensa úmida da máquina de papel. Assim, qualquer "falha" nesta interface, causa a separação revestimento/metal , provávelmente logo nas primeiras horas de operação, com conseqüências desastrosas não só para o revestimento como também para o feltro (perda total), para a própria máquina, além da indesejável "parada de produção não-programada".

A adesão entre o composto elastomérico e o cilindro metálico, é, portanto, outro aspecto de fundamental importância, que passaremos a analisar, a seguir.

8 - ASPECTOS GERAIS RELATIVOS À ADESÃO METAL/COMPOSTO ELASTOMÉRICO

8.1 Mecanismos

A adesão entre materiais é uma ciência multidisciplinar que envolve química e física de superfícies e interfaces, bem como mecânica de formação e fratura de juntas.

Neste sentido, apresentaremos, a seguir, somente os principais aspectos relativos ao tema, e que sejam de importância básica para o entendimento dos resultados obtidos neste trabalho.

Informações mais detalhadas podem ser encontradas na literatura especializada. [8.1] [8.2]

Em linhas gerais, serão abordados os tipos (mecanismos) básicos de junção, requisitos para uma boa adesão, principais tipos de falhas de juntas adesivas e observações metalográficas relevantes de interfaces metal/elastômeros.

A adesão é a interação que se desenvolve entre dois corpos diferentes que estejam em contato.[8.3] Basicamente, existem quatro tipos básicos de junção, a saber:

8.1.1 - Substrato plano não-miscível - Ocorre entre uma superfície sólida lisa e um líquido. A adesão é função básica da tensão superficial do líquido, associada à molhabilidade da interface, intensidade da força de atração molecular líquido/sólido do tipo fortes/fracas (indo desde iônica ou covalente até as de adsorção do tipo: pontes de hidrogênio, dipolo-dipolo, Van der Waals).

8.1.2 - Substrato não-miscível, com topografia superficial complexa - Como acima, o substrato é do tipo não-miscível com o aderente, limitando as interações

entre as superfícies. No entanto, a topografia do substrato é complexa, isto é, apresenta rugosidade, porosidades, depressões, asperezas, reentrâncias, propiciando uma interpenetração acentuada e formando um "ancoramento mecânico " entre o adesivo e o aderente (substrato).

8.1.3 - Substratos parcial ou totalmente miscíveis - Verifica-se que, na interface, há moléculas de cada um dos componentes que difundiram para a camada de união, cuja espessura depende da compatibilidade termodinâmica e da velocidade de difusão molecular das partes. Devemos distinguir a interdifusão do ancoramento mecânico, pois o primeiro envolve interpenetração a nível molecular, enquanto que, no segundo, o adesivo penetra na superfície e ao redor de imperfeições superficiais, cujo tamanho é bem maior que o molecular. Este mecanismo de interdifusão é importante, principalmente na adesão entre polímeros e, caso exista elevada afinidade entre as diferentes moléculas, a interface poderá até ser espessa, apresentando elevada adesão. A interdifusão pode conduzir, inclusive, à reação química, de modo que teremos uma união física e química das partes.

8.1.4 - Substratos não-miscíveis, com formação de interface por meio de reação química - Adesivo e substrato contêm componentes que podem difundir para a interface e reagir quimicamente, formando uma nova interface "*in situ*", combinando estes materiais, resultado desta reação. Objetiva-se, nesta interface, minimizar as tensões residuais decorrentes.

8.2 - Requisitos básicos

São requisitos básicos para uma boa adesão polímero/metal, os seguintes aspectos:

8.2.1 - Limpeza superficial das superfícies em contato - A eliminação de resíduos, poeiras, óleos, umidade, óxidos, é efetuada através de meios mecânicos (abrasão ou jateamento), ou químico (decapagem), ou combinação de ambos.[8.13]

No caso particular de substrato do tipo aço carbono, após o desengraxamento, normalmente emprega-se o jateamento com granalha de aço ou de alumina, com limpeza subseqüente, visando a remoção dos finos. A topografia da superfície obtida depende do tamanho, formato e dureza da granalha, influindo diretamente na promoção do ancoramento mecânico.

No entanto, a nova superfície recém-criada é muito reativa, reoxidando quase que instantaneamente, principalmente na presença de umidade, formando nova camada oxidada. Assim, a superfície recém-jateada, deve receber o mais cedo possível uma camada de adesivo (*primer*) , antes que a camada de óxido, novamente formada, seja de espessura tal que interfira, a ponto de enfraquecer a união entre as partes metal/elastômero.

8.2.2- Molhabilidade - O adesivo deve possibilitar o aumento da área de adesão.

8.2.3- Solidificação - O adesivo (líquido), quando aplicado, deve ser convertido em "sólido", através de :

a- uma reação química- através do emprego de calor, pressão e "agentes curativos";

b- do resfriamento - do líquido adesivo (tornando o adesivo em um sólido);

c- da secagem - resultante da evaporação do solvente;

d- da combinação dos mecanismos acima.

8.3 Falhas

Quanto aos principais mecanismos de falhas das juntas adesivas, deve-se destacar basicamente: [8.4] [8.5]

- falha adesiva - A falha ocorre na interface, entre o adesivo e o aderente (substrato);

- falha coesiva- A falha ocorre no próprio adesivo, ficando uma camada do adesivo nas faces do aderente.

A análise da fratura, utilizando o MEV, é empregada para distinguir se a falha foi do adesivo ou do preparo da superfície do aderente (substrato). [8.6] [8.2] A degradação da junta através de reações químicas, notadamente a hidrólise, temperatura, corrosão, bem como dissolução da interface, deve ser levada em conta na atuação destes mecanismos. Acrescente-se que não se dispõe, até o presente, de ensaios não-destrutivos para avaliar a qualidade da adesão das juntas, em particular de metal/elastômeros, nem de análises detalhadas relativas ao estado de tensões na interface metal/polímero, envolvendo o complexo sistema não-linear/ viscoelástico.

8.4 Interface Metal/Elastômero

A interface metal/elastômero tem sido estudada, empregando-se técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV/SEM), fotoelétron, espectroscopia por raio-X ou espectroscopia eletrônica para análise química (XPS ou ESCA),

espectroscopia de varredura Auger (AES), espectroscopia de massa de íons secundários (SIMS), destacando-se os trabalhos detalhados de Van Ooij, [8.7] [8.8] [8.9] [8.10] [8.11] [8.12] essencialmente estudando a interface elastômero / arame de aço latonado, de aplicação fundamental em pneumáticos.

Aqueles trabalhos permitiram evidenciar o tipo de junção com substratos não-miscíveis, com formação de interface por meio de reação química - pois, quando o elastômero contendo enxofre (e aditivos curativos), é pressionado contra o arame de aço latonado (tipicamente 70 Cu/ 30 Zn) e vulcanizado, o cobre difunde-se para a superfície do latão, onde combina-se com o enxofre (vindo do elastômero), formando uma interface de $Cu_x S$. A resistência da junta é controlada pelas características da camada (presença de íons Co) e de sua espessura.

Estes estudos foram realizados com compostos elastoméricos contendo tipicamente um teor de 4 phr de enxofre, considerado baixo, quando comparado com os empregados nos revestimentos elastoméricos de elevada dureza, empregados neste trabalho, como será abordado em maior detalhe, no capítulo 12.8.

No caso de compostos elastoméricos com teores de enxofre mais elevados, (ebonites) empregados típicamente em prensas umidas de máquinas de papel , deve-se ressaltar que a literatura técnica associada à analise da interface metal/ composto elastomérico é esparsa e antiga , não contando com técnicas modernas de análise microestrutural (MEV).

Acrescente-se que, nesta interface, pode-se verificar elevadas tensões residuais, como será analisado, a seguir.

9 - TENSÕES TÉRMICAS EM REVESTIMENTOS

As tensões térmicas, verificadas em materiais poliméricos, têm sido estudadas extensivamente, em particular filmes de epoxes de diferentes espessuras em contato com substratos metálicos. (Ex. : alumínio). [9.1]

A preocupação tem-se centrado no estudo da origem e nível de tensões que se desenvolvem na interface polímero/metal, devido ao processo de cura da resina e/ou gradiente térmico formado por ocasião do esfriamento, após cura. Estes trabalhos têm mostrado que acima da Tg do material polimérico, epoxes no caso, não foi verificada nenhuma tensão, dado ao relaxamento das tensões desenvolvidas. No entanto, com o abaixamento da temperatura, abaixo de Tg, verifica-se um aumento das tensões, devido ao fato de que o epoxe torna-se um polímero vítreo, contraindo a um gradiente maior do que o do substrato metálico. Situação idêntica ocorre para os compostos elastoméricos de dureza elevada .

Assim, o nível de tensões atingido em determinada temperatura < Tg , pode ser dado por:

$$\sigma = E \int_{T}^{Tg} \frac{(\alpha_E - \alpha_S)}{2(1-\upsilon)} dT = \sim E.(\alpha_E - \alpha_S).\Delta T \qquad \text{(eq.9.1)}$$

onde : α_e = coef. linear de expansão do polímero
α_s = coef. linear de expansão do substrato
E = módulo elástico do polímero

Em condição de equilíbrio, a diferença de temperaturas entre o interior e a superfície de um cilindro, pode ser dada por :

$$\Delta T = (R_o^2 / 4k)\ dT/dt \qquad \text{(eq.9.2)}$$

Combinando (eq. 9.1) e (eq. 9.2), temos :

$$\sigma = \frac{E \cdot (\alpha_e - \alpha_a)}{8 \cdot k (1 - \upsilon)} \; R_o^{\,2} \cdot dT / dt \qquad \text{(eq.9.3)}$$

onde : k = difusividade térmica do polímero (m^2/ s)
υ = coeficiente de Poisson do polímero
R_o = raio do cilindro metálico (m)
dT / d t = gradiente térmico no esfriamento (C/s) (assumido constante)

Convém lembrar que , à temperatura ambiente :

$\alpha_{elast} = 210 \times 10^{-6} >> \alpha_{aço} = 11 \times 10^{-6}$ (1/ ° c)

Experimentalmente, [9.1] foi confirmada a validade da (eq.9.1), acima, para ambiente seco, sendo que, em ambiente úmido e, para maior espessura de polímero, verifica-se uma diminuição da tensão(chamado de "plasticização" do polímero).

Ora, a acentuada diferença dos coeficientes lineares de expansão do susbtrato metálico e do polímero (epoxe ou composto elastomérico), conduz, durante o resfriamento após o ciclo de cura (vulcanização), a tensões residuais de tração no material polimérico, situado na parte externa do rolo (revestimento), por este estar sendo limitado na sua contração natural. Estas tensões, por sua vez, se forem superiores ao L.R.(limite de resistência) do polímero, poderão conduzir à ruptura / trincamento do mesmo.

As equações acima, levam em conta a espessura do revestimento, (através de dT / dt); e, ensaios com resina epoxídica, [9.1] têm demonstrado que há diminuição das tensões, com o aumento da espessura do revestimento.

Cheatham [9.2] efetuou uma estimativa desta tensão residual, empregando a (eq. 9.1), obtendo um valor (calculado) da ordem de 30 a 40 N/mm2.

10 - OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO

O objetivo primeiro deste trabalho foi o de efetuar uma revisão das informações existentes, relativas a arte-ciência de revestimentos elastoméricos de prensas de máquinas de papel, procurando identificar o "estado-da-arte".

Assim, ficou evidenciado que o estudo do arco de contato em prensas de máquinas de papel, revestidas com materiais elastoméricos - envolvendo, de maneira mais ampla, o cilindro metálico, o revestimento (liso, ranhurado, sucção), feltro(s) e papel - é um sistema altamente complexo, pois envolve tensões, deformações, velocidades elevadas (tempos de residência pequenos) e temperaturas crescentes, atuantes sobre estes materiais elásticos e viscoelásticos.

Como meta final, objetiva-se obter, no arco de contato, uma largura de *nip* constante (comprimento do arco de contato), bem como constante em toda largura do arco de contato (largura do papel), de modo que a pressão seja também uniforme em toda a área, de modo que o desaguamento do papel seja uniforme e maximizado na prensa de papel.

A tendência das prensas de máquinas de papel é a de aumentar a sua velocidade operacional, pressão e temperaturas de trabalho, visando, desta maneira, aumentar o impulso, bem como a produção, sem perda de qualidade superficial do produto final.

Assim, surgem demandas tecnológicas cada vez maiores sobre os componentes deste sistema: cilindro metálico - revestimento - feltro - papel, que devem ser analisadas quer isoladamente ou, de preferência, na forma de um conjunto .

Destas demandas crescentes sobre os materiais, possíveis de serem eventualmente equacionadas, surgem demandas paralelas, associadas, principalmente, quanto a vibrações indesejáveis do sistema , resistência a sobre-cargas eventuais (acidentes), além de elevação do desempenho (vida - útil) de cada componente do sistema, com simultâneo abaixamento de custos.

Estes objetivos, aparentemente conflitantes, são a base da pesquisa e desenvolvimento que está sendo efetuada a nível mundial, nesta área em particular.

Modelos matemáticos do arco de contato em prensas de máquinas de papel, envolvendo técnicas de FEM, são assunto recente, pois, ao contrário do que dispomos na área de materiais metálicos, onde existem "bancos de dados" bastante extensos, na área de compostos elastoméricos, feltros e do próprio papel (em termos de sua compressibilidade), tais "bancos de dados" não são encontrados, pois tratam-se de materiais e sistemas de fabricação complexos , portanto protegidos ("proprietários"), os quais tendem a evoluir continuamente e de maneira muito rápida.

Como objetivo segundo, deste trabalho, apresenta-se a metodologia de levantamento de informações relativas à caracterização dinâmica de compostos elastoméricos, de aplicação em prensas de máquinas de papel; análise do efeito da presença de furações neste revestimento e as conseqüentes modificações de suas propriedades dinâmicas; análise do *nip* (empregando o FEM), bem como o coroamento de cilindros revestidos, comparando os dados calculados com valores obtidos em campo (prensas de máquina de papel).

Como objetivo terceiro, analisa-se a interface revestimento/cilindro metálico quanto aos diferentes aspectos relacionados ao ancoramento, em termos de microestrutura e tensões residuais .

11 - EQUIPAMENTO E CARACTERÍSTICAS DE ENSAIOS DINÂMICOS DE ELASTÔMEROS

11.1- Equipamento

Os ensaios dinâmicos foram realizados em um sistema *MTS* - servo-hidráulico - modelo 810.19, como ilustra a figura 11.1.

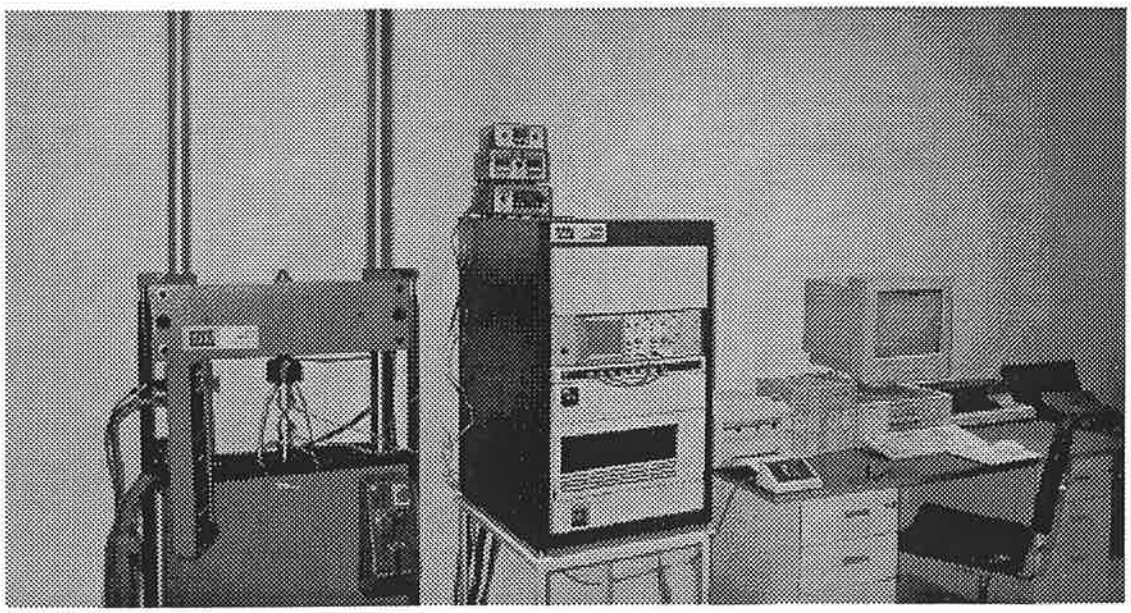


Fig. 11.1 - Sistema MTS - servo-hidráulico - modelo 810.19 [15 KN]
(quadro de carga 318.10 - unidade hidráulica 510.10 - software 790.10 e 790.31)

O esquema básico é ilustrado na figura 11.2.

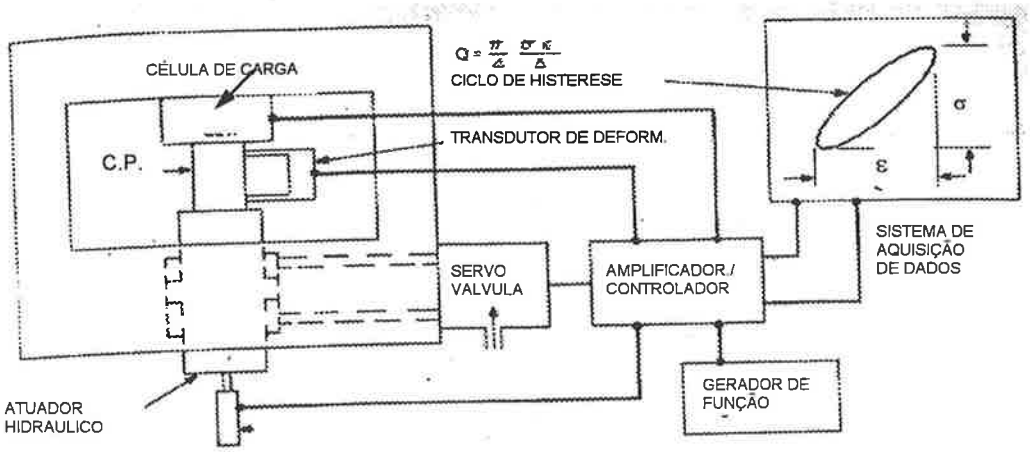


Fig. 11.2 - Esquema básico da máquina de ensaios.

Este sistema pode ser empregado tanto para ensaios estáticos, como para ensaios dinâmicos, em freqüências de até 200 Hz. Como principais componentes, possui uma célula de carga (15 kN), atuadores hidráulicos, servo-válvulas, controle digital, computador dedicado HP 486/66, impressora *laser*, *plotter* e *software*, para caracterização de elastômeros submetidos a diferentes condições de carregamento, que visam permitir a simulação das condições reais de uso.

O equipamento possui ainda o dispositivo de aquecimento controlado dos corpos-de-prova de cilíndricos (ϕ 12,7x 25 *mm* nominal), especificamente construído, como ilustra a figura 11.3.

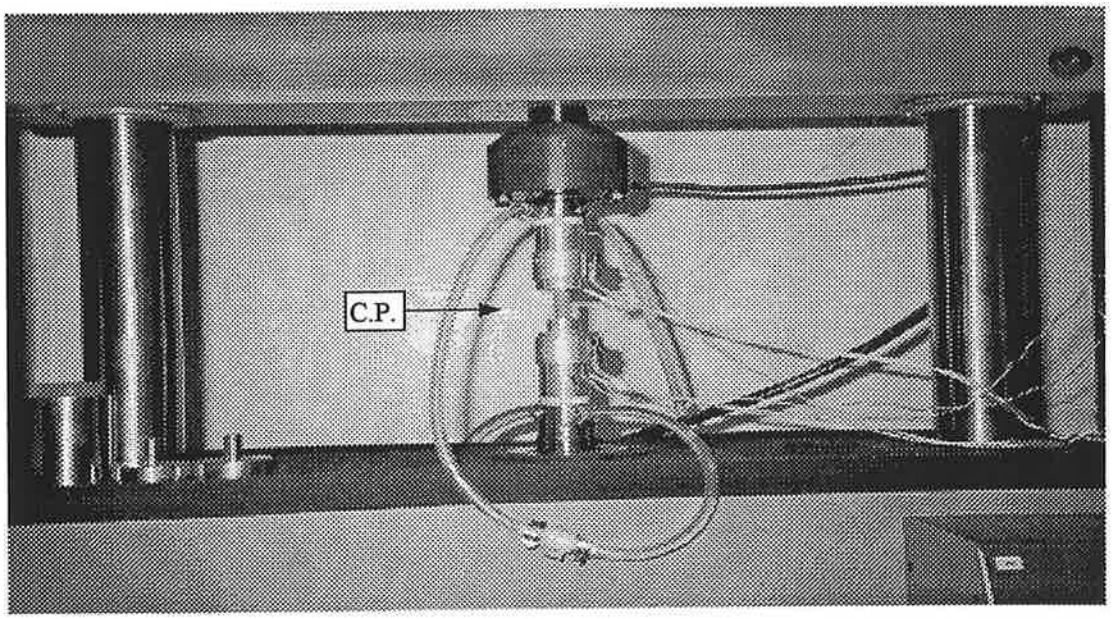


Fig. 11.3 - Dispositivo de aquecimento controlado

O sistema de testes possibilita efetuar o levantamento de informações estáticas e dinâmicas que caracterizam o comportamento do elastômero, possibilitando quantificar informações, destacando-se, principalmente, as seguintes :

- curva força-deslocamento;

- curva tensão-deformação ;
- módulos : complexo (E*), elástico (E') e viscoso (E");
- módulo de rigidez (K*) e tangente delta (tg δ);
- amortecimento (C), energia total (W), energia dissipada por ciclo;
- transmissibilidade (Tr). (3.11)

11.2 Características do ensaio

O ensaio de caracterização dinâmica de elastômeros deve ser executado de acordo com as normas *ASTM D 2231-87* ou *DIN 53513* :

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

Embora estas normas sejam equivalentes entre si, a norma *DIN 53513* será empregada por ser mais explícita em seus detalhes, sendo que seus aspectos principais serão abordados a seguir:

Nos compostos elastoméricos, a tensão e a deformação estão fora de fase (δ), como pode ser visto na figura 11.4.

O módulo dinâmico (E *) (eq. 5.4) apresenta dois componentes: o módulo elástico (E ') e o viscoso (E ") (valores vetoriais, sendo que os dois últimos são ortogonais entre si).

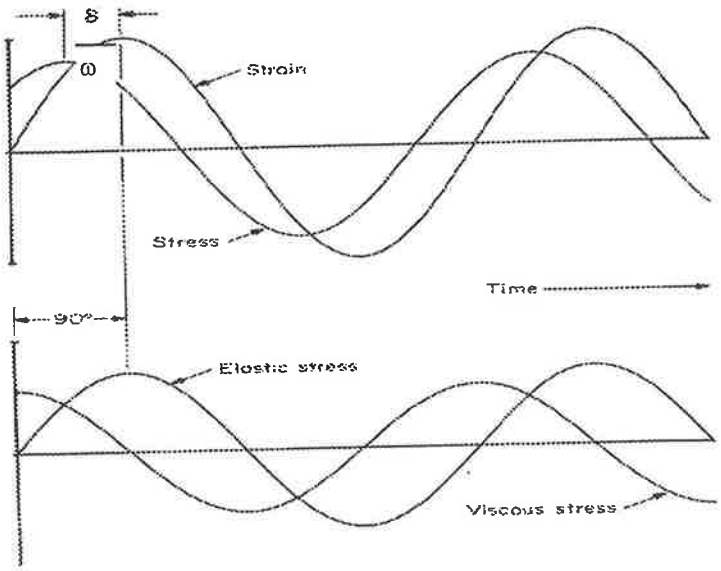


Fig. 11.4 - Tensão e deformação em ensaios cíclicos de composto elastomérico.
(stress= tensão , strain = deformaçào , elastic stress= tensão elástica, viscous stress= tensão viscosa)

Em maior detalhe, vejamos as equações e conceitos associados à figura 11.5.

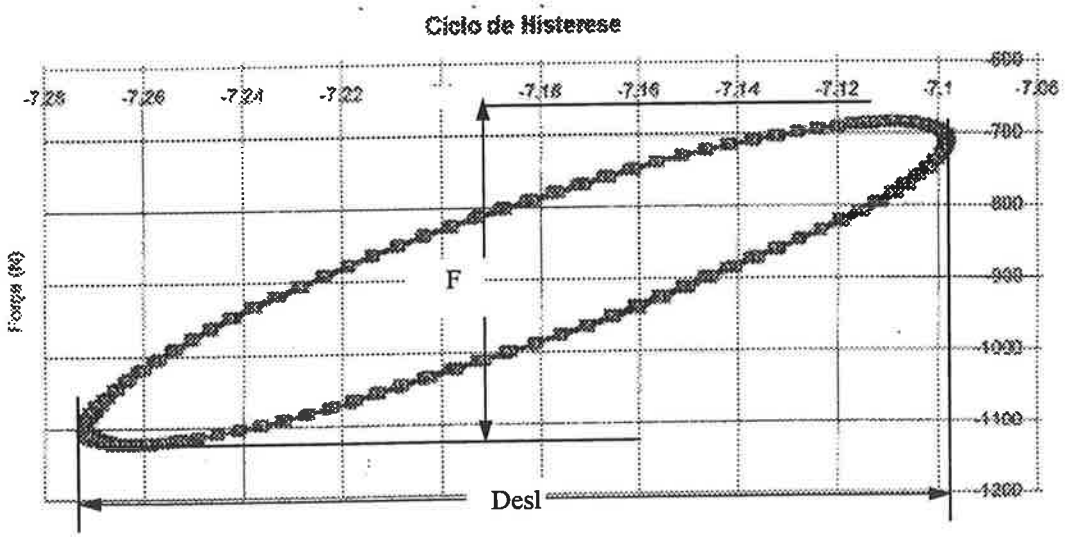


Fig. 11.5 - Ciclo de histerese típico e definições (DIN 53513).

fator de forma (Gent)

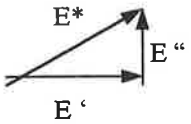
EQ. 11. 1 *TENSÃO* : σ (N/mm2) = $\sigma_M + \sigma_A$ * sen ω t , σ = F / [Ao*(1+ 2(Do / 4*Ho)^2)]

EQ. 11.2 *DEFORMAÇÃO* $\varepsilon = \varepsilon_m + \varepsilon_A$ * sen (ω t - δ) (δ = ang. de fase) , ε = Desl / Ho

EQ. 11.3 *MÓDULO DINÂMICO COMPLEXO* $E^* = \sigma / \varepsilon$

EQ. 11.4 *MÓDULO "ELÁSTICO"* $E' = E^* . \cos \delta$

EQ. 11.5 *MÓDULO "VISCOSO"* $E'' = E^* . \sin \delta$



EQ. 11.6 *TAN* δ = E "/ E ' COM $(E^*)^2 = E'^2 + E''^2$

EQ. 11.7 *SUJEIÇÃO DINÂMICA (COMPLIANCE)* $J^* = 1 / E^*$

EQ. 11.8 *ENERGIA DISSIPADA POR CICLO* $W_d = \frac{1}{4} * \sigma * \varepsilon * \pi * \sin \delta$ (Nmm/mm3)

EQ. 11.9 *ENERGIA FORNECIDA POR CICLO* $W_{fh} = \frac{1}{4} * \sigma * \varepsilon * (\cos \delta + (\delta + \pi/2) * \sin \delta)$

EQ. 11.10 *PERDA ESPECÍFICA POR CICLO* = Wd / Wfh (adimensional)

EQ. 11.11. *ÂNGULO DE FASE (DIN 53513)* $\delta = \sin^{-1} [(4* \text{area}) / (\pi * F* \text{Desl})$

OUTRAS RELAÇÕES :

EQ. 11.12 - *RIGIDEZ DINÂMICA* $K^* = F / \text{Desl}$

EQ.11.12a - *RIGIDEZ ELÁSTICA* $K' = (K^*) * \cos \delta$

EQ. 11.13 - *AMORTECIMENTO* $C = (K^*) * \sin \delta / 2.* \pi * f$

EQ. 11.14 - *TRANSMISSIBILIDADE* $Tr = \{ (C^2 \omega^2 + K'^2) / [(K'- m\omega^2)^2 + C^2 \omega^2)] \}^{1/2}$

(Mede a taxa de transferência de um sistema na excitação dinâmica que é atenuada ou amplificada.)

EQ. 11.15 - *RELAÇÃO BÁSICA* $F^2 = (K^* \text{ Desl})^2 + (C * \text{Desl} * f)^2$

12 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Foram selecionados três tipos de compostos elastoméricos, como sendo os mais representativos dos aspectos associados a prensas de máquinas de papel, na faixa de dureza de 30 a 1 P&J, como resumido na tabela 12.1.

TABELA 12.1 - COMPONENTES PRINCIPAIS DOS COMPOSTOS ELASTOMÉRICOS

COMPONENTE DUREZA	30 P&J	12 P&J	1P&J
	PHR	PHR	PHR
ELASTÔMERO BUTADIENO- ACRILONITRILA	100		
ELASTÔMERO ESTIRENO-BUTADIENO		100	
ELASTÔMERO ISOPRENO-BUTADIENO-ACRILONITRILA			100
MONÔMERO		42	
NEGRO- DE-FUMO	42	52	5
CARGA DE REFORÇO CLARA 1		32	116
CARGA DE REFORÇO CLARA 2			34
AGENTE DE VULCANIZAÇÃO 1	16		41,5
AGENTE DE VULCANIZAÇÃO 2		4	
ATIVADOR DE VULCANIZAÇÃO 1	125	10,5	1,5
ATIVADOR DE VULCANIZAÇÃO 2	0,5	1	1
RETARDANTE DE VULCANIZAÇÃO		0,5	
ACELERADOR DE VULCANIZAÇÃO	0,5	2	1
AGENTE ANTIOXIDANTE	4	3	
AGENTE DE PROCESSAMENTO	5		10
AGENTE DE COLORAÇÃO		22	
AGENTE DE PEGAJOSIDADE			5

Apresenta-se, a seguir, os resultados experimentais mais relevantes, obtidos tanto a nível de laboratório, como a nível industrial, comparando-os com os respectivos modelos matemáticos efetuados em FEM, através do programa *Cosmos/m*.

12.1 Corpo-de-Prova de Tração

Com base nos dados experimentais de Treolar [12.1] [Lo= 25.4*mm*, Wo= 3*mm* e To= 0.8*mm*], efetuou-se, inicialmente, um modelo básico da região do pescoço do corpo-de-prova no programa Cosmos/m, como apresentado na figura 12.1.1.

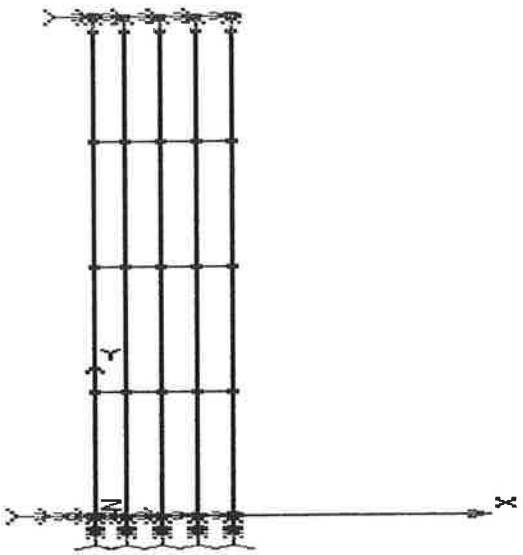


Fig. - 12.1.1 Região do pescoço do CP - tração - representação em elementos finitos.

O código do programa para o Cosmos/m, é apresentado abaixo:

```
C*
C* COSMOS/M     Geostar V1.71
C* Problem : "-TRAÇÃO- GRAVATA"
PT,1,0,0,0,
PT,2,3,0,0,
PT,3,3,25,0,
PT,4,0,25,0,
VIEW,0,0,1,0,
CRLINE,1,1,2,
CRLINE,2,2,3,
CRLINE,3,3,4,
CRLINE,4,4,1,
SF4CR,1,1,2,3,4,0,
M_SF,1,1,1,4,4,4,1,1,
EGROUP,1,PLANE2D,0,2,0,0,3,2,0,
MPROP,1,NUXY,0.499,MOONEY_A,0.118,MOONEY_B,0.107,
RCONST,1,1,1,2,0.8,0,
TIMES,0,1,.1,
CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,1,
DCR,1,AL,0,1,1,
DCR,3,UX,0,3,1,,
DCR,3,UY,25,3,1,,
RFCR,1,UY,1,1,,
NMERGE,1,25,1,.1,0,0,0,
NL_PRINT,1,0,0,0,0,0,
NL_PLOT,1,100,1,0,
```

```
NL_PLOT,1,100,1,0,
NL_CONTROL,0,1,
A_NONLINEAR,S,1,1,20,0.1,0,N,0,0,1E+010,0.1,0.01,0,
C* R_NONLINEAR,
```

As figuras 12.1.2 e 12.1.3 ilustram saídas típicas deste programa, relativas às forças de reação, relativas a alongamentos (λ= L / Lo) de 1,5 e 2,0, respectivamente.

```
R e a c t i o n    F o r c e s   f o r   s t e p     5

  Node        X1          X2          X3          R1          R2          R3

    1   0.00000E+00 -.13002E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+
    2   0.00000E+00 -.24841E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+
    3   0.00000E+00 -.24825E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+
    4   0.00000E+00 -.24841E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+
    5   0.00000E+00 -.13002E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+
```

Fig.12.1.2 - Informação relativa à força de reação para lambda=1,5 (veja coluna X2).

```
R e a c t i o n    F o r c e s   f o r   s t e p     10

  Node        X1          X2          X3          R1          R2          R3

    1   0.00000E+00 -.17416E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+
    2   0.00000E+00 -.39043E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+
    3   0.00000E+00 -.39043E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+
    4   0.00000E+00 -.39043E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+
    5   0.00000E+00 -.17416E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+
```

Fig. 12.1.3 - Informação relativa à força de reação para lambda = 2.0 (veja coluna x2)

Destas informações obtêm-se as forças de reação respectivas que, divididas pela seção do corpo-de-prova, fornecem as tensões calculadas que são comparadas com as experimentais, na figura 12.1.4, indicando que a metodologia de cálculos é apropriada.

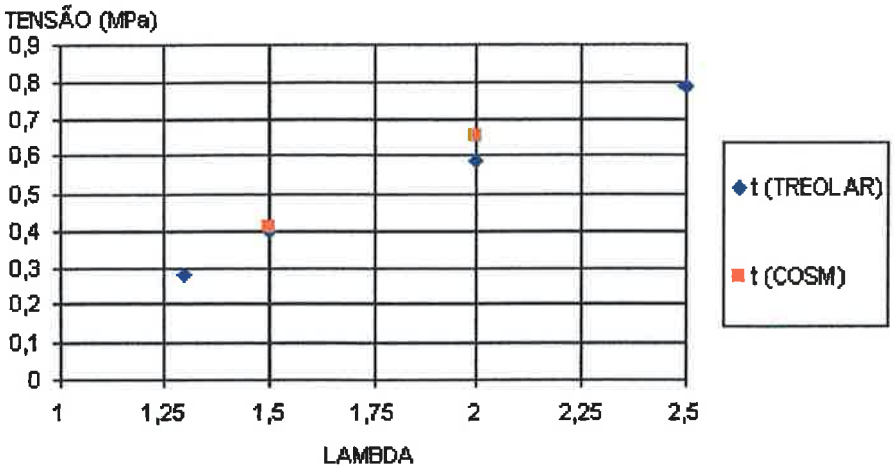


Fig. 12.1.4 - Comparação dos dados experimentais de Treolar e do FEM.

Em código semelhante, porém envolvendo toda a dimensão do CP, a figura 12.1.5 apresenta a evolução dos deslocamentos, visualizando as condições inicial e final para uma deformação (lambda = 2).

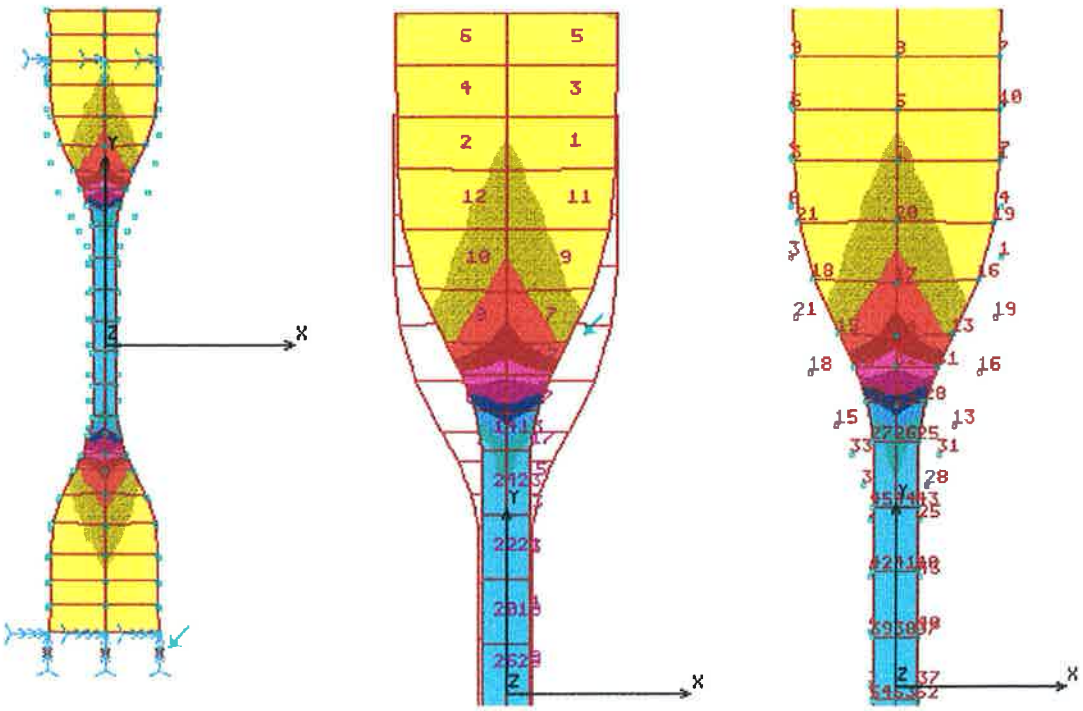


Fig. 12.1.5 - Posição "inicial / final" do corpo-de-prova de tração.

12.2 Ensaios de compressão

Os ensaios de compressão, efetuados na MTS, serão descritos, a seguir, em maior detalhe, destacando-se os ensaios de :

- compressão de corpo-de-prova cilíndrico;
- compressão de anel elastomérico;
- curvas características para os compostos em estudo.

Esta série de ensaios iniciais foi realizada objetivando a avaliação da metodologia de trabalho relacionando os resultados obtidos na MTS e os valores calculados pelo FEM - Cosmos/m.

A figura 12.2.1 apresenta a curva experimental de um composto com (2 P&J), T=23 °C , f = 1 Hz (D=12.54*mm* L= 24.4*mm*), obtida na MTS.

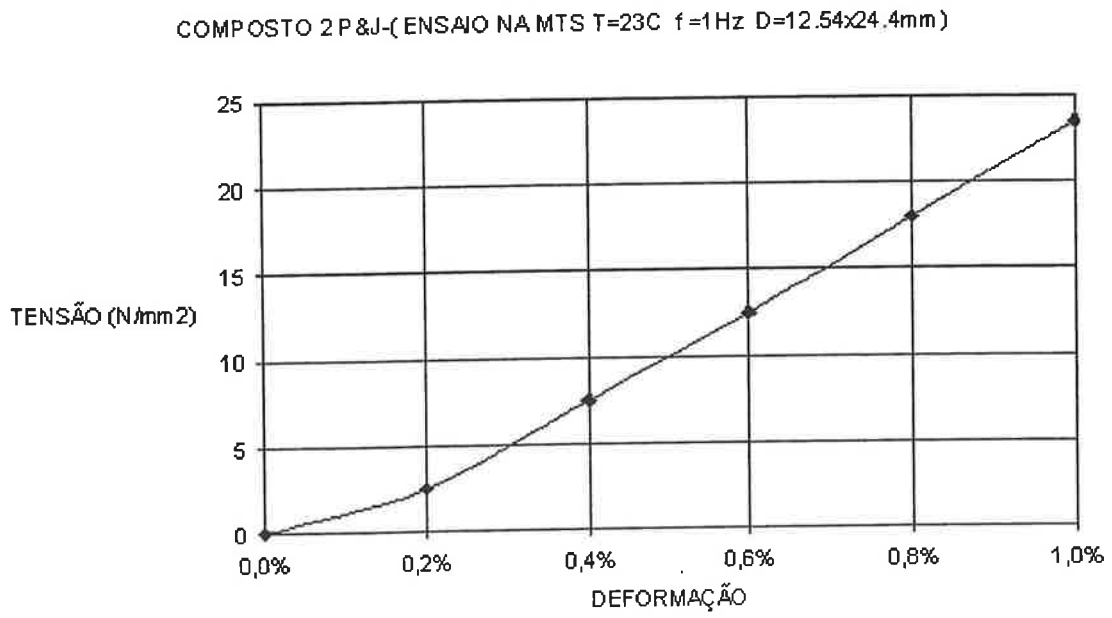
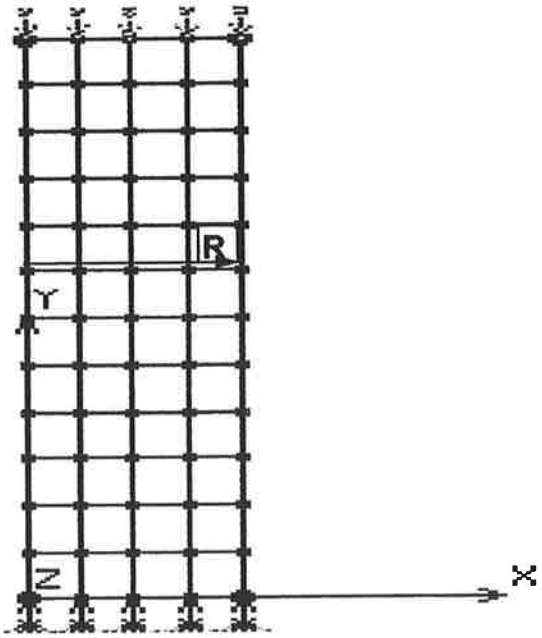


Fig. 12.2.1 - Ensaio de compressão de cilindro na MTS.

O código Cosmos/m empregado para o corpo-de-prova de compressão foi o seguinte:

```
C*  "COMPRESSÃO / MTS "          OBSERVAÇÕES:
PT,1,0,0,0,
PT,2,6.27,0.0                    DIMENSÕES DO C.P ( AXISSIMÉTRICO)
PT,3,6.27,24.40
PT,4,0.0,24.40
View,0,0,1,0
SF4PT,1,1,2,3,4,0,
Scale,.8
Egroup,1,Plane2d,0,2,1,0,4,2,0,  CARACTERÍSTICA DO ELEMENTO
Mprop,1,NUXY,.499
Rconst,1,1,1,2,0,0,
M_SF,1,1,1,4,4,12,1,1,           FORMAÇÃO DA REDE
MPCTYP,1,1,
MPC,1,0,1,-0.004,-7.500,,
MPC,1,0,2,-0.003,-5.000,,
MPC,1,0,3,-0.002,-2.500,,
MPC,1,0,4,-0.001,-1.800,,        CURVA TENSÃO - DEFORMAÇÃO DO
MPC,1,0,5,0.000,0.000,,            COMPOSTO ( VER FIG. 12.2.1)
MPC,1,0,6,0.001,1.800,,
MPC,1,0,7,0.002,2.500,,
MPC,1,0,8,0.003,5.000,,
MPC,1,0,9,0.004,7.500,,
Times,0,4,1,,
Curdef,Time,1,1,0,0,1, 2.5000000000E-01,,  CONTROLES DE PROCESSAMENTO
DCR,1,UY,0,1,1,                  DESLOCAMENTOS
DCR,2,UY,-1.000,2,1                    FORÇA REATIVA
RFCR,1,UY,1,1,,
NL_CONTROL,0,1,
NL_PLOT,1,100,1,0,,
R_NONLINEAR,
```

O modelo estrutural do corpo-de-prova é apresentado abaixo:



R = raio (48 elementos)

Fig. 12.2.2 - Modelo FEM do corpo-de-prova em compressão.

A figura 12.2.3 ilustra a tabela-resumo fornecida pelo Cosmos/m, relativa às forças reativas para a respectiva condição de deformação imposta em condições experimentais.

Reaction Forces for step 4

Node	X1	X2	X3	R1	R2	R3
1	0.00000E+00	0.94715E+01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+
2	0.00000E+00	0.56829E+02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+
3	0.00000E+00	0.11366E+03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+
4	0.00000E+00	0.17049E+03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+
5	0.00000E+00	0.10419E+03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+

F (N / rad) = 9.47+56.8+113.7+170.5+104.2=454.7N F final= F*2.Pi= 2856 N

Fig. 12.2.3 - Força reativa para corpo-de-prova em compressão.

A figura 12.2.4 apresenta o resumo das principais informações relevantes ao ensaio:

```
        MATERIAL.....=C2P&J
   DIAMETRO.....=12.540    (mm)
   ALTURA.......=24.400    (mm)
   DUREZA.......= 2        (P&J)
   TEMPERATURA..= 23     (Cent.)
   FREQUENCIA...= 1        (Hertz)
DESLOCAMENTO(mm)       MTS(N)          COSMOS(N)
       0                0.0              0.0
     0.098            992.009          982.038
     0.146           1615.258           1590.402
     0.195           2241.020           2195.475
     0.244           2931.687           2856.591
```

Fig. 12.2.4 - Resumo das informações do ensaio de compressão.

Estes resultados são melhor apresentados na figura 12.2.5.

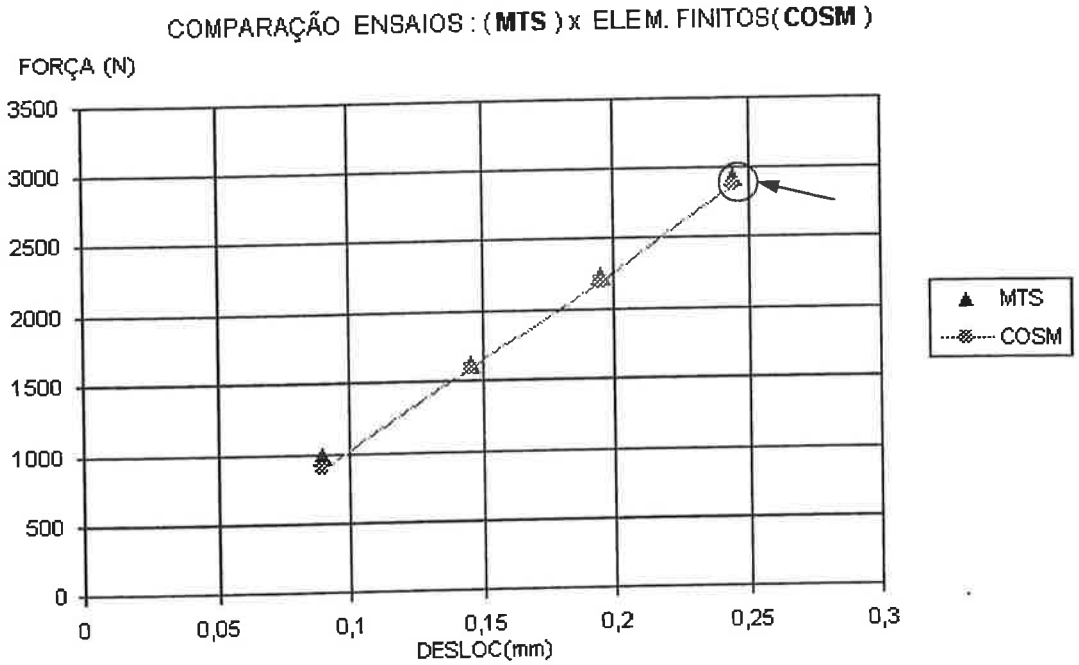


Fig. 12.2.5 - Resultados experimentais e calculados por FEM.

A metodologia apresentada tornou-se "padrão" quando do levantamento das curvas características tensão-deformação de cada composto estudado, verificando a sua validade quando da comparação com os dados experimentais de força-deformação, sendo que quaisquer desvios implicavam em reanálise dos dados obtidos .

12.3 Anel elastomérico .

Prosseguiu-se a avaliação da modelação matemática, agora com o emprego de um anel elastomérico com dimensões de 133x 68x 97.4*mm* (De x Di x compr.) de um composto (17 P&J), cujas características foram levantadas em compressão, com a metodologia acima apresentada, obtendo-se a figura 12.3.1.

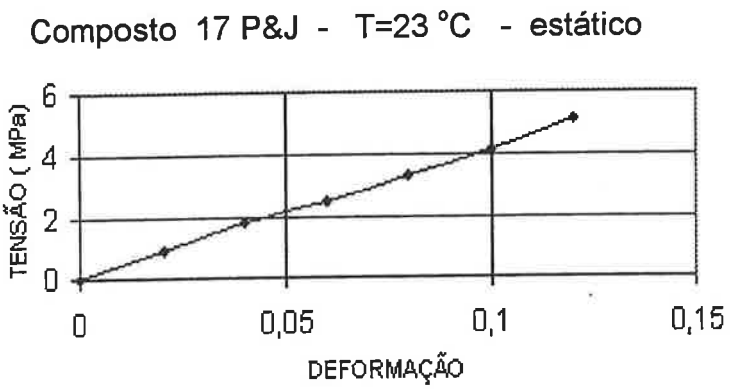


Fig. 12.3.1 - Curva característica de composto (17 P&J).

O código correspondente (anel) é apresentado abaixo:

```
C* COSMOS/M     Geostar V1.71
C* Problema : "ANEL "
PT,1,0,0,0,
PT,2,56.5,0,0,
PT,3,34,0,0,
PT,4,0,56.5,0,
PT,5,0,34,0,
PT,6,0,57.5,0,
PT,7,57.5,57.5,0,
PT,8,0,69,0,
PT,9,57.5,69,0,
VIEW,0,0,1,0,
CRARC,1,5,3,1,34,
CRARC,2,4,2,1,56.5,
CRLINE,3,4,5,
CRLINE,4,3,2,
SF4PT,2,6,7,9,8,0,
SF4CR,1,1,4,2,3,0,
M_SF,1,1,1,4,9,3,1,1,
EGROUP,1,PLANE2D,0,2,0,0,3,2,0,
MPROP,1,NUXY,.499,MOONEY_A,.528,MOONEY_B,.132,
RCONST,1,2,1,2,97.4,0,
EGROUP,2,PLANE2D,0,2,0,0,0,0,0,
MPROP,2,EX,21000,NUXY,0.33,
RCONST,2,1,1,2,97.4,0,
M_SF,2,2,1,4,9,1,1,1,
EGROUP,3,GAP,1,0,0,1,2,0,0,
TIMES,0,1,.1,
CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,1,
NL_GSAUTO,0,5,0,2,2,1,1,
DCR,3,UX,0,3,1,,
DCR,4,UY,0,4,1,,
DCR,7,UX,0,7,1,,
DCR,6,UY,-3.057,6,1,,
A_NONLINEAR,S,1,1,20,.1,0,N,0,0,1e+010,.1,0.01,0,
NL_CONTROL,0,1,
NL_PLOT,1,100,1,0,
ACTSET,EG,1,
ACTSET,MP,1,
ACTSET,RC,1,
ACTSET,EG,2,
ACTSET,MP,2,
ACTSET,RC,2,
ACTSET,EG,3,
SCALE,0.8,
RFCR,4,UY,4,1,,
C* R_NONLINEAR,
```

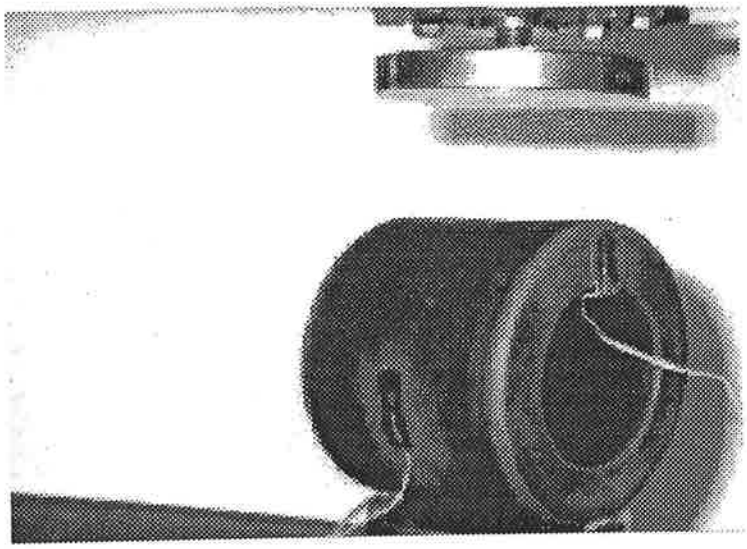


Fig. 12.3.2 - "Anel" sendo ensaiado na MTS.

A figura 12.3.2 ilustra o " anel " sendo ensaiado na MTS e a figura 12.3.3 apresenta o diagrama de partida do programa de elementos finitos, correspondente.

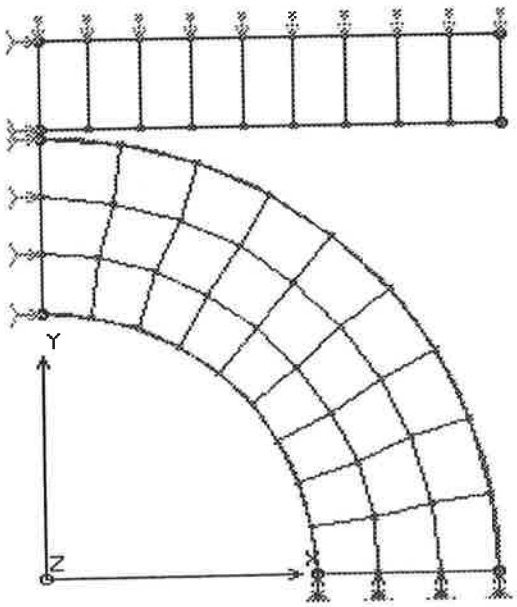


Fig. 12.3.3 - Esquema básico de aplicação de cargas do ensaio "anel ".

Os deslocamentos na direção y (vertical), são apresentados na figura 12.3.4.

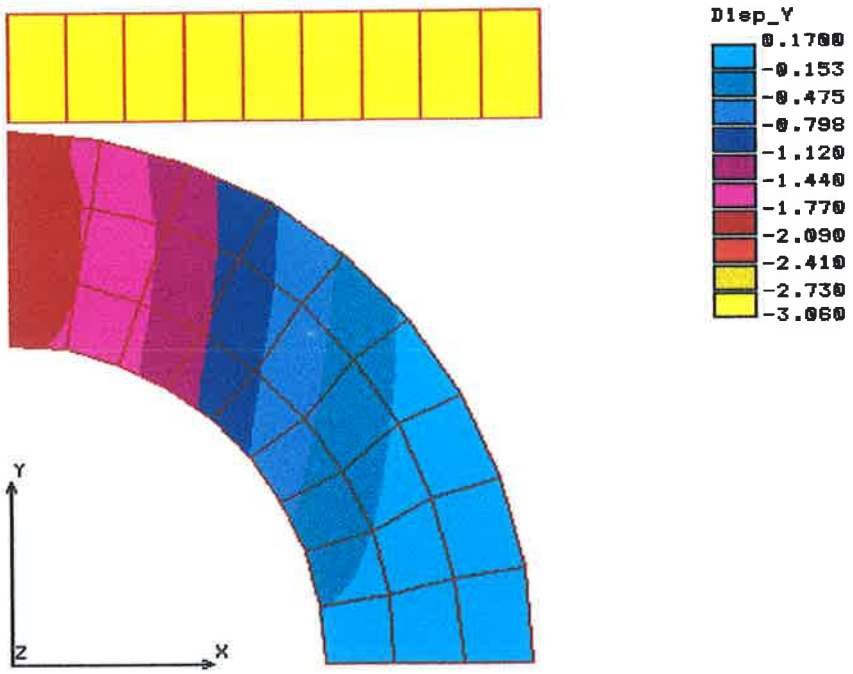


Fig. 12.3.4 - Deslocamento em y

As correspondentes tensões radiais (eixo y) são apresentadas na figura 12.3.5.

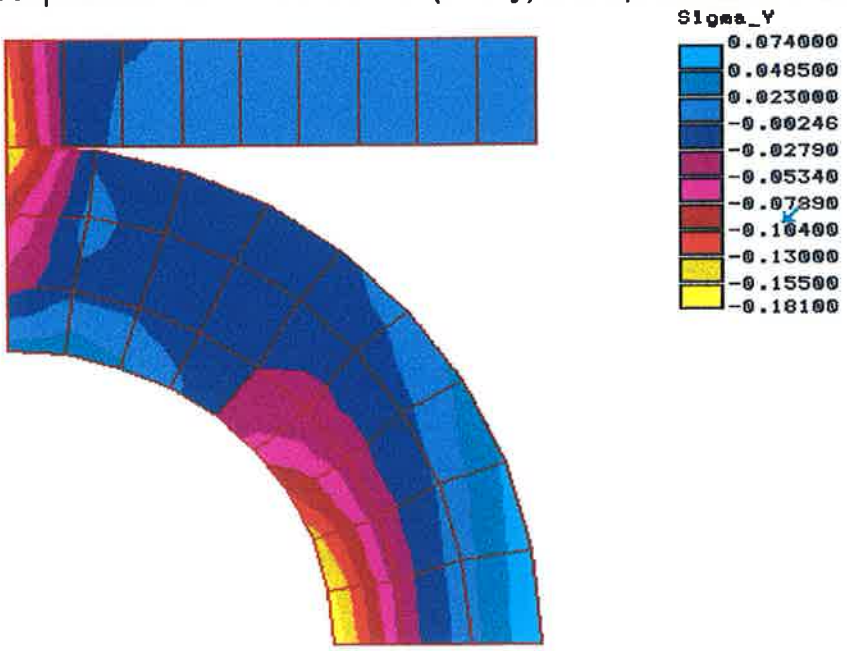
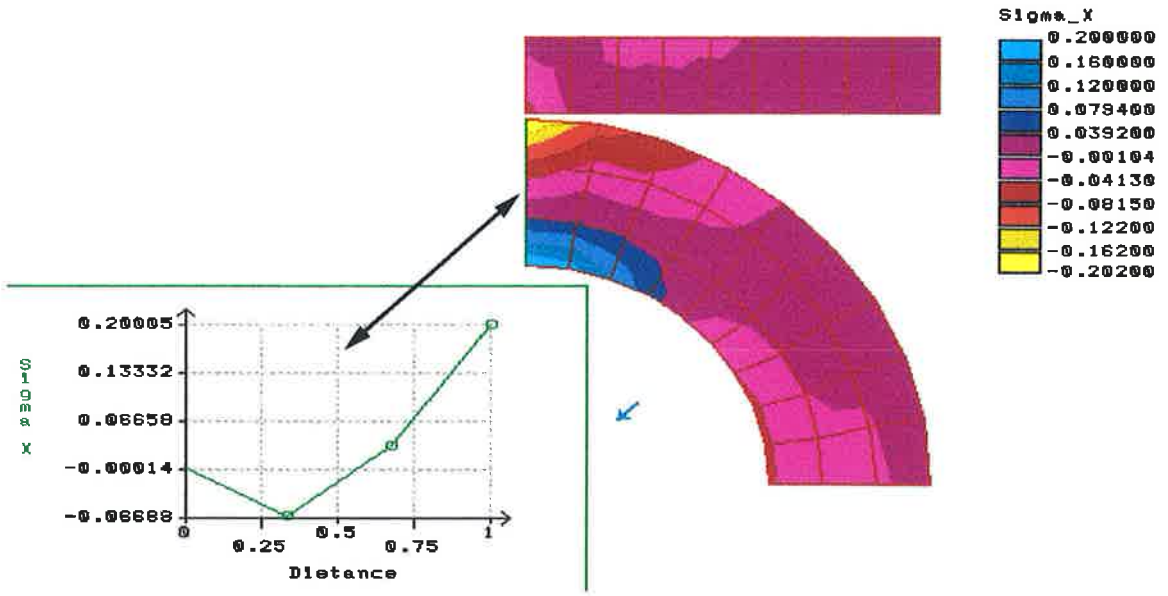


Fig. 12.3.5 - Tensões radiais (y).

Na direção horizontal (eixo x), as tensões radiais são apresentadas na figura 12.3.6.



12.3.6 -Tensões radiais (x)

O deslocamento radial correspondente, isto é, o aumento do raio (eixo x), decorrente da compressão, pode ser analisado na figura 12.3.7. O valor experimental observado foi de 1,4*mm* , ilustrando a boa concordância obtida com o valor calculado.

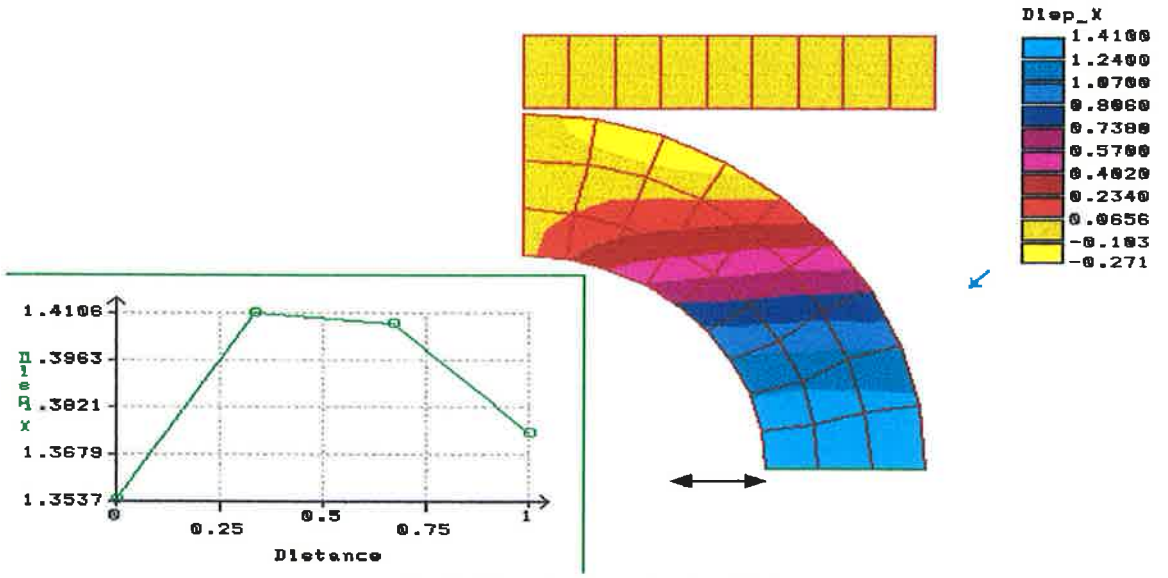


Fig. 12.3.7- Deslocamento radial.

De maneira semelhante, obteve-se uma boa correlação com os valores de força, experimentais e calculados, como indica a figura 12.3.8.

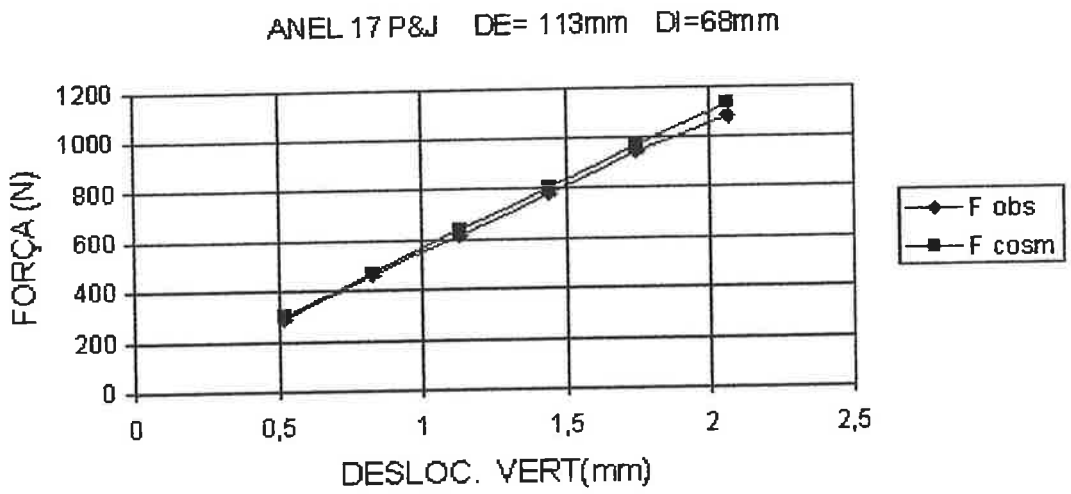


Fig. 12.3.8. - Valores experimentais e calculados - " Anel ".

12.4 Ensaios de corpos-de-prova em diferentes durezas- Detalhamento de ensaios.

Decorrente dos resultados acima obtidos, prosseguiu-se o programa de ensaios, procurando levantar as informações relevantes, relativas a elastômeros que mais representassem o espectro de durezas para aplicação em indústria papeleira, isto é, durezas de 30, 12 e 1 P&J, as quais passaremos a detalhar em seguida. (Ver composições na tabela 12.1).

12.4.1 Dureza de 30 P&J

A figura 12.4.1 apresenta um ciclo típico de histerese à temperatura ambiente e freqüência de 0.1 Hz, para diferentes níveis de tensão.

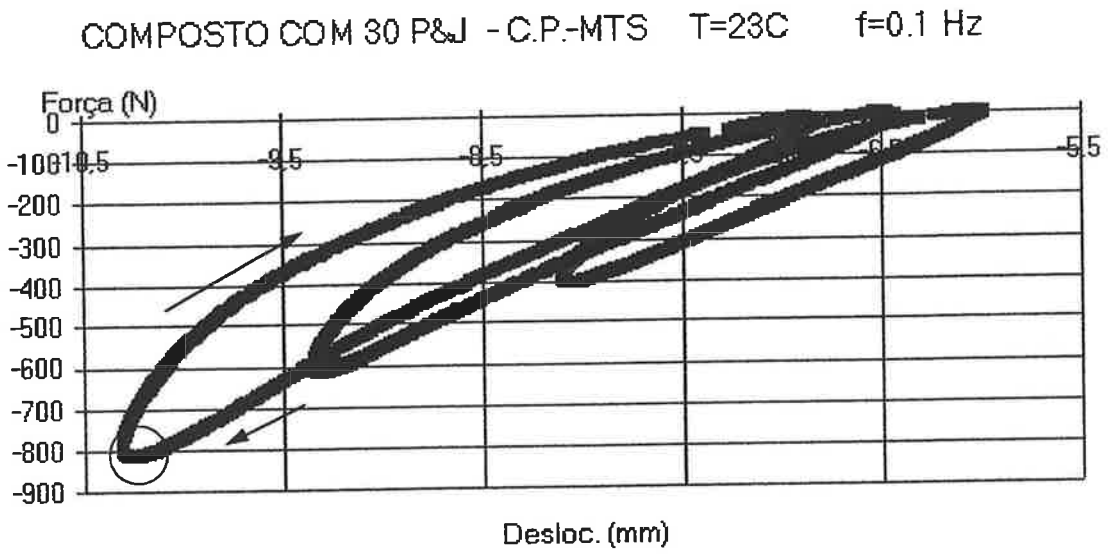


Fig. 12.4.1 - Ciclo de histerese para o composto 30 P&J para diferentes níveis de tensão (T=23°C, f= 0,1 Hz)

A figura 12.4.2 apresenta a curva tensão-deformação decorrente dos ciclos acima obtidos (lugar geométrico dos pontos de máximo ◯ na fig.12.4.1) (eq .11.1 e 11.2).

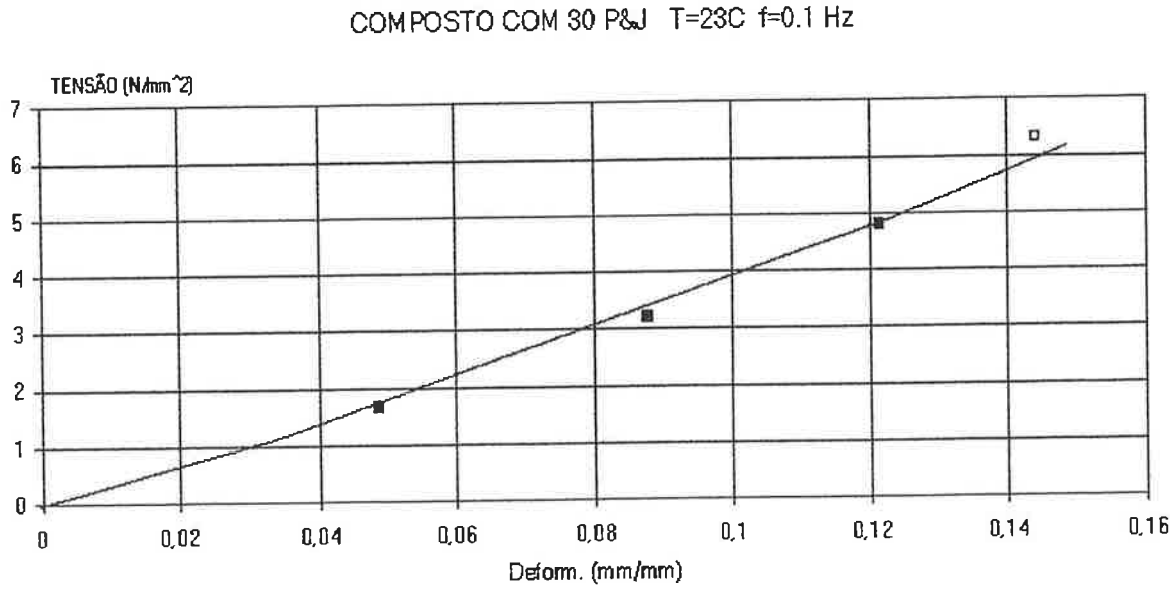


Fig. 12.4.2.- Curva tensão-deformação correspondente à figura 12.4.1. (T=23°C, f=0,1Hz)

Variando-se a freqüência, para a mesma tensão e temperatura, tem-se a

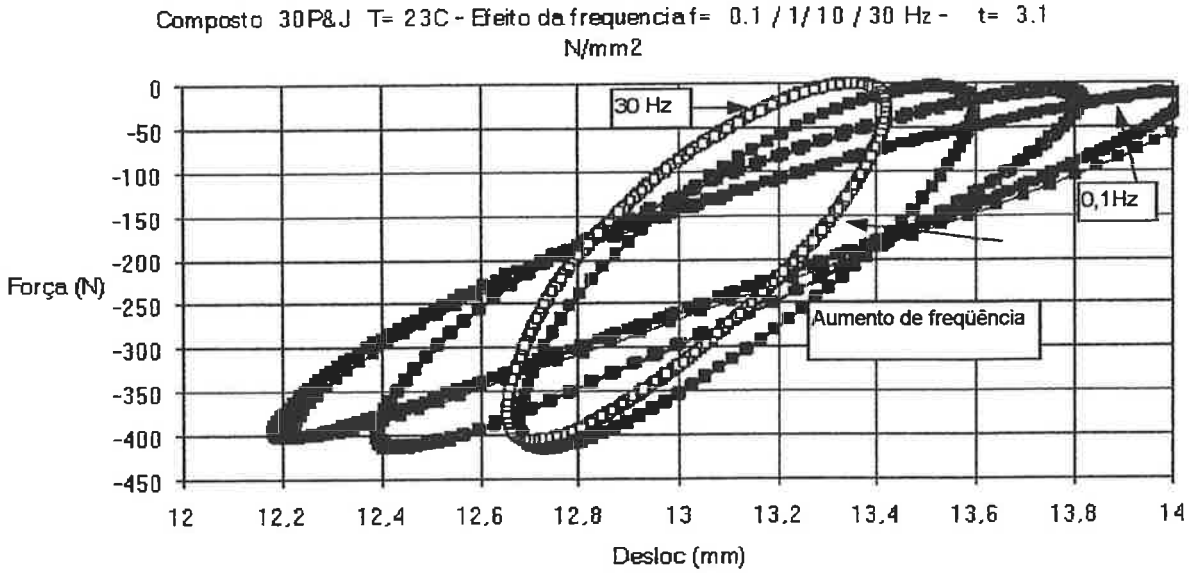


Fig. 12.4.3 - Efeito da freqüência no composto de 30 P&J.

Observa-se que o aumento da freqüência implica em um aumento do módulo dinâmico (E*) (eq. 11.3) do composto, neste caso, bastante acentuado.

Por outro lado, um aumento do número de ciclos de ensaio, particularmente nas freqüências mais elevadas, implica no aquecimento do corpo-de-prova, e, conseqüentemente, no abaixamento do valor de E*, como pode ser observado na figura 12.4.4.

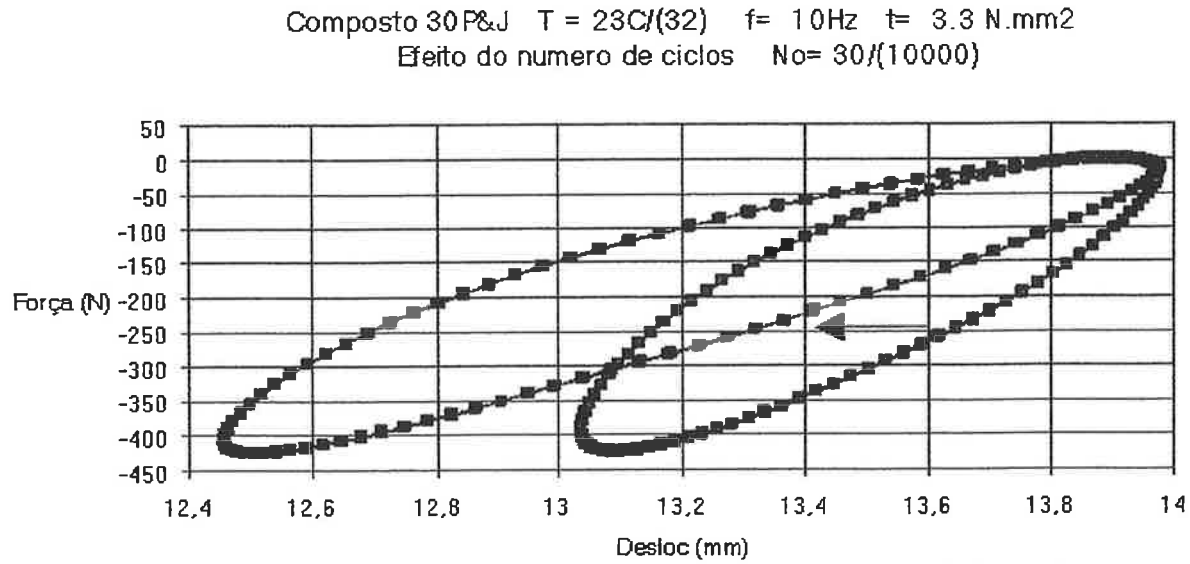


Fig. 12.4.4 - Efeito do número de ciclos de ensaio (aquecimento histerético).

No entanto, se, após a elevação de temperatura, permite-se que o corpo-de-prova volte à temperatura inicial, as propriedades tendem a se reestabelecer, como ilustra a figura 12.4.5.

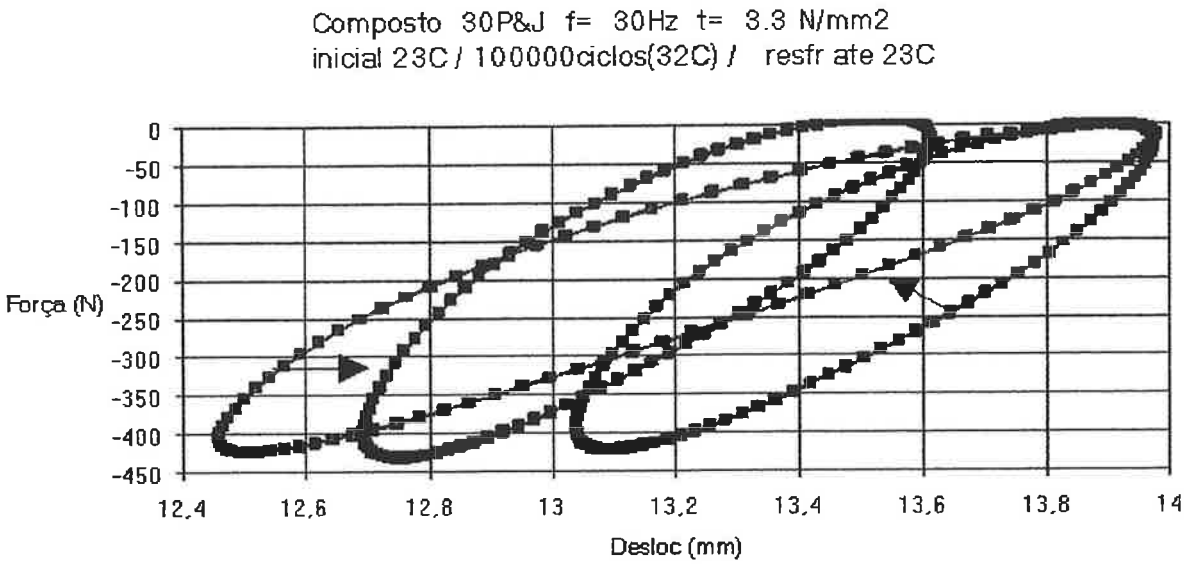


Fig.12.4.5 - Efeito do número de ciclos em freqüências elevadas.

Para evitar este tipo influência, os ensaios foram realizados em até 10 ciclos, mesmo em freqüências de até 30 Hz. O efeito da freqüência e da temperatura, sobre a curva característica do composto, pode ser observado na figura 12.4.6, para as temperaturas de 23 e 60°C , respectivamente.

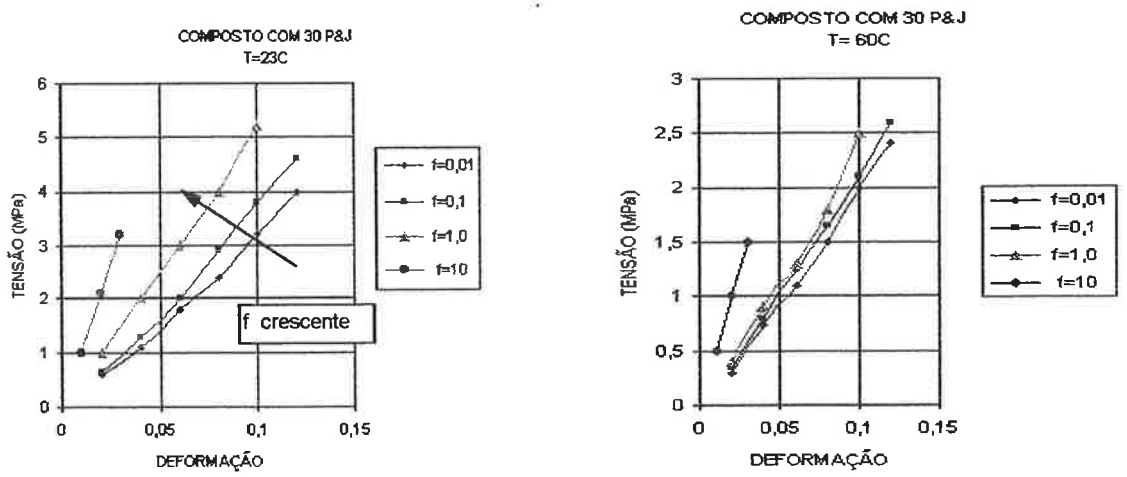


Fig. 12.4.6 - Efeito da temperatura (T) e da freqüência (f) - composto 30 P&J.

Os valores de E* apresentam linearidade com a aumento da freqüência, para tensão constante, para as diferentes temperaturas analisadas, de acordo com a relação de WLF, como foi visto na figura 5.3 (capítulo 5), e como pode ser observado na figura 12.4.7.

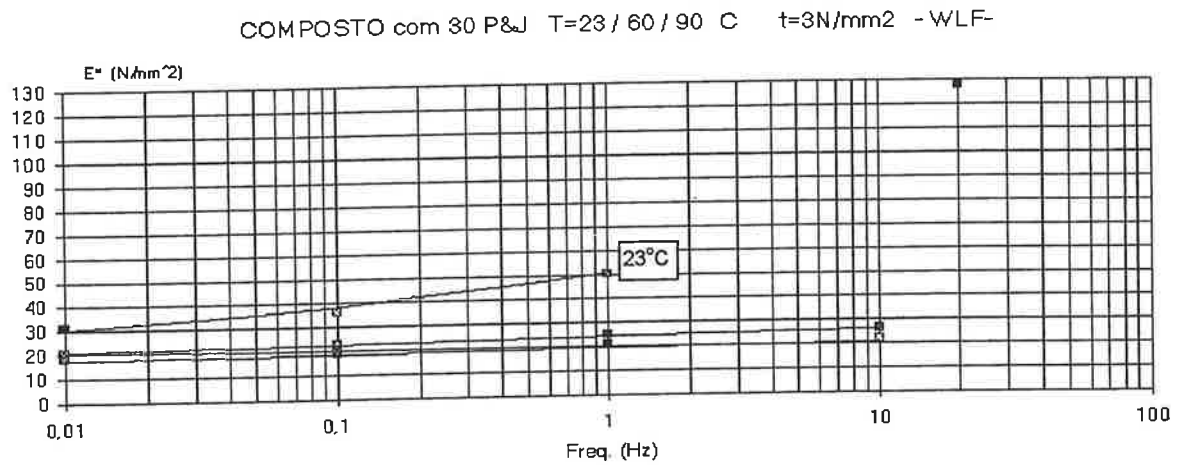


Fig. 12.4.7- Efeito da freqüência sobre o valor de E* (tensão constante)

A perda histerética, medida através da relação Wd / Wfh (eq. 11.8/eq. 11.9), apresenta um valor da ordem de 0,4 para temperaturas de até 60° C (temperatura normal de uso), como pode ser observado na figura 12.4.8.

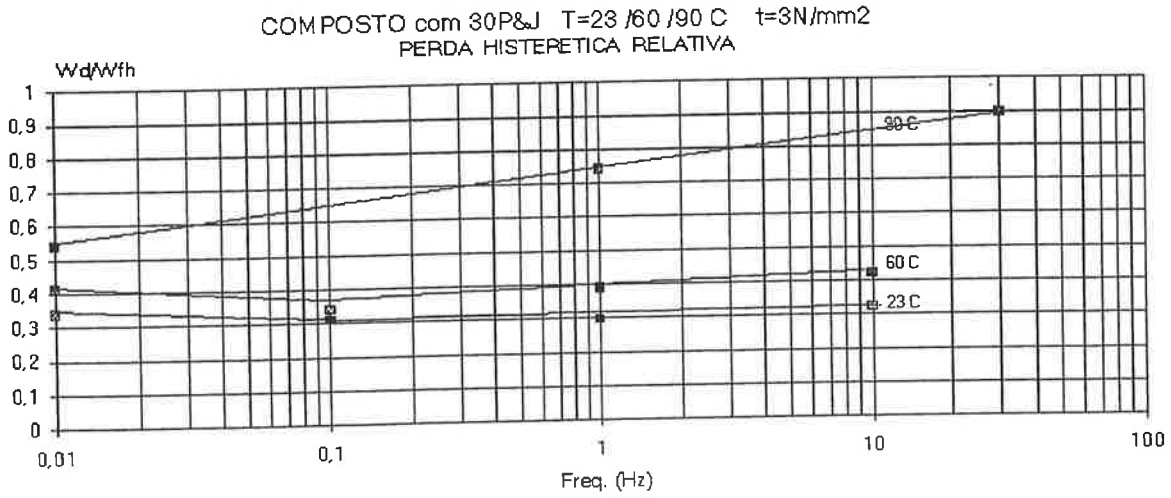


Fig. 12.4.8 - Perda histerética em função da freqüência e da temperatura (°C).

12.4.2 Dureza de 12 P&J

Na seqüência, são apresentados os resultados relativos às principais características do composto na dureza de 12 P&J.

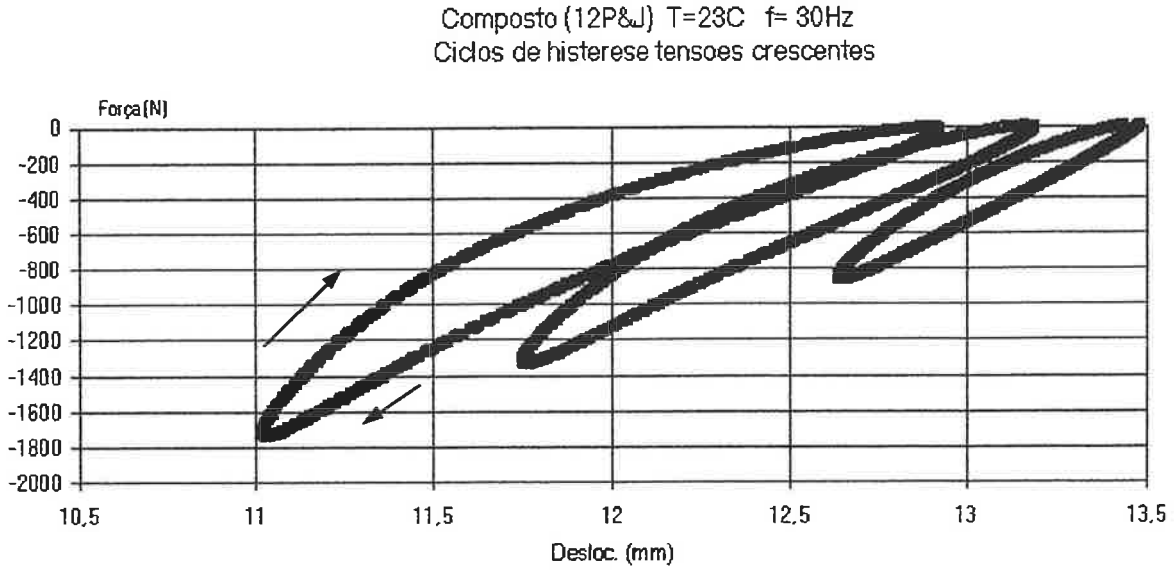


Fig. 12.4.9 - Composto 12 P&J - Ciclos de histerese, com tensões crescentes.

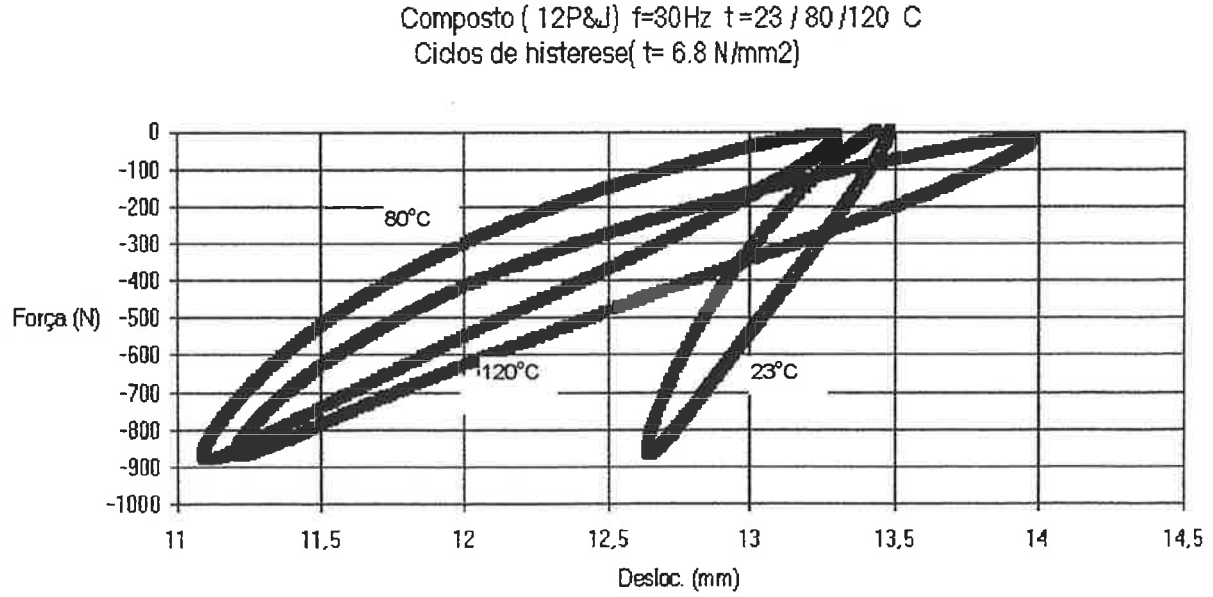


Fig. 12.4.10 - Composto 12 P&J - Efeito da temperatura sobre o ciclo de histerese para tensão de 6.8.N/mm2 e freqüência de 30 Hz, constantes.

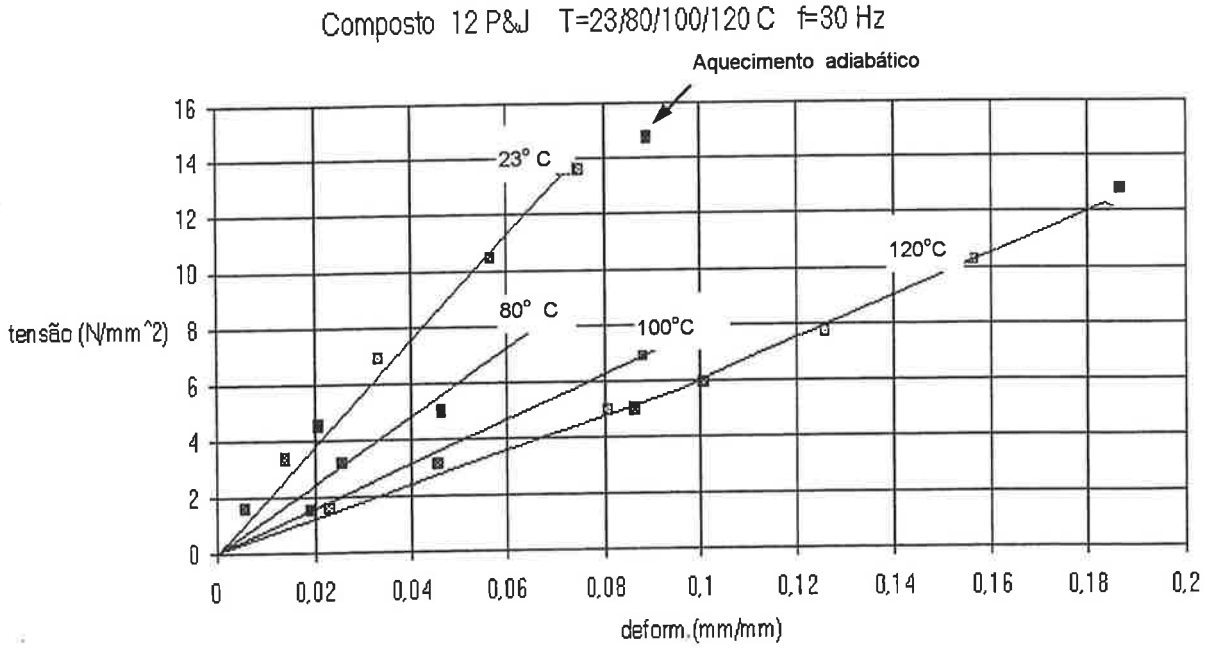


Fig. 12.4.11 - Composto 12 P&J - Efeito da temperatura nas curvas tensão-deformação a 30 Hz.

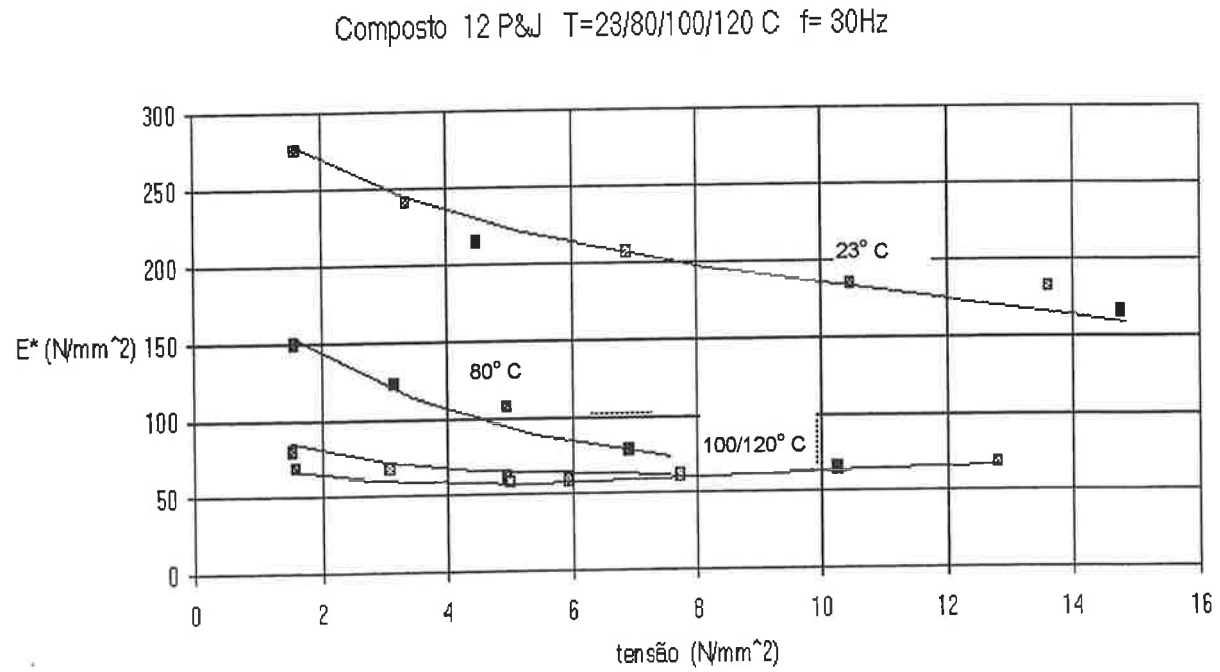


Fig. 12.4.12 - Composto 12 P&J - Efeito da tensão e da temperatura sobre o módulo dinâmico (E*) para f =30 Hz (eq. 11.1 e 11.3)

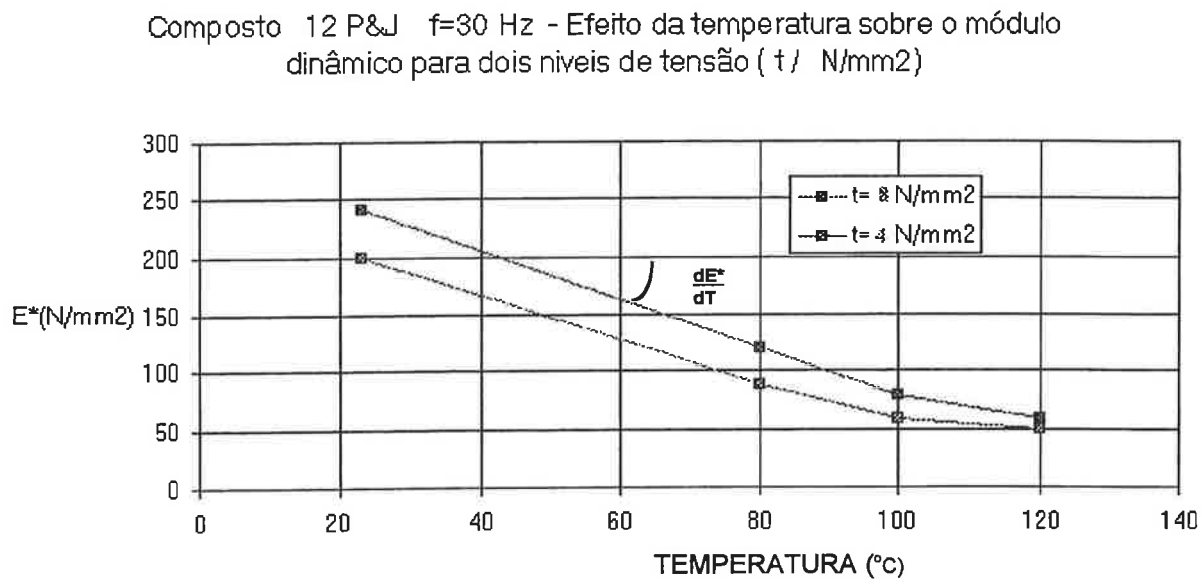


Fig. 12.4.13 - Composto 12 P&J - Efeito da temperatura e da tensão sobre o módulo dinâmico E* para f= 30 Hz.

(Obs.: A "estabilidade" do composto é avaliada pela relação d E* / d T)

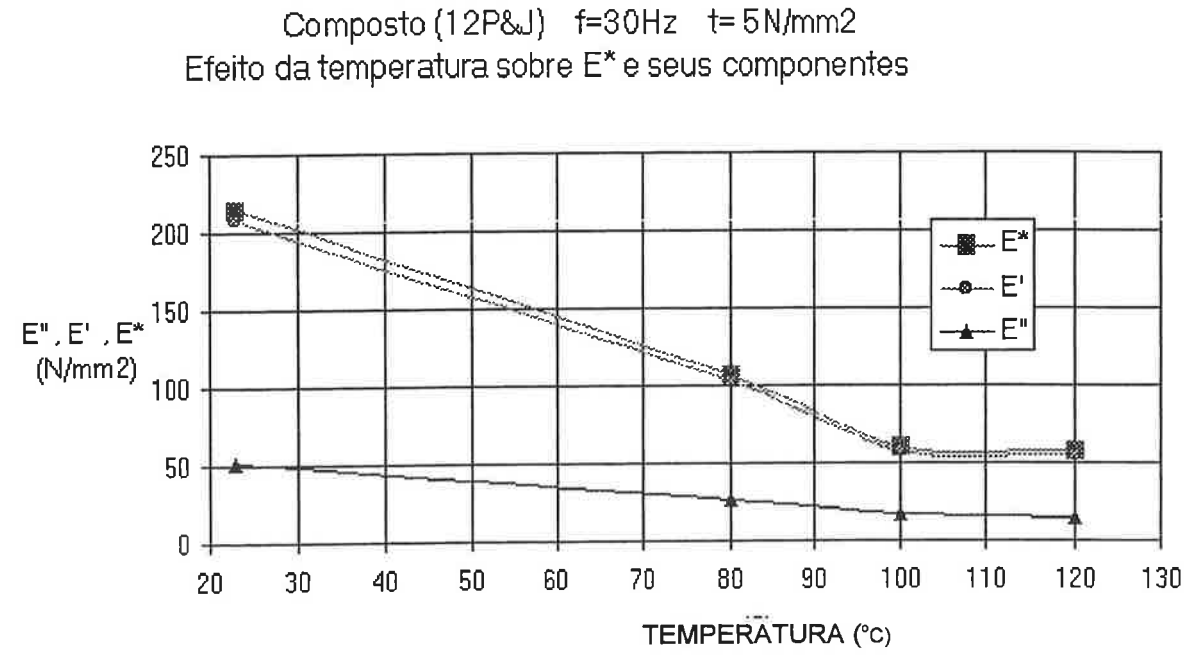


Fig. 12.4.14 - Composto 12 P&J - Efeito da temperatura sobre E* , E', E" (para t= 5 N/mm2 e f =30 Hz) (eq. 11.4 e 11.5).

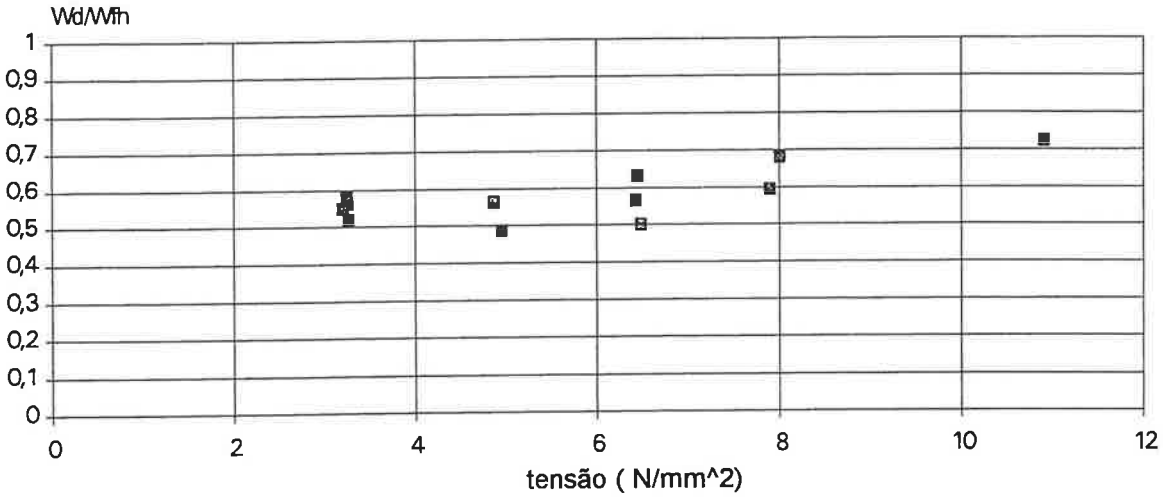


Fig. 12.4.15 - Composto 12 P&J - Efeito da tensão e da temperatura sobre a perda histerética específica para T= 23/60/90/120°C e f =0.1 Hz (eq. 11.8 e 11.9).

12.4.3 Dureza 1 P&J

Na seqüência, são apresentados os resultados relativos às principais características do composto na dureza de 1 P&J.

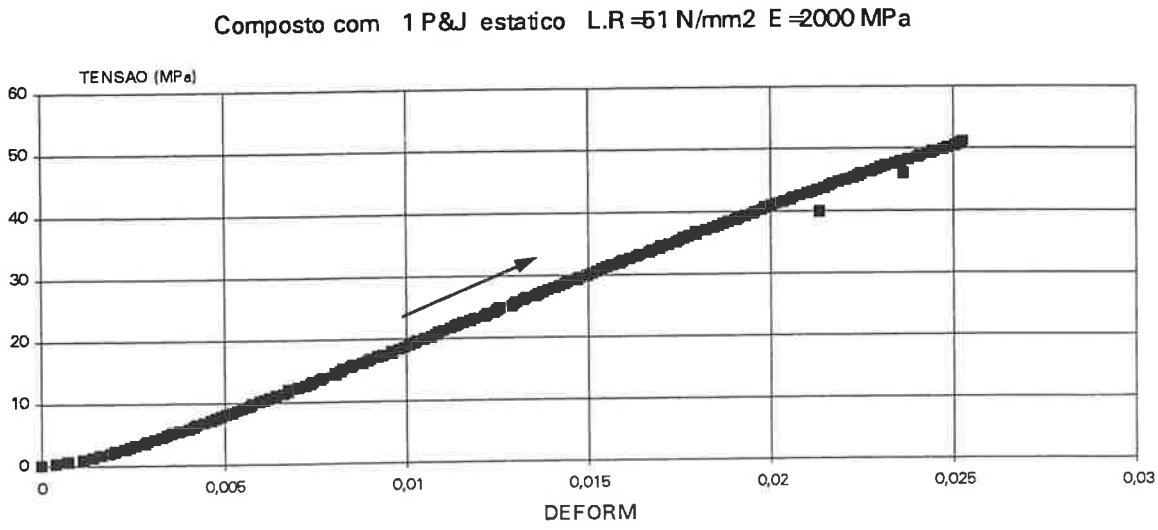


Fig. 12.4.16 - Composto 1 P&J ensaio "estático" de compressão.

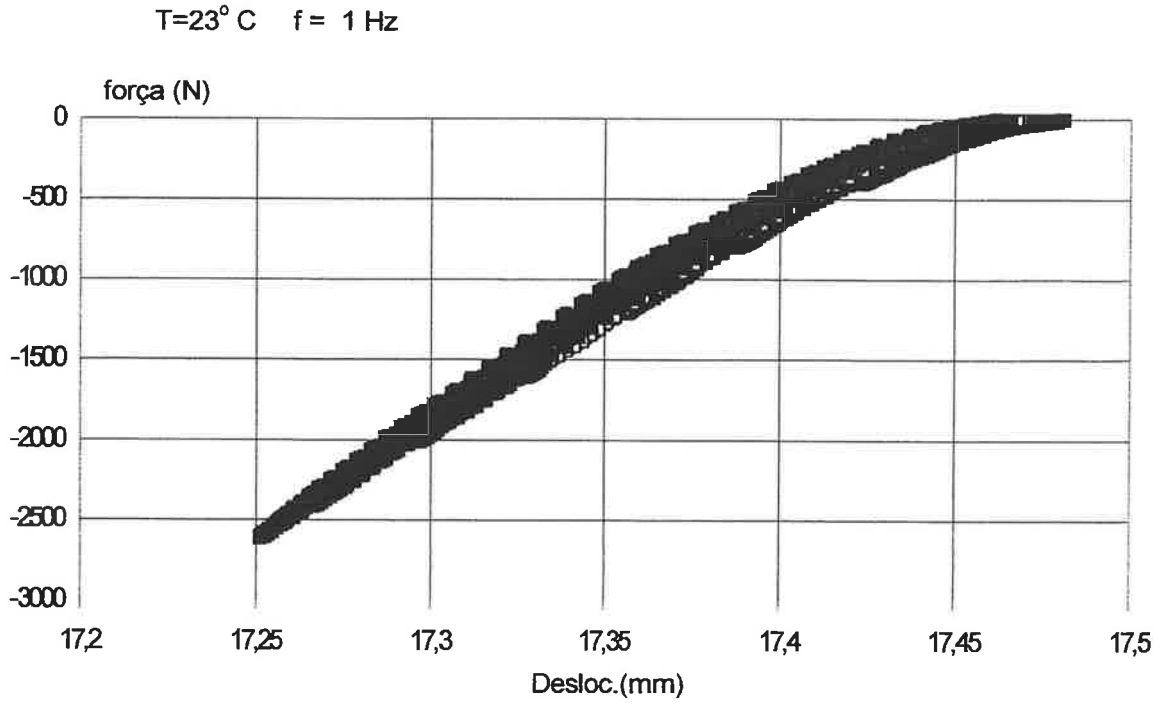


Fig. 12.4.17- Composto 1 P&J - ciclos de histerese para tensões crescentes a 1Hz.

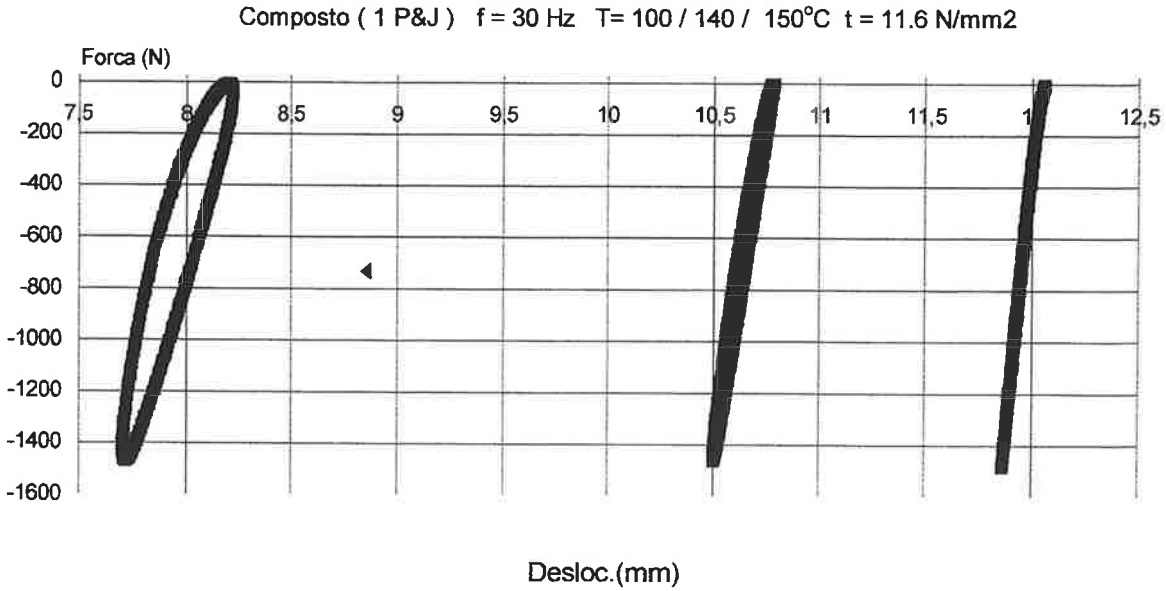


Fig. 12.4.18 - Composto 1 P&J - Efeito da temperatura sobre o ciclo de histerese para tensão e freqüência constantes .

(Obs.:O composto em temperaturas "elevadas" torna-se histerético.).

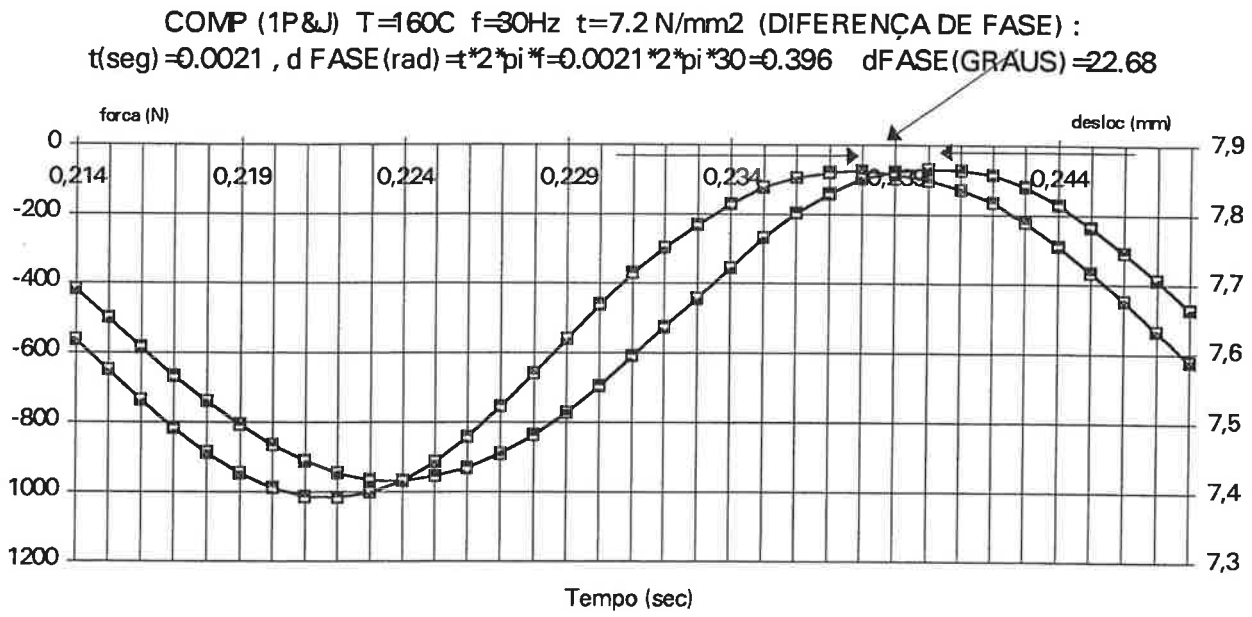


Fig. 12.4.19 - Composto 1 P&J - Diferença de fases entre força e deslocamento a 160°C

Composto (1 P&J) T = 23° C f = 30 Hz D = 12.4 *mm* L= 25.8 *mm*

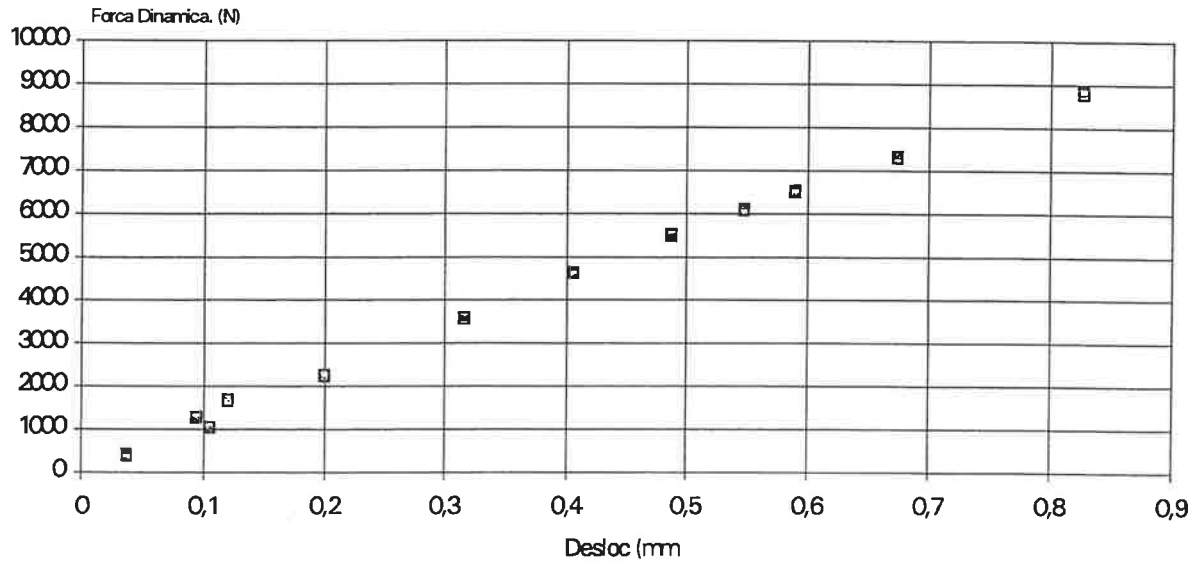


Fig. 12.4.20 - Composto 1 P&J - Curva força-deslocamento.

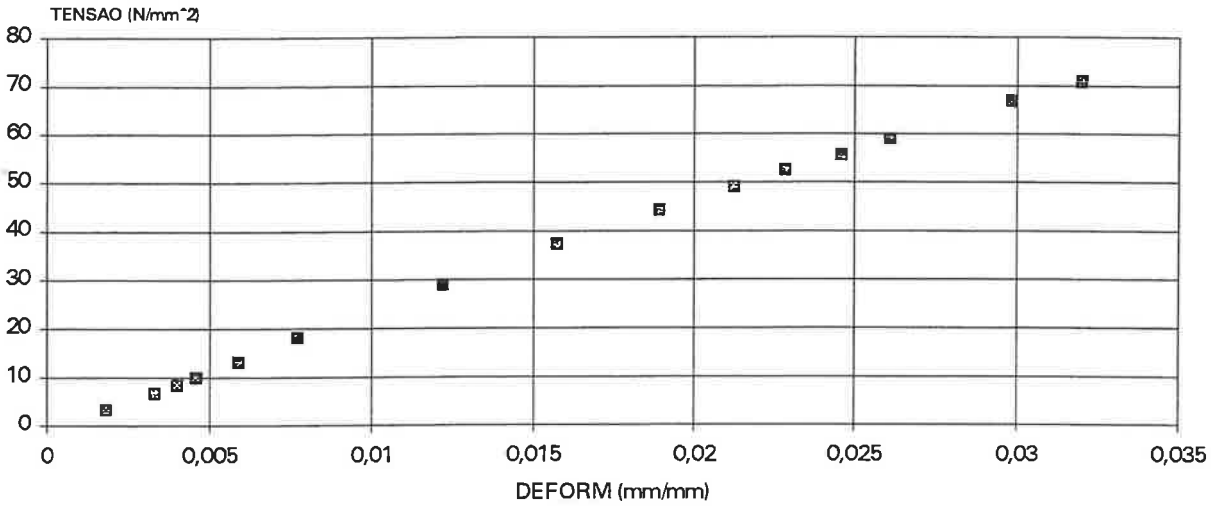


Fig. 12.4.21 - Composto 1 P&J - Curva tensão-deformação (da Fig. 12.4.20) .

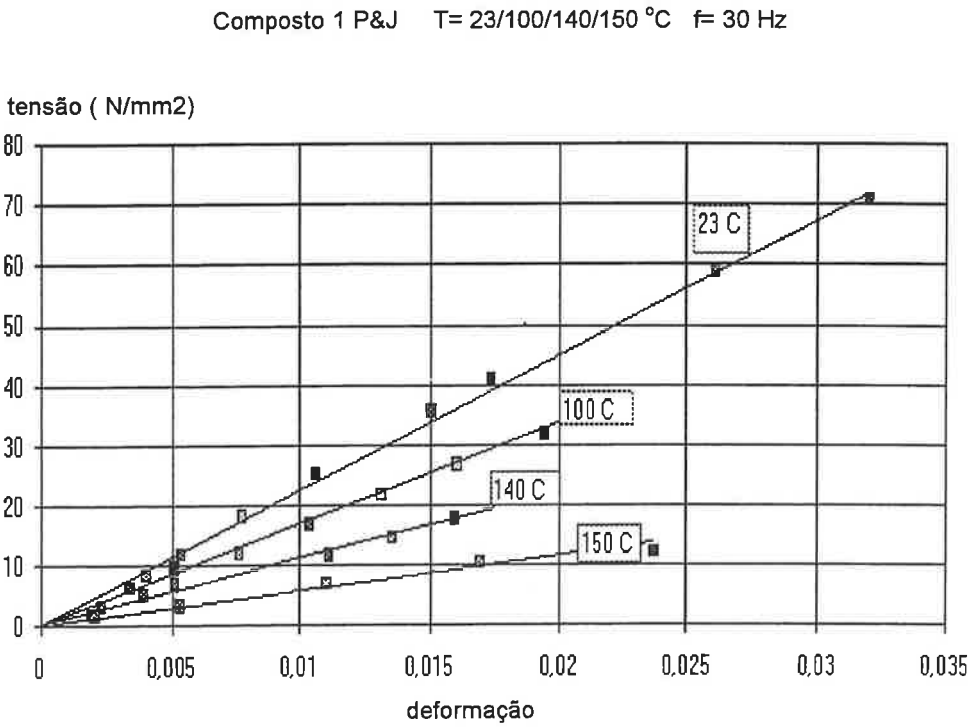


Fig. 12.4.22 - Composto 1 P&J -Efeito da temperatura sobre a curva tensão-deformação (f = 30 Hz) .

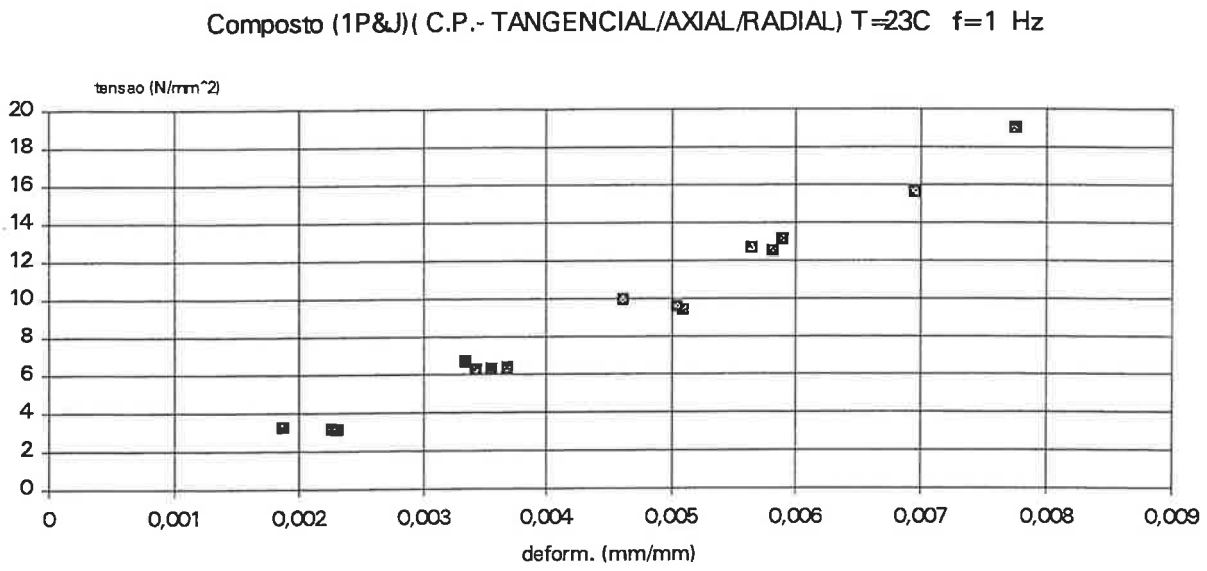


Fig. 12.4.23 - Composto 1 P&J - Efeito da direcionalidade do corpo-de-prova sobre a curva tensão-deformação.

(Observar a pequena dispersão dos resultados devido à direcionalidade.)

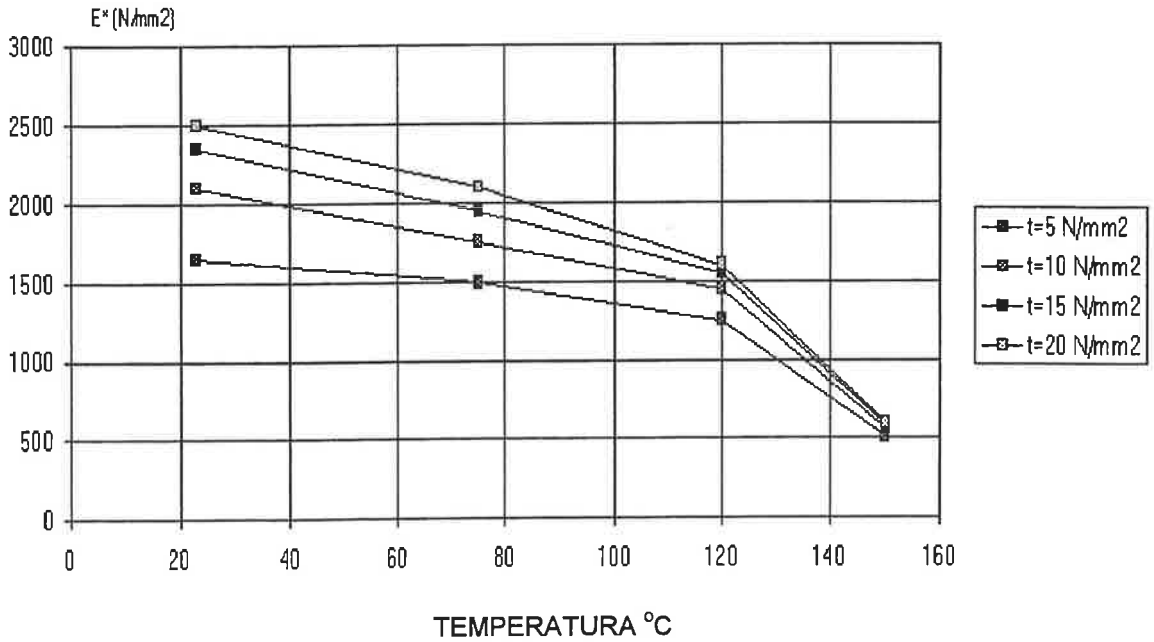


Fig. 12.4.24 - Composto 1 P&J - Efeito da tensão e da temperatura sobre o módulo dinâmico a 1 Hz.

(Obs.: A "estabilidade" do composto é significativamente afetada acima de 120°C)

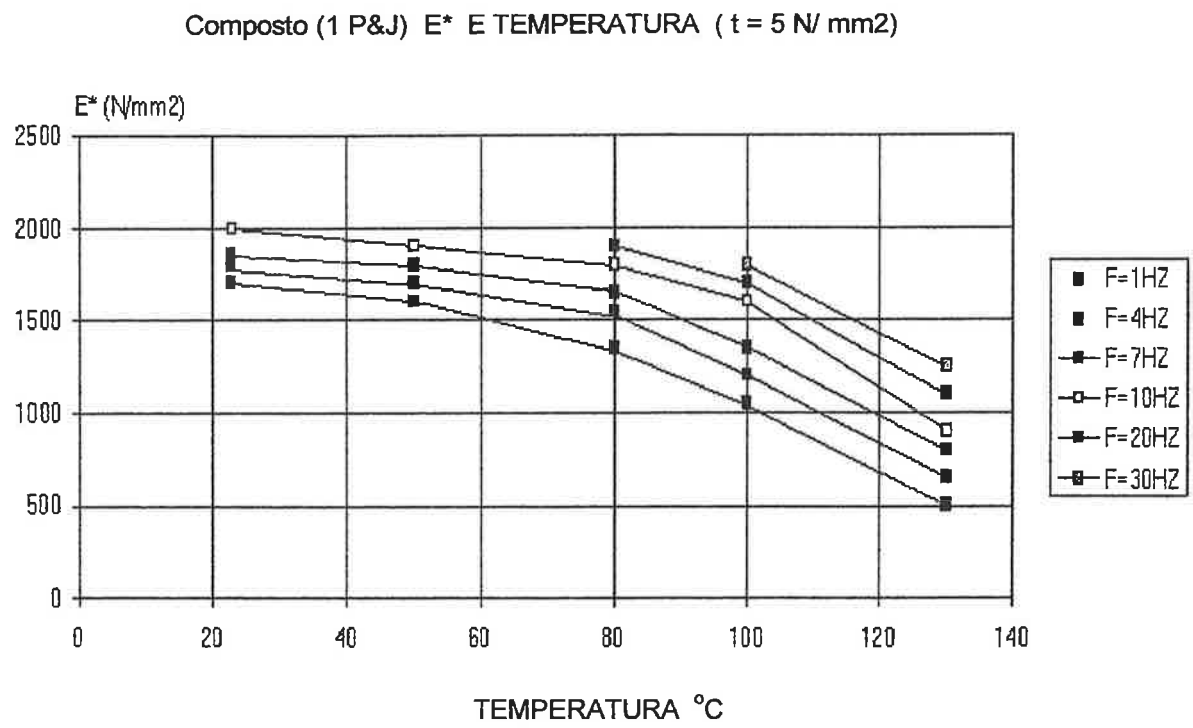


Fig. 12.4.25 - Composto 1 P&J - Efeito da temperatura e da freqüência sobre o módulo dinâmico a tensão constante.

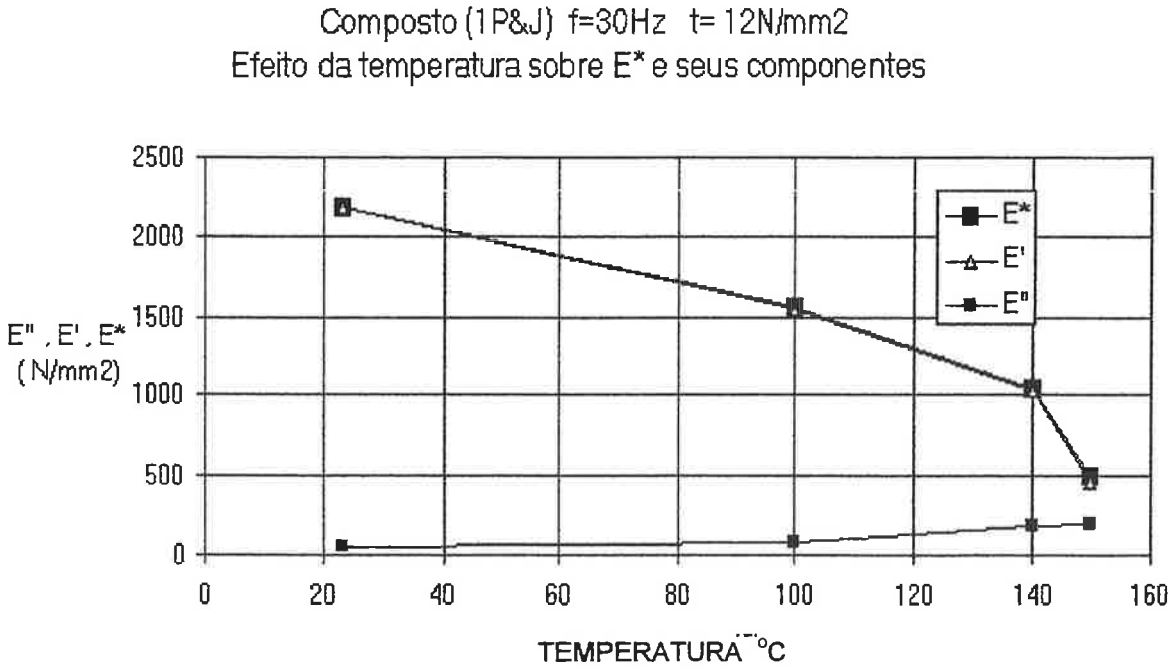


Fig. 12.4.26 - Efeito da temperatura sobre E* , E' , E"
(Obs.: O módulo dinâmico "complexo" e o "elástico" são próximos.)

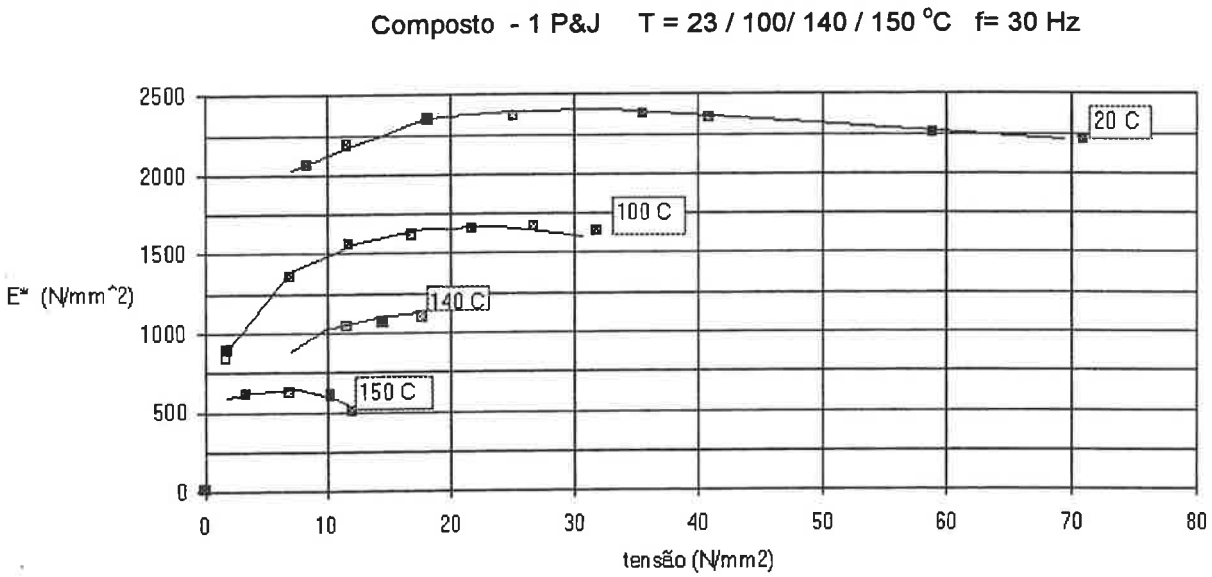


Fig.12.4.27 - Composto 1 P&J - Efeito da tensão e da temperatura sobre o módulo dinâmico (freqüência constante de 30 Hz).

(Obs.: Em "altas" freqüências e altas tensões, verifica-se o aquecimento adiabático do C.P., por atrito interno, com conseqüente imprecisão dos resultados.)

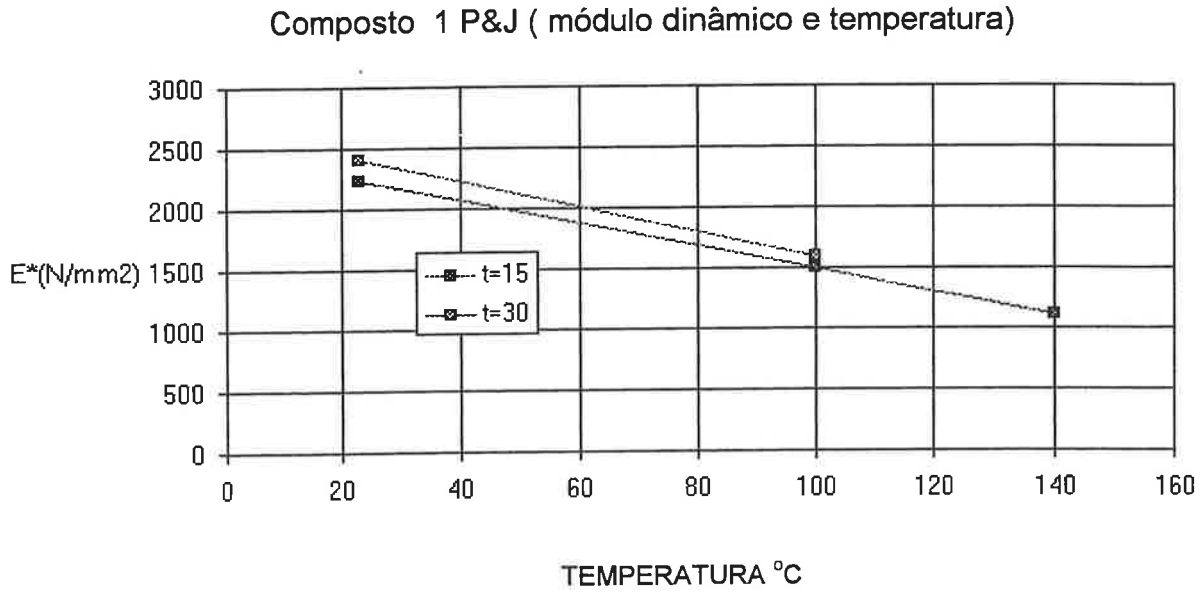


Fig. 12.4.28 - Composto 1 P&J - Efeito da temperatura e da tensão(t) sobre o módulo dinâmico para f= 30 Hz.

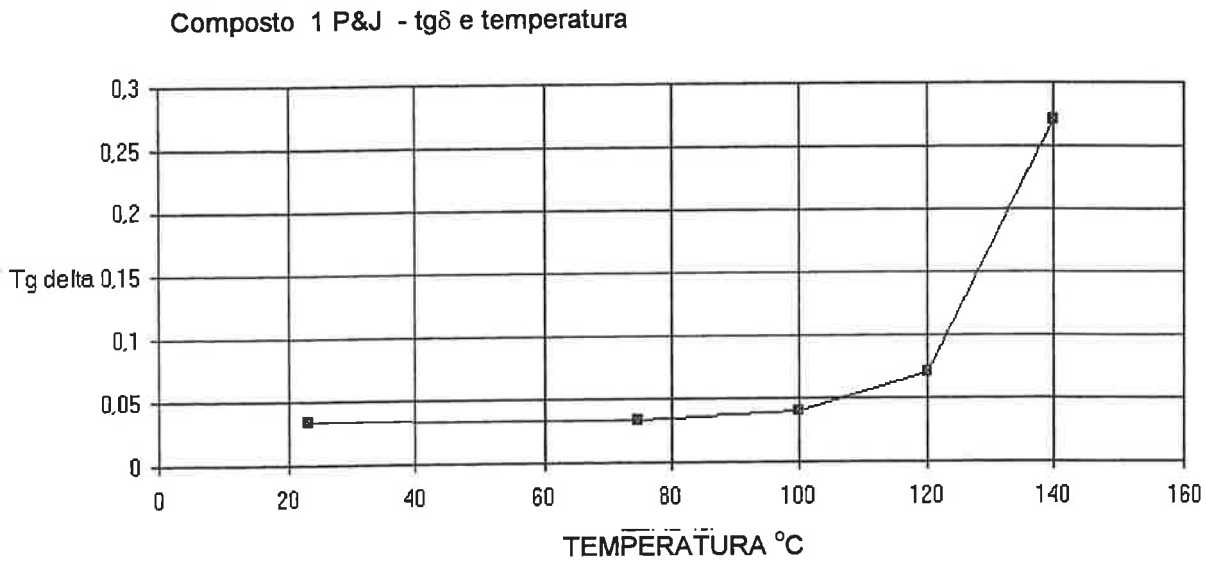


Fig. 12.4.29 - Composto 1 P&J - Efeito da temperatura sobre tg δ (eq.11.6)(t = 12.5N/mm2) (f= 1 Hz)

(Obs.: Acima de 120°C, o composto torna-se acentuadamente histerético.)

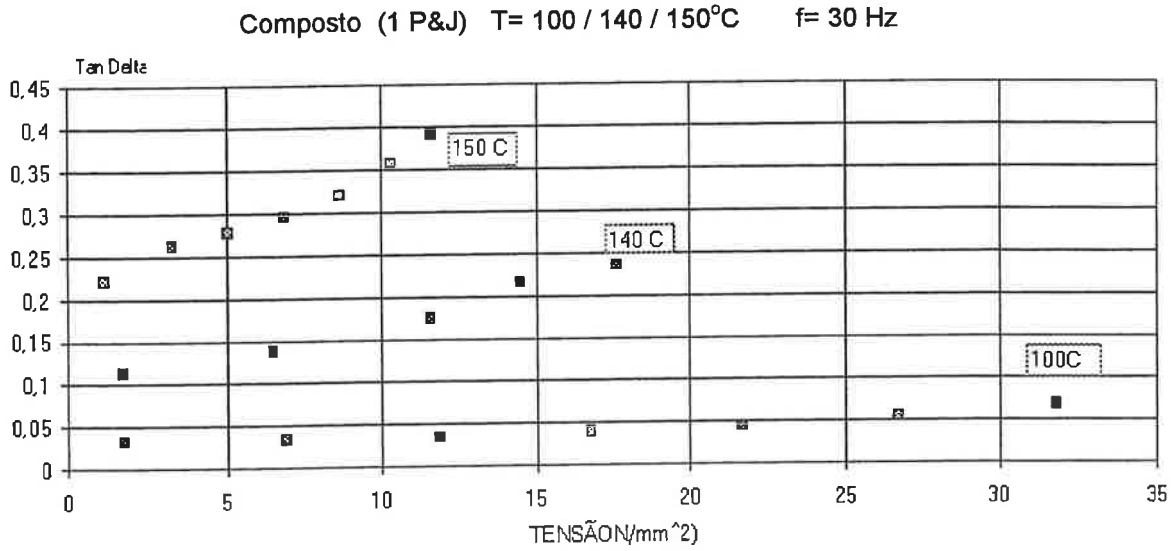


Fig.12.4.30 - Composto 1 P&J - Efeito da tensão e da temperatura sobre o valor de tg δ.

Composto (1 P&J) t= 8.2 N/mm^2 (Wd= Eq 11.8) (Wfh= Eq. 11.9)

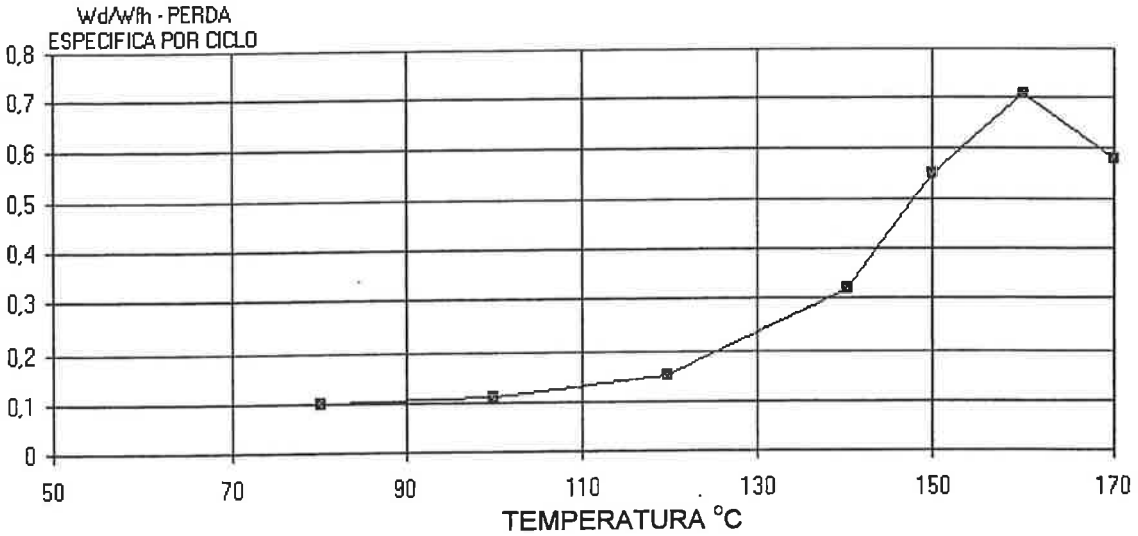


Fig. 12.4.31 - Efeito da temperatura sobre a perda histerética específica.

Obs.: 1- Ver as figuras 5.2 e 5.3, relativas à transição Tg.
2- Ver figura 12.4.29 , relativa a tg δ .

Composto (1 P&J) f= 30 Hz - Efeito da temperatura sobre tg δ e transmissibilidade (t_r)
(t= 12 N/mm^2)

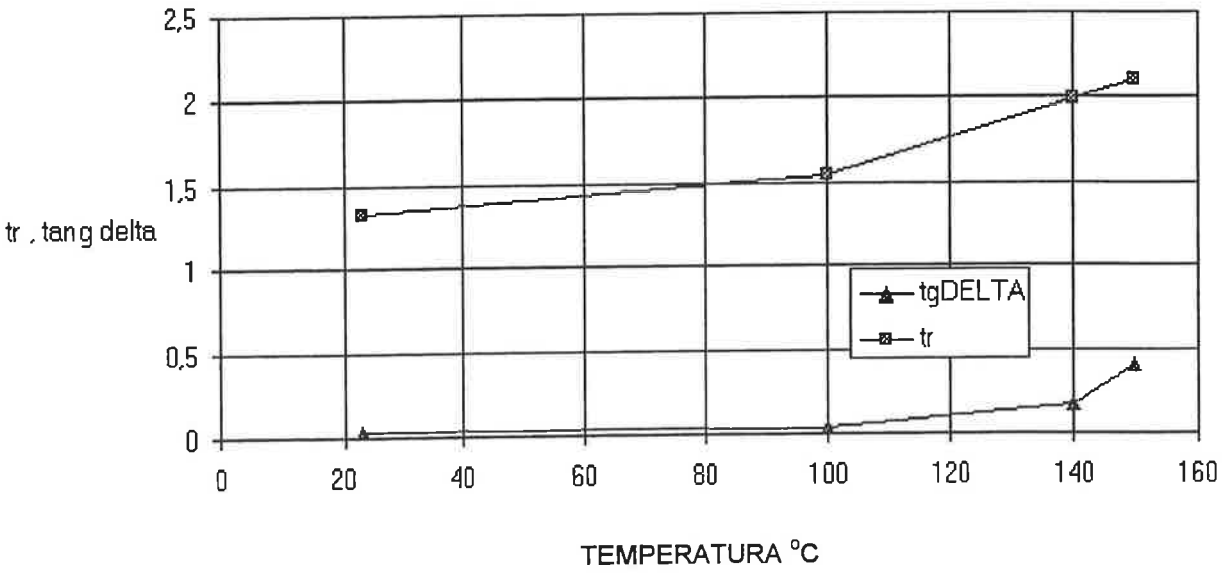


Fig. 12.4.32 - Composto 1P&J - Efeito da temperatura sobre tg δ e a transmissibilidade - tr (eq. 11.14).

12.5 Coeficiente de Poisson

Para compostos elastoméricos, o coeficiente de Poisson, normalmente, é tomado como sendo igual a 0,499 [12.5.1] [12.5.2] [12.5.4] pois trata-se de material incompressível. No entanto, para resina tipo epoxídica, de maior dureza, Rodal [12.5.3] adota o valor de 0,35.

Para compostos elastoméricos de elevada dureza (1 P&J), torna-se necessário determinar este coeficiente, integrante do modelo matemático de FEM.

Um corpo-de-prova de 15x12x50*mm*, como ilustra esquematicamente a figura 12.5.1, foi devidamente instrumentado com extensômetros (*strain gages*) nas direções axial e transversal e submetido ao ensaio de compressão na MTS (T=23 C, f=0,01 Hz), tomando-se as medidas das forças e deformações axial (MTS e extensômetro) e transversal (extensômetro) .

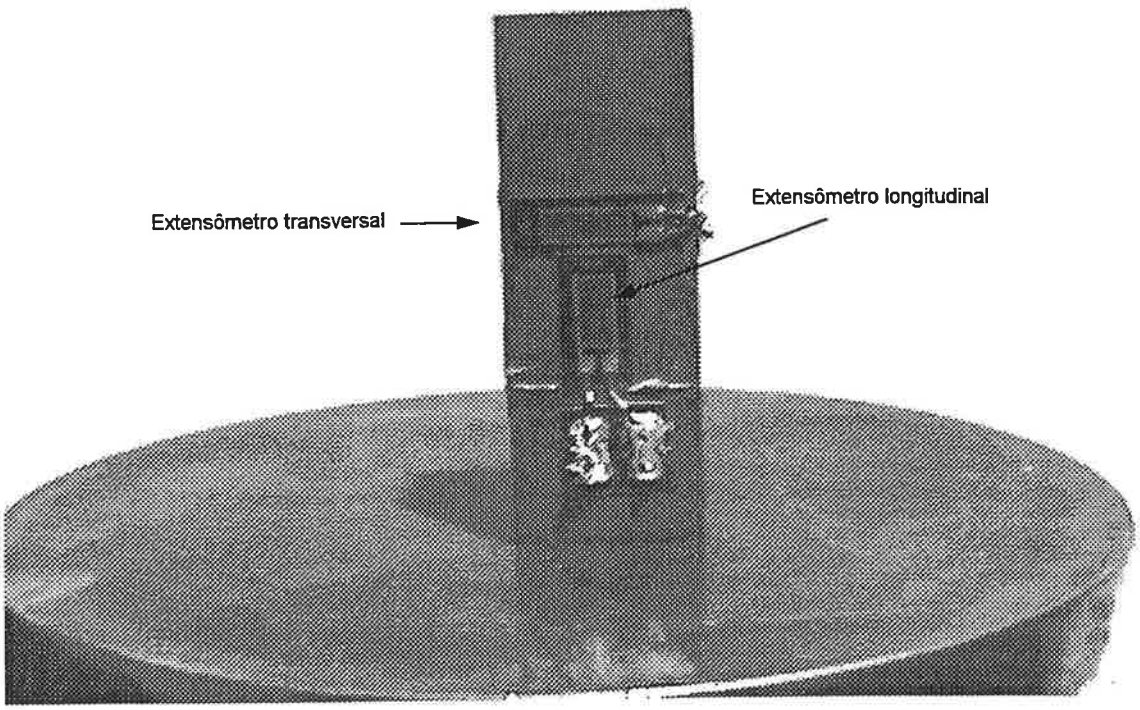


Fig. 12.5.1 - Corpo-de-prova empregado para a determinação do coeficiente de Poisson para composto elastomérico com 1 P&J (12 x 15 x 50*mm*).

As deformações axial e transversal, obtidas através do emprego dos extensômetros, são dadas na figura 12.5.2

Composto (1 P&J) - deformações e força T= 23°C f = 0,01Hz.

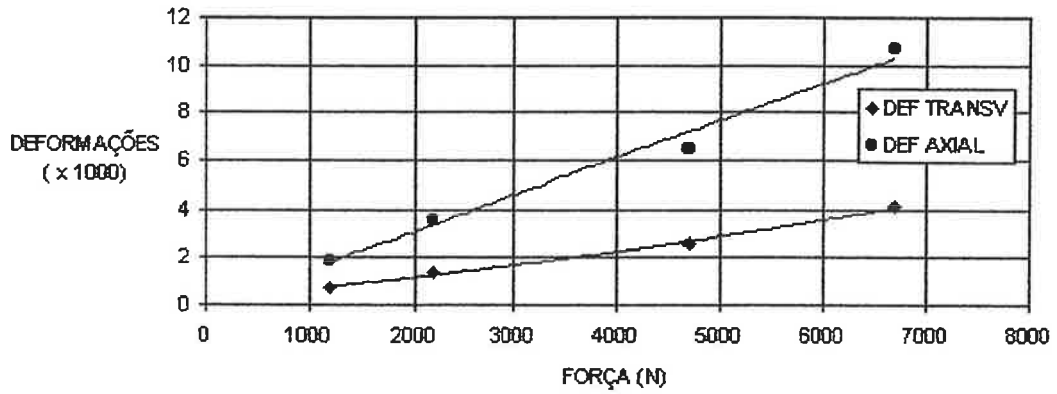


Fig. 12.5.2 - Deformações axial e transversal - ensaio "coeficiente. de Poisson"

Da relação das deformações transversal e axial, obtém - se o coeficiente de Poisson, como ilustra a figura 12.5.3.

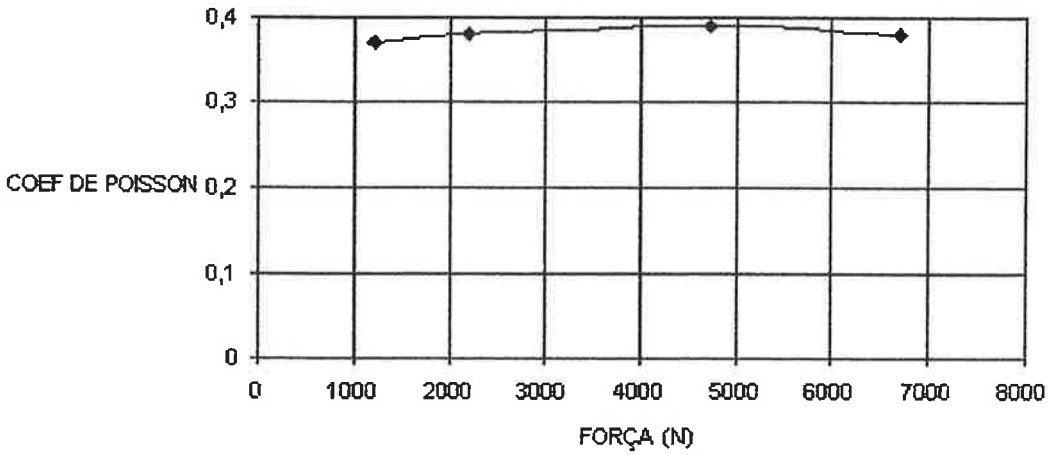


Fig. 12.5.3 - Composto 1 P&J - coeficiente de Poisson T =23 ° C e f = 0,01Hz.

Assim, particularmente para compostos elastoméricos de elevada dureza, o coeficiente de Poisson a ser empregado no modelo de FEM é de 0,38, de acordo com as observações de Rodal.[12.5.3]

Empregando este valor no modelo FEM do corpo-de-prova acima, obtém-se os resultados ilustrados na figura 12.5.4, confirmando esta observação.

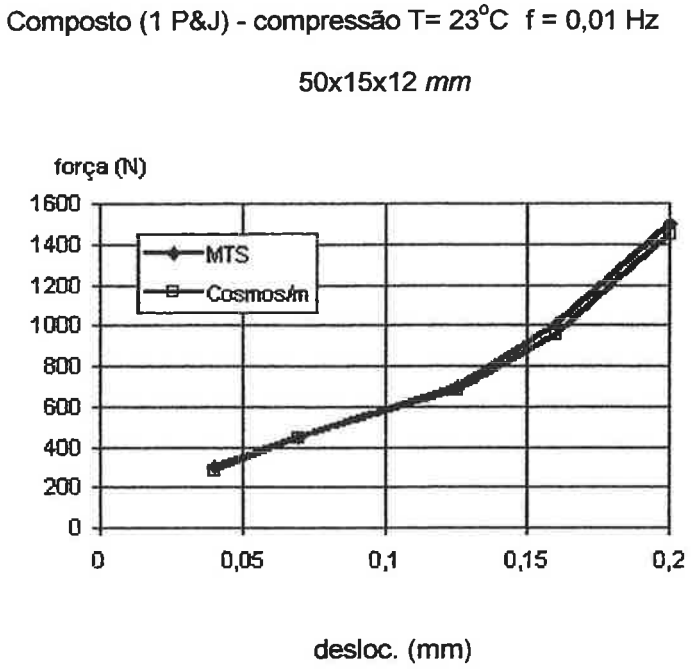


Fig. 12.5.4 - Composto 1 P&J- curvas força-deslocamento (axial) para f = 0,01 Hz

12.6 Ensaios de caracterização de revestimentos com furações

Como foi exposto no capítulo 2, no caso de prensas úmidas de máquinas de papel, a presença de uma "área aberta" no revestimento elastomérico visa auxiliar o desaguamento na região do *nip*. Esta área está associada a uma seqüência padronizada de furações, em termos de diâmetro, espaçamento e de profundidade, fazendo com que se tenha uma porcentagem de área (da ordem de 22% da área total de referência), dotada destas furações.[2.10]

Como conseqüência, a característica dinâmica do composto elastomérico é alterada e deve ser determinada, para efeito de se obter a curva característica tensão-deformação, necessária para o modelo FEM.

O emprego do corpo-de-prova cilíndrico discutido no capítulo 12.4 não comporta quaisquer furações, sendo, portanto, necessário adotar uma metodologia alternativa na determinação da curva tensão-deformação específica, como descrito a seguir.

Tomando-se blocos de 140x70x25*mm* do composto elastomérico, vulcanizado nas mesmas condições que as do revestimento final, efetua-se a comparação das curvas força x deformação nas condições do bloco sem furações e do bloco com furações (dotado das mesmas furações como as do cilindro revestido).

Para efeito de identificação dos ensaios, estes foram denominados - "*flat*".

Com o modelo FEM do *"flat"* e, dotado da curva tensão-deformação do composto (veja capítulo 12.4), procuramos estabelecer a validação do modelo

matemático contra os resultados do ensaio do *"flat"* - sem furações , realizado em compressão (na MTS), em termos de forças e de pressões máximas.

. Em seguida, com base nos resultados experimentais (na MTS) da curva força-deformação para o material do bloco elastomérico com furações , determina-se, por "*regressão*", a curva característica tensão-deformação do composto dotado de furações", como detalhado mais adiante, para uma dureza, no presente caso, de 12 P&J.

. O sistema de ensaio é apresentado esquematicamente na figura 12.6.1.

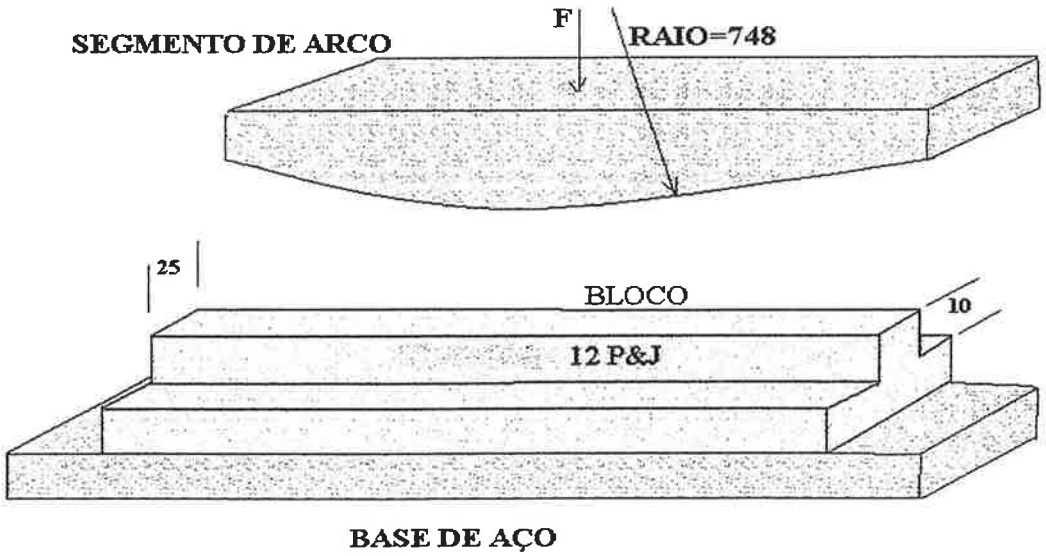


Fig. 12.6.1 - *"Flat"* para ensaios sem e com "furo cego".(R=748*mm*)

Em maior detalhe, podemos observar o sistema de ensaio na figura 12.6.2.

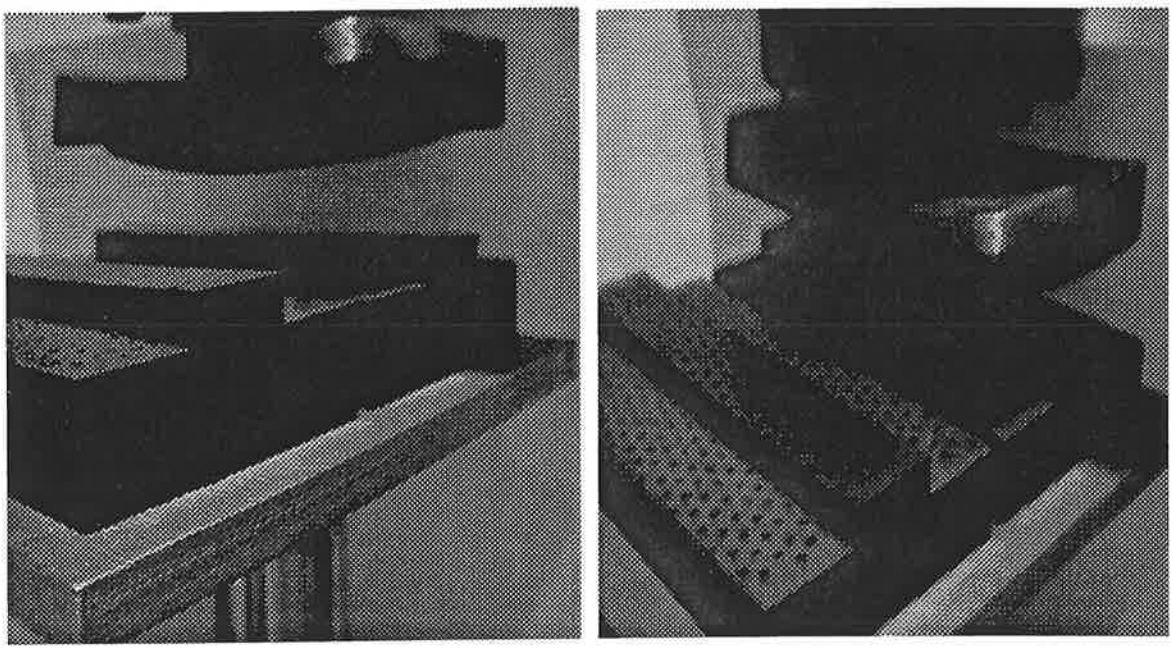


Fig. 12.6.2 - Detalhe do ensaio *"flat"* para revestimentos com "furo cego".

As pressões na região do *nip* são medidas com emprego do sistema ""FUJI Film" como descrito na figura 2.10 e ilustradas na figura 12.6.3.

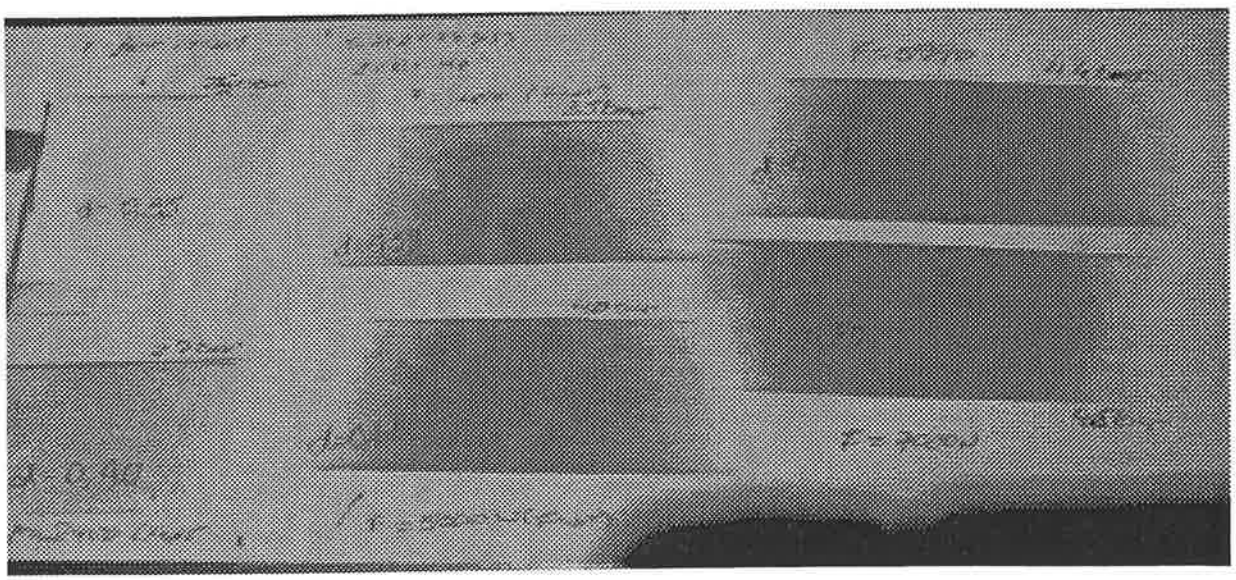


Fig. 12.6.3 - Impressões de *"nip"*, com emprego do "FUJI Film".

As curvas experimentais força-deslocamento no ensaio *"flat"* do composto com 12P&J a 23°C e f= 0.1 Hz, são ilustradas na figura 12.6.4.

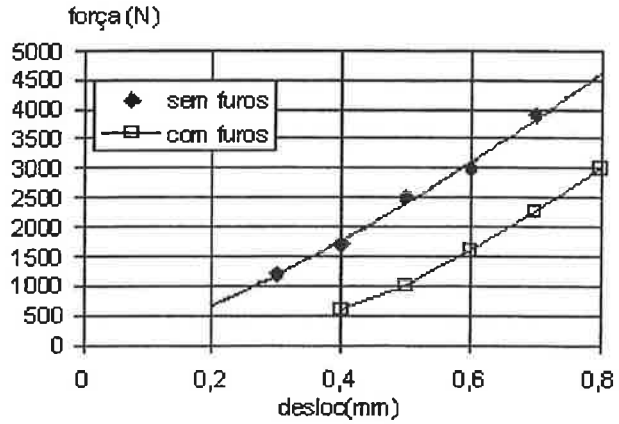


Fig. 12.6.4 - Ensaio *"flat"* (12 P&J) na MTS com T= 23°C , f = 0,1 Hz

Na forma de FEM-Cosmos/m, o modelo correspondente do sistema *"flat"* , encontra-se apresentado na figura 12.6.5.

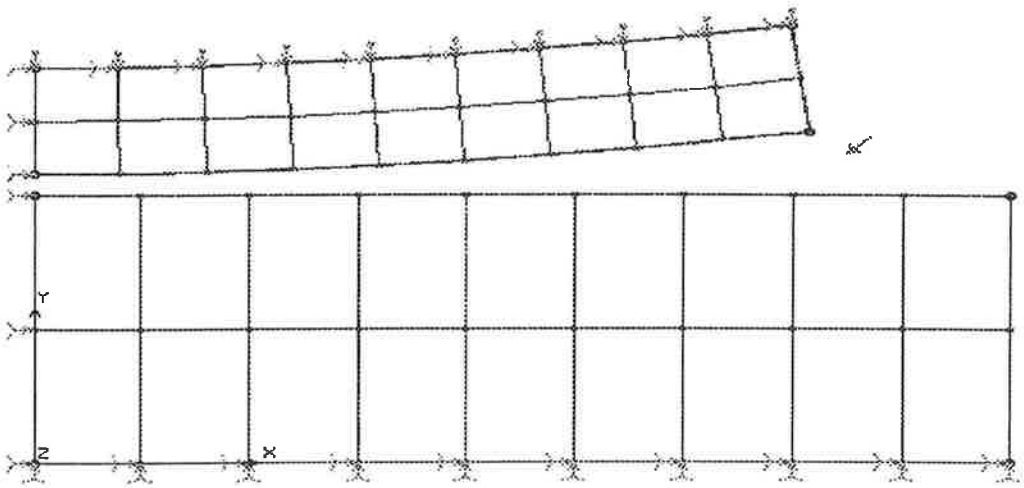


Fig. 12.6.5 - Modelo em elementos finitos do sistema *"flat"*.

O código correspondente é o seguinte:

```
C*, "flat 12"
VIEW,0,0,1,0,
PT,1, 0.00, 0.00,0,
PT,2, 0.00,25.00,0,
```

```
PT,3,70.00,25.00,0,
PT,4,70.00, 0.00,0,
PT,5, 0.00, 0.00,0,
PT,6, 0.00,27.00,0,
PT,7, 0.00,37.00,0,
PT,8,43.16,29.40,0,
PT,9,42.05,39.33,0,
PT,10, 0.00,417.00,0,
CRLINE,1,1,4,,
CRLINE,2,2,3,,
CRARC,3,7,9,10,380.00,0,
CRARC,4,6,8,10,390.00,0,
CRLINE,5,1,2,
CRLINE,6,4,3,
CRLINE,7,6,7,
CRLINE,8,8,9,
EGROUP,1,PLANE2D,0,2,0,0,4,2,0,
MPCTYPE,1,1,,
MPC,1,,,-8.0E-02,-1.12E+00,-7.0E-02,-1.0E+00,-6.0E-02,-8.26E-01,-5.0E-02,-6.83E-01,-4.0E-02,-5.71E-01,,
MPC,1,,6,-2.0E-02,-2.65E-01, 0.00E+00, 0.00E+00, 2.0E-02, 2.65E-01, 4.0E-02, 5.71E-01, 5.0E-02, 6.83E-01,,
MPC,1,,11, 6.0E-02, 8.26E-01, 7.0E-02, 1.0E+00, 8.0E-02, 1.12E+00,,
SF4CR,1,1,6,2,5,
RCONST,1,1,1,2,25.00,0,
M_SF,1,1,1,4,9,2,1,1,
EGROUP,2,PLANE2D,0,3,0,0,0,2,0,
MPROP,2,EX,21000,NUXY,.33,,
SF4CR,2,3,7,4,8,
M_SF,2,2,1,4,9,2,1,1,
NMERGE,1,200,1,.1,1,1,0,
NCOMPRESS,1,200,1,
EGROUP,3,GAP,1,0,0,1,2,0,0,
TIMES,0,1,.1,
CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,1,
DCR,5,UX,0,5,1,
DCR,7,UX,0,7,1,,
DCR,1,UX,0,3,2,,
DCR,3,UY,-2.60,3,1,,
DCR,1,UY,,1,1,,
NL_GSAUTO,0,2,0,4,4,1,1,
NL_CONTROL,0,1,
NL_PRINT,4,,,,
NL_PLOT,1,100,1,0,
A_NONLINEAR,S,1,1,20,.1,0,N,0,0,1e+010,.1,.1,0
NL_AUTOSTEP,1,1e-008,1,
R_NONLINEAR
```

As curvas tensão-deformação para o material sem furações, determinadas anteriormente (através dos corpos-de-prova), bem como a curva para o material "com furação" (esta última obtida por emprego do FEM para ajustamento com os dados experimentais da curva força-deslocamento), são apresentadas nas figuras 12.6.6 e 12.6.7.

Efeito da "furação " na curva tensão-deformação do composto 12 P&J

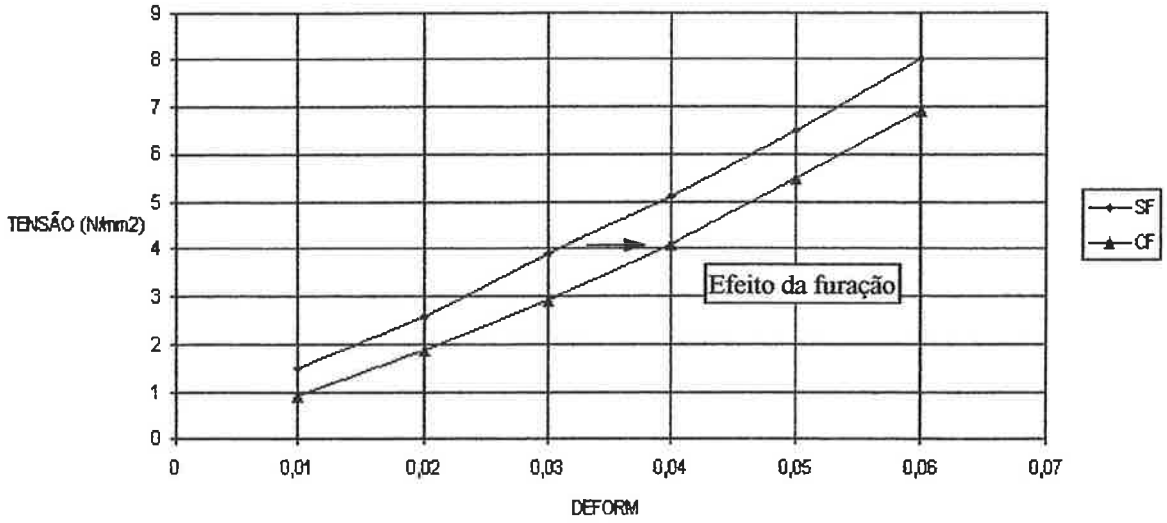


Fig. 12.6.6 - Relação tensão-deformação para as condições sem e com furações ("flat"12 P&J), 23°C f=0,1Hz

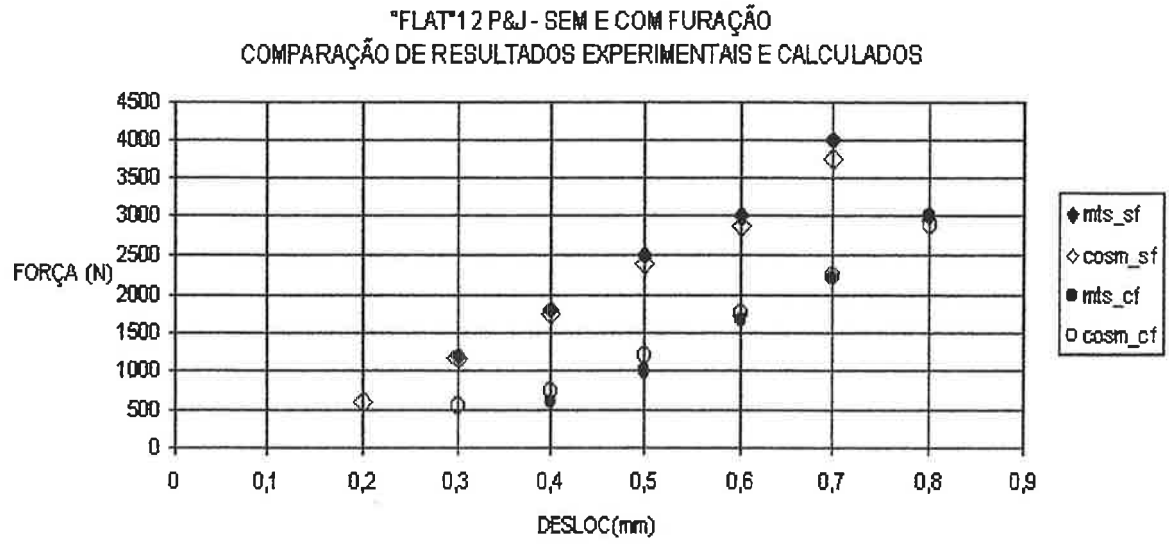


Fig. 12.6.7- Ensaio *"flat"* - sem e com furações
Comparação de resultados experimentais e calculados, com apoio da figura 12.6.6.

Através do "FUJI Film", pode-se corroborar os resultados, analisando os valores relativos à pressão máxima, como ilustra a figura 12.6.8.

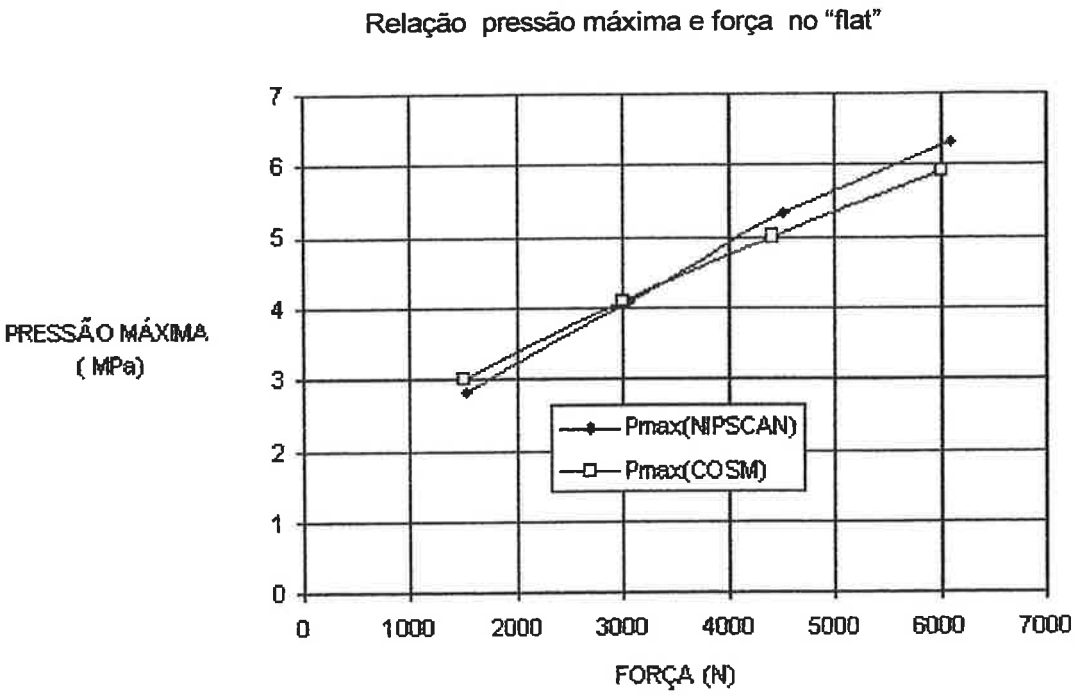


Fig. 12.6.8 - Ensaio *"flat"*- (12P&J) T =23°C f=0,1 Hz

Comparação de resultados experimentais e calculados (com furação)

A metodologia apresentada valida, portanto, a curva tensão-deformação "com furações", relativa ao composto com 12 P&J .

12.7 Avaliação do *"Nip"* de uma prensa úmida - Modelo matemático e sua validação

Analisa-se, a seguir, os diferentes aspectos relativos à avaliação do *nip*, coroamento, tensões e pressões que ocorrem em uma prensa úmida, com auxílio do FEM e da caracterização dinâmica do composto que reveste o cilindro metálico, no caso de uma prensa envolvendo um carregamento linear considerado "elevado", típico de uma prensa tipo "jumbo" (como visto na figura 2.5).

Os dados básicos desta prensa são :

- diâmetro externo com revestimento = 1513*mm*
- diâmetro externo do cilindro metálico = 1461*mm*
- diâmetro interno do cilindro metálico = 1300*mm*
- comprimento da mesa = 2960*mm*
- largura do papel = 2600*mm*
- distância entre mancais = 3600*mm*
- diâmetro do pescoço = 300*mm*
- carga linear = 360*kN/m*
- velocidade periférica = 300*mpm*
- revestimento: espessura = 26*mm* dureza objetivada = 12 P&J
- tipo: furo cego: 22% área aberta (furos 2.8*mm* com 9 e 12*mm* prof.)
- gramatura do papel= 215 g/m^2.

Objetiva-se, através do modelo, determinar :

- largura do *nip.*
- pressões ao longo do *nip*, pressão máxima e o impulso.
- tensões em diferentes pontos ao longo da espessura do revestimento.
- deflexão elástica do cilindro metálico.
- coroamento a ser dado no revestimento elastomérico.
- uniformidade das pressões ao longo da largura do cilindro, devido ao coroamento.

A análise deste problema deve ser dividida em quatro etapas, a saber:

1- análise do *nip*;

2- análise das deformações elásticas do rolo metálico;

3- análise do coroamento do rolo revestido;

4- validação dos resultados.

O resultado desta análise deve ser comparado com os dados obtidos por medidas "em campo", para efeito de validação do modelo analisado, como será apresentado a seguir:

ETAPA 1: *ANÁLISE DO NIP* (NA DIREÇÃO DA MÁQUINA- M.D.)

A figura 12.7.1 ilustra o esquema do cilindro revestido a ser analisado para as condições acima mencionadas.

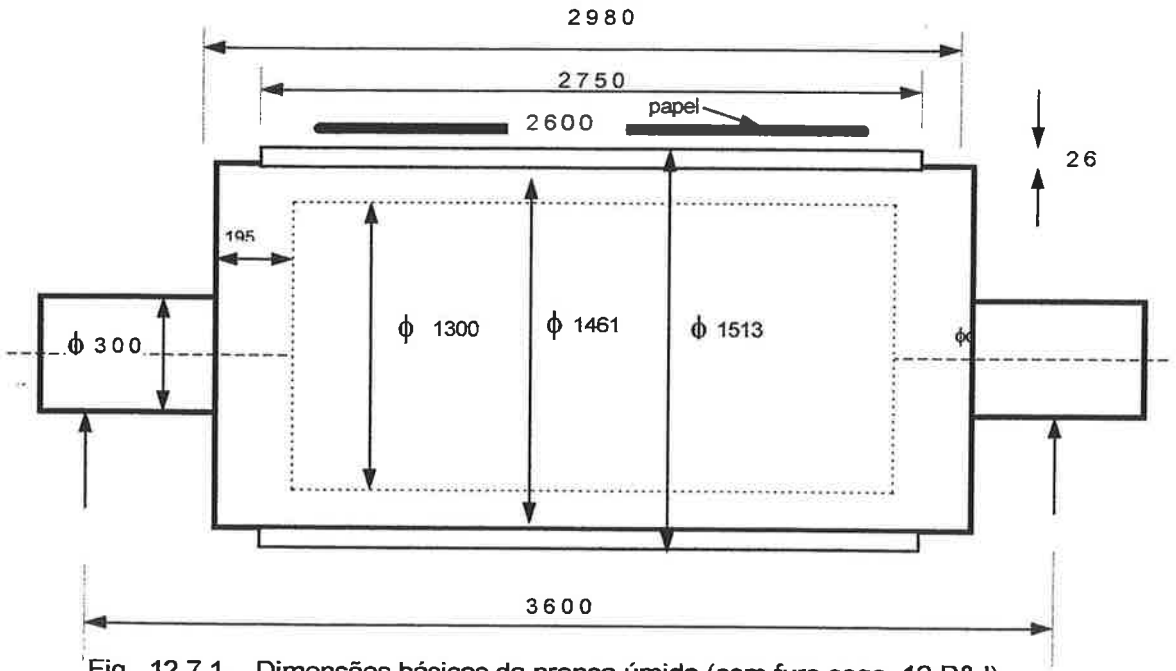


Fig. 12.7.1 - Dimensões básicas da prensa úmida (com furo cego 12 P&J).

As informações relativas ao revestimento, quanto a curva tensão-deformação, corrigida devido à presença das furações (furo cego), são tomadas dos ensaios dinâmicos efetuados de acordo com o que já foi apresentado na figura 12.6.6.

Dada a simetria no arco de contato, o modelo pode restringir-se a ½ *nip*, como apresentado no esquema da figura 12.7.2.

```
NCOMPRESS,1,200,
EGROUP,2,GAP,1,0,0,1,2,0,0,
TIMES,0,1,.1,
CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,1,
C* DESLOCAMENTOS E CARGAS
DCR,5,UX,0,5,1,,
DCR,7,UX,0,7,1,,
DCR,1,UX,0,3,2,,
DCR,3,UY,-2.19,3,1,,
DCR,1,UY,2.19,1,1,,
NL_GSAUTO,0,2,0,4,4,1,1,
NL_CONTROL,0,1,
NL_PRINT,4,0,0,0,0,0,
NL_PLOT,1,100,1,0,
A_NONLINEAR,S,1,1,20,.1,0,N,0,0,1E+010,.1,.1,0,
NL_AUTOSTEP,1,1E-008,1,
C* R_NONLINEAR,
C* OBS: TENSÕES EM Kgf/ mm2
```

Como resultado deste modelo relativo ao *nip*, pode-se observar, inicialmente, a figura 12.7.3, relativa à distribuição das tensões (sy) radiais no *nip* (deformado).

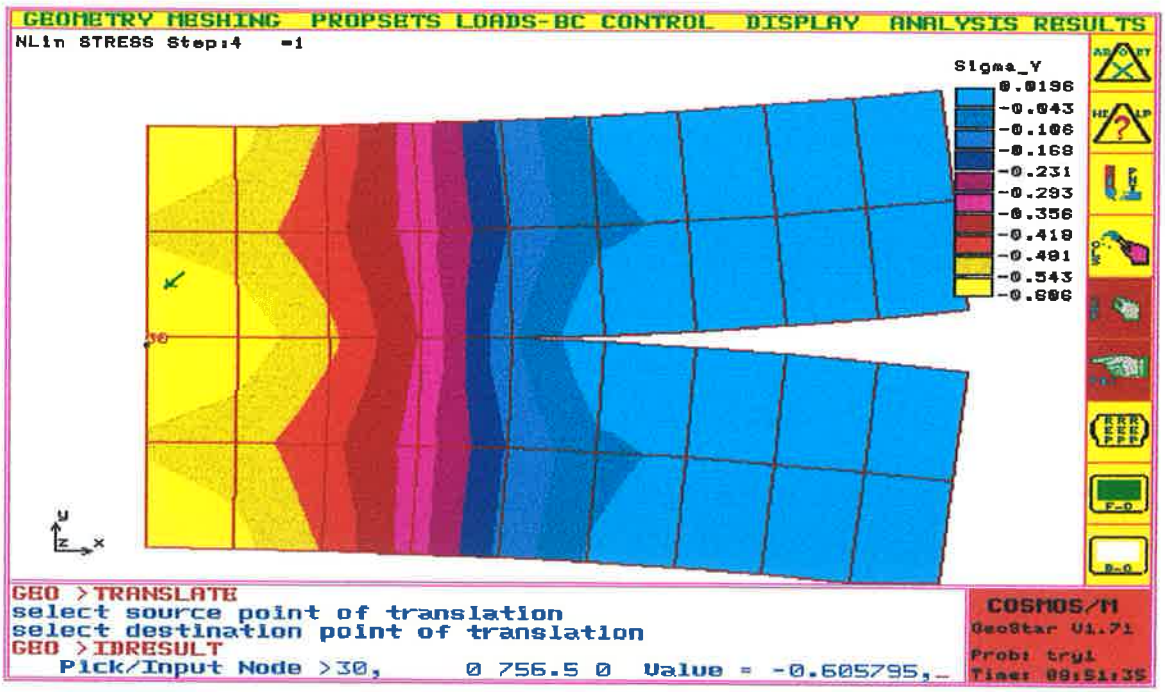


Fig. 12. 7. 3 - Tensões radiais para C= 360 kN/m.

Em maior detalhe, a figura 12.7.4, apresenta a mesma distribuição, porém, com a "curva de pressão", característica.

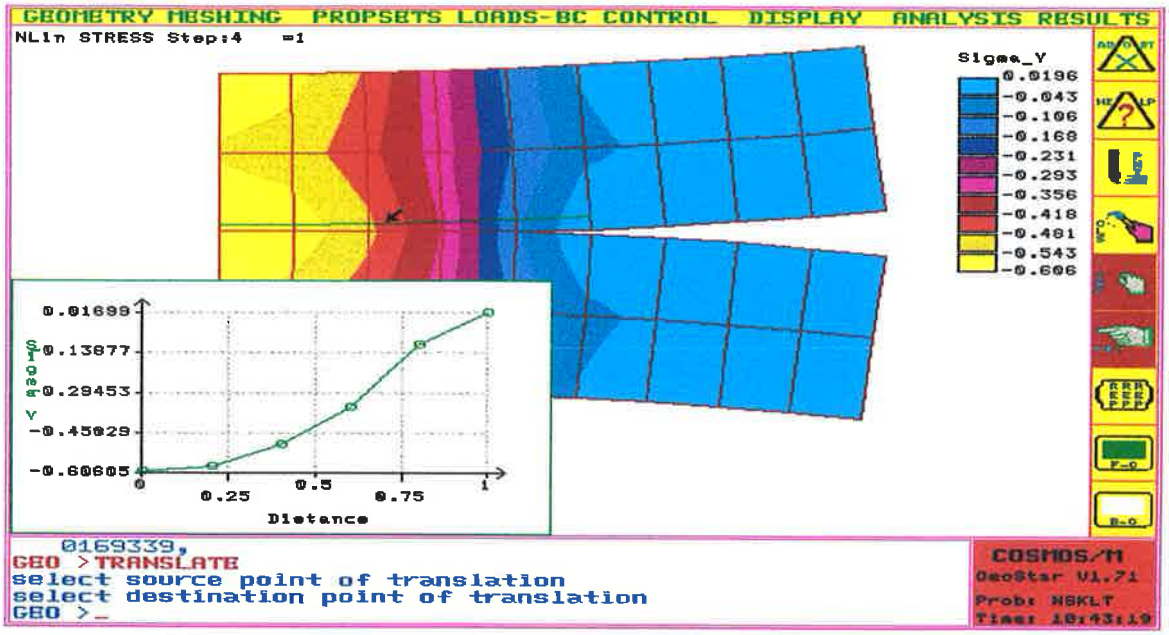


Fig. 12.7.4 - Curva de pressão no *nip* para C= 360 KN/m .

Na figura 12.7.5, apresenta-se a distribuição das tensões de cizalhamento . (tau_ xy), no caso, junto à base do revestimento (de interesse na análise de tensões, na interface composto elastomérico / metal).

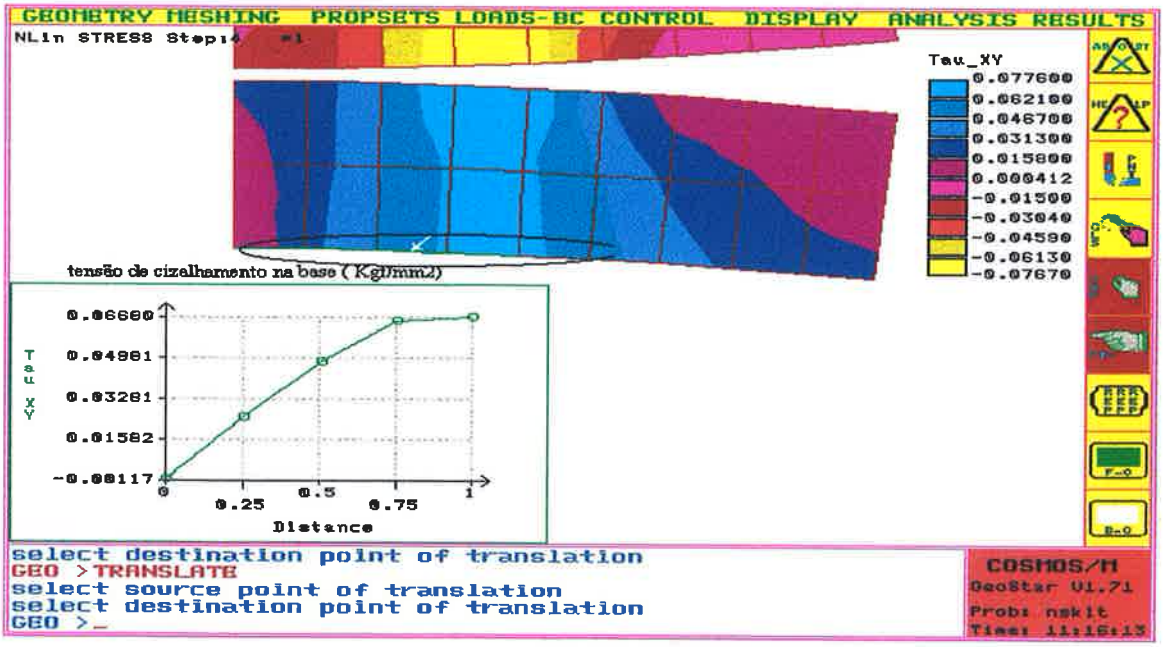


Fig. 12. 7. 5 - Tensões de cizalhamento na base do revestimento.

A figura 12.7.6 apresenta a distribuição das tensões radiais e de cizalhamento, em ½ *nip*, em maior detalhe. Observa-se, no caso, uma tensão radial máxima de 5, 93 MPa e uma tensão de cizalhamento máxima na superfície de 1 MPa e de 0,6 MPa junto à base do revestimento.

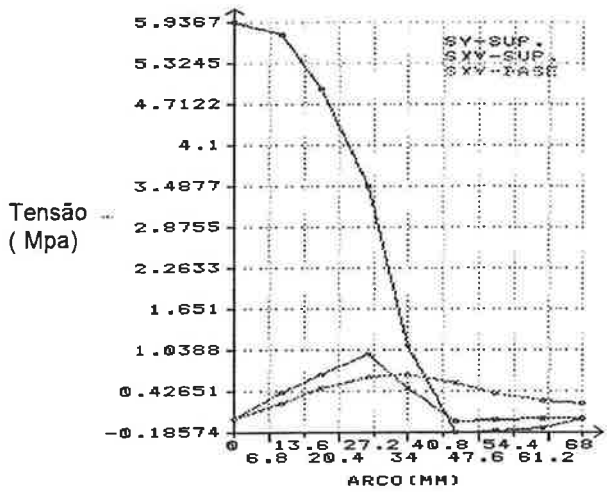


Fig. 12. 7.6 - Tensões: radial de compressão e de cizalhamento na superfície e na base do revestimento.

O programa fornece, também, os dados relativos à força atuante, como ilustrado na figura 12.7.7, confirmando que os resultados acima obtidos são relativos à carga linear objetivada de C= 360 kN/m . Em maior detalhe, a figura 12. 7.8, apresenta a distribuição das pressões ao longo do *nip* de 85 *mm* .

```
G A P    F O R C E S    A T    S T E P      4

GROUP NO. =     1
 Gap     Surface                    Normal Force
 No.      No.                 magnitude          direction

  42       4,  5              0.11404E+04 ( 0.0153,-0.9999, 0.0000)
  43       3,  4              0.33771E+04 ( 0.0004,-1.0000, 0.0000)
  44       2,  3              0.47140E+04 ( 0.0006,-1.0000, 0.0000)
  45       1,  2              0.55018E+04 ( 0.0008,-1.0000, 0.0000)
```

F/2= 1140+3377+4714+5501=14732N logo F = 29464N C= 29464 / 85= 345 N/mm

Fig. 12.7.7 - Forças reativas no "gap" do modelo.

Pressao para Nip de 85.00 mm

Nip(mm)	Pressao(Bar.)	Nip(mm)	Pressao(Bar.)
-42.50	0.000	42.50	0.000
-38.25	11.798	38.25	11.798
-34.00	22.355	34.00	22.355
-29.75	31.670	29.75	31.670
-25.50	39.742	25.50	39.742
-21.25	46.573	21.25	46.573
-17.00	52.162	17.00	52.162
-12.75	56.508	12.75	56.508
-8.50	59.613	8.50	59.613
-4.25	61.476	4.25	61.476
-0.00	62.097	0.00	62.097

Carga Total= 344.85 kN/m

Fig. 12. 7. 8 - Tabela de saída (com maiores detalhes) da pressão ao longo do *nip*.

ETAPA 2: ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES ELÁSTICAS NO CILINDRO METÁLICO
(NA DIREÇÃO TRANSVERSAL DA MÁQUINA - C.D.)

Nesta etapa, é necessário efetuarmos uma subdivisão, pois a deformação elástica (total) do cilindro metálico, compreende dois aspectos, a saber:

Etapa 2.1 - Análise da deformação elástica do cilindro "como viga".

Etapa 2.2 - Análise da deformação elástica do cilindro " por ovalização".

A figura 12.7.9 resume estes aspectos, bem como estabelece que, para efeito da determinação do "coroamento" final, é necessário estabelecermos as contribuições de cada parte, isto é, "como viga" e "por ovalização".

$\delta_{final} = \delta_{ovalização} + \delta_{viga}$

$\delta_{coroamento} = 2 \cdot \delta_{final}$

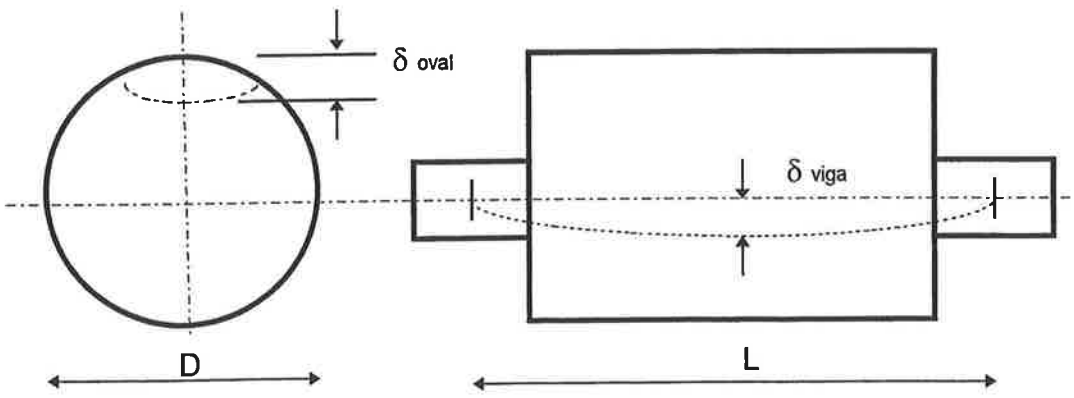


Fig. 12. 7. 9 - Deformação elástica do cilindro metálico.

O coroamento é o valor a ser dado no revestimento elastomérico , visando compensar a deflexão elástica do cilindro metálico.

Analisemos cada um destes aspectos :

Etapa 2.1 - Deformação elástica "como viga".

A figura 12.7.10 ilustra o esquema básico a ser aplicado na determinação da deflexão de ½ cilindro metálico, tido como "viga".

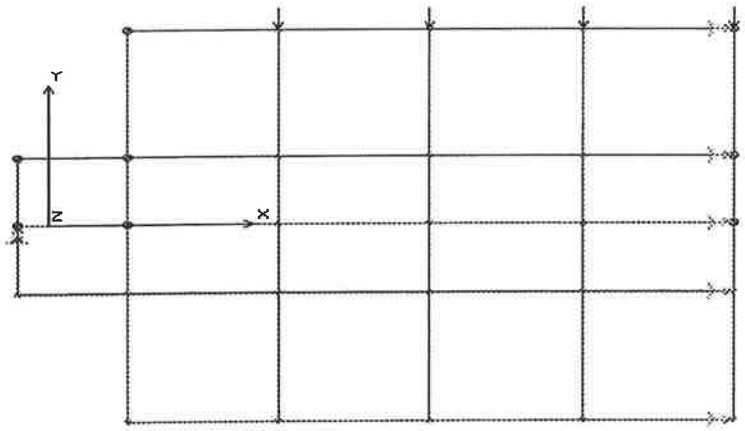


Fig. 12.7.10 - Esquema básico para o modelo FEM - deflexão elástica "viga".

O código Cosmos/m correspondente é dado abaixo:

```
C* Problem : DEFLEXÃO ELASTICA DO CILINDRO COMO "VIGA"
C*
C* GERAÇÃO DE PONTOS E SUPERFICIES
PT,1,-85,0,0,
PT,2,-85,250,0,
PT,3,225,250,0,
PT,4,225,0,0,
VIEW,0,0,1,0,
SCALE,.8,
SCALE,.5,
PT,5,225,726,0,
PTGEN,1,3,5,1,0,1715,0,0,
SCALE,.8,
SF4PT,1,1,4,3,2,0,
SF4PT,2,4,7,6,3,0,
SF4PT,3,3,6,8,5,0,
C* PROPRIEDADES FISICAS
EGROUP,1,PLANE2D,0,2,0,0,0,0,0,
MPROP,1,EX,210000,NUXY,.33,
RCONST,1,1,1,2,300,0,
SCALE,.8,
M_SF,1,1,1,4,1,1,1,1,
RCONST,1,2,1,2,300,0,
M_SF,2,3,1,4,4,1,1,1,
ELSYM,2,9,1,Y,1,0,
ACTSET,RC,1,
ELSYM,1,1,1,Y,1,0,
NMERGE,1,48,1,.1,0,0,0,
NCOMPRESS,1,48,
```

```
C* DESLOCAMENTOS E FORÇAS
DND,1,UY,0,1,1,,
DND,8,UX,0,12,4,,
DND,17,UX,0,17,1,,
DND,22,UX,0,27,5,,
FND,14,FY,-78000,17,3,
FND,15,FY,-156000,16,1,
NMERGE,1,28,1,.1,0,0,0,
TIMES,0,1,.1,
CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,1,
A_STATIC,G,0,0,1e-006,1e+010,0,0,0,0,0,
ACEL,0,-2.4,0,
MPROP,1,DENS,7.83E-6,
C* FORÇA REATIVA
RFND,1,UY,1,1,,
C* R_STATIC,
```

Para estas condições, a figura 12.7.11 apresenta uma deflexão de 0, *10mm*.

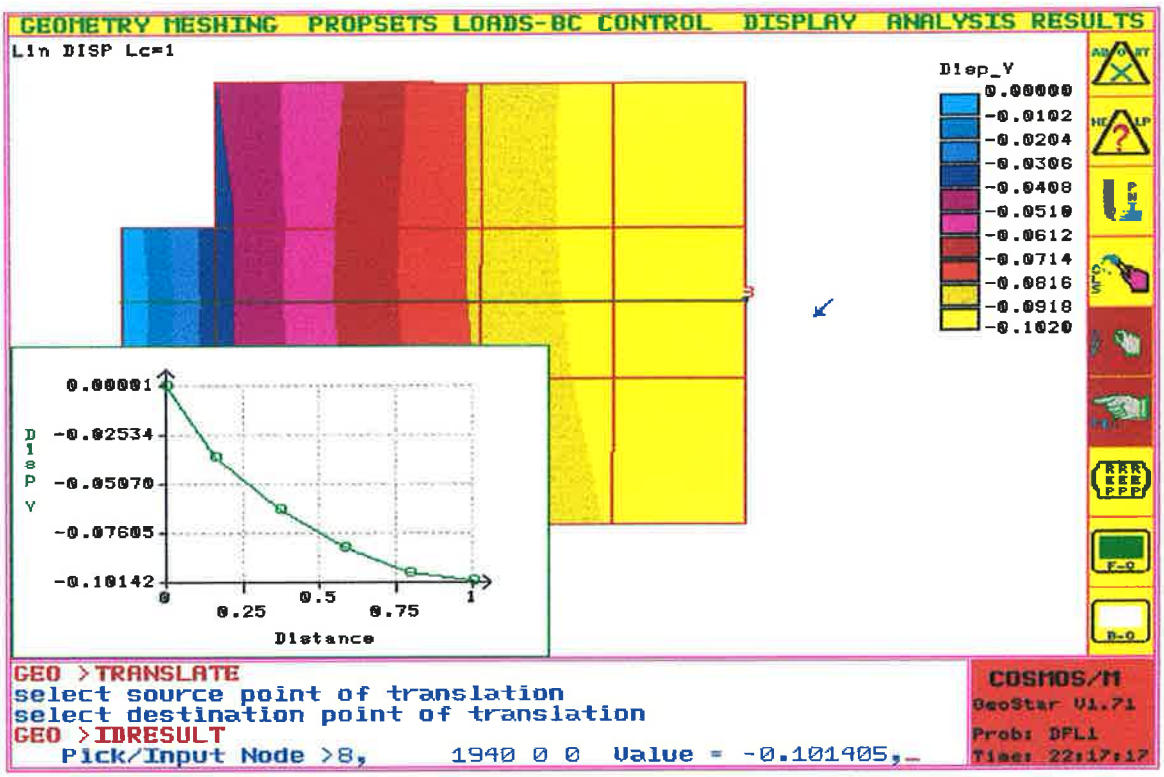


Fig. 12. 7.11- Deflexão elástica como "viga" para C= 360 kN/m

A figura 12.7.12 apresenta os resultados relativos às forças de reação no mancal (levando-se em conta o peso do cilindro metálico), confirmando que, para o modelo, está sendo aplicada a carga linear de 360 kN/m.

R E A C T I O N F O R C E S

NODE	CSYS	RFX	RFY	RFZ
1	0	------	0.4829E+06	------
TOTAL:		0.0000E+00	0.4829E+06	0.0000E+00

obs: 482900 x 2 / 2600 = 370 kN/m

Fig. 12. 7.12 - Forças reativas e carga linear para deflexão como "viga".

ETAPA 2.2 : DEFORMAÇÃO ELÁSTICA POR "OVALIZAÇÃO".

Tomando a seção transversal do cilindro metálico, na sua posição média no corpo (½ comprimento), por simetria de carregamento, tem-se o modelo apresentado na figura 12.7.13.

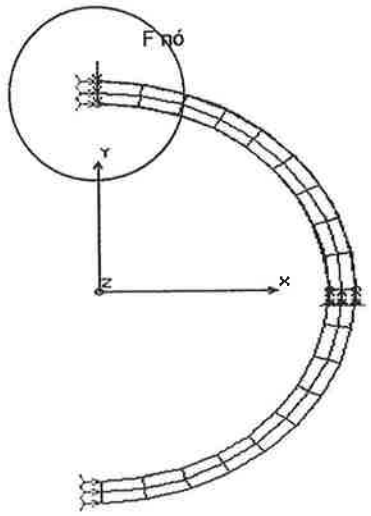


Fig. 12.7.13 - Modelo do cilindro metálico para efeito da avaliação da "ovalização"- deformação planar . DE= 1461*mm* DI= 1300*mm* C= 360 N/*mm* (no modelo F nó= 60 N)

O código Cosmos/m corespondente é apresentado abaixo (*plain strain*).

```
C* COSMOS/M     Geostar V1.71
C* Problem : anel "ovalização "
C* definição geométrica :
PT,1,0,0,0,
PT,2,0,650,0,
PT,3,0,726,0,
PT,4,726,0,0,
PT,5,650,0,0,
VIEW,0,0,1,0,
SCALE,.4,
```

```
CRARC,1,2,5,1,650,
CRARC,2,3,4,1,726,
CRLINE,3,3,2,
CRLINE,4,4,5,
C* propriedades físicas:
MPROP,1,EX,210000,NUXY,.33,
EGROUP,1,PLANE2D,0,2,2,0,0,0,0,
RCONST,1,1,1,2,1,0,
SF4CR,1,1,3,2,4,0,
M_SF,1,1,1,4,9,2,1,1,
ELSYM,1,18,1,Y,1,0,
NMERGE,1,60,1,2,0,0,0,
TIMES,0,1,.1,
C* deslocamentos :
DCR,3,UX,0,3,1,,
DCR,4,UY,0,4,1,,
DND,31,UX,0,34,3,,
DND,52,UX,0,52,1,,
SCALE,.8,
C* forças e reações:
RFCR,4,UY,4,1,,
A_STATIC,G,0,0,1E-006,1E+010,0,0,0,0,0,
MPROP,1,DENS,76.93E-6,
ACEL,0,-1.,0,
FCR,3,FY,-60,3,1,
C* R_STATIC,
```

A figura 12.7.14 apresenta, em escala ampliada (1000x), o aspecto da "ovalização" (semi), indicando a existência de um deslocamento δ ovalização = 0.32*mm* (região indicada por círculo na figura 12.7.13).

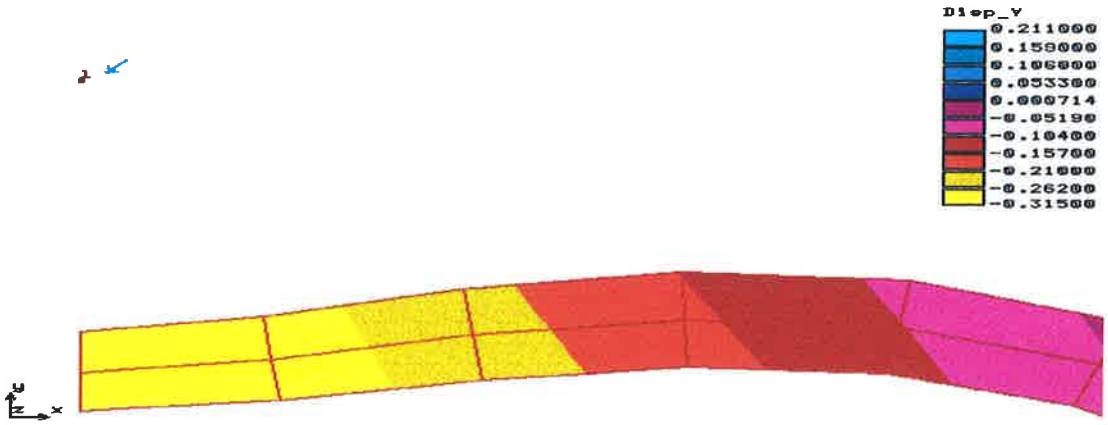


Fig. 12.7.14 - Anel, ilustrando a ovalização (escala 1000x).

A figura 12.7.15 confirma a carga linear aplicada.

R E A C T I O N F O R C E S

NODE	CSYS	RFX	RFY	RFZ
10	0	-----	-305.8	-----
20	0	-----	118.9	-----
30	0	-----	379.5	-----
TOTAL:		0.00000E+00	192.58	0.00000E+00

Fig. 12.7.15 - Força de reação para estudo de anel do cilindro em estado plano de deformação.

Observe-se da figura acima que F/2= 192.6 N/*mm*, logo F tot= 386 N/*mm* para δ oval = 0,32 *mm*.

Observa-se, portanto, que a deflexão elástica total é dada por

δ viga + δ ovalização = 0.10 + 0, 32 = 0,42*mm*

logo: coroamento = 0,84*mm*

ETAPA 3 - ANÁLISE DO COROAMENTO NO REVESTIMENTO (NA DIREÇÃO TRANSVERSAL DA MÁQUINA - C.D.)

Nesta etapa, objetiva-se analisar o efeito do coroamento, executado no revestimento elastomérico, visando "compensar" a deflexão elástica do cilindro metálico, de modo que, uma vez submetido à carga linear de trabalho, a pressão exercida pelo cilindro revestido seja a mais uniforme possível, ao longo de toda largura da folha de papel , bem como obter a correspondente uniformidade na largura de *nip*, por razões discutidas no capítulo 2, em particular da figura 2.19.

Para se elaborar um modelo - FEM - bidimensional, no estado plano de tensões, torna-se necessário recorrer à semelhança de rigidez existente entre um tubo (cilindro oco) e de uma viga "I ", para a qual o momento de inércia seja equivalente e que sofra uma deflexão idêntica àquela do tubo. A figura 12.7.16 ilustra, esquematicamente, o que foi exposto acima .

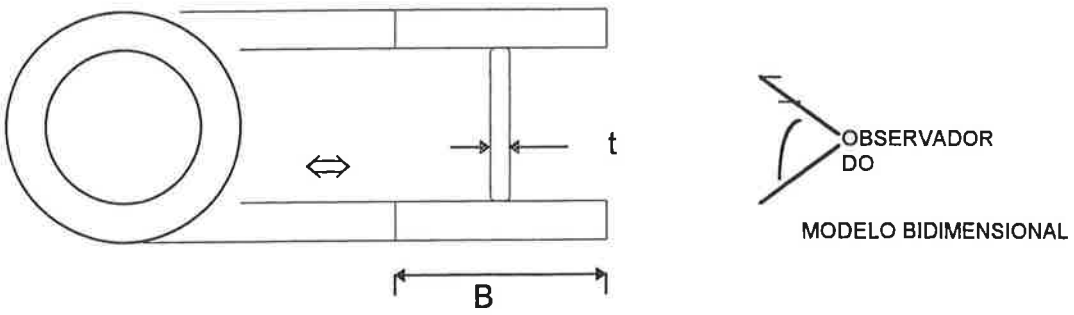


Fig.12.7.16 - Semelhança de rigidez : cilindro e viga "I"

Em termos de momento de inércia, tem-se:

1 - $\pi / 64 \ (DE^4 - DI^4) = B \ (DE^3 - DI^3) / 12$ logo $\underline{B = 1080mm}$

2 - NA "ALMA" DA VIGA : $F = K . \delta$ onde $F = 360\ N/mm \times 1300mm = 468\ kN$

logo $K = 1114285\ N/mm$ mas $A = K L / E$ onde $L = 1300mm$ $E = 210000 N/mm^2$

resulta que $A = 6897 mm^2$ donde $t = 6897 / 1300 = 5.3mm$, $\underline{t = \sim 6mm}$.

Assim, tem-se todos os dados básicos para o modelo bidimensional, ilustrado na figura 12.7.17.

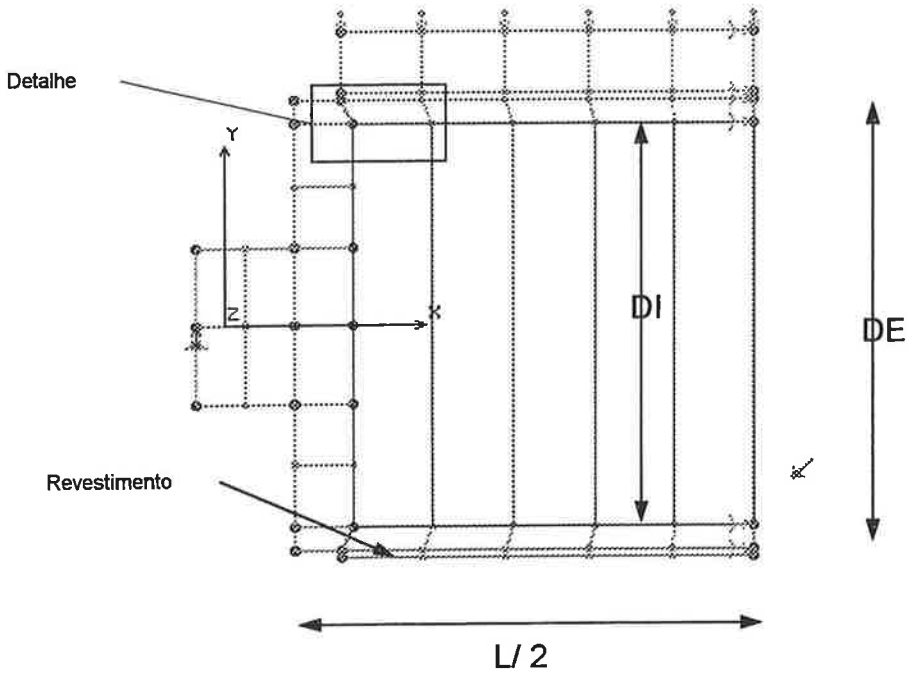


Fig. 12.7.17 - Esquema básico para FEM- coroamento.

O correspondente código FEM - Cosmos/m é dado a seguir:

```
C* COSMOS/M     Geostar V1.71
C* Problema : COROAMENTO
C*
C* PONTOS PRINCIPAIS DO DESENHO:
PT,1,-85,0,0,
PT,2,225,0,0,
PT,3,225,250,0,
PT,4,-85,250,0,
PT,5,415,0,0,
PT,6,415,250,0,
PT,7,225,650,0,
PT,8,415,650,0,
PT,9,225,726,0,
PT,10,375,726,0,
PT,11,1715,650,0,
PT,12,1715,726,0,
PT,13,1715,751,0,
PT,14,375,751,0,
PT,15,225,-250,0,
```

```
PT,16,-85,-250,0,
PT,17,415,-250,0,0,
PT,18,415,-650,0,0,
PT,19,225,-650,0,0,
PT,20,375,-726,0,0,
PT,21,225,-726,0,0,
PT,22,1715,-650,0,0,
PT,23,1715,-726,0,0,
PT,24,1715,-751,0,0,
PT,25,375,-751,0,0,
PT,26,1715,753,0,0,
PT,27,375,753,0,0,
PT,28,1715,951,0,0,
PT,29,375,951,0,0,
VIEW,0,0,1,0,
C* GERAÇÃO DE SUPERFÍCIES
SF4PT,1,1,2,3,4,0,
SF4PT,2,2,5,6,3,0,
SF4PT,3,3,6,8,7,0,
SF4PT,4,7,8,10,9,0,
SF4PT,5,2,1,16,15,0,
SF4PT,6,5,2,15,17,0,
SF4PT,7,17,15,19,18,0
SF4PT,8,18,19,21,20,0,
SF4PT,9,8,11,12,10,0,
SF4PT,10,10,12,13,14,0,
SF4PT,11,22,18,20,23,0,
SF4PT,12,23,20,25,24,0,
SF4PT,13,18,22,11,8,0,
SF4PT,14,27,26,28,29,0,
SFCOMPRESS,1,20,
C* GERAÇÃO DE MALHAS
M_SF,1,5,4,4,2,1,1,1,
M_SF,2,6,4,4,1,1,1,1,
M_SF,3,7,4,4,1,2,1,1,
M_SF,4,8,4,4,1,1,1,1,
M_SF,9,11,1,4,5,1,1,1,
M_SF,12,12,1,4,5,1,1,1,
M_SF,13,13,1,4,5,1,1,1,
M_SF,14,14,1,4,5,1,1,1,
C* CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES  METAL/REVESTIMENTO/GAP
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0,
MPROP,1,EX,210000,NUXY,.33,DENS,7.85E-6,
RCONST,1,1,1,2,300,0,
RCONST,2,2,1,2,84,0,
RCONST,1,3,1,2,1080,0,
RCONST,1,4,1,2,6,0,
EGROUP,2,PLANE2D,0,2,0,0,4,2,0,
TIMES,0,1,.1,
CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,1,
C* CURVA  DINÂMICA : TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO ELASTÔMERO/COM FUROS
MPCTYP,2,1,
MPC,2,0,1,-.06,-6.2,-.05,-5.1,-.04,-3.8,-.03,-2.8,-.02,-1.5,-0.01,-0.75&
,0,0,.01,.75,.02,1.5,.03,2.8,
MPC,2,0,11,0.04,3.8,0.05,5.1,0.06,6.2,
MPROP,2,NUXY,.49,
NMERGE,1,112,1,.1,0,0,0,
NCOMPRESS,1,112,
EGROUP,3,GAP,1,0,0,1,2,0,0,
NL_GSAUTO,0,48,0,36,36,1,1,
NL_CONTROL,0,1,
NL_PLOT,1,100,1,0,
NL_AUTOSTEP,0,
NL_AUTOSTEP,1,1E-008,1,
C* FORÇA DE REAÇÃO NO MANCAL
RFND,1,UY,1,1,,
A_NONLINEAR,S,1,1,20,0.001,0,G,0,0,1E+010,0.001,0.01,0,
PCR,49,-1.466,49,1,-1.466,2,
C* PESO PROPRIO DO ROLO
ACEL,0,-2.40,0,
C*  FLECHAS  NA SUPERFÍCIE- " COROAMENTO"-(PONTOS NODAIS)
ND,35,375,751.056,0,0,0,0,0,0,
```

```
ND,36,643,751.116,0,0,0,0,0,0,0,
ND,37,911,751.196,0,0,0,0,0,0,0,
ND,38,1179,751.249,0,0,0,0,0,0,0,
ND,39,1447,751.278,0,0,0,0,0,0,0,
ND,40,1715,751.287,0,0,0,0,0,0,0,
C* DESLOCAMENTO APLICADO AO CONJUNTO
DCR,43,UY,-2.86,43,1,,
C* R_NONLINEAR,
```

Em maior detalhe, o modelo pode ser observado na figura 12.7.18.

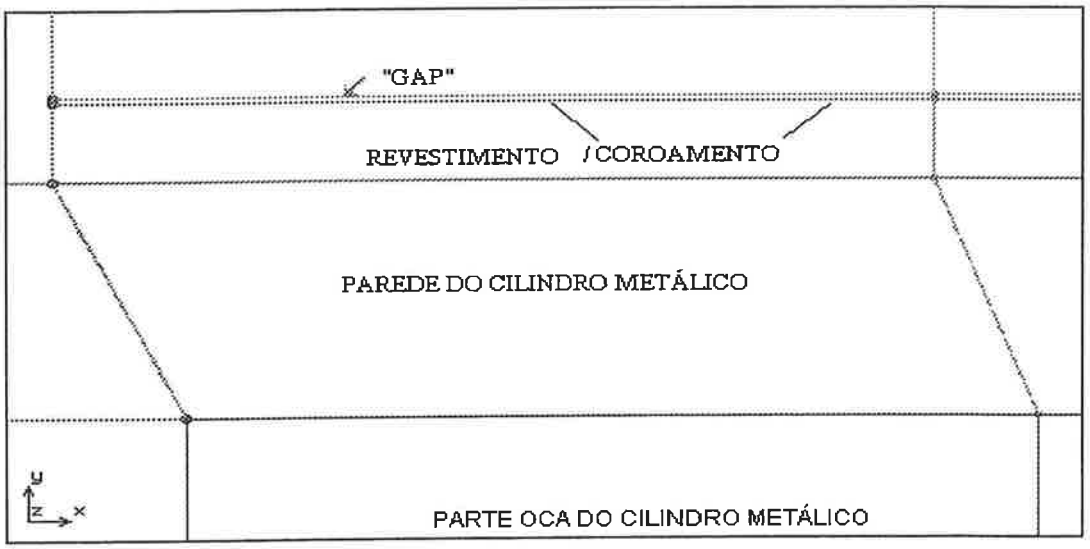


Fig. 12.7.18 - Detalhe da fig. 12.7.17.

Com base no modelo apresentado, efetua-se, inicialmente, a análise da situação sem aplicação do coroamento.

A figura 12.7.19 ilustra a deflexão do cilindro metálico, ao longo do diâmetro externo do cilindro metálico para a carga linear objetivada, como pode ser acompanhado, em termos de carga, pela figura 12.7.20.

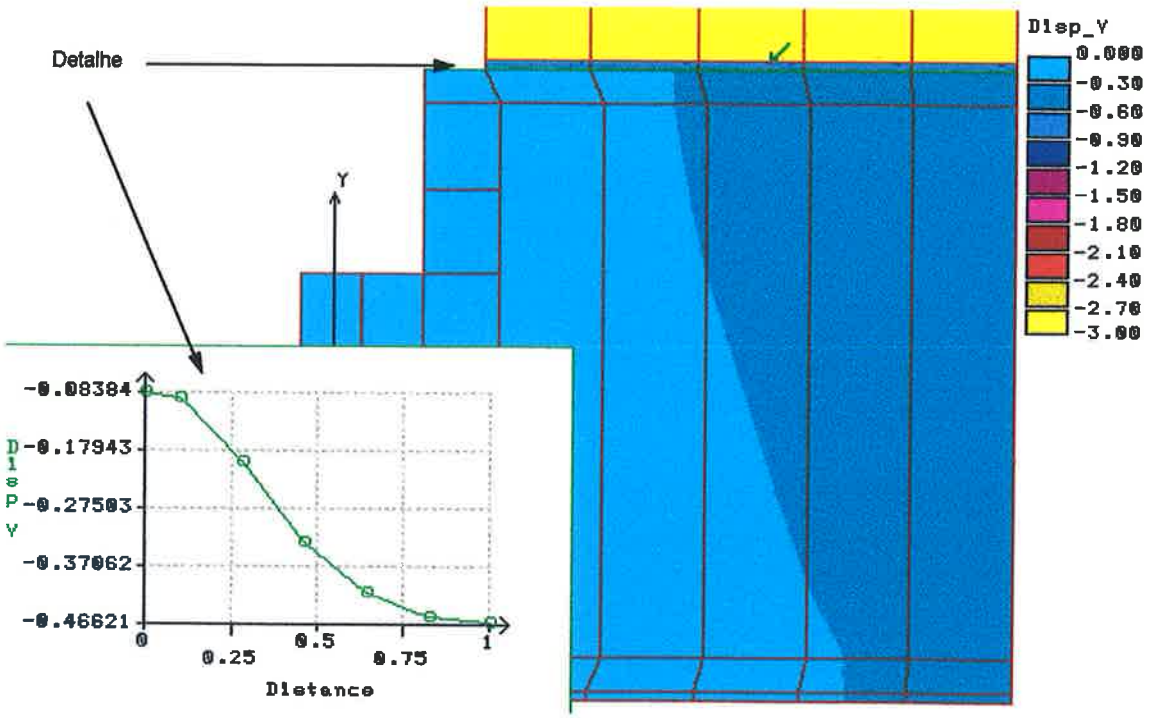


Fig. 12.7.19 - Deflexão do cilindro metálico.

R e a c t i o n F o r c e s f o r s t e p 4

Node	X1	X2	X3	R1	
1	0.00000E+00	0.47066E+06	0.00000E+00	0.00000E+00	0

F/2= 470666 N , F= 941200 N logo C= 941200/ 2600= 362 N/*mm*

Fig. 12.7.20 - Forças reativas do modelo, sem "coroamento".

Nestas condições, a distribuição das pressões ao longo da largura do cilindro é dada na figura 12.7.21 e, em maior detalhe, na figura 12.7.22, onde pode-se observar uma não-uniformidade da pressão ao longo do revestimento elastomérico (maior pressão nas extremidades do revestimento).

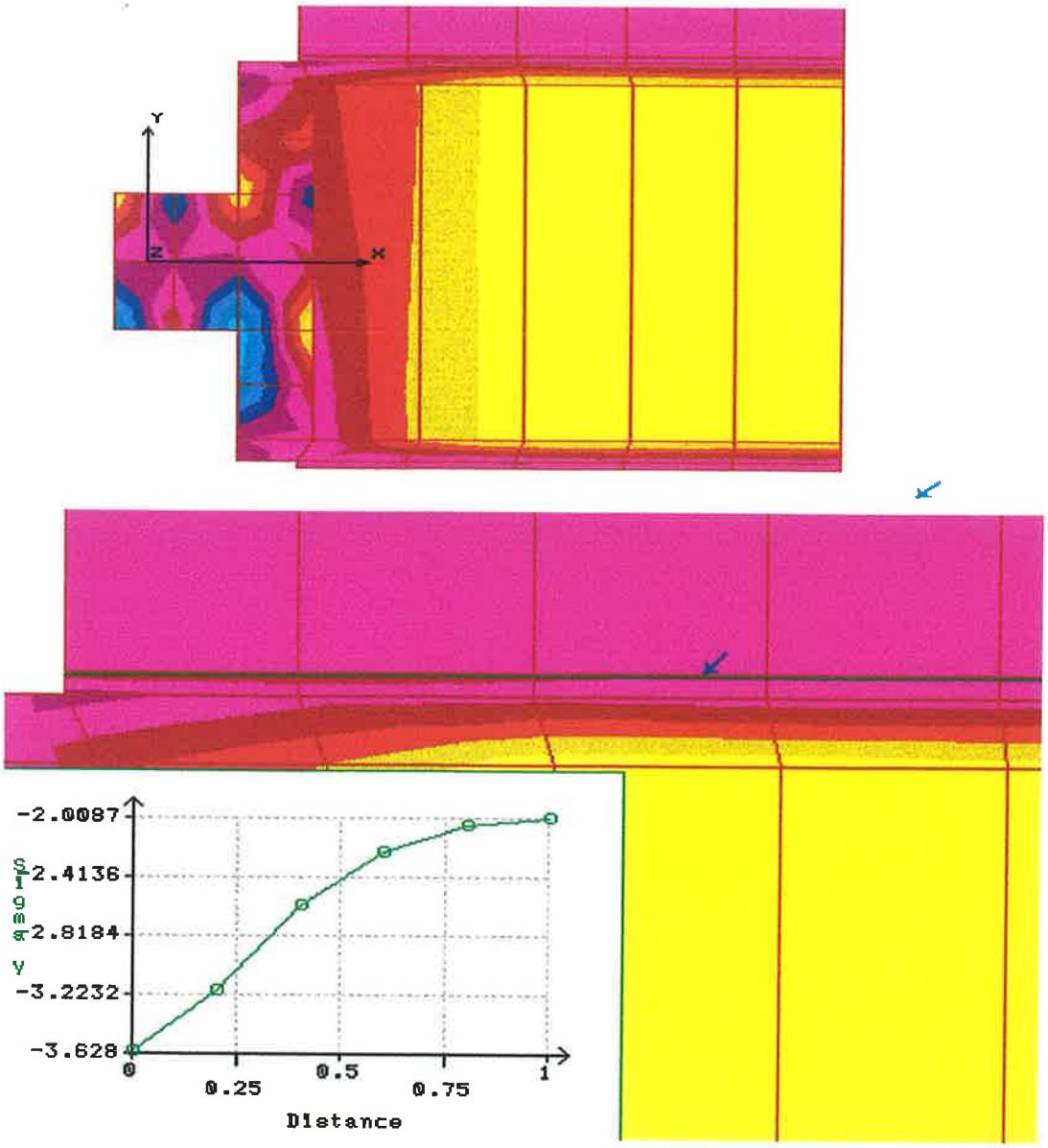


Fig. 12.7.21 e 12.7.22 - Distribuição da pressão - sem coroamento.

A aplicação de um coroamento, isto é, de uma flecha de 0,42*mm* (veja *ETAPA 2)*, para uma mesma carga linear, implica em uma mudança nos valores da deflexão e distribuição das pressões, como pode ser visto nas figuras 12.7.23 e 12.7.24, respectivamente.

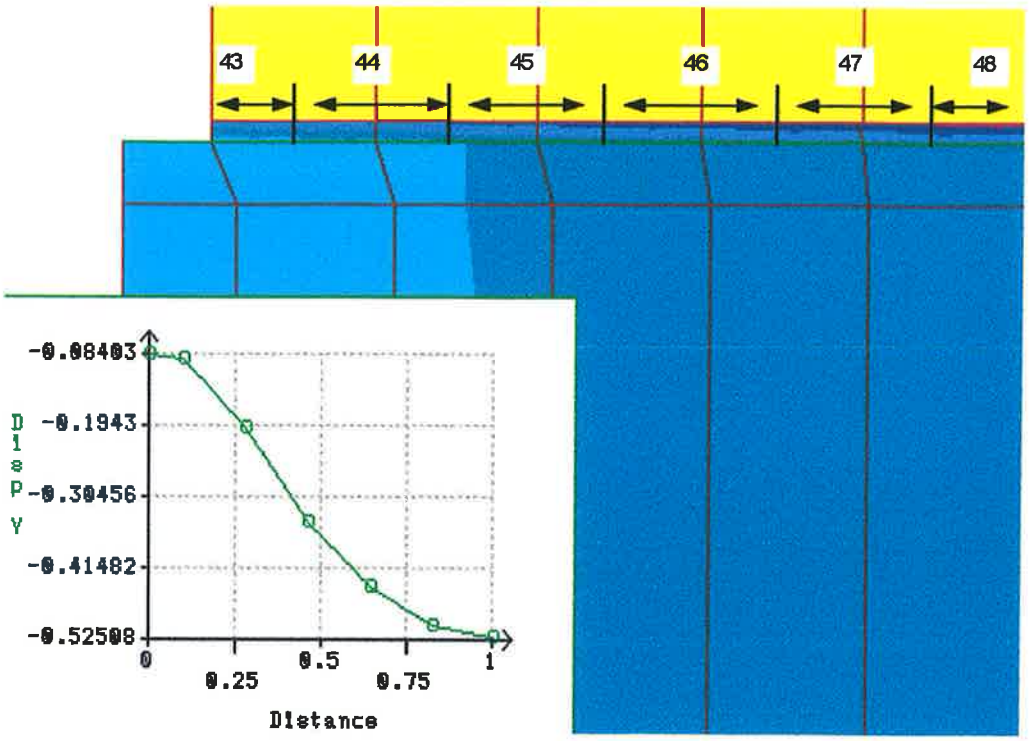


Fig. 12.7.23 - Deflexão do cilindro revestido, com coroamento.

gap no.	43	44	45	46	47	48	média
força (N)	52800	102580	94980	91260	97169	48422	
larg. gap (mm)	134	268	268	268	268	134	
larg nip (mm)	84	84	84	84	84	84	
pressão N/mm2)	4,69	4,55	4,21	4,05	4,81	4,30	4,43

logo $C_{media} = 4{,}43 * 84 = 373$ N/mm $\quad \underline{p_{max} = 4{,}43 * 4/\pi = 5.64 \text{ N/mm2}}$ (ver eq .7.2)

(Valor a ser validado pelo ensaio de "campo")

Fig. 12.7.24 - Forças reativas e pressão ao longo do coroamento .

Nestas condições, a figura 12.7.25 ilustra a distribuição das pressões ao longo da largura do cilindro sem e com coroamento, onde se observa o efeito do coroamento na maior uniformidade das pressões ao longo do revestimento.

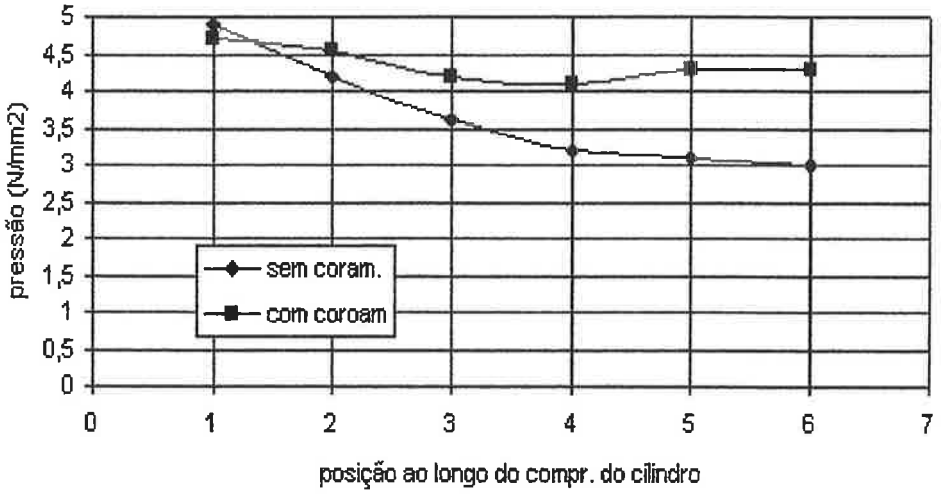


Fig. 12.7.25 - Efeito do coroamento na distribuição da pressão ao longo do comprimento do cilindro (largura do papel) (coroamento de 0,84*mm* para C = 360 kN/m).

ETAPA 4 - VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos através da análise acima, aplicados na execução do revestimento elastomérico do cilindro metálico, foram verificados através de análise "em campo", ou seja, através de medidas colhidas junto à prensa úmida (por ocasião de sua instalação em máquina), com auxílio do "FUJI-Prescale-Film", e respectiva técnica de medição, como apresentado no capítulo 2, em particular nas figuras 2.11 e 2.12.

A figura 12.7.26 compara os resultados calculados (figuras 12.7.6 e 12.7.24) e o obtido (medido) "em campo", em termos de pressão ao longo da largura do cilindro, validando o modelo desenvolvido.

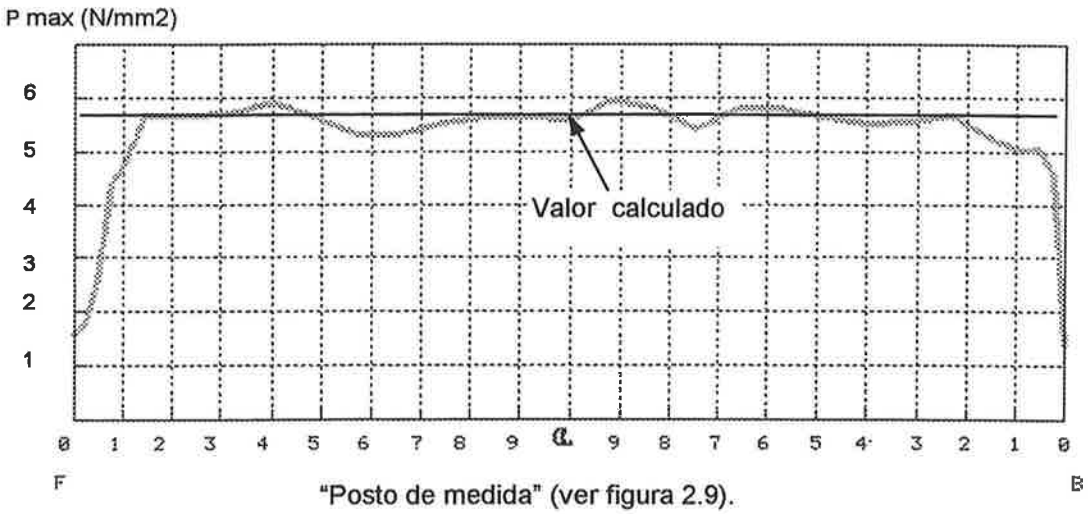


Fig. 12.7.26 - Comparação de valor calculado e valor de medição "em campo" .

12.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As observações efetuadas na interface elastômero/metal, como descritas a seguir, foram realizadas no MEV- Microscópio Eletrônico de Varredura - LEO 440 I - dotado de detector de elétrons secundários retroespalhados, catodo de luminescência, espectrofotômetro de energia dispersiva (EDS), janela Si-Li, com correção ZAF, pertencente ao laboratório de MEV do Depto de Paleontologia e Estratigrafia do Instituto de Geociências - Processo FAPESP 95/5635-4, operado pelo Eng. Isaac J .Sayeg.

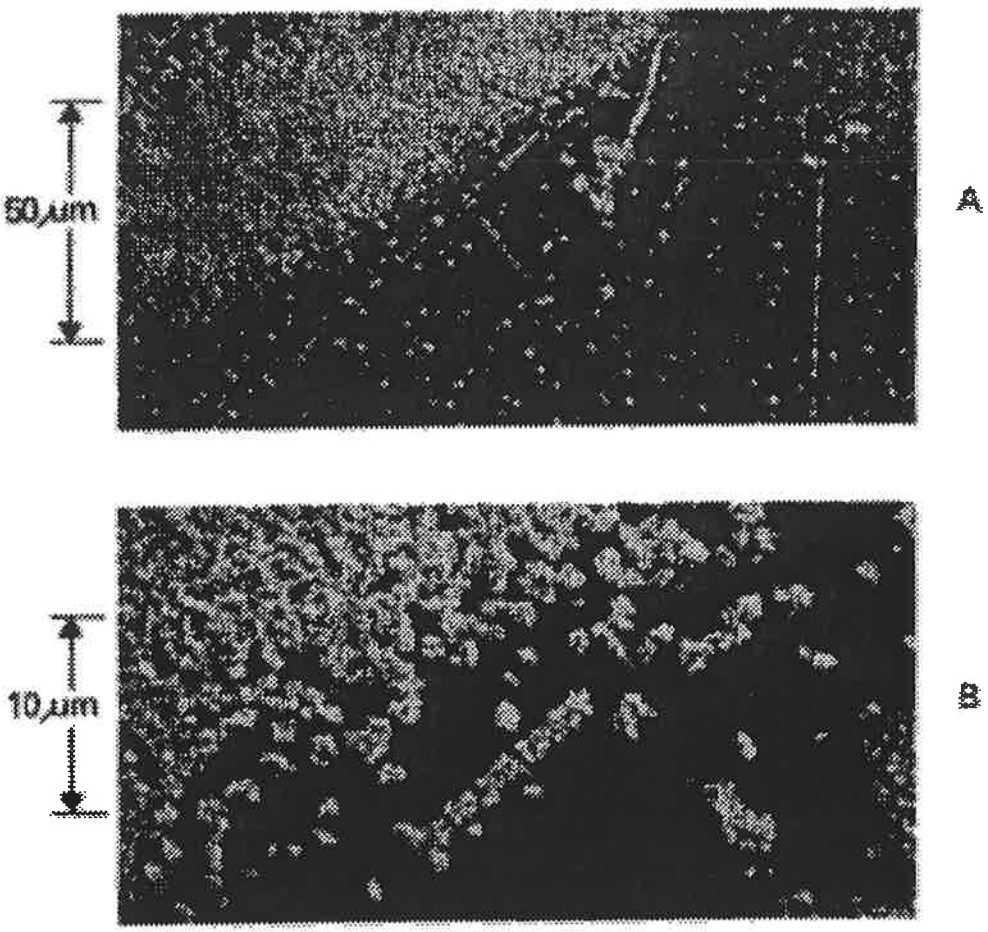
As observações concentraram-se na análise da interface metal/elastômero de alta dureza. Assim, lâminas de aço-carbono e de latão foram cobertas com camadas de composto elastomérico de 1P&J de dureza e submetidos ao ciclo de vulcanização industrial. Estas lâminas foram embutidas em resina de cura a frio, sendo que a interface metal/elastômero foi submetida ao preparo metalográfico convencional. Por ocasião da análise no MEV, foi efetuado recobrimento com película de carbono.

Como apresentado no capítulo 8, os trabalhos de Van Ooij, [8.7] [8.8] [8.12] analisaram a junção aço latonado/elastômero NR- com 4 phr de enxofre.

Segundo este autor, embora o tipo de união verificado na interface ainda não tenha sido identificado de maneira conclusiva, a literatura técnica é unânime em apontar os seguintes aspectos principais:

1 - Existe uma forte união entre o latão e a borracha natural -NR, decorrente de um crescimento localizado (*in situ*) de um filme do tipo $Cu_x S$ (espessura < 50*nm*), que ocorre nos estágios iniciais da vulcanização, antes do início da formação das ligações cruzadas (reticulação). Este filme de sulfeto tem boa adesão, bem como boa coesividade e, por ser poroso, permite a entrada de

moléculas de borracha, propiciando a formação de um ancoramento mecânico, como pode ser visto nas figuras 12.8.1 e 12.8.2.



Figs. 12.8.1 e 12.8.2 - Interface NR - aço latonado. [8.7]

A presença de ZnS ou FeS é considerada "não adesiva", pois estes não formam as microporosidades, necessárias para esta interligação.

2 - no arame de aço trefilado, latonado, forma-se uma camada de óxido, como apresentada, esquematicamente, na figura 12.8.3.

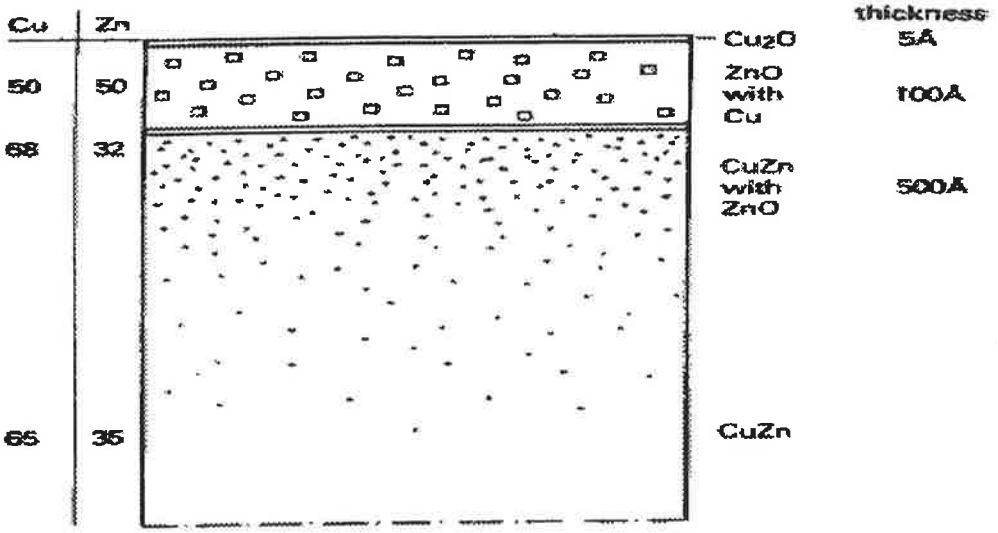


Fig. 12.8.3 - Esquema do filme oxidado no aço trefilado latonado. [8.7]

Observa-se uma camada fina de Cu_2 O (5 Å), sob a qual encontra-se uma camada de ZnO e inclusões de Cu (100Å) e, mais abaixo, a camada de latão (500 Å). Expondo a camada de Cu_2 O a moléculas contendo S, nos estágios iniciais da vulcanização, observa-se a fomação do $Cu_x S$, bem como a formação de uma pequena proporção de ZnS , como ilustra a figura 12.8.4.

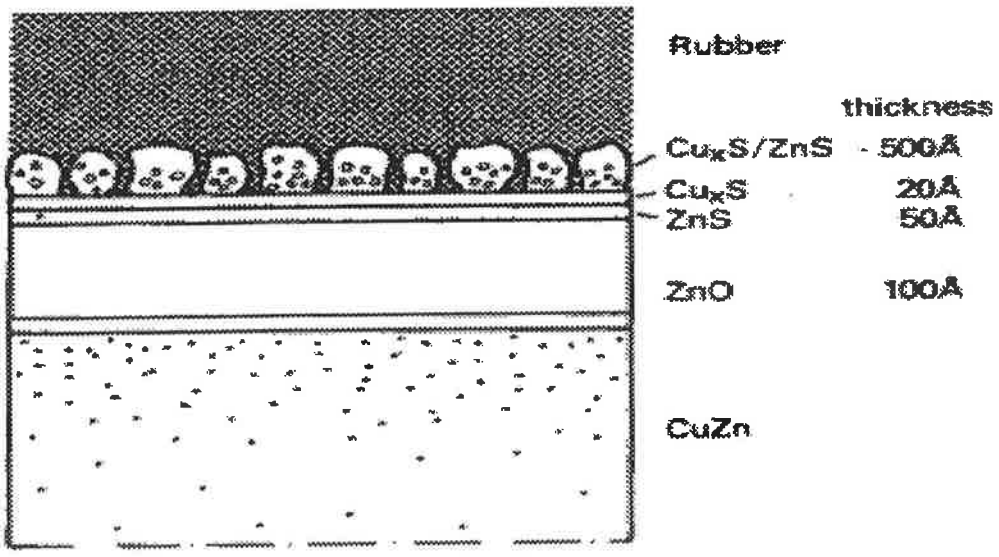


Fig. 12.8.4 - Esquema dos sulfetos na interface NR-latão, ilustrando o mecanismo de interligação.[8.7]

A estrutura e propriedades mecânicas do filme de $Cu_x S$ dependem de vários fatores, dentre os quais, destacam-se: formulação do composto

elastomérico, presença de umidade, bem como da espessura do filme formado. Filmes espessos produzem elevadas tensões residuais que conduzem ao trincamento, reduzindo a adesão objetivada.

3 - O composto elastomérico (à base de NR) contribui para a formação da espessura do filme de $Cu_x S$, através da relação S/ acelerador de vulcanização (tipo TMTD= trimetil tiurame bissulfato ou DCBS= diciclo benzotiazol sulfenamida), sendo que relações > 4 produzem filmes estáveis de boa adesão, contanto que o filme de $Cu_x S$ tenha sido formado completamente antes da "ligação cruzada" do elastômero. Nestes aceleradores do tipo "R- C- Sy- NR" o íon Sy - reage com o Cu + formando $Cu_x S$, de modo que quanto maior y , mais rico em S será o filme de $Cu_x S$, e, portanto maior adesão será verificada. No entanto, os aceleradores tipo sulfenamida devem satisfazer uma segunda condição associada à não formação de complexos de cobre passíveis de dissolução no composto elastomérico, propiciando a corrosão do latão (por dezincificação) e, conseqüentemente, perda de adesão (neste sentido o DCBS é uma sulfenamida mais favorável que as demais).

Igualmente, a presença de ácido esteárico na formulação do composto elastomérico atua como corrosivo do latão, pois o filme de ZnO da superfície tende a reagir e se dissolver no composto. Assim, o composto deve ter alto teor de ZnO para que este reaja rapidamente com o ácido esteárico, evitando a remoção do ZnO da superfície do aço trefilado latonado. Co e Ni atuam como inibidores desta reação, além de atuarem como consumidores do S, retardando a reação de vulcanização.

4 - A presença de umidade, oxigênio, sais, implica em degradação da adesão devido à oxidação do Zn, sob a camada de ZnO/ ZnS/ $Cu_x S$, associada à dezincificação, a qual pode ser atenuada pela presença de íons de Co ou Ni.

Os estudos acima resumidos restringem-se aos compostos elastoméricos contendo até S=8.6 phr, valor este, baixo, quando comparado aos teores de S empregados nos compostos elastoméricos de alta dureza (1 P&J), como os do presente trabalho (para os quais, estudos semelhantes aos de Van Ooij, não foram encontrados na literatura técnica).

Embora não seja objetivo do presente trabalho estudar a interface elastômero/latão, a figura 12.8.5 ilustra alguns aspectos morfológicos desta interface, para efeito de comparação com as observações de Van Ooij.

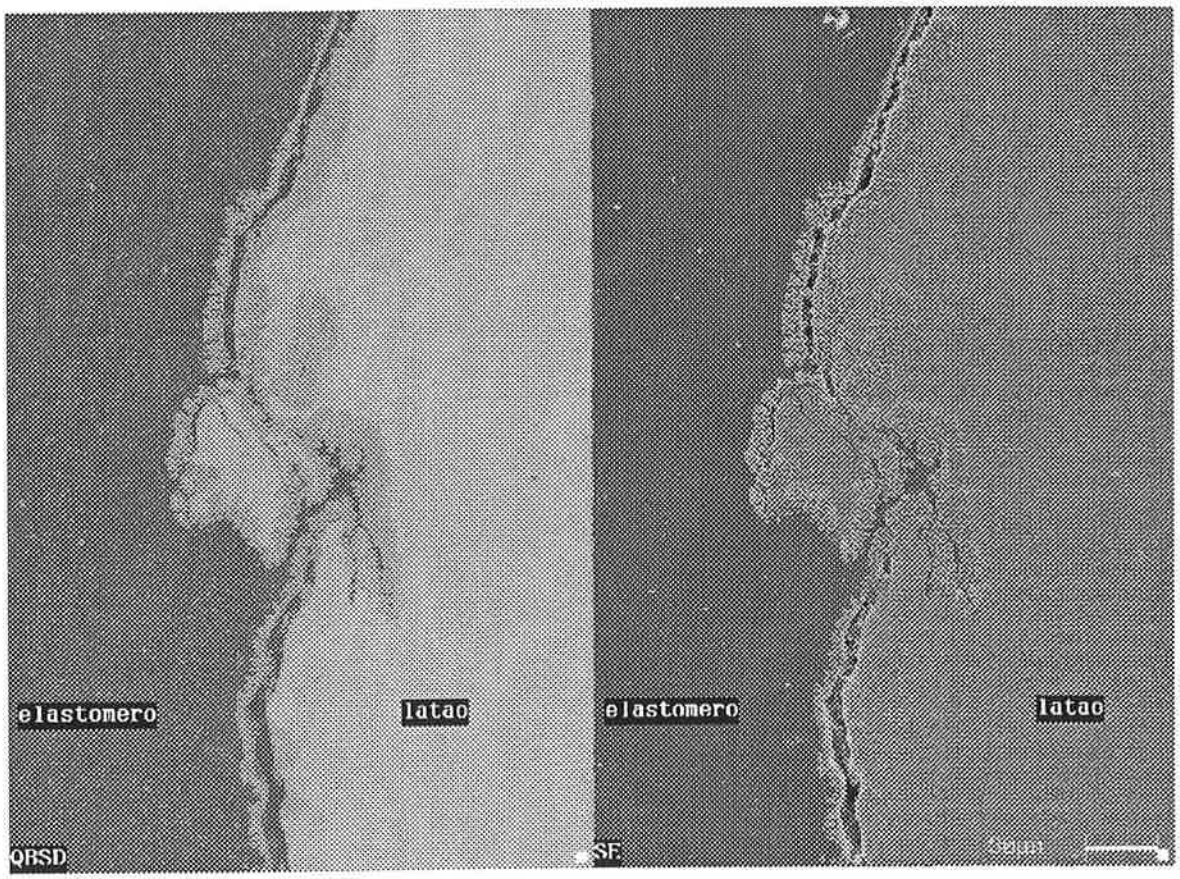


Fig.12.8.5 - MEV -Elétrons retroespalhados e secundários da interface latão/composto elastomérico com 1 P&J (410 x)

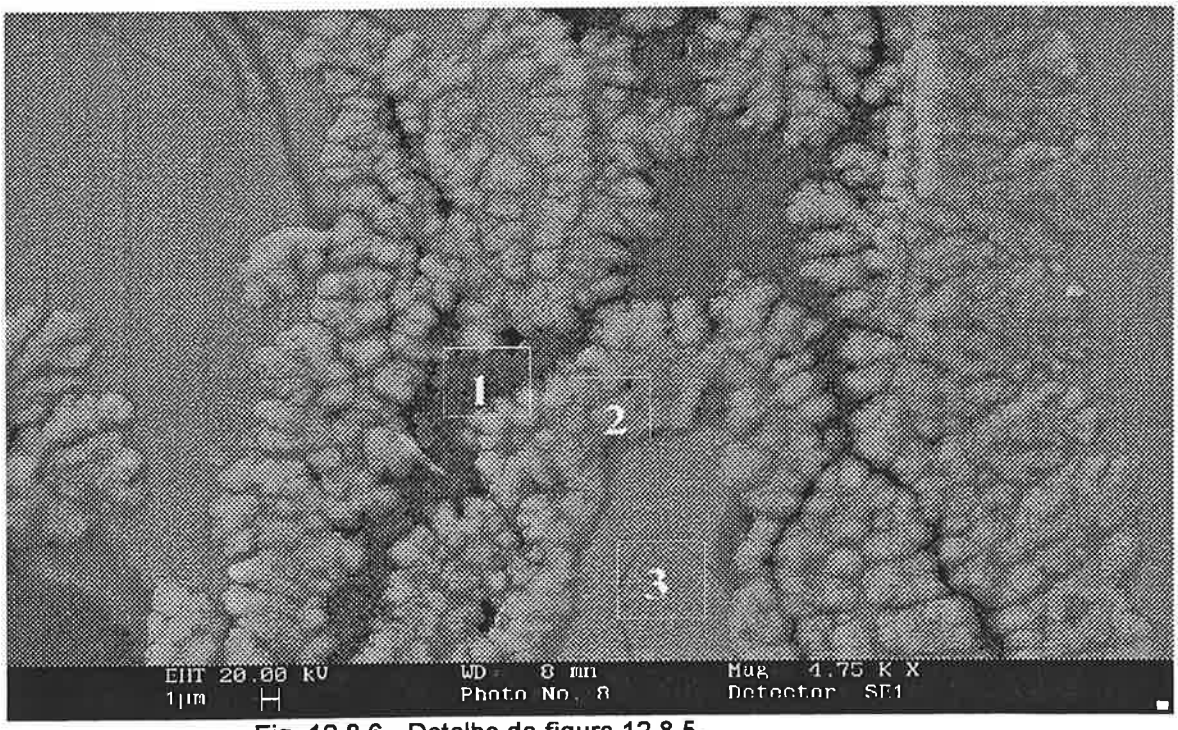


Fig. 12.8.6 - Detalhe da figura 12.8.5.

Pode-se observar, inicialmente, a presença de segundas fases (alvéolos) (marca 2, na figura 12.8.6) caracterizados como sendo Cu $_x$ S (ver figura 12.8.8, onde Cu=61,24%, S= 26.83%), valores que vão ao encontro a observações de Van Ooij .

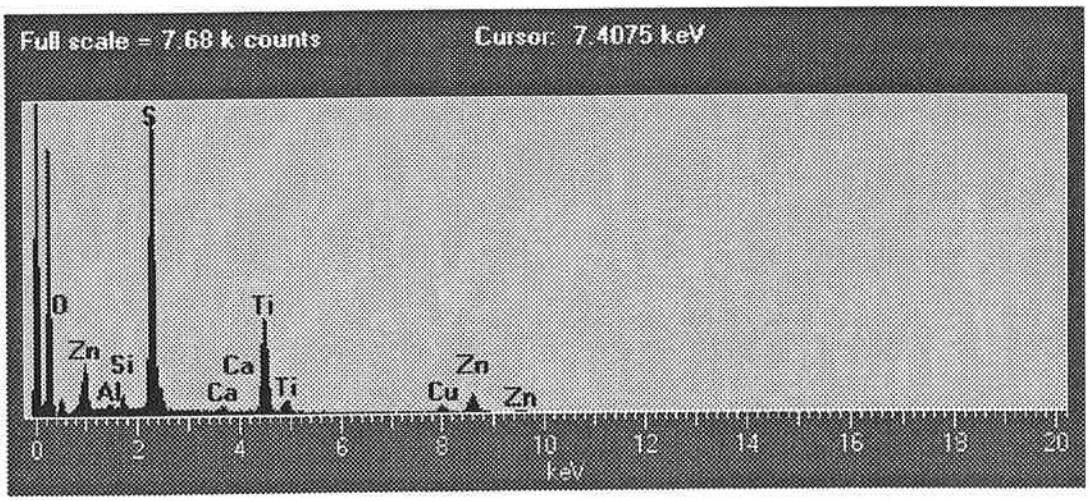


Fig. 12.8.7- EDS relativo ao ponto 1 da figura 12.8.6 (região do elastômero).

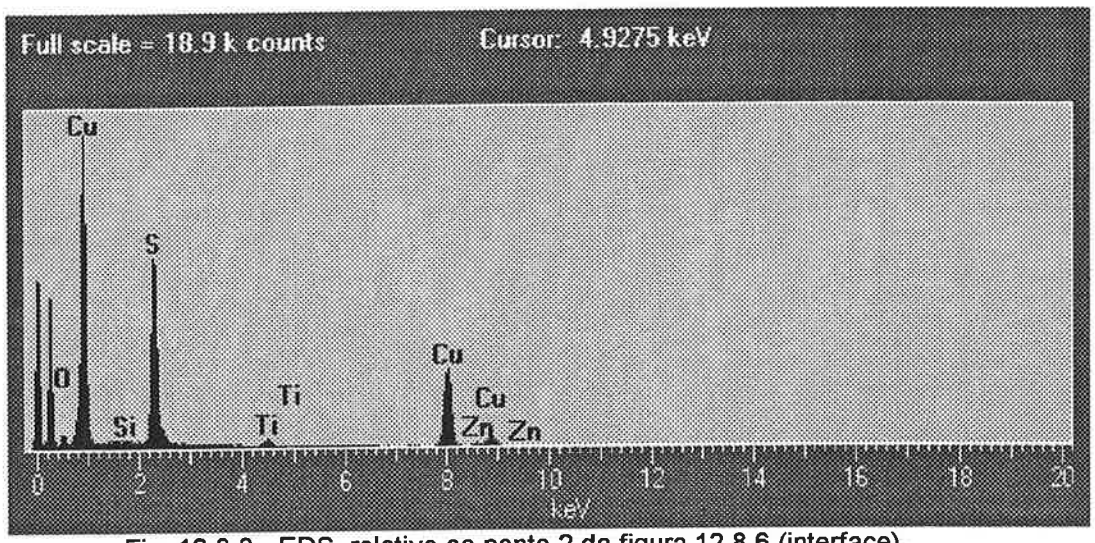


Fig. 12.8.8 - EDS relativo ao ponto 2 da figura 12.8.6 (interface).

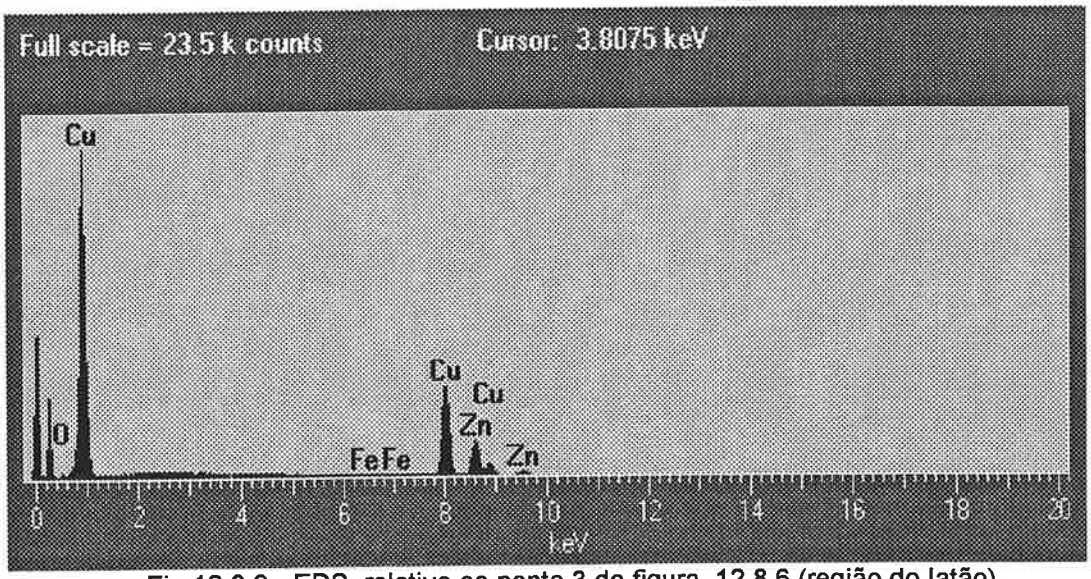


Fig.12.8.9 - EDS relativo ao ponto 3 da figura 12.8.6 (região do latão).

Por outro lado, de maior interesse para o presente trabalho, são as observações relativas à interface composto elastomérico (1 P&J)/aço carbono, pois encontram-se relacionadas ao mecanismo de adesão revestimento/cilindro metálico.

As figuras 12.8.10 a 12.8.12 apresentam os detalhes relativos à interface em questão.

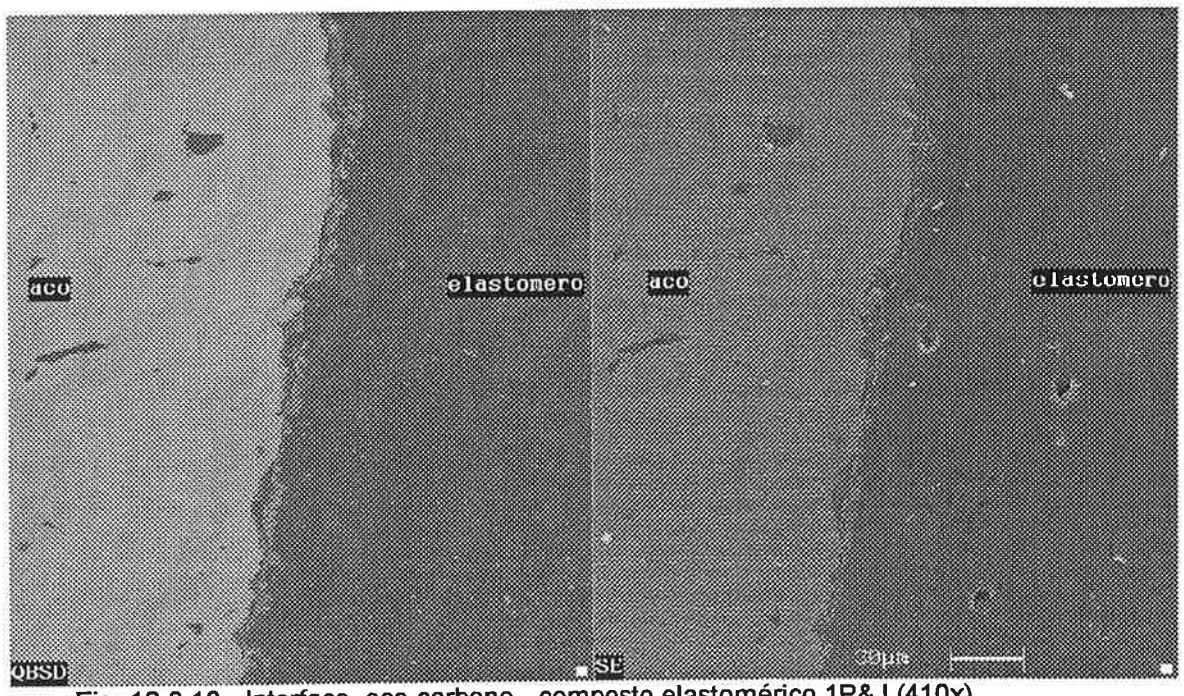
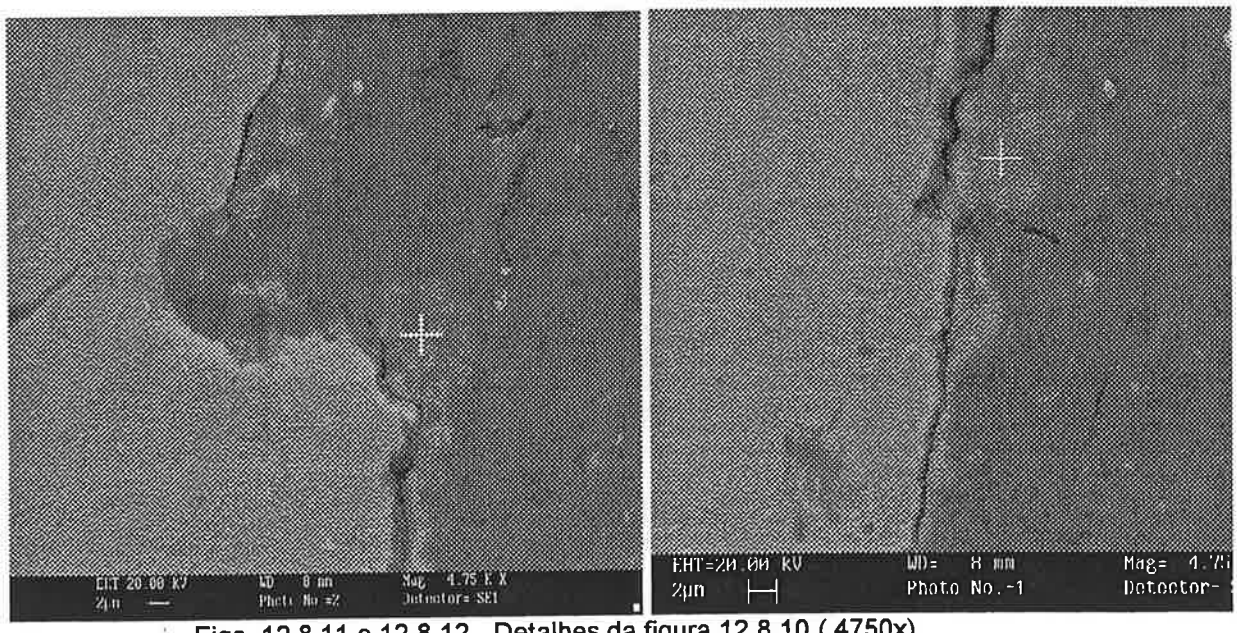


Fig. 12.8.10 - Interface aço carbono - composto elastomérico 1P&J (410x) .

Em maior detallhe, observemos as figuras 12.8.11 e 12.8.12.



Figs. 12.8.11 e 12.8.12 - Detalhes da figura 12.8 10 (4750x).

As figuras 12.8.13 a 12.8.15, associadas à análise química quantitativa (calibração ZAF com Co), das regiões metálica/interface/elastômero, ilustram a presença de $Fe_x S$, com Fe=87% S=8.7% (local com marca +).

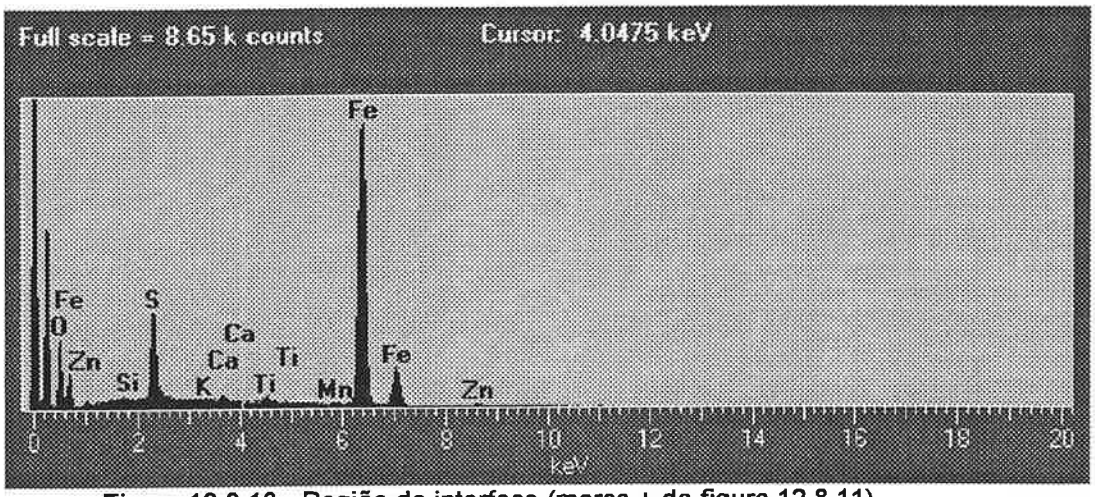


Figura 12.8.13 - Região da interface (marca + da figura 12.8.11).

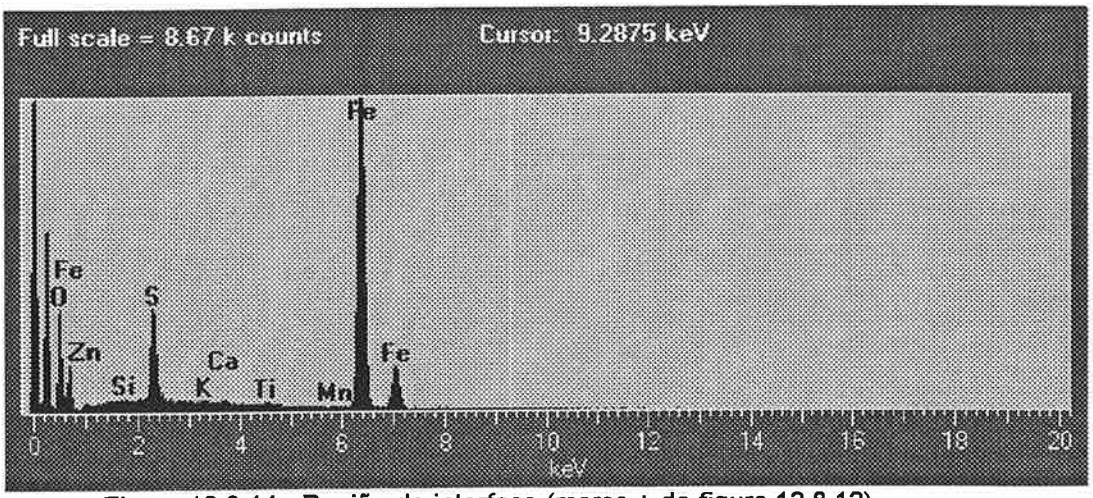


Figura 12.8.14 - Região da interface (marca + da figura 12.8.12).

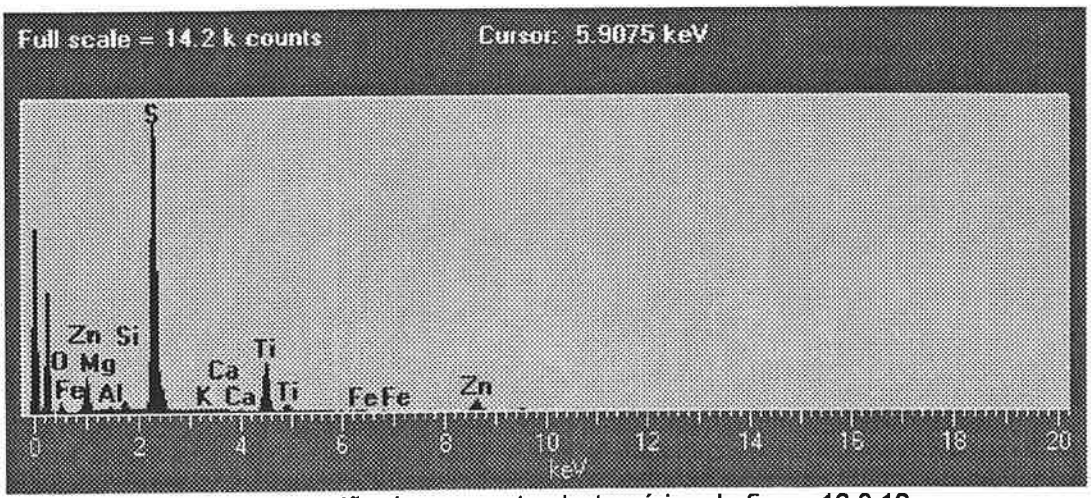


Figura 12.8.15 - região do composto elastomérico da figura 12.8.12.

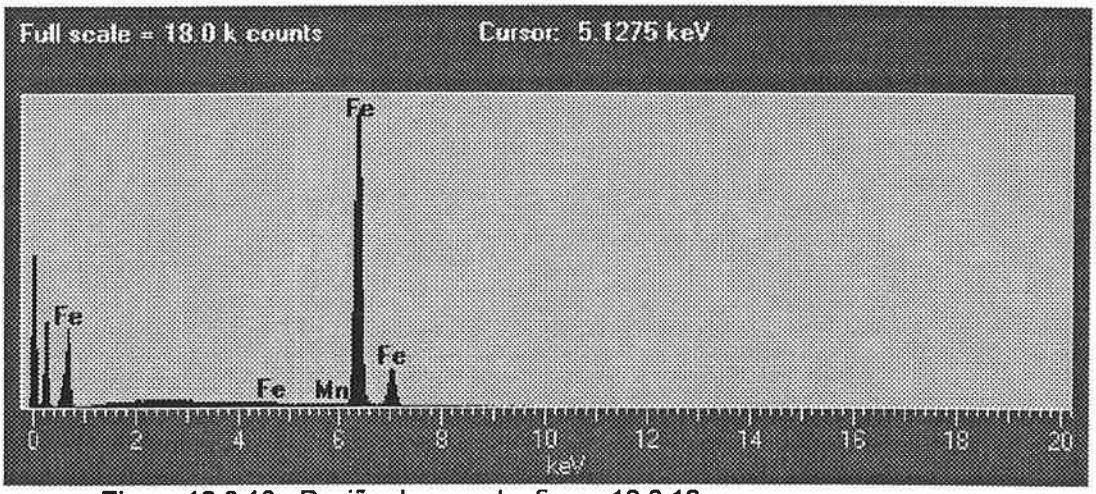


Figura 12.8.16 - Região do aço da figura 12.8.12.

A tabela 12.8.1 resume os principais elementos analisados (wt %)

(análise quantitativa -EDS - detector Si Li - método ZAF - padrão Co)

IDENTIFICAÇÃO	CODIGO	Cu	Zn	S	Fe
COMP ELASTOMÉRICO	EDSL-1	5,05	17,69	35,3	
INTERFACE	EDSL-2	61,24	2,84	24,8	
LATÃO	ESDL-3	64,15	32,08	0,04	
COMP. ELASTOMÉRICO	*EDSL-32*		*18,68*	*56,27*	*0,88*
INTERFACE	*EDSA-31*		*1,49*	*8,69*	*84,5*
INTERFACE	*EDSA-41*		*0,73*	*8,65*	*89,31*
AÇO	*EDSA-33*				*99,8*

Tabela 12.8.1 - Resumo dos principais elementos analisados por EDS na interface aço-elastômero com 1 P&J.

Obs.:

1- outros elementos analisados no latão/composto elastomérico: 0, Al, Si, Ca, Ti.

2- outros elementos analisados no *aço*/composto elastomérico: K, Mn, Si, Ca, Ti (0,3%) , Zn (0.7%).

3- na interface aço/composto elastomérico, tem-se, na região marcada com +:

at % Fe = (84,5/ 56) / (84,5/56+ 8,7/32+6,8*0,3/48+6,8*0,7/65)= 0,79

at % S = (8,7/32) / (84,5/56+ 8,7/32+6,8*0,3/48+6,8*0,7/65) = 0,14 e

Fe S = 50 at% Fe + 50 at % S

Assim, a difusão de Fe em direção ao elastômero propiciou a formação da mistura de fases contendo Fe + FeS (37 % S), [12.8.1] com predominância de Fe.

A morfologia destas fases, no caso do latão, difere daquelas observadas por Van Ooij , pois não se configuram como sendo dendríticas.

No caso do aço, não se dispõe de dados comparativos na literatura técnica específica.

A extensão do trincamento na interface, tanto no caso do aço, como do latão, sugere uma fraca adesão "por reação química" (segundo mecanismo descrito em 8.1.4) verificado entre o elastômero (1 P&J) de alto teor de S e o substrato metálico (aço).

13 - COMENTÁRIOS ADICIONAIS

Neste capítulo, apresentam-se os comentários adicionais aos efetuados nos capítulos anteriores e que envolvam comparações de dados obtidos e/ou publicados na literatura, nos seguintes aspectos: **1**- compostos elastoméricos estudados; **2**- composto elastomérico de 1 P&J , Tg e tensão residual; **3**- cargas lineares: modelos simplificados e modelo FEM.

1- Comparação entre compostos elastoméricos estudados:

Para os três compostos elastoméricos estudados, respectivamente, nas durezas de 1, 12 e 30 P&J, a figura 13.1 compara o módulo dinâmico E*, para tensões típicas de trabalho (para cada nível de dureza), em função da temperatura para uma freqüência de 30 Hz.

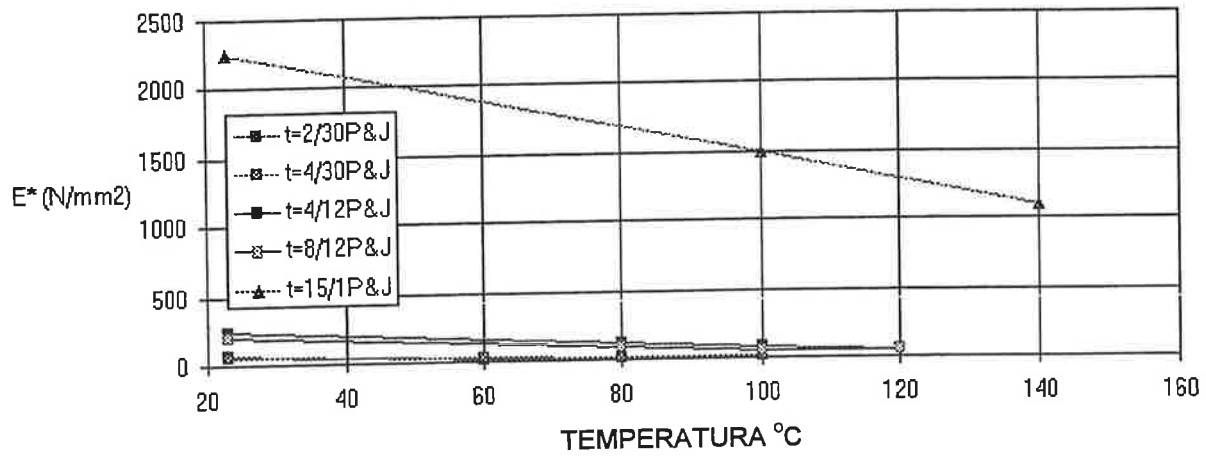


Fig. 13.1- Módulo dinâmico (E*) em função da temperatura para diferentes tensões (t) (típicas de trabalho) e respectivas durezas (P&J).

Observa-se que os níveis dos valores de E* são bastante diferenciados para um composto elastomérico de elevada dureza, quando comparados aos de menor dureza, fato relacionado à formação de ligações cruzadas tridimensionais, nos

primeiros. A figura 13.2 apresenta este aspecto para temperaturas de 23 e 100°C, para uma tensão de 4 N/mm2 (30 Hz), em conjunto com os dados de Gudehus [2.18], apresentados anteriormente na figura 4.6.1.

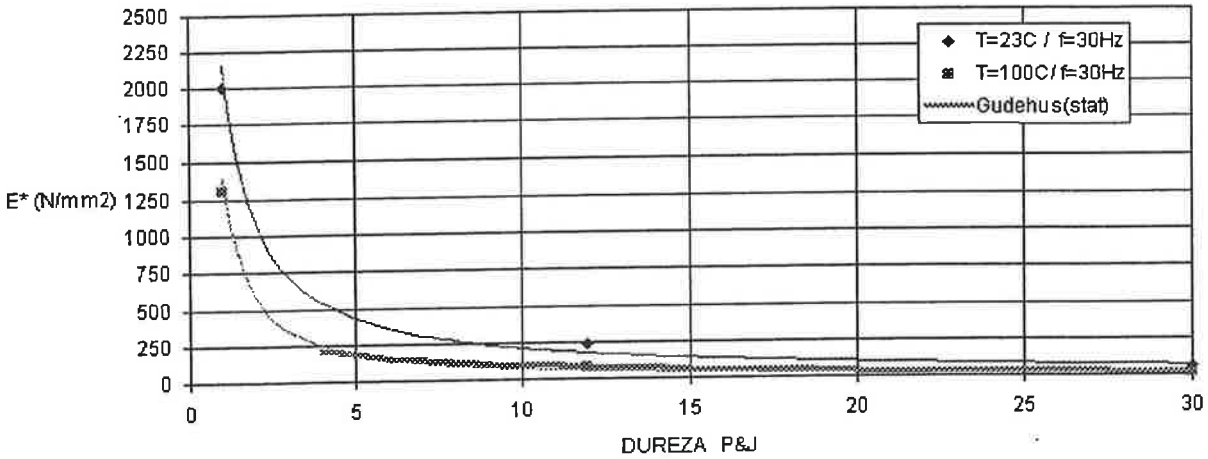
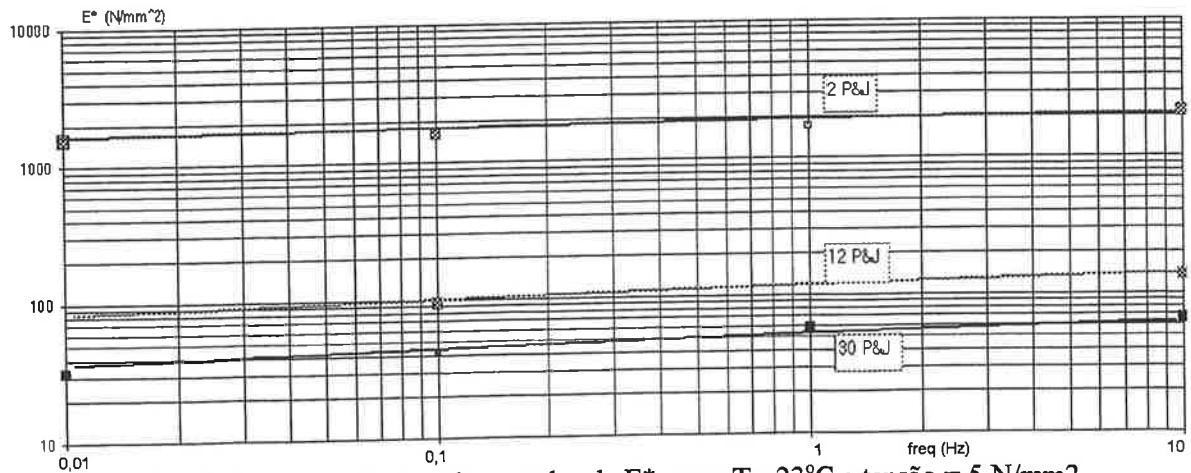


Figura 13.2 - Módulo dinâmico e dureza para dois níveis de temperatura (°C) para tensão constante de 4 N/mm2 (30 Hz), incluindo os dados de módulo estático de Gudehus [2.18] (T=23°C). Note-se que para os compostos de dureza elevada (P&J < 4), os valores do módulo dinâmico, obtidos no presente trabalho, são significativamente maiores dos que seriam obtidos pela extrapolação dos dados daquele autor (e que têm sido empregados em projetos associados à área de contato em prensas úmidas de máquinas de papel).

Para os compostos estudados, a figura 13.3 apresenta o efeito da freqüência sobre o módulo dinâmico para uma tensão constante de 5 N/mm2 a 23°C.



13.3 - Efeito da freqüência sobre o valor de E*, para T =23°C e tensão = 5 N/mm2.

Nota-se que a relação WLF, apresentada na figura 5.3, é aplicável no intervalo de freqüências estudado. Pode-se notar, também, que a influência da freqüência é mais acentuada quanto menor a dureza (maior o valor de P&J) do composto elastomérico (por efeito da histerese ou ainda tg δ, ser mais elevado).

2 - Composto elastomérico de 1 P&J , Tg e tensão residual.

Uma propriedade importante na caracterização dos polímeros, é a determinação da temperatura de transição vítrea (Tg). Ela está associada a uma transição secundária (pois seu valor depende da velocidade de esfriamento) [13.2] e que ocorre em uma faixa de temperatura, como pode ser visto na figura 13.4.

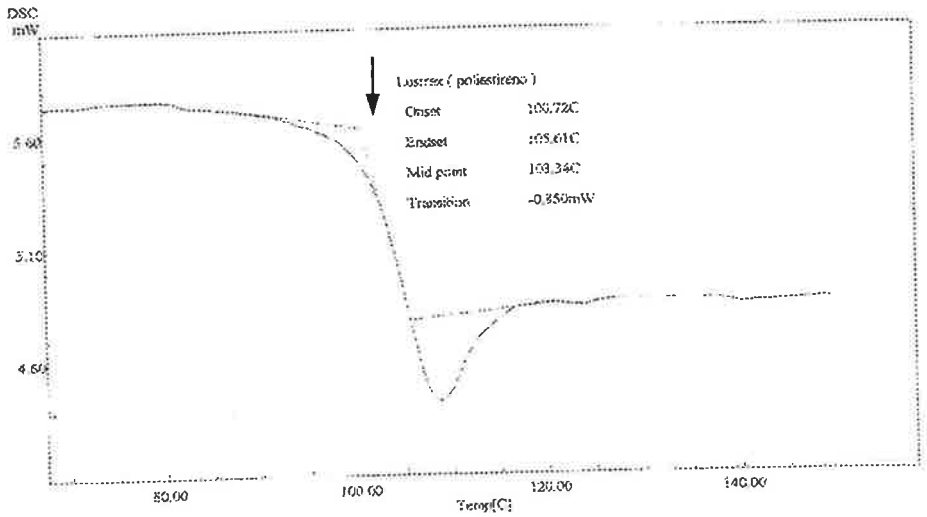


Fig. 13.4 - Curva típica obtida no DSC (poliestireno).

De particular importância é a sua determinação no caso de polímeros de elevada dureza e de compostos elastoméricos de dureza igual ou superior a 1 P&J (82 Shore D). [13.2]

Na determinação do Tg, empregando o DSC- Differential Scanning Calorimetry, modelo Shimadzu DSC-50 (deste Departamento) , mede-se a variação do fluxo de calor em função da temperatura da amostra, sendo que a primeira inflexão na curva de aquecimento está associada ao valor de Tg. [13.4]

No caso de um composto NBR contendo 40 phr de enxofre (semelhante ao composto de 1 P&J da tabela 12.1- excluindo-se as "cargas minerais"), a figura 13.5 apresenta um valor de Tg na faixa de 155°C.

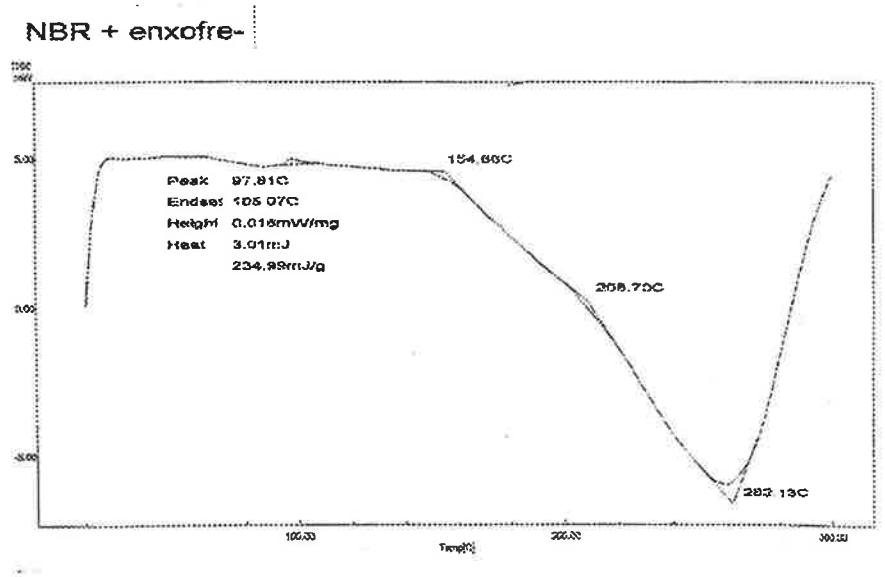


Fig. 13.5 - Curva DSC para elastômero NBR + 40 phr S.

O módulo de elasticidade do polímero (E*), o valor de tg δ, a perda específica (Wd / Wfh), sofrem alterações acentuadas no seu valor, nas proximidades de Tg.[13.5] De fato, as figuras 12.4.26 e 12.4.29, confirmam estas observações.

Portanto, objetiva-se que o revestimento seja refrigerado ou / e que o mesmo tenha uma Tg maior do que a temperatura de trabalho. Um critério tecnológico, associado à temperatura máxima de trabalho, está associado àquela temperatura onde a curva tg δ x temperatura apresente uma subida abrupta, [13.5] como pode ser visto na figura 12.4.29.

Acrescente-se o fato de que, ao se aproximar destas temperaturas, verifica-se uma redução acentuada na resistência à deformação (figura 12.4.22), além do fato de a geração de calor (figura 12.4.31) localizar-se preferencialmente ao redor de

zonas danificadas (tais como nas pontas de trincas, onde há elevada concentração de tensões), particularmente em materiais histeréticos nos quais este efeito concentrador de calor é mais acentuado, devido à sua baixa condutividade térmica.

O valor de Tg nos fornece, portanto, um limite superior de temperatura operacional permissível para o composto elastomérico termofixo .

Por outro lado, nestes materiais, verifica-se uma elevada tensão residual, devido ao elevado nível de ligação cruzada (redes tridimensionais, limitando o relaxamento das tensões), tanto mais intensa quanto maior a dureza do material. Esta tensão residual é uma conseqüência da contração térmica do polímero desde a Tg até a temperatura ambiente, sendo que à Tg este se encontra isento de tensões. [13.5] . Dado que o revestimento é restringido na sua contração radial (e longitudinal) na interface com o cilindro metálico, e que o metal do cilindro tem menor coeficiente de expansão térmica (ver capítulo 9), verificam-se elevadas tensões residuais de tração (por ocasião do resfriamento a partir de Tg), que podem conduzir ao trincamento, como pode ser visto na figura 13.6.

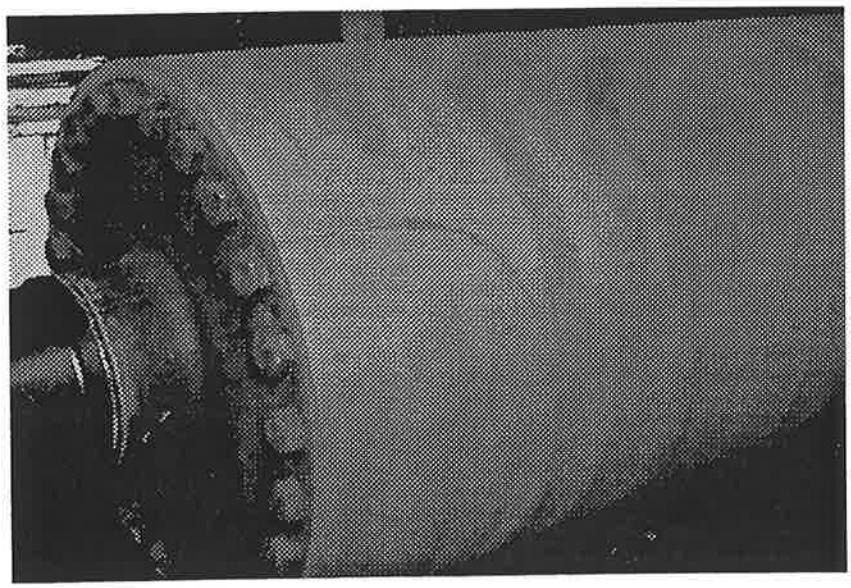


Fig. 13.6 - Efeito das tensões residuais em cilindro com revestimento experimental de 1 P&J.

Observe-se que esta contração térmica radial conduz, por um lado, à "melhor fixação" do revestimento sobre o cilindro metálico, e, por outro lado, a contração térmica axial contribui para a destruição (cizalhamento) da adesão na interface.

Neste aspecto, analisemos as tensões residuais no caso de dois cilindros metálicos com DE=320*mm* e 700*mm* (figura 13.6), ambos revestidos com 25*mm* de composto elastomérico de dureza 1 P&J.

A figura 13.7 apresenta a seqüência de medições do cilindro com DE= 320*mm*

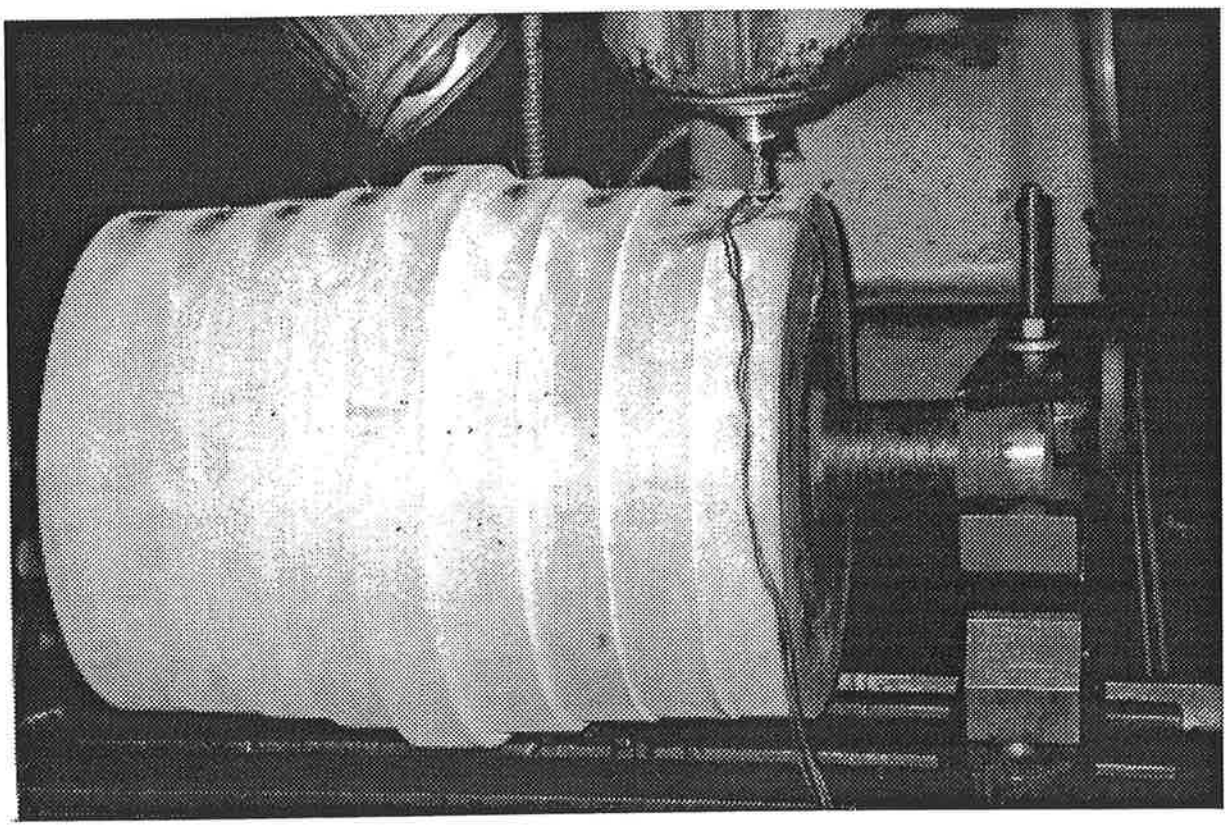
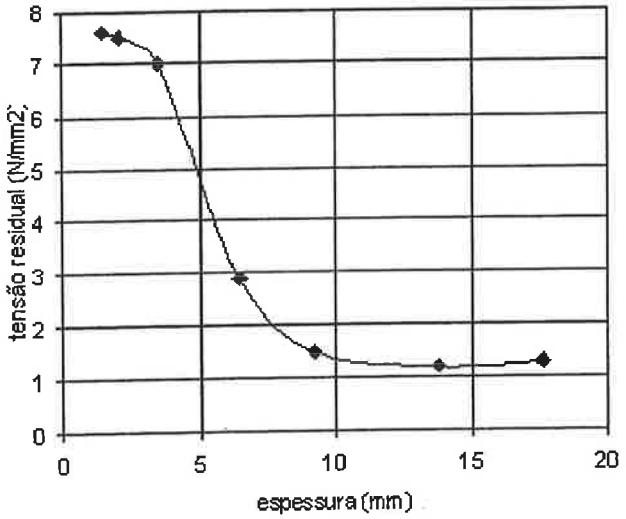


Fig. 13.7 - Medições de tensão residual no cilindro com DE= 320 *mm.*

A figura 13.8 apresenta a evolução da tensão residual (tangencial) medida no cilindro com DE= 320*mm* (por técnica análoga àquela empregada na figura 12.5.1).



OBS.: ***Extensômetro colocado sobre o revestimento e deformação medida após execução de furos próximo às duas extremidades do mesmo.*** [13.7] [13.8]

Fig. 13.8 - Valor experimental da tensão residual em cilindro (D=320*mm*), revestido com 25*mm* de composto elastomérico com dureza 1 P&J.

Tomando-se a eq. 9.3, o valor de E* para este composto de 1 P&J a 140 °C (figura 12.4.26), os coeficientes de expansão linear, respectivamente, do elastômero e do metal (capítulo 9), tem-se:

E*= 1000N/mm2 , $\Delta\alpha = 200 . 10^{-6}$ / °C , k= 0,005 m^2/h , (onde $k= \lambda / c \rho$) ,

dT / dt = 5 °C/h [com dT/ dt = (Tvulc- T amb) / t] , ν = 0,38 (capítulo 12.5)

logo : σ resid.= [(1000 * 200 *10^{-6}) / (8*0,0005 *(1-0,38)] * 0,16^2 * 7 = 10 N/mm^2

Este valor, estimado através dos "melhores dados disponíveis", aproxima-se satisfatoriamente do valor experimental de ~8 N/mm^2 (figura 13.8).

Por outro lado, para o cilindro com DE= 700*mm* onde ocorreram as trincas, (figura 13.6), os mesmos cálculos apontam para uma tensão residual de σ resid > 40 N/mm^2. Levando-se em conta que o L.R.(limite ruptura a23 °C) deste material encontra-se na faixa de 22 a 24 N/mm^2 (ASTM D638-68), a figura 13.8 resume estes aspectos.

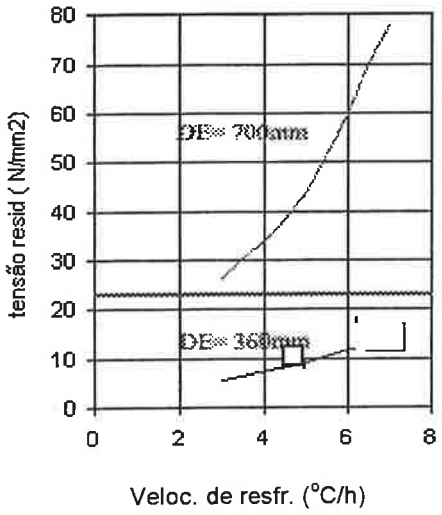


Fig. 13.8 - Efeito da velocidade de resfriamento e do diâmetro (D) sobre a tensão residual (eq. 9.1).

Observe-se que o cilindro de menor diâmetro não apresentou trincamento, pois a tensão residual estava bem abaixo do LR, ao passo que, no cilindro maior, houve trincamento devido às tensões residuais superarem o LR do composto elastomérico, denotando a importância do controle da velocidade de esfriamento, quanto maior o diâmetro do cilindro revestido. Um modelo matemático, empregando FEM, visando analisar este problema em maior profundidade, encontra-se em desenvolvimento.

Por outro lado, danos localizados, originados por impactos ou pelo "embuchamento" (isto é, passagem de excesso de papel na região do *nip* e conseqüente rompimento da folha de papel), conduzem a picos localizados de tensão, possibilitando a nucleação de defeito ou mesmo o aceleramento da sua velocidade de crescimento, conduzindo a falha por fadiga.

Este aspecto se acentua, particularmente, se houverem defeitos ocasionados por :

- Falhas de projeto: camadas mais próximas do cilindro metálico que apresentem menor dureza do que o material de revestimento de topo - deve-se objetivar uma graduação nos valores de E* desde a camada de base, intermediária e de topo no revestimento - além do correto coroamento e "alívio de extremidades" do coroamento;
- Falhas de fabricação do composto elastomérico: inomogeneidade de seus componentes (tipo, tamanho e dispersão), processamento (temperaturas que conduzam ao "*scorch*"), presença de voláteis[13.9] que conduzam a porosidades;
- Falhas de fabricação do revestimento: delaminações (extrusão ou calandragem) ou existência de elevadas tensões residuais (vulcanização);
- Falhas na aplicação final: incompatibilidade de coroamento e carga linear aplicada, resultando em pressões desiguais ao longo do cilindro metálico revestido ou, ainda, a inexistência ou insuficiência de refrigeração no revestimento conduzem ao aquecimento subsuperficial com possível deterioração acentuada (facetamento) e/ou separação da interface revestimento/metal .

À medida que as durezas são cada vez mais elevadas, nos aproximamos mais das características do cilindro metálico, indo na direção de uma condição Hertziana, na qual manifestam-se tensões máximas, subsuperficiais,[7.10] as quais conduzem ao fenômeno conhecido (na laminação de metais) por "*spalling*" (lascamento).

Nesta área de materiais de elevada dureza para revestimentos (85 A 93 Shore D) [13.6], elevadas tensões (30 a 50 Mpa) e elevadas velocidades (até 900*m/min*), possivelmente contando com a presença de "chuveiros de vapor", competem compostos elastoméricos com elevadas cargas minerais, polímeros termofixos (epoxes com fibras de aramida), compósitos e cerâmicas, que encontram aplicação

particularmente na seção de acabamento de papéis, isto é nas calandras, [13.2] os quais apresentam outros aspectos interessantes, porém ultrapassam os objetivos do presente trabalho.

3 - Cargas lineares: modelos simplificados e o modelo FEM.

Retomando o capítulo 7, em particular as eq. 7.4 e 7.2, bem como os resultados obtidos no capítulo 12.7, aplicando o FEM, a figura 13.9 resume diversos dados industriais, ilustrando que, os adimensionais, desenvolvidos por Deshpande [7.6], podem ser aplicados para cargas lineares maiores que as originalmente propostas (de 4 kN/m) .

REF	F(kN/m)	R(mm)	h(mm)	P&J	nip (mm)	nip adim.	F adim.
usina 1(USA)	280	940	23	15	66	29	1,65
usina 2 (USA)	350	762	23	16	79	57	2,52
usina 3 (USA)	280	672	23	16	69	34	1,54
usina 4 (BR)	40	405	15	10	32	12,3	0,24
usina 5 (BR)	45	430	25	10	36	5,5	0,17
usina 6 (BR)	360	750	31	12	84	24,3	1,17

Obs: nip adimensional = exp (2,35 . (nip /2h))

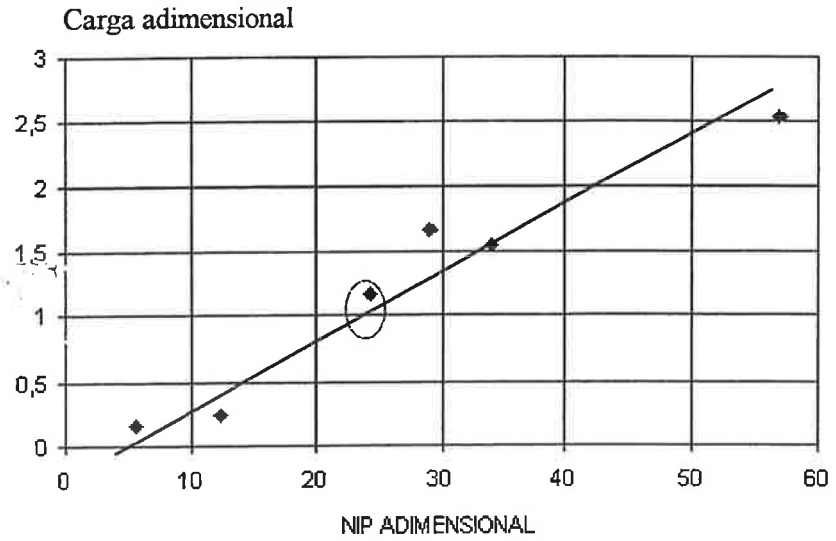


Fig. 13.9- Relação de carga e *nip* adimensionais. [7.6]
O valor associado ao do capítulo 12.7 é o indicado no círculo.

14 - CONCLUSÕES

Em prensas de máquinas de papel, o objetivo básico é o de retirar a maior quantidade possível de água contida na fibra de papel, através da aplicação de elevadas pressões em tempos de residência (no *nip*) os maiores possíveis, isto é , maximizando-se o impulso. Neste sentido, os revestimentos elastoméricos encontram-se em contínuo desenvolvimento para atenderem às cargas lineares, temperaturas e velocidades periféricas cada vez maiores, além de outras características importantes, tais como resistência à abrasão (contra o feltro e o papel), ao ataque químico (solventes), à radiação UV, boa "soltura" de folha após a saída do *nip*, acabamento superficial (rugosidade controlada) , etc.

Dada a diversidade e complexidade das formulações de compostos elastoméricos empregados em revestimentos de cilindros metálicos usados na fabricação de papel, quer devido aos requisitos do produto final, quer por razões de seu preparo (diversidade de matérias primas e sua mistura física), quer por sua processabilidade (extrusão/calandragem) e subseqüente vulcanização, às vezes com características conflitantes, os ensaios dinâmicos de caracterização destes compostos elastoméricos contribuem significativamente para o entendimento de seu desempenho, para controlar sua reprodutividade e, acima de tudo, auxiliar no "*Nip* com engenharia", efetuado através do emprego do FEM.

Dentro desta perspectiva, o presente trabalho possibilitou obter-se as seguintes conclusões:

1- *Quanto a característica dinâmica dos compostos elastoméricos*

1.1 - A característica dinâmica de cada composto elastomérico é expressa através da relação existente entre a tensão, deformação, freqüência e temperatura de ensaio, que deve ser realizada de modo que se aproximem das condições reais de uso final. Como decorrência destas variáveis surgem outras, tais como o módulo complexo (E*), elástico (E'), e viscoso (E") , perda histerética específica (Wd / Wfh), além de outros que visam avaliar o caráter termoviscoelástico do composto elastomérico.

Através destes, estabelece-se o conhecimento de outra característica denominada "estabilidade do composto", avaliada através da mudança destas propriedades, em função do aumento da temperatura e/ou da freqüência.

1.2 - Para determinado nível de tensão, os compostos elastoméricos obedecem a relação de WLF- Williams-Landel-Ferry - que estabelece a equivalência entre freqüência e temperatura.

1.3 - A relação entre dureza (medida estática, por penetração de esfera ou ponta), e a característica dinâmica do composto elastomérico não é linear, pois esta depende da freqüência e temperatura de ensaio.

1.4 - Compostos elastoméricos são indeformáveis, portanto o seu coeficiente de Poisson é próximo de 0,5. Para compostos elastoméricos de maior dureza (1P&J) , a presença de cargas minerais e agentes de vulcanização altera esta característica, levando este coeficiente para 0,38.

1.5 - Ensaios dinâmicos permitem avaliar a influência de modificações na formulação, nas matérias-primas, bem como nas condições de

processamento, visando analisar a reprodutividade e/ou melhoria de propriedades físicas dinâmicas.

1.6 - A reprodutividade no ensaio dinâmico está associada ao estabelecimento de condições tais que não conduzam ao aquecimento adiabático (devido a grandes deformações, freqüências ou temperaturas).

1.7 - As características dinâmicas do composto elastomérico são ponto de partida para a execução de modelos FEM de componentes simples (ensaio de tração, compressão) ou complexos (no presente trabalho, relativo a revestimentos de cilindros metálicos) .

2 - *Quanto ao modelamento FEM do composto elastomérico*

2.1 - De posse das características dinâmicas, o FEM permite avaliar forças, deslocamentos, tensões e deformações no composto elastomérico (de característica não-linear), em componentes simples ou complexos, isolada ou conjuntamente com substratos metálicos. Esta avaliação, embora aproximada (não exata), permite uma estimativa bastante detalhada (mesmo com um número baixo de elementos) das condições locais, muitas vezes difícil de ser obtida pelos métodos analíticos ou semi-empíricos convencionais.

2.2 - A presença de furações (ou ranhuras) no revestimento elastomérico implica em alterações nas suas características dinâmicas, passíveis de serem avaliadas através da "regressão", partindo-se do modelo FEM validado para a condição onde a furação (ou ranhura) não esteja presente.

3 - *Quanto ao modelamento FEM do revestimento e do cilindro metálico*

3.1 - O modelo FEM do cilindro revestido, com base no conhecimento das características dimensionais, materiais e de carregamento do conjunto revestimento+ cilindro metálico, permite obter informações quanto à : largura de *nip*, distribuição de pressões ao longo do *nip* e ao longo do comprimento do cilindro (largura da folha), carga linear e total.

3.2 - O efeito do coroamento do revestimento sobre a distribuição da pressão pode ser avaliada levando-se em conta reduções na espessura no revestimento (por retíficas sucessivas de recondicionamento até a espessura de "fim de vida útil"), ou no próprio cilindro metálico (por diminuição da espessura da parede do cilindro metálico, devido às usinagens sucessivas por ocasião da remoção de revestimentos desgastados).

3.3 - Alterações de condições operacionais, seja por aumento de velocidade, de carregamento linear ou, ainda, de aumento de temperatura operacional, podem ser avaliadas, bem como podem ser analisadas as prováveis causas de falhas.

3.4 - A validação dos modelos é efetuada através da medição dinâmica do *nip*, com o auxílio de filme sensível, previamente calibrado.

3.5 - As deflexões elásticas do cilindro metálico são "compensadas" pelo coroamento efetuado no revestimento elastomérico. Para carga lineares elevadas, além da deflexão linear "tipo viga", é necessário incluir o "achatamento" na região de contato, pois esta pode tornar-se parcela preponderante no cálculo do coroamento final .

3.6 -O modelo FEM de cilindro de prensa úmida de máquina de papel, revestido com elastômero dotado de furação "cega", em conjunto com as características dinâmicas do composto elastomérico (corrigidas pela presença da furação), empregando mesmo um número reduzido de elementos (< 48), possibilitou efetuar-se a análise nos diferentes pontos do conjunto revestimento/interface/cilindro metálico, relativo às forças, tensões, deslocamentos, informações de difícil obtenção por equações analíticas convencionais, ou ainda, semi-empíricas.

3.7 - Equações semi-empíricas, adimensionais, auxiliam na determinação da "ordem de grandeza " das forças, *nip* e deslocamentos envolvidos.

4 - *Quanto aos compostos elastoméricos de alta dureza e respectiva tensão residual.*

4.1 - Compostos elastoméricos de elevada dureza (1 P&J) apresentam elevada tensão (tensão residual de tração, favorecendo o "ancoramento" do revestimento no cilindro metálico), em função da velocidade de esfriamento após a vulcanização, bem como da presença de componentes que propiciem a formação de ligações cruzadas tridimensionais. A presença de Fe + FeS na interface metal/composto elastomérico pode estar interferindo na qualidade da adesão por reação química .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Capítulo 1

1.1- GUERON, R.- "*Investimentos de Capital* ", Revista "O Papel". ABTCP, Associação Brasileira de Celulose e Papel, pp. 79-85,set. 1998.

1.2- Revista "*O Papel* ". ABTCP, p. 16,set. 1998.

1.3- BARROTTI, S.L.B.- *"Celulose e Papel* ". Vol. II, cap. VIII, IPT/Senai, pp. 843-855.

Capítulo 2

2.1- PIRES, F.S; KUAN, G.S.S.- "*Celulose e Papel* ". Vol. II, cap. III, IPT/Senai, pp. 657-741.

2.2- WICKS,L.D. -"*Pratical Aspects of Pressing and Drying*". TAPPI Press, pp.1-21, 1992.

2.3- RODAL, J.-"*Soft Nip Calendering Of Paper And Paperboard*" . TAPPI J., pp. 177-186, maio 1989.

2.4- PARISH , G.J.-"*Measurements Of Pressure Distribution Between Metal Rubber And Rubber Covered Rolls*". British J. of Appl. Physics, v. 9, pp. 158-161,1958.

2.5- PARISH,G.J.-"*Calculation Of The Behaviour Of Rubber Covered Pressure Rollers*". British J. of Appl. Physics, v.12, pp. 333-336, 1961.

2.6- MC NAMARA, J. ; HINTERMAIER, J.C.-"*Nip Region Pressure Gradient Measurement*". TAPPI J., v. 47, n. 4, pp.199-204, Dec. 1964.

2.7- MC NAMEE, "*A Study Of Rubber Covered Press Roll Nip Dynamics*". Tappi, v.48, n.12, pp. 673-679, Dec. 1965.

2.8- MAC GREGOR, M. - "*Pressure Profiles In A Press Nip : The Roll Of Th Wet Felt*". TAPPI J., v. 60, n. 7, pp. 86-88, Jul. 1977.

2.9- SMOOK, G. -*"Handbook For Pulp And Paper Technologists*". Angus Wilde/Tappi,1997.

2.10- WAHLSTROM,P.B.-"*Our Present Understanding Of The Fundamentals Of Pressing*". Pulp and Paper Mag. of Canada, pp. 76-95, Oct. 3, 1969.

2.11- SPENGOS, A. C. J.- "*Experimental Investigation Of Rolling Contact* ". J. of Appl Mech-Trans ASME, pp. 859-864, Dez. 1965.

2.12- ROISUM, D.R. - "*The Mechanics Of Rollers*". Tappi Press, 1996.

2.13- "*The Paper Machine Wet Press Manual* ". Tappi Press, pp. 52,1991.

2.14- "*Roll Covering Handbook*". The Rubber Manufacturers Association, RMA,1980.

2.15- REESE, R. A.- "*Pulp and Paper Manufacture*". Paper Machine Operations, Tappi Press, v.7, cap. XI, Tappi Press, pp. 261-28, 1991.

2.16- KENNEDY, W. B.- "*Nip Impressions*". TAPPI J., pp. 277-280, May 1991.

2.17- MC NAMEE- "A *Study Of Rubber Covered Press Roll Nip Dynamics*". TAPPI J., v. 48, n.12, pp. 673-679, Dec. 1965.

2.18- GUDEHUS, T.- "*Entwässerungsprofile für Presswalzen*". Wochenblatt für Papierfabrikation, v. 16, pp. 699-717, 1987.

2.19- BECK , D.A.-"*Dynamic properties of paper machine wet felts in a press nip*". Tappi, Eng. Conf. Proc., book 1, pp.181-187, 1980.

2.20- *MC* GREGOR, M. A. - *"Practical Aspects of Pressing and Drying*". Tappi Press, pp. 41-68, 1988.

2.21- YESKE, R. -"*Corrosion Fatigue Testing Of Suction Roll Alloys*". Tappi J. , pp. 47-53,Mar. 1988.

2.22- REID, D.C.;WENSLEY, D.A.- "*Eletrochemical Corrosion Testing Of Duplex Stainless Steel Suction Roll Alloys*" .TAPPI J., pp. 57-61, Mar. 1989.

2.23- GARNER, A - "*Corrosion In The Pulp And Paper Industry*". Metals Handbook, 9ª. ed., pp. 1186-1208.

Capítulo 3

3.1- ANEMA, J.; CLARKE, B.- "*The Cause And Cure Of Press Section Vibrations*"- TAPPI J. , pp. 58-61, Mar. 1984.

3.2- CHARLES, J. A. - "*Pulp and Paper Manufacture* ". Paper Machine Operations, v.7, cap. XXIV, Tappi Press, pp. 615-639, 1991.

3.3- YAEGER, R. -"*Runnability Monitoring System Measures More Than Vibrations*" . American Paper Maker, pp. 26-28, Apr. 1989.

3.4- DEN HARTOG, J. P.- "*Vibrações nos sistemas mecânicos*". Ed. E. Blucher/ EDUSP,1972.

3.5- 0SWALD, M.-"*Measures To Limit Vibration Of Papermachine And Basements With Increasing Velocities*". Wochnbl. Papierfabrication, v.113, n.5, pp. 170-177, Mar., 1985.

3.6- BECK, D. A.-"*Finding Press Section Vibration Sources Using Synchronous Averaging* " - TAPPI J., v.73, n.9, pp. 199-204, Set .1990.

3.7- PLAUT, R.L.; SOTELO J.; PORCHIA, L.F.- "*Sistema De Diagnose Em Manutenção Preditiva De Prensas De Máquinas De Papel* ". I - Interpretação de dados. O Papel, v. 56, n. 10, pp. 51-53, out .1995.

3.8- PLAUT, R.L.; SOTELO, J.; PORCHIA, L.F.- "*Sistema De Diagnose Em Manutenção Preditiva De Prensas De Máquinas De Papel* ". II - Metodologia proposta. O Papel, v. 56, n. 11, pp. 76-81, nov. 1995.

3.9- SOTELO, J.; PLAUT R.L.; PORCHIA, L.F.- "*Sistema De Medição De Vibração: Análise Comparativa De Algumas Técnicas Atuais* ".O Papel, v .57, n. 10, pp. 50-56, out.1996.

3.10- SOTELO, J.; PORCHIA, L.F.; PLAUT, R.L. - "*Simulador De Prensas Aplicado Ao Desenvolvimento De Sistemas Especialistas De Diagnose Em Manutenção Preditiva*". O Papel, v. 57, n. 8, pp. 62-64, ago. 1996.

3.11- PLAUT, R. L.; SOTELO, J.; PORCHIA , L.F.- "*Transmissão De Vibração : Uma Característica Fundamental Na Performance De Rolos De Prensas* ". O Papel, v. 59, n. 5, pp. 66-70, mai. 1998.

3.12- PLAUT, R.L.; SOTELO, J.; PORCHIA, L.F.- "*Resultado De Estudo Em Cilindros e Sua Relação Com a Análise De Vibração Na Indústria Papeleira* ". Anais, XXVI Congresso AnuaL, ABTCP, pp. 311-319, nov. 1993.

3.13- PLAUT, R.L.; SOTELO, J.; PORCHIA, L.F.-"*Medição De Vibrações: Alternativa Ao Método Da Média Síncrona No Tempo* ". Anais, XXVI Congresso Anual, ABTCP, pp. 265-271, nov. 1993.

3.14- SOTELO J.; PORCHIA, L.F.; PLAUT, R.L.-"*Simulador De Prensas Aplicado Ao Desenvolvimento De Sistemas Especialistas De Diagnose Em Manutenção Preditiva* ". Anais, XXVIII Congresso Anual, ABTCP, pp. 453-458, nov. 1995.

3.15- SOTELO, J.; PLAUT, R.L.; PORCHIA, L.F.-"*Sistemas De Medição De Vibração : Análise Comparativa De Algumas Técnicas Atuais*". Anais, XXVIII Congresso Anual - ABTCP, pp. 459-467, nov . 1995.

3.16- SOTELO, J.; PORCHIA, L. F.; PLAUT, R.L.- *"Vibration Measurements: An Alternative Method To The Synchronous Average Technique* "- Proc. Eng. & Papermakers Conf., Tappi, Nashville, USA, pp. 1323-1326, out. 1997.

Capítulo 4

4.1- KINLOCH, A. J.; YOUNG, R.J.- "*Fracture Behaviour of Polymers*". Chapman & Hall, p.7, 1983.

4.2- HAMED, G. - *"Engineering with Rubber"*- Ed. Gent AN , Hanser Publ., pp. 13-19,1992.

4.3- MACCANI, R. - "*Enginnered Materials Handbook*". Vol. 1,"Composites", ASM, p. 68,1987.

4.4- MORTON; JONES, D.H.- "*Polymer Processing*". Chapman Hall,cap. 10, p.185, 1995.

4.5- SCHAKELFORD , J.F.-"*Introduction To Materials Science* ". Prentice Hall, 4ª. ed. , pp. 480-482, 1996.

4.6 - PADILHA, A. F. - *"Ciência dos Materiais"*, PMT-EPUSP, p. 198, 1997.

4.7- ASHBY, M.F.; JONES, D.R.H. - "*Engineering Materials 2* "- Pergamon Press, 1994, pp. 209-231.

4.8- GENT, A. N. et al. - "*Enginnering with Rubber*". Hanser Publ., p. 326, 1992.

4.9- MORTON, M. - "*Rubber Tecnology*" . Van Nostrand Reinhold Co. , p.4, 1987.

4.10- "*1993- Blue Book*". Rubber World Mag. Lippincott & Peto P. publ. , 1993.

4.11- HOFMANN, W.- "*Rubber Technology Handbook*".Hanser Publ., pp. 230-451,1989.

4.12- CORAN, A. Y. - "*Science and Technology of Rubber*" . Ed. Eirich F. R ., Academic Press, p. 295, 1978.

4.13- "*The Vanderbilt Rubber Handbook*".Ed. Babbit R. O., R.T. Vanderbilt Co., pp. 364-380, 1978.

4.14- MORTON, M.- "*Rubber Technology*" , Van Nostrand Reinhold Co., pp. 1-150, 1987.

4.15- CORAN, A. Y. - "*Vulcanization: conventional and dynamic*". Rubber Chem. and Tech., v. 68, n. 3, pp. 351- 375, jul-ago, 1995.

4.16- BHOWMICK, A.- Mangaraj D.- *"Rubber Products Technology"*, M. Dekker, 1994, p 337.

4.17- FRANTA , I.- "*ELastomers and Rubber Compounding Materials* "- Elsevier Publ., pp. 379, 1989.

4.18- MEDALIA, A.- "*Mixing and Compounding of Polymers*". Ed. Manas-Tadmor, Hanser Publ., cap. 15, pp. 493- 551, 1994.

4.19- LEE, B.L.- *"Mixing and Compounding of Polymers"* .Ed. Manas- Tadmor, Hanser Publ., cap. 17, pp. 549-605, 1994.

4.20- Webster - Dicionário Inglês- p 420

4.21- "*The Vanderbilt Rubber Handbook*".Ed. Babbit R. O. , R .T. Vanderbilt Co., p. 550, 1978.

4.22-ANDREWS, R. D. -"*Correlation Of Dynamic And Static Measurements Of Rubberlike Materials* ". Rubber Chem. and Tech., ACS, pp. 730-751, Set.1951.

4.23- GARDINER, R. A . - "*Basic Compounding And Processing Of Rubber*". Ed. Long H. , ACS, Rubber Div. , pp. 156-67, 1985.

4.24- GENT, A.N.- "*Engineering With Rubber*" - Ed. Gent A. N., Hanser Publ., pp. 67-91, 1992.

4.25- GRUBER, T.C. et al. -"*3D Morphological Characterization Of Carbon Black Aggregates Using Transmission Electron Microscopy*", Rubber Chem. Tech. , v.67, n.2, pp. 280-287, Mai.-Jun. 1994.

4.26- ZERDA ,T.W. et al.- "*The Effects Of Heating And Cooling Rates On The Structure Of Carbon Black Particles*". Rubber Chem. Tech., v.71, n.1 , pp. 26-37, Mar.-Abr. 1998.

4.27- BRYDSON, J. A .- "*Rubber Chemistry*"- Appl. Science Publ. , pp. 66-105, 1978.

4.28- CORAN, A.Y. BONNET, J.B.-"*The Dispersion Of Carbon Black In Rubber*". Rubber Chem. Tech., v. 65, n. 5 , pp. 973-1041, Nov.-Dec. 1992.

4.29- ROUWENDAAL, C. -"*Polymer Extrusion*". 3ª. ed., Hanser Publ., 1994.

4.30- CALLISTER, W. -"*Materials Science and Engineering*".3ª. ed., John Wiley, p. 487, 1994.

4.31- CHEREMISINOFF, N.- *"Elastomer Technology Handbook*". CRC Press, pp. 476-487, 1990.

4.32- WOLFF, S. et al.- "*Filler - Elastomer Interactions*". Rubber Chem. Tech., v. 66, n.2, pp.163-195, Mar.-Jun. 1993.

4.33- NIEUWENHUIZEN, P. J. et al. -"*Thiuram And Dithiocarbamide -Accelerated Sulphur Vulcanization*". Rubber Chem. Tech. , v. 70 , n. 3 , pp. 368-423, Jul.-Ago. 1997.

4.34- KOBATAKE, T. et al. -"*Improvement Of Low- Tempeture Flexibility Of Hydrogenated Nitrile-Butadiene Rubber*"- Rubber Chem. Tech. , v. 70, n. 5 , pp. 839-870 , Nov.- Dec. 1997.

Capítulo 5

5.1- PROGELHOF, R.; THRONE, J. -"*Polymer Eng. Principles*". Hanser Publ., p. 623, 1993.

5.2- HOFMANN, W.- "*Rubber Technology Handbook*". Hanser Publ., p. 5,1989.

5.3- GENT, A .N. et al. - "*Enginnering With Rubber*". Ed. Gent A.N., Hanser Publ., p. 86, 1992.

5.4- KRAMER, O. ; FERRY, J. D. - "*Science and Technology of Rubber*" . Ed. Eirich, F.R., Academic Press, pp.180-220, 1993.

5.5- FERRY, J.D. -"*Viscoelastic Properties Of Polymers*". 3ª. ed. , John Wiley , pp. 264-316, 1980.

5.6- WARD, I.M.- "*Mechanical Properties Of Solid Polymers*". 2ª. ed., John Wiley, p. 97,1990.

Capítulo 6

6.1- REDDY, J.N. -"*An Introduction to the Finite Element Method* " - Mc Graw Hill Publ., 2ª ed., pp. 1-16.

6.2- LOGAN , D.L.- "*A First Course in the Finite Element Method* ".PWS -Kent Publ.Co. , pp. 3-47, 1986.

6.3- COOK , R.D. ; MALKUS, D.S.; PLESHA, M.E.-"*Concepts and Applications of Finite Element Analysis*". John Wiley and Sons, pp. 1-57, 1989.

6.4- "*Cosmos/m*" . Structural Research & Analysis Corp., 2ª ed., Ver. 1.71, 4 volumes, 1994 .

6.5- CHARLTON, D.J.;YANG, J. -"*A Review Of Methods To Characterize Rubber Elastic Behavior For Use In Finite Element Analysis* " - Rubber Chem. Tech., pp. 481-503, Jul.-Ago. 1994.

6.6- DAVIES, C.K.; THOMAS, A .G. et al.- "*Characterization Of The Behavior Of Rubber For Engineering Design Purposes*". Rubber Chem. Tech , pp.716 -728, Set.- Out. 1994.

6.7- FINNEY, R.; KUMAR, A . - "*Development Of Material Constants For Nonlinear Finite Element Analysis*" . Rubber Chem. Tech., pp. 879-891, Set.- Out. 1988.

6.8- YEOH, O .H. - "*Some Forms Of The Strain Energy Function For Rubber* "- Rubber Chem. Tech., pp. 754-771, Nov.- Dez. 1993.

6.9- JOHNSON, A .R. et al. - "*Large Strain Viscoelastic Constitutive Models For Rubber* " Rubber Chem. Tech., pp. 904-916, Nov.- Dez. 1994.

6.10- "*Vibration and Shock Theory* ". Lord Aerospace Products-USA , pp.1-132, 1990.

6.11- FINNEY, R.H. -"*Engineering With Rubber* ". Ed. Gent A. ,Hanser Publ., cap. 9, pp. 23 - 278, 1992.

6.12- BATRA, R.C. - "*Rubber Covered Rolls- The Non-Linear Problem*". Trans ASME, v. 47, pp. 82-86, Mar 1980.

6.13- MOORE, R.H.; MOSHEL, C.C.- "*A Tool for The Engineered Nip*". Tappi Eng. Conf., pp. 749-756, 1993.

6.14- RODAL, J. - "*Modelling The State Of Stress Ans Strain In The Soft-Nip Calandering*" . In "Fundamentals of Paper Making- 9 th. Fundam. Research Symp. ", Mech. Eng . Publ. London , pp. 1050-1075, 1989.

6.15- GENT, A .N. et al. - "*Crack Growth In Twisted Rubber Disks*"- Rubber Chem. Tech ., v. 71, n. 1, pp. 76-94, Mar.-Abr. 1998.

6.16- FUKAHORI, Y. et al. - "*Mass Transfer In Compression Reep Of Bonded Rubber Blocks*". Rubber Chem. Tech. , v. 69, n .5 , pp. 752-768, Nov.-Dec. 1996.

6.17- SANTANGELO, P.G. ; ROLAND, C.M.- "*The Mechanical Behavior Of Double Network Elastomers*", v. 67, n.2, pp. 359-365, Mar.-Jun. 1994.

Capítulo 7

7.1- PARISH, G. J. -"*Measurements Of Pressure Distribution Between Metal And Rubber Covered Rolls*" - Brit. J. Appl. Phys., v.9 , pp. 158-161, Abr. 1958.

7.2- BENTALL, R.H.; JOHNSON, K.L.- "*Slip In The Rolling Contact Of Two Dissimilar Elastic Rollers*". Int. J. Mech .Sci., v. 9 , pp. 389-404, 1967.

7.3-BENTALL, R.H.;JOHNSON, K.L.-"*An Elastic Strip In Plane Rolling Contact*". Int.J.Mech. Sci., v .10, pp. 637-663, 1968.

7.4- JOHNSON, K.L. et al. - "*Surface Energy And The Contact Of Elastic Solids* ". Proc. R .Soc. Lond., v. A -324, pp. 301-313, 1971.

7.5- SPENGOS, A .C. - *"Experimental Investigation Of Rolling Contatc*". J. Appl. Mech., Trans. ASME, pp .859-864, Dez. 1965.

7.6- DESHPANDE, N.V.- "*Calculation Of Width, Penetration And Pressure For Contact Between Cylinders With Elastomeric Covering* ". TAPPI J., v.61 , n. 10 , pp.115 -118, 1978 .

7.7- PARISH, G. J.- "*Measurement Of Pressure Distribution Between Metal And Rubber Covered Rollers*". Brit.J.Appl. Mech., v .9, pp.158-161, Abr. 1958.

7.8- PARISH, G. J.- "*Calculation Of The Behaviour Of Rubber Covered Pressure Rollers*" . Brit. J. of Appl. Physics, v. 12, pp. 333-336, Jul. 1961.

7.9- BENTALL, R.H.; JOHNSON , K.L.- *"Slip In The Rolling Contact Of Two Dissimilar Elastic Rollers*". Int. J. Mech. Sci., v.9 , pp. 389-404, 1967.

7.10- BENTALL, R.H. ; JOHNSON, K.L.- "*An Elastic Strip In Plane Rolling Contact* ". Int. J. Mech . Sci, v .10, pp. 637-663, 1968.

7.11- BLAKKETTER, D.O.; CHRISTENSES, H.D.- "*Contact Stress Between Two Dimensional Finite Elastic Bodies*". J. of Appl. Mech .Trans. ASME, pp. 397-402, Set. 1969.

7.12- BATRA, R.C. -"*Rubber Covered Rolls- The Non-Linear Problem*" -Trans. ASME, v.47, pp. 82-86, Mar 1980.

7.13- BATRA, R.C . - "*Finite Plane-Strain Deformations Of Rubber Like Materials*"- Int.J.of Num. Methods in Engineering, v.15, pp.145-160, 1980.

7.14- MOORE, R.H.; MOSHEL, C.C.- "*A Tool For The Engineered Nip*" .TAPPI Eng. Conf., pp. 749 -756, 1993.

7.15- RODAL, J.- "*Modelling The State Of Stress Ans Strain In The Soft-Nip Calandering*" . In "Fundamentals of Paper Making - 9 th Fundam. Research Symp."- Mech. Eng. Publ. London, pp. 1050 -1075, 1989.

7.16- RODAL, J. -"*Soft Nip Calendering Of Paper And Paperboard*" - TAPPI J., pp. 177-186, Mai. 1989.

7.17- RODAL, J. - "*Paper Deformation In A Calendering Nip*" .TAPPI J., v.76, n.12, pp. 63 -74, Dez. 1993.

7.18- SWAIN, G. - "*Behavior Of Press Felts In Compression* ". Proc. Int. Conf. TAPPI, Book 1, pp. 53-61, 1980.

7.19- WIKSTROM, M.; RIGDAHL, M. et al - "*Finite Element Modelling Of Calendering - Some Aspects Of The Effects Of Temperature Gradients And Structure Inhomegeneities*". J. Mat. Science, pp. 3159-3166, 1996.

Capítulo 8

8.1- "*Engineered Materials Handbook* ". Vol. 3, Adhesives and Sealants, ASM.

8.2- HARTSHORN, S.R.- "*Structural Adhesives - Chemistry and Technology*". Plenum Press, p. 65, 1986.

8.3- GENT, A. N. ; HAMED, G.R. - "*Fundamentals of Adhesion*" in *Handbook of Adhesives* - Ed. SKEIST, I., Van Nostrand Reinhold , 3ª ed. , pp. 39-69, 1990.

8.4- LANDROCK, A. L.- "*Adhesive Technology Handbook* ". Noyes Publ., pp. 1-11, 1985.

8.5- PETRIE, E.M.- "*Handbook of Plastics, Elastomers and Composites*". Ed. Harper, Cap. 9, Mc Graw Hill, pp. 1-23, 1992.

8.6- "*Engineered Materials Handbook*". V. 3, Adhesives and Sealants, ASM, pp. 325-334.

8.7- VAN OOIJ, W.J.- *"Fundamental Aspects Of Rubber Adhesion To Brass-Plates Steel Tire Cords*". Rubber Chem. and Tech., v. 52 , n. 3, pp. 605 -675, 1979.

8.8- VAN OOIJ , W.J.-"*Mechanism And Theories Of Rubber Adhesion To Steel Tire Cords- An Overview*". Rubber Chem. and Tech., v .57 n. 3, pp. 421- 456, 1984.

8.9- VAN OOIJ , W.J.; BIEIMOND, M.E.F .-*"A Novel Class Of Rubber To Steel Wire Cord Adhesion Promoters*". Rubber Chem. and Tech., v. 57 , n. 4 , pp. 686-702, 1984.

8.10- VAN OOIJ, W.J.; RANGARAJAN, V. -"*Interfaces Between Natural Rubber And Metals- Part 1"* . Rubber Chem. and Tech., v. 61 , pp. 594-608, 1988.

8.11- VAN OOIJ, W.J.; NAHMIAS, M.-"*Surface Characterization Of Rubber By Secondary Ion Mass Spectrometry*" . Rubber Chem. and Tech., v. 62, pp. 656-682, 1989.

8.12- VAN OOIJ , W.J.; GIRIDHAR, J. ; AHN, J.H.- *"Review Of Recent Advances In Bonding Rubber To Steel Tire Cords*" . Kautschuk+Gummi Kunststoffe, v. 44, n.4, pp. 348-359, 1991.

8.13- ZELLNER, A .- *"Rubber-to-metal bonding* ". Rubber Tech. Int., pp.100-104, 1992.

Capítulo 9

9.1- KING, D. ; BELL, J.P.- "*Thermal Stress Development In Thick Epoxy Coatings* " In "*Cross Linked Polymers - Chemistry, Properties And Applications* ". ACS., Ed . Dickie, Labana, Bauer, cap. 16, pp. 221- 236, 1989.

9.2- CHEATHAM, J. -"*Polyurethane Roll Covers For The Paper Industry*". Rubber World, pp.14-22, Set. 1988.

Capítulo 12

12.1- TREOLAR, L.G.R., Trans. Faraday Soc., p. 59, 1944.

12.2.1- CHEN, J. et al.- *"Large Deformation Contact Analysis Of Elastomers"*. Rubber Chem. Tech., v. 71, n.2, pp. 191-213, Mai.- Jun. 1998.

12.5.1- FINNEY, R.H.- "*Engineering With Rubber*". Ed. GENT, A .N. , Hanser Publ., p .243 , 1992.

12.5.2- GENT, A .N. - *"Science and Technology of Rubber"* . Ed. EIRICH, F.R., Academic Press, 1978.

12.5.3- RODAL, J. - "*Soft Nip Calendering Of Paper And Paperboard* " . TAPPI J., pp. 177-186, Mai. 1989.

12.5.4- WYATT, O .H.; HUGHES, D.- *"Metal, Ceramics and Polymers* ". Cambridge Univ. Press., 1991, p. 308.

12.8.1- "*Binary Phase Diagrams*", in "*Metals Handbook*". ASTM, 10ª. ed., p. 201.

Capítulo 13

13.1- BULLERWELL, A . et al.- *"Development Of An Engineered Nip"*. TAPPI Papermaker Conf. , pp. 105 -111, 1980.

13.2- PROGELHOF, R.C.; THRONE, J. L.- "*Polymer Engineering Principles*". Hanser Publ., p. 109, 1993.

13.3- RODAL, J.- "*Roll Covers In Soft Nip Calendereing And Supercalendering*". TAPPI Proc. Finish and Converting Conf., pp. 1-14, 1995.

13.4- "Manual de Operação do DSC-5". Shimadzu, pp. 13-15.

13.5- COURTER, J. L.- "*Engineering Mat. Handbook*". V. 1, "*Composites*", ASM. pp. 779-780, 1989.

13.6- LAUTERBACH, T.J.- "*Synthetic Composite Covers In Supercalenders: Update*" . TAPPI J., v. 76, n.6, pp.115-119, 1992.

13.7- RENDLER, N.J.; VIGNESS, I. -"*Hole Drilling Strain Gage Method Of Measuring Residual Stress*". Experim. Mech., pp. 577-586, Dez. 1966.

13.8- ASTM E 837-95- "*Standard Test Method For Determining Residual Stresses By The Hole-Drilling Strain Gage Method* ".

13.9- KASNER, A.; MEINECKE, E.A .- "*Porosity In Rubber, A Review*". Rubber Chem. Tech., v. 69, n.3, pp. 424-440, Jul.-Ago. 1996.