

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO

MON
620.17
0482
TEC/MEM

**ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM
DO COMPORTAMENTO MECÂNICO
NO REGIME INELÁSTICO-ANELÁSTICO
DE MISTURAS DE RESINA DE POLIÉSTER**

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por:

LUIZ CLAUDIO OLIVEIRA

como parte dos requisitos para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Mecânica

SISBI/UFU



1000197440

Aprovada por:

Prof. Dr. Henner Alberto Gomide - (UFU) Orientador
Prof^a. Dr^a. Raquel Santini Leandro Rade - (UFU) Co-Orientadora
Prof. Dr. Flaminio Levy Neto - (UnB)
Prof. Dr. Perrin Smith Netto - (PUC-MG)
Prof^a. Dr^a. Sonia A. Goulart de Oliveira - (UFU)
Prof. Dr. Valder Steffen Júnior - (UFU)

Aos meus pais, às minhas irmãs, e aos meus sobrinhos, que fazem tudo valer a pena.

Agradeço imensamente à orientação do Prof. Henner Alberto Gomide e à co-orientação da Prof^a Raquel Santini Leandro Rade, que foram os guias e mentores seguros deste trabalho; agradeço ainda ao apoio financeiro do CNPq e da FAPEMIG, elemento fundamental para a pesquisa e o desenvolvimento da tecnologia.

**ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM
DO COMPORTAMENTO MECÂNICO
NO REGIME INELÁSTICO-ANELÁSTICO
DE MISTURAS DE RESINA DE POLIÉSTER**

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
SIMBOLOGIA	xii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xx
RESUMO (em Esperanto)	xxi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
PARTE I: TENSÕES E DEFORMAÇÕES	
3. TENSÕES E DEFORMAÇÕES ALÉM DO LIMITE DE ELASTICIDADE	19
3.1- Elasticidade, Inelasticidade, Anelasticidade	19
3.2- Estudo do Diagrama Tensão-Deformação através de "Quantidades Componentes"	25
4. FORMULAÇÕES DA PLASTICIDADE E VISCOPLASTICIDADE	36
4.1- Fundamentos Teóricos	36

4.2- Critérios de Plasticidade e Viscoplasticidade	38
4.3- Teorias Matemáticas da Plasticidade e Viscoplasticidade	39
4.4 Formulações de Lemaitre e Chaboche	40

PARTE II: MATERIAIS

5. AS RESINAS E SUAS MISTURAS	43
5.1 Estrutura Química Básica	43
5.2 Composição Química versus Arquitetura Molecular	45
5.3 Resposta do Material a Mudanças na Temperatura	45
5.4 Materiais Amorfos para Modelagem	46
5.5 Resinas Termorrígidas e Resinas Termoplásticas	47
5.6 Formação de Macro-moléculas Tridimensionais	48
5.7 Misturas	49
5.8 Propriedades de Modelagem dos Materiais Ópticamente Sensíveis	50
5.9 Casos Específicos: Alguns Materiais e suas Características	51
6. FOTOPLASTICIDADE	53
6.1 Bases Físicas da Fotoplasticidade	53
6.2 Teorias da Fotoplasticidade Plana	59

PARTE III: ENSAIOS E RESULTADOS

7. ENSAIOS CARACTERIZADORES	65
7.1 Tipos de Ensaio Realizados	65
7.2 Ensaio de Fluência e Relaxação	66
7.3 Ensaio de Tração com Relaxações Múltiplas	70

7.4 Ensaio de Tração Monotônico	72
7.5 Viscoplasticidade sem um Domínio Elástico Inicial	73
7.6 Ensaio Cíclico	74
7.7 Ensaio Ótico	74
8. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E METODOLOGIA DE FORMULAÇÃO	77
8.1 Material	77
8.2 Equipamento de Ensaio	79
8.3 Metodologia de Ensaio e de Formulação	86
9. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	100
9.1 Ensaio Preliminares de Sensibilidade à Relaxação	101
9.2 Ensaio Preliminares de Sensibilidade à Temperatura, à Taxa de Deformação e à Proporção de Resinas	104
9.3 Ensaio Sistemáticos de Encruamento com Relaxações Múltiplas	110
9.4 Fluência Numérico-Experimental	120
9.5 Ensaio Cíclicos	123
9.6 Ensaio Óticos	125

PARTE IV: MODELAGEM

10. MODELAGEM: PARÂMETROS CARACTERIZADORES DO COMPORTAMENTO	133
10.1 Parâmetros de Caracterização da Tração	135
10.2 Parâmetros de Caracterização da Relaxação	140
10.3 Determinação da Fluência	141
10.4 Descrição do Comportamento Cíclico	144
10.5 Modelo Final e Coeficientes para Planejamento de Ensaio	146

10.6 Visualização Gráfica das Formulações	153
10.7 Procedimentos para Simulação	155

PARTE V: CONCLUSÃO

11. DISCUSSÃO	158
11.1 Generalidades sobre a Viscoplasticidade e o Diagrama Tensão×Deformação	158
11.2 Metodologia de Ensaios e Equipamentos	162
11.3 O Material e suas Propriedades	177
11.4 Sobre a Formulação do Comportamento Mecânico	181
11.5 Resultados Experimentais	196
CONCLUSÃO	209
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	212

APÊNDICES

A1. VISUALIZAÇÃO GRÁFICA DE RESULTADOS

Veja relação dos gráficos na lista de figuras

A2. PARÂMETROS NUMÉRICOS E VISUALIZAÇÃO GRÁFICA DE EQUAÇÕES

Em disquete anexo (v. a etiqueta do disquete para detalhes sobre seu conteúdo).

Observação: está anexada ao corpo da tese uma impressão do conteúdo das planilhas, com os parâmetros e os coeficientes de correlação, porém com algumas restrições na visualização, na seguinte ordem:

A2.1 Resumo dos parâmetros e dos coeficientes de correlação linear - tração - Material 60/40-C

A2.2 Resumo dos parâmetros e dos coeficientes de correlação linear - tração -

Material 70/30-C

A2.3 Resumo dos parâmetros e dos coeficientes de correlação linear - tração -
Material 80/20-C

A2.4 Resumo dos parâmetros e dos coeficientes de correlação linear - relaxação -
Material 60/40-C

A2.5 Resumo dos parâmetros e dos coeficientes de correlação linear - relaxação -
Material 70/30-C

A2.6 Resumo dos parâmetros e dos coeficientes de correlação linear - relaxação -
Material 80/20-C

A2.7 Resumo dos parâmetros e dos coeficientes de correlação linear - fluência -
Material 60/40-C

A2.8 Resumo dos parâmetros e dos coeficientes de correlação linear - fluência -
Material 70/30-C

A2.9 Resumo dos parâmetros e dos coeficientes de correlação linear - fluência -
Material 80/20-C

A3. AMOSTRAGEM DE ENSAIOS ÓTICOS

Em fita de vídeo anexa (v. folha anexa à fita para conteúdo detalhado).

LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Página
3.1 -	Diagramas tensão×deformação típicos para: (a) Elasticidade e Plasticidade, (b) Viscoplasticidade a uma temperatura e taxa de deformação, (c) Viscoplasticidade a várias temperaturas e taxas de deformação	21
3.2 -	Comportamento elástico-elastoplástico: Subdomínios característicos: a) (σ, ϵ) e $(\sigma_{ep}, \epsilon_{ep})$, b) $(\sigma_{ep}, \epsilon_p)$, c) (σ_{ep}, ϵ) , d) (σ, ϵ_{ep}) e (σ, ϵ_p)	30
3.3 -	Esquema das atividade para a caracterização de parâmetros e modelagem do comportamento de uma curva tensão-deformação simples usando quantidades componentes	35
5.1 -	Cadeia linear do polimetileno	43
5.2 -	Revisão da cadeia linear do polimetileno	44
6.1 -	Efeito dos tipos de birrefringência	62
7.1 -	Solicitações e reações típicas à fluência: (a) comportamento elastoplástico, sem fluência sensível; (b) comportamento elastoviscoplastico, típico à fluência	67
7.2 -	Solicitações e reações típicas à relaxação: (a) comportamento elastoplástico, sem relaxação sensível; (b) comportamento elastoviscoplastico, típico à relaxação	69
7.3 -	Esquema do Teste de tração relaxações múltiplas: (a) deformação aplicada, (b) diagrama tensão-deformação, (c) zonas de tração e relaxação	71
7.4 -	Flexão a três pontos como ensaio ótico	76
8.1 -	Esquema interno da câmara de controle de temperatura	81
8.2 -	Câmara de controle de temperatura e sistema de aquisição de dados	83
8.3 -	Cunhas contra escorregamento viscoso	84
8.4 -	Sistema de garras e cunhas	85
8.5 -	Esquema dos corpos de prova	86
8.6 -	Sistema para flexão a três pontos	87
8.7 -	Limites práticos para os valores das variáveis de ensaios dentro de uma região de interesse $\dot{\epsilon} \times \theta$	89
8.8 -	Esquema de diagramas $\sigma \times \epsilon$ típicos, segundo a programação de ensaios utilizada	91
8.9 -	Relaxações iniciadas em diferentes níveis de tensão $\sigma_{m\acute{a}x}$ produzindo família de curvas	93
8.10 -	Procedimento numérico para cálculo de uma curva de fluência a partir de curvas de relaxações múltiplas	95
9.1 -	Relaxações a baixos níveis de carregamento (dados não facilmente carac-	

	terizáveis): (a) materiais 70/30-A e 50/50-A a 56°C; (b) material 70/30-A a 56°C	102
9.2 -	Relaxações em altos níveis de carregamento (dados mais caracteristicamente nítidos): (a) material 70/30-A a 46°C; (b) material 70/30-A a 36°C	102
9.3 -	Tração, materiais 50/50-A e 70/30-A	103
9.4 -	Ensaio de tração monotônica até ruptura, várias temperaturas e taxas de deformação, material 60/40-B	105
9.5 -	Ensaio de tração monotônica até ruptura, várias temperaturas e taxas de deformação, material 70/40-B, com esquematização da influência típica da taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ e da temperatura θ no formato do diagrama	106
9.6 -	Ensaio de tração monotônica até ruptura, várias temperaturas e taxas de deformação, material 80/20-B	107
9.7 -	Dados parciais brutos de tração e relaxação, armazenados pelo sistema de controle da máquina como texto em arquivo ASCII, material 70/30-B, $\dot{\epsilon}=0,00108 \text{ s}^{-1}$, 33°C	113
9.8 -	Exemplo de trabalho em planilha com dados de tração, dados parciais do material 70/30-B, $\dot{\epsilon}=0,00108 \text{ s}^{-1}$, 33°C	114
9.9 -	Exemplo de trabalho em planilha com dados de relaxação, dados parciais do material 70/30-B, $\dot{\epsilon}=0,00108 \text{ s}^{-1}$, 33°C	115
9.10 -	Ensaio completo de encruamento com relaxações múltiplas, material 60/40-B, temperatura 42°C, taxa temporal de deformação $0,00060 \text{ s}^{-1}$: (a) primeira tração e primeira relaxação, (b) relaxações múltiplas, (c) tração final	116
10.1 -	Simulação, por regressão, da mudança na curva $\sigma \times t$ com a taxa de deformação	154
10.2 -	Simulação, por regressão, da mudança na curva $\sigma \times t$ com a temperatura	154

LISTA DE TABELAS

Tabela	Título	Página
3.1 -	Expressões algébricas para P_i e A_i nas equações (3.5)(b) e (3.6)(b)	32
9.1 -	Ensaio de encruamento-relaxações múltiplas com o material 60/40-C	111
9.2 -	Ensaio de encruamento-relaxações múltiplas com o material 70/30-C	111
9.3 -	Ensaio de encruamento-relaxações múltiplas com o material 80/20-C	111
9.4 -	Relação de ensaios cíclicos	123
9.5 -	Relação de ensaios óticos	125
9.6 -	Relação das condições dos ensaios apresentados no vídeo	129
10.1 -	Parâmetros K e M da tração, iniciais, caracterizadores de diagramas $\sigma \times \varepsilon$ numa dada temperatura θ e taxa de deformação $\dot{\varepsilon}$	139
10.2 -	Parâmetros \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} da tração, intermediários, caracterizadores da variação de K e M com a temperatura θ , numa dada taxa $\dot{\varepsilon}$	139
10.3 -	Parâmetros k_i , m_i e n_i finais da tração, caracterizadores da variação de \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} com $\dot{\varepsilon}$	140
10.4 -	Parâmetros A , D e G da relaxação, iniciais, caracterizadores de curvas $\sigma/\sigma_{\text{máx}} \times t$ numa dada temperatura θ e taxa de deformação $\dot{\varepsilon}$	142
10.5 -	Parâmetros α_i , δ_i e γ_i da relaxação, intermediários, caracterizadores da variação dos parâmetros A , D e G com a temperatura θ	143
10.6 -	Parâmetros a_i , b_i , c_i , d_i , e_i , f_i , g_i , h_i e l_i finais da relaxação, caracterizadores da variação de α_i , δ_i e γ_i com $\dot{\varepsilon}$	144
10.7 -	Exemplo de parâmetros A_f , D_f e G_f para descrever a fluência sob valores de tensão constante σ^* , caracterizadores da variação da deformação total ε com o tempo t	145
10.8 -	Parâmetros caracterizadores do comportamento à tração, correspondentes à equação (10.5)	148
10.9 -	Parâmetros numéricos caracterizadores do comportamento à relaxação, correspondentes às equações (10.8)	148
10.10 -	Limites da formulação, material 60/40-C	149
10.11 -	Limites da formulação, material 70/30-C	149
10.12 -	Limites da formulação, material 80/20-C	149

SIMBOLOGIA

- a - coeficiente da escrita compacta, eq. (3.8), que assume valores ou expressões conforme a Fig. 3.2
- a_{f_j} - coeficientes numéricos de uma relação $\alpha_{f_j} = \alpha_{f_j}(a_{f_j}, \theta)$, utilizados na fluência como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes α_{f_j} e a temperatura θ
- a_i - coeficientes numéricos das relações $\alpha_i = \alpha_i(a_i, b_i, c_i, \dot{\epsilon}_i)$, utilizados na relaxação como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes α_i e a taxa temporal de deformação $\dot{\epsilon}$
- a'_{f_j} - coeficientes numéricos de uma relação $a'_{f_j} = a'_{f_j}(a'_{f_j}, \dot{\epsilon})$, utilizados na fluência como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes a'_{f_j} e a taxa temporal de deformação $\dot{\epsilon}$
- A - coeficiente numérico de uma relação $\sigma = \sigma(A, D, G, t)$, utilizado na relaxação como parâmetro caracterizador da relação entre σ e t , i.e. da relaxação;
- ponto qualquer sobre uma curva $\sigma \times \epsilon$;
- notação do coeficiente K na lei de Andrade;
- parcela referente à "elasticidade energética", relacionada à *birrefringência de tensão* (na Fotoplasticidade)
- A_f - coeficientes numéricos de relações $\epsilon = \epsilon(A_f, D_f, G_f, t)$, para um dado valor de tensão σ^* constante, usados na fluência como parâmetros caracterizadores da relação entre ϵ e t , i.e. das curvas de fluência
- A_i - expressão algébrica dada pela Tabela 3.1
- b_i - coeficientes numéricos das relações $\alpha_i = \alpha_i(a_i, b_i, c_i, \dot{\epsilon}_i)$, utilizados na relaxação como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes α_i e a taxa temporal de deformação $\dot{\epsilon}$
- B - parcela referente à "elasticidade entrópica", relacionada à *birrefringência de orientação* (Fotoplasticidade)
- c, c_0, c_i, c_{i+1} - coeficientes para melhor ajuste de uma curva pelos mínimos quadrados no caso de uma deformação pré-existente
- c_i - coeficientes numéricos das relações $\alpha_i = \alpha_i(a_i, b_i, c_i, \dot{\epsilon}_i)$, utilizados na relaxação como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes α_i e a taxa temporal de deformação $\dot{\epsilon}$
- C, C_0, C_s - constante fotoelástica
- d - espessura da camada na direção de propagação (na Fotoplasticidade);
- espessura do modelo (na Fotoplasticidade)
- d_{f_j} - coeficientes numéricos de uma relação $\delta_{f_j} = \delta_{f_j}(d_{f_j}, \theta)$, utilizados na fluência como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes δ_{f_j} e a temperatura θ
- d'_{f_j} - coeficientes numéricos de uma relação $d'_{f_j} = d'_{f_j}(d'_{f_j}, \dot{\epsilon})$, utilizados na fluência como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes d'_{f_j} e a taxa temporal de deformação $\dot{\epsilon}$
- d_i - coeficientes numéricos da relação $\delta_i = \delta_i(d_i, e_i, f_i, \dot{\epsilon}_i)$, utilizados na relaxação como pa-

râmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes δ_i e a taxa temporal de deformação $\dot{\epsilon}$

- dW - incremento de trabalho plástico
- $d\epsilon/dt$ - taxa de deformação
- $d^2\epsilon/dt^2$ - aceleração de deformação
- $d\sigma/dt$ - taxa de carregamento
- D - coeficiente numérico de uma relação $\sigma = \sigma(A, D, G, t)$, utilizado na relaxação como parâmetro caracterizador da relação entre σ e t , i.e. da relaxação
- D_f - coeficientes numéricos de relações $\epsilon = \epsilon(A_f, D_f, G_f, t)$, para um dado valor de tensão σ^* constante, usados na fluência como parâmetros caracterizadores da relação entre ϵ e t , i.e. das curvas de fluência
- e - coeficiente da escrita compacta, eq. (3.8), que assume valores relacionados ao módulo de elasticidade E conforme a Fig. 3.2
- e_i - coeficientes numéricos da relação $\delta_i = \delta_i(d_i, e_i, f_i, \dot{\epsilon}_i)$, utilizados na relaxação como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes δ_i e a taxa temporal de deformação $\dot{\epsilon}$
- E - módulo de elasticidade
- f - função
- f_i - coeficientes numéricos da relação $\delta_i = \delta_i(d_i, e_i, f_i, \dot{\epsilon}_i)$, utilizados na relaxação como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes δ_i e a taxa temporal de deformação $\dot{\epsilon}$
- F - energia livre (na Fotoplasticidade)
- função (na Fotoplasticidade)
- F_ϵ - constante ótica de deformação, é uma constante característica do material
- $F_{\text{máx}50/50}$ - nível de força máximo até o qual é possível uma comparação direta entre o material dado (50/50) e outro de maior resistência
- $\langle f(x) \rangle_{x_A}, x_A \langle f(x) \rangle$ - notação da divisão de uma função em intervalos, com os valores dos extremos determinados pelo índice x_A
- g - função (na Fotoplasticidade)
- g_{f_i} - coeficientes numéricos de uma relação $\gamma_{f_i} = \gamma_{f_i}(g_{f_i}, \theta)$, utilizados na fluência como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes γ_{f_i} e a temperatura θ
- g_{f_i} - coeficientes numéricos de uma relação $g_{f_i} = g_{f_i}(g_{f_i}, \dot{\epsilon})$, utilizados na fluência como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes g_{f_i} e a taxa temporal de deformação $\dot{\epsilon}$
- g_i - coeficientes numéricos da relação $\gamma_i = \gamma_i(g_i, h_i, l_i, \dot{\epsilon}_i)$, utilizados na relaxação como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes γ_i e a taxa temporal de deformação $\dot{\epsilon}$
- G - coeficiente numérico de uma relação $\sigma = \sigma(A, D, G, t)$, utilizado na relaxação como parâmetro caracterizador da relação entre σ e t , i.e. da relaxação;
- função (na Fotoplasticidade)

- G_f - coeficientes numéricos de relações $\varepsilon = \varepsilon (A_f, D_f, G_f, t)$, para um dado valor de tensão σ^* constante, usados na fluência como parâmetros caracterizadores da relação entre ε e t , i.e. das curvas de fluência
- h_i - coeficientes numéricos da relação $\gamma_i = \gamma_i (g_i, h_i, l_i, \dot{\varepsilon}_i)$, utilizados na relaxação como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes γ_i e a taxa temporal de deformação $\dot{\varepsilon}$
- k - coeficiente da escrita compacta, eq. (3.8), que assume valores relacionados ao parâmetro K conforme a Fig. 3.2;
- limite de elasticidade inicial, na formulações de Lemaitre-Chaboche
- k_i - parâmetros que caracterizam a variação de \mathcal{K} com $\dot{\varepsilon}$, $\mathcal{K} = \mathcal{K}(k_i, \dot{\varepsilon})$
- K - um dos parâmetros numéricos caracterizadores do diagrama tensão×deformação (outro parâmetro: M); é o ponto de intercessão com o eixo y de uma curva linearizada pelo método dos mínimos quadrados num plano ($\ln\sigma$, $\ln\varepsilon$); está relacionado com a resistência do material;
- um dos parâmetros numéricos caracterizadores da superfície tensão×deformação×taxa temporal de deformação, em formulações do diagrama $\sigma \times \varepsilon$ em três dimensões incluindo a taxa de deformação $\dot{\varepsilon}$, $\sigma \times \varepsilon \times \dot{\varepsilon}$ (outros parâmetros: M e N)
- K, K_0 - constante ótica, para deformações inelásticas (plásticas), similar à constante da Fotoelasticidade
- K_a - constante da lei de encruamento-viscosidade aditiva
- K_y - notação de K na referência Lemaitre/Chaboche (1985)
- \mathcal{K} - um dos parâmetros numéricos caracterizadores da variação dos parâmetros K e M com a temperatura
- l - comprimento (na Fotoplasticidade)
- l_i - coeficientes numéricos da relação $\gamma_i = \gamma_i (g_i, h_i, l_i, \dot{\varepsilon}_i)$, utilizados na relaxação como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes γ_i e a taxa temporal de deformação $\dot{\varepsilon}$
- Δl - intervalo de deslocamento (nos ensaios óticos)
- L_0 - comprimento inicial
- ΔL - intervalo de deslocamento (na definição de deformação)
- m - coeficiente da escrita compacta, eq. (3.8), que assume valores relacionados ao parâmetro M conforme a Fig. 3.2
- m_i - parâmetros que caracterizam a variação de \mathcal{M} com $\dot{\varepsilon}$, $\mathcal{M} = \mathcal{M}(m_i, \dot{\varepsilon})$
- M - um dos parâmetros numéricos caracterizadores do diagrama tensão×deformação (outro parâmetro: K); é a inclinação da curva linearizada pelo método dos mínimos quadrados num plano ($\ln\sigma$, $\ln\varepsilon$); está relacionado com o encruamento do material;
- um dos parâmetros numéricos caracterizadores da superfície tensão×deformação×taxa temporal de deformação, em formulações do diagrama $\sigma \times \varepsilon$ em três dimensões incluindo a taxa de deformação $\dot{\varepsilon}$, $\sigma \times \varepsilon \times \dot{\varepsilon}$ (outros parâmetros: K e N)
- M_i - momento elétrico induzido (na Fotoplasticidade)
- M_f - inclinação da reta de regressão a uma curva de fluência, utilizada como valor aproximado da tangente a esta curva (na formulação do comportamento à fluência)

- M_y - notação de M na referência Lemaitre/Chaboche (1985)
- \mathcal{M} - um dos parâmetros numéricos caracterizadores da variação dos parâmetros K e M com a temperatura
- n_i - parâmetros que caracterizam a variação de \mathcal{N} com $\dot{\epsilon}$, $\mathcal{N} = \mathcal{N}(n_i, \dot{\epsilon})$
- N - um dos parâmetros numéricos caracterizadores da superfície tensão×deformação×taxa temporal de deformação, em formulações do diagrama $\sigma \times \epsilon$ em três dimensões incluindo a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$, $\sigma \times \epsilon \times \dot{\epsilon}$ (outros parâmetros: K e M); está relacionado à viscosidade do material;
 - coeficiente da lei de Norton;
 - constante do índice de refração do meio e do número de segmentos por volume unitário (na Fotoplasticidade)
- N_a - constante da lei de encruamento-viscosidade aditiva
- N_x, N_y - ordem de franja isocromática no ponto de interesse, na direção x ou y (Fotoplasticidade)
- \mathcal{N} - um dos parâmetros numéricos caracterizadores da variação dos parâmetros K e M com a temperatura
- p - coeficiente da escrita compacta, eq. (3.8), que assume valores ou expressões conforme a Fig. 3.2;
 - valor percentual arbitrário (na formulação da fluência)
- P - peso
- P_i - expressão algébrica dada pela Tabela 3.1
- q - notação do coeficiente M na lei de Andrade
- Q - força de reação a uma solicitação externa sobre um sólido macromolecular (na Fotoplasticidade)
- r^2, r_1^2, r_{i+1}^2 - coeficiente de correlação linear do método dos mínimos quadrados
- R - deformação plástica acumulada, na formulações de Lemaitre-Chaboche
- S - entropia do sistema (na Fotoplasticidade)
- $Sgl(x)$ - função sinal de x (definida no texto)
- t - tempo
- t_y, t_x - espessura da fatia (na Fotoplasticidade)
- Δt - intervalo de tempo
- Δt_i - intervalo de tempo de cada relaxação, onde Δt_n é o máximo intervalo de tempo verificado
- T - temperatura absoluta (na Fotoplasticidade)
- U - energia interna (na Fotoplasticidade)
- dW - incremento de trabalho plástico
- α - polarizabilidade (na Fotoplasticidade)
- $\alpha_{f,i}$ - coeficientes numéricos de uma relação $A_f = A_f(\alpha_{f,i}, \sigma^{n*})$, utilizados na fluência como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes A_f e a tensão σ^{n*}
- α_i - coeficientes numéricos da relação $A=A(\alpha_i, \theta)$, utilizados na relaxação como parâme-

- tros caracterizadores da relação entre os coeficientes A e a temperatura θ
- α_1, α_2 - variáveis para a quantificação da polarizabilidade de segmentos de fibra na direção do eixo e perpendicular a esta (na Fotoplasticidade)
- γ, γ_e - constantes algébricas utilizadas na Fotoplasticidade, definidas utilizando-se as eqs. (6.16) e (6.17)
- γ_{f_i} - coeficientes numéricos de uma relação $G_f = G_f(\gamma_{f_i}, \sigma^{n*})$, utilizados na fluência como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes G_f e a tensão σ^{n*}
- γ_i - coeficientes numéricos da relação $G=G(\gamma_i, \theta)$, utilizados na relaxação como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes B e a temperatura θ
- δ - birrefringência de deformação, valor final da birrefringência; também denominada birrefringência artificial temporária (Fotoplasticidade)
- δ_{f_i} - coeficientes numéricos de uma relação $D_f = D_f(\delta_{f_i}, \sigma^{n*})$, utilizados na fluência como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes D_f e a tensão σ^{n*}
- δ_i - coeficientes numéricos da relação $D=D(\delta_i, \theta)$, utilizados na relaxação como parâmetros caracterizadores da relação entre os coeficientes D e a temperatura θ
- δ_o - birrefringência de orientação (Fotoplasticidade)
- δ_s - birrefringência de tensão (Fotoplasticidade)
- δ_0 - condição inicial da variável (na Fotoplasticidade)
- δ_z - birrefringência residual instantânea (Fotoplasticidade)
- ΔL - intervalo de deslocamento (na definição de deformação)
- Δl - intervalo de deslocamento (nos ensaios óticos)
- Δt - intervalo de tempo
- Δt_i - intervalo de tempo de cada relaxação, onde Δt_n é o máximo intervalo de tempo verificado
- $\Delta\sigma_{i|i+1}$ - intervalo de tensão entre as tensões de tração máximas i e i+1, não necessariamente uniforme
- $\Delta\sigma_{\max}, \Delta\sigma_{\min}, \Delta\sigma_i$ - faixas de tensão mínima, máxima, e i-ésima nas quais situa-se a tensão σ^*
- ϵ - deformação total
- $\dot{\epsilon}$ - taxa temporal da deformação
- ϵ_A - valor da deformação num ponto arbitrário A
- ϵ_c - componente de deformação "constituente", usadas para formarem-se planos (ϵ_c, σ_c)
- ϵ_e - componente elástica da deformação ou deformação elástica
- ϵ_{ef} - deformação efetiva
- ϵ_{ep} - componente elastoplástica da deformação;
- $\epsilon_{E|P}$ - deformação final no domínio elástico, relacionada a $\sigma_{E|P}$
- ϵ_{in} - deformação inelástica, irreversível

- ϵ_i - deformação total num ponto i
 $\dot{\epsilon}_i$ - i -ésimo valor fixo de taxa temporal da deformação, a ser usados em ensaios (Figuras 3.1c e 8.8)
 ϵ_p - componente plástica da deformação ou deformação plástica
 ϵ_{pi} - deformação plástica total num ponto i
 $\dot{\epsilon}_p$ - taxa temporal da deformação plástica
 $\dot{\epsilon}_p^*$ - taxa temporal da deformação plástica na lei de Norton
 ϵ_{ij}^p - tensor das deformações plásticas
 $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ - tensor das taxas temporais de deformação plástica
 ϵ_{reduz} - componente de deformação "reduzida", a saber ϵ_p ou ϵ_{ep}
 ϵ_{subtr} - componente de deformação "subtraída" (de uma outra), a saber ϵ_e ou ϵ_{EIP}
 ϵ_{vp} - deformação viscoplástica
 ϵ_v - deformação viscosa
 $\dot{\epsilon}_{vp}$ - taxa temporal da deformação viscoplástica
 ϵ_Y - deformação da tensão de escoamento
 ϵ_0 - condição inicial da variável (na Fotoplasticidade)
 ϵ_e - constante algébrica, utilizada e definida na Fotoplasticidade, eq. (6.20)
 $d\epsilon/dt$ - taxa de deformação
 $d^2\epsilon/dt^2$ - aceleração de deformação
 η - parâmetros internos (na Fotoplasticidade)
 θ - temperatura
 θ_i - i -ésimo valor de temperatura (Figura 3.1c)
 $\theta_{i,T}$ - i -ésimo valor de temperatura para a i -ésima taxa de deformação $\dot{\epsilon}_i$ (Figura 8.8)
 λ^* - coeficiente da lei de Norton
 ν - coeficiente de Poisson
 $\nu, \nu_{elást}, \nu_{elastopl}$ - componentes total, elástica e elastoplástica da escrita compacta, eq. (3.8), que podem assumir o valor ou de ϵ ou de σ conforme a Fig. 3.2 (enquanto χ assume respectivamente o valor ou de σ ou de ϵ)
 σ - tensão total
 $\dot{\sigma}$ - taxa temporal de tensão, obtida pela derivada de uma curva de relaxação, $d(\sigma_i)/dt$ (inclinação da tangente a uma curva de relaxação)
 σ^*, σ^{**} - nível constante de tensão para o qual vai-se determinar uma curva de fluência
 σ_A, σ_B - valor da tensão num ponto arbitrário A, ou B
 σ_e - componente elástica de tensão (quantidade meramente algébrica, com nomenclatura análoga à deformação elástica mas sem a mesma interpretação física)
 σ_{ef} - tensão efetiva

- σ_{ep} - componente elastoplástica de tensão (quantidade meramente algébrica, com nomenclatura análoga à deformação elastoplástica mas sem a mesma interpretação física)
- $\sigma_{E|P}$ - limite elástico (entre o domínio elástico e o plástico)
- σ_{eq} - tensão equivalente de Mises
- $\sigma_i = \sigma_i(t)$ - i-ésima curva de relaxação
- σ_{ij} - tensor das tensões
- σ_{MAX_i} - i-ésima tensão máxima atingida em cada processo de tração
- σ_{max} - valor máximo de tensão existente no início da relaxação
- σ_{MIN} - tensão de relaxação mínima, um valor de tensão mínimo constante a ser atingido em cada relaxação
- σ^{n*} - indicação genérica do valor de tensão constante dentro de um intervalo entre σ_{MIN} e o menor dos σ_{MAX_i} , i.e. dos valores constantes σ^* , σ^{**} , etc.
- σ_p - componente plástica de tensão (quantidade meramente algébrica, com nomenclatura análoga à deformação plástica mas sem a mesma interpretação física)
- σ_{reduz} - componente de tensão "reduzida", a saber σ_p ou σ_{ep}
- σ_s - limite plástico
- σ_{subtr} - componente de tensão "subtraída" (de uma outra), a saber σ_e ou $\sigma_{E|P}$
- $\sigma_x, \sigma_y, \dots, \tau_{yz}$ - componentes da tensão nas direções x, y, ... (tensão normal) e nos planos xy, ..., yz (tensão cisalhante)
- σ_Y - tensão de escoamento
- $\sigma_{Y,plast}$ - tensão de escoamento na plasticidade (nomenclatura para σ_Y ao se comparar plasticidade e viscoplasticidade)
- $\sigma_{Y,viscopl}$ - tensão de escoamento na viscoplasticidade
- σ_0 - condição inicial da variável (na Fotoplasticidade)
- σ_1, σ_2 - tensões principais no plano
- $d\sigma/dt$ - taxa de carregamento
- $\Delta\sigma_{ij+i}$ - intervalo de tensão entre as tensões de tração máximas i e i+1, não necessariamente uniforme
- $\Delta\sigma_{max}, \Delta\sigma_{min}, \Delta\sigma_i$ - faixas de tensão mínima, máxima, e i-ésima nas quais situa-se a tensão σ^*
- τ - tensão cisalhante máxima
- Φ - campo elétrico externo (na Fotoplasticidade)
- χ - parâmetro da escrita compacta, eq. (3.8), que pode assumir o valor ou de σ ou de ϵ conforme a Figura 3.2 (enquanto ν assume respectivamente o valor ou de ϵ ou de σ)

Oliveira, L. C., 2000, "Estudo da Caracterização e Modelagem do Comportamento Mecânico no Regime Inelástico-Anelástico de Misturas de Resina de Poliéster", Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG

RESUMO

Visa-se o estudo do comportamento fotoviscoelástico fundamental de misturas de resina de poliéster, através de ensaios caracterizadores. Isto provém do fato de as técnicas experimentais da Análise de Tensões/Deformações estarem defasadas com relação a modelos de comportamento, além da necessidade do aprimoramento de materiais e métodos para uso em modelagem viscoelástica ser uma necessidade tecnológica atual. Assim, neste trabalho de tese foi realizada, em corpos de prova de material fotoviscoelástico, uma série sistemática de ensaios mecânicos e óticos, a várias taxas de deformação e a várias temperaturas. Nos ensaios óticos, levantou-se o nível de formação de franjas isocromáticas e seu desenvolvimento, e nos ensaios mecânicos, levantaram-se curvas que relacionam tensão, deformação, taxa temporal de deformação, tempo e temperatura. Foram usadas proporções especificadas de resina de poliéster rígida/flexível. Os parâmetros numéricos de regressões sobre os dados experimentais caracterizam o comportamento mecânico, permitindo a determinação de equações numéricas que prevêm a resposta do material a determinadas solicitações. O modelo possibilita o planejamento de experimentos onde o comportamento viscoelástico de outros materiais poderá ser estudado através de simulação experimental. Finalmente, o amplo estudo metodológico e experimental realizado sobre a caracterização e o equacionamento do comportamento de tais materiais formam um fundamento teórico e uma base de dados para futuros estudos e modelagens numérico-experimentais fotoviscoelásticas.

Palavras-chave: Comportamento Mecânico. Análise Experimental de Tensões/Deformações.

Materiais Poliméricos. Viscoplasticidade.

Oliveira, L. C., 2000, "Study on the Characterization and Modeling of the Mechanical Behavior in the Inelastic-Anelastic Domain of Mixtures of Polyester Resin", Federal University of Uberlândia (Universidade Federal de Uberlândia), Uberlândia, MG

ABSTRACT

It's aimed the study of the fundamental photoviscoplastic behavior of mixtures of polyester resin through characterizing tests. This comes from the fact that the experimental techniques of stress/strain analysis are out of date regarding behavior models. Furthermore, the refinement of materials and methods for use in viscoplastic modeling is an actual technological need. So, in this thesis work it has been performed a systematic series of mechanical and optical tests on photoviscoplastic material test samples, under several strain rates and several temperatures. In the optic tests, it has been obtained the level of isochromatic fringe formation and their development. In the mechanical tests, it has been obtained curves relating stress, strain, time rate of strain, time and temperature. It has been used specified proportions of rigid/flexible polyester resin. The numerical parameters from regressions on the experimental data characterize the mechanical behavior, allowing the determination of numerical equations which foresee the response of the material to certain solicitations. The model enables the planning of experiments where the viscoplastic behavior of other materials may be studied through experimental simulation. Finally, the extensive methodological and experimental study performed on the characterization and equationing of the behavior of such materials form a theoretical fundament and a data basis for future photoviscoplastic numerical-experimental studies and modeling.

Key words: Mechanical Behavior. Experimental Stress/Strain Analysis. Polymeric Materials. Viscoplasticity.

Oliveira, L. C., 2000, "Studo pri la Karakterizo kaj Modeligo de la Meĥanika Sinteno en Inelasteca-Anelasteca Subestado de Miksoj el Poliesterrezinoj", Federacia Universitato de Uberlândia (Universidade Federal de Uberlândia), Uberlândia, MG

RESUMO

Oni celas la studon de la fundamenta fotoviskoplastika sinteno de miksoj el poliesterrezinoj pere de karakterizigantaj testoj. Tio devenas el la fakto, ke la eksperimentaj teknikoj de la Analizo de Streĉoj/Deformoj estas nune malnovaj respekte al modeloj por sinteno. Plue, la plibonigo de materialoj kaj metodoj por uzado en viskoplastika modeligo estas nuna teknologia bezono. Do, en tiu tezo estas farita serion da sistemaj meĥanikaj kaj optikaj testoj, sub diversaj streĉtaksoj kaj diversaj temperaturoj, al diversaj specimenoj el fotoviskoplastika materialo. En la optikaj testoj, oni akiris la nivelon de formado de samkoloraj franĝoj kaj ilian disvolviĝon. En la meĥanikaj testoj, oni akiris la kurbaĵojn rilatantajn streĉon, deformon, deforman temptakson, tempon kaj temperaturon. Oni uzis difinitajn proporciojn el rigida/fleksebla poliestera rezino. La numerikaj parametroj de la akiritaj kurbaĵoj karakterizas la meĥanikan sintenon, permesante la determino de numerikaj ekvacioj, kiuj donas la respondon de la materialo sub difinitaj agoj. La modelo ebligas la planadon de eksperimentoj, kie la viskoplastikan sintenon de aliaj materialoj povos esti studata pere de eksperimenta simulado. Fine, la ampleksa metodologia kaj eksperimenta studo farita pri la karakterizo kaj ekvaciigo de la sinteno de tiaj materialoj formas teoriantan fundamenton kaj ensemblon de donaĵoj por estontaj studoj kaj modeligoj fotoviskoplastikaj numeriko-eksperimentaj.

Ŝlosilvortoj: Meĥanika Sinteno. Eksperimenta Analizo de Streĉoj/Deformoj. Polimerikaj Materialoj. Viskoplasteco.

ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM DO COMPORTAMENTO MECÂNICO NO DOMÍNIO INELÁSTICO-ANELÁSTICO DE MISTURAS DE RESINA DE POLIÉSTER

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

É possível situar este trabalho, com relação a uma série de assuntos utilizados para sua concretização, analisando-se, parte a parte, o título acima, que sintetiza o escopo e a aplicação desta tese. Inicialmente, observemos que peças feitas de misturas de poliéster rígido e flexível possuem certas *propriedades óticas*. Tais propriedades óticas se apresentam através de quantidades físicas mensuráveis, denominadas franjas isoclínicas e isocromáticas, que são quantitativamente dependentes da solicitação mecânica a que está sujeita a peça. Isto possibilita a utilização de parâmetros óticos na modelagem experimental para determinar o estado de tensões-deformações, através de técnicas experimentais fotomecânicas. A seguir, observemos que tais misturas possuem, ainda, *características acentuadamente viscosas*, isto é, a resposta do material depende sensivelmente do tempo, por exemplo da taxa temporal de deformação aplicada. Assim, quando se realiza a caracterização do comportamento básico destes materiais, estes dois fatores, propriedades óticas e viscosidade, levam ao estudo do comportamento *não só mecânico como também ótico*, e não só dos fenômenos elastoplásticos in-

dependentes do tempo, i.e., da *Inelasticidade*, como também daqueles dependentes do tempo, i.e., da *Anelasticidade*. Daí tratar este trabalho do *comportamento mecânico e ótico, no regime inelástico-anelástico* das misturas que compõem a peça em consideração, que neste caso se trata de um corpo de prova. Por sua vez, *as misturas de resinas de poliéster* especificamente escolhidas são materiais clássicos de excelência nas técnicas fotomecânicas, compostas por porcentagens proporcionais em peso de resina flexível e de resina rígida tratadas com endurecedores, sendo as resinas e endurecedores utilizados de fabricação nacional. Com relação à *caracterização* realizada sobre estas misturas, trata-se de um *levantamento experimental das propriedades ou do comportamento macroscópico* do material resultante das misturas, compreendendo basicamente a variação de quantidades físicas macroscópicas, a saber proporção de resinas, temperatura de ensaio e taxa temporal de deformação aplicada, numa série sistemática de experimentos, efetuando-se o registro dos resultados em força, deformação e tempo. Após a caracterização segue-se uma *modelagem*, que se inicia pela *identificação dos parâmetros* que quantificarão os resultados de experimentos, a saber os coeficientes das equações numéricas, e se complementa pelo *estabelecimento de um modelo matemático global*, composto pelas diversas equações interligadas. Reunindo-se, agora, todas as partes acima relacionadas, temos que este trabalho de tese realiza a *caracterização e modelagem do comportamento mecânico e ótico, no regime inelástico e anelástico, de misturas de resina de poliéster rígidas e flexíveis*. Os fundamentos teóricos, procedimentos experimentais e equacionamentos desenvolvidos serão utilizados em futuras simulações numérico-experimentais de peças e componentes. Nestas simulações, uma peça real, o protótipo, feita de metal ou de algum outro material, será estudada através de um modelo, feito de uma das misturas de resinas aqui estudadas, utilizando-se a técnica experimental da Fotomecânica, opcionalmente com o estudo concomitante através de técnicas numéricas, como p. ex. Elementos Finitos.

Partindo-se, agora, para situar o trabalho num contexto mais específico, consideremos, inicialmente, que o ensaio de materiais é um tema de máxima importância no contexto do de-

envolvimento tecnológico e da efetivação prática de projetos, para validação de desenvolvimentos predominantemente teóricos. De fato, ao observar-se a elaboração de um projeto, pode-se constatar que sua análise é efetuada principalmente através de estudos teórico-analíticos, implementados computacionalmente. Desenvolvem-se e dimensionam-se componentes e sistemas complexos utilizando-se de métodos quase exclusivamente numérico-computacionais. E, ainda, por vezes se especificam, para os vários componentes, alguns materiais novos ou em pleno desenvolvimento. A combinação destes dois fatores torna tais projetos bastante "idealizados" ou "virtuais", durante grande parte de sua realização. Sendo assim, é fundamental para um projeto a realização de testes finais concludentes em protótipos, para o conhecimento de suas características *em tempo e situação reais* visando a validação dos desenvolvimentos teóricos. Em seguida, deve-se considerar que os sistemas mecânicos atuais, em seu conjunto, são altamente complexos em suas estruturas e solicitações, devido às necessidades tecnológicas atuais. Além disso, por motivos de otimização, os componentes destes sistemas são projetados e dimensionados em seus limites máximos de resistência. Tudo isto faz com que se trabalhe com equipamentos e componentes em níveis de segurança extremamente dependentes de uma previsão bastante precisa do comportamento, para que tudo esteja e continue exatamente conforme projetado. Finalmente, podemos concluir que, em todos os casos acima, são necessários ensaios experimentais decisivos sobre materiais e protótipos, extremamente importantes na validação de previsões teórico-analíticas ou numéricas do comportamento. Pode-se, assim situar este trabalho no contexto mais amplo de desenvolvimento de materiais, equipamentos e metodologias para Análise Experimental. No caso deste trabalho, onde se estuda de fato o material e não uma peça, ou um sistema de peças sob determinado carregamento, a previsão do comportamento deste material, sob a forma geométrica de um determinado corpo de prova, é feita necessariamente através do estabelecimento de um *modelo matemático descritivo do comportamento do material sob diversas condições e solicitações*. As características de complexidade matemática, bem como da precisão deste mode-

lo estão subordinadas às necessidades específicas de sua aplicação, sendo também dependentes do estágio evolutivo dos estudos realizados. Para o estabelecimento deste modelo foi necessário projetar e construir o equipamento adequado, bem como desenvolver uma metodologia de ensaios e formulação correspondentes.

No campo da análise experimental de tensões e deformações, o estudo da presença de viscosidade na elasticidade e na plasticidade leva ao conjunto mais amplo de variáveis fenomenológicas a serem consideradas em ensaios caracterizadores, composto por tensão, deformação, temperatura e tempo. Assim, a dependência do comportamento de um material com a temperatura e com o tempo compreende o caso mais geral de comportamento mecânico. A viscosidade tem uma importância predominante sob altas temperaturas, ou sob esforços de grande intensidade. Assim, no estudo do comportamento de um material sujeito a altas temperaturas, necessariamente devem-se incluir considerações de natureza viscoplástica, como a influência da taxa temporal de deformação aplicada, da relaxação, da fluência, mesmo para um curto período de tempo. Em geral, no projeto de peças, equipamentos e processos para trabalho em condições onde a viscosidade é significativa ou mesmo predominante, é fundamental o conhecimento da influência da temperatura e do tempo, este último por exemplo sob a forma da taxa temporal de deformação. Acrescentem-se a este quadro as características de complexidade dos projetos citadas anteriormente, e então teremos projetos bastante sensíveis a quaisquer fatores externos quando em funcionamento, tornando imprescindível a consideração de deformações não elásticas, ou mesmo um dimensionamento que leve diretamente em consideração estas deformações. Para isso, necessita-se conhecer o comportamento não-elástico *real* dos materiais, ou de uma peça, o que é mais rápido, prático, econômico e muitas vezes somente possível através de *modelagem experimental*.

Como último ponto a ressaltar, dentro do contexto experimental, observe-se que as técnicas experimentais, na área específica de simulação e modelagem da Análise de Tensões/Deformações e da Fotomecânica, estão defasadas com relação ao estabelecimento de

modelos de comportamento, quando comparadas tanto com o avanço na identificação direta do comportamento mecânico de materiais (utilizando corpos de prova ou modelos do próprio material) quanto com o avanço na simulação computacional. Esta defasagem diz respeito à integração dos aspectos fenomenológicos dos materiais de modelagem em modelos de comportamento que descrevam de forma ampla e interligada a resposta deste material a um conjunto de solicitações básicas mais amplo, como a consideração da variação simultânea da taxa temporal de deformação e da temperatura.

Todos os fatores acima alinhados levam à consideração de que *o desenvolvimento ou aprimoramento de materiais e métodos para uso em modelagem não exclusivamente elástica experimental* é de fato uma exigência do momento presente, para poder-se acompanhar as necessidades da tecnologia e do avanço dos métodos de projeto e cálculo. As considerações não-elásticas estão além das potencialidades das técnicas de modelagem atualmente estabelecidas, que descrevem de maneira completa apenas o regime elástico e o início do regime plástico, como por exemplo as técnicas de Extensometria, Camada Frágil, Moiré, Fotoelasticidade.

Após apresentarem-se a relevância dos ensaios experimentais em materiais e a importância do estudo de seu comportamento viscoso, é preciso identificar a maneira de se descreverem tais fenômenos. Inicialmente, considere-se que o estudo do comportamento mecânico de um material consiste fundamentalmente em estabelecerem-se relações entre os esforços solicitantes básicos e as respectivas deformações. Estas relações são descritas pelas expressões algébricas/numéricas de um modelo básico de comportamento. Este modelo pode ser obtido por duas vias:

- *uma via fenomenológica ou "indutiva"*, segundo a qual utiliza-se da idealização de um material homogêneo, numa escala macroscópica; neste caso, procura-se descrever diretamente as quantidades macroscópicas observadas, por exemplo deformação, taxa temporal de carregamento, ou temperatura, a partir de ensaios mecânicos;

- *uma via “dedutiva”*, segundo a qual o comportamento macroscópico é determinado a partir da descrição dos diferentes fenômenos a nível microscópico e posteriormente da passagem desta descrição microscópica para a escala macroscópica; esta via é extremamente difícil de ser praticada, sendo aquela dita possuir uma fundamentação física direta.

A via utilizada no presente trabalho de tese é a fenomenológica, de acordo com o âmbito onde será realizado, ou seja, a Engenharia Mecânica. A via dedutiva requer um enfoque mais de acordo com o ramo da Física propriamente dita, ou das Ciências Físicas.

As leis de comportamento assim obtidas, por sua vez, podem se decompor, no plano fenomenológico, em três grandes tipos, de acordo com a deformação resultante:

- *Elasticidade*: caracterizada por deformação reversível e relação biunívoca entre tensão e deformação, independente do tempo e geralmente linear.
- *Plasticidade*: caracterizada pela existência de uma deformação permanente após o descarregamento, se a tensão atingida superar um certo limite, o escoamento. Se este limite é uma constante, tem-se o caso de material perfeitamente plástico. Em muitos casos, o material sofre um endurecimento por deformação plástica (também denominado encruamento nos metais) e, então, o limite de escoamento varia de acordo com o endurecimento. Este endurecimento pode ainda ser isotrópico, quando a fronteira do limite elástico depende somente de um parâmetro escalar, ou cinemático, quando o domínio elástico tem uma amplitude constante mas se desloca por translação dentro do espaço das tensões.
- *Viscosidade*: quando se verifica uma dependência da tensão com a tempo, por exemplo com a taxa temporal de deformação.

O comportamento de um material é descrito por combinações destes três tipos de propriedades, seja descrevendo simultaneamente as três propriedades, nos modelos unitários, seja decompondo o comportamento em partes, cada uma apresentando uma só das três propriedades. Quando o comportamento *não é exclusivamente elástico*, refere-se ao mesmo como *inelástico* e/ou *anelástico*, de acordo com a verificação da presença da Plasticidade e/ou

Viscosidade como acima descritas. Dentro do contexto destes três grandes tipos de comportamento, este trabalho de tese concentra-se nos aspectos inelásticos-anelásticos de misturas de resinas de poliéster rígidas e flexíveis usadas como material de modelagem, principalmente o tipo de comportamento conhecido como Viscoplasticidade.

Dentro do contexto acima exposto, neste trabalho de tese foi realizada, em corpos de prova de material fotoviscoplastico, uma série sistemática de ensaios mecânicos e óticos. Nos ensaios óticos, levantou-se o nível de aparecimento de franjas e o desenvolvimento das mesmas sob carregamento e em relaxação. Nos ensaios mecânicos, levantaram-se curvas que relacionam as variáveis: tensão, deformação, taxa temporal de deformação, tempo e temperatura. Como material fotoviscoplastico, foram usadas combinações especificadas de porporções de resina de poliéster rígida/flexível. As curvas experimentais obtidas são utilizadas para determinar parâmetros numéricos caracterizadores do comportamento mecânico do material em tração, relaxação, e fluência, além da característica de isotropia à solicitação cíclica. Ensaios óticos sobre o mesmo material determinam sua resposta ótica plástica através do nível de formação de franjas isocromáticas. Os parâmetros numéricos são sintetizado em "leis de comportamento", equações que prevêem a resposta do material a determinadas solicitações. Este equacionamento compõe o que se denominou um modelo de comportamento. O modelo possibilitará o planejamento de experimentos para a utilização das misturas proporcionais de resina de poliéster, a fim de modelar o comportamento plástico de outros materiais que se deseja estudar, através de simulação experimental, na forma de corpos de prova ou de peças com geometria e carregamento específicos. Finalmente, o amplo estudo metodológico e experimental realizado sobre a caracterização e o equacionamento do comportamento do material formam um fundamento teórico e uma base de dados para futuras modelagens numérico-experimentais fotoviscoplasticas.

As contribuições inéditas deste trabalho se referem tanto ao desenvolvimento de equipamento e metodologia de ensaio quanto ao estudo teórico e implementação de um modelo

matemático fenomenológico-experimental básico, considerando as características mecânicas viscoplásticas do material, sendo também inédita a base de dados experimental sistemática obtida sobre o comportamento viscoplástico mecânico e ótico destas resinas. Este tipo de modelagem e a base de dados correspondente ainda não existem na área, nem mesmo para Fotoelasticidade. Em outras áreas onde se usam como materiais os aços e materiais compostos, já se partiu para a generalização de modelos. No entanto, do fato de se tratarem de estudos específicos para um único material, não se fazem trabalhos direcionados para possibilitar a modelagem de um material por outro, e, além disto, estes materiais, por sua vez, não possuem as propriedades óticas dos materiais fotoplásticos.

O modelo fenomenológico desenvolvido está baseado nas seguintes condições e simplificações: (i) grandes deformações, sem no entanto ocorrer um "fluxo" de material; (ii) temperatura uniforme num mesmo ensaio; (iii) descrição unitária do comportamento incorporando deformações elásticas, plásticas e viscoplásticas; (iv) endurecimento (encruamento) determinado pela deformação.

Esta tese se insere numa linha de pesquisa do Departamento de Projetos e Sistemas Mecânicos voltada para estudos em áreas não elásticas, quais sejam a plasticidade e a viscoplasticidade, estudos estes relativos ao comportamento de materiais de modelagem fotovisco-plásticos e de materiais compostos, tanto na modelagem computacional por elementos finitos, utilizando programas comerciais ou programas desenvolvidos por pesquisadores do Laboratório, quanto na modelagem experimental, através da utilização de materiais plásticos, viscoplásticos, fotovisco-plásticos, com elaboração de modelos e metodologia de ensaios nestas áreas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo do comportamento de um material inicia-se com um teste de tração uniaxial até ruptura, que fornece o clássico diagrama tensão×deformação. Os procedimentos para este ensaio são encontrados na norma brasileira NBR6152 (ABNT, 1992) ou americana A370 (ASTM, 1978, 1993). Dentre as inúmeras descrições matemáticas para o diagrama resultante destacam-se, por sua aplicabilidade na área de projetos, aquelas expressões de tipo exponencial. Dentre estas, Hollomon (1945) e Ramberg e Osgood (1943) são referências clássicas fundamentais. Ramberg e Osgood descrevem as curvas de tensão×deformação para muitos tipos de não-linearidades a serem encontradas, utilizando três parâmetros: módulo de elasticidade e duas tensões de escoamento secantes. Sua descrição é relativamente simples e precisa, sendo o fundamento de trabalhos posteriores. A formulação de Ramberg e Osgood foi retomada por Lemaitre e Chaboche (1985). Lopes e Al-Qureshi (1990) descrevem as formulações de Swift e Hollomon. Kleemola e Nieminen (1974) comparam as formulações de Hollomon, Swift, Ludwik e Voce. Adams e Beese (1974) dividem a curva do diagrama em três partes, elástica, plástica não-linear e plástica linear. Dieter (1988) discute os pontos básicos de diagramas tensão×deformação e algumas das formulações mais difundidas. Alguns aspectos teóricos sobre o diagrama são ainda de interesse, como as primeiras definições de limite de escoamento e de proporcionalidade, realizadas por Donnell (1938), e de limite de escoamento, por Osgood (1940).

Um relato dos detalhes presentes nos resultados de ensaios que são geralmente negligenciados nas descrições, especialmente com relação a descarregamento-recarregamento, é dado por Dieter (1981). Hayden et alii (1965) apresentam as propriedades mecânicas básicas de um material no que se refere à sua relação com o diagrama tensão×deformação. Helman e

Cetlin (1983) fazem uma introdução breve ao diagrama e às relações usadas na conformação metálica. Uma breve visão geral das relações entre as propriedades mecânicas fenomenológicas medidas e a estrutura interna do material são encontradas em Hertzberg (1983). Deve-se ressaltar que existem ligeiras diferenças entre as diversas formulações exponenciais, principalmente com relação à utilização da deformação plástica ϵ_p ao invés da deformação total ϵ e à descrição ou não do domínio elástico. Os resultados desta longa tradição em diagramas tensão×deformação são encontrados de forma condensada invariavelmente em quase todo livro-texto de mecânica aplicada. Dentre os mais utilizados, Souza (1982) é um texto voltado basicamente para a realização dos ensaios e interpretação dos resultados, descrevendo mais extensamente que o usual sobre os ensaios de tração e compressão, e cobrindo vários outros ensaios básicos como de fratura, dureza, dobramento e flexão, torção, fadiga, fluência. Hayden et alii (1965) descrevem sucintamente os ensaios mecânicos integrados com a Ciência de Materiais, descrevendo o comportamento mecânico macroscópico de estruturas microscópicas subjacentes. Dieter (1981) está direcionado para a Metalurgia Mecânica, discutindo os efeitos de vários processamentos térmicos e mecânicos sobre as propriedades básicas à tração e compressão. Hertzberg (1983) inclui os ensaios e as propriedades básicas num contexto de Mecânica da Fratura.

Utilizando aparatos e procedimentos mais complexos, outros procedimentos experimentais foram desenvolvidos para tentar compreender de maneira mais abrangente as respostas dos materiais a diversos tipos de solicitações além da tração axial. Lefebvre (1993) descreve o equipamento e procedimentos para teste em tubos de parede fina com carga axial (tração ou compressão) e pressão (externa/interna). Gilat e Pao (1988) descrevem o teste com decréscimo na taxa de tensão a altos níveis de carregamento. Hamad e Eichhorn (1997) obtêm curvas de tração típicas em fibras de celulose usando espectroscopia Raman. Em materiais com comportamento básico já estabelecido, são realizados ensaios mais abrangentes, como carre-

gamento-descarregamento, ensaios cíclicos, biaxiais, ou introduzindo-se considerações de tempo e temperatura. Neuder (1980) estuda a identificação das leis de comportamento plástico a partir de vários ensaios de identificação.

Uma outra maneira de se ampliar o estudo do comportamento se refere à introdução das variáveis temperatura e tempo, este último geralmente na forma de taxa temporal de deformação. A taxa temporal e a temperatura são essenciais quando se estudam materiais com comportamento basicamente viscoso, como os polímeros. Arruda et alii (1997) estudam grandes deformações plásticas dependentes da taxa de deformação. Chen e Zhang (1997) utilizam equipamento e aparelhos sofisticados em ensaios dinâmicos para a obtenção de gráficos tensão×deformação de um polímero viscoplástico, o Epon 828/T-403, sob várias taxas de deformação e temperaturas. Os efeitos do estado de cura na relaxação de uma resina epóxi são estudados por White e Hartman (1997). G'Sell e Souahi (1997) estudam as propriedades mecânicas de polímeros amorfos em grandes deformações, para três materiais a várias temperaturas. Testes de compressão uniaxial do Nylon 6/6, variando-se umidade, temperatura, e taxa de deformação, são realizados por Kawahara (1990).

As características básicas dos polímeros são descritas extensamente por Schultz (1974) utilizando um enfoque de Ciência dos Materiais, i.e. fortemente baseado no estudo das estrutura interna, discutindo entre outros os processos de copolimerização, a mecânica dos polímeros amorfos e o comportamento ótico-elétrico. Por sua vez, Alfrey e Gurnee (1967) é um texto que trata basicamente dos mesmos tópicos que Schultz (1974), porém de maneira mais condensada, concentrando-se mais na fenomenologia com aplicação prática imediata. Ward (1985) descreve extensamente sobre as propriedades mecânicas de polímeros sólidos proveniente de ensaios, com relação à elasticidade (da borracha), viscoelasticidade linear e não-linear, relaxação, e comportamento anisotrópico. As características das resinas de poliéster e sua misturas são descritas por Weiss e Bord (1983), que consideram sua utilização na fabricação de materiais compostos. Com relação aos materiais compostos, Hull (1992) é um texto introdutó-

rio na área, assim como Schwartz (1992) é uma referência básica, enquanto que Schawartz (1996) trata das propriedades e ensaios não destrutivos.

Um estágio mais avançado nos estudos do comportamento mecânico de um material diz respeito à incorporação dos resultados dos diversos tipos de ensaios em *modelos*, que vão descrever o comportamento do material de maneira mais completa. Lemaitre (1971) trata da determinação das leis de comportamento para materiais elastoviscoplasticos. Belhedi (1988) descreve os ensaios de tração, relaxação, fluência, cíclicos, para materiais viscoplasticos, apresentando resultados experimentais, identifica um modelo de comportamento utilizando-se do conceito de variáveis internas, com temperatura variável, e apresenta alguns trechos da implementação computacional. Trivaudey (1988) introduz o dano por fluência num modelo viscoplastico para aços. Billa (1989) modela o comportamento termodinâmico de dois tipos de aço para diferentes tipos de solicitação, tração monotônica, com descarregamento total e parcial, tração-compressão, fluência com variação de incremento e decremento de tensões, e efeito de 'rochet' ou dente de serra, isto é, o deslocamento contínuo do ciclo ao longo do eixo das deformações, sem estabilizar-se numa posição. Como exemplos específicos, podemos citar o modelo LMAM - "Laboratoire de Mécanique Appliqué pour les Métaux" para metais, desenvolvido entre outros por Delobelle (1988) e mais recentemente Leveque (1992), e o modelo LMAC - "Laboratoire de Mécanique Appliqué pour les Composites" para materiais compostos, desenvolvido por Maire (1992) e Rade (1994). O estágio em que se encontra atualmente na formulação de modelos se refere à modificação dos modelos específicos para generalização de sua aplicação, visando poder-se descrever aspectos mais amplos de comportamento, por exemplo, anisotropia em modelos para metais. Neste último contexto se insere o trabalho de Rade (1994), que introduz modificações num modelo para metais (LMAM) visando incluir características do comportamento de materiais compostos (anisotropia), e aperfeiçoa um modelo para compostos (LMAC) visando medidas mais precisas, fazendo então um estudo comparativo da utilização de ambos os modelos em materiais compostos.

Ao se estabelecer um modelo, utilizam-se basicamente dois enfoques. Por um lado, pode-se realizar uma modelagem algébrico-numérica, onde assume-se que determinado conjunto de variáveis e funções descrevem um fenômeno físico em questão, com base em hipóteses simplificadoras. Ao final, experimentos simplificados dão uma idéia do grau de aderência da teoria desenvolvida a estes exemplos de comportamento real. Por outro lado, pode-se partir para a realização de experimentos como ponto de partida, fazendo-se um estudo das relações entre variáveis físicas diretamente mensuráveis. O primeiro método é largamente empregado pelas teorias matemáticas da plasticidade e da viscoplasticidade. Apesar deste não ser o enfoque utilizado neste trabalho, as fórmulas aqui desenvolvidas, por se tratarem de relações básicas tensão×deformação, tensão×tempo, deformação×tempo, podem ser inseridas/desenvolvidas em modelos teóricos. Para teorias matemáticas, Kachanov (1971), Hill (1985) e Lubliner (1990) são textos clássicos de plasticidade com enfoque eminentemente teórico. Datsko (1966), Gopinathan (1982) e Dieter (1981) são textos voltados para a conformação mecânica. Lemaitre e Chaboche (1985) é um texto que desenvolve simultaneamente conceitos teóricos e aplicações práticas, *tratando em extensão da viscoplasticidade, também bem desenvolvida por Radenkovic e Salençon (1974) com relação aos seus mecanismos físicos (para metais) e a modelos mecânicos macroscópicos*. Phillips (1956) e Johnson e Mellor (1962) são textos introdutórios à plasticidade, o último para Engenharia. Krieg (1995) desenvolve uma teoria de plasticidade usando uma superfície de carregamento e um superfície limite, e apresenta alguns resultados experimentais. Vários estudos especializados são de importância na plasticidade, como comportamento a solicitações cíclicas, discutido por Mroz (1969; 1975; 1983) e Chaboche (1986), e um modelo de carregamento cíclico com endurecimento não linear por Dafalias e Popov (1982). O ensaio de fluência e sua aplicações práticas são descritos de forma simplificada por Souza (1982). McClintock e Argon (1966) descrevem a apresentação e correção de dados experimentais para materiais de engenharia. Kraus (1979) descreve extensamente sobre a modelagem da fluência. Wu e Ho (1995) estudam a fluência primária (ou transi-

ente) utilizando um enfoque dito unificado (deformação plástica e fluência), teoricamente e através de experimentos. A determinação da fluência através de relaxações múltiplas, na forma como é realizada neste trabalho, é tratada por Lemaitre e Chaboche (1985). Poirier (1976) trata da plasticidade em altas temperaturas. Nowick e Berry (1972) é um texto básico contendo a teoria formal da Anelasticidade. Persoz (1960) é um texto fundamental de Reologia, com modelos mola-amortecedor para modelagem de inúmeros tipos de materiais. Na área de estruturas, todos os desenvolvimentos baseiam-se em versões do diagrama tensão-deformação, sobre o qual são construídas as teorias aplicadas. Neste campo, Massonet e Save (1965) e Neal (1977) mostram a passagem do diagrama tensão×deformação usual para o modelo de diagrama utilizado nos métodos estruturais. Problemas de instabilidade inelástica são tratados por Bazant e Cedolin (1991). O estudo desenvolvido neste trabalho de tese fornece subsídios tanto para inclusão das equações básicas aqui desenvolvidas em desenvolvimentos/modelos matemáticos mais elaborados, quanto na validação experimental destas teorias.

No campo das técnicas experimentais, os estudos de Fotoplasticidade como disciplina foram sintetizados por Javornický (1974), que trata, entre inúmeros itens, dos materiais para modelagem, de suas características óticas e da descrição analítica destas características. A Fotomecânica não-linear e uma revisão dos estudos fotoplásticos são dados por Burger (1980). A calibração de vários materiais é discutida por Shimamoto e Takahashi (1990), e aspectos da medição das tensões elastoplásticas por Sharpe (1992). Efeitos da taxa de carregamento foram estudados por Ishikawa e Tadano (1989) para o acetato de celulose e por Lee e Simon (1993) para o policarbonato. Quanto aos principais materiais utilizados, Javornický (1974) escreve extensamente sobre a celulose, Dally e Mulc (1973) discutem as propriedades do policarbonato como material de modelagem, Raghava e Caddell (1973) um critério para o polietileno, e Tuttle et alii (1992) as propriedades do polietileno em carregamento biaxial. O poliéster como material para fotoplasticidade é estudado por Morris e Riley (1972); sua resposta ótica e comportamento ao escoamento são dados por Zachary e Riley (1977); os efeitos de

carregamento e descarregamento são desenvolvidos por Freire et alii (1983). No campo das aplicações específicas de modelagem fotoplástica, modelos com geometria e solicitação específicas, utilizando algum dos principais materiais mencionados, são fabricados, carregados e analisados. Exemplos de aplicações são Gomide e Burger (1981) que estudam as tensões em anéis comprimidos, Burger e Gomide (1982) a laminação de placas, Lee e Wan (1990) a estiragem a frio de barras cilíndricas e Gomide e Oliveira (1990) o atrito em cilindros comprimidos. No campo específico da viscoplasticidade, Nishitani (1979) descreve um método para determinar a distribuição de tensões para deformações inelásticas durante a fluência, utilizando equações constitutivas de um meio viscoelastoplástico. Nishitani (1981) aplica a mesma formulação para o estado plano de deformações, num caso específico de estiragem. Hirano et alii (1995) utilizam o método de luz esparsa ("scattered light") para análise de um modelo tri-dimensional fotoviscoelastoplástico considerando o efeito da taxa temporal de deformação. No entanto, dentre estes trabalhos, que utilizam diversos materiais fotoplásticos para simular o comportamento de outros materiais, nenhum modelo ou metodologia fenomenológico-experimental foi elaborada visando uma caracterização que estude simultaneamente as características óticas comuns a todos os materiais fotoplásticos e os parâmetros de um comportamento mecânico mais abrangente, considerando tanto a rigidez (i.e., proporção entre resinas) quanto a temperatura e taxa temporal de deformação. Assim, a metodologia e os modelos desenvolvidos utilizando-se técnicas experimentais têm permanecido no estágio de critérios específicos para cada material e estudo de solicitações particulares, com aplicações a casos de geometria-carregamento específicos. Alguns trabalhos tratam do estudo de mais de um tipo de solicitação, porém de maneira desconexa.

Um tópico especial, no contexto deste trabalho, se refere à consideração das características viscosas dos materiais, aqui referidas como comportamento anelástico. Os trabalhos eminentemente práticos na área estão relacionados acima, com relação à realização de ensaios caracterizadores e estabelecimento de modelos. Por outro lado, dentro da linha de modelos

teóricos (i.e., matemáticos) com posterior verificação experimental, Adams et alii (1997) estudam a compressão de materiais viscoplásticos no estado plano de tensões. Wu e Ho (1997) desenvolvem uma formulação teórica, utilizando um enfoque de "viscoplasticidade endocrônica", da fluência transiente, razoavelmente bem comprovada por experimentos simples. Tachibana e Krempl (1995) seguem um enfoque singular, modelando o comportamento à deformação segundo a teoria da plasticidade baseada no conceito de "overstress", que não utiliza superfícies de escoamento nem condições de carregamento/descarregamento. Chaudonneret (1977) aplica o método das equações integrais aos problemas de viscoplasticidade. No campo dos modelos essencialmente teóricos, Hashiguchi (1980) desenvolve equações constitutivas para materiais elastoplásticos com transição elastoplástica. Klisinski (1988) desenvolve a teoria clássica da plasticidade utilizando a teoria de conjuntos difusos ("fuzzy sets"). A viscoelasticidade isoladamente não é objeto de interesse neste trabalho. Apesar disto, algumas referências são importantes para complementação da compreensão do efeito viscoso no comportamento destes materiais. Schapery (1966; 1969) é uma das referências iniciais no assunto, havendo desenvolvido a teoria da termoviscoelasticidade não linear com considerações termodinâmicas, desenvolvendo um modelo mecânico não linear da termoviscoelasticidade; fez também a caracterização da viscoelasticidade não linear para carregamento uniaxial, para fluência, recuperação e relaxação. Dentre alguns trabalhos mais recentes na área, Lee e Wetmann (1995) usam o Método dos Elementos de Contorno para estudo da viscoelasticidade, Yi e Hilton (1997) estudam a resposta elástica e viscoelástica de compostos laminados, para tração, flexão e torção, usando Elementos Finitos, Johnson et alii (1997) desenvolvem uma formulação viscoelástica para incluir efeitos dinâmicos elásticos, considerando um sólido viscoso, Popelar e Liechti (1997) fazem uma caracterização viscoelástica de uma resina epóxi com endurecedor, e sua modelagem através de equações integrais, e Li e Weng (1997) estudam a resposta elástica e viscoelástica de compostos laminados, para tração, flexão e torção, usando Elementos Finitos.

Na área computacional, encontram-se inúmeros trabalhos sobre a implementação em programas computacionais de soluções matemáticas (teóricas) para casos idealizados de materiais e carregamentos. MacKeigham e Hillberry (1991) determinam um algoritmo para identificar as propriedades a tração a partir de dados gravados. A simulação de carregamentos cíclicos é feita por Barbosa et alii (1993), um modelo com dano em barras por Chimisso e Mattos (1993), algoritmos para plasticidade cíclica por Hopperstad e Remseth (1995), e até mesmo a utilização de elementos finitos com parâmetros "difusos" ("fuzzy") para elasto-plasticidade por Valliappan e Pham (1995). Grandes deformações de polímeros semicristalinos são modeladas por Seeney et alii (1997), usando elementos finitos. A modelagem de espumas poliméricas é efetuada por Wagner et alii (1997), e a caracterização/modelagem também de espumas poliméricas é feita por Zhang et alii (1997). Mattos e Rachid (1993) simulam carregamentos cíclicos em barras elastoviscoplásticas. Todos no entanto estão à espera de modelagem em protótipos para confirmação, correção ou reforma de seus conceitos.

As misturas de resina de poliéster utilizadas neste trabalho de tese foram originalmente desenvolvidas por Zachary e Riley (1977). Gomide e Siqueira (1994) utilizaram testes de tração/compressão, cíclicos e de tração/torção para estudar o comportamento destas resinas, variando em alguns ensaios a proporção resina rígida/resina flexível e em outros a temperatura e taxa de deformação. Já utilizando-se resultados deste trabalho, um resumo da metodologia de ensaios e resultados de relaxação estão em Oliveira et alii (1997b), o equipamento desenvolvido para os ensaios, assim como o teste de tração com relaxação múltiplas e alguns resultados de ensaios estão descritos em Oliveira et alii (1997a). Uma visão do comportamento típico e as bases do equacionamento estão em Oliveira et alii (1998b), e uma visão dos ensaios e resultados em Rojas et alii (1998). Parâmetros numéricos iniciais e o procedimento para sua utilização numa simulação experimental estão descritos em Oliveira et alii (1998a). Uma apresentação sucinta da formulação empregada para descrever os vários diagramas é feita em

Oliveira et alii (1999a), e uma mostra do comportamento à tração, relaxação, e ensaios cíclicos são dadas em Oliveira et alii (1999b).

CAPÍTULO 3

TENSÕES E DEFORMAÇÕES ALÉM DO LIMITE DE ELASTICIDADE

De fundamental importância é o estabelecimento de conceitos e termos, sejam mais comuns, como Elasticidade, Plasticidade, sejam menos usados, como Viscoelasticidade, Viscoplasticidade, Anelasticidade ou Inelasticidade, principalmente quando se necessita fazer considerações opondo comportamentos anelásticos a inelásticos, ou considerar deformações elastoviscoplasticas. Na seqüência, após definições qualitativas, são identificados os diversos tipos de deformações e domínios de um diagrama tensão×deformação idealizado, discutindo-se diversas possibilidades de modelagem deste diagrama. Apesar de extremamente básico e de larga utilização, os conceitos subjacentes ao diagrama tensão×deformação, principalmente no domínio plástico, nem sempre são suficientemente discutidos, existindo mesmo certas negligências teóricas em sua interpretação. Sendo a Viscoplasticidade experimental fundamentalmente formada por uma família de diagramas tensão×deformação, quantitativamente diferentes para cada temperatura e cada taxa de deformação aplicada, o estudo deste diagrama é indispensável como passo inicial para a formulação viscoplastica.

3.1 *Elasticidade, Inelasticidade, Anelasticidade*

Dado um material ou corpo sólido deformável, a classificação de seu comportamento mecânico macroscópico é efetuada com base no tipo de deformação resultante após uma solicitação. Considere-se a deformação resultante após um ensaio com carregamento-descarregamento, onde um corpo de prova em tração uniaxial é levado até um valor determi-

nado de tensão σ_A , σ_B , etc., sendo em seguida descarregado, como na Figura 3.1a. Se, após descarregamento, a deformação retorna *completamente* a zero, como para tração até σ_A na Figura 3.1a, então diz-se que o material está no domínio elástico ou em regime elástico. Caso isto não ocorra, então verifica-se a existência de uma deformação residual permanente após o descarregamento, como para tração até σ_B na Figura 3.1a, denominada *deformação plástica*, ϵ_p . Isto se aplica a materiais em geral, à temperatura ambiente, quando se diz, então, que um material submetido a uma solicitação está seja no domínio elástico, seja no domínio plástico, este último de fato descrevendo um comportamento elastoplástico já que a elasticidade está concomitantemente presente quando o carregamento está ainda atuando.

No entanto, com o desenvolvimento das aplicações, novas situações surgem, como o aparecimento de comportamento dependente do tempo, e então se faz necessário uma ampliação e retificação das denominações empregadas. Na realidade, existem dois fatores necessários à elasticidade: o retorno da deformação a zero *completamente e instantaneamente*. Se a deformação retornar a zero completamente, mas somente após algum tempo, temos a Viscoelasticidade. Se existir uma deformação após descarregamento, ocorrendo porém uma diminuição de parte desta deformação com o certo tempo, temos a Viscoelasticidade/Viscoplasticidade. Tem-se, em ambos os casos, um comportamento denominado *anelástico*. Por oposição, denomina-se o comportamento elastoplástico como *inelástico*. O desenvolvimento da deformação, no comportamento anelástico, pode ser comparado ao deslocamento de um pistão no interior de um cilindro com um fluido viscoso, Figura 3.1b. Assim, esta deformação dependente do tempo é denominada *deformação viscosa*.

Desse modo, uma caracterização abrangente do comportamento de um material é realizada fundamentando-se no tipo de deformação macroscópica resultante para um dado nível de tensão, a uma dada temperatura, e considerando-se sempre estes dois fatores básicos:

- existência de deformação residual permanente após descarregamento;

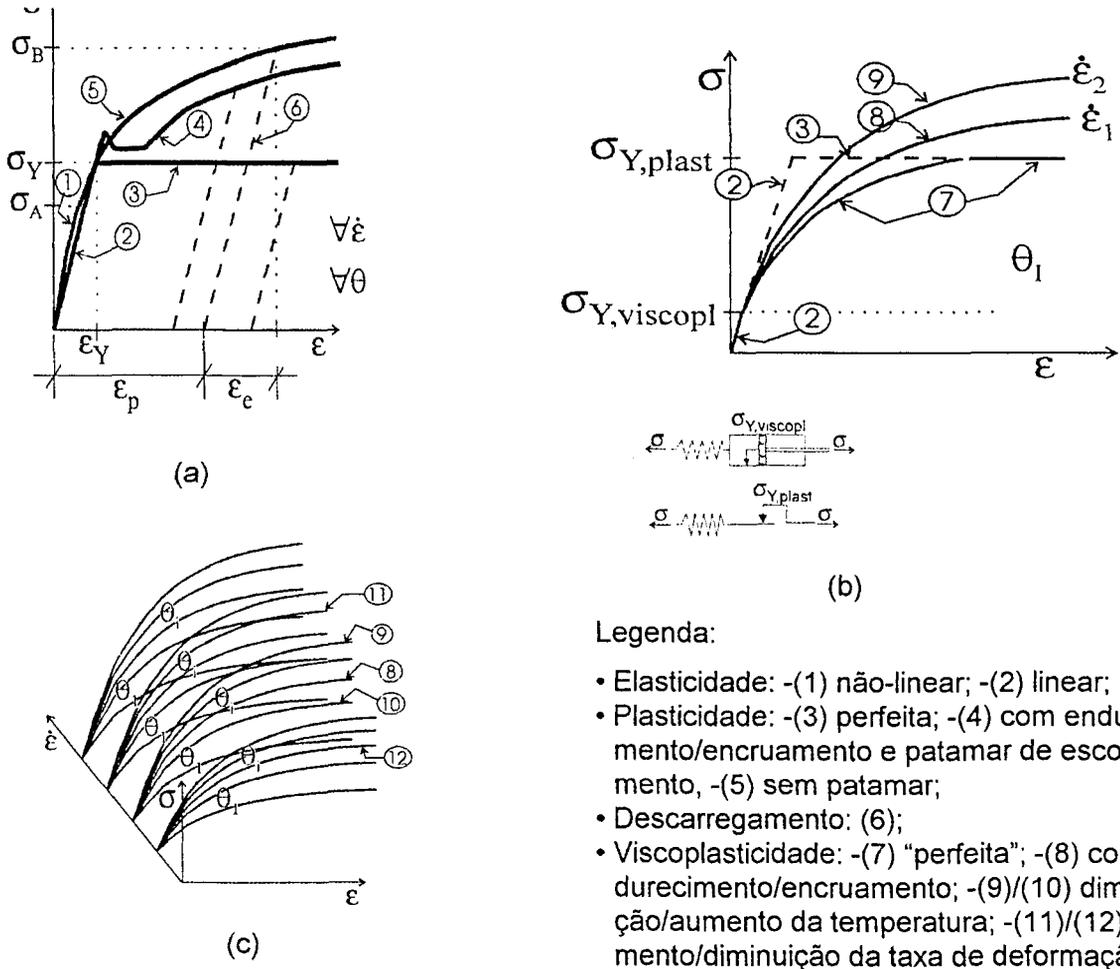


Fig. 3.1 - Diagramas tensão×deformação típicos para: (a) Elasticidade e Plasticidade, (b) Viscoplasticidade a uma temperatura e taxa de deformação, (c) Viscoplasticidade a várias temperaturas e taxas de deformação

- instantaneidade da deformação.

A partir destes conceitos, pode-se estabelecer a seguinte classificação pragmática de domínios (não exatamente coincidente com as classificações usuais):

- *Domínio Elástico (comportamento exclusivamente elástico)*: um comportamento em regime elástico (Figura 3.1a, curvas 1 e 2) se mostra quando uma solitação até um determinado nível de tensão resulta somente deformações macroscópicas completamente reversíveis após o descarregamento. Além disso, tais deformações são instantâneas com a aplicação de carga, ou seja, ao se parar o carregamento cessa-se simultaneamente o

desenvolvimento da deformação, e estas deformações regridem instantaneamente até zero acompanhando o descarregamento. Neste exemplo, a solicitação se realiza na forma de uma força F , ou tensão σ , gradualmente aplicada até um determinado valor final.

- *Domínio Viscoelástico (comportamento exclusivamente viscoelástico)* : este domínio, essencialmente não-linear, tem deformações macroscópicas completamente reversíveis após descarregamento, como na elasticidade, mas o desenvolvimento destas deformações é dependente do tempo. Assim, para solicitações a diversas taxas temporais de deformação $\dot{\epsilon}$, resultarão diversos gráficos $\sigma \times \epsilon$ dependentes destas taxas. Este tipo de comportamento não é objeto de estudo ou quantificação explícitos neste trabalho.
- *Domínio Plástico (comportamento elastoplástico)* : é caracterizado por uma solicitação em tensão resultando deformações residuais permanentes, como nas curvas 3, 4, 5 e 6 (descarregamento) da Figura 3.1a, denominadas deformações plásticas, identificadas após o descarregamento. Quando a carga está atuante, a deformação total ϵ é sempre composta por uma deformação elástica ϵ_e adicionada à deformação plástica ϵ_p , situação expressa pela conhecida formulação $\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p$. Observa-se, assim, que no domínio plástico tem-se de fato um comportamento elastoplástico, onde, no entanto, as deformações plásticas são quantitativamente preponderantes (daí a denominação domínio ou regime plástico).
- *Domínio Viscoplastico (comportamento elastoviscoplastico)* : é definido pela existência de deformações residuais permanentes verificadas após o descarregamento, como no domínio plástico, as quais são, no entanto, dependentes do tempo, cf. na Figura 3.1b as curvas 8 e 9. Esta dependência se revela, analogamente como no domínio viscoelástico, através de curvas $\sigma \times \epsilon$ diferentes para cada taxa $\dot{\epsilon}$ aplicada. Observe-se que, similarmente ao domínio plástico, tem-se um comportamento elastoviscoplastico, onde as deformações elásticas existentes não dependem do tempo (i.e., idealiza-se que a viscosidade aparece so-

mente na plasticidade). Um domínio inicial exclusivamente elástico, como na curva 2 da Figura 3.1b, embora teoricamente possível, é geralmente pouco significativo ou inexistente experimentalmente.

- *Domínio Viscoelastoplástico (comportamento elástico-viscoelastoplástico)*: caso onde a viscosidade se apresenta nas deformações elásticas e nas deformações plásticas. Na classificação pragmática realizada aqui, continua-se a seguir o padrão anterior dos domínios plástico e viscoplástico, e não se exclui a existência de deformações elásticas neste domínio, que responderiam por uma porção de retorno instantâneo de deformações no descarregamento, em maior ou menor grau. Para grandes deformações, é considerável a deformação que retorna instantaneamente num descarregamento, e, portanto, não se pode desprezar o comportamento elástico não viscoso, ao lado dos comportamentos elástico e plástico viscosos. Este é o domínio de maior interesse neste trabalho (Figuras A1.1 a A1.4).

O domínio viscoelastoplástico pode ser estudado através de uma deformação viscosa ϵ_v , dependente do tempo e retornando completamente a zero após um certo período, adicionada ou sobreposta a uma deformação residual permanente ϵ_p (com ou sem uma deformação elástica instantânea, não viscosa, ϵ_e). Outra opção se refere a um enfoque unitário, que considera uma deformação total, ϵ , resultante de todos os tipos de deformações existentes. Neste caso, descreve-se o comportamento geral, sem separar-se a deformação em componentes elásticas, plásticas ou viscosas. Este é o enfoque utilizado para as formulações experimentais finais deste trabalho.

Até aqui tratou-se somente do comportamento numa mesma temperatura, variando-se apenas a taxa temporal de deformação $\dot{\epsilon}$. No entanto, utilizando-se o modelo reológico de um pistão num fluido, pode-se prever que uma variação na temperatura vai modificar a viscosidade deste fluido e, por conseguinte, o comportamento. Isto é mostrado na Figura 3.1c para o

caso da viscoplasticidade. Sendo assim, ao se variar a temperatura para um mesmo valor de $\dot{\epsilon}$, como nas curvas 9 e 10 da Figura 3.1c, vão-se obter diagramas diversos, para cada temperatura. A Figura 3.1c mostra as duas dimensões a que são projetados os diagramas $\sigma \times \epsilon$ na viscoplasticidade:

- uma dimensão, ou família de diagramas para variações da taxa temporal de deformação $\dot{\epsilon}$, curvas 11 e 12,
- uma dimensão para variações da temperatura, curvas 9 e 10.

Com relação às deformações existentes nestes domínios e ao seu estudo, no domínio elástico as deformações são exclusivamente elásticas, e então trata-se da comumente conhecida *Elasticidade*. Suas relações básicas, linear (lei de Hooke) ou não, são válidas para qualquer domínio, desde que se admita uma continuidade das deformações elásticas além do limite elástico (i.e., limite do domínio elástico; na plasticidade perfeita a elasticidade aparece no descarregamento). Analogamente, a *Viscoelasticidade* trata de deformações exclusivamente viscoelásticas, resultantes da viscosidade do material. A partir de um certo limite de sollicitação, no entanto, verifica-se a existência de deformações residuais permanentes, as *deformações plásticas*. Estas deformações plásticas combinadas com as deformações elásticas são aqui chamadas *deformações inelásticas*. As deformações inelásticas se mostram nos comportamentos elastoplástico, elastoviscopoplástico e viscoelastoplástico, os quais, em conjunto, podem ser referidos como *Inelasticidade*, isto é, “não-elasticidade” devido à presença de deformações plásticas. Já a *Anelasticidade* está ligada a *deformações elásticas e plásticas dependentes do tempo*, que se mostram nos comportamentos viscoelástico, elastoviscopoplástico e viscoelastoplástico, tratando-se aqui de uma “não-elasticidade” devido à dependência com relação ao tempo, i.e. à existência de um efeito viscoso. Denomina-se *Plasticidade* ao estudo do comportamento elastoplástico ou somente plástico. A *Viscoplasticidade* estuda os comportamentos elastoviscopoplástico e viscoelastoplástico, seja considerando-se as deformações viscosas separadas das deformações plásticas (e eventualmente das deformações elásticas), seja a defor-

mação total elástica-viscoelastoplástica.

A Figura 3.1 mostra gráficos tensão×deformação comumente utilizados para definir os comportamentos na Elasticidade (Figura 3.1a), Plasticidade (Figura 3.1a) e Viscoplasticidade (Figura 3.1b e c), observando-se que no comportamento elastoplástico, Figura 3.1a, tem-se somente um diagrama tensão-deformação para um mesmo material, enquanto que no comportamento elastoviscoplastico, devido à sua variação com a temperatura e com a taxa de deformação aplicada, tem-se uma família de curvas, Figura 3.1c.

Esta descrição conceitual de domínios, deformações, comportamentos e disciplinas mostra uma certa complexidade, que se agrava bastante quando se parte para a análise das diversas maneiras de se formular tais comportamentos. A seguir, vai-se examinar o cerne da questão, o diagrama tensão×deformação, através de formulações simples porém acuradas. Alguns tipos de formulações matemáticas, de cunho teórico, utilizadas na literatura, serão indicadas no Capítulo 4. No Capítulo 8 será adotado um enfoque unitário, e desenvolvida uma formulação interligada ou acoplada, em estreita ligação com a metodologia de ensaios e aquisição de dados experimentais.

3.2 Estudo do Diagrama Tensão-Deformação através de "Quantidades Componentes"

O diagrama tensão×deformação é de fundamental importância como ponto de partida e referência básica para uma caracterização macroscópica de propriedade mecânicas. Este diagrama é, na realidade, fundamental no projeto em Engenharia, e seu conhecimento indispensável. Tendo em vista as várias formulações dispersas na literatura utilizadas para descrever o diagrama, o desenvolvimento feito a seguir produz uma formulação única abrangente que descreve simultaneamente as principais formulações exponenciais utilizadas (Ramberg-Osgood, Hollomon ou relação exponencial, Ludwick, Swift). A partir deste desenvolvimento percebe-se que é possível o uso de quaisquer formulações, exponenciais, polinomiais, ou outras, para se

descrever o diagrama tensão×deformação, desde que se atente para a devida interpretação dos parâmetros das equações numéricas resultantes.

Quando o diagrama tensão×deformação descreve o comportamento de uma material com endurecimento por deformação, observa-se uma parte inicial elástica, linear ou não, e em seguida uma *parte elastoplástica não-linear*. No caso de uma *parte elástica linear*, uma *curva exclusivamente não-linear* no domínio plástico é obtida subtraindo-se das variáveis totais uma quantidade constante ou variável, a saber $\sigma - \sigma_Y$, $\varepsilon - \varepsilon_Y$ ou $\varepsilon - (\sigma/E)$, sendo σ_Y e ε_Y a tensão de escoamento e sua deformação. A quantificação desta curva exclusivamente não-linear é geralmente buscada através dos meios disponíveis mais simples para linearização. Isto é feito com o objetivo de se obterem formulações básicas simples, e no entanto acuradas, para descrever a tensão total, a deformação total e a deformação plástica. Tais formulações e as quantidades típicas do diagrama (p. ex. E , σ_Y , $\sigma_{RUPTURA}$) compreendem uma descrição fenomenológica do comportamento mecânico básico fundamental de um dado material.

Os diagramas a serem mostrados neste item são exclusivamente para tração. No entanto, os modelos idealizados são generalizados visando sua validade para dados obtidos seja de uma tração exclusivamente monotônica, seja de uma compressão exclusivamente monotônica. Em todo o desenvolvimento que se segue assume-se que σ e ε são dados fornecidos por um ensaio.

Na seqüência, as variáveis pertinentes à tração/compressão monotônica unidimensional de corpos de prova será discutida com algum detalhe. O objetivo é reescrever mais detalhadamente os tópicos básicos fundamentais de plasticidade presentes em diagramas tensão×deformação, expressos por estas variáveis e suas combinações, e logo após obter um ambiente generalizado abrangente, composto de variáveis de tensão e deformação e seus sub-dominios característicos. Disto resultam dois conjuntos de modelos, um como uma forma já invertida do outro: um modelo descrevendo deformação em função de uma dada tensão, e o

outro descrevendo tensão em função de uma dada deformação. Estes modelos serão finalmente escritos numa fórmula compacta única.

3.2.1 *Plasticidade Independente do Tempo: relações gerais de uso comum*

Dada uma tensão total de tração ou compressão unidimensional σ , uniformemente distribuída numa seção de um corpo de prova de um material elástico com endurecimento por deformação, assumindo a independência dos fenômenos de elasticidade e plasticidade a deformação total é simplesmente a soma das deformações elástica e plástica, $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$, onde $\varepsilon_e = \varepsilon_e(\sigma)$ para $\forall \sigma$, $\varepsilon_p = 0$ para $\sigma \leq \sigma_{EIP}$, $\varepsilon_p = \varepsilon_p(\sigma)$ para $\sigma \geq \sigma_{EIP}$.

O *limite elástico* σ_{EIP} está designando o valor de tensão no limite entre os domínios elástico e plástico. Para este limite, isto é, para o valor de tensão exatamente no início da deformação plástica, é usado, na literatura, o assim denominado limite de escoamento ou tensão de escoamento σ_Y para o caso geral, e além deste, o caso particular do limite superior de escoamento. Esta nomenclatura introduzida, notada σ_{EIP} , é no momento simplesmente um nome novo para σ_Y , que será usada aqui na maioria do tempo, para uma maior precisão na definição e consistência de terminologia.

Será considerado em detalhe somente o caso de um material elástico linear (lei de Hooke) em ambos os domínios elástico e plástico. Neste caso, a relação $\varepsilon_e(\sigma)$ pode ser explicitada como $\varepsilon_e = \sigma/E$, $\forall \sigma$. Havendo sido definido o tipo de comportamento elástico, a relação plástica $\varepsilon_p(\sigma)$ é o próximo tópico a ser examinado.

3.2.2 *“Quantidades componentes” e a linearização da relação $\varepsilon_p(\sigma)$*

Um contexto mais amplo de quantidades componentes será agora introduzido. Após estabelecer-se este contexto, a relação $\varepsilon_p(\sigma)$ será explicitada ou particularizada como linearizações logarítmicas de uma curva exclusivamente não-linear no diagrama tensão-deformação.

Isto permitirá obterem-se as formulações clássicas para o diagrama e mais algumas a partir de um equacionamento único generalizado.

A) Decomposição das quantidades totais ε e σ : A fim de manter-se somente uma curva *exclusivamente não-linear* no domínio plástico, vai ser adotado o seguinte expediente: das *quantidades totais* ε e σ será subtraída seja uma quantidade variável, a *quantidade componente elástica (linear)* ε_e , seja uma das quantidades invariáveis $\varepsilon_{E|P}$ ou $\sigma_{E|P}$. Desse modo, restará no primeiro caso a *quantidade componente plástica não-linear* ε_p , e no segundo caso as *quantidades componentes elastoplásticas não-lineares* ε_{ep} e σ_{ep} . Explicitando este procedimento, trabalhando inicialmente com quantidades componentes de deformação definem-se:

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \varepsilon_e = \varepsilon - (\sigma / E), \quad \forall \sigma, \quad \forall \varepsilon \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{ep} = \varepsilon - \varepsilon_{E|P}, \quad \varepsilon \geq \varepsilon_{E|P} \quad (3.2)$$

onde $\varepsilon_{E|P} = \varepsilon_e(\sigma = \sigma_{E|P}) = \sigma_{E|P} / E$.

De maneira similar, a seguinte quantidade componente de deformação pode ser definida:

$$\sigma_{ep} = \sigma - \sigma_{E|P}, \quad \sigma \geq \sigma_{E|P} \quad (3.3)$$

Nas definições acima, $\varepsilon_{E|P}$ é a deformação total no final do domínio elástico, no ponto relacionado a $\sigma_{E|P}$. ε_{ep} é uma *componente de deformação elastoplástica*, obtida subtraindo-se da deformação total ε no subdomínio $\varepsilon \geq \varepsilon_{E|P}$ a deformação do limite elástico, $\varepsilon_{E|P}$. A *componente de tensão elastoplástica* σ_{ep} foi obtida por um processo algébrico análogo a ε_{ep} , daí a mesma notação de índice e nomenclatura. ε_e e ε_p são exatamente as deformações elástica e plástica comumente usadas.

B) Linearização Logarítmica: Através de uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, dados experimentais, transformados em planos $\ln(\sigma - \sigma_{subtr})$, $\ln(\varepsilon - \varepsilon_{subtr})$, serão descritos pela relação $\ln(\sigma - \sigma_{subtr}) = \ln K + (1/M) \ln(\varepsilon - \varepsilon_{subtr})$, $\sigma > \sigma_{subtr}$, $\varepsilon > \varepsilon_{subtr}$, onde:

- σ e ε na equação são valores aproximados, dados pela linearização;
- ε_{subtr} é uma das quantidades componentes ε_e ou $\varepsilon_{E|P}$ e σ_{subtr} é $\sigma_{E|P}$, quantidades

“subtraídas” como em (3.1) a (3.3);

- K e M são constantes obtidas de uma regressão linear, resultando valores diferentes quando se usa cada uma das quantidades componentes de deformação ε_e ou ε_{EIP} para ε_{subtr} (índices para K e M foram omitidos para evitar sobrecarregar a notação).

As constantes K e M são parâmetros específicos de um dado material, a uma dada temperatura. Numa interpretação de sua significação física, o coeficiente K, que indica o ponto onde a reta de regressão corta o eixo dos y's, está relacionado à resistência do material (já que σ_{EIP} está nesta posição), e o coeficiente M, que indica a inclinação da reta de regressão, está relacionado com a intensidade do encruamento.

A equação acima pode ser rearranjada para se obterem as *formas gerais da relação plástica* $\varepsilon_p(\sigma)$ e de sua forma inversa $\sigma(\varepsilon_p)$, $\varepsilon_{reduz} = (\sigma_{reduz} / K)^M$, $\sigma_{reduz} = K \varepsilon_{reduz}^{1/M}$, onde:

- $\sigma_{reduz} = \sigma - \sigma_{subtr}$, $\sigma_{subtr} = \sigma_{EIP}$ e $\varepsilon_{reduz} = \varepsilon - \varepsilon_{subtr}$, $\varepsilon_{subtr} = \varepsilon_e$ ou ε_{EIP} ; $\sigma \geq \sigma_{EIP}$, $\varepsilon \geq \varepsilon_{EIP}$.

Das relações anteriores resultam dois conjuntos de relações lineares, nos planos coordenados: (i) $(\ln(\sigma_{ep}), \ln(\varepsilon_{ep}))$, (ii) $(\ln(\sigma_{ep}), \ln(\varepsilon_p))$. Outros conjuntos de relações são ainda possíveis, conforme mostrado na seqüência.

C) Reintroduzindo as quantidades totais. Linearização logarítmica: As variáveis e planos definidos no item (A) podem ser ampliados para incluir também quantidades totais, necessariamente em combinação com uma das quantidades componentes reduzidas a fim de se manter o caráter de não-linearidade exclusiva da curva. Desse modo, as quantidades previamente definidas podem ser ampliadas num conjunto chamado de *quantidades constitutivas*, as quais conterão, além das *componentes reduzidas*, também a tensão e a deformação totais. Juntas, tais constituintes são: σ , σ_{ep} , ε , ε_{ep} e ε_p . Estas constituintes serão usadas para formar planos $(\sigma_c, \varepsilon_c)$, onde ou σ_c ou ε_c deverá ser uma componente reduzida, a fim de se obter uma curva não-linear. As curvas exclusivamente não lineares nestes planos serão linearizadas utilizando-se o meio mais adequado: linearização logarítmica, polinômios, etc. Diagramas tensão-deformação para tais quantidades constituintes são mostradas na Figura 3.2.

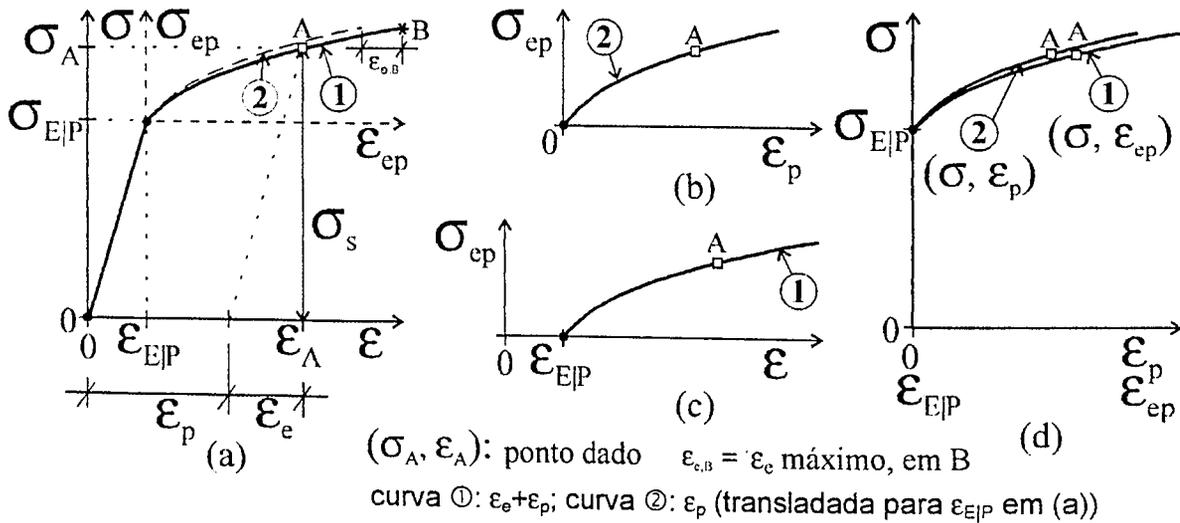


Fig. 3.2 - Comportamento elástico-elastoplástico: Subdomínios característicos: a) (σ, ϵ) e ($\sigma_{ep}, \epsilon_{ep}$), b) (σ_{ep}, ϵ_p), c) (σ_{ep}, ϵ), d) (σ, ϵ_{ep}) e (σ, ϵ_p)

Como exemplo concreto a ser explicitamente desenvolvido, estes planos podem ser linearizados exatamente como no item (B) acima. As equações resultantes são da mesma forma, substituindo-se σ_c e ϵ_c por σ_{reduz} e ϵ_{reduz} :

$$\epsilon_c = (\sigma_c / K)^M \quad \text{ou} \quad \sigma_c = K \epsilon_c^{1/M} \quad (3.4)$$

Os limites de validade desta equação são $\forall \sigma, \epsilon \geq \epsilon_{EIP}$, quando se usam σ e ϵ_{ep} ou ϵ_p , e $\forall \epsilon, \sigma \geq \sigma_{EIP}$, quando se usam ϵ e σ_{ep} . Para os outros casos, $\sigma \geq \sigma_{EIP}$ e $\epsilon \geq \epsilon_{EIP}$.

Com a reinserção das quantidades totais, três novos conjuntos de equações são possíveis em adição aos dois anteriores, conjuntos estes a serem definidos nos seguintes planos coordenados: (iii) ($\ln(\sigma), \ln(\epsilon_{ep})$), (iv) ($\ln(\sigma), \ln(\epsilon_p)$) e (v) ($\ln(\sigma_{ep}), \ln(\epsilon)$).

3.2.3 Modelos Monotônicos de Comportamento Plástico para Diagramas Tensão-Deformação.

Havendo definido quantidades componentes e escolhido tipos explícitos de equações

para o domínio plástico, tudo isto será utilizado agora junto com a relação do domínio elástico, a lei de Hooke, para modelar o diagrama tensão-deformação. Inicialmente, vai ser introduzido o *limite plástico* σ_s . Enquanto que σ_{EIP} é o valor limite além do qual a deformação plástica primeiramente se desenvolve num carregamento inicial de um dado espécimen (cujo estágio exato de deformações plásticas anteriores não é considerado ou é desconhecido), o limite plástico σ_s é um valor limite após endurecimento, o qual varia com o aumento da deformação plástica. Já que qualquer valor de $\sigma \geq \sigma_{EIP}$ produz uma deformação plástica, qualquer valor de $\sigma \geq \sigma_{EIP}$ já é intrinsecamente um limite plástico σ_s por si mesmo. Se um carregamento é reduzido a partir de qualquer valor, digamos σ_A , $\sigma_A \geq \sigma_{EIP}$, um recarregamento posterior será elástico até atingir este mesmo valor de σ_A , e assim, para este recarregamento, o limite plástico σ_s é quantitativamente o valor de σ_A (v. a Figura 3.2; desprezando muitas peculiaridades do comportamento real). σ_{EIP} é, então, exatamente o primeiro valor tomado por σ_s , no início da deformação plástica. Dessa forma, as relações explicitando σ nos conjuntos (i) a (v) anteriores podem ser usadas para prever o limite plástico σ_s , dificuldades algébricas à parte. A fim de se obter uma descrição ampla previamente trabalhada, desde o início a equação 3.4 é desenvolvida em duas linhas de modelagem, numa forma de separação de variáveis "a priori" no domínio plástico: um modelo explicitando a relação $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$ e o outro a relação $\sigma = \sigma(\varepsilon)$.

A) Modelagem da Deformação : As quantidades e relações apresentadas até agora serão usadas para construir um modelo para a descrição de um comportamento de deformação básico fundamental. Neste modelo:

- σ é uma tensão de tração ou compressão monotônica unidimensional dada;
- ε é a deformação uniforme total que resultará na direção paralela ao eixo de tração/compressão;
- σ_{EIP} é uma quantidade identificada previamente, sempre tomada como positiva;
- $\varepsilon_{EIP} \equiv \sigma_{EIP} / E$ é uma quantidade definida previamente, sempre tomada como positiva (E é previamente identificado);
- P_1 e A_1 são expressões algébricas dadas na Tabela 3.1;
- os valores de K e M dependem do par específico de quantidades constitutivas usado na li-

nearização;
 • $Sgl(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \geq 0 \\ -1, & \text{se } x < 0 \end{cases}$ é uma função para controlar o sinal através de uma variável x .

Modelo 1 - Modelo para comportamento simples de deformação em tração/compressão monotônica, onde a deformação uniforme axial total e suas componentes elástica e plástica devem ser determinadas, num sólido elastoplástico com encruamento isotrópico, sob um dado carregamento de tração/compressão uniforme monotônico unidimensional σ . As relações para encontrar tais deformações são:

$$\text{para } |\sigma| \leq \sigma_{EIP}, \quad \varepsilon = \varepsilon_e = (|\sigma| / E) Sgl(\sigma), \quad \varepsilon_p = 0; \quad (3.5)(a)$$

$$\text{para } |\sigma| \geq \sigma_{EIP}, \quad \varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \left(\frac{P_1}{K}\right)^M Sgl(\sigma) + A_1 Sgl(\sigma). \quad (3.5)(b)$$

Separadamente, as componentes elástica e plástica na equação (3.5)(b) são dadas por:

Tabela 3.1 - Expressões algébricas para P_i e A_i nas equações (3.5)(b) e (3.6)(b)

EXPRESSÕES ALGÉBRICAS PARA P_i E A_i NOS MODELOS DE DEFORMAÇÃO E DE TENSÃO						
conjunto nº	QUANTIDADES σ_c, ε_c USADAS†	MODELO DE TENSÃO $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$, eq. (3.5)(b)		MODELO DE DEFORMAÇÃO $\sigma = \sigma(\varepsilon)$, eq. (3.6)(b)		algumas formulações similares (desenvolvidas basicamente como uma relação do tipo:)
		$P_1 \ddagger$ ($ \sigma - \sigma_{subtrl} $)	$A_1 \ddagger$ ($ \varepsilon_{subtrl} $)	$P_2 \ddagger$ ($ \varepsilon - \varepsilon_{subtrl} $)	$A_2 \ddagger$ ($ \sigma_{subtrl} $)	
i	$\sigma - \sigma_{EIP}, \varepsilon - \varepsilon_{EIP}$	$ \sigma - \sigma_{EIP}$	ε_{EIP}	$ \varepsilon - \varepsilon_{EIP}$	σ_{EIP}	
ii	$\sigma - \sigma_{EIP}, \varepsilon - \sigma/E$	$ \sigma - \sigma_{EIP}$	$ \sigma / E$	$ \varepsilon - \sigma /E$	σ_{EIP}	Ramberg-Osgood* ($\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$); Ludwick* ($\sigma = \sigma(\varepsilon)$)
iii	$\sigma, \varepsilon - \varepsilon_{EIP}$	$ \sigma $	ε_{EIP}	$ \varepsilon - \varepsilon_{EIP}$	0	
iv	$\sigma, \varepsilon - \sigma/E$	$ \sigma $	$ \sigma / E$	$ \varepsilon - \sigma /E$	0	Hollomon ou relação exponencial** ($\sigma = \sigma(\varepsilon)$)
v	$\sigma - \sigma_{EIP}, \varepsilon$	$ \sigma - \sigma_{EIP}$	0	$ \varepsilon $	σ_{EIP}	

Observações: ($\sigma_{EIP}, \varepsilon_{EIP}$) \equiv (σ_Y, ε_Y), onde σ_Y é a notação comum para o início da deformação plástica (i.e., o "limite de escoamento"); σ_{EIP} e ε_{EIP} são sempre tomadas como positivas (mesmo valor para tração e compressão).

Notas: †: a fim de se formarem planos ($\ln(\sigma_c), \ln(\varepsilon_c)$); *: exatamente as mesmas equações, somente mudando a nomenclatura; **: com ε no lugar de ε_p ($\varepsilon_p = \varepsilon - \sigma/E$); ‡: coeficientes das eqs. (3.5) e (3.6).

$$\varepsilon_e = (|\sigma| / E) \text{Sgl}(\sigma), \quad \varepsilon_p = \left(\frac{P_1}{K}\right)^M \text{Sgl}(\sigma) + A_1 \text{Sgl}(\sigma) - (|\sigma| / E) \text{Sgl}(\sigma) \quad (3.5)(c)$$

Além disso, para $|\sigma| \geq \sigma_{EIP}$, $\sigma = \sigma_s$, isto é, σ é o limite plástico σ_s para $|\sigma| \geq \sigma_{EIP}$ (σ e σ_s são dadas de maneira direta no Modelo 2 a seguir).

B) Modelando a tensão : Segue-se uma maneira mais eficiente de se obter σ , isto é, uma formulação direta do problema inverso do anterior. Neste caso, a deformação uniforme total ε numa dimensão é dada, e σ é a tensão de tração/compressão uniforme unidimensional resultante. Neste modelo:

- ε é uma deformação de tração ou compressão monotônica axial total dada, uniforme em uma dimensão;
- σ é a tensão unidimensional que vai resultar numa direção paralela ao eixo de deformação, uniforme numa seção transversal dada;
- P_2 e A_2 são dados na Tabela 3.1;
- para ε_{EIP} , K , M e $\text{Sgl}(x)$ vale a descrição do Modelo 1.

Modelo 2 - Modelo para comportamento simples de tensão em tração/compressão monotônica, onde a tensão uniforme unidimensional total σ resultante e o limite plástico σ_s devem ser determinados num sólido elástico-plástico com encruamento isotrópico, inicialmente isotrópico, sob uma deformação uniforme monotônica axial ε dada. As relações para encontrar tais tensões são:

$$\text{para } |\varepsilon| \leq \varepsilon_{EIP}, \quad \sigma = (E |\varepsilon|) \text{Sgl}(\varepsilon); \quad (3.6)(a)$$

$$\text{para } |\varepsilon| \geq \varepsilon_{EIP}, \quad \sigma = K (P_2)^{1/M} \text{Sgl}(\varepsilon) + A_2 \text{Sgl}(\varepsilon); \quad (3.6)(b)$$

$$\text{além disso, para } |\varepsilon| \geq \varepsilon_{EIP}, \quad \sigma = \sigma_s, \quad (3.6)(c)$$

isto é, σ é o limite plástico σ_s para $|\varepsilon| \geq \varepsilon_{EIP}$. (σ_s não é definido para $|\varepsilon| \leq \varepsilon_{EIP}$)

3.2.4 Escrita Compacta

Inicialmente, como ponto de referência, as equações (3.5)(a) e (3.5)(b) usando as quantidades do conjunto (ii) formam exatamente um equacionamento do tipo Ramberg-Osgood,

como se encontra em Lemaitre/Chaboche (1985). Ajustando nomenclaturas, $K_y = K$, $M_y = M$, $\sigma_y = \sigma_{EIP}$, e reescrevendo, obtém-se:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p, \quad \forall \sigma, \quad (3.7)$$

onde $\varepsilon_e = \sigma / E$, $\varepsilon_p = \left\langle \frac{\sigma - \sigma_{EIP}}{K} \right\rangle^M \text{Sgl}(\sigma)$,

utilizando para ε_p a notação $\langle f(x) \rangle = \begin{cases} 0, & \text{para } f(x) \leq 0 \\ f(x), & \text{para } f(x) > 0. \end{cases}$

A equação (3.7) é o que poderia ser denominado uma formulação monolítica composta, em oposição às equações (3.5)(a) e (3.6)(b), que são formulações divididas em intervalos. Se uma tal formulação se tornar necessária, os modelos 1 e 2 podem também ser reescritos como uma fórmula única, numa maneira similar (mas não exatamente igual) à equação (3.7), como se segue, eq. (3.8).

Escrita compacta das equações (3.5)(a), (3.5)(b), (3.6)(a), (3.6)(b) dos Modelos 1 e 2 como uma fórmula única:

$$v = v_{elást} + v_{elastopl} \quad (3.8)$$

onde $v_{elást} = \langle e |\chi| \rangle_{\chi_{EIP}} \text{Sgl}(\chi)$,

$v_{elastopl} = \chi_{EIP} \langle k p^m \text{Sgl}(\chi) + a \text{Sgl}(\chi) \rangle$,

sendo a, e, k, m, p, v, χ dados na Figura 3.3, e utilizando-se as notações

$$\langle f(x) \rangle_{x_A} = \begin{cases} f(x), & \text{para } f(x) \leq x_A \\ 0, & \text{para } f(x) > x_A \end{cases} \quad \text{e} \quad x_A \langle f(x) \rangle = \begin{cases} 0, & \text{para } f(x) \leq x_A \\ f(x), & \text{para } f(x) > x_A. \end{cases}$$

As notações $\langle f(x) \rangle_{x_A}$ e $x_A \langle f(x) \rangle$ são utilizadas para controlar o valor de uma função $f(x)$ a partir de um valor x_A , onde:

- $\langle f(x) \rangle_{x_A}$ indica que $f(x)$ é zerada para valores de $f(x)$ maiores que x_A
- $x_A \langle f(x) \rangle$ indica que $f(x)$ é zerada até atingirem-se valores de $f(x)$ maiores que x_A .

A equação (3.8) pode ser inserida num fluxograma para a caracterização e simulação do diagrama tensão-deformação, como na Figura 3.3.

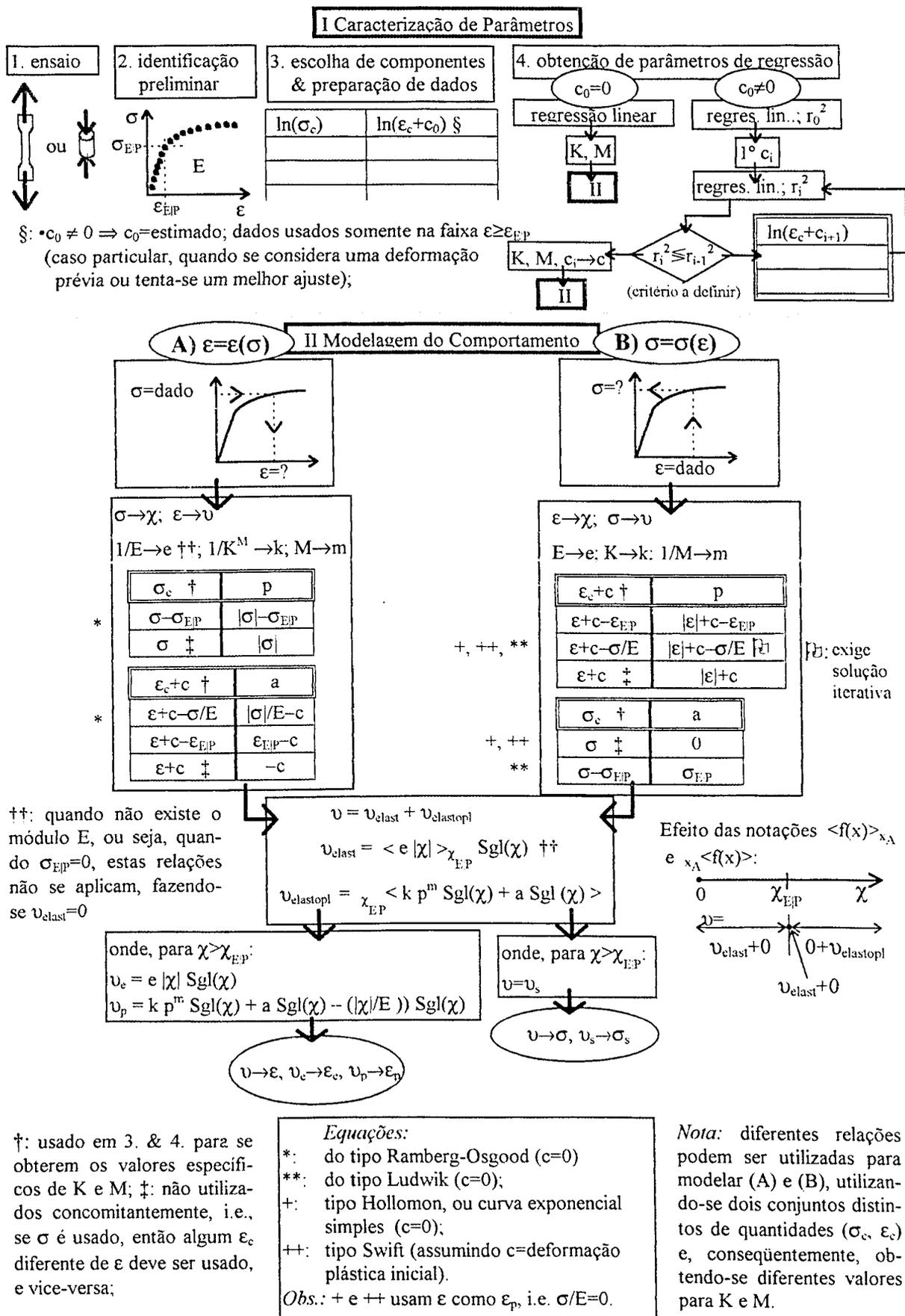


Fig. 3.3 - Esquema das atividades para a caracterização de parâmetros e modelagem do comportamento de uma curva tensão-deformação simples usando quantidades componentes

Capítulo 4

Formulações da Plasticidade e Viscoplasticidade

São relacionadas a seguir algumas formulações e teorias de Plasticidade/Viscoplasticidade desenvolvidas a partir de descrições teóricas da deformação plástica. Nestas teorias, as relações do tipo $\sigma=f(\epsilon)$ ou $\epsilon=f(\sigma)$ podem ser substituídas pelas formulações experimentais desenvolvidas nos Capítulos 8 e 10, sejam como componentes básicos para a formulação, sejam como instrumento para validação prática das teorias desenvolvidas, já que o material estudado é um material de modelagem. A determinação de critérios de plasticidade é um trabalho posterior à elaboração das formulações experimentais desenvolvidas neste trabalho.

4.1 Fundamentos Teóricos

As teorias analíticas da plasticidade e viscoplasticidade baseiam-se na definição e estudo de formulações para as deformações não puramente elásticas de um corpo, geralmente classificadas como plásticas (inelásticas), viscosas (anelásticas), e combinações destas com deformações elásticas. Para isso, escolhe-se um método geral de trabalho, por exemplo a Reologia, e definem-se as variáveis físicas envolvidas (tensão e deformação neste caso). Para possibilitarem-se aplicações a casos práticos, geralmente desenvolvem-se teorias específicas. As relações necessárias a todas as formulações incluem a força atuante versus a deformação resultante.

A quantidade física real em questão, no entanto, trata-se de fato de um deslocamento, ou seja, deslocamento de uma célula de carga no domínio elástico, medindo a força, e deslocamento de um extensômetro ligado ao corpo de prova, que fornece o desenvolvimento do des-

locamento relativo entre extremidades deste extensômetro, seguindo o deslocamento da célula de carga. Os conceitos básicos envolvidos são, assim, a deformação e seus mecanismos. Microscopicamente, estes mecanismos são tema da Metalurgia e Ciência dos Materiais. Fenomenologicamente, o processo de deformação pode ser classificado como esclerônimo, quando não depende do tempo e reônimo, quando depende. Em termos da Mecânica do Meio Contínuo pode-se esquematizar um “intervalo” de comportamento, cujos extremos são comportamento perfeitamente plástico e comportamento fluido (newtoniano).

Na investigação analítica da Plasticidade, faz-se uma descrição teórica da deformação plástica, que deve ser fisicamente justificada e matematicamente correta. O propósito de uma teoria matemática da Plasticidade é determinar os estados de tensão e deformação ou seu histórico, em cada ponto de um sólido parcialmente ou completamente plástico, dados os carregamentos e deslocamentos de contorno ou seu histórico. As hipóteses de trabalho se referem a sólido isotrópico ou anisotrópico, pequenas ou grandes deformações, em uma, duas, ou três dimensões.

Em termos gerais, para a grande maioria das teorias, a pequena influência da pressão hidrostática faz com que a tensão cisalhante seja invariavelmente o principal fator da deformação plástica. A tensão resultante, em geral, independe das condições de contorno inicial, sendo mais importante o histórico completo do processo de deformação. Este processo depende do tempo, com relação à taxa de deformação e dos vínculos através dos quais o material obstrui o desenvolvimento do processo de deformação. Para tensões em três dimensões, diferentes regiões do corpo estarão simultaneamente em diferentes fases de deformação. Sendo assim, de um dado conjunto de condições de contorno não se deve esperar uma solução única para o estado de tensão e deformação no interior de um sólido.

4.2 Critérios de Plasticidade e Viscoplasticidade

Dentro de uma determinada investigação, deve-se adotar um critério de plasticidade para o desenvolvimento das teorias clássicas. Este critério é a lei básica determinando o início da primeira deformação plástica. Nenhum dos critérios aplicados tem “significado físico” para as teorias matemáticas, pois consideram que a primeira deformação plástica é uma continuação direta das deformações elásticas. Estes critérios, assim, determinariam simplesmente a combinação de componentes de tensão sob as quais ocorre a deformação plástica num ponto. Para diferentes materiais, utilizam-se diferentes critérios, mais apropriados a cada caso. As formulações dos critérios têm duas concepções básicas: a utilização de componentes do tensor das tensões ou a utilização de hipóteses baseadas em conhecimentos físicos do processo. Esta última é mais elaborada.

Dentre os critérios clássicos da plasticidade, os mais conhecidos e utilizados são:

- *Critério de Von Mises* (também conhecido como Huber-Mises, Hencky-Mises, ou da energia dissipada). Sua variante mais geral é o critério de Mises-Schleicher.
- *Critério de Tresca* ou Saint-Venant-Tresca. De maior generalidade que este é o critério de Mohr.

Em termos gerais, pode-se definir um “critério geral de plastificação” pela seguinte expressão:

$$f(\sigma_{ij}) = 0 \quad (4.1)$$

onde f é um potencial plástico estabelecendo uma relação entre as componentes de tensão num ponto do sólido. Num dado estado de deformação plástica, existe uma função $f(\sigma_x, \sigma_y, \dots, \tau_{yz})$ das componentes de tensão, tal que existe um aumento na deformação plástica somente nos casos em que a função f aumenta. Esta é uma generalização que tem ampla aplicação no desenvolvimento da teoria da plasticidade e suprime o significado original de critério de plasticidade, pois tem aplicação direta nas relações físicas da plasticidade.

As teorias que procuram descrever um material endurecido por deformação, fazem distinção entre anisotropia inerente e anisotropia por deformação (como o efeito Bauschinger). Neste caso utiliza-se:

$$f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p, \dot{\varepsilon}_{ij}^p) = 0 \quad (4.2)$$

onde σ , ε e $\dot{\varepsilon}$ são uma função do tempo, e f é uma “função de carregamento”, obtida através de estudos experimentais. Este caso é o de maior interesse para este trabalho, pois permite utilizar as expressões desenvolvidas diretamente. Os critérios de plasticidade ou de plastificação constituem um caso especial desta função de carregamento.

4.3 Teorias Matemáticas de Plasticidade e Viscoplasticidade

Do ponto de vista físico, as teorias matemáticas da plasticidade dividem-se em duas classes, as teorias fenomenológicas e a teoria das discordâncias. Esta última se concentra na descrição exata do estado interno do sólido.

As teorias fenomenológicas tentam uma descrição completa dos estados de tensão e deformação de um sólido deformado. São mais abrangentes e encontram maior aplicação tecnológica. São importantes para estas teorias, as equações de equilíbrio, a definição de condições de contorno e a compatibilidade das deformações com relação à magnitude das deformações consideradas. Devem ainda ser incluídas nas formulações um critério de plastificação e uma função de carregamento. A parte mais relevante do problema se refere à condição física especificando a relação tensão×deformação, que é geralmente baseada em carregamento uniaxial, com a tensão em sua definição básica ou na forma de suas componentes, ou ainda como força atuante, e a deformação como definida basicamente. Usam-se, ainda, quantidades derivadas, como tensão e deformação efetivas num incremento de trabalho plástico, como:

$$dW = \sigma_{ef} d\varepsilon_{ef} \quad (4.3)$$

As teorias fenomenológicas se dividem em dois grupos principais, teorias de deformação e teorias de fluxo plástico. Dentre estas teorias, como exemplo podem-se citar:

- *Teoria de Saint-Venant* do fluxo plástico, cujas formas alternativas constituem as teorias de Mises, de Prandtl, de Reuss, de Lanine;
- *Teoria de Prager* (ou *Drucker*), que aplica uma função de carregamento: sem endurecimento e com endurecimento;
- *Teoria de Bishop-Hill*, que introduz o caráter físico do mecanismo de cisalhamento em monocristais.

4.4 *Formulações de Lemaitre e Chaboche*

De grande importância para este trabalho são as formulações desenvolvidas por Lemaitre e Chaboche (1985), que tratam separadamente e em extensão da Viscoplasticidade. De especial interesse é o enfoque dado por estes autores à modelagem. A modelagem praticada por Lemaitre e Chaboche provém de uma análise qualitativa dos resultados de ensaios característicos. Para as formulações, utilizam-se ensaios de encruamento à tração ($\dot{\epsilon}$ constante ou σ constante), fluência (força ou tensão constante), relaxação (ϵ constante) e cíclicos. Os diferentes resultados são reunidos numa lei mecânica de estado, sob a forma:

$$\sigma = f(\epsilon_p, \dot{\epsilon}_p) \quad (4.4)$$

Para a particularização da função f utiliza-se uma formulação do tipo:

$$\sigma = K \epsilon_p^{1/M} \dot{\epsilon}_p^{1/N} \quad (4.5)$$

onde K , M e N são parâmetros função da temperatura e do material. Este é exatamente o tipo de formulação empregada neste trabalho, tanto para a discussão dos diagramas tensão×deformação do Capítulo 3 (onde a viscosidade não é variada, e portanto, para $N=0$, a equação acima se reduz a $\sigma = K \epsilon_p^{1/M}$ quanto para a formulação dos resultados experimentais

obtidos, com a observação de que aqui substitui-se o parâmetro N pela taxa temporal de deformação $\dot{\epsilon}$, por motivos de ordem prática que serão discutidos no Capítulo 10.

Algumas formulações particulares da Viscoplasticidade são dignas de nota. São elas a lei de Andrade:

$$\epsilon_p = A t^{1/q} \quad (4.6)$$

para fluência primária, e a lei de Norton:

$$\dot{\epsilon}_p^* = (\sigma/\lambda^*)^N \quad (4.7)$$

onde A, q, λ^* e N são constantes a serem determinadas.

Nas descrições da viscoplasticidade, é comum utilizar-se a partição das deformações de um modo análogo à plasticidade:

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_{in} \quad (4.8)$$

onde ϵ_e é uma deformação elástica (reversível) e ϵ_{in} uma deformação inelástica, irreversível, para a qual concorrem três tipos de deformações: (a) uma deformação plástica instantânea, independente do tempo, geralmente inexistente; (b) uma deformação viscoplástica, ou deformação de fluência e (c) uma deformação anelástica ou de elasticidade retardada. Para a maioria dos materiais, num largo domínio de temperatura, a deformação viscoplástica é suficiente para descrever os experimentos. A deformação anelástica do tipo "c" acima pode ser tratada no domínio da viscoelasticidade. No presente trabalho, além da viscoplasticidade, observa-se a presença tanto da deformação anelástica (viscoelasticidade) quanto de uma deformação elástica, esta última verificada quando da ruptura do corpo de prova (v. Capítulo 9, retração da deformação).

Estas equações, assim como aquelas desenvolvidas neste trabalho, são formulações básicas para descrição do comportamento fundamental. Outras formulações mais complexas, tendo como caso particular estas formulações básicas, são desenvolvidas. Segundo a metodologia desenvolvida por Lemaitre e Chaboche, têm-se, por exemplo, para viscoplasticidade com

encruamento isotrópico, as seguintes "leis":

- Lei de encruamento-viscosidade aditiva, identificada a partir de ensaios de tração,

$$\dot{\varepsilon}_p = (3/2) <(\sigma_{eq} - R - k)/K_a>^{N_a} \quad (4.9)$$

onde $R = f(\varepsilon_p)$, ε_p é uma deformação plástica acumulada, k é o limite de elasticidade inicial, K_a e N_a são constantes a serem determinadas, σ_{eq} é a tensão equivalente de Mises;

- Lei de encruamento-viscosidade multiplicativa, identificada a partir de ensaios de tração,

$$\dot{\varepsilon}_p = (3/2) (\sigma_{eq} / (K \varepsilon_p^{1/M}))^N (\sigma' / \sigma_{eq}) \quad (4.10)$$

onde ε_p é uma deformação plástica acumulada, σ' é a tensão desvio, σ_{eq} é a tensão equivalente de Mises, K e N são constantes a serem determinadas

Há, ainda, leis para encruamento cinemático, num grau crescente de complexidade algébrica.

Deve-se observar que, não importando o grau de complexidade do equacionamento, o procedimento é basicamente a realização de experimentos e a determinação dos parâmetros das formulações através de regressões sobre os dados experimentais. Os procedimentos para a obtenção destes parâmetros nem sempre é direto, dependendo do caso em questão e da formulação escolhida. Para o tipo de modelagem efetuada neste trabalho, basta um equacionamento do tipo da eq. (4.5) para descrição do comportamento básico.

CAPÍTULO 5

AS RESINAS E SUAS MISTURAS

Os polímeros orgânicos amorfos constituem-se de macro-moléculas, são extremamente numerosos e bastante diversos em estrutura e propriedades. Têm aplicações devido às suas propriedades elétricas e térmicas (isolamento), óticas (camadas em óculos de segurança), e mecânicas. Dentre os polímeros sintéticos, destacam-se as resinas vítreas e duras, os adesivos pegajosos e macios, as fibras têxteis fortes e resistentes, os elastômeros altamente extensíveis e os revestimentos superficiais duráveis.

5.1 Estrutura Química Básica

A característica estrutural central da química dos polímeros é sua cadeia de átomos unidos por ligações covalentes. O exemplo mais simples é a cadeia linear do polietileno, como na Figura 5.1.

O carbono é tetravalente, podendo formar ligações covalentes fortes com hidrogênio, oxigênio, cloro, enxofre, nitrogênio e outros átomos de carbono. Desse modo, existe a possibilidade de se formarem moléculas de cadeia longa bastante extensa e também redes de moléculas.

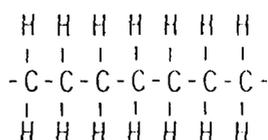


Fig. 5.1 - Cadeia linear do polietileno

O número de estruturas poliméricas possíveis é imenso. Estas estruturas apresentam certas características importantes: geometria tetraédrica de carbono saturado e rotação ao redor das ligações carbono-carbono. Isto tem peso importante nas propriedades das cadeias poliméricas. Numa molécula com constituintes maiores, as restrições à rotação são mais fortes, no entanto, mesmo numa molécula com uma alta barreira energética à rotação, muitos "saltos" de uma configuração "desencontrada" para outra ocorrem a cada segundo. Dessa forma, uma revisão da cadeia linear do polietileno é mostrada na Figura 5.2, que ainda não é, de fato, a forma real da molécula.

Esta possibilidade de cada ligação carbono-carbono girar permite à cadeia tomar um grande número de diferentes configurações, contorcidas e encaracoladas em três dimensões. Além disso, a cadeia está num estado de constante movimento, contorcendo-se de uma forma encaracolada para outra. A velocidade das contorções varia drasticamente com a temperatura e difere distintamente de um polímero para outro. Por exemplo, na borracha natural as cadeias se contorcem de uma forma a outra milhares de vezes por segundo a 25°C, mas o movimento é extremamente lento a -100°C, e no poliestireno as contorções são desprezíveis a 25°C, mas rápidas a 150°C. Desse modo, a mobilidade intramolecular baseada na rotação das ligações carbono-carbono, característica importante dos polímeros, é a base do comportamento elástico (como na borracha) e viscoelástico destes materiais. (Alfrey e Gurnee, 1967)

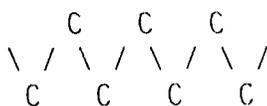


Fig. 5.2 - Revisão da cadeia linear do polietileno

5.2 Composição Química versus Arquitetura Molecular

Ao se analisarem as relações entre a estrutura e as propriedades físicas dos polímeros, distinguem-se dois aspectos distintos de sua estrutura molecular: composição química e arquitetura molecular. A composição química está ligada à estrutura local, à natureza da(s) unidade(s) básica(s) que se repete(m), mostrada pela simples fórmula estrutural do polímero. Na maioria dos casos determina seu nome. Por outro lado, a arquitetura molecular está ligada à estrutura como um todo. Neste aspecto, um polímero linear tem um peso molecular médio, com distribuição deste peso. Um polímero com ramificações deve ser identificado com relação à frequência e comprimento dos ramos, e uma rede tridimensional será caracterizada, por exemplo, por um comprimento médio de cadeias entre os nós da rede.

5.3 Resposta do Material a mudanças na temperatura

Uma característica marcante dos polímeros é a mudança sensível na resposta do material quando sofre mudanças na temperatura. Ocorrem aí mudanças concomitantes na estrutura interna, i.e., nos mecanismos físicos subjacentes.

Como exemplo típico de comportamento de um polímero tem-se o poliestireno (Hayden et alii, 1965). São características deste comportamento as regiões de comportamento distinto para diversas faixas de temperatura. O poliestireno tem cinco regiões distintas. Estas regiões apresentam comportamento: 1) vítreo; 2) análogo ao couro; 3) análogo à borracha; 4) de fluxo como o da borracha; 5) líquido. Na região (1), tem-se um sólido elástico como o vidro. Uma pequena tensão leva a uma pequena deformação elástica e reversível. Esta deformação provém das ligações covalentes, por estiramento e flexão, e da variação das distâncias intermoleculares entre cadeias vizinhas. Nesta região, as cadeias estão “congeladas” juntas, não podendo fluir passando umas pelas outras, e só podem ser separadas por fratura. Na região (2),

encontram-se deformações bem maiores. Mesmo sem tensão mecânica, as cadeias estão se contorcendo de uma conformação a outra e existe auto-difusão de cadeias inteiras. Se uma tensão mecânica é imposta, o movimento randômico é induzido favorecendo certas conformações. Como exemplo de movimento preferencial induzido, uma tensão de tração favorece formas mais estendidas, orientadas mais paralelamente à tensão, provocando então uma distensão do espécimen a nível macroscópico. Trata-se de um comportamento elástico retardado, cuja deformação é recuperável após remoção da carga. Neste caso, nem a distensão ou deformação longitudinal, nem a recuperação são instantâneas. Se o material não estiver interligado, pode existir um fluxo viscoso lento irrecuperável, à medida em que cadeias inteiras de polímeros se deslocam lentamente com relação às que lhes estão próximas. (Hayden et alii, 1965)

5.4 *Materiais Amorfos para Modelagem*

Os materiais para modelagem fotoplástica são materiais macromoleculares, produzidos pela combinação de unidades mais simples através de copolimerização, policondensação e poliadição. Este último é um processo químico cujos produtos finais, do ponto de vista mecânico e ótico, são moléculas de cadeia cujos comprimentos e ramificações podem diferir até mesmo para o mesmo material. Estes materiais são sólidos à temperatura ambiente, capazes de apresentar a propriedade da *birrefringência* que os distinguem por um determinado comportamento ótico.

Nas moléculas poliméricas, existem as ligações iônicas (heteropolares) e as ligações covalentes (homopolares). As moléculas da maior parte dos polímeros formam ligações homopolares, e daí resulta que a natureza dielétrica dos polímeros é caracterizada por um momento de dipolo e uma *polarizabilidade*. Esta última pode ser descrita por um elipsóide, é de tipo tensorial, e é diretamente responsável pelo efeito de birrefringência sob carregamento mecânico. As

moléculas são mantidas unidas principalmente por forças de van der Waals, entre átomos sem ligações químicas, produzidas pelo campo de elétrons livres em rotação. (Javornicky, 1974)

Na Fotoelasticidade, tem-se uma “lei” utilizada para a descrição da correlação entre a birrefringência temporária e o estado de tensões elástico. Esta lei descreve ainda a relação entre a intensidade da radiação que passou através do meio birrefringente e a orientação dos eixos principais de tensão. Para a maioria dos materiais birrefringentes em uso, a birrefringência ou dupla refração existe ou é verificada até o ponto de ruptura. Sendo assim, é possível uma extensão do caso da Fotoelasticidade para o regime plástico, materializada na Fotoplasticidade. Porém, necessitam-se de estudos não só relativos à teoria da plasticidade, mas ainda todo um conjunto de considerações a respeito das características físicas dos materiais birrefringentes para uso nas deformações plásticas de modelos.

5.5 Resinas Termorrígidas e Resinas Termoplásticas

Na experimentação utilizando-se materiais poliméricos, um grupo importante de materiais são as resinas. Denomina-se resina a um polímero modificado por diferentes aditivos orgânicos e minerais, os primeiros na forma de estabilizantes, desmoldantes, e outros, e os segundos como pigmentos, cargas, etc. O segredo destas modificações (misturas) é o que faz a “arte” do formulador. Neste caso, após as modificações é difícil distinguir o que seja material plástico, elastômero, adesivo, pinturas e vernizes. Estas modificações nos polímeros ou misturas possuem a facilidade de poderem ser moldadas, para se obter um produto intermediário, como placas e tarugos a serem usinados, ou um produto final, como uma peça moldada num determinado formato necessitando apenas alguma usinagem superficial. (Weiss e Bord, 1983a)

As resinas se dividem em dois grandes grupos, termorrígidas e termoplásticas. As resinas termorrígidas só podem ser moldadas uma única vez, devido às ligações covalentes cru-

zadas entre as macromoléculas. Formam uma estrutura tridimensional por polimerização, sob a ação de calor, pressão, e/ou luz, em presença ou não de um catalisador. Esta estrutura só pode ser destruída por um alto grau de energia térmica. Deste modo, obtêm-se propriedades mecânicas e termomecânicas mais elevadas em relação às termoplásticas. Quando se emprega um material termorrígido, efetua-se uma verdadeira reação química no interior do molde. O material resultante é *fisicamente, mecanicamente e quimicamente diferente dos materiais originais*. Por outro lado, as resinas termoplásticas podem ser fundidas e modificadas várias vezes, após um aquecimento e um resfriamento. Existe a possibilidade de reciclagem de rebarbas, restos e mesmo componentes inteiros. Quando se transforma um material termoplástico, por exemplo por extrusão, moldagem, etc., seu estado físico muda somente temporariamente. (Weiss e Bord, 1983a)

5.6 Formação de Macro-moléculas Tridimensionais

As resinas tridimensionais são obtidas através das reações químicas de policondensação, poliadição e polimerização ou reticulação. A policondensação é a reação entre partes diversas, tendendo à formação de macro-moléculas com eliminação de um sub-agente, em geral a água. Como exemplos têm-se as resinas fenólicas e os poliésteres na sua fase termoplástica. A poliadição é uma reação análoga à policondensação, no entanto sem a eliminação de um sub-produto. São exemplos as resinas epóxi tratadas com endurecedores de aminas ou hidroxilas. A reticulação, também conhecida por polimerização ou copolimerização, também é uma reação como as anteriores, sem sub-produto. Neste caso, a reação se processa através da abertura de ligações duplas, reação efetuada a partir de monômeros com duas ou várias ligações duplas não conjugadas. Como exemplo, citem-se o ftalato de dialila e resinas de poliéster policondensadas com o estireno. (Weiss e Bord, 1983a)

Os poliésteres clássicos polimerizados são o resultado de duas operações. Inicialmente,

é feita uma policondensação, onde acontece a formação de cadeias de poliésteres termoplásticos. A seguir, é efetuada sua copolimerização com o estireno. (Weiss e Bord, 1983a)

5.7 Misturas

Na prática da Fotoplasticidade trabalha-se com misturas. O elemento principal destas são os polímeros, orgânicos ou semi-orgânicos, montados a partir de monômeros. Estas misturas apresentam várias características, de acordo com o nível estrutural considerado. No primeiro nível, tem-se a estrutura das macro-moléculas, que pode ser linear, ramificada, ou reticulada (em três dimensões). Tem-se uma rigidez molecular do conjunto local. Aqui, tratam-se ainda simplesmente de polímeros. A partir de associações entre as macro-moléculas, têm-se as resinas. Neste segundo nível encontram-se as estruturas resultantes das ligações intermoleculares, formando as resinas termoplásticas ou termorrígidas. Este sistema apresenta uma "arquitetura" com estrutura amorfa em grande parte dos casos, e principalmente naqueles de interesse neste estudo. Num terceiro nível, tem-se a estrutura supermolecular ou macroscópica, formada pelas estruturas do segundo nível juntamente com as heterogeneidades presentes no conjunto total. Estas heterogeneidades são de natureza física e química. Estas últimas provêm das misturas de polímeros com estruturas diferentes. Observe-se, no entanto, que certas similitudes de estrutura devem existir para tornar a associação compatível. Este é o tipo de estrutura resultante do material utilizado neste trabalho de tese, que trata das propriedades mecânicas e óticas da associação de componentes com propriedades complementares, um componente relativamente rígido associado a um componente flexível, utilizados em porcentagens em peso.

O material aqui estudado é, então, um exemplo típico de mistura com estrutura tridimensional altamente complexa. Trata-se de um polímero rígido disperso numa matriz de polímero flexível, quando se têm uma quantidade preponderante de polímero flexível, ou vice-versa,

quando a parte em peso de polímero rígido predomina. A fase rígida introduz alta resistência, boa durabilidade (sem interesse neste trabalho), certa estabilidade térmica, e resistência química. A fase flexível melhora a resistência aos choques e facilita a utilização.

Para fins deste estudo, somente é de interesse a diversidade no comportamento mecânico destas diferentes misturas, para fins de simulação. A identificação dos polímeros, das resinas (polímeros com aditivos), e finalmente das misturas de polímeros (resina rígida mais resina flexível), junto com a caracterização das propriedades das partes, vai dar subsídios para a escolha de materiais cuja combinação resulte num conjunto de propriedades convenientes para uso em materiais a serem empregados na fabricação de modelos para estudo fotovisco-plástico.

5.8 Propriedades de Modelagem dos Materiais Oticamente Sensíveis

Os mecanismos de deformação dos polímeros e misturas são basicamente similares, mas não podem ser deduzidos pura e simplesmente de sua estrutura. Peculiaridades específicas devem ser observadas, e o comportamento deve ser avaliado individualmente. Segundo sua tendência à deformação plástica, estes materiais podem ser classificados em dois grupos:

- *1º Grupo, materiais com qualidades dúteis:* Polímeros lineares, termoplásticos e polímeros interligados ("cross-linked") termorrígidos. Suas estruturas apresentam forças de dipolo, de dispersão, e interligação por pontos somente. Estas forças e ligações não impedem o movimento necessário para ocorrer deformação plástica. Exemplos de materiais neste grupo são, respectivamente à existência de um determinado tipo de força ou ligação citados: acrilatos, PVC, polivinilbutiral; polietileno, poliestireno; poliamida, acetato de celulose, celulóide e poliuretano.
- *2º Grupo, materiais rígidos:* Apresenta estrutura interna interligada pelas ligações de valência principais. São presumivelmente incapazes de deformação plástica, mas existe a

ocorrência de certos derivados com caráter exatamente contrário, e ainda a possibilidade de uma superestrutura.

Em termos gerais, a homogeneidade imperfeita e a isotropia dos materiais leva a uma dispersão das constantes mecânicas e óticas para diferentes porções do mesmo material.

À temperatura ambiente, estes materiais podem ser:

- *Frágeis*: a relação $\sigma \times \epsilon$ é reduzida, linear ou ligeiramente não linear até a ruptura, como o umaplex e o poliestireno.
- *Dúteis*: são capazes de deformação permanente, como a poliamida, o PVC, o celulóide.
- *Intermediários*: apresentam fratura frágil mas deformação por fluência anelástica, como o PVB e a “epoxyde” (resina epóxi).

5.9 Casos Específicos: Alguns Materiais e suas Características

- *Resinas de Poliéster*: Formam um grande grupo, com variedades de tipos diferentes. São a base dos métodos de “congelamento” de tensões. Suas ligações estruturais são destruídas somente por calor. Seu comportamento reológico está muito distante de ser uniforme. Os diversos tipos apresentam característica mais ou menos flexível. Por isso, além da utilização de uma determinada resina unicamente, o uso de misturas, em proporções diferentes, de resinas de poliéster rígida e flexível permite alterar suas propriedades. As misturas de resina de poliéster utilizadas nesta tese, sua obtenção e cura, estão no Capítulo 8 (item 8.1).

- *Resinas Epóxi*: Devido à sua composição química, exibem uma grande faixa de propriedades mecânicas e óticas.

- *Tecnopolímeros*: Ao se referir a um “plástico”, termo de uso comum, na realidade se está referindo a uma resina termoplástica. Trata-se de uma família de materiais bastante vasta, que pode ser subdividida em dois grande grupos, segundo sua produção e uso, em plásticos de grande difusão, com altíssima produção e baixo custo, e plásticos técnicos ou tecnopolíme-

ros, obtidos através de um número maior de processos subseqüentes, mais complexos, resolvendo certos problemas bastante específicos. Um exemplo destes materiais é o policarbonato, utilizado na fotoplasticidade tridimensional e na investigação dos campos de deformação em modelos descarregados com deformação permanente. (Weiss e Bord, 1983a)

- *Policarbonato com Resina Epóxi*: Apresenta uma curva $\sigma \times \epsilon$ não linear, ajustada por vários ciclos de tratamentos térmicos. Aplicável a estudos tridimensionais, apresentando características de fluência.

CAPÍTULO 6

FOTOPLASTICIDADE

O fenômeno físico da Fotoplasticidade é bastante complexo. Uma maneira de apresentá-lo, em suas características básicas, consiste em efetuar-se a formulação das quantidades fenomenológicas envolvidas. Pode-se, assim, apresentar a Fotoplasticidade através de relações matemáticas entre quantidades identificadas, por exemplo as quantidades identificadas como anisotropia de força e deformação (Javornicky, 1974). Desse modo, o desenvolvimento a seguir, apesar de não ser utilizado diretamente em experimentos caracterizadores, apresenta o fenômeno ótico presente em ensaios fotoelásticos/fotoplásticos. No entanto, quando da utilização destes materiais na modelagem, necessitam-se destas equações para aplicações práticas, principalmente das relações do item 6.3.2, que relacionam a quantidade de franjas provenientes dos ensaios óticos ao estado interno de tensões/deformações.

6.1 Bases Físicas da Fotoplasticidade

A matéria tem uma natureza eletromagnética. Isto quer dizer que qualquer molécula ou agrupamento de moléculas está envolto em um campo eletromagnético proveniente de sua própria constituição. Assim, cada agrupamento característico de moléculas provoca um campo eletromagnético específico.

Consideremos, agora, uma modificação no estado de agitação das moléculas via solicitação mecânica. Quando se provoca uma deformação mecânica num material, está-se ativando ou excitando as ligações internas do material, que tendem a resistir a esta solicitação. Com esta deformação mecânica está-se forçando estas ligações a uma modificação em seu estado anterior, inicial ou “de repouso”. Trata-se de uma excitação mecânica do campo eletromagnéti-

anterior, inicial ou "de repouso". Trata-se de uma excitação mecânica do campo eletromagnético, ou seja, de uma modificação via solicitação mecânica do estado de agitação inicial das moléculas. O estado anterior à solicitação é dito "de repouso" quando o material tiver sido fabricado sem a produção de tensões internas, na ausência de quaisquer deformações residuais provenientes de esforços mecânicos solicitantes. Caso o processo de fabricação produza tensões internas, solicitações externas adicionais vão se sobrepor às solicitações iniciais já existentes, formando uma situação bem mais complexa, que não é objeto de estudo aqui.

A seguir, considere-se a relação entre a estrutura interna e a isotropia das propriedades eletromagnéticas. Em termos gerais, quanto maior a simetria do conjunto de moléculas, mais pronunciadamente anisotrópicas serão as propriedades do campo eletromagnético. Isto é especialmente marcante em macromoléculas, já que seus comprimentos excedem seus diâmetros de várias ordens de grandeza. A anisotropia deste campo eletromagnético manifesta-se de várias maneiras. Em termos óticos, o efeito mais pronunciado resulta na refração, em duas componentes, de um raio de luz passando através de um material sob solicitação mecânica, efeito conhecido como birrefringência ou refração dupla. Este efeito geralmente desaparece quando a solicitação é removida, sendo então denominado "birrefringência temporária".

Passemos, a seguir, a analisar a quantificação deste fenômeno. As forças mecânicas forçam os átomos de um sólido a se moverem de suas posições de equilíbrio existentes no estado inicial ou "de repouso". A distância entre os centros de gravidade dos átomos de ligação direta provavelmente não muda. No entanto, sofrem modificação de posição relativa, nos átomos formando ramificações a partir do esqueleto básico, que são átomos de ligação indireta ou intra-molecular, e nos ângulos de valência. Nos materiais transparentes, estas modificações de posição resultam na divisão de um feixe de luz incidente em dois, polarizados linearmente e em direções mutuamente perpendiculares, que fazem as camadas de elétrons dos átomos vibrarem. A fase do feixe original se transforma então em duas componentes, com duas fases diferentes, uma em cada componente. A avaliação quantitativa destas componentes depende

da *polarizabilidade*, que é uma indicação da transmissividade à luz da camada de elétrons da molécula.

A polarizabilidade é definida pela relação:

$$M_i = \alpha \Phi \quad (6.1)$$

onde M_i é o momento elétrico induzido, que depende do estado de tensões do campo e da forma deformada da envoltória elétrica, Φ é o campo elétrico externo, proveniente da ação da envoltória de elétrons e do núcleo da molécula, e α é a polarizabilidade, constante de proporcionalidade entre os dois primeiros. Num átomo livre $M_i=0$, já que o centro de gravidade da envoltória coincide com o centro de gravidade do núcleo do átomo.

A onda de luz tem um campo magnético mudando periodicamente, e interpreta a polarização da molécula através de uma mudança na sua velocidade de propagação. Deste modo, verificando-se a mudança na velocidade de propagação da onda de luz pode-se medir a polarização de uma molécula que está no caminho desta onda luminosa. A capacidade macroscópica de uma substância em polarizar um raio de luz que passa pela mesma é caracterizada por um índice de refração n , relativo a uma dada direção de propagação. Como a passagem da luz deve ser considerada em duas dimensões, a magnitude da birrefringência pode ser computada simplesmente como a diferença entre os índices extremos de refração nas duas direções principais.

A polarizabilidade das moléculas é o fator determinante da anisotropia ótica que causa a birrefringência. Como a eq. (6.1) é uma relação vetorial linear, a polarizabilidade tem propriedades de um tensor simétrico e pode ser interpretada por um elipsóide. Se a distribuição dos elipsóides moleculares no material for totalmente aleatória, o material vai exibir macroscopicamente uma isotropia ótica. No entanto, uma anisotropia pode existir por orientação (anisotropia positiva) e devido à densidade (anisotropia negativa).

A anisotropia por orientação aparece especialmente através da ação das forças externas, que modificam o estado de equilíbrio. Os eixos principais dos elipsóides de polarizabili-

de alinham-se na direção principal da orientação da estrutura e perpendicular à mesma, o que causa uma birrefringência positiva. A anisotropia devido à densidade deve-se à variação da densidade em diferentes direções. Para uma tração uniaxial, a densidade diminui na direção da extensão e aumenta na direção perpendicular, o que provoca uma birrefringência negativa. Estas duas anisotropias geralmente acontecem simultaneamente, e agem uma em oposição à outra. Geralmente, a birrefringência negativa domina na anisotropia resultante.

Existem interferências que influem nos efeitos óticos, como por exemplo a mudança no sinal e na magnitude da constante ótica durante a deformação por fluência. Por outro lado, sistemas super-estruturais em polímeros cristalinos, que formam diversos tipos de estruturas tri-dimensionais, têm papel semelhante ao das moléculas.

Os dados relativos à situação energética num sólido sob tensão permitem classificar a natureza da birrefringência inicial e sua relação com as mudanças mecânicas numa substância macromolecular sólida. A partir de uma sollicitação externa sobre o sólido macromolecular, vai existir uma força de reação Q tal que:

$$Q = (\partial F/\partial l)_{T,\eta} = (\partial U/\partial l)_{T,\eta} - T (\partial S/\partial l)_{T,\eta} = A - B \quad (6.2)$$

onde T é a temperatura absoluta, η designa outros parâmetros internos, l é o comprimento, F a energia livre, U a energia interna, S a entropia do sistema.

A parcela A se refere à “elasticidade energética” e representa a variação de energia dependente do comprimento. É igual ao trabalho realizado para mudarem-se as forças interatómicas que mantêm os átomos em suas posições de equilíbrio. Finalmente, esta parcela está relacionada à *birrefringência de tensão* (ou de força). A parcela B se refere à “elasticidade entrópica” e representa a variação de entropia dependente do comprimento. Leva a uma orientação das cadeias moleculares, a um “desempenamento” ou “desenrolamento” na direção da deformação, tendendo a reverter ao estado de desordem, por razões cinéticas, termodinâmicas, estatísticas e mecânicas. Está relacionada à *birrefringência de orientação*.

A birrefringência de tensão, δ_s , segue um determinado mecanismo. As ligações mais fra-

cas falham, provocando uma mudança principalmente nas ligações de valência secundária e em seus ângulos de valência. Tem-se, então, anisotropia na polarizabilidade. As ligações de valência principal participam muito pouco, não havendo, assim, “desenrolamento” nem “deslizamento” entre moléculas, somente deformações que afetam o espaçamento entre as moléculas deixando, porém, sua forma e posição relativa qualitativamente sem mudanças.

A birrefringência de tensão é característica de materiais de “baixa cadeia”, independe do tempo, desaparecendo imediatamente após a retirada da carga, podendo, no entanto, exibir elasticidade “retardada”. Independe, também, da temperatura, a não ser que a temperatura mude as constantes mecânicas e as distâncias interatômicas. Apresenta polarizabilidade quando do rearranjo dos elétrons de valência. Sua quantificação depende da distribuição dos elipsóides de polarizabilidade dos átomos da cadeia e da diferença entre os valores principais da polarizabilidade resultante. Esta é, de fato, a lei da Fotoelasticidade, expressa por:

$$\delta_s = C \tau d = C (\sigma_1 - \sigma_2) d/2 \quad (6.3)$$

onde C é a constante fotoelástica, τ é a tensão cisalhante máxima, e d é a espessura da camada na direção de propagação. A birrefringência de tensão ocorre em pequenas deformações, i.e., em deformações elásticas.

A birrefringência de orientação, δ_o , segue mecanismo diverso. Neste caso, ocorre um “desenrolamento” com “desempenamento” ou “endireitamento” simultâneo das cadeias moleculares, através da ação de forças externas. Isto quer dizer que, numa estrutura ideal, altamente elástica (como p. ex. borracha), não existem deformações dos ângulos de valência, influência das forças de ligações entre as cadeias, nem influência de forças de cristalização. Somente se observa o desenrolamento de segmentos da cadeia entre os pontos fixos (ligados) da estrutura. Em suma, tudo o que mudava na birrefringência de tensão não conta, e tudo o que ficava fixo começa a mudar.

A birrefringência de orientação é uma característica de materiais de “alta cadeia”, em grandes deformações. Somente é passível de medida (separação) em grandes deformações,

quando a deformação pode seguir livremente, sem impedimentos. Depende do tempo, ou seja, pode ser usada para descrever a fluência e a relaxação. A quantificação desta birrefringência representa a medida da orientação das moléculas:

$$\delta_o = N (\alpha_1 - \alpha_2) (\epsilon^2 - (1/\epsilon)) \quad (6.4)$$

onde N é a constante do índice de refração do meio e do número de segmentos por volume unitário, $(\alpha_1 - \alpha_2)$ fornece a quantificação da polarizabilidade de segmentos de fibra na direção do eixo e perpendicular a esta, e ϵ é a deformação produzida.

Para elastômeros,

$$\sigma = E [\epsilon^2 - (1/\epsilon)] \quad (6.5)$$

e, então,

$$\delta_o = (C_o/E) \sigma = C \sigma \quad (6.6)$$

onde E é o módulo de elasticidade e σ a tensão existente.

Deve-se observar que os dois tipos de birrefringência sempre aparecem simultaneamente, mas com magnitudes diferentes. Devido à natureza de seus mecanismos, têm propriedades distintas. Para tensões "elásticas", só se tem δ_s , δ_o podendo ocorrer, mas sendo desprezível em magnitude. Para tensões "inelásticas" (plásticas), têm-se δ_s e δ_o , respectivamente descrevendo a parte elástica e a parte plástica. δ_s só existe praticamente em polímeros sólidos e no estado vítreo, sendo que em temperaturas superiores sua presença é sempre insignificante. δ_o caracteriza basicamente o comportamento não linear e é responsável pelas variações que dependem do tempo. O valor final da birrefringência, chamado "birrefringência de deformação", é dado por:

$$\delta = \delta_s + \delta_o \quad (6.7)$$

6.2 Teorias da Fotoplasticidade Plana

6.2.1 Teorias do Efeito Birrefringente Inelástico

Até o presente, as tentativas para se encontrar o "princípio físico" que relaciona tensão, ou deformação, ou ambas, à birrefringência, não foram bem sucedidas. Todas as teorias publicadas são de natureza fenomenológica. Deve-se considerar, no entanto, que a Metalurgia Física propõe explicações de certos fenômenos através dos tipos das ligações, da teoria das discordâncias, com "princípios físicos" através de "equações gerais", complexas, sobre conceitos "fundamentais" mas de pouca aplicação prática direta. Por outro lado, na Metalurgia Mecânica, são feitos ainda estudos experimentais, empíricos, baseados nos conceitos retirados da Metalurgia Física, no entanto com ênfase em considerações de ordem prática para a obtenção de resultados concretos. Em qualquer área, pode-se afirmar que "princípios" explicam tudo, em geral, mas não resolvem muitos casos em particular. Por isso realizam-se os estudos práticos de um fenômeno, visando resolverem-se problemas particulares, de algum modo, sem muita preocupação com generalizações "a priori". Somente após um certo número de resultados práticos, pode-se começar a tentar as primeiras generalizações.

Existem, assim, dificuldades em se encontrar o "princípio físico" relacionando plasticidade com birrefringência. As propriedades de deformação dos materiais para modelagem não têm um grau de similaridade que torne possível sua descrição satisfatória através de uma única equação. As possibilidades são ainda menores quando se quer incluir na descrição os efeitos óticos. Sendo assim, dispõem-se de teorias ou para um único tipo de material ou que se concentram num único intervalo de tensões ou de tempo, a partir de testes em um certo número de materiais análogos. Dessa forma, faz-se alguma restrição das variáveis atuantes e a certos materiais que apresentem o comportamento conveniente. Então, mesmo sem conhecer o "princípio físico fundamental", pode-se desenvolver a técnica, realizar aplicações, e resolver problemas práticos.

6.2.2 Teorias incluindo a Natureza Dupla da Birrefringência

As conclusões de natureza físico-químicas sobre a birrefringência indicam que esta tem uma natureza dupla, uma componente δ_s da deformação e uma componente δ_o da orientação. As teorias propostas são validadas pelo comportamento do celulóide, que corresponde na prática às conclusões acima.

A relação geral para se quantificar a birrefringência artificial temporária δ tem a forma:

$$\delta = F(\sigma, \epsilon, d\sigma/dt, d\epsilon/dt, d^2\epsilon/dt^2, t, \delta_0, \sigma_0, \epsilon_0, d) \quad (6.8)$$

onde $d\sigma/dt$ é a taxa de carregamento, $d\epsilon/dt$ a taxa de deformação, $d^2\epsilon/dt^2$ a aceleração de deformação, $\delta_0, \sigma_0, \epsilon_0$ são as condições iniciais e d é a espessura do modelo.

A função F descreve o estado mecânico do modelo. As limitações impostas são temperatura constante e umidade constante. Como $\delta = \delta_s + \delta_o$ tem-se:

$$\delta = G(\delta_s, \delta_o, d\epsilon/dt, d^2\epsilon/dt^2, t) \quad (6.9)$$

onde $d\epsilon/dt$ e $d^2\epsilon/dt^2$ influenciam a participação de δ_o no efeito resultante. Experimentalmente, verifica-se que δ_s depende acima de tudo da tensão. Sendo assim, usam-se para a quantificação de δ_s somente as variáveis que dependem da tensão, mais as condições iniciais. δ_o é função principalmente da deformação. Assim, tem-se:

$$\delta_s = f(\sigma, d\sigma/dt, \delta_0, \sigma_0, d) \quad (6.10)$$

$$\delta_o = g(\epsilon, d\epsilon/dt, d^2\epsilon/dt^2, t, \epsilon_0, \delta_0, d) \quad (6.11)$$

Note que, nesta relação, δ_o é a birrefringência de orientação e δ_0 é um condição inicial.

São feitas simplificações para facilitar a aplicação prática das equações. Estas se referem a um controle sobre os experimentos de forma a manter certas variáveis constantes, p.ex. $d\sigma/dt$, e as condições iniciais "zeradas", $\sigma_0 = 0, \delta_0 = 0$. Nesta descrição, $d\epsilon/dt, d^2\epsilon/dt^2$ e t são variáveis "subsidiárias", que auxiliam na descrição. O tempo t tem a maior influência, seja direta-

mente nos efeitos de fluência, seja através de $d\varepsilon/dt$ ou $d^2\varepsilon/dt^2$.

Algumas observações devem ser feitas a respeito das quantidades envolvidas. Sob altas taxas de carregamento, o material apresenta propriedades elásticas até o ponto de ruptura, seguindo a lei da Fotoelasticidade, $\delta = C_s \sigma d$. Sob baixas taxas de carregamento, o material apresenta deformação por fluência, e com o aumento da tensão aplicada verifica-se um aumento da birrefringência. A taxa de carregamento efetiva é o estado no qual, em qualquer ponto onde já existam tensões acima do limite de escoamento, a deformação ocorreu numa taxa que permitiu a formação de deformações plásticas. Estas últimas ocorrem devido somente à tensão, e não à fluência do material. Este estado pode ser considerado como um estado quasi-estático da deformação elasto-plástica. Quando se continua com um carregamento constante, aparecem em todos os pontos uma deformação por fluência, com mudanças correspondentes na birrefringência. Quando esta continuação é feita por carregamento a baixa taxa, resultam efeitos combinados de carregamento e fluência, que dependem ainda da magnitude da tensão aplicada em cada ponto considerado e do tempo durante o qual a tensão é aplicada.

Após as simplificações anteriores, obtém-se a fórmula de Brewster-Wertheim:

$$\delta_s = C_s \sigma d \quad (6.12)$$

onde C_s é a constante fotoelástica. Quanto a δ_o , sua magnitude é influenciada pela taxa de deformação e pelo tempo, através da magnitude do gradiente de deformação.

Quanto maior o tempo e quanto maior a tensão, maior será a deformação e maior será δ_o . No processo de deformação, a taxa de deformação e/ou a aceleração de deformação variam. Isto quer dizer que, se a função $\varepsilon = \varepsilon(t)$ for conhecida, tem-se:

$$\delta_o = f[\varepsilon(t)] \quad (6.13)$$

Quando $\varepsilon \leq \varepsilon_{em\acute{a}x}$, tem-se δ_o pequena e desprezível. No entanto, ao se aumentar a deformação, aumenta-se a birrefringência de orientação, no início, de maneira não linear num pe-

queno trecho de transição, e de maneira linear nas deformações plásticas. Se σ_0 , ϵ_0 e δ_0 (δ_s ou δ_o) são zero e existe um controle do processo de carregamento, tem-se:

$$\delta_o = g [\epsilon(t), d] \quad (6.14)$$

Para deformações inelásticas (plásticas) e t constante tem-se:

$$\delta_o = K_o (\epsilon - \epsilon_p) d \quad (6.15)$$

onde K_o é a constante ótica, similar à constante da Fotoelasticidade.

Deve-se observar que a sensibilidade ótica de δ_o com relação à deformação inelástica é geralmente menor do que a "sensibilidade" ótica de δ_s à deformação elástica. A contribuição de cada tipo de birrefringência na birrefringência total pode ser esquematizada como na Figura 6.1.

Do desenvolvimento anterior, têm-se as equações básicas, simplificadas, da relação entre birrefringência de deformação (i.e., total) e tensões-deformações:

$$\delta = \delta_s + \delta_o = [C \sigma + K (\epsilon - \epsilon_e)] d \quad (6.16)$$

ou, para $\gamma = (1/2) (\epsilon_1 - \epsilon_2)$, tem-se:

$$\delta = 2 [C \tau + K (\gamma - \gamma_e)] d \quad (6.17)$$

onde δ_s é dada pela "lei" da Fotoelasticidade e δ_o pela "lei" da fotoplasticidade.

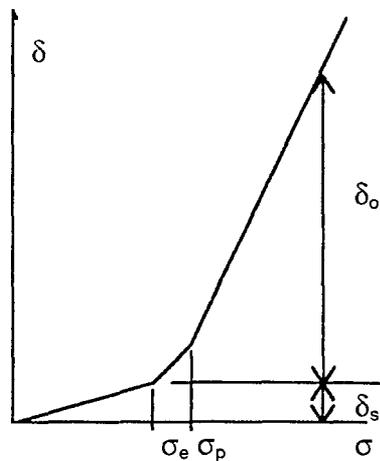


Fig. 6.1 - Efeito dos tipos de birrefringência

6.2.3 Avaliação da Birrefringência por Quantidade Mecânicas

No estado plano de deformações, através da polarização ótica, a componente da birrefringência correspondente ao regime elástico, δ_s , desaparece após descarregamento instantâneo. Dessa forma, somente permanece no modelo a birrefringência de orientação, com a magnitude atingida durante o carregamento. Define-se, assim, a birrefringência residual instantânea δ_z :

$$\delta_z = \delta_o = \delta - \delta_s \quad (6.18)$$

Das relações anteriores, têm-se:

$$\sigma = [1/(C d)] (\delta - \delta_z) \quad (6.19)$$

$$\varepsilon = [1/(k d)] (\delta_z + \varepsilon_t) \quad \text{ou} \quad \varepsilon - \varepsilon_e = \delta_z / (K d) \quad (6.20)$$

onde $\varepsilon_t = K d \varepsilon_e$.

Para um estado tri-dimensional de deformação, utilizando-se a nomenclatura usual da experimentação na área, as deformações em função da ordem de franja e espessura da fatia são dadas por:

$$\varepsilon_x - \varepsilon_y = (N_y F_\varepsilon)/t_y, \varepsilon_x > \varepsilon_y \quad (6.21.a)$$

$$\varepsilon_y - \varepsilon_z = (N_x F_\varepsilon)/t_x, \varepsilon_y > \varepsilon_z \quad (6.21.b)$$

onde N_x, N_y correspondem à ordem de franja isocromática no ponto de interesse, t_y, t_x à espessura da fatia e F_ε é a constante característica do material ou constante ótica de deformação.

6.2.4 Restrições para Aplicações em Viscoplasticidade

Para materiais com características viscosas, duas considerações devem ser feitas. Inicialmente, as equações anteriores fornecem resultados diversos para cada taxa de deformação aplicada e cada temperatura de ensaio, sendo então necessária uma sistematização de resultados para as propriedades óticas análoga àquela utilizada para as propriedades mecânicas,

com equações adicionais levando em conta o efeito da taxa de deformação e da temperatura.

Em aplicações práticas, o desenvolvimento das tensões/deformações com o tempo implica não serem possíveis leituras de franjas isoclínicas (lugar geométrico dos pontos que têm a mesma direção das tensões óticas principais) para um determinado estágio de deformação, somente franjas isocromáticas (lugar geométrico dos pontos que têm a mesma diferença das tensões principais). Outra consideração se refere ao caráter não estático dos experimentos: ao se aplicar uma solicitação e sair de um estado de deformação zero, se a deformação pára, ocorre relaxação das tensões, e se a tensão fica constante, ocorre fluência. Sendo assim, a aplicação do equacionamento anterior necessita de artifícios experimentais para determinar-se o estado de tensão-deformação efetivo da leitura, análogos aos utilizados para a determinação do estado de tensões/deformações a partir de fotografias.

CAPÍTULO 7

ENSAIOS CARACTERIZADORES

Para uma caracterização ampla do comportamento fundamental de um material, são necessários ensaios básicos diversificados, como os ensaios de encruamento, relaxação, fluência, ensaios cíclicos, de cujos gráficos $\sigma \times \varepsilon$, $\sigma \times t$ e $\varepsilon \times t$ são retirados parâmetros utilizados para distinguir ou caracterizar este material.

7.1 Tipos de Ensaios Realizados

Na caracterização de materiais com propriedades viscosas, cujas respostas às solicitações dadas são dependentes do tempo e da temperatura, além do ensaio clássico à tração, realizado neste caso sob várias temperaturas e taxas de deformação, tornam-se fundamentais os ensaios de relaxação e de fluência, sob as mesmas condições. No ensaio de relaxação, mantém-se um determinado nível de deformação constante e verifica-se a diminuição da tensão com o tempo. No ensaio de fluência, a tensão é mantida constante a um determinado nível, verificando-se a variação da deformação com o tempo. Ao invés de ensaios separados para relaxação e fluência, uma opção que proporciona economia de tempo e recursos consiste em se efetuar um ensaio de encruamento com relaxações múltiplas, de onde se retiram tanto curvas de tração e relaxação, diretamente, quanto curvas de fluência, a partir de um processo numérico (Lemaitre/Chaboche 1985). Este tipo de ensaio foi o adotado neste trabalho e está descrito no item 7.3 a seguir.

Além destes ensaios fundamentais, que fornecem parâmetros caracterizadores nas várias temperaturas e taxas de deformação, faz-se necessária uma avaliação da isotropia, necessária para caracterizar o comportamento no caso de uma reversão da solicitação. As proprie-

sária para caracterizar o comportamento no caso de uma reversão da sollicitação. As propriedades óticas, por sua vez, requerem uma série de ensaios específicos à parte, onde se observam e registram o aparecimento e a quantidade de franjas isocromáticas.

7.2 Ensaios de Fluência e Relaxação

Considere-se, inicialmente, um ensaio típico de fluência, como na Figura 7.1. Neste ensaio, aplica-se um carregamento, em força ou tensão, a uma determinada taxa $\dot{\sigma}$ até seu nível máximo. Este nível será posteriormente mantido constante por um período de tempo determinado Δt . Na ilustração mostrada na Figura 7.1, um peso P é preso à extremidade inferior de uma barra em tração, sendo liberado quasi-estaticamente, porém numa taxa temporal maior ou menor. A barra se alonga até atingir o nível de tensão final σ_A , quando então a força aplicada permanecerá constante. Nas máquinas de ensaio com controlador eletrônico é possível manter-se a tensão constante, através do uso de extensômetros. Para tal, monitora-se a variação da área da seção transversal através de um extensômetro longitudinal, e então um programa do sistema de controle da máquina varia a força aplicada para manter-se a tensão constante.

Como resposta a esta sollicitação, têm-se dois tipos de comportamento:

- *Elastoplástico* : a deformação permanece invariável durante todo o tempo em que a tensão estiver atuante com seu valor constante, i.e., não se verifica a fluência, como na Figura 7.1a; além disso, o nível de deformação atingido, σ_A , independe da taxa de carregamento $\dot{\sigma}$ (como é o caso da Figura 7.1b);
- *Elastoviscoplasticidade* : a deformação vai variar continuamente com o tempo, enquanto a tensão estiver atuante, e seu valor dependerá da taxa de aplicação da sollicitação, neste caso, da taxa de tensão aplicada, confira a Figura 7.1b; tem-se, aqui, o comportamento típico à fluência, onde, aumentando-se a taxa de tensão aplicada, aumenta-se o valor da deformação verificada num mesmo instante de tempo após o início da sollicitação, confor-

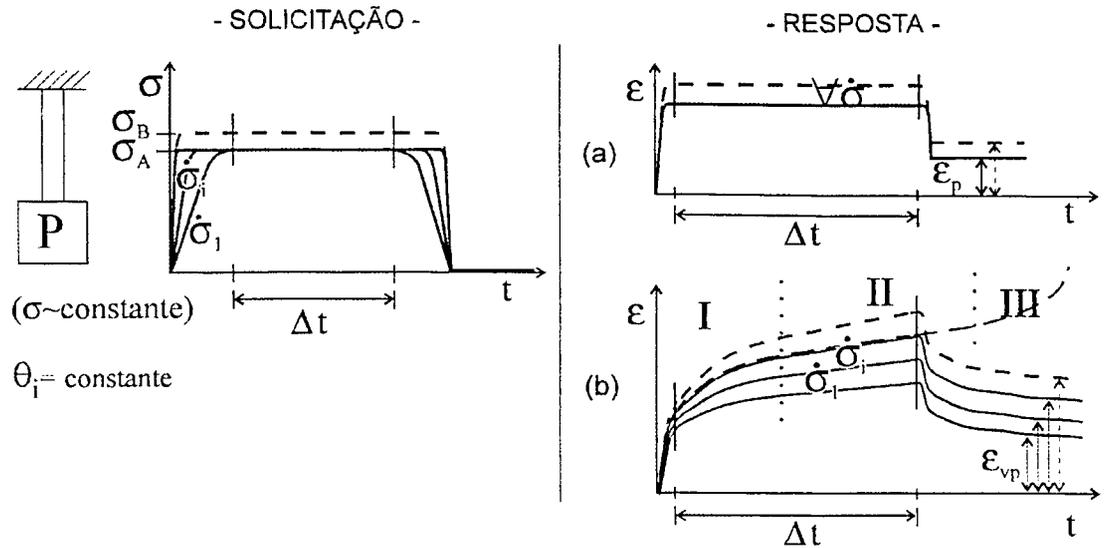


Fig. 7.1 - Solicitações e reações típicas à fluência: (a) comportamento elastoplástico, sem fluência sensível; (b) comportamento elastoviscoplastico, típico à fluência

me mostram as sucessivas curvas para diferentes valores de $\dot{\sigma}_i$ na Figura 7.1b.

Na Figura 7.1 se está considerando o comportamento a uma mesma temperatura θ . Este comportamento, no entanto, varia segundo a temperatura, observando-se um conjunto de curvas análogo ao da Figura 7.1b, porém com cada curva num nível maior ou menor para cada temperatura de ensaio menor ou maior. O efeito da temperatura é explicitamente mostrado a partir do Capítulo 8.

O valor final da deformação, seja elastoplástica (Figura 7.1a) ou elastoviscoplastica (Figura 7.1b), será obviamente também dependente do nível de tensionamento do material, obtendo-se um maior nível de deformação para um maior nível de tensionamento, como por exemplo indicado pelo valor final σ_B e pelas linhas com tracejado curto na Figura 7.1.

No descarregamento, relativo ao ensaio de fluência, será verificada a existência de uma deformação residual quando se ultrapassar o limite de escoamento, mostrada como ϵ_p na Figura 7.1a e ϵ_{vp} na Figura 7.1b.

Nos diagramas elastoviscoplasticos da Figura 7.1b, para uma dada temperatura estão mostrados os limites clássicos dos três tipos de fluência, primária (I), secundária (II) e terciária (III), esta última somente mostrada para uma curva indicada por tracejado longo, sendo necessário levar o corpo de prova até a ruptura para se chegar ao estágio terciário. As demais curvas da Figura 7.1 mostram ensaios com descarregamento bem antes da ruptura. Este tipo de ensaio não foi realizado experimentalmente, e está mostrado aqui como explicação do comportamento em fluência. As curvas de fluência numérico-experimentalmente obtidas neste trabalho estão situados no início do estágio (I).

No ensaio típico de relaxação, Figura 7.2, a solicitação aplicada está sob a forma de um deslocamento ou deformação, de zero até um nível determinado. Ao atingir-se este nível, mantém-se o deslocamento ou deformação num valor constante. Na Figura 7.2 ilustra-se esta solicitação como uma tração na extremidade de uma barra até um certo valor ΔL (ou ϵ), mantendo-se em seguida a extremidade da barra fixa neste ponto. Neste caso, ao se manter o deslocamento constante mantém-se também a deformação constante ($\epsilon = \Delta L / L_0$).

Analogamente à solicitação anterior, têm-se dois tipos de comportamento como resposta:

- *Elastoplasticidade*: a tensão permanece invariável durante todo o tempo em que a deformação estiver com seu valor final constante, i.e., não se verifica a relaxação já que o valor desta tensão independe da taxa de carregamento, como mostrado esquematicamente na Figura 7.2a;
- *Elastoviscoplasticidade*: a tensão vai variar continuamente com o tempo, enquanto a deformação é mantida constante, e seu valor dependerá da taxa de deformação aplicada; este é um comportamento típico à relaxação onde, aumentando-se a taxa de deformação aplicada, aumenta-se o valor da tensão para um mesmo instante de tempo, após o início da solicitação, conforme mostram as sucessivas curvas para diferentes valores de $\dot{\epsilon}$; na Figura 7.2b.

Analogamente à fluência, observe que este comportamento, vai, ainda, variar com a

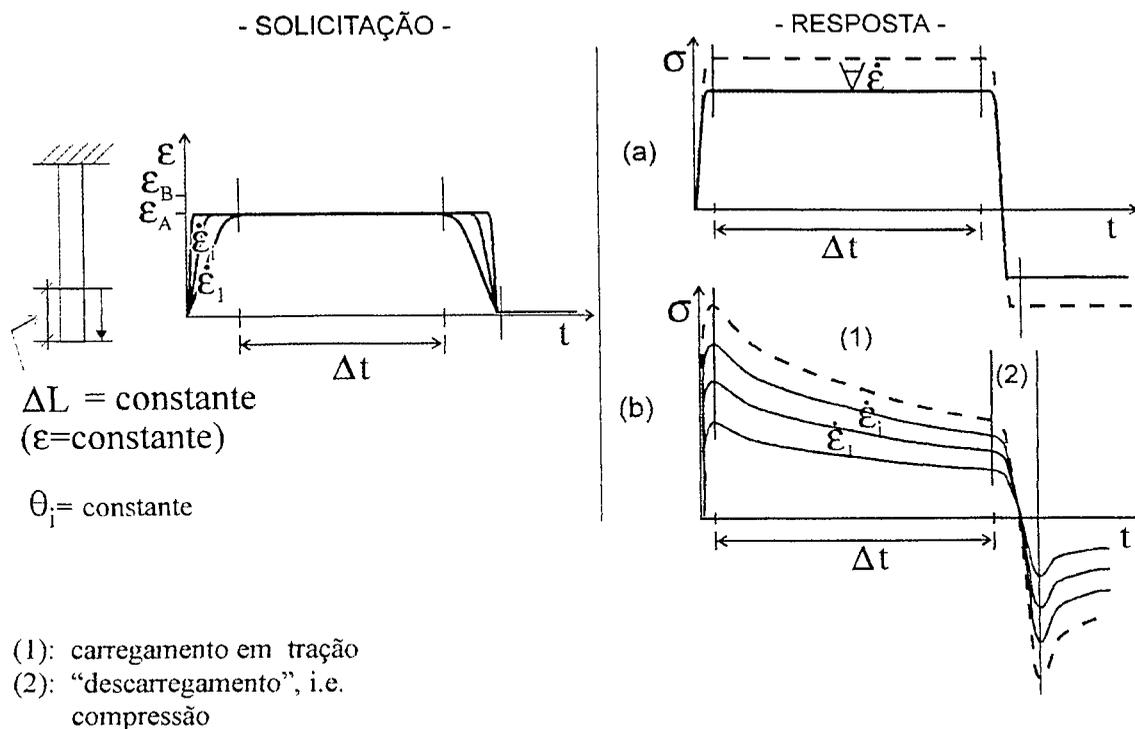


Fig. 7.2 - Solicitações e reações típicas à relaxação: (a) comportamento elastoplástico, sem relaxação sensível); (b) comportamento elastoviscoplastico, típico à relaxação)

temperatura, observando-se um conjunto de curvas análogo ao da Figura 7.2b, porém em níveis diferentes, para cada temperatura de ensaio.

Observe que na relaxação não se “retira” a solicitação, como no caso da fluência, mas faz-se a deformação voltar a zero, o que acarretará, nesta volta em compressão, uma diagrama análogo à tração, invertido com relação ao anterior, conforme mostra a parte (2) das curvas da Figura 7.2b. Não existem denominações específicas para porções do diagrama de relaxação, mas a porção das curvas desde o pico máximo de tensão, com decaimento não linear convexo, até o valor mínimo antes de se voltar a deformação a zero, constitui uma curva de relaxação clássica, como na parte (1) das curvas da Figura 7.2b.

7.3 *Ensaio de Tração com Relaxações Múltiplas*

A fim de se obterem parâmetros caracterizadores de encruamento, relaxação e fluência a partir de um só ensaio, os ensaios monotônicos clássicos de encruamento e relaxação são combinados em um teste composto único. Trata-se do ensaio de tração com relaxações múltiplas (Lemaitre e Chaboche 1992; Rade 1994). A partir deste ensaio podem-se obter os parâmetros elastoplásticos do material, tais como o módulo de elasticidade e limite de escoamento, caso se verifique um domínio elástico inicial, e os coeficientes K e M caracterizadores do diagrama tensão-deformação no domínio plástico, para a taxa de deformação dada. Obtêm-se, ainda, curvas de relaxação e também a curva de fluência (por um processo numérico) para um dado nível de tensão σ^* , σ^{**} , etc. (Lemaitre e Chaboche 1992).

As exigências mínimas para a coleta de dados neste ensaio são o diâmetro inicial do corpo de prova e o registro dos valores de tempo, deslocamento e carga. Para facilidade de cálculos e maior precisão, ao invés de se registrar o deslocamento e depois calcular a deformação, o uso de um extensômetro (eletrônico) registra diretamente esta deformação. O ensaio, também, caracterizará os parâmetros acima descritos para uma determinada temperatura, que deverá ser registrada, devendo-se realizar um ensaio de encruamento com relaxações múltiplas para cada temperatura onde se deseja determinar tais parâmetros.

No procedimento de ensaio, faz-se um teste comum de tração, durante o qual, no entanto, descarregamentos parciais são programados, conforme mostrado na Figura 7.3. Esta figura mostra um caso geral idealizado, onde se tem um comportamento elastoviscoplastico, com um domínio elástico inicial distinto (o que não acontece nos diagramas experimentais obtidos, que não possuem um domínio elástico inicial). Os descarregamentos ocorrem ao se manter a deformação constante durante certos períodos de tempo, como mostra a Figura 7.3a. Dessa forma, permite-se que o processo de relaxação aconteça. A Figura 7.3b mostra o diagrama tensão×deformação de um ensaio de encruamento com relaxações múltiplas completo, mos-

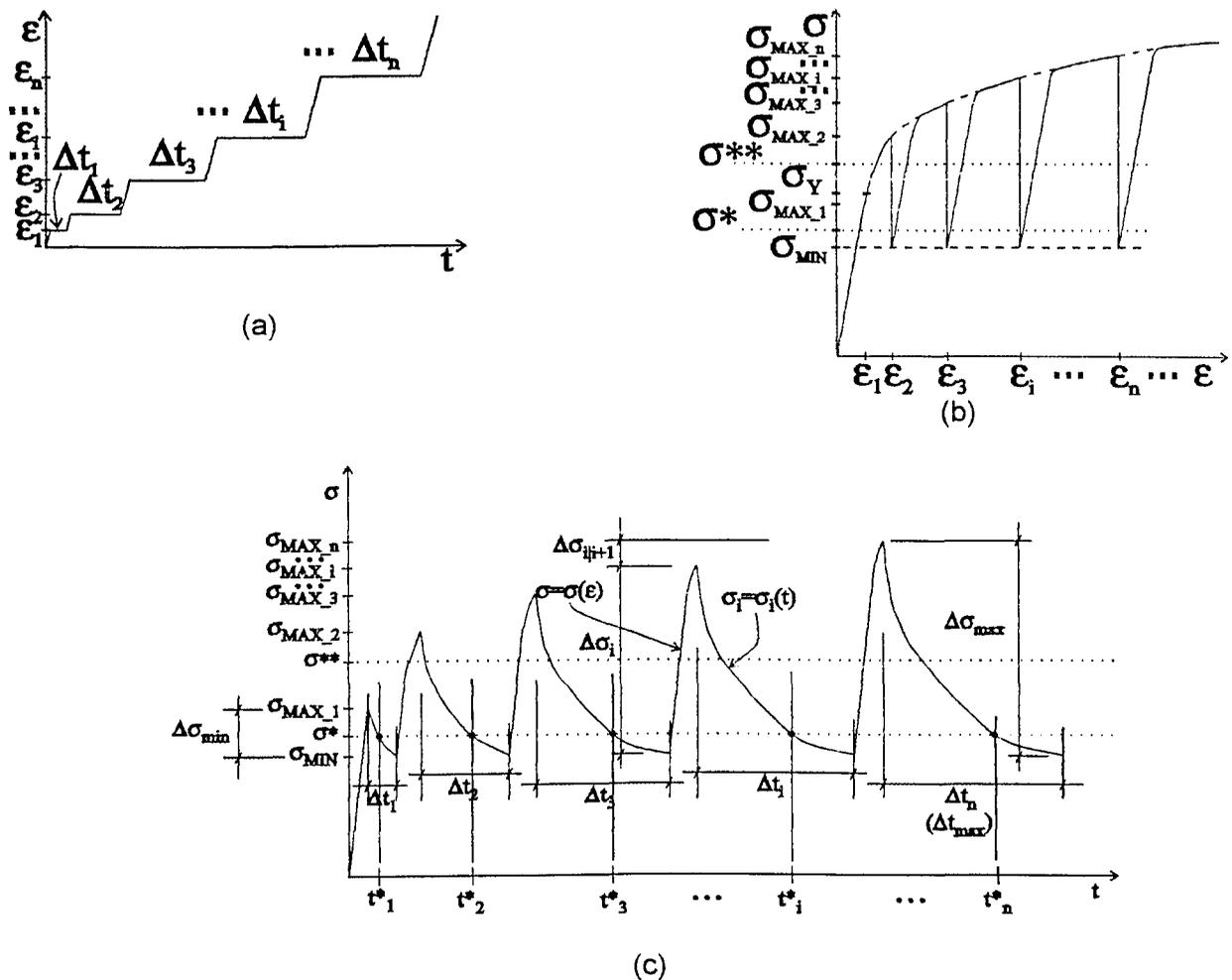


Fig. 7.3 - Esquema do Teste de tração relaxações múltiplas: (a) deformação aplicada, (b) diagrama tensão-deformação, (c) zonas de tração e relaxação

trando os trechos em tração intercalados por trechos em relaxação, estes últimos caracterizados por uma linha vertical onde a deformação é constante e a tensão decai continuamente. Neste caso, necessita-se do registro de $\sigma \times t$ para poder-se quantificar a queda de tensão. O desenvolvimento da tensão no tempo, que caracteriza a relaxação do material, é mostrado na Figura 7.3c. Neste mesmo gráfico observe em cada tração, curvas $\sigma = \sigma(\epsilon)$, seus domínios lineares elásticos iniciais (idealizados), indicando um comportamento elástico devido ao encruamento anterior. A partir de um certo ponto, a curva de tração torna-se não linear, pois ultrapassa-se o limite de escoamento. Este estágio inicial elástico é geralmente muito pequeno, na

maioria das vezes desprezível. As curvas de relaxação mostradas, $\sigma_i = \sigma_i(t)$, são típicas, compreendendo uma porção inicial de rápido decaimento, que se torna cada vez menor. Num ensaio de relaxação somente, pode-se atingir um estágio final de decaimento bastante lento.

Alguns pontos característicos neste teste, mostrados na Figura 7.3, são:

- os valores de deformação $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, etc., onde se realizará uma “parada” na tração;
- as tensões σ^*, σ^{**} , etc., cada uma indicando um nível de tensão para o qual uma curva de fluência $\varepsilon = \varepsilon(t)$ será obtida;
- a tensão de relaxação mínima σ_{MIN} , que é um valor de tensão mínimo a ser atingido por todas as relaxações; os dados acima deste valor serão utilizados para definir a curva de relaxação $\sigma_i = \sigma_i(t)$;
- a i -ésima tensão máxima σ_{MAX_i} atingida em cada tração, quando da “parada” pré-estabelecida (Figura 7.3a); a relaxação propriamente dita vai iniciar-se a partir deste valor de tensão;
- as faixas de tensão, desde a mínima $\Delta\sigma_{\text{min}}$, a i -ésima $\Delta\sigma_i$, até a máxima $\Delta\sigma_{\text{max}}$, dentro das quais situa-se a tensão σ^* (σ^{**} , etc.);
- o intervalo de tensão $\Delta\sigma_{ij+1}$ entre as tensões de tração máximas i e $i+1$, não necessariamente uniforme;
- o intervalo de tempo Δt_i verificado em cada relaxação, onde Δt_r é o máximo intervalo de tempo observado.

7.4 Ensaio de Tração Monotônico

Ensaio inicial de tração monotônicos são necessários para se “mapear” o comportamento, ou seja, para se fazer uma avaliação inicial do comportamento do material sob algumas condições de temperatura e taxa temporal de deformação dentro dos limites a serem estudados. Tratam-se de ensaios de tração monotônicos usuais até ruptura, sob várias taxas temporais de deformação e a várias temperaturas.

7.5 Viscoplasticidade sem um Domínio Elástico Inicial

Os diagramas tensão×deformação em materiais viscoplásticos mostram, na maioria das vezes, a inexistência de um domínio elástico inicial distinto, linear ou não. O diagrama se mostra como uma curva contínua, não linear, desde o início. Neste caso, a elasticidade não pode ser identificada isoladamente da viscoplasticidade, pois a viscoplasticidade se manifesta desde o início do diagrama.

Desta forma, a linearidade mostrada nos ensaios anteriores, por exemplo na Figura 7.3, não é de fato observada na maioria dos materiais viscoplásticos, incluindo-se as resinas aqui estudadas. A identificação e quantificação da elasticidade neste materiais deve, então, ser realizada ou equacionada de algum outro modo, como, por exemplo, no procedimento detalhado no item 8.3.2C, Comportamento à Fluência.

Uma outra maneira de se avaliar, pelo menos qualitativamente, a existência da elasticidade, é conseguida através de medidas da retração da deformação após a ruptura. Quando se faz um raio de concordância bastante pequeno, entre a cabeça e a haste dos corpos de prova, a ruptura na grande maioria das vezes se localiza nesta região. Neste caso, perdem-se as medidas de força devido à separação entre as partes rompidas do corpo de prova, mas continua-se a medir a deformação, já que a ruptura se dá externamente às pinças de fixação do extensômetro. Sendo assim, mantendo-se o extensômetro preso, após a ruptura num ensaio de encruamento-relaxação ou de tração monotônica, pode-se registrar a retração da deformação com o tempo. Esta retração vai fornecer uma indicação da elasticidade existente no material. Isto é conseguido analisando-se o gráfico deformação×tempo resultante, onde a parcela de deformação retornada num período de tempo quase instantâneo, que se mostra como uma linha vertical no gráfico deformação×tempo (v. por exemplo as Figuras A1.5 e A16, retração após ruptura), pode ser identificada como elasticidade, e a parcela que retorna mais lentamente com o tempo pode ser identificada como viscoelasticidade.

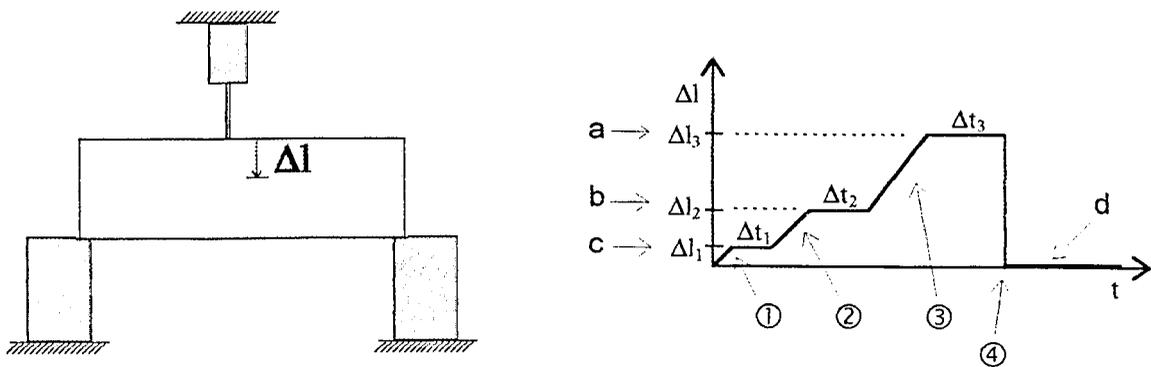
7.6 Ensaio Cíclico

Os ensaios cíclicos utilizados são também usuais, fixando-se níveis máximos e mínimos para o deslocamento e realizando-se ciclos de tração/compressão centrados em zero. Nos ensaios realizados, estabeleceram-se ciclos sob uma deformação imposta de $\pm 2,25$ mm e $\pm 4,5$ mm. O diagrama tensão \times deformação mostra, neste caso, a tendência do comportamento em estabilizar-se sobre uma mesma curva, quando se tem encruamento isotrópico, ou em degenerar-se nos diversos tipos de encruamento cinemático. Um número mínimo de seis ciclos (Chaboche) é indicado para resinas. Quando em comportamento frágil, as resinas tendem a não superar um nível muito baixo de ciclos, quando então não se pode caracterizar ou definir o encruamento segundo a classificação anterior.

7.7 Ensaio Ótico

Dentre as inúmeras possibilidades de se determinar o aparecimento de franjas num corpo de prova fotomecânico, foi escolhido o ensaio de uma viga em flexão a três pontos. Neste ensaio, é possível visualizarem-se não só pontos de concentração de tensão (os pontos de apoio ou de aplicação de carga), como também o desenvolvimento de franjas numa região ampla, menos solicitada.

Uma pequena viga de material fotoviscoelástico é apoiada em um dispositivo de apoio rígido, sob a ação de uma lâmina com certa flexibilidade, como mostra a Figura 7.4. Ao se movimentar a lâmina, como num ensaio de compressão, obtém-se a flexão da viga (na prática do ensaio, devido à montagem específica e ao funcionamento do equipamento, movimenta-se o apoio em direção à lâmina). Realiza-se esta compressão até um certo nível de deslocamento (e, então, de deformação), quando se pára a movimentação e deixa-se o material relaxar. Isto



Legenda:

- ①, ②, ③: primeira, segunda e terceira punção, com deslocamento da ponta da haste respectivamente até 0,4 mm, 1,0 mm e 3,0 mm
- ④: retirada da carga e afastamento da ponta de punção
- a, b, c: primeira, segunda e terceira relaxação, respectivamente 3 minutos, 5 minutos e 10 minutos
- d: retração da deformação após a ruptura, 10 minutos (somente possível quando a ruptura se dá fora dos apoios do extensômetro)

Fig. 7.4 - Flexão a três pontos como ensaio ótico

foi realizado para três níveis de deformação, pequena, média, e grande, relativas a um deslocamento respectivamente de 0,4 mm, 1,0 mm e 3,0 mm, sendo registrados o deslocamento do apoio e a carga aplicada. Como se trata de uma variação das franjas com o tempo, ensaio deve ser filmado para possibilitar a identificação da variação do desenvolvimento das franjas no interior do corpo de prova na tração e em relaxação.

Como deseja-se fazer medidas do retorno das franjas após descarregamento, não é de interesse romper o corpo de prova. Para isso, utilizou-se uma lâmina flexível, que se flete quando a tensão ultrapassa um certo limite, evitando assim a quebra do corpo de prova. Se tanto o apoio quanto a ponta de aplicação de carga fossem rígidos, poder-se-ia romper o corpo de prova ao se atingir um estado de tensão crítico.

Num ensaio ótico comum identificam-se franjas isoclínicas e isocromáticas. No presente caso, devido às características dinâmicas do ensaio, somente franjas ou isocromáticas ou

isoclínicas podem ser identificadas de cada vez, numa série de ensaio-filmagem direta.

CAPÍTULO 8

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E METODOLOGIA DE FORMULAÇÃO

Na realização propriamente dita dos ensaios de caracterização, existem três componentes importantes em interação: o material a ser ensaiado, o equipamento para a realização dos ensaios, e a metodologia de ensaio para a obtenção da formulação desejada. O comportamento do material influencia na escolha/projeto dos equipamentos, e ambos determinam a metodologia específica dos ensaios, a fim de se obterem as variações das quantidades macroscópicas a serem relacionadas, a saber: tensão, deformação, tempo, taxa temporal de deformação e temperatura.

8.1 Material

Na simulação experimental do comportamento de um material, as técnicas Fotomecânicas utilizam um corpo de prova de material fotoelástico/fotoplástico como modelo, para substituir o corpo de prova de material real, o protótipo. Dentre os vários materiais fotoviscoelásticos, destacam-se as misturas de resinas de poliéster rígidas e flexíveis pelo seu baixo custo, facilidade de obtenção e variedade das propriedades resultantes.

Os materiais estudados neste trabalho são misturas de partes proporcionais em peso da resina flexível Resapol 10.069 com a resina rígida Resapol 10.119, fabricadas pela Resana. As proporções resina rígida/resina flexível utilizadas foram 50/50 (descartada após ensaios iniciais, por problemas na usinagem), 60/40, 70/30, 80/20. Estas proporções foram arbitradas para descrever os extremos de comportamento mais rígido (80/20), mais flexível (60/40), e ainda um caso intermediário (70/30). As misturas são tratadas com 1 ml de monômero de estireno e 0,5 ml de peróxido de metil-etil-cetona para cada 100 g de resina líquida.

O procedimento para a obtenção do material (Morris and Riley, 1972; Siqueira e Gomide, 1994) será descrito agora. Na fundição do material, calculam-se os volumes proporcionais de cada resina, por exemplo 60% de resina rígida e 40% de resina flexível, de acordo com o volume do(s) molde(s). Este volume é transformado em peso. Pesam-se as resinas líquidas e misturam-se, até completa homogeneização. Para o peso total da mistura, calculam-se os volumes de monômero de estireno e peróxido de metil-etil-cetona, que são medidos e misturados separadamente, uma após o outro. O material é homogeneizada novamente por cerca de trinta minutos, para uma distribuição completa do monômero de estireno e do peróxido de metil-etil-cetona por todo o volume da mistura. A seguir, a mistura é vazada em moldes. Os moldes, retangulares e cilíndricos, são recobertos internamente com uma mistura de borracha de silicone com 10% em peso de endurecedor (específico desta borracha), para possibilitar o desmolde. Os moldes com material vasado são deixados à temperatura ambiente por 8 horas, quando então o material parcialmente curado é retirado dos moldes. Levam-se estas peças já sólidas para um segundo período de cura, a 80°C por 24 horas. O material já curado é armazenado à temperatura ambiente. As peças curadas, na forma de cilindros e placas, são finalmente usadas até chegar-se ao formato e dimensões finais desejados.

Estes tipos de misturas possibilitam a fabricação de materiais com características de flexibilidade variáveis segundo a proporção resina rígida/resina flexível utilizada. Assim, à temperatura ambiente, o comportamento de um corpo de prova 100/0 (% de resina rígida/% de resina flexível) é tipicamente bastante frágil (material quebradiço), apresentando-se como um material com características tendentes às do vidro. Na outra extremidade tem-se a mistura 0/100, uma resina com características tendentes às da borracha artificial. Entre os dois extremos, tem-se uma imensa variedade de possíveis misturas, segundo outras proporções de resina rígida/resina flexível, resultando materiais que vão apresentar um comportamento de frágil a dútil. Este comportamento é ainda afetado pela temperatura de ensaio: ao se aumentar a temperatura, modifica-se quantitativamente o comportamento e acentuam-se as características dú-

teis. Esta variedade de comportamento permite pesquisar-se uma composição de proporções, numa dada temperatura, cujas características simulem as propriedades do material de um protótipo a ser usado num experimento fotoviscoplastico.

Não só a proporção de resinas afeta o comportamento, mas também a taxa temporal de deformação aplicada, para uma mesma temperatura. Cada mistura apresenta características de viscosidade variáveis, dependentes da taxa temporal de deformação aplicada e da temperatura de ensaio.

Desse modo, as misturas de resinas permitem obter respostas diversas segundo a variação dos fatores: composição da mistura, temperatura de ensaio e taxa temporal de deformação aplicada. Este material é clássico na Fotomecânica, e tem extensa utilização em simulações da Mecânica dos Sólidos e da Conformação Mecânica. Os fundamentos da arte da obtenção destes materiais, sua utilização e suas aplicações principais estão nas bibliografias examinadas no Capítulo 2. Neste trabalho, utilizou-se exclusivamente resina de poliéster.

8.2 Equipamento de Ensaio

Na prática da realização de ensaios específicos, utilizando uma determinada máquina de ensaios, geralmente se faz necessária a utilização de equipamentos e acessórios projetados e/ou ajustados para cada situação de ensaio. Neste trabalho, foi utilizado o sistema universal de testes MTS 810, constando de uma máquina universal de testes e seu sistema eletrônico de controle/aquisição de dados. A este sistema foram acopladas basicamente uma câmara para controle de temperatura e garras especiais, estas últimas para fixação de corpos de prova cilíndricos com características viscosas, bem como corpos retangulares para ensaios óticos. A câmara e as garras foram desenvolvidas e construídas especificamente para atender às necessidades dos testes, conforme descrições a seguir.

8.2.1 Câmara de Temperatura Controlada

No estudo das propriedades viscoplásticas, as preocupações se concentram inicialmente na necessidade de se realizarem ensaios em temperaturas controladas, estabilizadas em vários níveis. Geralmente, as câmaras comerciais disponíveis são projetadas para temperaturas relativamente altas (300°C - 600°C), para o estudo de materiais metálicos. No caso das resinas de poliéster, entretanto, são empregadas temperaturas não muito maiores que 100°C. Isto advém, principalmente, do fato de que as temperaturas máximas na cura deste material atingem aproximadamente 150°C.

No Laboratório de Análise Experimental de Tensões têm sido construídos e utilizados fornos de madeira compensada para o estudo de resinas. Estes fornos são de baixíssimo custo e construção relativamente fácil. Neste caso, a temperatura ideal de trabalho desta madeira, sem grandes danos por ressecamento ou empenamentos, é de 70°C ou pouco mais. Isto diminui ainda mais o limite máximo da temperatura de utilização do forno. No entanto, considerando-se que, quanto maior a temperatura, menor o nível de tensões máximas, e assim menor a escala de tensões de trabalho, um forno operando a 70°C ou 80°C no máximo é perfeitamente compatível com o estudo destas resinas. A temperaturas relativamente altas, o diagrama tensão-deformação tende a se confundir com o eixo das deformações (tensões muito pequenas ou aproximadamente iguais a zero). Desse modo, o ideal para os ensaios realizados consiste em se trabalhar na faixa de 30°C~70°C. O limite inferior se refere à dificuldade em se controlar temperaturas baixas num forno sem sistema de resfriamento.

Uma câmara de baixo custo para controle acurado da temperatura foi projetada e construída para os ensaios mecânicos e óticos. Utilizaram-se paredes duplas de madeira compensada com preenchimento de isopor, visando um troca mínima de calor com o ambiente. Comparada às câmaras de paredes metálicas com preenchimento refratário, esta escolha é de custo extremamente baixo, construção bastante simples e realiza com grande eficiência o iso-

lamento térmico nas temperaturas utilizadas (30°C a 70°C). A Figura 8.1 mostra um esquema da câmara de controle de temperatura.

Para o sistema de aquecimento, foi adotado um esquema similar àquele das câmaras de aquecimento comerciais comumente utilizadas para ensaio de materiais, sendo ainda este o tipo das câmaras usadas na Fotoelasticidade. Neste esquema, existe um compartimento separado para os elementos aquecedores (resistivos), forçando-se um fluxo de ar entre este compartimento e aquele onde está o corpo de prova através de um ventilador. Isto evita gradientes de temperatura a partir dos elementos aquecedores, dentro do compartimento de ensaio, permanecendo então esta última a uma temperatura mais homogênea. As paredes internas do compartimento de aquecimento foram recobertas com amianto para proteção extra, em caso de algum aquecimento imprevisto localizado, como, por exemplo, no caso de falha no ventilador, garantindo-se a integridade do equipamento até que este superaquecimento seja detectado pelo operador, através do mostrador do controlador de temperatura.

Foi tomado um cuidado especial na especificação do termopar e do controlador, para que correspondessem o mais próximo possível à faixa de atuação da câmara (30°C a 80°C).

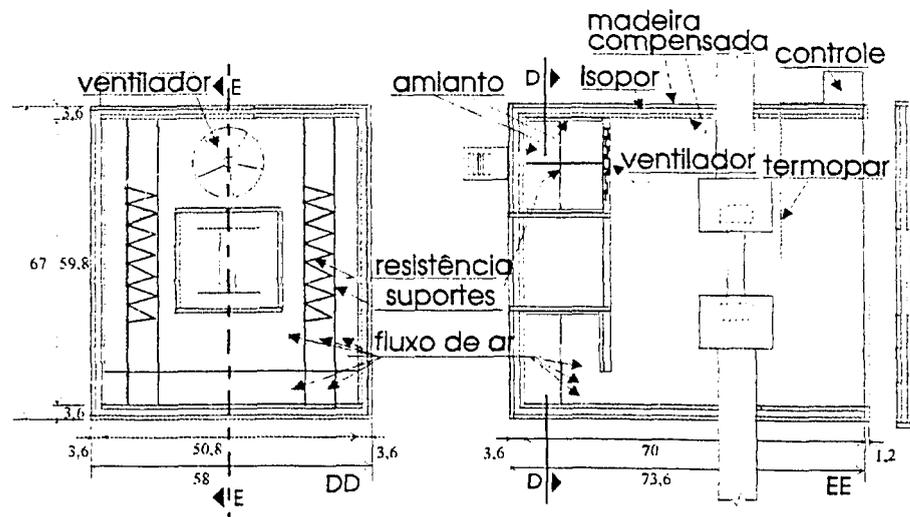


Fig. 8.1 - Esquema interno da câmara de controle de temperatura

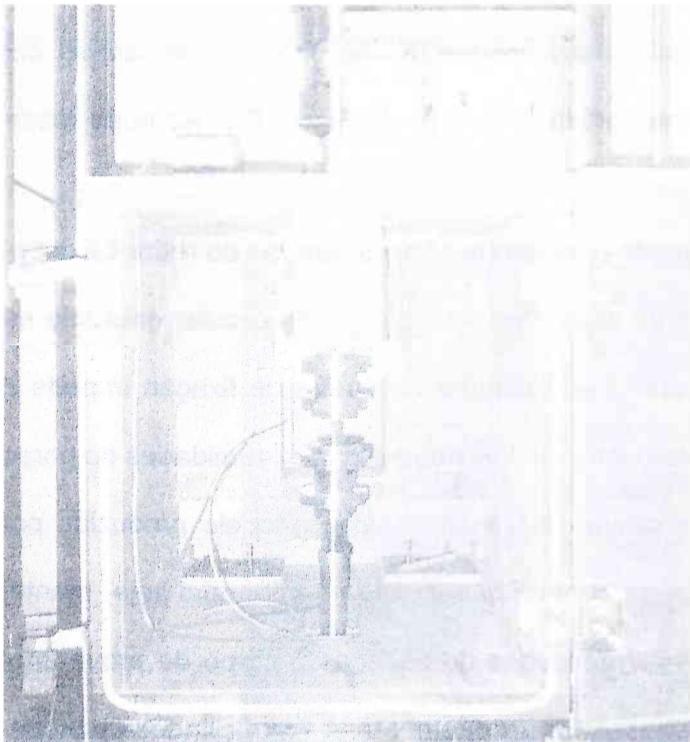
Um item de projeto não convencional nos fornos comerciais diz respeito à visualização das propriedades óticas. Para tanto, uma área de visão livre através do forno foi incluída no projeto, através de janelas em paredes opostas, permitindo o uso externo de um polariscópio para identificação das propriedades óticas durante os ensaios. As dimensões externas gerais do forno foram especificadas para permitirem um aproveitamento máximo do vão entre as colunas de suporte da trave do sistema de testes MTS 810. A Figura 8.2 mostra fotografias da câmara acoplada à máquina, bem como alguns de seus detalhes.

Testes com a câmara mostraram um tempo de aquecimento de 5 min para temperaturas de 25 a 40~50°C, e uma boa estabilização da temperatura num dado valor. A temperatura nos ensaios é monitorada através de um termômetro instalado dentro do forno, ao lado do termopar. Este termômetro é instalado de modo a poder-se ler sua medidas pelo visor da porta, sem necessidade de se abrir o forno. Desse modo, o termômetro permite um acompanhamento da temperatura independentemente do termopar, verificando-se a temperatura atuante em qualquer instante do ensaio.

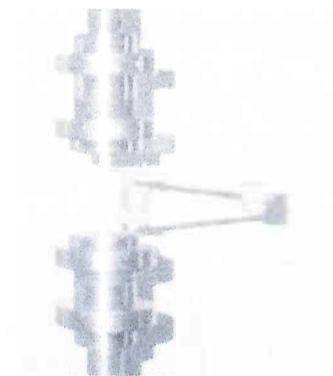
Em temperaturas mais altas, ou em ensaios mais prolongados, verifica-se um aquecimento progressivo do forno, principalmente das hastes metálicas das garras ligadas ao restante da máquina. Este tipo de aquecimento é controlado através do resfriamento da sala de ensaios, mantida a uma temperatura de 22 a 25°C. Neste caso, apesar de o forno não conter um sistema de resfriamento interno, o pequeno vão circular entre as paredes do forno e as hastes das garras (que se estendem para fora do forno) funciona como válvula de escape, permitindo uma pequena perda de temperatura. Quando a temperatura, medida pela sonda (termopar) do controlador, diminui abaixo de um certo limite, verifica-se a ligação automática das resistências por este controlador. As demais frestas, das portas, foram lacradas por um cordão de amianto, preso à porta e pressionado à carcaça pela fechadura, pois perdas consideráveis de calor não proporcionariam uma boa estabilização da temperatura. Os pequenos vãos circulares entre o forno e as hastes das garras são as únicas aberturas por onde ocorre uma pequena perda de



(a) máquina, câmara de temperatura, sistema de aquisição: controlador, ①, e computador



(c) interior da câmara



(b) corpo de prova com extensômetro acoplado

Fig. 8.2 - Câmara de controle de temperatura e sistema de aquisição de dados

calor, os quais não foram também lacrados, conforme projeto, por se mostrarem úteis ao controle de temperatura.

8.2.2 Cunhas Contra Escorregamento

Por se tratar de um material com comportamento viscoplástico, o sistema de fixação dos corpos de prova deve, obrigatoriamente, levar em consideração os efeitos da relaxação. A relaxação das tensões não permite o uso de garras que funcionam à base de pressão (tensão) lateral, pois verifica-se, com o tempo, um escorregamento do corpo de prova, quando da perda de tensão lateral devido ao relaxamento da tensão. Este fator é especialmente crítico em ensaios longos.

Para contornar este problema de escorregamento por perda de tensão lateral, foi projetado um sistema de fixação que é uma versão simplificada dos sistemas de fixação das máquinas mais antigas. Neste sistema, utilizam-se cunhas partidas como as da Figura 8.3. As duas metades de uma cunha são encaixadas ao redor da cabeça do corpo de prova. Uma aba circular existente na extremidade externa da cunha de fixação impede o deslocamento longitudinal das extremidades do corpo de prova, com efeito análogo àquele produzido por garras com rosqueamento interno, qual seja, manter as extremidades da cabeça do corpo de prova imóveis, sem escorregamento. A parte cilíndrica protuberante da cabeça do corpo de prova, introduzida no interior da cunha, proporciona o alinhamento, através do controle das dimensões na usinagem.

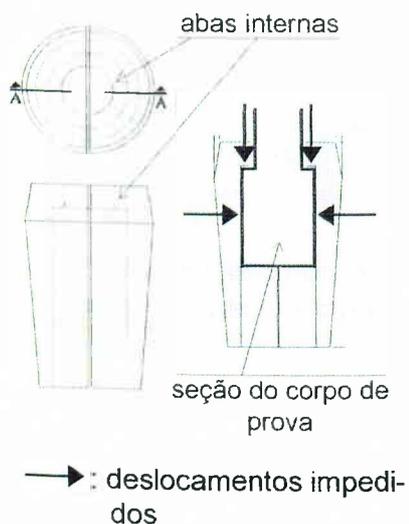


Fig. 8.3 - Cunhas contra escorregamento viscoso

des de uma cunha são encaixadas ao redor da cabeça do corpo de prova. Uma aba circular existente na extremidade externa da cunha de fixação impede o deslocamento longitudinal das extremidades do corpo de prova, com efeito análogo àquele produzido por garras com rosqueamento interno, qual seja, manter as extremidades da cabeça do corpo de prova imóveis, sem escorregamento. A parte cilíndrica protuberante da cabeça do corpo de prova, introduzida no interior da cunha, proporciona o alinhamento, através do controle das dimensões na usinagem.

Conforme mostra a Figura 8.4, após serem encaixadas as duas metades de uma cunha ao redor da cabeça do corpo de prova, o conjunto cabeça-cunha é inserido no interior da cavidade existente na garra. A garra é finalmente fechada pela tampa rosqueada. Para os ensaios cíclicos, é necessário adicionar-se um apoio inferior para o corpo de prova, com altura regulável, que providencia uma superfície externa de apoio ao corpo de prova em compressão. Note que o sistema garra-corpo de prova é bastante simplificado, dispensando grandes raios de concordância, arranjos especiais para alinhamento, e a usual seção de transição entre a parte fixada nas extremidades e o fuste, já que em comportamento viscoplástico não existem grandes dificuldades com concentração de tensões e alinhamento.

Para os ensaios de tração simples, encruamento-relaxação e cíclicos são utilizados corpos de prova cilíndricos, conforme mostrado na Figura 8.5, com dimensões da seção transversal variáveis, conforme indicado na figura. Esta variação da seção transversal tem como objetivo utilizar-se, para as tensões máximas atingidas, 80% do fundo de escala da célula de carga,

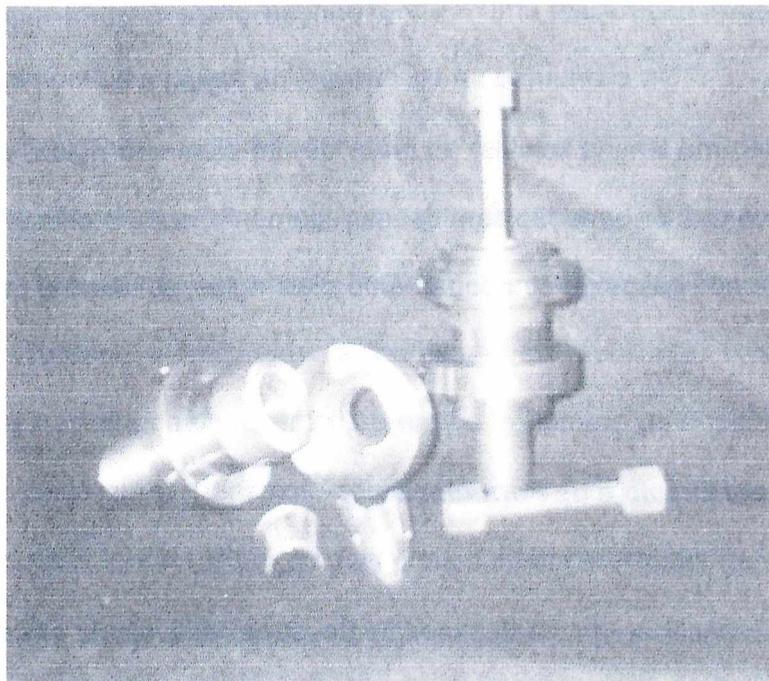


Fig. 8.4 - Sistema de garras e cunhas

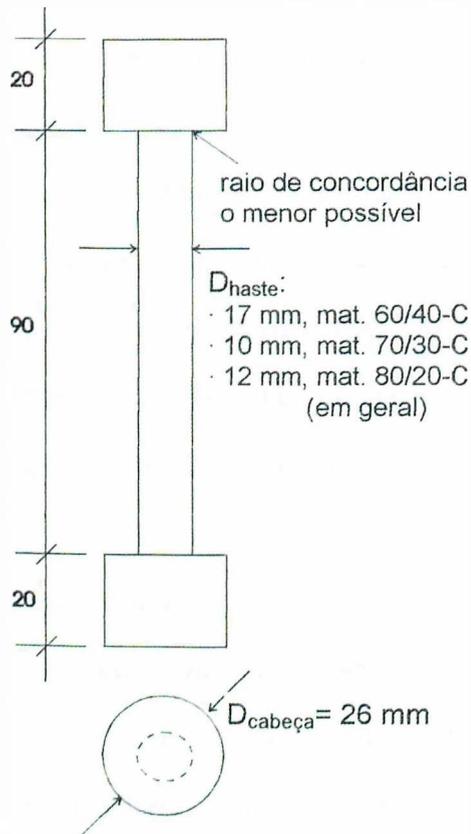


Fig. 8.5 - Esquema dos corpos de prova

procurando-se assim otimizar o sistema de medição. Nos ensaios óticos, um corpo de prova retangular de dimensões $7,5 \times 5,0 \times 1,0 \text{ cm}$ é utilizado.

8.2.3 Dispositivo para Flexão a Três Pontos

Em ensaios óticos, uma visualização das franjas simultaneamente ao ensaio só é possível através da Fotoelasticidade plana. Para tal, escolheu-se ensaiar uma viga em flexão a três pontos. Para a realização deste ensaio, foi adaptado à máquina universal de testes um sistema rígido para viga bi-poiada na parte inferior e uma lâmina de punção presa à garra superior, como mostrado na Figura 8.6.

A utilização de uma lâmina flexível, ao invés de um elemento rígido, permite realizar-se um ensaio de retorno das deformação sem descarregamento, após o ensaio de flexão. A lâmina flexível se deflete nos casos de comportamento mais rígido, evitando a quebra do corpo de prova.

8.3 Metodologia de Ensaio e de Formulação

É necessário especificar, em cada experimento, suas variáveis de ensaio, quais sejam, a taxa temporal de deformação e a temperatura, para cada material. Isto vai levar à variação da



Fig. 8.6 - Sistema para flexão a três pontos

resposta do material, i.e. aos diversos diagramas $\sigma \times \epsilon$, $\sigma \times t$, sobre os quais serão identificados os parâmetros caracterizadores de seu comportamento. Para tal especificação, é necessário uma programação de ensaios segundo um planejamento que considere tanto a variação das quantidades de ensaio envolvidas, com seus limites práticos e desejados, quanto a posterior quantificação numérica das curvas experimentais, visando o estabelecimento de um modelo caracterizador.

8.3.1 Planejamento de Ensaios

Visto que as misturas de resina utilizadas apresentam um comportamento de frágil a dútil, dependendo da temperatura de ensaio e da taxa de deformação aplicada, o primeiro passo para a realização de ensaios sistemáticos se refere a uma exploração inicial do comportamento para o estabelecimento de alguns limites práticos fundamentais.

Em explorações iniciais do comportamento do material (Oliveira, Gomide e Rade, 1997), identifica-se o comportamento para um certo número de taxas de deformação e temperaturas. Nestas explorações iniciais, são realizados ensaios de tração simples em alguns pontos dentro de uma região de interesse, e então através dos diagramas resultantes conhece-se o comportamento da mistura nestes pontos. Estimou-se um certo número de ensaios cobrindo esta região, arbitrado em cinco ou seis ensaios, cobrindo pontos próximos aos extremos, nas duas dimensões θ e $\dot{\epsilon}$ (quatro pontos), e um ou dois pontos internos. A partir destes ensaios tem-se uma informação inicial sobre a tendência de comportamento (como nas Figuras 9.4 a 9.6), e estimam-se os limites extremos deste comportamento, muito frágil ou muito dútil, para os pon-

tos não ensaiados. Estes limites extremos definem uma região onde se estima que os ensaios fornecerão resultados satisfatórios para a caracterização. Tais limites caracterizam-se por:

- quebra do corpo de prova no início do ensaio, para uma combinação de taxa de deformação e temperatura onde observa-se um comportamento frágil do material,
- valores de tensão medidos aproximadamente iguais a zero, para uma combinação levando a um comportamento extremamente dútil-viscoso.

Uma outra limitação se refere a combinações de baixa velocidade e baixa temperatura, que produzem diagramas ondulados, descrevendo um tipo de comportamento onde ocorrem relaxações e recuperações durante o ensaio.

Assim, próximo a estes limites (e além deles) situam-se regiões de difícil prática da simulação, seja pela quebra do corpo de prova, seja pela obtenção de valores de tensão aproximadamente nulos, seja ainda pela obtenção de gráficos ondulados. Deve-se definir, então, através destes limites, uma região conservativa central de trabalho, onde não ocorrerão sérios problemas de identificação, conforme mostrado na Figura 8.7. para pontos dentro dos limites desta região, dentro da região de trabalho (Figura 8.7).

A seguir, é elaborada uma sistematização de ensaios para cada material. Como passo inicial, definem-se os intervalos de taxas de deformação e de temperatura “característicos”, i.e., sem problemas de identificação. A região de interesse é dividida em “faixas” igualmente espaçadas, e os limites identificados (cf. na Figura 8.7). Com isso, passa-se à elaboração de seqüências de ensaios: para cada ensaio, fixa-se uma determinada taxa de deformação $\dot{\epsilon}_i$ e uma série de temperaturas θ_i que definem as variáveis de ensaio. Tem-se, assim um conjunto de taxas $\dot{\epsilon}_i$ e um conjunto de temperaturas θ_i para cada taxa $\dot{\epsilon}_i$. Isto é feito para cada mistura. Adotou-se, como quantidade de ensaios economicamente viável e numericamente significativa, um conjunto de 4 valores de taxa de deformação e 5 a 6 temperaturas em cada taxa.

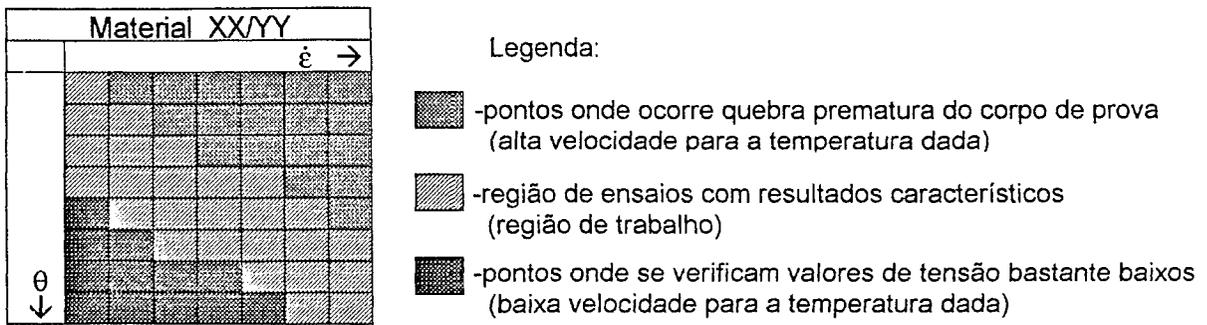


Fig. 8.7 - Limites práticos para os valores das variáveis de ensaios dentro de uma região de interesse $\epsilon \times \theta$

8.3.2 Variáveis Fenomenológicas e Metodologia de Formulação

As quantidades fenomenológicas a serem consideradas para ensaio e variadas/medidas são: taxa temporal de deformação, temperatura, tensão, deformação e tempo, para uma mistura específica porcentagem de resina rígida / porcentagem de resina flexível. Com relação às misturas, é feito um equacionamento separado para cada uma, e assim a proporção resina rígida/resina flexível não entra diretamente nas formulações. A forma do equacionamento final pretendido, por sua vez, induz considerações adicionais com relação aos procedimentos de ensaio. Serão efetuados equacionamentos parciais interligados, iniciando-se com as variáveis experimentais $\sigma \times \epsilon$, de onde se obtêm os parâmetros numéricos K e M posteriormente relacionados com a temperatura θ , o que por sua vez resulta os parâmetros \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} finalmente relacionando estes últimos parâmetros com a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$. Sendo assim, as temperaturas utilizadas nas diversas taxas de deformação não necessitam ser exatamente as mesmas entre as diversas taxas de deformação. Por outro lado, devem-se realizar ensaios somente para os valores especificados de taxa de deformação, ou não se consegue realizar o equacionamento final da forma pretendida.

A metodologia de formulação é a seguinte. Inicialmente obtêm-se os parâmetros numéricos K e M a partir dos diagramas tensão×deformação. Em seguida, formula-se a variação destes parâmetros K e M com a temperatura θ , obtendo-se nova série de parâmetros numéricos \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} . Finalmente, equaciona-se a variação destes últimos parâmetros com a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$, obtendo-se uma série final de parâmetros numéricos k_i , m_i , n_i . A este tipo de equacionamento se chama formulação interligada, acoplada ou imbricada (Rade 1994), onde cada estágio de formulação depende intrinsecamente de um estágio anterior, estando os parâmetros e as equações interligados ou “acoplados” uns aos outros. A metodologia utilizada para a relaxação é essencialmente idêntica, iniciando-se pelos diagramas tensão×tempo, cujos parâmetros numéricos A , D e G são posteriormente relacionados à temperatura θ , produzindo nova série de parâmetros α_i , δ_i , γ_i . Estes últimos, por sua vez, são relacionados à taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ resultando uma série final de parâmetros a_i , b_i , c_i , d_i , e_i , f_i , g_i , h_i , l_i .

Em todos os casos, o processo de equacionamento utilizando-se parâmetros numéricos e variáveis físicas é o mesmo, somente variando o tipo de equação algébrica utilizado em cada etapa. Utilizou-se, para cada etapa, um tipo algébrico de equação que se mostrou mais adequado para descrever as relações para os três tipos de materiais simultaneamente.

A) Variáveis e parâmetros do comportamento à tração : Para uma compreensão básica das propriedades de um material, a descrição do diagrama tensão×deformação à tração, via formulações logarítmicas, fornece uma boa aproximação. Neste caso, os coeficientes K e M de uma regressão linear no domínio $(\ln\sigma, \ln\epsilon)$ fornecem uma indicação da forma do diagrama, ao se compararem diferentes curvas do mesmo material em situações diversas de taxa de deformação e temperatura. Estas formulações podem ser utilizadas seja como dados de comportamento básico em projetos experimentais, seja como componentes a serem incluídos em formulações mais complexas.

Assim, a partir dos ensaios realizados em corpos de prova cilíndricos, são obtidos vários

diagramas tensão×deformação, para as várias temperaturas e taxas de deformação, conforme mostra a Figura 8.8. Observe que, de acordo com a sistematização estabelecida no item 8.7.1 e as observações do início do item 8.3.2, os valores da taxa $\dot{\epsilon}$ são fixos, mas as temperaturas de ensaio para uma dada taxa não têm necessariamente relação com as temperaturas de outras faixas. Ao final, tem-se uma série de diagramas tensão×deformação cobrindo várias temperaturas e várias taxas de deformação.

De cada um destes diagramas $\sigma \times \epsilon$, Figura 8.8, através de uma regressão linear obtêm-se as constantes K_i e M_i , para cada temperatura θ_i , a uma taxa constante $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_i$. Assim, K_i e M_i são os coeficientes que caracterizam cada curva.

Com estas variações, obtêm-se um conjunto de valores (θ_i, K_i, M_i) , para cada taxa de deformação $\dot{\epsilon}_i$. Fazendo-se, agora, uma interpolação polinomial no espaço das variáveis θ_i, K_i e M_i , através da relação:

$$\theta = \mathcal{K} + \mathcal{M} K + \mathcal{N} M \quad (8.1)$$

obtêm-se os coeficientes \mathcal{K}, \mathcal{M} e \mathcal{N} para cada $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_i$. A equação (8.1) generaliza a temperatura θ para K 's e M 's quaisquer. Note que a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ é mantida constante para cada interpolação, conforme o esquema de ensaios e formulação.

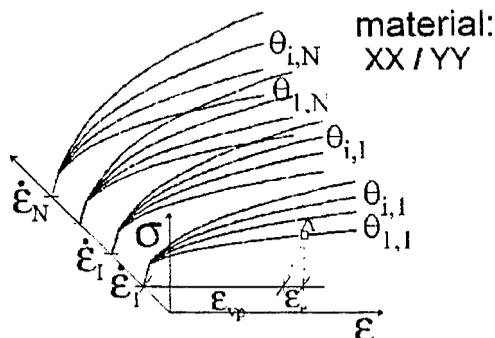


Fig. 8.8 - Esquema de diagramas $\sigma \times \epsilon$ típicos, segundo a programação de ensaios utilizada

A seguir, com as séries de valores \mathcal{K} , \mathcal{M} , \mathcal{N} obtidos para os diversos valores de taxa $\dot{\epsilon}_i$, estabelece-se um novo equacionamento que fornecerá valores de \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} em função de $\dot{\epsilon}$:

$$\begin{aligned}\mathcal{K} &= \mathcal{K}(k_i, \dot{\epsilon}) \\ \mathcal{M} &= \mathcal{M}(m_i, \dot{\epsilon}) \\ \mathcal{N} &= \mathcal{N}(n_i, \dot{\epsilon})\end{aligned}\tag{8.2}$$

A seqüência desta formulação, com explicitação dos parâmetros numéricos, será retomada no Capítulo 10.

B) Variáveis e parâmetros do comportamento em relaxação : Quando se interrompe uma tração, realizada a uma determinada taxa de deformação, inicia-se imediatamente o processo de relaxação das tensões, como mostra a Figura 7.3b e c. Para uma mesma taxa de deformação (e temperatura), a curva de relaxação depende do nível de tensão máximo $\sigma_{\text{máx}}$ atingido, antes desta relaxação, obtendo-se uma família de curvas quando se inicia a relaxação em diferentes níveis de tensão, como na Figura 8.9. Desse modo, em cada ensaio, definido por $\dot{\epsilon}_i$ e θ_i , poderão ser realizadas diversas relaxações, para diversos níveis de tensão máxima atingida. Neste trabalho, utilizou-se a primeira relaxação, efetuada logo após a primeira tração de ensaios de encruamento com relaxações múltiplas, para caracterizar o comportamento à relaxação, como por exemplo a curva $\sigma_i = \sigma_i(t)$ após σ_{MAX_j} na Figura 7.3c. As demais curvas de relaxação do ensaio são utilizadas para o cálculo da fluência. Identificadas curvas $\sigma_i = \sigma_i(t)$ e suas tensões máximas, a diversas temperaturas e taxas de deformação, a relação básica de influência $\sigma \times t$ nesta temperatura, taxa de deformação e tensão máxima pode ser descrita por um polinômio na forma:

$$\sigma = A + D t + G t^2\tag{8.3}$$

onde t é o tempo e A , D , G são coeficientes da interpolação.

Utilizando-se um equacionamento interdependente, em duas etapas subseqüentes, pode-se estabelecer uma série sucessiva de equações relacionando os parâmetros A , D e G à

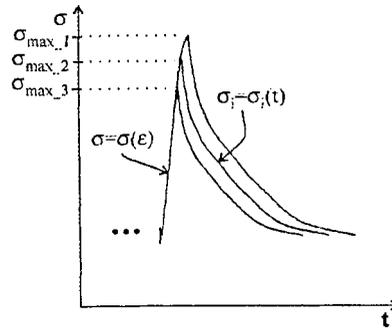


Fig. 8.9 - Relaxações possíveis durante uma dada tração, iniciadas em diferentes níveis de tensão $\sigma_{\text{máx}}$.

temperatura θ , e os parâmetros daí resultantes à taxa de deformação $\dot{\epsilon}$. Assim, A, D e G serão funções da temperatura, dadas por:

$$A = A(\alpha_i, \theta)$$

$$D = D(\delta_i, \theta) \tag{8.4}$$

$$G = G(\gamma_i, \theta)$$

onde, por sua vez α , δ e γ serão funções de $\dot{\epsilon}$, dadas por:

$$\alpha_i = \alpha_i(a_i, b_i, c_i, \dot{\epsilon})$$

$$\delta_i = \delta_i(d_i, e_i, f_i, \dot{\epsilon}) \tag{8.5}$$

$$\gamma_i = \gamma_i(g_i, h_i, l_i, \dot{\epsilon})$$

Cada formulação é essencialmente uma composição de regressões polinomiais sobre os parâmetros numéricos das equações anteriores mais uma variável física medida (a primeira equação é uma relação entre duas variáveis físicas medidas, originando a primeira série de parâmetros numéricos). Esta formulação segue um caminhar como o utilizado no comportamento à tração, primeiramente equacionando-se a influência da temperatura e depois da taxa de deformação. No Capítulo 10 será retomado este equacionamento e mostrada a obtenção prática das equações e parâmetros.

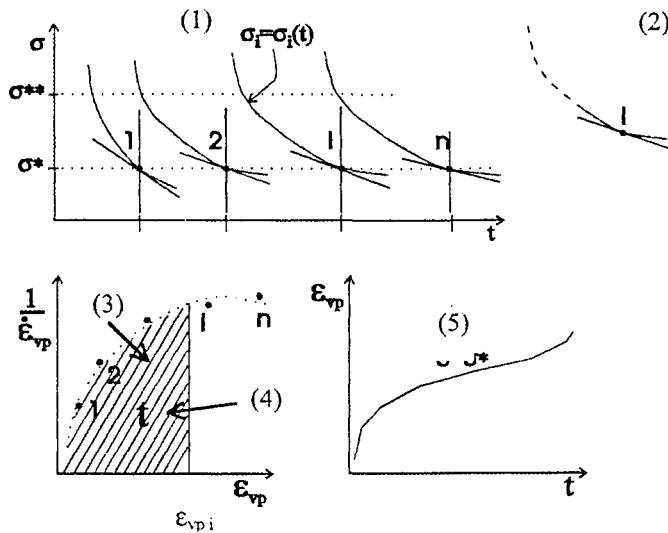
C) Comportamento em fluência : De acordo com o método de ensaios utilizado, encruamento com relaxações múltiplas, as curvas de fluência são obtidas indiretamente, a partir de um procedimento numérico sobre as curvas de relaxação múltipla (Lemaitre-Chaboche, 1984). Não existem normas técnicas para este ensaio combinado, nem para os diversos procedimentos numéricos necessários para se obter a relação final deformação×tempo. Sendo assim, a formulação e procedimentos desenvolvidos a seguir apresentam procedimentos adaptados/arbitrados para o material em estudo, sendo a estimativa do valor do módulo de elasticidade obtida através de um procedimento completamente inédito. Uma esquematização do procedimento completo está mostrada na Figura 8.10. Neste procedimento, escolhe-se um valor de tensão arbitrário, σ^* , que é o valor de tensão constante para o qual vai-se estabelecer uma curva de fluência. Num ensaio de encruamento com relaxações múltiplas, para cada i-ésima relaxação grava-se um conjunto de pontos (σ, t) experimentais num arquivo de dados. Assim, tem-se um arquivo de dados com uma seqüência de relaxações. Em cada uma destas relaxações, deve-se localizar o valor de tensão mais aproximado de σ^* . Encontrado este valor, faz-se uma regressão linear com os pontos próximos a este valor, utilizando-se de 40 a 100 pontos experimentais. Encontra-se, assim, o valor da inclinação de uma reta de regressão, M_r , para uma porção restrita da curva, que se aproxima do valor da inclinação da reta tangente à curva neste ponto. Esta inclinação, por sua vez, fornece a derivada no ponto, e assim:

$$\dot{\sigma} \approx M_r \quad (8.6)$$

A partir desta derivada, obtém-se a taxa $\dot{\epsilon}_{vp}$ no ponto, através da relação:

$$\dot{\epsilon}_{vp} = -\frac{1}{E} \frac{d(\sigma_i)}{dt} = -\frac{\dot{\sigma}}{E} \quad (8.7)$$

A eq. (8.7) é obtida derivando-se a relação entre deformações, $\epsilon_{vp} = \epsilon_i - \epsilon_e = \epsilon_i - \sigma/E$, onde ϵ_i é uma constante.



-Roteiro:

- 1) determinação experimental das curvas $\sigma_i = \sigma_i(t)$;
 - 2) determinação da inclinação da reta nas vizinhanças do ponto $\sigma = \sigma^*$;
 - 3) interpolação sobre os dados do gráfico $1/\dot{\epsilon}_{vp} \times \epsilon_{vp}$;
 - 4) determinação do tempo t em vários pontos $\epsilon_{vp i}$, onde $t_i = \text{área sob a curva até o ponto } \epsilon_{vp i}$;
 - 5) interpolação da curva $\epsilon_{vp} \times t$.
- (Lemaitre e Chaboche, 1985)

-Valores característicos:

$$\epsilon_{vp} = \epsilon_i - \epsilon_e \approx \epsilon_i \quad (\epsilon_e \approx 0)$$

$$\dot{\epsilon}_{vp} = \frac{1}{E} \frac{d(\sigma_i)}{dt} = \dot{\sigma} \quad (\text{eq. 8.6})$$

$\dot{\sigma} \approx$ inclinação da reta tangente à curva

Fig. 8.10 - Procedimento numérico para cálculo de uma curva de fluência a partir de curvas de relaxações múltiplas

Deve-se, agora, efetuar uma avaliação do módulo de elasticidade para poder-se utilizar as equações acima, já que o módulo de elasticidade não é possível de ser calculado explicitamente nos experimentos realizados. Considere-se, inicialmente, que, apesar de quantitativamente insignificante, a deformação elástica segue a relação:

$$\epsilon_{pi} = \epsilon_i - \frac{\sigma^*}{E} \quad (8.8)$$

onde $\epsilon_e = \sigma^*/E$ é a deformação elástica e ϵ_{pi} e ϵ_i são respectivamente as deformações plástica e total no ponto i . Ao se admitir $\epsilon_i \gg \epsilon_e$, tem-se a aproximação $\epsilon_{pi} \approx \epsilon_i$ conforme esperado. No entanto, uma relação de grandeza entre as deformações elástica e total pode fornecer uma estimativa do valor de E . Inicialmente, consideremos esta relação na forma de uma desigual-

dade:

$$\varepsilon_e \ll \varepsilon_i \Rightarrow \sigma^*/E \ll \varepsilon_i \quad (8.9)$$

Utilizando-se um coeficiente para transformar esta desigualdade numa expressão obtem-se:

$$\sigma^*/E = p \times \varepsilon_i \quad (8.10)$$

onde "p" vai definir a relação, ou proporção, entre as deformações elástica e total. Estimando-se que a deformação elástica seja no máximo 10% da deformação total, i.e. arbitrando-se um valor de 10% para "p", tem-se:

$$\sigma^*/E = 0,1 \varepsilon_i \Rightarrow E = \sigma^* / 0,1 \varepsilon_i \quad (8.11)$$

O valor de $p = 0,1$ é arbitrário, e pode ser revisto, Esta relação serve, finalmente, para estimar o valor de E na eq. (8.6). Assim:

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = (0,1 \varepsilon_i) \frac{M_f}{\sigma^*} \quad (8.12)$$

Com o valor de $\dot{\varepsilon}_{vp}$ forma-se, agora, um conjunto de pontos $(\varepsilon_{vp}, 1/\dot{\varepsilon}_{vp})$, onde ε_{vp} é a deformação plástica no ponto (admitida como sendo a deformação total ao se considerar a deformação elástica desprezível), e $\dot{\varepsilon}_{vp}$ é a taxa temporal de deformação. Sobre este conjunto de pontos faz-se uma regressão polinomial, obtendo-se uma relação do tipo:

$$1/\dot{\varepsilon}_{vp} = f(\varepsilon_{vp}) \quad (8.13)$$

Obtida esta primeira relação numérica, atribuem-se valores a ε_{vp} e encontram-se vários valores de $f(\varepsilon_{vp})$, construindo-se uma série de valores igualmente espaçados $(\varepsilon_{vp}, \dot{\varepsilon}_{vp})$. O valor da integração (área) sob qualquer porção da curva $1/\dot{\varepsilon}_{vp} \times \varepsilon_{vp}$, Figura (8.10), corresponde ao valor do tempo para o correspondente valor de ε_{vp} da curva. Assim, calculando-se as áreas de intervalos sucessivos e somando-as cumulativamente encontram-se os valores de t para tais intervalos. Após a determinação do tempo t para cada um destes intervalos, chega-se finalmente a um conjunto de valores (ε_{vp}, t) , que formam a curva de fluência desejada. Através de uma interpolação polinomial sobre estes pontos numérico-experimentais obtém-se uma expressão do

tipo:

$$\varepsilon_{vp} = A_f + D_f t + G_f t^2, \quad \sigma = \sigma^* \quad (8.14)$$

onde A_f , D_f , e G_f são os coeficientes do polinômio que caracteriza cada curva de fluência.

Tal procedimento pode ser repetido para um nível de tensão σ^{**} , e assim por diante, utilizando-se do intervalo de relaxação efetuado, para estabelecerem-se curvas de fluência a vários níveis de tensão desejados. No Capítulo 10 é mostrado um equacionamento específico para um determinado nível σ^* .

O procedimento acima indica como obterem-se curvas de relaxação a partir de um ensaio de encruamento com relaxações múltiplas. Estas curvas são arbitrárias, dependendo do valor σ^* , σ^{**} , etc. escolhido. Como a relaxação é um fenômeno derivado da fluência, de acordo com o enfoque do ensaio de encruamento-relaxações múltiplas utilizado neste trabalho, ao se caracterizar a relaxação, de fato já se caracteriza a fluência. Neste caso, um estudo da fluência, além da relação inicial dada pela eq. (8.14), é redundante. Considere-se, ainda, que os procedimentos para manipulação de dados e a análise numérica para realizar uma formulação acoplada são extensos. Estes dois fatores levaram à realização somente da análise dos parâmetros iniciais da fluência, como na eq. (8.14). Não é de interesse, no momento, definirem-se as relações sistemáticas entre estes parâmetros de fluência, A_f , D_f e G_f , e as diversas temperaturas e taxas de deformação, isto é, não é de interesse no momento proceder-se a uma seqüência de equacionamentos interligados como nos casos da tração e da relaxação. Este procedimento seria apenas numérico, não fornecendo informações utilizáveis em futuras simulações.

No entanto, sem os resultados das relaxações sucessivas não é possível quantificar a fluência para um dado valor de tensão constante, seja σ^* , ou σ^{**} , etc. Sendo assim, as várias curvas formam uma base de dados sobre a qual podem-se quantificar curvas de fluência em níveis σ^* , σ^{**} , etc. dentro dos limites de σ_{MIN} e σ_{MAX_i} das diversas curvas de relaxação. Além

disso, como este trabalho trata da metodologia para estudo do comportamento básico deste material, é interessante esquematizar-se a seqüência de formulações, análogas às da tração e da relaxação, a serem utilizadas para a fluência. Utilizando-se a base de dados de curvas de relaxação, é possível realizar-se um estudo separado da fluência para este material, como no roteiro esquematizado a seguir, que poderá ser de interesse em futuros trabalhos.

Cada conjunto de parâmetros de fluência A_f , D_f , G_f está ligado a um valor de tensão σ^* , numa dada temperatura θ e taxa de deformação $\dot{\epsilon}$. Calculando-se estes parâmetros para outros valores σ^* , σ^{**} , etc. pode-se estabelecer, para cada temperatura e taxa de deformação, uma relação entre os parâmetros da relaxação e os valores de σ^* , σ^{**} , etc.:

$$\begin{aligned} A_f &= A_f(\alpha_{f_i}, \sigma^{n*}) \\ D_f &= D_f(\delta_{f_i}, \sigma^{n*}) \\ G_f &= G_f(\gamma_{f_i}, \sigma^{n*}) \end{aligned} \quad (8.15)$$

onde:

- $A_f(\alpha_{f_i}, \sigma^{n*})$, etc. são funções a serem especificadas, com seus parâmetros numéricos;
- α_{f_i} , δ_{f_i} , γ_{f_i} estão indicando uma nova série de parâmetros ligados a A_f , D_f , G_f e a tensão σ^{n*} ;
- σ^{n*} é uma indicação genérica do valor de tensão constante dentro de um intervalo entre σ_{MIN} e o menor dos σ_{MAX_i} , i.e. dos valores constantes σ^* , σ^{**} , etc.

Deve-se estabelecer, agora, uma relação entre estes novos parâmetros e a temperatura, para um valor de taxa de deformação constante, e, logo após, entre os novíssimos parâmetros recém obtidos e a taxa de deformação. Assim, termos os equacionamentos:

$$\begin{aligned} \alpha_{f_i} &= \alpha_{f_i}(a_{f_i}, \theta) \\ \delta_{f_i} &= \delta_{f_i}(d_{f_i}, \theta) \end{aligned} \quad (8.16)$$

$$\gamma_{f_i} = \gamma_{f_i}(g_{f_i}, \theta)$$

e

$$a_{f_i} = a_{f_i}(a_{f_i}, \dot{\epsilon})$$

$$d_{f_i} = d_{f_i}(d_{f_i}, \dot{\epsilon}) \tag{8.17}$$

$$g_{f_i} = g_{f_i}(g_{f_i}, \dot{\epsilon})$$

onde:

- $\alpha_{f_i}(a_{f_i}, \theta)$, etc. e $a_{f_i}(a_{f_i}, \dot{\epsilon})$, etc. são funções a serem especificadas, com seus parâmetros numéricos;
- a_{f_i} , etc. e d_{f_i} , etc. estão indicando novas séries de parâmetros, ligados respectivamente à temperatura e à taxa de deformação, e aos respectivos parâmetros anteriores, α_{f_i} e a_{f_i} ;

Observe que, neste caso, necessita-se de um nível de equacionamento a mais além do que foi necessário na relaxação, pois existem várias tensões σ^* , σ^{**} , etc. para cada conjunto temperatura-taxa de deformação. Além disso, a quantidade de parâmetros envolvida indica dificuldades em se escolher as relações para efetivar tais relações com boa precisão.

O equacionamento da fluência inicial, eq. (8.14) será explicitado no Capítulo 10. A sequência posterior, eqs. (8.15 a 8.17), não foi efetivada por estar fora dos objetivos estritos do trabalho.

CAPÍTULO 9

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais foram obtidos em três etapas: (i) ensaios preliminares para verificação da sensibilidade das curvas de relaxação com variações de temperatura e da taxa temporal de deformação, materiais identificados como 50/50-A, 60/40-A, 70/30-A e 80/20-A; (ii) ensaios preliminares para exploração dos limites dentro dos quais os materiais não apresentam dificuldades para caracterização, por comportamento seja excessivamente frágil seja excessivamente dútil, identificados como 60/40-B, 70/30-B e 80/20-B; (iii) ensaios sistemáticos de encruamento com relaxações múltiplas e óticos, além de ensaios cíclicos, para formação de uma base de dados a partir da qual é feito o equacionamento do comportamento à tração (endurecimento), à relaxação, à fluência, e a verificação do comportamento cíclico (isotropia) e ótico (quantidade de franjas isocromáticas). Estes últimos materiais estão identificados como 60/40-C, 70/30-C e 80/20-C.

O comportamento à tração, em sua expressão básica, é caracterizado neste trabalho utilizando-se os parâmetros K e M de regressões lineares exponenciais, como os das eqs. (3.4) e (4.5), nesta última para $1/N \rightarrow 0$. Estas regressões são realizadas sobre os dados experimentais de diagramas tensão×deformação, oriundos da primeira tração dos ensaios, a várias temperaturas e várias taxas temporais de deformação. O comportamento à relaxação, em sua expressão básica, é caracterizado pelos parâmetros A , D e G (eq. 8.2) de interpolações polinomiais sobre as curvas tensão×tempo. Estas curvas são oriundas da relaxação efetuada imediatamente após a primeira tração, a várias temperaturas e várias taxas temporais de deformação. O comportamento à fluência, em sua expressão básica, é caracterizado pelos parâmetros A_f , D_f e G_f (eq. 8.13) de interpolações polinomiais sobre dados numérico-experimentais, onde as interpolações são obtidas a partir de um procedimento numérico (Figura 8.10). Este procedi-

mento numérico é realizado sobre o conjunto de relaxações múltiplas realizadas imediatamente após a primeira relaxação, a várias temperaturas e taxas temporais de deformação. A fluência não é, assim, diretamente quantificada/visualizada, necessitando-se de um procedimento numérico sobre os dados experimentais das curvas de relaxações múltiplas. A constatação de isotropia é feita a partir dos gráficos de resultados de ensaios cíclicos em um certo número de combinações temperatura-taxa temporal de deformação. O comportamento ótico é caracterizado pela identificação de dois aspectos relativos à avaliação experimental de franjas em experimentos fotomecânicos: (1) a constatação do aparecimento de uma quantidade de franjas isocromáticas suficiente para quantificação e (2) a constatação da facilidade de distinção entre as mesmas. Estes aspectos podem ser verificados através de exame visual das filmagens realizadas sobre ensaios de flexão a três pontos, a várias temperaturas e taxas temporais de deformação.

9.1 Ensaio Preliminares de Sensibilidade à Relaxação

A fim de se constatar a sensibilidade da resposta de cada material à variação das quantidades de ensaio, a saber temperatura e taxa temporal de deformação, foram realizados ensaios preliminares de encruamento com relaxações múltiplas. Foram utilizados corpos de prova de material 70/30-A e 50/50-A com diâmetro inicial de 10 mm. Dados do sistema universal de testes MTS 810 foram gravados num micro-computador à taxa de 0,2 amostras/s. Os ensaios foram realizados a uma velocidade de 0,008 mm/s para os materiais 50/50-A e 70/30-A a 56°C, e 0,0016 mm/s para o material 70/30-A a 36°C e 46°C, velocidades estas caracterizadas como baixas. Os gráficos, na seqüência, mostram dados brutos força×tempo e força×deslocamento, embora em alguns comentários faça-se referência a "tensão".

Uma comparação de relaxações para dois materiais e três temperaturas é feita nas Figu-

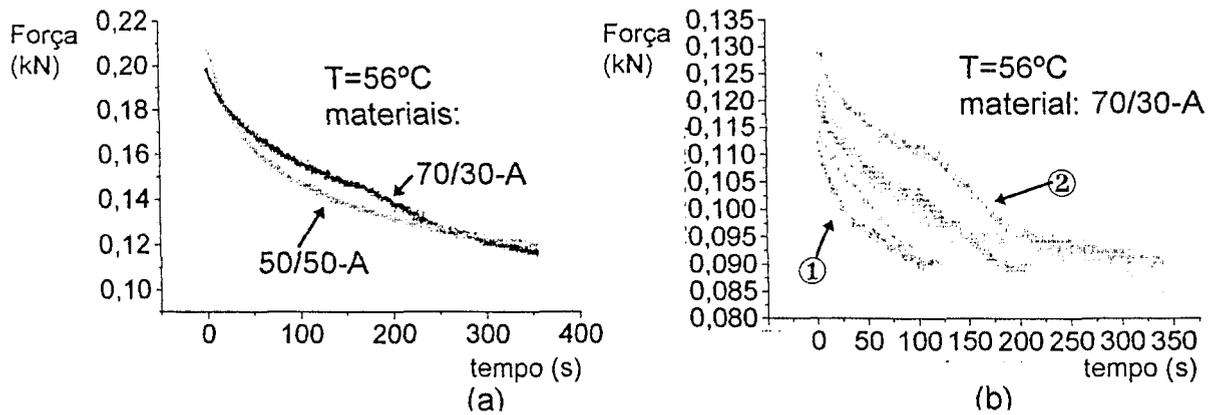


Fig. 9.1 - Relaxações a baixos níveis de carregamento (dados não facilmente caracterizáveis): (a) materiais 70/30-A e 50/50-A a 56°C; (b) material 70/30-A a 56°C

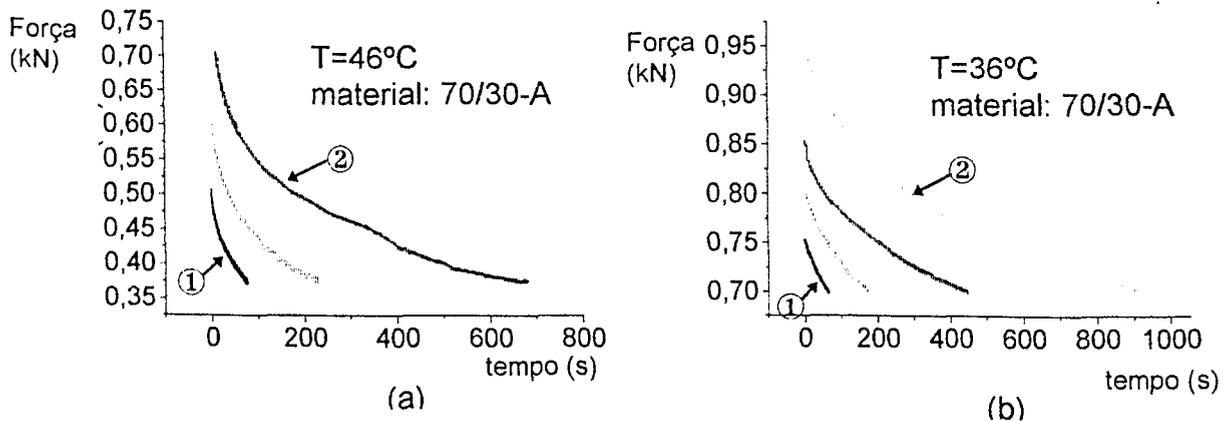


Fig. 9.2 - Relaxações em altos níveis de carregamento (dados mais caracteristicamente nítidos): (a) material 70/30-A a 46°C; (b) material 70/30-A a 36°C

ras 9.1 e 9.2. Cada curva se refere a uma relaxação caracterizada pelo mais alto nível de tensão onde esta curva se inicia. A Figura 9.1 se refere a um baixo nível de tensão, e a Figura 9.2 a um alto nível.

Uma comparação direta de relaxações para diferentes materiais, como na Figura 9.3, só é possível para valores de força, no material mais rígido (70/30-A), até a força máxima atingida no material menos rígido (50/50-A). Esta força limite está definida como $F_{\text{máx}50/50}$ na Figura 9.3, que mostra as trações efetuadas até 0,3 kN num material 70/30-A e até 0,14 kN num material 50/50-A.

Em tais níveis de tensão consideravelmente baixos, a relaxação é quase idêntica para

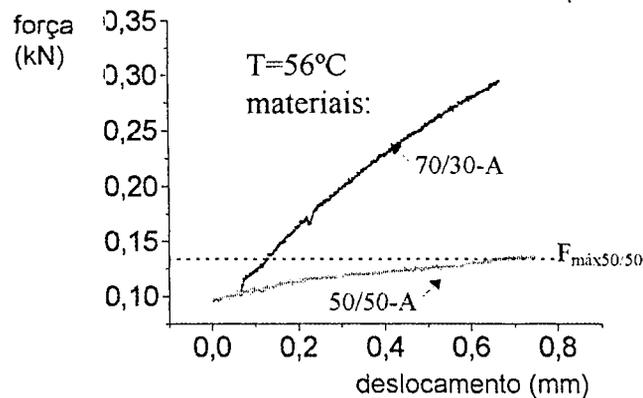


Fig. 9.3 - Tração, materiais 50/50-A e 70/30-A

qualquer material, pois o processo se encontra em seu estágio inicial, como mostrado na Figura 9.1a. Os dados nas Figuras 9.1b, 9.2a e b mostram relaxações em diferentes temperaturas do material 70/30-A. Este material exemplifica mais pronunciadamente o comportamento típico de um material de modelagem viscoplástico. Cada gráfico está mostrando simultaneamente todos os ensaios de relaxação na dada temperatura.

As relaxações seguem um padrão esperado de decrescimento inicialmente rápido da força, que logo após se torna cada vez mais lento. Observe que, para os intervalos $\Delta\sigma_i$ menores (intervalo entre a tensão máxima e mínima de uma relaxação, cf. na Figura 7.3c), a relaxação está em seu estágio inicial, e assim a força decrescerá numa taxa alta, atingindo rapidamente seu valor final desejado, como nas curvas marcadas ① nas Figuras 9.1 e 9.2. Quando o valor de $\Delta\sigma_i$ aumenta, na seqüência de relaxações, analogamente às curvas sucessivas da Figura 7.3c, o tempo total necessário para atingir a tensão mínima final desejada aumenta consideravelmente, como nas curvas marcadas ② nas Figuras 9.1 e 9.2. Para o valor de temperatura mais alto (56°C, Figura 9.1b), a força máxima atingida é muito baixa (0,135 kN). Neste caso, os dados medidos se tornam indistintos, e não se distingue facilmente uma relaxação da outra, como mostram as curvas sobrepostas da Figura 9.1b. Um conjunto de dados mais nítido é obtido em temperaturas mais baixas, 36°C e 46°C, como na Figura 9.2a e b, com curvas

bem distintas e separadas.

9.2 Ensaio Preliminares de Sensibilidade à Temperatura, à Taxa de Deformação e à Proporção de Resinas

Sobre a região de interesse mostrada na Figura 8.7 foram escolhidos alguns pontos temperatura-taxa de deformação (θ , $\dot{\epsilon}$) para se realizarem ensaios exploradores iniciais do material. Isto se faz necessário pois não se dispõe de dados, na literatura, sobre o comportamento das diversas proporções de resina ao se variar sistematicamente a taxa de deformação aplicada e a temperatura de ensaio. Sendo assim, antes da realização sistemática de ensaios para equacionamento deve se fazer uma estimativa inicial, em alguns pontos distribuídos sobre a região, que serão posteriormente utilizada para o planejamento dos ensaios finais definitivos.

As curvas resultantes dos ensaios de tração monotônico ininterrupto até a ruptura (i.e., ensaios de tração usual) em corpos de prova cilíndricos estão mostrados nas Figuras 9.4 a 9.6. Foram utilizados corpos de prova com diâmetro de 9 mm para o material 80/20-B, 10 mm para 70/30-B, e 17 mm para 60/40-B, todos com comprimento inicial de 90 mm. Cada figura representa diagramas tensão×deformação típicos para um dado material em combinações específicas de temperatura e taxa de deformação, conforme indicado nas figuras. O efeito do aumento da temperatura é mostrado nos pares de Figuras 9.4a e b, 9.4c e e, 9.5a e b, 9.5c e d, 9.6a e b, 9.6c e e. O efeito do aumento da taxa temporal de deformação é mostrado nos pares de Figuras 9.4d e e, 9.4a ou b e c (este último aproximadamente), 9.5d e a, 9.5c e e, 9.6 c e d.

O comportamento típico à tração de qualquer mistura tem as seguintes características básicas:

- dada uma mesma temperatura, aumentando-se a taxa de deformação aplicada, aumenta-

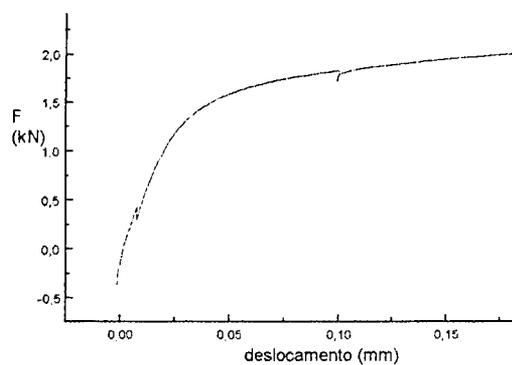
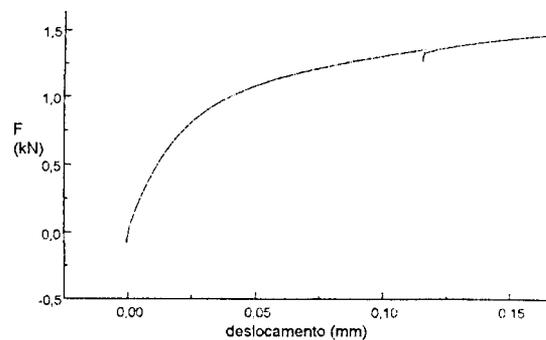
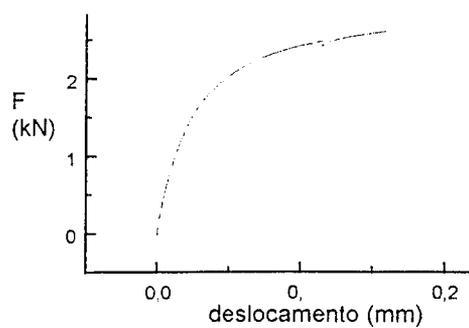
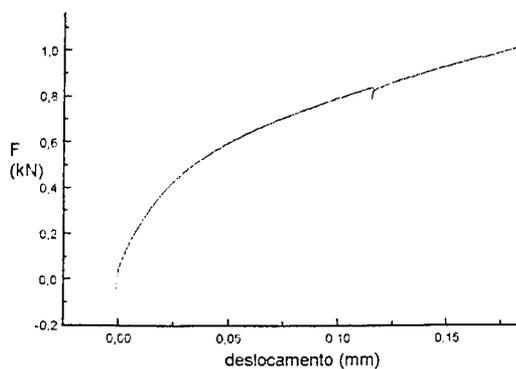
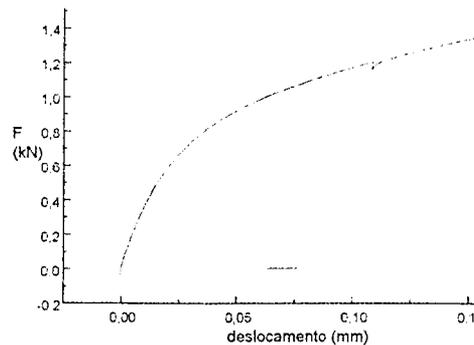
(a) mat. 60/40-B, 28°C, $\dot{\epsilon}=0,036 \text{ \% s}^{-1}$ (b) mat. 60/40-B, 36°C, $\dot{\epsilon}=0,036 \text{ \% s}^{-1}$ (c) mat. 60/40-B, 32°C, $\dot{\epsilon}=0,600 \text{ \% s}^{-1}$ (d) mat. 60/40-B, 42°C, $\dot{\epsilon}=0,060 \text{ \% s}^{-1}$ (e) mat. 60/40-B, 42°C, $\dot{\epsilon}=0,600 \text{ \% s}^{-1}$

Fig. 9.4 - Ensaio de tração monotônica até ruptura, várias temperaturas e taxas de deformação, material 60/40-B

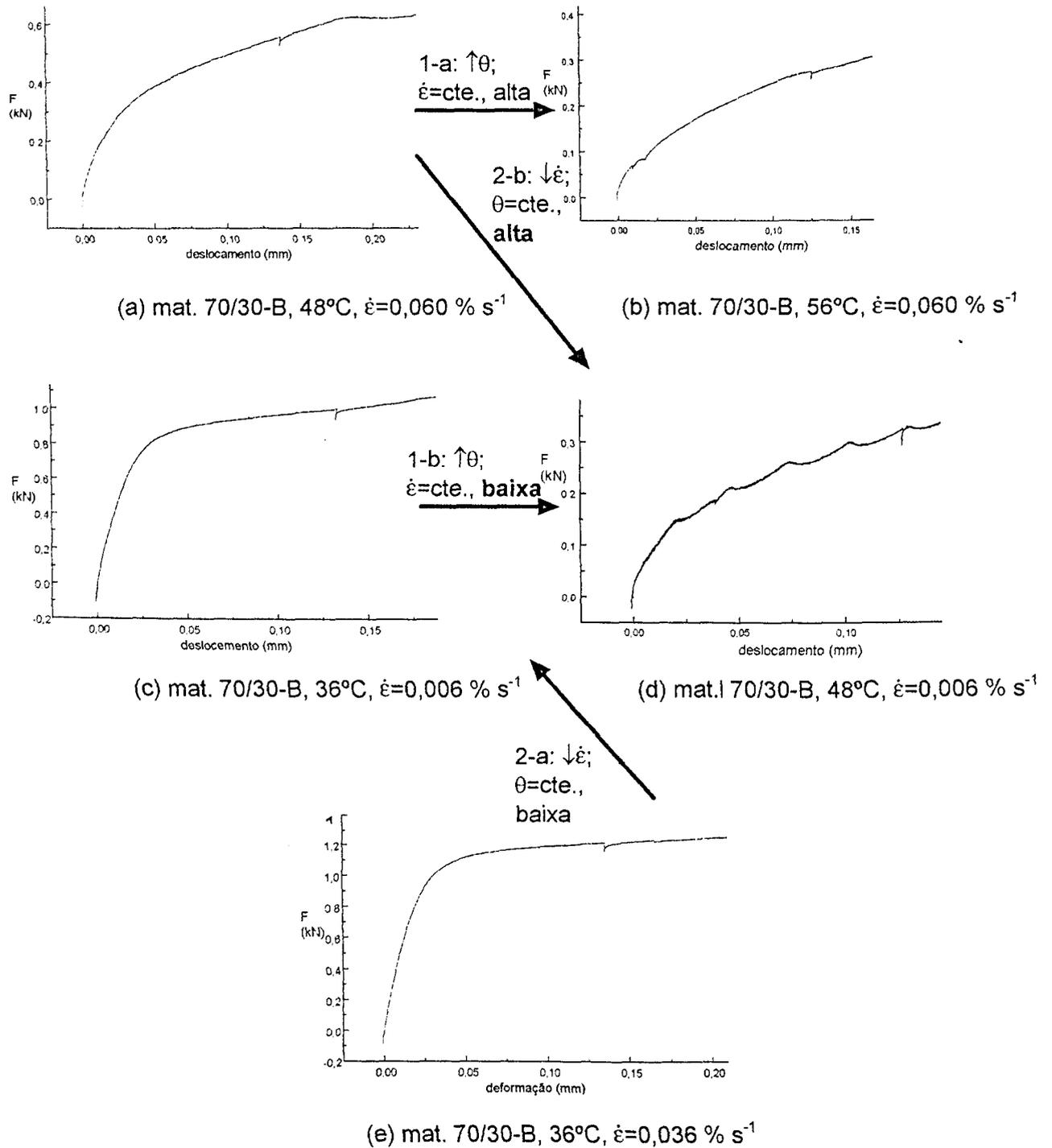


Fig. 9.5 - Ensaio de tração monotônica até ruptura, várias temperaturas e taxas de deformação, material 70/40-B, com esquematização da influência típica da taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ e da temperatura θ no formato do diagrama

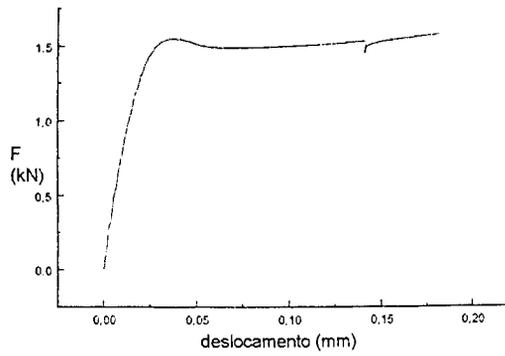
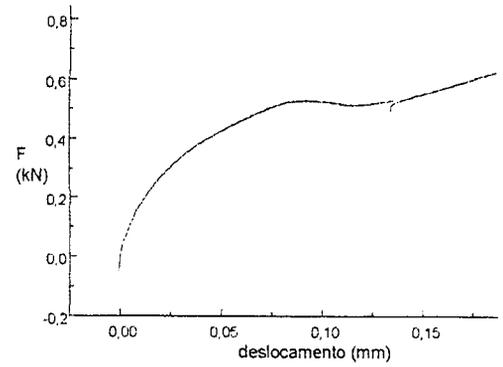
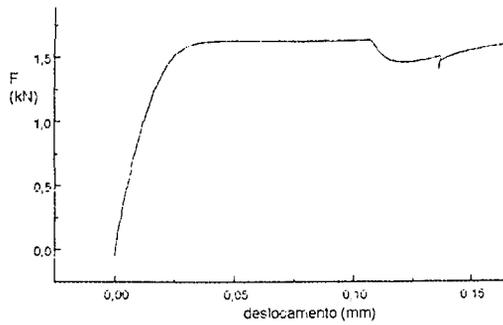
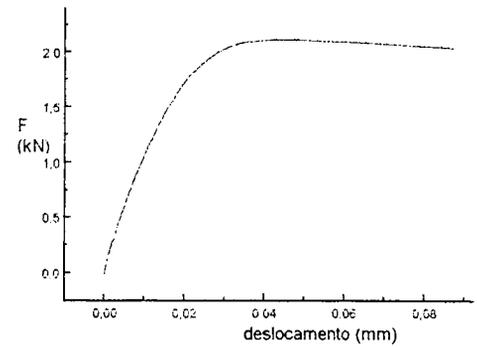
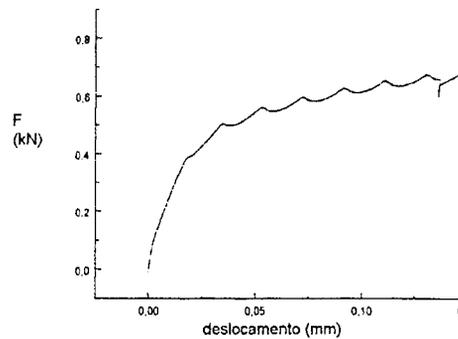
(a) mat. 80/20-B, 42°C, $\dot{\epsilon}=0,060 \text{ \% s}^{-1}$ (b) mat. 80/20-B, 56°C, $\dot{\epsilon}=0,060 \text{ \% s}^{-1}$ (c) mat. 80/20-B, 36°C, $\dot{\epsilon}=0,006 \text{ \% s}^{-1}$ (d) mat. 80/20-B, 36°C, $\dot{\epsilon}=0,036 \text{ \% s}^{-1}$ (e) mat. 80/20-B, 48°C, $\dot{\epsilon}=0,006 \text{ \% s}^{-1}$

Fig. 9.6 - Ensaio de tração monotônica até ruptura, várias temperaturas e taxas de deformação, material 80/20-B

se a tensão atuante para uma mesma deformação;

- dada uma mesma taxa de deformação, aumentando-se a temperatura, diminui-se a tensão para uma mesma deformação;
- combinações de alta temperatura com baixa taxa de deformação resultam diagramas tensão×deformação inteiramente ondulados, completamente diferentes dos esperados, como mostrado nas Figuras 9.5d e 9.6e; nestes diagramas, a tensão sobe até um certo nível, e depois decai, como se existisse um alívio de tensões interno, voltando a subir logo após, como num processo de recuperação, num ciclo que se repete várias vezes, com a tensão dos picos e vales também crescendo;
- além dos diagramas não usuais citados acima, alguns diagramas, mesmo aparentemente típicos, fogem da tendência geral de aumento da curvatura do diagrama, como na Figura 9.5b; trata-se de uma transição entre os diagramas esperados para os diagramas ondulados.
- dentre os diagramas, dois deles, Figuras 9.4a e 9.5b, mostram uma pequena ondulação única ou queda de tensão logo no início do diagrama; nos ensaios sistemáticos, mostrados a seguir, verificou-se que se trata de uma versão de "escoamento" para estes materiais, com e sem patamar; com relação a esta ondulação inicial, todos os outros diagramas da série mostrada pelas Figuras 9.4 a 9.6 não apresentaram fenômeno semelhante, a não ser os gráficos completamente ondulados a partir de certo ponto, Figuras 9.5d e 9.6e.

Sobre a Figura 9.5 foram colocadas setas indicando a ocorrência do comportamento fenomenológico típico da *queda de tensão*. Entre as setas 1-a e 1-b o comportamento mostra uma queda de tensão devido ao aumento da temperatura, mantida a taxa de deformação constante, enquanto que entre as setas 2-a e 2-b ocorre queda da tensão devido à diminuição da taxa de deformação, mantida a temperatura constante. Em ambos os casos, nos processos identificados como "a", o diagrama com um valor de tensão menor é do mesmo tipo do anterior, enquanto que nos processos "b" o diagrama se modifica para aquele de tipo inteiramente

ondulado, citado acima. A modificação dos diagramas para o tipo ondulado ocorre, assim, seja a baixas taxas de deformação, quando se aumenta a temperatura, seja a altas temperaturas, quando se diminui a taxa de deformação. Este comportamento ocorre para todas as proporções de resinas. Uma modificação análoga nos diagramas da mistura 80/20-B é mostrada pelas Figuras 9.6c e e, onde se aumentou a temperatura numa taxa de deformação sensivelmente baixa. neste caso, se um aumento de temperatura sensível for feito, no entanto simultaneamente a um aumento também sensível da taxa de deformação, como entre os diagramas das Figuras 9.6c e a, o diagrama não se degenera para o tipo ondulado.

Uma comparação entre os gráficos das Figuras 9.4 a 9.6 mostra a diferença de comportamento entre as diversas misturas de materiais. Comparando-se as Figuras 9.4b, 9.5e e 9.6d, todas a uma mesma temperatura e taxa de deformação, percebem-se mudanças no diagrama e no valor das tensões ilustrando um comportamento cada vez mais rígido, evidenciado principalmente pelo aumento do valor das tensões no início do diagrama. O mesmo se mostra nos gráficos das Figuras 9.4d e 9.6a. Observe-se, agora, a Figura 9.5a, que mostra um diagrama à mesma taxa de deformação das Figuras 9.4d e 9.6a, porém a uma temperatura maior. Este diagrama é quase idêntico ao da Figura 9.4d, com níveis de tensão um pouco menores para as mesmas deformações, mostrando que, ao se aumentar a temperatura, mudando no entanto para um material mais rígido, o efeito final será obter um diagrama com aproximadamente as mesmas características de comportamento. Neste caso, o aumento de temperatura diminui o valor das tensões para uma mesma deformação, no entanto a característica mais rígidas do material aumenta este mesmo valor, em parte anulando a diminuição causada pela temperatura. Este é exatamente uma das qualidades que um material de modelagem deve ter, diversidade e maleabilidade de comportamento.

9.3 *Ensaio Sistemáticos de Encruamento com Relaxações Múltiplas*

Com os resultados preliminares, Figuras 9.4 a 9.6, foi elaborada uma programação de ensaios. Estes ensaios foram realizados para certas combinações de temperatura-taxa de deformação, especificadas para cada material 60/40-C, 70/30-C e 80/20-C, conforme mostrado nas Tabelas 9.1 a 9.3, onde foram realizados, respectivamente, 21, 19 e 19 ensaios. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos conforme o modelo da Figura 8.5, em geral com diâmetro de 17 mm para o material 60/40-C, 11 mm para 70/30-C, e 12 mm para 80/20-C, todos com comprimento inicial da haste de 90 mm. Os valores exatos dos diâmetros são medidos antes de cada ensaio e registrados nas planilhas de cálculo, pois alguns corpos de prova podem apresentar dimensões sensivelmente diferentes do padrão estabelecido, devido ao processo de usinagem. Em todo caso, nos cálculos sempre se usam valores de tensão, apesar de alguns resultados mostrados na seqüência estarem em unidades de força. Os valores de força \times deformação e força \times tempo são apresentados em algumas figuras como amostra dos dados brutos, no entanto os únicos valores utilizados nos cálculos são valores de tensão \times deformação e tensão \times tempo, zerados e eliminados alguns pontos iniciais (para eliminar possíveis interferências do equipamento no início do ensaio).

Tabela 9.1 - Ensaios de encruamento-relaxações múltiplas com o material 60/40-C

temperatura θ [°C]	taxa temporal de deformação $\dot{\epsilon}$ [% s ⁻¹]			
	0,060	0,240	0,420	0,600
38		c.p. fe		
40	c.p. fi		c.p. hk	c.p. hj
42		c.p. ff		
44	c.p. fj ₀₉		c.p. fm	c.p. hl
46	c.p. fg	c.p. fb	c.p. go	c.p. gp
48				
50	c.p. fh	c.p. fc	c.p. gq	c.p. gr
52				
54		c.p. fd	c.p. gi	c.p. gk
56	c.p. fj ₁₄			
58	c.p. fk			

Obs.: 1) c.p.: corpo de prova; 2) as indicações sobre as linhas se referem a temperaturas intermediárias, por ex. os ensaios com os corpos de prova "fi", "hk" e "hj" foram realizados a 39°C.

Tabela 9.2 - Ensaios de encruamento-relaxações múltiplas com o material 70/30-C

temperatura θ [°C]	taxa temporal de deformação $\dot{\epsilon}$ [% s ⁻¹]			
	0,048	0,078	0,108	0,138
38	c.p. fn			
40				
42		c.p. gs	c.p. gt	c.p. gu
44	c.p. fo		c.p. gv	c.p. gw
46	c.p. fq	c.p. fs		
48			c.p. gy	c.p. gx
50	c.p. fr	c.p. ft		
52			c.p. gz	c.p. ha
54				
56		c.p. ga	c.p. gb	c.p. gc

Obs.: 1) c.p.: corpo de prova; 2) as indicações sobre as linhas se referem a temperaturas intermediárias, por ex. o ensaio com o corpo de prova "fo" foi realizado a 42°C.

Tabela 9.3 - Ensaios de encruamento-relaxações múltiplas com o material 80/20-C

temperatura θ [°C]	taxa temporal de deformação $\dot{\epsilon}$ [% s ⁻¹]			
	0,024	0,042	0,060	0,078
48				
50	c.p. hq			
52				
54	c.p. hp	c.p. ho		
56	c.p. hs	c.p. hv	c.p. ht	c.p. hu
58		c.p. ia	c.p. ib	c.p. ic
60	c.p. hw			c.p. iz
62		c.p. hx	c.p. hy	
64				
66		c.p. id		c.p. if
68			c.p. ie	
70			c.p. ig	c.p. ih

Obs.: 1) c.p.: corpo de prova; 2) as indicações sobre as linhas se referem a temperaturas intermediárias, por ex. o ensaio com o corpo de prova "hq" foi realizado a 49°C.

9.3.1 Arquivos de Dados e Planilhas

Os ensaios realizados fornecem dados experimentais de força, deformação e tempo, armazenados pelo programa controlador da máquina em arquivos ASCII (como texto), a uma taxa de 0,1 amostras/s. Cada ensaio é registrado num arquivo relativo ao corpo de prova específico, conforme mostra a Figura 9.7, estando os corpos de prova identificados por uma série de duas letras "aa", ... "az", "ba", "bb", "bc", ... "zz". Cada arquivo contém séries de dados a serem trabalhados. Os arquivos gravados formam uma base de dados viscoelastoplástica do comportamento em tração-relaxações múltiplas. Estes arquivos são abertos em planilhas, onde os dados brutos são trabalhados, como nas Figuras 9.8 e 9.9. Optou-se pela utilização da planilha Quattro Pro, por sua facilidade de utilização e rapidez nas análises estatísticas e confecção de gráficos. Para fins de análise, os dados brutos seqüenciais de um ensaio de encruamento com relaxações múltiplas devem ser separados nos diversos estágios de cada ensaio: tração inicial, primeira relaxação, seqüência de trações e relaxações, tração final, e finalmente retração da deformação após ruptura. Alguns gráficos e as interpolações polinomiais foram realizadas do programa de análise numérica Origin, usado em conjunto com a planilha devido à versatilidade com que este programa realiza as interpolações, permitindo ainda uma visualização instantânea de gráficos contrastando os dados experimentais com as curvas de interpolação.

Um ensaio completo de encruamento com relaxações é mostrado pelos gráficos da Figura 9.10, para um corpo de prova de material 60/40-B, à temperatura de 42°C, taxa de deformação $\dot{\epsilon} = 0,00060 \text{ s}^{-1}$. A Figura 9.10a mostram-se a tração inicial e a primeira relaxação. Neste caso, as etapas do ensaio mostradas são uma tração até um nível de deformação próximo a 0.00046 mm/mm, quando então se pára o deslocamento permitindo-se que o material sofra uma relaxação até atingir-se o nível mínimo de tensão de 0.5 kN. Os dados referentes a estes gráficos fornecem os parâmetros caracterizadores da tração e da relaxação. A Figura 9.10b

DATE:	03-06-1998				
TIME:	09:49:51				
File Name	dccb06b1				
File Appended					
CONTROL MODE	Stroke	WAVEFORM	Ramp - Single		
FREQ/RATE	.097				
FULL SCALE	2.5	.5	10000	2	
UNITS	kN	M/M	mmx100	mmx10	
Current Cycle:	<i>(ciclo atual)</i>				
	TIME:	Channel Data:			
	<i>(tempo)</i>				
0	9:49:51.29	-0.038	-.0003	-13	2.000
0	9:49:51.40	-0.023	-.0002	-11	2.000
0	9:49:51.51	-0.011	-.0001	-10	2.000
0	9:49:51.62	-0.000	0.0000	-9	2.000
0	9:49:51.73	0.008	0.0001	-8	2.000
	<i>(...)</i>				
0	9:50:32.82	1.374	0.0392	391	2.000
0	9:50:32.93	1.375	0.0393	392	2.000
0	9:50:33.03	1.375	0.0394	393	2.000
0	9:50:33.14	1.376	0.0395	394	2.000
0	9:50:33.25	1.377	0.0396	395	2.000
0	9:50:33.36	1.377	0.0398	397	2.000
0	9:50:33.47	1.379	0.0398	398	2.000
0	9:50:33.58	1.379	0.0400	399	2.000
0	9:50:33.69	1.380	0.0401	399	2.000
0	9:50:33.80	1.380	0.0402	401	2.000
0	9:50:33.91	1.381	0.0403	401	2.000
0	9:50:34.02	1.372	0.0403	402	2.000
	<i>(início da primeira relaxação)</i>				
0	9:50:34.13	1.367	0.0403	402	2.000
0	9:50:34.24	1.359	0.0404	401	2.000
0	9:50:34.35	1.355	0.0404	402	2.000
0	9:50:34.46	1.348	0.0404	402	2.000
0	9:50:34.57	1.343	0.0404	402	2.000
0	9:50:34.68	1.338	0.0404	402	2.000
0	9:50:34.79	1.334	0.0404	402	2.000
0	9:50:34.90	1.329	0.0404	402	2.000
0	9:50:35.01	1.325	0.0404	402	2.000
0	9:50:35.12	1.321	0.0404	402	2.000
	<i>(...)</i>				

Obsevação: -Date: data; -Time: hora; -File Name: nome do arquivo de dados, onde d: tipo de ensaio (encruamento com relaxações), c: material (70/30), cb: identificação do corpo de prova, 06b: data, 1: n# do ensaio; -Full scale: fundo de escala; -Channel Data: dados dos canais, por ordem: força, deformação longitudinal, deslocamento, deformação transversal. As observações em itálico entre parêntesis não constam do arquivo original

Fig. 9.7 - Dados parciais brutos de tração e relaxação, armazenados pelo sistema de controle da máquina como texto em arquivo ASCII, material 70/30-B, $\dot{\epsilon}=0,108 \text{ \% s}^{-1}$, 33°C

primeira tração					
		L0: 9,01	Lf: 9,4	(cm)	
		D0: 1,0	Df: 0,99	(cm)	
		e_pto: 0.008	area0: 0.007854	(mm ²) 1 1.007854	
Tempo		Força medida kN	Tensão Convenc kN/mm ²	Tensão Real kN/mm ²	Deformç~ medida %
9:49:51.29		-0.038	-4.838311	-4.836859	-0.0003
9:49:51.40		-0.023	-2.928451	-2.927865	-0.0002
9:49:51.51		-0.011	-1.400564	-1.400424	-0.0001
9:49:51.62		0	0	0	0
9:49:51.73		0.008	1.0185917	1.0186936	0.0001
9:49:51.84		0.017	2.1645074	2.1649403	0.0002
9:49:51.95		0.023	2.9284512	2.9293297	0.0003
9:49:52.06		0.029	3.692395	3.6935027	0.0003
9:49:52.17		0.03	3.8197189	3.8212468	0.0004
		...			
9:49:53.05		0.027	3.437747	3.4391221	0.0004
9:49:53.16		0.032	4.0743669	4.0764041	0.0005
9:49:53.27		0.038	4.8383107	4.8407298	0.0005
9:49:53.38		0.045	5.7295784	5.7330162	0.0006
9:49:53.49		0.05	6.3661982	6.3706546	0.0007
9:49:53.60		0.059	7.5121139	7.5173724	0.0007
9:49:53.71		0.065	8.2760577	8.2826786	0.0008
9:49:53.82		0.072	9.1673255	9.1755761	0.0009
9:49:53.93		0.079	10.058593	10.068652	0.001
9:49:54.04		0.087	11.077185	11.08937	0.0011
9:49:54.15		0.093	11.841129	11.855338	0.0012
9:49:54.26		0.1	12.732396	12.748949	0.0013
9:49:54.37		0.107	13.623664	13.642737	0.0014
9:49:54.48		0.115	14.642256	14.662755	0.0014
9:49:54.59		0.121	15.4062	15.43085	0.0016
		...			

Fig. 9.8 - Exemplo de trabalho em planilha com dados de tração, dados parciais do material 70/30-B, $\dot{\epsilon}=0,108 \text{ \% s}^{-1}$, 33°C

prim relaxaç						
		L0: 9,01 Lf: 9,4 (cm)				
		D0: 1,0 Df: 0,99 (cm)				
e_pto: 0.008		area0: 0.007854		(mm2) 1 1.007854		
Tempo	Tempo zerado 3034.13	Força medida kN	Tensão Convenc kN/mm2	Tensão Real kN/mm2	tensão normalizada 181.06615	Deformç~ medida %
3034.13	0	1.367	174.05186	181.06615	1	0.0403
3034.24	0.11	1.359	173.03327	180.02381	0.9942433	0.0404
3034.35	0.22	1.355	172.52397	179.49394	0.9913169	0.0404
3034.46	0.33	1.348	171.6327	178.56667	0.9861957	0.0404
3034.57	0.44	1.343	170.99608	177.90433	0.9825377	0.0404
3034.68	0.55	1.338	170.35946	177.24199	0.9788797	0.0404
3034.79	0.66	1.334	169.85017	176.71212	0.9759534	0.0404
3034.9	0.77	1.329	169.21355	176.04978	0.9722954	0.0404
3035.01	0.88	1.325	168.70425	175.51991	0.969369	0.0404
3035.12	0.99	1.321	168.19496	174.99003	0.9664426	0.0404
3035.23	1.1	1.317	167.68566	174.46016	0.9635162	0.0404
3035.34	1.21	1.313	167.17637	173.93029	0.9605898	0.0404
3035.45	1.32	1.309	166.66707	173.40042	0.9576634	0.0404
3035.56	1.43	1.305	166.15777	172.87055	0.954737	0.0404
3035.67	1.54	1.301	165.64848	172.34068	0.9518106	0.0404
3035.78	1.65	1.298	165.26651	171.9598	0.9497071	0.0405
3035.89	1.76	1.294	164.75721	171.4134	0.9466894	0.0404
3036	1.87	1.291	164.37524	171.03244	0.9445854	0.0405
3036.11	1.98	1.287	163.86594	170.50251	0.9416587	0.0405
3036.22	2.09	1.284	163.48397	170.10507	0.9394637	0.0405
3036.33	2.2	1.282	163.22932	169.84011	0.9380003	0.0405
3036.44	2.31	1.279	162.84735	169.42638	0.9357154	0.0404
3036.55	2.42	1.275	162.33806	168.91275	0.9328787	0.0405
3036.66	2.53	1.273	162.08341	168.64779	0.9314153	0.0405
3036.77	2.64	1.269	161.57411	168.11786	0.9284886	0.0405
3036.88	2.75	1.266	161.19214	167.72042	0.9262936	0.0405
3036.99	2.86	1.263	160.81017	167.32298	0.9240986	0.0405
3037.1	2.97	1.26	160.4282	166.92554	0.9219036	0.0405
3037.21	3.08	1.258	160.17355	166.66058	0.9204403	0.0405
	...					

Fig. 9.9 - Exemplo de trabalho em planilha com dados de relaxação, dados parciais do material 70/30-B, $\dot{\epsilon}=0,108 \text{ \% s}^{-1}$, 33°C

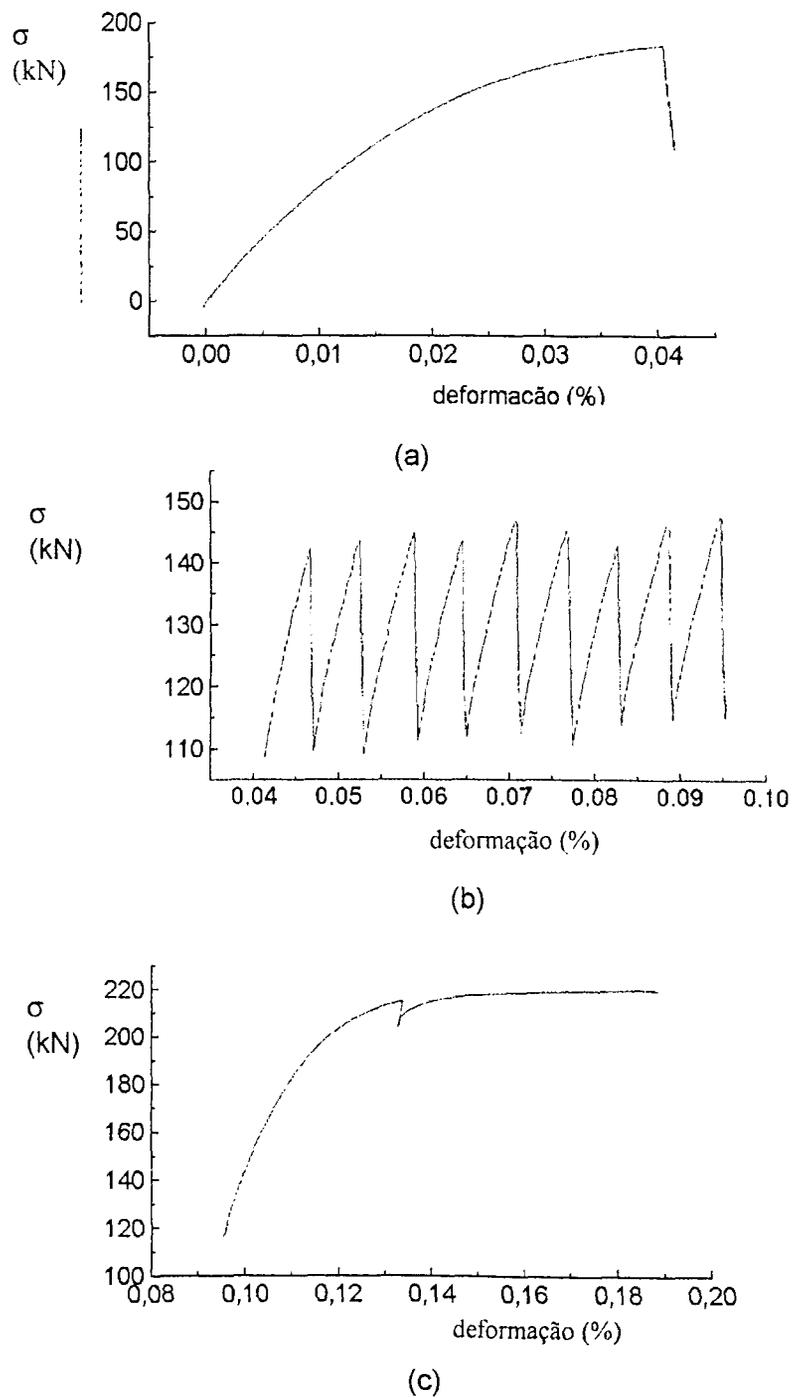


Fig. 9.10 - Ensaio completo de encruamento com relaxações múltiplas, material 60/40-B, temperatura 42°C, taxa temporal de deformação 0,060 % s⁻¹: (a) primeira tração e primeira relaxação, (b) relaxações múltiplas, (c) tração final

mostra a série seguinte de trações e relaxações que compõem o ensaio de relaxações múltiplas, num total de seis a oito relaxações. Os dados referentes às sucessivas relaxações são utilizadas no procedimento numérico para se obter um gráfico de fluência a partir destas relaxações. A Figura 9.10c mostra a tração final até ruptura. No ensaio mostrado na Figura 9.10, a ruptura ocorreu entre as pinças do extensômetro, não permitindo a avaliação da retração da deformação após a ruptura. A última parte do ensaio, de tração até ruptura, não é utilizada na equações de caracterização do comportamento, conforme efetuada aqui. No entanto, todo o ensaio foi sistematicamente registrada para compor uma base de dados experimental sistemática sobre o comportamento das misturas.

9.3.2 Visão Gráfica da Fenomenologia na Tração, Relaxação e Retração da Deformação

Uma visão geral inicial do comportamento fenomenológico é fornecida por diagramas tensão×deformação. Estes gráficos são comuns na prática da Engenharia, e através deles pode-se fazer uma avaliação inicial do comportamento do material com relação à variação de suas propriedades com a temperatura e taxa de deformação. Esta avaliação inicial deverá necessariamente ser complementada por considerações sobre o comportamento à relaxação, por se tratar de um material com comportamento viscoso.

Os gráficos das Figuras A1.1 a A1.4 do Anexo 1 mostram a primeira tração efetuada, para praticamente todas as taxas de deformação e temperatura ensaiadas. Com relação ao endurecimento (ou encruamento), conforme havia sido observado nos ensaios preliminares (v. item 9.2), verifica-se uma diminuição da tensão quando se aumenta a temperatura ou quando se diminui a taxa de deformação, para uma mesma deformação, e vice-versa, observa-se um aumento da tensão quando se diminui a temperatura ou se aumenta a taxa de deformação. Este comportamento está suficientemente comentado no item 9.2, já que o fenômeno é o mesmo, porém não se efetua a tração até a ruptura no caso das Figuras A1.1 a A1.4. Com relação ao formato geral destes gráficos, deve-se observar que este material apresentou,

na maioria dos casos, uma queda de tensão logo no início do ensaio, conforme mostram especialmente os gráficos da Figura A1.1a a 39°C e 43°C, Figura A1.2a a 39°C e 54°C, A1.2b a 46°C, Figura A1.3b a 49°C e 55,5°C, Figura A1.3c a 59°C e Figura A1.4c a 55°C. Este comportamento foi identificado com uma versão do escoamento para estes materiais, nem sempre nitidamente caracterizável, às vezes se estendendo sensivelmente, outras vezes de efeito bastante restrito. Escoamentos de difícil visualização podem ser encontrados na Figura A1.1a a 54,5°C, Figura A1.1b a 42°C e Figura A1.1c a 39°C, 47°C, Figura A1.2a para todas as temperaturas (menos 50°C), Figura A1.2c a 42°C e 45°C, Figura A1.3a a 45°C, Figura A1.3b a 45°C, (49°C bem pronunciado) e 52°C, e Figura A1.3c a 49°C e 52,5°C, Figura A1.4 a 53°C e 61°C, Figura A1.4b a 55°C, 57,5°C e 61°C, e Figura A1.4c a 55°C. Conforme se observa, é um fenômeno que se apresenta em quase todos os ensaios, mais ou menos nitidamente, porém em alguns poucos casos não se verifica. Foi identificado como uma das componentes do comportamento não perfeitamente unívoco destes materiais (v. discussão, item 11.5).

Fazendo-se, agora, uma visualização de uma seqüência primeira tração-primeira relaxação-retração final da deformação, os dados brutos, i.e., ainda a serem zerados e trabalhados, separados em primeira tração, primeira relaxação e retração final após ruptura, são mostrados nas Figuras A1.5 a A1.10 para os materiais 60/40-C, 70/30-C e 80/20-C. São mostrados para esta série somente alguns valores de temperatura e taxa de deformação, geralmente os valores extremos utilizados. Mostra-se, nas Figuras A1.5, A1.7 e A1.9, o efeito da variação da temperatura para um dado valor constante da taxa de deformação, e nas Figuras A1.6, A1.8 e A1.10 o efeito da variação da taxa de deformação para um valor constante de temperatura. Os gráficos são mostrados na ordem primeira tração-primeira relaxação-retração final após ruptura, numa mesma linha, para cada experimento. Na seqüência de linhas das Figuras A1.5, A1.7 e A1.9 mostram-se, assim, ensaios a uma mesma taxa de deformação e a valores crescentes de temperatura, até o valor máximo de temperatura para uma dada taxa para cada material. Na seqüência de linhas das Figuras A1.6, A1.8 e A1.10 mostram-se os experimentos a uma

mesma temperatura e a valores crescentes da taxa de deformação. Assim, estas Figuras dão uma visão do comportamento típico à tração-relaxação-retração final, sob influência da temperatura e da taxa temporal de deformação, conforme comentado a seguir.

Na relaxação, observa-se um ligeiro aumento na concavidade do gráfico com ao aumento da temperatura. Veja, por exemplo, que o gráfico da Figura A1.5a mostra uma pequena concavidade, enquanto que o da Figura A1.5e é sensivelmente mais côncavo. Esta concavidade, porém, tende a se concentrar na porção inicial da curva, mais próximo ao eixo dos y's. Isto indica que, para temperaturas mais altas, existirá uma queda de tensão ligeiramente maior logo no início da relaxação, posteriormente diminuindo de intensidade. Analisando-se a seqüência de gráficos da Figura A1.9, para o material 80/20-C, contrastivamente com os da Figura A1.5 (material 60/40-C), nota-se que um material mais rígido vai apresentar uma variação de concavidades bem menor e mais distribuída ao longo da extensão do gráfico. Por sua vez, o material 70/30-C, Figura A1.7, é um caso intermediário entre os outros, apresentando uma concavidade se não em toda a extensão do gráfico, também não tão restrita à sua porção inicial. Em se tratando da influência da taxa de deformação na relaxação, observa-se que, numa mesma temperatura, ao se aumentar a taxa de deformação, como nas Figuras A1.6, A1.8 e A1.10, o gráfico não só aumenta bastante sua concavidade, como também se aproxima bastante do eixo dos y's, com uma descida inicial quase paralela a este eixo para o material 60/40-C, Figura A1.6d. De fato, nas Figuras A1.6, A1.8 e A1.10 uma tração mais rápida leva sempre a uma relaxação inicial também mais rápida. Analogamente como na variação da temperatura, a concavidade abrange quase todo o domínio do gráfico no material 80/20-C, em parte no material 70/30-C, e se restringe bastante à porção inicial no material 60/40-C.

Este comportamento da relaxação com a temperatura é bem particular, indicando estar a relaxação, neste material viscoso, influenciada sensivelmente pela taxa de deformação antes da relaxação, mas praticamente insensível à temperatura atuante. Assim, uma solitação rápida será rapidamente relaxada, enquanto que solitação à mesma velocidade em temperaturas

diversas terão aproximadamente um mesmo tipo gráfico para a relaxação.

Quando a ruptura do corpo de prova acontece externamente à fixação do extensômetro, possibilitando a continuidade das medidas, registra-se a retração da deformação após a ruptura. Observa-se uma retração imediata maior da deformação para temperaturas menores, como na seqüência das Figuras A1.7b e c, já que o material se encontra em condições cada vez mais distanciadas de um comportamento predominantemente viscoso. Na Figura A1.7a, o corpo de prova se rompeu na primeira tração, mostrando o caso de retorno da deformação sem ainda uma grande deformação plástica. Assim, a retração a uma temperatura baixa, sem grandes deformações viscoplásticas, é predominantemente instantânea, i.e., elástica em sua quase totalidade, confira na Figura A1.7a a parte do gráfico aproximadamente perpendicular ao eixo das deformações, de $\epsilon=0,012$ a $\epsilon=0,007$. Neste caso, restou uma parcela viscoelástica menor, que retorna com o tempo, de $\epsilon=0,007$ a $0,005$. Nas Figuras A1.5 e A1.9 o fenômeno não está totalmente documentado, devido à quebra do corpo de prova entre as pinças do extensômetro, porém observa-se um padrão análogo de comportamento, com a parte vertical inicial aumentando com a diminuição da temperatura.

A seqüência de relaxações múltiplas num ensaio é mostrada na Figura A1.11. Observa-se que as tensões não se apresentam numa seqüência única sinuosa crescente-decrescente de valores de deformação, como seria de se esperar teoricamente, considerando-se os diagramas monotônicos. Isto ocorre devido à influência dos intervalos de deformação entre relaxações, que são pequenos e não permitem o pleno desenvolvimento do gráfico entre interrupções. Desse modo, alguns pontos intermediários se apresentam com valores inferiores aos demais.

9.4 Fluência Numérico-Experimental

O comportamento típico à fluência, resultante do procedimento numérico sobre as curvas

de relaxações múltiplas indicado na Figura 8.9, é mostrado nas Figuras A1.12 a A1.15. Observa-se uma fluência linear. Isto é de se esperar, já que os tempos de relaxação utilizados foram bastante curtos, iniciando-se em 1,5 min, atingindo em média 4 a 5 min nas relaxações mais longas, e assim estas curvas darão origem a gráficos de fluência primária. Na fluência primária, verifica-se uma variação significativa da deformação com o tempo, mostrada pela inclinação significativa das curvas. Caso se houvesse entrado em regime de fluência secundária, onde a deformação varia ainda continuamente com o tempo porém numa taxa bem pequena, os gráficos deveriam mostrar duas inclinações, uma inicial pronunciada e uma final bem menos pronunciada, esta última quase perpendicular ao eixo do tempo.

O comportamento típico em fluência fica bem caracterizado pelo material 60/40-C, Figura A1.12a, b, c e Figura A1.13a. Nestas séries de gráficos observa-se, com o aumento da temperatura, uma diminuição do tempo necessário para se chegar a uma dada deformação, i.e., com o aumento da temperatura a deformação até um certo nível ocorre num tempo menor. Como exemplo, observe que na Figura A1.12a, a 39°C atinge-se uma deformação de 0,08% em aproximadamente 0,08 s, a 43°C em 0,06 s, a 46°C em 0,04 s, até um tempo de 0,012 s a 55°C. Os tempos são bastante pequenos, por se estar num regime essencialmente viscoso, propício a deformações sensíveis de fluência num tempo bastante curto. O mesmo padrão de comportamento observa-se nas seqüências de temperaturas crescentes da Figura A1.12b, da Figura A1.12c, e da Figura A1.13a.

Com relação à taxa de deformação, como comportamento geral é de se esperar um aumento da resistência com o aumento da taxa temporal de deformação, e assim um aumento no tempo necessário para de atingir um mesmo nível de fluência. No entanto, conforme foi visto acima, item 9.3, a taxa temporal de deformação influi significativamente na tração, onde a velocidade tem uma atuação de fato, mas não tanto na relaxação, já que esta ocorre devido exatamente a uma parada na tração. Por conseqüência, a taxa de deformação também não influenciará tanto na fluência, já que a fluência é obtida a partir dos gráficos da relaxação. No

caso da relaxação, o fator predominante é a temperatura, e assim continuará a ser para a fluência. Na relaxação, como foi dito, a taxa de deformação influi fazendo com que uma tração mais rápida resulte também uma relaxação mais rápida, e ainda com que se atinja um nível de tensão maior. No caso da fluência, como esta é obtida fundamentalmente a partir da inclinação do ponto σ^* da curva de relaxação, o efeito da taxa de deformação está relacionado à sua influência na porção da curva onde se situa o ponto σ^* , através da tangente. Assim, para valores de σ^* no início das curvas de relaxação, como por exemplo o valor marcado σ^{**} na Figura 7.3c, a taxa de deformação vai influenciar sensivelmente a fluência, já que é geralmente no início da curva de relaxação (para materiais nitidamente viscosos) que é sentido o efeito da taxa de deformação produzindo uma relaxação mais ou menos rápida. Por outro lado, para valores de σ^* no final da curva de relaxação, como por exemplo o valor marcado σ^* na Figura 7.3c (localização adotada aqui), o efeito inicial da taxa de deformação sobre a relaxação terá passado, e assim o efeito da taxa de deformação não se fará sensível para curvas de fluência calculada a partir de tangentes nesta localização. De fato, nos gráficos das Figuras A1.12 a A1.15, o efeito da taxa de deformação, que deveria aumentar o tempo necessário para se atingir uma mesma deformação com o aumento da taxa, não é sensível em todos os casos. Em alguns casos verifica-se um aumento do tempo, como entre os gráficos da Figura A1.12a e os da Figura A1.12b, onde o tempo necessário para se atingir uma deformação de 0,08%, por exemplo, será maior na Figura A1.12b. Isto, no entanto, não se verifica para os demais gráficos, Figura A1.12c e d. Nestes últimos casos, porém, valores sensivelmente diferentes de σ^* dificultam uma comparação direta. Para o material 80/20-C, ao se examinarem os gráficos a 58°C das Figuras A1.15a, b e c, todos a uma tensão σ^* aproximadamente igual, pode-se perfeitamente observar o aumento do tempo (para se atingir uma determinada deformação) com o aumento da taxa de deformação. Para este material, também as Figuras A1.15b e c, a 55°C e 58°C mostram um aumento no tempo. Para o material 70/30-C em geral, e para os outros ca-

Tabela 9.4 - Relação de ensaios cíclicos
<ul style="list-style-type: none"> • Material 60/40-C, 7 ensaios: limites de deslocamento de aproximadamente $\pm 2,25$ mm, a três taxas de deformação $\dot{\epsilon} = 0,024 \% s^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 0,042 \% s^{-1}$ e $\dot{\epsilon} = 0,060 \% s^{-1}$, em duas temperaturas em cada taxa, 30°C e 40°C; limite de deslocamento de aproximadamente $\pm 22,6$ mm, taxa $\dot{\epsilon} = 0,001 \% s^{-1}$, temperatura 30°C.
<ul style="list-style-type: none"> • Material 70/30-C, 11 ensaios: limites de deslocamento de aproximadamente $\pm 2,25$ mm, $\pm 4,5$ mm e ± 7 mm, cada um a uma taxa $\dot{\epsilon} = 0,0108 \% s^{-1}$ e temperatura 70°C; limites de deslocamento de aproximadamente $\pm 2,25$ mm e $\pm 4,5$ mm, em cada limite ensaios a 37°C e $\dot{\epsilon} = 0,014 \% s^{-1}$, a 42°C e $\dot{\epsilon} = 0,005 \% s^{-1}$, e a 52°C, $\dot{\epsilon} = 0,005 \% s^{-1}$ e $\dot{\epsilon} = 0,014 \% s^{-1}$.
<ul style="list-style-type: none"> • Material 80/20-C, 8 ensaios: limites de deslocamento de aproximadamente $\pm 2,25$ mm e $\pm 4,5$ mm, em cada limite ensaios a temperaturas de 44°C, $\dot{\epsilon} = 0,002 \% s^{-1}$ e $\dot{\epsilon} = 0,008 \% s^{-1}$, 52,5°C, $\dot{\epsilon} = 0,002 \% s^{-1}$ e $\dot{\epsilon} = 0,008 \% s^{-1}$.

dos materiais 60/40-C e 80/20-C, o tempo tende a ser aproximadamente igual, para valores de σ^* próximos, ou ligeiramente diverso, para valores de σ^* diversos.

9.5 Ensaios Cíclicos

Nos ensaios cíclicos, foi realizada uma série de ensaios para exploração do comportamento e determinação de sua característica, relativamente a comportamento isotrópico ou cinemático. Realizaram-se os ensaios mostrados na Tabela 9.4.

Medidas de força, deslocamento, deformação e tempo foram registradas em arquivos ASCII, gravados em disquetes. A numeração dos corpos de prova é análoga àquela utilizada para a tração-relaxação. Os arquivos gravados formam uma base de dados viscoelastoplástica do comportamento cíclico.

Na Figura A1.16 são mostrados ciclos de deslocamento de $\pm 2,25$ mm para os materiais

70/30-C e 80/20-C, corpos de prova de diâmetro de aproximadamente 20 mm, e ciclos de deslocamento $\pm 2,25$ e $\pm 22,6$ para o material 60/40-C, corpos de diâmetro de aproximadamente 17 mm. Mantendo-se a taxa de deformação constante e aumentando-se a temperatura, diminui a tensão e aumentam a deformação e a área interna do ciclo, como entre as Figuras A1.16c e A1.16e (é aproximadamente igual), e entre as Figuras A1.16h e A1.16f. Mantendo-se, inversamente, a temperatura constante e aumentando-se a taxa de deformação, verifica-se somente um pequeno aumento de tensão e pequena diminuição da deformação e da área interna do ciclo, como entre as Figuras A1.16c e d, e entre as Figuras A1.16g e h (tensão e deformação diferentes). Uma comparação entre materiais é fornecida pelas Figuras A1.16e e A1.16f, onde a utilização do material mais rígido, 80/20-C, numa mesma temperatura, provoca um aumento na força e na deformação. O comportamento mostrou tratar-se de encruamento isotrópico, conforme mostra a superposição de ciclos na Figura A1.16. Nesta figura, os ciclos à compressão não coincidem exatamente. No entanto, isto decorre de problemas com flambagem dos corpos de prova na compressão. Durante a compressão, observa-se nos ensaios uma flambagem maior ou menor do corpo de prova, o que provoca uma ligeira modificação nos gráficos para tensão negativa (máximo da compressão), com os ciclos não exatamente superpostos. A porção dos ciclos sob valores positivos de tensão, no entanto, sem influência (considerável) da flambagem, mostra um encruamento perfeitamente isotrópico.

Nos ensaios cíclicos, ao se pressionarem firmemente as cunhas em volta da cabeça do corpo de prova na fixação, de forma a se provocar uma pré-tensão, obtêm-se os gráficos com "laço", próximo ao zero da tensão, como evidenciam as Figuras A1.16e e A1.16f. Sem tal pré-tensão, obtêm-se um gráfico como evidenciam as Figuras A1.16g e h, onde a passagem de tração para compressão se faz por um patamar ao invés do laço. Estes laços refletem o desenvolvimento dos deslocamentos internos das cadeias poliméricas influenciados pela existência ou não da pré-tensão.

Em geral, os corpos de prova se rompem com menos de 15 ciclos, que é o máximo pro-

Tabela 9.5 - Relação de ensaios óticos
<ul style="list-style-type: none"> • Material 60/40-C, 15 ensaios, nas taxas e temperaturas: $\dot{\epsilon} = 0,018 \text{ \% s}^{-1}$, 38°C, 46°C, 51°C, 54°C; $\dot{\epsilon} = 0,072 \text{ \% s}^{-1}$, 38°C, 46°C, 51°C, 54°C; $\dot{\epsilon} = 0,126 \text{ \% s}^{-1}$, 38°C, 46°C, 51°C, 54°C; $\dot{\epsilon} = 0,180 \text{ \% s}^{-1}$, 38°C, 51°C, 54°C.
<ul style="list-style-type: none"> • Material 70/30-C, 16 ensaios, nas taxas e temperaturas: $\dot{\epsilon} = 0,014 \text{ \% s}^{-1}$, 42°C, 49°C, 51°C, 54°C; $\dot{\epsilon} = 0,023 \text{ \% s}^{-1}$, 42°C, 44°C, 51°C, 54°C; $\dot{\epsilon} = 0,032 \text{ \% s}^{-1}$, 42°C, 42°C, 51°C, 54°C; $\dot{\epsilon} = 0,041 \text{ \% s}^{-1}$, 42°C, 47°C, 51°C, 54°C.
<ul style="list-style-type: none"> • Material 80/20-C, 16 ensaios, nas taxas e temperaturas: $\dot{\epsilon} = 0,007 \text{ \% s}^{-1}$, 52°C, 56°C, 59°C, 64°C; $\dot{\epsilon} = 0,013 \text{ \% s}^{-1}$, 52°C, 56°C, 60°C, 64°C; $\dot{\epsilon} = 0,018 \text{ \% s}^{-1}$, 52°C, 56°C, 60°C, 66°C; $\dot{\epsilon} = 0,023 \text{ \% s}^{-1}$, 52°C, 56°C, 60°C, 66°C.

gramado em cada ensaio. Observe que a tensão na compressão pode ser até duas vezes maior que na tração.

9.6 Ensaios Óticos

Os ensaios óticos filmados mostram o desenvolvimento interno das franjas isocromáticas ao se aplicar a sollicitação conforme definida no item 7.7. Foram utilizados corpos de prova retangulares, com dimensões gerais de 30 x 75 mm, espessuras de 8 mm a 9 mm, seguindo a programação de ensaios da Tabela 9.5.

Estes ensaios estão registrados em fitas de vídeo, com aproximadamente 25 h de ensaios no total. Medidas de força, deslocamento e tempo foram registradas em arquivos ASCII, gravados em disquetes. A numeração dos corpos de prova é análoga àquela utilizada para a tração-relaxação. As fitas de vídeo e os arquivos em disquetes formam uma base de dados fotoviscoelastoplástica do comportamento ótico no ensaio de flexão a três pontos.

Observa-se que, para temperaturas mais elevadas, o material se encontra mais viscoso

e, portanto, mais flexível. Neste caso, mesmo a pequena deformação da primeira punção provoca uma deformação sensível no corpo de prova e, portanto, o aparecimento de um número significativo franjas sobre uma extensão também significativa do corpo de prova. Ao contrário, para temperaturas mais baixas, o aparecimento de franjas fica restrito às porções do corpo de prova próximas às zonas de aplicação de carga/apoio, já que o material se encontra mais rígido, com uma deformação bem pequena e uma concentração de tensões nos pontos de aplicação.

9.6.1 Comportamento Ótico Geral

De acordo com o procedimento de ensaio, após a primeira punção (Figura 7.4), faz-se uma parada no deslocamento e deixa-se a tensão relaxar. Para todos os materiais, esta relaxação mostra, em geral, um pequeno desenvolvimento próximo à ponta de punção, onde, após a parada da punção, se observa não só uma diminuição de franjas, i.e. uma relaxação propriamente dita, mas também uma "redistribuição" das franjas sobre as regiões próximas à ponta de punção. A deformação sob esta ponta, no entanto, se mantém, já que a ponta fica fixa em sua posição. Quando se faz a aplicação da segundo punção, observa-se que o desenvolvimento das tensões internas não é análogo à primeira punção. Inicialmente, observa-se um desenvolvimento de tensões no sentido de diminuir o estado interno residual deixado pela redistribuição de tensões da primeira relaxação; observa-se, em seguida, em alguns casos, uma espécie de parada neste desenvolvimento; finalmente observa-se um aumento de franjas análogo à primeira tração. Na porção média no extremo inferior do corpo de prova observam-se de uma a duas franjas, que se desenvolvem também num esquema de aumento/diminuição, às vezes não concomitantemente com o desenvolvimento de franjas sob a ponta de punção. A primeira punção se refere a um estado de deformação muito pequeno, e em muitos casos o aparecimento de franjas só é notado no final da relaxação, quando uma redistribuição de esforços amplia a zona de aparecimento de franjas sob a ponta de punção.

Na segunda relaxação, novamente se verifica uma diminuição de franjas com redistribuição por sobre as regiões adjacentes, neste caso num processo mais extenso. Este processo se desenvolve por toda a superfície do corpo de prova, em taxas de deformação menores, ou se restringe mais às porções mais externas, próximas às superfícies superior e inferior. A segunda punção se refere a um estado de deformação já considerável, com a ponta de punção avançando 1 mm. Na terceira punção, em ensaios a baixas temperaturas e a altas taxas de deformação, a lâmina se flete, devido à maior rigidez do material. Nesta punção, o desenvolvimento de franjas é considerável, já que o avanço de 3 mm da ponta de punção introduz uma grande deformação.

Estes três níveis de punção mostram o nível de formação de franjas para deformações pequenas, médias e grandes. Em pequenas deformações, deseja-se uma sensibilidade mínima do material, principalmente em temperaturas mais altas, onde a menor rigidez não induz uma quantidade de franjas considerável. Já no outro extremo, em grandes deformações, quer-se que o nível de franjas não seja excessivo, para uma boa visualização e quantificação destas.

Ao final da terceira relaxação, retira-se finalmente a ponta de punção, e novo fenômeno se apresenta. Desta vez, o estado de tensões residual "distribuído", resultante da última relaxação, provoca uma deformação, ou volta de deformação. Deixando-se tempo suficiente, observa-se que o "vinco" existente sob a ponta de punção tende a "desaparecer", isto é, a deformação viscoplástica existente neste local tende a ser retornada. No entanto, a deflexão total, i.e., o abaixamento da viga, não retorna, pelo menos completamente. Neste caso se observa um retorno local de deformações acentuado sob a ponta de punção, proveniente da retirada desta ponta. Tem-se, aqui, um exemplo nítido do desenvolvimento complexo das deformações internas do material, onde as tensões residuais foram suficientes para retornar uma deformação localizada, tratando-se assim de uma deformação viscoelástica. No entanto, uma deformação plástica permanente se verifica, no caso da deformação geral da viga. As duas carac-

terizam bem o material como viscoelastoplástico.

9.6.2 Visualização do Comportamento Ótico Geral em Vídeo

Observa-se, nas gravações dos ensaios, o desenvolvimento complexo das tensões internas. A Tabela 9.6 mostra uma relação de ensaios e porções de ensaios utilizados como amostragem do comportamento ótico. Este comportamento, obviamente, só pode ser mostrado em vídeo (anexo), seguindo o esquema mostrado na Tabela 9.6.

Desde o início do vídeo até 1 h e 30 min, apresenta-se um ensaio ótico completo para cada material, sob as condições de temperatura e taxa de deformação indicadas. Estes ensaios completos são compostos por:

- uma primeira punção até 0,4 mm (pequena deformação), seguida de uma relaxação de 3 min;
- uma segunda punção até 1.0 mm (deformação média), seguida de uma relaxação de 5 min;
- uma terceira punção até 3.0 mm (grande deformação), seguida de uma relaxação de 10 min;
- retirada da ponta de punção (descarregamento), seguida de uma relaxação de 7 min.

O primeiro ensaio mostrado no início do vídeo se refere ao material 80/20-C, onde o horário 4:30 da legenda "MAY 2.99 PM 4:30" (2 de maio 1999, 4 h 30 min da tarde) situa o início da primeira punção. O início e a parada de cada punção são indicados por uma luz que pisca, acima da tela à esquerda. Observa-se a formação de duas a três franjas, em círculos bem próximas à aplicação da carga. Assim que se pára a punção, estas franjas tendem a desaparecer quase que totalmente. Nova punção ocorre de 4:33 a 4:34, levando algum tempo para aparecerem novas franjas, porém na forma de círculos quase divididos ao meio, bem sob a ponta de punção. Com a parada da punção, estas franjas tendem a ficar mais arredondadas. Não se distinguem muito bem as franjas nos apoios. Na segunda relaxação, as franjas tendem a quase desaparecer, como na primeira, ficando novamente uma franja circular sob o ponto de aplicação da punção, que se desenvolve e aparece maior em 4:37, 4:38. A última punção se dá em 4:39, onde se verifica nitidamente o seguinte desenvolvimento: inicialmente, diminui o

Tabela 9.6 - Relação das condições dos ensaios apresentados no vídeo

1) Variação no comportamento ao se variar o material, para temperaturas e taxas aproximadamente iguais (ensaio completo para o material, nas condições indicadas)

TEMPO DA FITA (± 1 min)	LEGENDA NO VÍDEO	MATERIAL	OUTRAS CONDIÇÕES (TEMPERATURA E TAXA DE DEFORMAÇÃO)
0:01:00	MAY 2.99 PM 4:30	80/20-C	52°C; 0,018 % s ⁻¹
0:29:00	JAN 4.99 PM 4:17	70/30-C	51°C; 0,014 % s ⁻¹
1:01:00	MAR 9.99 PM 2:25	60/40-C	51°C; 0,018 % s ⁻¹

2) Variação no comportamento ao se variar a temperatura, para um mesmo material, a uma mesma taxa temporal de deformação (somente mostrada a terceira punção)

TEMPO DA FITA (± 1 min)	LEGENDA NO VÍDEO	TEMPERATURA (°C)	OUTRAS CONDIÇÕES (MATERIAL E TAXA DE DEFORMAÇÃO)
1:30:40	MAR 7.99 PM 4:44	38	60/40-C; 0,126 % s ⁻¹
1:32:40	MAR 8.99 PM 5:07	46	60/40-C; 0,126 % s ⁻¹
1:36:40	MAR 9.99 PM 3:50	51	60/40-C; 0,126 % s ⁻¹
1:40:20	MAR 9.99 PM 6:07	54	60/40-C; 0,126 % s ⁻¹

3) VARIAÇÃO NO COMPORTAMENTO AO SE VARIAR A TAXA TEMPORAL DE DEFORMAÇÃO, PARA UM MESMO MATERIAL, A UMA MESMA TEMPERATURA:

TEMPO DA FITA (± 1 min)	LEGENDA NO VÍDEO	TAXA TEMPORAL DE DEFORMAÇÃO (% s ⁻¹)	OUTRAS CONDIÇÕES (MATERIAL E TEMPERATURA)
1:43:50	MAR 9.99 PM 2:34	0,018	60/40-C; 51°C
1:48:40	MAR 9.99 PM 3:11	0,072	60/40-C; 51°C
1:53:00	MAR 9.99 PM 3:50	0,126	60/40-C; 51°C
1:56:20	MAR 9.99 PM 4:16	0,180	60/40-C; 51°C

tamanho da franja residual circular; em seguida, começam a aparecer uma franja na porção média inferior do corpo de prova, entre os apoios, assim como franjas laterais ao círculo sob o ponto de aplicação de carga. No final de 4:40 observam-se duas franjas inferiores e um desenvolvimento complexo de franjas sob a ponta de punção. Em 4:41, pára-se a punção. As tensões sob a ponta começam a se distribuir lentamente, restando um padrão mais simples, com somente um conjunto de franjas circulares sob a ponta. As franjas ocupam aproximadamente 1/4 das porções extremas do corpo de prova, próximo às laterais superior e inferior. Na

parte inferior, observa-se um avanço das franjas com o tempo. Em 4:42, as franjas na parte superior começam a se expandir. Começam a aparecer franjas nas laterais, em baixo. Em 4:46, observam-se 2 franjas em baixo, uma maior em cima e um pequeno círculo sob a ponta de punção. Em 4:50, observa-se que o estado de tensões não se modificou muito. Somente a franja maior em cima diluiu-se um pouco. Em 4:52 retira-se a ponta de punção, liberando-se o retorno da deformação acumulada nas três punções. O estado de tensões residual vai promover uma redistribuição de esforços por sobre o corpo de prova. De início, quase nada muda. Em 4:54, observa-se que o “vinco” deixado na parte superior do corpo de prova pela ponta já retornou metade de sua profundidade. A retirada da ponta, neste caso, mostra mais uma redistribuição localizada, com o retorno da deformação sob a ponta de punção, e não indica grandes modificações no geral. Em 4:58 ainda se percebe um pequeno vinco. Em suma, para este material, nas condições de maior deformação, quando da terceira punção, apareceu uma quantidade sensível de franjas, por uma extensão considerável do corpo de prova.

A seguir, aproximadamente 30 min após o início da fita, a legenda “JAN 4.99 PM 4:17” se refere ao material 70/30-C, onde o horário 4:17 situa o início da primeira punção. A quantidade de franjas sob a ponta de punção é quase imperceptível, assim como na segunda punção em 4:21. Somente em 4:22 observa-se o aparecimento sensível de franjas, nas laterais sob a ponta de punção, devido ao desenvolvimento do processo de relaxação. Em 4:24 aparecem mais franjas. Em 4:26, quando da terceira punção, observam-se as franjas (superiores) diminuir, como visto no material 80/20-C acima, num ritmo bem lento. Em 4:27, começam a aparecer franjas na parte média inferior, enquanto que as franjas superiores parecem distribuir-se horizontalmente. Em 4:28, as franjas inferiores continuam a aumentar, enquanto que em cima começam a se expandir, no entanto aparentemente de forma mais concentrada. Em 4:29, pára-se a punção. Existem duas franjas em baixo. Em 4:32 existem franjas distribuídas por toda a extensão do corpo de prova. Em 4:40, retira-se a ponta de punção, e observa-se

um vinco bem pequeno. Em 4:48, o estado de tensões internas encontra-se bem menos desenvolvido.

Aproximadamente em 1 h após o início da fita, inicia-se o último dos ensaios completo, do material 60/40-C, com a legenda "MAR 9.99 PM 2:25". Em 2:25 Não se percebe quase nada sob a ponta de punção, apenas um círculo bem pequeno de franjas sob a ponta de punção. Em 2:28, a segunda punção como que "achata" e expande este pequeno círculo, observando-se apenas um pequeno desenvolvimento de relaxação, comparado com os materiais anteriores. Em 2:34, quando da última punção, não se observa mudança alguma no estado das franjas, somente um ligeiro achatamento. Em 2:43, observa-se uma distribuição bem homogênea de franjas, igualmente distribuídas/espaçadas sobre toda a superfície do corpo de prova.

Comparando-se estes três ensaios, nas mesmas condições de temperatura e taxa de deformação, porém para materiais de rigidez diferente, observa-se que, ao final da relaxação após a terceira punção, i.e. sob um estado de tensões considerável, o material 80/20 apresenta uma distribuição interna de franjas mais concentrada, próximo às extremidades superior e inferior, enquanto que as franjas se mostram mais distribuídas por sobre a extensão do corpo no material 70/30, e bastante distribuídas sobre todo o corpo de prova no material 60/40.

Após 1 h e 30 min, inicia-se a segunda série de amostragem e ensaios, desta vez apresentando-se somente parte do ensaio. Inicia-se aproximadamente 1 min antes da terceira punção, realizada com um deslocamento de 3.0 mm (grande deformação), e termina-se após 2 min de relaxação. Nesta amostragem e na próxima, mostra-se o comportamento do material 60/40-C. Nesta segunda série, a taxa de deformação é a mesma para todos os ensaios, $\dot{\epsilon} = 0,126 \% s^{-1}$, mostrando-se a variação no comportamento ao se variar (aumentar) a temperatura. A legenda "MAR 7.99 PM 4:44" indica o primeiro ensaio, numa temperatura de 38°C. Observa-se a existência de alguma tensão, e em 4:46 é aplicada a punção, desenvolvendo-se franjas de forma ampla por todo o corpo de prova, que posteriormente se restringem em 4:48. Logo após, a legenda "MAR 8.99 PM 5:07" introduz o segundo ensaio, a 46°C, observando-se

também franjas residuais, e em 5:08 ocorre a punção, observando-se um desenvolvimento de franjas menor que o anterior. O terceiro ensaio, "MAR 9.99 PM 3:50", a 51°C, mostra, após a punção (3;51), franjas restritas à periferia do corpo de prova. O último ensaio, "MAR 9.99 PM 6:07", segue o padrão, com punção em 6:07.

A terceira série de amostragem mostra o efeito da taxa de deformação, para uma temperatura constante, numa porção de ensaio análoga à da segunda série. Comparando-se os casos extremos, para $\dot{\epsilon} = 0,018 \% s^{-1}$ ("MAR 9.99 PM 2:34") e $\dot{\epsilon} \% = 0,180 s^{-1}$ ("MAR 9.99 PM 4:16") percebe-se uma distribuição análoga de franjas, porém, para a velocidade maior, o desenvolvimento fica mais restrito às extremidades do corpo de prova.

CAPÍTULO 10

MODELAGEM: PARÂMETROS CARACTERIZADORES DO COMPORTAMENTO

A partir de um série de valores tensão×deformação e tensão×tempo, provenientes de ensaios de tração com relaxações múltiplas, são identificados os principais parâmetros numéricos caracterizadores do comportamento mecânico, que são aqueles relativos a encruamento, relaxação e fluência. Estes parâmetros são os coeficientes das equações numéricas adotadas, utilizados para caracterizar o comportamento mecânico em cada caso. Assim, cada curva tensão×deformação, numa dada temperatura e sob uma dada taxa de deformação, como na Figura 8.8, será caracterizada pelos parâmetros K e M de uma regressão linear no espaço $(\ln\sigma, \ln\epsilon)$. Em seguida, para quantificar o efeito da temperatura, os parâmetros K e M de temperaturas diversas são equacionados juntamente com suas respectivas temperaturas de ensaio, desta vez como uma regressão polinomial no espaço (K, M, θ) . Isto produz uma nova série de parâmetros \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} que caracterizam a variação do parâmetros K e M com a temperatura, a uma dada taxa de deformação. Relacionando-se, finalmente, estes últimos parâmetros numéricos, \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} com a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$, obtém-se uma série final de parâmetros k_i , m_i e n_i que caracterizam a variação de \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} com $\dot{\epsilon}$.

Este processo de obtenção de parâmetros numéricos, com equações interdependentes ou “acopladas”, desenvolve-se, assim, sucessivamente, iniciando-se com uma equação envolvendo duas variáveis de ensaio, posteriormente envolvendo, em cada equação sucessiva, uma variável de ensaio e os parâmetros numéricos da equação anterior, até serem equacionadas todas as variáveis de ensaio envolvidas no experimento. Na tração, estas variáveis são tensão, deformação, temperatura de ensaio e taxa de deformação aplicada. Procedimento

análogo é utilizado para o equacionamento da relaxação, para as variáveis tensão, tempo, temperatura de ensaio e taxa de deformação aplicada. Relacionando-se as variáveis de ensaio tensão e tempo, resultam os parâmetros A , D e G . Estes parâmetros, equacionados com a temperatura θ , resultam novos parâmetros α_i , δ_i e γ_i que, por sua vez, relacionados com a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ resultam, finalmente, os parâmetros a_i , b_i , c_i , d_i , e_i , f_i , g_i , h_i e l_i .

As curvas de fluência não foram submetidas a tal processo de variáveis acopladas. A caracterização do comportamento fica determinada pelas curvas de relaxação, sendo a fluência um processo derivado desta, obtida indiretamente através de um procedimento numérico sobre curvas de relaxações sucessivas. Neste caso, a relação entre as variáveis ϵ e t fornece os parâmetros numéricos A_f , D_f e G_f , que descrevem a fluência para um determinado nível de tensão σ^* arbitrado, a uma dada temperatura e uma dada taxa de deformação. Esta relação não é obtida diretamente dos resultados de ensaio, mas de um procedimento numérico sobre uma porção das curvas experimentais $\sigma \times t$ nas vizinhanças do ponto σ^* . A esquematização de um equacionamento para estudo da fluência foi indicada no Capítulo 8.

O comportamento cíclico é caracterizado, em termos básicos, como isotrópico ou cinemático. Nos ensaios aqui realizados, observa-se uma estabilização dos ciclos sobre uma mesma trajetória, tratando-se, assim, de encruamento isotrópico. Neste caso, a quantificação do fenômeno cíclico é mais simples. Apesar de não se necessitarem de quantidades cíclicas para caracterização do material com objetivos de simulação, um equacionamento é indicado visando futuras simulações que incluam justamente um estudo cíclico. Este equacionamento é realizado após se descreverem vários ciclos, a vários níveis de tensão, quando se equaciona a variação das amplitudes de tensão e deformação, $\Delta\sigma$ e $\Delta\epsilon$. Tal procedimento experimental não foi de fato efetuado aqui, somente realizando-se um máximo de dois ciclos, a duas amplitudes de deformação diferentes, para as temperaturas e taxas de deformação utilizadas, visando uma melhor constatação da isotropia ou anisotropia do comportamento.

O comportamento ótico é caracterizado pela inspeção, na filmagens, dos níveis de aparecimento de franjas e nitidez para leituras. Não são atribuídos parâmetros numéricos quantificadores neste estágio. Faz-se uma avaliação qualitativa da existência de franjas e de uma quantidade de franjas suficiente para leitura. A quantificação das constantes óticas e das franjas isocromáticas será feita nos experimento de simulação específicos, conforme delineado nos Capítulos 6 e 10 (item 10.7), observando-se que se deve realizar uma calibração para cada temperatura e para cada taxa de deformação.

Sendo assim, no atual estágio da modelagem destas misturas não foi realizada uma quantificação das franjas para estes corpos de prova. Foi realizada uma avaliação/inspeção das filmagens, onde se verificou o nível de aparecimento de franjas: (i) é geralmente suficiente para fins de quantificação, em comportamentos mais rígidos, para deformações relativas ao nível da segunda punção, (ii) é distinto para quantificações sobre a superfície média do corpo de prova, em todas as temperaturas e taxas de deformação, para deformações relativas ao nível da terceira punção. Observa-se que nos pontos de aplicação da punção, conforme seria de se esperar, há uma concentração de tensões e, conseqüentemente, de franjas, sendo difícil sua quantificação nas temperaturas menores para os materiais mais rígidos. A primeira punção mostrou-se um nível muito pequeno de aparecimento de franjas, às vezes somente parte da primeira franja, estando assim num nível muito baixo de tensionamento na maioria dos casos para se poder fazer uma quantificação de seu estado.

O processos de obtenção dos parâmetros de tração, relaxação e fluência estão detalhados a seguir.

10.1 Parâmetros de Caracterização da Tração

Para a descrição das características de endurecimento (ou encruamento) de um material viscoso, utilizam-se na literatura várias versões de uma equação exponencial do tipo:

$$\sigma = K \varepsilon^{1/M} \dot{\varepsilon}^{1/N} \quad (10.1)$$

onde K, M e N são parâmetros numéricos resultantes de uma regressão linear dos resultados experimentais no espaço das variáveis $\ln \sigma$, $\ln \varepsilon$, $\ln \dot{\varepsilon}$.

Estes parâmetros podem ser relacionados:

- o parâmetro K com a resistência;
- o parâmetro M com o encruamento;
- o parâmetro N com a viscosidade.

Este equacionamento é geralmente feito utilizando-se somente o domínio plástico do diagrama $\sigma \times \varepsilon$.

Assim, a partir de resultados de ensaios de tração/compressão em um material qualquer, utiliza-se este tipo de equacionamento para a caracterização do material através dos parâmetros K, M e N, a uma dada temperatura. Devem-se, desse modo, especificar três parâmetros para caracterizar um determinado comportamento. Alternativamente, podem-se utilizar os coeficientes K e M e a taxa de deformação aplicada para caracterizar algebricamente um determinado comportamento, utilizando-se a taxa de deformação $\dot{\varepsilon}$ como parâmetro ao invés do coeficiente N. É exatamente isto o que se faz para a formulação dos comportamentos desenvolvidas neste trabalho, utilizando os parâmetros K, M de curvas no espaço $(\ln \sigma, \ln \varepsilon)$ e sua respectiva taxa $\dot{\varepsilon}$ como quantidades caracterizadoras.

Desse modo, a eq. (10.1) é uma relação entre as variáveis σ , ε e $\dot{\varepsilon}$, a uma dada temperatura θ . Por outro lado, a formulação aqui desenvolvida é feita de equacionamentos parciais, inicialmente entre as variáveis σ , ε , posteriormente entre K, M e θ , visando-se obter a temperatura θ necessária para que este material de simulação tenha, nesta temperatura, propriedades análogas às descritas pelos parâmetros K, M e $\dot{\varepsilon}$ da eq. (10.1). Assim, o tipo fundamental de equação utilizada neste trabalho para a tração é uma relação entre a temperatura θ e os parâmetros K e M do material de modelagem. O tipo algébrico final escolhido para a relação

$\theta = \theta(K, M)$ foi uma expressão polinomial, por sua melhor adaptabilidade à série de resultados (θ, K, M) .

Para se realizar esta formulação, a partir de resultados de ensaios numa dada mistura a uma dada temperatura e taxa de deformação são obtidos, dos diagramas $\sigma \times \varepsilon$, as constantes K_i e M_i , para cada temperatura θ_i e taxa $\dot{\varepsilon}_i$, através de regressões lineares logarítmicas:

$$\sigma = K_i \varepsilon^{1/M_i} \quad (10.2)$$

onde K_i e M_i são os coeficientes que definem a plasticidade do material na temperatura θ_i e sob a taxa $\dot{\varepsilon}_i$.

Esta equação não é explicitamente utilizada aqui, mas pode ser usada para descrever cada curva experimental, a cada temperatura e taxa de deformação, usando-se os coeficientes K e M . De fato, o que interessa nestas relações são os coeficientes K e M e sua respectiva temperatura. A partir de uma série de tais valores θ , K e M , através de uma interpolação polinomial obtém-se a relação:

$$\theta = \mathcal{K}_i + \mathcal{M}_i K + \mathcal{N}_i M \quad (10.3)$$

A eq. (10.3) fornece a temperatura θ para quaisquer K e M . \mathcal{K}_i , \mathcal{M}_i e \mathcal{N}_i são os coeficientes do polinômio que caracterizam a variação de K e M com θ .

Considerando-se, agora, as diversas taxas de deformação, tem-se o conjunto de valores $\dot{\varepsilon}_i$, \mathcal{K}_i , \mathcal{M}_i , \mathcal{N}_i . Equacionando-se, agora, cada parâmetro \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} separadamente, obtém-se a variação de cada parâmetro \mathcal{K} , \mathcal{M} ou \mathcal{N} com a taxa de deformação $\dot{\varepsilon}$, através de relações do tipo:

$$\begin{aligned} \mathcal{K} &= \mathcal{K}(k_i, \dot{\varepsilon}) \\ \mathcal{M} &= \mathcal{M}(m_i, \dot{\varepsilon}) \\ \mathcal{N} &= \mathcal{N}(n_i, \dot{\varepsilon}) \end{aligned} \quad (10.4)$$

Estas relações, numa formulação simples, podem tomar a forma ou de um polinômio ou de uma expressão exponencial, ou ainda "splines", escolhendo-se o tipo de expressão que

fornece o melhor ajuste aos dados. No caso de expressões polinomiais de grau "n", têm-se:

$$\begin{aligned}\mathcal{K}(k_i, \dot{\epsilon}) &= k_1 + k_2 \dot{\epsilon} + k_3 \dot{\epsilon}^2 + \dots + k_{n+1} \dot{\epsilon}^n \\ \mathcal{M}(m_i, \dot{\epsilon}) &= m_1 + m_2 \dot{\epsilon} + m_3 \dot{\epsilon}^2 + \dots + m_{n+1} \dot{\epsilon}^n \\ \mathcal{N}(n_i, \dot{\epsilon}) &= n_1 + n_2 \dot{\epsilon} + n_3 \dot{\epsilon}^2 + \dots + n_{n+1} \dot{\epsilon}^n\end{aligned}\tag{10.5}$$

O número n+1 de parâmetros de uma equação depende do grau do polinômio que melhor se ajusta aos dados, em cada conjunto.

Vai-se indicar, a seguir, o processo de obtenção destes parâmetros, a partir dos resultados experimentais de tração para o material 60/40-C. Utilizando-se os dados de tensão×deformação da primeira tração, referentes aos ensaios relacionados na Tabela 9.2, foram obtidos inicialmente uma série de valores de K e M, para diferentes valores de θ e $\dot{\epsilon}$. Estes valores estão mostrados na Tabela 10.1.

Com os valores de θ , K e M da Tabela 10.1, obtêm-se os parâmetros da equação (10.3) para diversos valores de $\dot{\epsilon}$. Os valores de \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} para os respectivos $\dot{\epsilon}$ assim obtidos são mostrados na Tabela 10.2.

Finalmente, com os dados da Tabela 10.2, que são os valores dos parâmetros \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} para diversos valores de $\dot{\epsilon}$, são determinados os parâmetros k_i , m_i e n_i caracterizadores da variação de cada parâmetro \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} com a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$, relativos às equações 10.5 e mostrados na Tabela 10.3.

Deve ser observado que estas tabelas resumem, numericamente, o comportamento à tração dos materiais estudados, que são descritos fundamentalmente pelas eqs. (10.3) e (10.5). Os coeficientes de correlação e estimativas de erros para todos os equacionamentos e todos os materiais estão nos arquivos kmnres.xls e adgresum.xls (ou *.wb1), relacionados no Anexo 1, a serem abertos com uma planilha Excel (*.xls) ou Quattro Pro (*.wb1). Comentários

Tabela 10.1 - Parâmetros K e M da tração, iniciais, caracterizadores de diagramas $\sigma \times \epsilon$ numa dada temperatura θ e taxa de deformação $\dot{\epsilon}$

Material 60/40-C¶				
$\dot{\epsilon}$ [s ⁻¹]	θ [°C]	K	M	r ² †
0,0006	39	0,1730777	0,6329494	0,990
0,0006	43	0,1046264	0,5519194	0,992
0,0006	46	0,1178489	0,7127961	0,991
0,0006	50	0,0307471	0,421229	0,997
0,0006	54,5	0,0346255	0,716438	0,976
0,0006	57	0,0129801	0,3440971	0,996
0,0024	38	0,6353029	0,8480009	0,997
0,0024	42	0,2105113	0,6348622	0,987
0,0024	46	0,2388991	0,6709398	0,984
0,0024	50	0,0909883	0,6724491	0,989
0,0024	54	0,0275562	0,4694368	0,997
0,0042	39	0,2423772	0,6333727	0,985
0,0042	43	0,1660868	0,6062152	0,990
0,0042	46	0,1035485	0,6964127	0,979
0,0042	47	0,081695	0,6001803	0,991
0,0042	49	0,0421624	0,5129506	0,995
0,0042	50	0,047524	0,5223268	0,994
0,0042	53,5	0,0280687	0,4864666	0,998
0,0060	39	0,2673223	0,6488529	0,991
0,0060	43	0,1841193	0,615833	0,987
0,0060	46	0,1428658	0,6160124	0,989
0,0060	49	0,0874268	0,6724079	0,990
0,0060	50	0,055087	0,5515	0,971
0,0060	54	0,0306423	0,5095888	0,997

¶: uma listagem destes coeficientes e suas equações, retirada da planilha de cálculo, está no Apêndice 2, item A2.1-2. Valores análogos para os materiais 70/30-C e 80/20-C estão nos itens A2.2-2 e A2.3-2, respectivamente. †: coeficiente de correlação linear de $\sigma \times \epsilon$, indicando a representatividade dos parâmetros K e M nas condições de temperatura θ e taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ mostradas.

Tabela 10.2 - Parâmetros \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} da tração, intermediários, caracterizadores da variação de K e M com a temperatura θ , numa dada taxa $\dot{\epsilon}$

Material 60/40-C¶				
$\dot{\epsilon} \times 10^4$ [s ⁻¹]	\mathcal{K}	\mathcal{M}	\mathcal{N}	r ² †
6	53,02	-113,31	7,425	0,905
24	57,95	-17,92	-11,593	0,807
42	58,14	-52,61	-10,370	0,949
60	56,02	-54,14	-4,555	0,904

¶: uma listagem destes coeficientes e suas equações, retirada da planilha de cálculo, está no Apêndice 2, item A2.1-2. Valores análogos para os materiais 70/30-C e 80/20-C estão nos itens A2.2-2 e A2.3-2, respectivamente. †: coeficiente de correlação linear de $\mathcal{K} \times \mathcal{M} \times \theta$, indicando a representatividade dos parâmetros \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} para o valor de $\dot{\epsilon}$ mostrado.

Tabela 10.3 - Parâmetros k_i , m_i e n_i finais da tração, caracterizadores da variação de \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} com $\dot{\epsilon}$

Material 60/40-C¶				
parâmetro	i			$r^2 \ddagger$
	1	2	3	
k_i	50,870	0,41080	-0,0054512	0,983
m_i	-136,84	5,7297	-0,074792	0,717
n_i	14,698	-1,4575	0,019161	0,946

¶: uma listagem destes coeficientes e suas equações, retirada da planilha de cálculo, está no Apêndice 2, item A2.1-3. Valores análogos para os materiais 70/30-C e 80/20-C estão nos itens A2.2-3 e A2.3-3, respectivamente. †: coeficiente de correlação linear de $\mathcal{K} \times \dot{\epsilon}$, $\mathcal{M} \times \dot{\epsilon}$ e $\mathcal{N} \times \dot{\epsilon}$, indicando a representatividade dos parâmetros k_i , m_i e n_i .

sobre a significância destas equações, ligados aos coeficientes de correlação linear, estão no item 10.5 a seguir.

10.2 Parâmetros de Caracterização da Relaxação

Na relaxação, deve-se equacionar a variação da tensão com o tempo, conforme já discutido no Capítulo 8. Neste trabalho, para descrição desta relação entre a tensão e o tempo, vai-se utilizar uma expressão polinomial de segundo grau:

$$(\sigma/\sigma_{\text{máx}}) = A + D t + G t^2 \quad (10.6)$$

onde $(\sigma/\sigma_{\text{máx}})$ é uma tensão "normalizada" com relação ao valor máximo de tensão $\sigma_{\text{máx}}$, existente no início da relaxação. Isto permite uma melhor análise dos resultados, já que o valor específico onde se iniciou a relaxação fica considerado pela formulação.

Os parâmetros A, D e G, de acordo com a formulação acoplada utilizada, formam um conjunto de expressões dadas por:

$$A(\alpha_i, \theta) = \alpha_1 + \alpha_2 \theta + \alpha_3 \theta^2$$

$$D(\delta_i, \theta) = \delta_1 + \delta_2 \theta + \delta_3 \theta^2 \quad (10.7)$$

$$G(\gamma_i, \theta) = \gamma_1 + \gamma_2 \theta + \gamma_3 \theta^2$$

onde cada coeficiente α_i , δ_i , γ_i é resultante de uma expressão da forma:

$$\alpha_i = \alpha_i(a_i, b_i, c_i, \dot{\epsilon}) = a_i + b_i \dot{\epsilon} + c_i \dot{\epsilon}^2$$

$$\delta_i = \delta_i(d_i, e_i, f_i, \dot{\epsilon}) = d_i + e_i \dot{\epsilon} + f_i \dot{\epsilon}^2 \quad (10.8)$$

$$\gamma_i = \gamma_i(g_i, h_i, l_i, \dot{\epsilon}) = g_i + h_i \dot{\epsilon} + l_i \dot{\epsilon}^2$$

Vai-se indicar, a seguir, o processo de obtenção destes parâmetros para o material 60/40-C, a partir dos resultados experimentais de tensão×tempo da primeira relaxação, referentes aos ensaios relacionados na Tabela 9.1.

Inicialmente, de curvas de relaxação obtêm-se dados de tensão×tempo para várias temperaturas e taxas de deformação. Uma regressão polinomial no espaço $(\sigma/\sigma_{\text{máx}}, t)$ fornece os parâmetros A, D e G de polinômios de regressão, mostrados na Tabela 10.4. Inicialmente, os parâmetros A, D e G da Tabela 10.4 são formulados com relação à variação de θ , conforme as equações (10.7), para uma taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ constante. Obtêm-se, assim, os parâmetros α_i , γ_i e δ_i , mostrados na Tabela 10.5

A partir da Tabela 10.5, nova formulação é realizada, equacionando a variação de cada parâmetro α_1 , α_2 , α_3 , δ_1 , ..., γ_3 com a taxa temporal de deformação $\dot{\epsilon}$, segundo a equação (10.8). Os parâmetros a_i a l_i resultantes estão dados na Tabela 10.6.

10.3 Determinação da Fluência

A determinação de uma curva de fluência depende do nível de tensão desejado, chamado σ^* , σ^{**} , etc. Para obter-se uma curva de fluência, segue-se o procedimento numérico es-

Tabela 10.4 - Parâmetros A, D e G da relaxação, iniciais, caracterizadores de curvas $\sigma/\sigma_{\text{máx}} \times t$ numa dada temperatura θ e taxa de deformação $\dot{\epsilon}$

Material 60/40-C¶					
$\dot{\epsilon}$ [s ⁻¹]	θ [°C]	A	D	$G \times 10^{-5}$	$r^2 \dagger$
0,0006	46	0,9204412	0,008596	4,737	0,987
0,0006	50	0,8962537	0,007956	3,996	0,981
0,0006	39	0,9301662	0,007275	3,961	0,984
0,0006	43	0,9301662	0,007275	3,961	0,984
0,0006	54.5	0,872726	0,009078	5,219	0,973
0,0006	57	0,8893038	0,009294	5,222	0,981
0,0024	38	0,90577608	0,0059845048	2,5267503	0,971
0,0024	42	0,83451103	0,0091745952	5,5197128	0,953
0,0024	46	0,79407627	0,0094298020	5,4630372	0,943
0,0024	50	0,78117407	0,0098799216	5,8091889	0,942
0,0024	54	0,74556493	0,010190955	6,1470346	0,926
0,0042	39	0,79328735	0,011002122	8,2764574	0,931
0,0042	43	0,76354901	0,0099350587	6,4734323	0,924
0,0042	46	0,75573530	0,015311733	13,833899	0,927
0,0042	47	0,71328896	0,010847525	7,0658576	0,915
0,0042	49	0,69478216	0,010924398	7,3749768	0,905
0,0042	50	0,70260471	0,010855030	7,0132773	0,908
0,0042	53.5	0,67527873	0,010692343	7,0010715	0,898
0,0060	39	0,73517439	0,0089473458	5,5874264	0,905
0,0060	43	0,71911731	0,0092669463	5,8426449	0,901
0,0060	46	0,70244266	0,0097978808	6,2814885	0,899
0,0060	49	0,69704276	0,010431633	6,5446195	0,906
0,0060	50	0,65739618	0,010930413	7,416214	0,889
0,0060	54	0,62558387	0,010543850	7,0435625	0,866

¶: uma listagem destes coeficientes e suas equações, retirada da planilha de cálculo, está no Apêndice 2, item A2.4-1. Valores análogos para os materiais 70/30-C e 80/20-C estão nos itens A2.5-1 e A2.6-1, respectivamente. †: coeficiente de correlação linear de $\sigma/\sigma_{\text{máx}} \times t$, indicando a representatividade dos parâmetros A, D e G nas condições de temperatura θ e taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ mostradas.

quematizado na Figura 8.10. Após obtidos numericamente os valores de ϵ e t , vai-se caracterizar esta curva através da equação:

$$\epsilon_p = A_f + D_f t + G_f t^2 \quad (10.9)$$

onde os parâmetros A_f , D_f , e G_f caracterizam uma curva para um determinado valor σ^* arbitrado, sob condições de taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ e temperatura θ dadas.

Conforme explicado no início deste Capítulo, a fluência, de acordo com o enfoque utilizado, é obtida de curvas de relaxação, e assim não é utilizada para caracterizar o comporta-

Tabela 10.5 - Parâmetros α_i , δ_i e γ_i da relaxação, intermediários, caracterizadores da variação dos parâmetros A, D e G com a temperatura θ

Material 60/40-C†					
$\dot{\epsilon}$ [s ⁻¹]	parâmetro	i			r ² †
		1	2	3	
0,0006	α_i	1,0559	-0,0030072	-1,8257E-	0,840
0,0006	δ_i	-0,0053432	-3,6513E-6	-1,1515E-6	0,804
0,0006	γ_i	68,5472E-5	-2,4555E-6	3,3016E-8	0,683
0,0024	α_i	2,1616	-0,049941	4,4127E-4	0,979
0,0024	δ_i	0,053312	-0,0025128	2,4836E-5	0,917
0,0024	γ_i	-4,9223E-4	2,2038E-5	-2,1908E-7	0,867
0,0042	α_i	1,1830	-0,010829	2,3521E-5	0,923
0,0042	δ_i	0,04175	-0,0023411	2,5547E-5	0,833
0,0042	γ_i	-5,1800E-4	2,7197E-5	-3,0473E-7	0,914
0,0060	α_i	0,55717	0,012949	-2,1555E-4	0,864
0,0060	δ_i	0,013833	-9,0536E-4	8,3502E-6	0,808
0,0060	γ_i	-1,0928E-4	6,4214E-6	-5,6885E-8	0,718

†: uma listagem destes coeficientes e suas equações, retirada da planilha de cálculo, está no Apêndice 2, item A2.4-2. Valores análogos para os materiais 70/30-C e 80/20-C estão nos itens A2.5-2 e A2.6-2, respectivamente. †: coeficiente de correlação linear de $A \times \theta$, $D \times \theta$, $G \times \theta$, indicando respectivamente a representatividade dos parâmetros α_i , δ_i e γ_i para o valor de $\dot{\epsilon}$ mostrado.

to, já caracterizado pelos parâmetros da relaxação. A fluência é, aqui, um processo derivado da relaxação.

Parâmetros A_f , D_f , e G_f foram obtidos para o material 60/40-C, a partir dos resultados de formação x tempo provenientes de procedimentos numéricos, referentes aos ensaios de relaxações múltiplas relacionados na Tabela 9.1. Das várias curvas de relaxação múltiplas de um mesmo ensaio obtêm-se dados de tensão x tempo, para uma dada temperatura e taxa de deformação. Após o procedimento numérico da Figura 8.9 sobre estes dados σ_{xt} , obtêm-se uma série discreta de valores (ϵ, t) . Uma regressão de segundo grau sobre esta série (ϵ, t) fornece os parâmetros a, d e g de polinômios de regressão. Coeficientes relativos aos níveis de tensão indicados estão mostrados na Tabela 10.7.

Com relação a este equacionamento, pode-se ainda estabelecer uma relação entre os pa-

Tabela 10.6 - Parâmetros a_i , b_i , c_i , d_i , e_i , f_i , g_i , h_i e l_i finais da relaxação, caracterizadores da variação de α_i , δ_i e γ_i com $\dot{\epsilon}$

Material 60/40-C¶				
i	parâmetros			$r^2 \dagger$
	a_i	b_i	c_i	
1	0,77928	744,34	-133611	0,780
2	0,0086665	-31,178	5456,1	0,760
3	-1,0404E-4	0,28857	-52,636	0,761

i	parâmetros			$r^2 \dagger$
	d_i	e_i	f_i	
1	-0,028230	46,641	-6679,9	0,932
2	0,0011058	-2,1498	304,40	0,977
3	-1,3752E-5	0,023615	-3,3321	0,995

i	parâmetros			$r^2 \dagger$
	g_i	h_i	l_i	
1	3,7394E-4	-0,53624	76,113	0,997
2	-1,6420E-5	0,024820	-3,4930	0,996
3	1,9209E-7	-2,7434E-4	0,038576	0,980

¶: uma listagem destes coeficientes e suas equações, retirada da planilha de cálculo, está no Apêndice 2, item A2.4-3. Valores análogos para os materiais 70/30-C e 80/20-C estão nos itens A2.5-3 e A2.6-3, respectivamente. †: coeficiente de correlação linear de $\alpha_i \times \dot{\epsilon}$, $\delta_i \times \dot{\epsilon}$ e $\gamma_i \times \dot{\epsilon}$, indicando respectivamente a representatividade dos parâmetros a_i , b_i e c_i , d_i , e_i , e f_i , g_i , h_i e l_i .

râmetros A_f , D_f , e G_f e diversos valores de tensão σ^* , σ^{**} , etc. conforme estabelecido no final do item 8.3.2-C, eqs. (8.15) a (8.17). Isto não foi efetuado neste trabalho, pois o objetivo do equacionamento aqui desenvolvido é o planejamento de um experimento fotoviscoelástico, onde os parâmetros necessários são K , M , $\dot{\epsilon}$, sendo a fluência posteriormente calculada a partir de um ensaio de encruamento com relaxações múltiplas.

10.4 Descrição do Comportamento Cíclico

Conforme mostram os gráficos de ensaios cíclicos, Figura A1.16, descritos no item 9.5, o

Tabela 10.7 - Exemplo de parâmetros A_f , D_f , e G_f para descrever a fluência sob valores de tensão constante σ^* , caracterizadores da variação da deformação total ε com o tempo t

Material 60/40-C¶						
θ (°C)	$\dot{\varepsilon}$ (s ⁻¹)	σ^* (kN/mm ²)	A_f	D_f	G_f	$r^2 \ddagger$
39	0,0006	0,011	0,046299993	0,42637790	-5,041439E-5	0,999
43	0,0006	0,0085	0,046900020	0,55177824	-4,5252539E-5	0,963
46	0,0006	0,0,0055	0,046905108	0,85233438	0,0067660886	0,912
50	0,0006	0,003	0,046683774	1,5661148	-0,099550947	0,976
55	0,0006	0,0017	0,046400010	2,7588440	-4,0388452E-4	0,885
38	0,0024	0,0131	0,048000007	0,35802400	-1,4427159E-5	0,883
42	0,0024	0,0094	0,046900005	0,49894951	-3,7934466E-5	0,841
46	0,0024	0,006	0,045100043	0,78169511	-2,4114347E-4	0,804
50	0,0024	0,037	0,046383672	1,2695377	-0,049059200	0,966
54	0,0024	0,00175	0,046199982	1,0000127	-1,7994851E-4	0,887
39	0,0042	0,0105	0,048700002	0,44668151	-4,1148218E-5	0,900
43	0,0042	0,0075	0,045272108	13,283678	-501,39357	1
46	0,0042	0,0030	0,045699997	1,5633576	-2,4254639E-4	0,898
50	0,0042	0,0021	0,046000053	2,2333448	-6,3649908E-5	0,987
54	0,0042	0,00138	0,044800034	2,6800083	1,6564985E-4	0,967
39	0,0060	0,0115	0,048399965	0,40789751	-2,0765746E-4	0,603
43	0,0060	0,0075	0,046000009	0,62534963	-7,5964086E-5	0,954
46	0,0060	0,00325	0,048299962	1,4431090	-5,8561977E-4	0,630
50	0,0060	0,00225	0,046361328	6,6395813	-175,87188	1
54	0,0060	0,00125	0,045600003	3,7520209	-6,081728E-4	0,922

¶: uma listagem destes coeficientes e suas equações, retirada da planilha de cálculo, está no Apêndice 2, item A2.7. Valores análogos para os materiais 70/30-C e 80/20-C estão nos itens A2.8 e A2.9, respectivamente. †: coeficiente de correlação linear da interpolação sobre os dados experimentais $1/\dot{\varepsilon}_p \times \varepsilon_p$, passo (3) do roteiro da Figura 8.9, indicando a representatividade experimental dos parâmetros A_f , D_f e G_f nas condições de temperatura θ e taxa de deformação $\dot{\varepsilon}$ mostradas (a representatividade numérica dos parâmetros A_f , D_f e G_f é excelente, pois os coeficientes de correlação linear de $\varepsilon_{vp} \times t$ são quase todos iguais a um).

comportamento cíclico é identificado como isotrópico, não se verificando, assim, fenômenos nem de endurecimento nem de amolecimento cíclico. Dessa forma, é usual na literatura (Lemaitre-Chaboche, 1985) utilizarem-se equações de tipo exponencial para a descrição do endurecimento isotrópico. Admite-se, inicialmente, as seguintes relações para as amplitudes de deformação e tensão:

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_{vp} \approx \Delta\varepsilon_{vp} \quad (10.10)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_M + \sigma_m \quad (10.11)$$

onde $\Delta\epsilon$ é a amplitude de deformação, $\Delta\sigma$ a amplitude de tensão, σ_M a tensão máxima atingida na tração e σ_m a tensão na compressão (Lemaitre-Chaboche, 1985).

A variação da amplitudes, nesta situação, pode ser descrita por:

$$\Delta\sigma = K \Delta\epsilon^{1/M} \quad (10.12)$$

para uma dada taxa de deformação $\dot{\epsilon}$, a uma dada temperatura θ .

Os valores de $\Delta\sigma$ e $\Delta\epsilon$ não foram sistematicamente levantados neste trabalho. Inicialmente, os corpos de prova utilizados nos ensaios de tração monotônica e encruamento-relaxação não se adaptaram a ciclos com grandes variações na amplitude de deformações. Além disso, tal equacionamento não é utilizado no projeto de uma simulação, conforme os objetivos deste trabalho. No entanto, a caracterização da isotropia é necessária para a completa identificação do comportamento do material, principalmente numa reversão de esforços, e para tal é necessário realizarem-se ensaios a várias temperaturas e taxas de deformação, conforme realizado, sobre a região de interesse da Figura 8.7.

10.5 Modelo Final e Coeficientes para Planejamento de Ensaios

10.5.1 Modelo Final e Tabelas de Parâmetros Caracterizadores

Relacionam-se, a seguir, o conjunto de fórmulas que sintetizam o modelo para planejar um ensaio de simulação fotoviscoelástica utilizando-se uma das misturas de resinas. Este modelo vai indicar a temperatura do ensaio, eq. (10.13), e o comportamento característico à relaxação, eq. (10.14). Para isto, devem-se obter, inicialmente, através de relações de similitude entre modelo e protótipo (v. a seguir), os valores de K , M e $\dot{\epsilon}$ (do modelo) para o ensaio específico que se deseja realizar. Este ensaio se refere, por exemplo, a uma determinado protótipo com geometria definida, a ser solicitado numa taxa $\dot{\epsilon}$, com suas propriedades dadas por K e M numa dada temperatura. Em seguida, utilizam-se os valores de K , M e $\dot{\epsilon}$ (do modelo) nas for-

mulações interdependentes (10.13) para determinar-se a temperatura de ensaio θ em que o modelo fotoviscoplastico vai apresentar comportamento à tração similar ao do protótipo. Finalmente, com a temperatura θ nas formulações (10.14) determina-se o comportamento à relaxação para um valor arbitrário de tensão $\sigma_{m\acute{a}x}$ onde se faz iniciar a relaxação.

A) Modelo de comportamento à tração : Dados os valores de K , M e $\dot{\epsilon}$ (em $10^2 [s^{-1}]$) de um protótipo, num experimento fotoviscoplastico, a temperatura θ em $[^{\circ}C]$ de ensaio que simulará o comportamento do modelo à tração é dada por:

$$\theta = \mathcal{X} + \mathcal{M} K + \mathcal{N} M \quad (10.13)$$

onde:

- $\mathcal{X} = k_1 + k_2 \dot{\epsilon} + k_3 \dot{\epsilon}^2$,
- $\mathcal{M} = m_1 + m_2 \dot{\epsilon} + m_3 \dot{\epsilon}^2$,
- $\mathcal{N} = n_1 + n_2 \dot{\epsilon} + n_3 \dot{\epsilon}^2$,
- k_i , m_i e n_i são dados na Tabela 10.8.

B) Modelo de comportamento à relaxação : Para a temperatura θ em $[^{\circ}C]$ encontrada em (A) acima, a relaxação da tensão em $[kN/mm^2]$ após uma tração realizada até o valor de tensão $\sigma_{m\acute{a}x}$ em $[kN/mm^2]$ a uma taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ em $10^2 [s^{-1}]$ é dada por:

$$(\sigma/\sigma_{m\acute{a}x}) = A + D t + G t^2 \quad (10.14)$$

onde:

- $\sigma_{m\acute{a}x}$ é a tensão no início da relaxação em $[kN/mm^2]$ (valor arbitrado),
- t é o tempo em $[s]$ (zero no início da relaxação; valor arbitrado),
- $A = \alpha_1 + \alpha_2 \theta + \alpha_3 \theta^2$,
- $D = \delta_1 + \delta_2 \theta + \delta_3 \theta^2$,
- $G = \gamma_1 + \gamma_2 \theta + \gamma_3 \theta^2$.

Os coeficientes α_1 , α_2 , α_3 , δ_1 , δ_2 , δ_3 , γ_1 , γ_2 , γ_3 são dados por:

- $\alpha_i = a_i + b_i \dot{\epsilon} + c_i \dot{\epsilon}^2$,
- $\delta_i = d_i + e_i \dot{\epsilon} + f_i \dot{\epsilon}^2$,
- $\gamma_i = g_i + h_i \dot{\epsilon} + l_i \dot{\epsilon}^2$,

e

- a_i , b_i , c_i , d_i , e_i , f_i , g_i , h_i , l_i são dados na Tabela 10.9.

Tabela 10.8 - Parâmetros caracterizadores do comportamento à tração, eq. (10.5)

Material	i	Parâmetros (para valores de $\dot{\epsilon} \times 10^2$)		
		k_i	m_i	n_i
60/40	1	50,87	-136,84	14,698
70/30	1	53,069	-28,112	-6,6934
80/20	1	39,466	-102,12	50,219
60/40	2	0,4108	5,7297	-1,4575
70/30	2	2,0951	3,9047	-4,3795
80/20	2	1,9032	4,4097	-4,5318
60/40	3	-0,00545	-0,07479	0,01916
70/30	3	-0,03509	-0,04121	0,07816
80/20	3	-0,01991	-0,04408	0,04679

Tabela 10.9 - Parâmetros caracterizadores do comportamento à relaxação, eq. (10.8)

Material	i	Parâmetros (para valores de $\dot{\epsilon} \times 10^2$)								
		a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	g_i	h_i	l_i
60/40	1	0,77928	744,34	-133611	-0,02823	46,641	-6679,9	3,7394	-0,53624	76,113
70/30	1	0,46255	1880,9	-1147406	0,02197	-58,783	19980,4	-5,901E-4	1,7099	-826,26
80/20	1	-0,51713	1909,8	307102	0,01408	-251,83	382958	-8,5701	4,7493	-5220,7
60/40	2	0,00867	-31,178	5456,1	0,00111	-2,149	304,40	-1,642	0,02482	-3,4930
70/30	2	0,01571	-66,146	41252	-9,942E-4	2,411	-896,60	2,368E-5	-0,06901	34,12
80/20	2	0,06456	-113,75	38091	-3,6532	8,0923	-12728	3,0309	-0,16641	182,24
60/40	3	-1,0404	0,28857	52,636	-1,3752	0,02361	-3,3321	1,9209	-2,7434	0,03858
70/30	3	-9,979E-5	0,50156	-347,12	8,708E-6	-0,02657	10,589	-2,218E-7	6,997E-4	-0,35088
80/20	3	-6,1891	1,0703	-376,54	8,3210	-0,06753	106,98	-2,6449	0,00148	-1,6041

Observação: Nas Tabelas 10.8 e 10.9, os parâmetros característicos para os materiais 60/40, 70/30 e 80/20 foram dispostos seqüencialmente por comodidade de apresentação, e não para uma comparação direta entre os coeficientes, o que de fato não é possível de ser feito em formulações numéricas. Cada parâmetro numérico só faz sentido dentro de sua própria equação, não sendo possível uma comparação direta entre parâmetros análogos pertencentes a equações diferentes.

Tabela 10.10 - Limites da formulação, material 60/40-C

θ [°C]	$\dot{\epsilon}$ [% s ⁻¹]			
	0,060	0,240	0,420	0,600
35				
36				
37				
38				
39				
40				
...				
50				
...				
54				
55				
56				
57				
58				
59				
60				

Tabela 10.11 - Limites da formulação, material 70/30-C

θ [°C]	$\dot{\epsilon}$ [% s ⁻¹]			
	0,048	0,078	0,108	0,138
35				
36				
37				
38				
39				
40				
41				
42				
...				
50				
...				
51				
52				
53				
54				
55				
56				
57				
58				
59				
60				

Tabela 10.12 - Limites da formulação, material 80/20-C

θ [°C]	$\dot{\epsilon}$ [% s ⁻¹]			
	0,024	0,042	0,060	0,078
45				
46				
47				
48				
49				
50				
51				
52				
53				
54				
55				
56				
...				
59				
60				
61				
62				
63				
64				
65				
66				
67				
68				
69				
70				
71				

C) Indicações para o estabelecimento de um modelo de comportamento à fluência : Inicialmente, para um valor de tensão arbitrário σ^* em $[\text{kN}/\text{mm}^2]$, que é o valor de tensão constante para o qual vai-se estabelecer uma curva de fluência, deve-se necessariamente seguir os procedimentos de cálculo do item 8.3.2 C, eqs. (8.10), (8.12), (8.13) e Figura 8.10, utilizando-se das curvas de relaxação (σ, t) da base de dados, de acordo com o material escolhido. Este procedimento leva à obtenção dos parâmetros A_f , D_f e G_f da eq. (8.14) para $\sigma = \sigma^*$. A seguir, calculam-se parâmetros A_f , D_f , G_f , para outros valores σ^{**} , σ^{***} , etc. numa dada temperatura θ e taxa de deformação $\dot{\epsilon}$. Procedimento análogo permite obter, para cada temperatura e taxa de deformação, uma relação entre os parâmetros da relaxação e os valores de σ^* , σ^{**} , etc., como esquematizado na eq. (8.15). Relações devem ser obtidas entre os novos parâmetros e a temperatura, para um valor de taxa de deformação constante, e, posteriormente entre outros parâmetros recém obtidos e a taxa de deformação, conforme esquematizado pelas eqs. (8.16) e (8.17). O procedimento numérico de modelagem da fluência, eqs. (8.14) a (8.17), não foi efetivado por estar fora dos objetivos estritos do trabalho. Observe que problemas numéricos com ajustes de equações podem aparecer, já que se deve equacionar um nível a mais de relações do que na relaxação.

D) Limites dos experimentos e da formulação : Toda a modelagem foi realizada dentro de certos limites de temperatura e taxa temporal de deformação, conforme estabelecido no item 8.3.1 e esquematizado na Figura 8.7, com valores especificados nas Tabelas 9.1, 9.2 e 9.3. Estes limites estão sintetizados na Tabelas 10.10, 10.11, 10.12.

10.5.2 Significância dos Parâmetros Caracterizadores

Os coeficientes de correlação linear estão nos arquivos kmnres60.xls, kmnres70.xls e kmnres80.xls (Excel) ou kmnres.wb1 (Quattro-Pro) para tração, adgres60.xls, adgres70.xls e adgres80.xls (Excel) ou adgresum.wb1 (Quattro-Pro), para relaxação, adgrfs60.xls,

adgfrs70.xls e adgfrs80.xls (Excel) ou adgfres.wb1 (Quattro-Pro), para fluência, todos em disquete anexo. Uma impressão do conteúdo destes arquivos está no Anexo 2, itens A2.1, A2.2 e A2.3 para tração, itens A2.4, A2.5 e A2.6 para relaxação, e itens A2.7, A2.8 e A2.9 para fluência, com algumas restrições na visualização.

Os coeficientes de correlação linear das relações iniciais para tração e relaxação, respectivamente eqs. (10.2), (10.3) e eqs. (10.5), (10.6), apresentaram um bom ajuste entre os dados e as equações de regressão escolhidas. As regressões exponenciais sobre os diagramas tensão×deformação, que fornecem os parâmetros K e M da tração, apresentam também um ajuste muito bom com os resultados experimentais, conforme indicam os valores mínimos mostrados no Apêndice 2, itens A2.1-1 (material 60/40-C), A2.2-1 (material 70/30-C) e A2.3-1 (material 80/20-C). Os coeficientes de correlação linear mínimos para cada material são 0,97 para o 60/40-C, 0,97 para o material 70/30-C e 0,99 para o 80/20-C, conforme mostrado na Tabela 10.1 para o material 60/40-C e nos itens A2.2-1 e A2.3-1 do Apêndice 2 para os materiais 70/30-C e 80/20-C. As relações entre K , M e θ , resultando os coeficientes \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} , também apresentam um bom ajuste, como mostra a Tabela 10.2 para o material 60/40-C e os itens A2.2-2 e A2.3-2 para o 70/30-C e o 80/20-C, com coeficientes de correlação maiores que 0,90 para o material 60/40 (um coeficiente igual a 0,80), 0,96 para 70/30, 0,95 para 80/20. Observe que encontrou-se um coeficiente de correlação de 0,80 para uma das relações do material 60/40. Na relaxação, as regressões exponenciais tensão×tempo que fornecem os parâmetros A , D e G também têm ótimo ajuste, conforme mostra a Tabela 10.4 para o material 60/40-C e os itens A2.5-1 e A2.6-1 do Apêndice 2 para os materiais 70/30-C e 80/20-C, apresentando coeficientes maiores que 0,91 para a maioria das relações do material 60/40 (alguns com coeficiente menores que 0,90), maior que 0,95 para o material 70/30, e maior que 0,91 para o 80/20. Observe que também aqui se encontram alguns coeficientes de correlação de 0,86 a 0,89, para o material 60/40. Já na segunda série de relações interdependentes para a

relaxação, que fornecem os parâmetros α_i , γ_i e δ_i , podem-se encontrar algumas relações com coeficientes de correlação baixos, para os materiais 60/40 e 70/30, conforme mostra a Tabela 10.5 para o material 60/40-C e os itens A2.5-2 e A2.6-2 para 70/30-C e 80/20-C, geralmente maiores que 0,80, mas com dois valores iguais a 0,62 e 0,71 para o material 70/30. Por outro lado, o material 80/20 apresenta todas suas relações ainda com ótimos coeficientes de correlação, maiores que 0,91. Confira os coeficientes dos materiais 70/30-C e 80/20-C no Apêndice 2, itens A2.2 e A2.3 para tração e A2.5 e A2.6 para relaxação.

As relações que contêm os parâmetros finais, justamente por se tratarem de um terceiro nível de regressões, perdem muito precisão conforme mostram seus coeficientes de correlação, Tabelas 10.3 e 10.6 para o material 60/40-C e os itens A2.2-3 e A2.3-3, A2.5-3 e A2.6-3 para o 70/30-C e 80/20-C. Estas relações deverão ser necessariamente objeto de estudos mais detalhados em futuros aperfeiçoamentos do modelo. No entanto, para efeitos do estudo atual, graficamente elas fornecem uma indicação da variação do comportamento, conforme indicam os gráficos, arquivos `alfbg**.wmf` e `kmn*.wmf`, no disquete anexo. Com relação aos coeficientes de correlação finais, eqs. (10.5) e (10.8), as relações com os parâmetros finais da tração, k_i , m_i , n_i , apresentam, em geral, ótimos coeficientes de correlação: 0,94 e 0,98 para 60/40, 0,99 para 70/30-C, maiores que 0,99 para 80/20-C, conforme mostra a Tabela 10.3 para o material 60/40-C e itens A2.2-3 e A2.3-3 para os materiais 70/30-C e 80/20-C. No entanto, algumas relações não se ajustaram bem, uma do material 60/40, para m_i , com coeficiente de correlação 0,71, e duas do material 70/30-C, para k_i e n_i , coeficientes de correlação iguais a 0,51. Estas relações do material 70/30-C apresentam coeficientes de correlação de fato não utilizáveis. Ainda assim, optou-se por manter estas formulações e os seus coeficientes, pois são indicativas da tendência geral de comportamento, de acordo com os gráficos (v. arquivos gráficos anexos, em disquete). Na relaxação, as relações com os parâmetros finais a_i , b_i , c_i , d_i , e_i , f_i , g_i , h_i e l_i apresentam em geral um ótimo ajuste, conforme mostra a Tabela 10.6 para o material 60/40-C e os itens A2.5-3 e A2.6-3 para 70/30-C e 80/20-C, no entanto com algumas

exceções. Todas as relações do material 80/20-C apresentam coeficientes de correlação muito bons, maiores que 0,97, assim como a maioria das relações do material 60/40, com coeficientes de correlação maiores que 0,93. O material 60/40-C, no entanto, apresenta 3 coeficientes baixos, de 0,76 a 0,78, e o material 70/30-C não apresenta nenhum coeficiente de correlação de fato considerável. Deste modo, os coeficientes finais de relaxação do material 70/30-C não tem significância considerável.

10.6 Visualização Gráfica das Formulações

No Apêndice 1 encontram-se todos os gráficos interpolados para sucessivamente se obterem os parâmetros das eqs. (10.3) a (10.8). Para estas equações, utilizadas sucessivamente para se chegar às relações finais, é de interesse uma visualização gráfica. Esta visualização, praticada quando da obtenção dos polinômios de regressão, é uma forma de controle imediato visual da boa ou má descrição destas curvas numéricas aos dados experimentais (paralelamente aos coeficientes de regressão). Através destas visualizações foi que se escolheram polinômios do segundo grau, que descrevem a maioria das curvas tão bem quanto polinômios de grau mais elevado. Os polinômios de grau mais elevado, ao final, iriam requerer um número maior de relações, já que se tem um número maior de coeficientes a serem futuramente equacionados. Neste caso, um aparente ganho de precisão, na descrição de uma curva isolada, leva a problemas com relação ao equacionamento de um número maior de coeficientes.

Como amostra da relação experimento x regressão numérica, para as relações iniciais, mostram-se as formulações numéricas desenvolvidas para a caracterização do comportamento à relaxação nas Figuras 10.1 e 10.2, na forma de uma comparação visual entre os dados experimentais obtidos e o equacionamento numérico empregado. Foram utilizados polinômios de segundo grau para descrever as relações de relaxação $\sigma_i = \sigma_i(t)$ (para descrever a tração foi

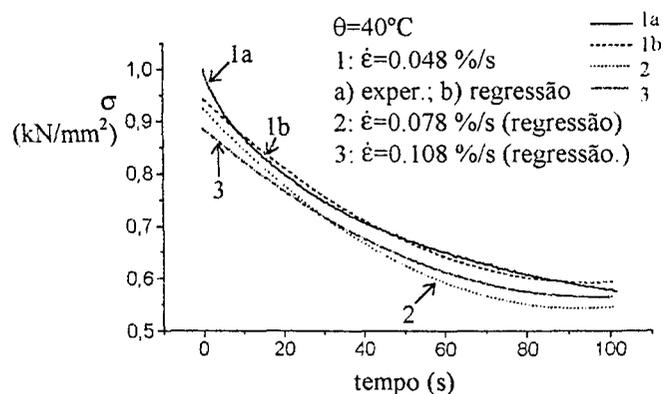


Fig. 10.1 - Curvas de regressão e uma experimental, para a mudança na curva σ_{xt} com a taxa de deformação

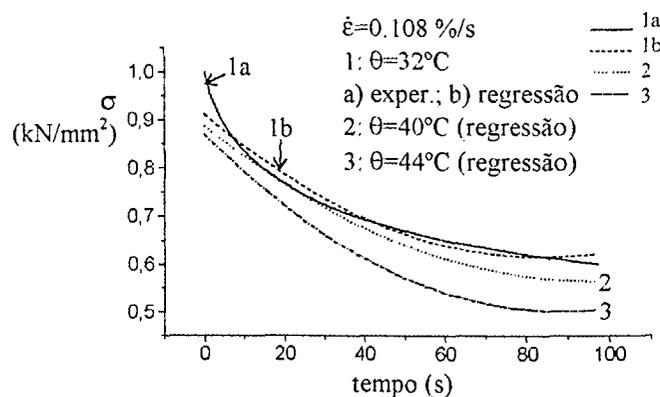


Fig. 10.2 - Curvas de regressão e uma experimental, para a mudança na curva σ_{xt} com a temperatura

possível utilizarem-se expressões exponenciais). A Figura 10.1 mostra curvas de regressão da relaxação ao se variar a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$. Nesta figura, mostram-se a curva experimental, 1a, e sua regressão numérica, 1b. Visualmente pode-se perceber que o equacionamento numérico fornece uma boa aproximação do comportamento real.

As expressões numéricas empregadas têm a forma seja de equações exponenciais, seja de polinômios, pois estas são as formas mais simples possíveis para se formular numérica-

mente uma dada curva monotônica como as obtidas. Estas formulações se justificam quando se observam os gráficos experimentais, onde todas as curvas levantadas são de tipo bem comportado, com crescimento ou decrescimento tipo parabólico, sem descontinuidades ou grandes ondulações.

10.7 Procedimentos para Simulação

Nos estudos para simulação, tem-se uma peça de um material qualquer, submetida a determinadas ações, e deseja-se estudar o estado de tensões/deformações interno desta peça, seja para otimizar o desenho de projeto, seja para identificar pontos fracos e falhas. Como exemplo, temos uma viga bi-apoiada submetida a uma carga puntual centrada, feita de um material qualquer. O estado interno de tensões/deformações desta viga pode ser estudado utilizando-se um modelo da viga, feito de material fotomecânico, que permite visualizar este estado interno através das franjas isoclínicas e isocromáticas, resultado das propriedades ótico-mecânicas do material de modelagem. Assim, ao se estabelecerem as relações modelo-protótipo, que vão transformar as relações tensão×deformação experimentais existentes no modelo para o protótipo, está-se transformando os resultados do modelo para uma situação real.

Nas formulações a seguir, são mostrados os passos básicos que deverão ser executados para se aplicar a formulação desenvolvida num estudo Fotoviscoelástico experimental. Inicialmente, devem ser determinados os valores de simulação da taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ e dos coeficientes K e M , ou seja, $\dot{\epsilon}_{sim}$, K_{sim} e M_{sim} , através de um estudo das condições de similaridade modelo-protótipo. $\dot{\epsilon}_{sim}$ é a solicitação aplicada à peça em estudo, uma quantidade a ser especificada juntamente com os parâmetros K_{sim} e M_{sim} , intrinsecamente ligados a $\dot{\epsilon}_{sim}$. Conforme estabelecido anteriormente (item 10.1), ao invés de se especificar o coeficiente N , especifica-se a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$, pois as equações experimentais foram desenvolvidas de forma a se tra-

balhar com $\dot{\epsilon}$ e não com N . Estes valores $\dot{\epsilon}_{sim}$, K_{sim} e M_{sim} , para efeito do presente trabalho, são dados provenientes de um estudo de similitude e modelagem sobre o caso específico (material e geometria) a ser simulado.

Neste contexto, é dado um protótipo (índice “ $_{PT}$ ”), caracterizado pela equação:

$$\sigma = K_{PT} \epsilon_{ep}^{1/M_{PT}} \dot{\epsilon}^{1/N_{PT}} \quad (10.15)$$

onde:

- K_{PT} , M_{PT} e N_{PT} são parâmetros de uma regressão linear no espaço $(\sigma, \epsilon, \dot{\epsilon})$, que descrevem a superfície $\sigma \times \epsilon \times \dot{\epsilon}$ característica do comportamento deste material a uma dada temperatura;
- σ é a tensão total;
- $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação;

A seguinte relação se aplica para ϵ_{ep} :

$$\epsilon_{ep} = \epsilon - \epsilon_Y \quad (10.16)$$

onde:

- $\epsilon_Y = \sigma_Y / E$;
- σ_Y é o limite de escoamento.

Esta formulação é análoga àquela desenvolvida no Capítulo 3 para o diagrama tensão-deformação, adaptada ou expandida para um diagrama $\sigma \times \epsilon \times \dot{\epsilon}$. Em termos práticos, como não se utiliza o coeficiente N_{PT} , por utilizar-se ao invés deste o valor da taxa de deformação $\dot{\epsilon}$, basta conhecerem-se o valor de K_{PT} e M_{PT} para a taxa $\dot{\epsilon}$ a ser aplicada no ensaio. Estes valores caracterizam o comportamento do protótipo, e são o mínimo indispensável a se conhecer sobre as propriedades básicas do protótipo.

Pretende-se, agora, simular o ensaio deste protótipo, utilizando um modelo fotoviscoelástico. Para isto, parte-se de uma mistura mais rígida, ou de uma mais flexível, por analogia com o material do protótipo, e encontram-se K , M e N para a taxa $\dot{\epsilon}_{PT}$, usando as equações 10.1 a 10.3. Com estes valores determina-se a temperatura θ de ensaio, devendo ter-se $\theta_{min} \leq \theta \leq \theta_{máx}$, de acordo com os limites de leitura aproximadamente zero ou de quebra do material estabele-

cidos no Capítulo 7. Caso a temperatura não se encontre nesta faixa, repete-se o procedimento para uma mistura menos rígida (ou para uma menos flexível).

CAPÍTULO 11

DISCUSSÃO

11.1 Generalidades sobre a Viscoplasticidade e o Diagrama Tensão×Deformação

Distingue-se a Viscoplasticidade ao se constatar a seguinte característica marcante do comportamento: sua dependência fundamental com relação à temperatura e ao tempo. Neste caso, ao se realizar um ensaio, observam-se variações no diagrama tensão×deformação com a variação da temperatura, como nas Figuras 9.4a e 9.4b, 9.5a e 9.5b, 9.6a e b, e também com a variação da taxa temporal de deformação, como nas Figuras 9.4a e c, 9.5a e 9.5c. Estas variações ocorrem seja nos valores de tensão para uma mesma deformação, seja no formato do diagrama, como mostra a série de diagramas de tração até ruptura das Figuras 9.4, 9.5, 9.6. Além disso, não só durante a variação da solicitação, mas também sob um valor constante da mesma observa-se o desenvolvimento interno contínuo de tensões e deformações, como mostram as relaxações na Figura 9.2a e b. Na Viscoplasticidade, quando se aplica uma solicitação, inicia-se um determinado processo interno de desenvolvimento de tensões e deformações, quantitativamente diverso para cada temperatura e para cada taxa temporal de solicitação, conforme esquematizado na Figura 8.8, processo este que varia continuamente durante o tempo de variação da solicitação ou de manutenção da mesma num valor constante, conforme mostram na Figura 7.3 os diagramas esquemáticos tensão×deformação e tensão×tempo, resultantes da solicitação tensão×tempo indicada.

De forma diversa, identificam-se a Elasticidade e Plasticidade quando se observam situações instantaneamente definidas, sem modificações fundamentais no comportamento com o tempo ou com o nível de temperatura existente (obviamente dentro de certos níveis ou limites,

além dos quais começam a se mostrar características viscosas). Como exemplo, ao se aplicar, num caso de comportamento elastoplástico, uma certa sollicitação em deslocamento, sob qualquer taxa temporal, o resultado é imediato: obtém-se um determinado nível de força/tensão, como mostra a Figuras 7.2a. E quando se mantém o deslocamento num nível constante, o respectivo valor da força/tensão se manterá inalterado, cf. na mesma figura. Esta situação de definição imediata é, de fato, uma característica distintiva, que não se verifica num comportamento viscoelastoplástico. Como um exemplo, agora em Viscoplasticidade, quando se aplica uma sollicitação em força, como na Figura 7.1, ao se manter a sollicitação constante o processo de deformação não pára, ele continua a se desenvolver, ao que se chama fluência, como mostra a Figura 7.1b. E mesmo ao se retirar tal força, o processo de deformação não chega imediatamente a seu estado final definitivo, cf. nesta mesma figura. Quando a sollicitação aplicada for um deslocamento, como na Figura 7.2, induz-se um estado de tensão que cresce com a sollicitação, mas, ao se manter este deslocamento constante, o nível de tensão não se mantém constante, ele começa imediatamente a diminuir, ao que se denomina relaxação, como na Figura 7.2b. Considere-se, ainda, que a resultante desta determinada sollicitação, em tensão ou deformação, não é sempre a mesma, vai depender da velocidade com que esta sollicitação foi aplicada, por exemplo, um mesmo nível final de deformação, aplicada de zero até seu valor total num tempo mais ou menos curto, vai produzir uma tensão maior ou menor, de acordo com o tempo levado para tal aplicação, como nas diversas curvas da Figura 7.2b para cada valor de $\dot{\epsilon}_1$. Por último, também a temperatura em que se realiza a sollicitação vai definir um diagrama quantitativamente diferente, como esquematizam as Figuras 3.1c e 8.8.

Em suma, quando se trabalha com a componente viscosa, as referências de comportamento imediato, comuns na elastoplasticidade, se perdem. Ao se aplicar uma sollicitação, a resposta vai variar, dependendo da taxa temporal da sollicitação, e ao se manter a sollicitação constante, a resposta continua ainda a se modificar, aparentemente de uma forma não facilmente visualizável. No entanto, após certa familiaridade com experimentos em materiais visco-

so, novas referências se apresentam, como por exemplo:

- para uma dada solicitação em deformação, quanto maior a taxa temporal de deformação aplicada, $\dot{\epsilon} = \Delta\epsilon/\Delta t$, maior será o nível da tensão resultante, como mostra a seqüência de diagramas $F \times \epsilon$ das Figuras A1.6, A1.8 e A1.10;
- para uma dada taxa de deformação, quanto maior a temperatura menor será o nível da tensão resultante, como mostra a seqüência de diagramas $F \times \epsilon$ das Figuras A1.5, A1.7 e A1.9;
- ao se manter a deformação num determinado nível constante, imediatamente se inicia um processo de diminuição da tensão, i.e. relaxação, como nos diagramas $F \times t$ das Figuras A1.5 a A1.10;
- por outro lado, se for a tensão a ser mantida constante, o processo de deformação vai continuar indefinidamente, eventualmente até a ruptura.

Além disso, da mesma forma como se estabelecem novas referências para o comportamento geral, também novas maneiras devem ser procuradas para se examinar e quantificar os diagramas tensão×deformação deste comportamento. Assim, observam-se vários diagramas tensão×deformação na Viscoplasticidade, no entanto cada um deles é análogo ao diagrama único da elastoplasticidade, com as seguintes particularidades:

- o regime elástico inicial geralmente é desprezível, iniciando-se quase que imediatamente o regime viscoplástico;
- o comportamento é definido por uma "família" de diagramas, com um diagrama diverso para cada temperatura de ensaio e, numa dada temperatura, um diagrama diverso para cada taxa temporal da solicitação aplicada, analogamente ao esquema da Figura 3.1c.

Com relação a esses novos diagramas, deve-se ter em mente que continua-se a obter, após um ensaio, um diagrama tensão×deformação, como exemplificado por cada um dos diagramas das Figuras A1.1 a A1.4, mas este diagrama depende da temperatura em que se está

trabalhando, e também da taxa da solitação aplicada, confira os formatos dos diagramas, os valores de σ e ε , e as condições de temperatura θ e taxa de deformação $\dot{\varepsilon}$ nas Figuras A1.1 a A1.4. Como uma forma de se trabalhar com esta multiplicidade de diagramas pode-se, por exemplo, fixar uma determinada temperatura, e considerar que o formato do diagrama vai mudar conforme a taxa temporal de deformação aplicada: quanto maior esta taxa, maiores os níveis da resposta, ou seja, os diagramas vão descrever curvas em níveis crescentes (aumento da resistência) para taxas também crescentes, como na seqüência (a), (b), (c), (d) dos diagramas $F \times \varepsilon$ das Figuras A1.6, A1.8 e A1.10. Se, ao contrário, a taxa temporal de deformação for constante, e a temperatura variar, então vão-se obter diagramas crescentes (aumento da resistência) para valores *decrecentes* de temperatura, já que a diminuição da temperatura reduz a viscosidade, como na seqüência (d), (c), (b), (a) dos diagramas $F \times \varepsilon$ das Figuras A.5, A.7 e A.9. Todas estas novas referências, sobre o comportamento do material em geral e sobre os diagramas tensão \times deformação, são importantes para se poder incluir estes tipo de comportamento na rotina de trabalho, para que se possa ter um "sentimento" do comportamento do material quando se está analisando um projeto em comportamento viscoelastoplástico. Este "sentimento" será o passo inicial para a análise de problemas viscoplásticos, analogamente ao "sentimento" que se tem ao se contrastarem os vários diagramas tensão \times deformação de diversos materiais usuais na elastoplasticidade, quando de um projeto. Por outro lado, os problemas específicos de Viscoplasticidade serão quantitativamente definidos recorrendo-se a equações caracterizadores do comportamento, pertencentes a modelos matemáticos usados para descrição desta multiplicidade de diagramas. Um tipo de modelo caracterizador, para comportamento básico e utilizando expressões exponenciais e polinomiais, foi estabelecido neste trabalho de tese, através das equações interligadas para o comportamento, como as eqs. (10.3) a (10.5) para a tração e as eqs. (10.6) a (10.8) para a relaxação.

11.2 Metodologia de Ensaios e Equipamentos

No campo experimental, as técnicas próprias da Análise de Tensões e Deformações estão atualmente defasadas, se comparadas tanto com o avanço das técnicas de identificação do comportamento mecânico de materiais quanto com o avanço das técnicas de simulação computacional (i.e., projeto e cálculo por computador). Esta defasagem diz respeito à integração das variáveis fisicamente mensuráveis, quais sejam tensão, deformação, taxa temporal de deformação (ou taxa temporal de tensão), tempo e temperatura, em modelos de comportamento que descrevam a resposta de um material às solicitações de maneira ampla, variando-se por exemplo a temperatura e a taxa de deformação *simultaneamente*, e ainda o material, como faz o modelo aqui desenvolvido sintetizado pelas eqs. (10.13) e (10.14) e pelos coeficientes das Tabelas 10.8 e 10.9, que descrevem o comportamento à tração e à relaxação, modelo este complementado pela eq. (10.9) e item 10.5.1-C para estudo da fluência. Estudam-se, assim, na Análise Experimental, seja utilizando-se a Fotomecânica, Extensometria, Camada Frágil, ou outras técnicas, aspectos isolados de cada material, como influência da taxa temporal de deformação, ou então influência da temperatura. Isto se deve ao fato de que, para a variação simultânea de várias quantidades físicas necessita-se, além da aplicação pura e simples de uma técnica, de um planejamento não só de ensaios e equipamentos, como tratado no Capítulo 7 e 8, mas ainda de uma metodologia de ensaios e da forma de equacionamento, como visto nos Capítulos 8, 9 e 10. Note bem que a metodologia de ensaios e o equacionamento estão intimamente ligados, onde necessitam-se de ensaios a várias temperaturas e taxas de deformação para o estudo de sua variação simultânea, no entanto num esquema de variação segundo um certo número de taxas de deformação pré-determinadas e várias temperaturas em cada taxa, de acordo com as necessidades da formulação. Além disso, surgem várias dificuldades de ordem prática na execução desta metodologia, por exemplo limitações do equipamento com relação às taxas de deformação e temperaturas possíveis de serem execu-

tadas/obtidas, ou ainda limitações na adaptação dos dados, de forma ampla, a um equacionamento unificado (necessário à formulação imbricada), indicado por baixos coeficientes de correlação em muitos casos.

Na caracterização de misturas de resinas fotomecânicas para simulação devem-se considerar dois grupos de quantidades ou propriedades inerentes às mesmas:

- as combinações de resinas, em proporções, que darão ao material características mecânicas definidas, quantidades estas aqui fixadas em três tipos, 60/40, 70/30 e 80/20, porcentagem em peso de resina rígida/porcentagem em peso de resina flexível;
- o nível das propriedades óticas resultantes destas combinações, que vão justamente descrever o estado de tensões/deformações internas do material, que em última instância é o que se deseja de um material de modelagem, sendo este nível aqui verificado através das filmagens realizadas, Apêndice 3, descritas no item 9.6.1.

Todos ensaios realizados, de encruamento com relaxações múltiplas, cíclicos, com punção-relaxação (óticos), são de tipo padrão para uma máquina universal de ensaios. A série idealizada cobre os aspectos principais do comportamento viscoso: tração (punção para propriedades óticas), relaxação, ciclagem, fluência, a várias taxas de deformação e temperaturas. O ensaio de encruamento com relaxações múltiplas não é a solução ideal para a fluência, já que os tempos obtidos são extremamente curtos. No entanto, é uma maneira de se aproveitar uma ensaio de tração e seu corpo de prova para estudar não só a relaxação como ainda a fluência. A fluência fica restrita a seu comportamento inicial, no entanto isto acontece também na relaxação. Isto em si não é uma restrição, já que os processos mecânicos de deformação a serem estudados em geral não levam mais do que segundos. O conjunto de equações esquematizado para a fluência, seguindo uma metodologia análoga à da tração e relaxação, fornece subsídios para um futuro estudo sistemático, utilizando a rica base de dados levantada. Após a

realização dos ensaios verificou-se que o cálculo de parâmetros de fluência adicionais é de fato redundante para a caracterização conforme realizada, bem definida pela tração e relaxação, sendo os parâmetros de fluência desnecessários para projetos de futuras simulações.

Dificuldades experimentais maiores ou menores foram encontradas nos diversos estágios do trabalho. Na fundição dos materiais, encontram-se problemas com o enrijecimento excessivo de resinas originalmente bastante viscosas, quando de períodos longos entre fundições, ou problemas com a mudança no grau de copolimerização das resinas pelos fabricantes, que as têm tornado mais fluidas. Na usinagem, os corpos de prova tipo C, sensivelmente mais ressecados já por inspeção visual, mostraram-se mais difíceis para usinar, com a formação ostensiva de fios e poeira. Foi ainda necessário contrariar-se a prática usual de projeto e fazer-se um raio de concordância extremamente pequeno entre a cabeça e o fuste do corpo de prova, para induzir à quebra do mesmo externamente à região de apoio do extensômetro, possibilitando assim o registro da retração da deformação após ruptura. A realização dos ensaios em si é bastante trabalhosa, requerendo diversos procedimentos para que se aqueça eficientemente e homoganeamente o equipamento e corpos de prova. São necessários períodos e procedimentos de pré-aquecimento com todo o material desmontado, para um aquecimento uniforme do interior das cunhas e garras, e reaquecimentos após a montagem e fixação, pois a montagem é feita com o forno aberto. O processo de fixação final do corpo de prova, fechando-se e rosqueando-se as tampas das garras, requer o desenvolvimento de experiência prática e cuidados especiais, para não ocorrerem torções, introdução de pré-esforços, ou quebra do corpo de prova. O sistema de exaustão (ventilador) requer manutenção periódica, devido a desgastes nos rolamentos e na haste de suporte do eixo entre o motor e a hélice, sendo ainda necessários ajustes freqüentes, pois o forno de madeira tem certa flexibilidade e as constantes montagens-desmontagens (para outros ensaios) desalinham o sistema da hélice. O tempo de cada ensaio é bastante longo, e problemas com quedas momentâneas de energia, assim

como falhas no sistema de comunicação entre a placa de aquisição de dados e o computador, podem parar o ensaio ou tirar o sistema de controle do ar, perdendo-se o ensaio e o corpo de prova. O sistema de fixação dos extensômetros, por pressão, por um lado ajudou nos ensaios à tração-relaxação, pois a pressão faz um pequeno vinco que impede o escorregamento do extensômetro longitudinal, e por outro lado impossibilitou o estudo da variação do coeficiente de Poisson, pois a própria fixação do extensômetro produz uma redução de área que impossibilita medidas acuradas. A operação do controlador da máquina também foi um problema à parte. Para se realizarem os ensaios da forma pretendida, foi necessário fazer uma operação de parada controlada manualmente, o que limitou as velocidades máximas de ensaio.

A quantificação de propriedades específicas dos materiais, por exemplo a determinação do módulo de elasticidade, ou a determinação da resistência ao escoamento, ou ainda da resistência máxima a algum tipo de esforço, é feita com a utilização de critérios estatísticos, ou seja, é realizado um determinado número de ensaios de um mesmo tipo, sob exatamente as mesmas condições, e, da análise estatística destes resultados, determina-se a média da propriedade desejada. Neste caso, o valor obtido indica precisamente o comportamento do material, de acordo com sua significância estatística, até determinarem-se novos valores com uma precisão ou significância maior. Este procedimento, no entanto, nem sempre é praticável. Na determinação dos parâmetros necessários para caracterizar os materiais da forma ampla, como feita neste trabalho, a realização de um certo número de ensaios para análise estatística geral, por exemplo 5 ou 7 repetições de cada condição de ensaio, torna proibitiva tal tipo de análise. Na realidade, a análise estatística aqui se situa em dois níveis. Um nível se refere a cada equação isoladamente, que apresenta uma significância estatística conforme os coeficientes de correlação linear das Tabelas 10.1 a 10.7 (material 60/40-C). Outro nível de análise estatística se refere a cada ponto ou condição de ensaio, definido por uma temperatura e uma taxa de deformação, como as condições expostas nas Tabelas 9.1 a 9.3. Neste caso, cada

experimento deveria ser executado um certo número de vezes, 5, 6 ou 7, e o conjunto de diagramas obtido deveria ser estudado estatisticamente antes de ser feita a descrição de algum deles por uma equação. Este tipo de análise, no caso da modelagem aqui realizada, não é de fato praticável. Considere o tempo necessário para a fundição de corpos de prova e sua usinagem, para a realização dos ensaios, tanto mecânicos quanto óticos, para cada material, com os tempos necessários para pré-aquecimento, fixação dos corpos de prova, reaquecimento, etc. e ainda o tempo de cada ensaio, onde se obtêm de seis a oito trações-relaxações nos ensaios mecânicos, e três nos óticos, além dos ensaios cíclicos. Todo este procedimento consumiu cerca de quatro meses, onde se efetuaram 141 ensaios (válidos), 58 ensaios de tração-relaxação, 47 óticos e 36 cíclicos. Além disso, considere a manipulação de dados e a análise numérica, que levou cerca de um mês. Ao se multiplicar este tempo total de 5 meses por 5 ou 6, para um estudo estatístico de cada experimento, chega-se a um tempo necessário de 25 a 30 meses de ensaios e análises, o que torna impraticável este tipo de análise estatística. Assim, a precisão estatística mostrada nas tabelas está a nível de cada equação e não a nível de cada ponto. A nível geral, no entanto, é feito um controle sobre o desenvolvimento das quantidades medidas, isto é, sobre o desenvolvimento da tensão e deformação, através do formato dos diagramas e dos valores máximos atingidos. Assim, através do exame dos diagramas da tração inicial nos ensaios de encruamento-relaxações, controla-se se os mesmos apresentam valores monotonicamente crescentes com o aumento da taxa de deformação, ou monotonicamente decrescentes com o aumento da temperatura. Isto foi sistematicamente verificado neste trabalho, refazendo-se um ou outro experimento cujos resultados se diferenciaram em excesso dos demais. Neste caso, uma análise contrastiva entre resultados sucessivos fornece um meio de se controlar erros grosseiros.

Deve-se observar que estudos estatísticos não solucionam certas "anomalias" de comportamento como as registradas. O aparecimento não perfeitamente sistemático de fenômenos análogos a escoamento, como nas Figuras 9.4a, 9.5b, A1.1a, A1.2b, A1.3b, A1.3c, A1.4b,

A1.4c, os diagramas completamente ondulados, Figuras 9.5d e 9.6e, e os diagramas intermediários entre os comuns e os ondulados, como na Figuras 9.5b, são "anomalias" intrínsecas a estas misturas de resinas em comportamento viscoelastoplástico. Neste caso, deve-se estudar a melhor maneira de quantificar estes fenômenos. Neste trabalho, considerou-se que as regressões lineares e polinomiais são uma forma interessante de descrever o comportamento, pois não são sensíveis a pequenos picos ou ondulações localizadas, fornecendo a tendência geral de curvas que, se são bem comportadas em geral, apresentam algumas peculiaridades localizadas. Deve-se ressaltar que o controle de temperatura é bastante preciso, havendo sido objeto de verificação, sendo sempre monitorado nos ensaios por um termômetro colocado no interior do forno, não sendo, assim, fonte de possíveis problemas.

Obviamente várias opções de estudos estatísticos se apresentam, como por exemplo o estudo de determinados tipos de comportamento, só em tração ou só em relaxação, somente um tipo de mistura, etc., como são os diversos estudos na área experimental. No entanto, a proposta deste trabalho foi idealizar-se, projetar-se e executar-se uma série bastante ampla de ensaios, variando-se as quantidades físicas temperatura, taxa de deformação, proporção de resinas, em ensaios de tração-relaxação, cíclicos e punção-relaxação (óticos), para se ter uma visão ampla do comportamento do material. Estes estudo amplo consumiu os cerca de 140 ensaios possíveis de serem realizados, e o tempo disponível, variando-se os ensaios e os materiais para se obter o comportamento mais amplo, ao invés de se deter no exame de um ou dois tipos de ensaio.

Antes da realização de uma série completa de ensaios, da obtenção dos dados, de sua manipulação e análise numérica, não se sabe se o modelo final é exeqüível, sob a forma proposta ou outra. Vários equacionamentos tiveram de ser adaptados. Como um exemplo, na tração foi possível obter-se uma equação inicial relacionando simultaneamente três quantidades, K , M e θ , o que diminuiu consideravelmente o número de equações e coeficientes na seqüên-

cia. Na relaxação, não foi possível realizar-se uma equação única englobando ε , t e θ , e assim a quantidade de coeficientes na relaxação é bem maior que na tração. A fluência, por envolver uma quantidade a mais, a tensão σ^* , deve se mostrar bastante complexa na escolha das equações específicas.

Em todo trabalho eminentemente experimental existe um estágio que corresponde aos estudos iniciais de certo material ou de certo tipo de comportamento, como é o caso deste trabalho. Aqui, não só os coeficientes das formulações obtidas, mas as próprias formulações estão ainda num estágio inicial, não sendo portanto absolutas nem irremovíveis. Sendo assim, os coeficientes aqui relacionados, nas Tabelas 10.8 e 10.9, com suas respectivas equações, formam um modelo inicial, que permite estudar quantitativamente o fenômeno da viscoplasticidade presente nos experimentos, modelo este que poderá ser modificado em futuras reanálises do conjunto. No entanto, o modelo da forma como realizado é ainda importante para mostrar que a caracterização ampla da forma como idealizada é perfeitamente exeqüível, i.e., que os coeficientes obtidos têm uma variação significativa, com valores sensivelmente distintos, e podem ser imediatamente utilizados na modelagem experimental. Os parâmetros numéricos caracterizadores aqui obtidos são indicativos do comportamento básico do material, para os corpos de prova ensaiados, e serão utilizados para planejamento de outros ensaios, em uma peça com geometria e carregamento definidos.

Uma das etapas seguintes deste trabalho de modelagem poderá ser um reajuste do equacionamento, visando-se não mais a realização de experimentos, mas sim outras formas de descrição de partes específicas da base de dados experimentais levantada, por exemplo, descrições mais acuradas das relações tensão×deformação, tensão×tempo, ou deformação×tempo. No entanto, para se proceder a uma descrição mais acurada do comportamento

geral, i.e., melhorar a precisão das últimas equações principalmente, o número de ensaios deverá ser aumentado. Neste trabalho foram idealizados e programados ensaios a quatro diferentes taxas temporais de deformação, e em quatro ou cinco temperaturas em cada taxa. Este foi o número de ensaios julgado mínimo para fornecer uma descrição econômica em tempo e recursos mas eficiente para descrever o comportamento geral. Alguns dos coeficientes de correlação, no entanto, não mostraram um bom ajuste de equações, conforme será comentado a seguir no item 11.5. Estes coeficientes de correlação, principalmente das formulações finais, mostram que será necessário aumentar o número de taxas de deformação, de quatro para cinco ou seis, para aumentar a precisão das equações finais, por exemplo num estudo análogo para outro tipo de mistura de resinas. Obviamente isto acarretará custos adicionais de ensaio e maior tempo de execução. Para cada ponto a mais nas equações finais, i.e., para cada ponto adicional de taxa de deformação, devem-se realizar de quatro a cinco ensaios adicionais, já que este é o número de valores de temperatura a serem variados em cada taxa. Neste caso, como os valores extremos de taxas de deformação utilizados correspondem aos limites operacionais da máquina e do controlador, para se obterem novos experimentos em outras taxas, vai-se ter de redividir o intervalo atual em um número maior de velocidades. Isto de fato não melhora o entendimento do comportamento, somente acrescenta pontos nas últimas equações, que descrevem a relação entre os parâmetros numéricos e a taxa de deformação, o que poderá melhorar os coeficientes de correlação linear destas equações.

A constatação da influência marcante do grau de copolimerização das resinas originais nas propriedades viscosas finais das misturas incluiu uma nova variável nos estudos fotoviscoplasticos. Quando as resinas apresentam graus de viscosidade sensivelmente diversos entre si, seja por tempo de armazenagem, seja por diferença entre lotes, segundo uma caracterização mesmo visual, é necessário efetuar-se uma exploração preliminar do comportamento do material antes da realização de ensaios sistemáticos. Esta exploração preliminar pode ser feita,

por exemplo, através de ensaios de tração monotônica para alguns valores temperatura-taxa de deformação selecionados dentro dos limites a serem utilizados em ensaios (i.e., dentro de uma região de interesse, como a esboçada na Figura 8.7, conforme foi aqui realizado nos ensaios preliminares, etapa (b) do item 9.1, da qual obtiveram-se os gráficos das Figuras 9.4 a 9.6. A temperaturas e taxas de deformação destes gráficos são um exemplo de exploração inicial do comportamento. Após esta exploração inicial, os diagramas tensão×deformação devem ser analisados e, caso se constate que o material ensaiado não apresenta propriedades análogas ao que está mostrado nos diagramas das Figuras 9.4 a 9.6, isto significa que o mesmo está num grau de copolimerização diverso daquele dos materiais aqui utilizados na obtenção dos parâmetros numéricos apresentados. Neste caso, os coeficientes das Tabelas 10.8 e 10.9 não se aplicam diretamente. Caso se constate que o material tem um comportamento menos viscoso, isto implicará temperaturas maiores e taxas de deformação menores para se obterem os mesmos níveis de tensão aqui descritos, e vice-versa, temperaturas menores e taxas maiores para materiais mais viscosos. Sendo assim, a caracterização aqui mostrada ainda é utilizável para misturas de mesmas proporções resina rígida/resina flexível que apresentem um grau de polimerização original ligeiramente diferente. Num caso extremo, onde o comportamento se mostre bastante diverso, deverá ser então efetuada uma nova caracterização, e obtidos novos coeficientes numéricos. Os procedimentos para caracterização e o equacionamento são aqueles dados nos Capítulos 7, 8 e 10. Resumidamente, para uma caracterização do comportamento, idealiza-se um número mínimo de ensaios composto por quatro taxas de deformação e cinco temperaturas em cada taxa. Para uma melhor precisão final, podem-se usar 5 taxa de deformação (e cinco temperaturas em cada). A seguir, necessitam-se dos seguintes ensaios: determinação dos parâmetros K e M da primeira tração; determinação dos parâmetros A, D e G da primeira relaxação; determinação de um mínimo de 5 relaxações múltiplas, em cada ensaio, para formação de uma base de dados de onde se retiram as curvas de fluência; dispensam-se os ensaios cíclicos, já que o material é isotrópico. Uma segunda opção

“expedita” para se avaliar o comportamento de um material consiste em estimarem-se as combinações temperatura-taxa de deformação próximas ao que se deseja, usando os ensaios estabelecidos, e realizarem-se ensaios em três taxas de deformação e três temperaturas em cada taxa, somente na sub-região desejada. Isto requer uma maior intimidade com o comportamento das misturas de resina, mas é perfeitamente praticável com a experiência no uso destes materiais.

Os experimentos sistemáticos foram realizados para três tipos de misturas, 60/40-C, 70/30-C, 80/20-C (proporção em peso de resina rígida/resina flexível). Isto foi idealizado, inicialmente, por não se ter um conhecimento sistemático do comportamento das diversas proporções de misturas da forma ampla como desejada. Teoricamente, uma proporção 80/20 poderia não ser utilizável para uma série completa de ensaios, por ser fundamentalmente bastante rígida. Experimentalmente constatou-se, por um lado, que um material bastante rígido, como o material 80/20-C, apresenta limitações mas não impossibilidade de aplicação. Por outro lado, a experiência com tais misturas mostrou outras dificuldades além do excesso de rigidez, por exemplo a dificuldade em se manter o controle das dimensões finais na usinagem de misturas mais viscosas, neste caso, os materiais 60/40-A e 50/50-A, este último descartado desde o início justamente por grandes dificuldades em sua usinagem. A utilização de três tipos de materiais com comportamento geral mais ou menos viscoso permite uma pré-seleção, de acordo com as propriedades do protótipo, e um “ajuste fino” através da temperatura. Se o protótipo tiver características marcadamente viscosas, então o material 60/40-C será o mais adequado. No entanto, a necessidade de se simular o comportamento de um material com pouca viscosidade vai determinar o emprego de um material com características relativamente mais rígidas, como o material 80/20-C. O material 70/30-C, ao final, não mostrou boa correlação entre seu comportamento e o tipo de equacionamento utilizado. Sendo assim, tendo-se em vista o espectro mais amplo de possibilidades de aplicações práticas, mostrou-se necessário estudar o

comportamento de um número mínimo de três misturas, cobrindo o comportamento desde uma maior rigidez a uma maior viscosidade. Obviamente, existem interseções de comportamentos, onde temperaturas maiores e/ou taxas de deformação menores num material mais rígido produzem comportamento análogo a uma certa temperatura e taxa de deformação num material mais viscoso, como as Figuras 9.4d e 9.5a, conforme estabelecido no item 9.2.

Deve-se observar que o primeiro passo para a programação de ensaios foi estabelecer uma região inicial de trabalho, definida por valores limites práticos de temperatura e taxa de deformação, como ilustrado na Figura 8.7, estando os valores específicos finais para cada mistura nas Tabelas 9.1 a 9.3. Assim, num extremo, verifica-se a quebra do corpo de prova, para temperaturas:

- *abaixo de 36°C*, em geral em todas as taxas de deformação no material 60/40-C, Tabela 9.1;
- *abaixo de 36°C* para $\dot{\epsilon}=0,048 \text{ \% s}^{-1}$ e 38°C para $\dot{\epsilon}=0,078 \text{ \% s}^{-1}$ a $\dot{\epsilon}=0,138 \text{ \% s}^{-1}$ no material 70/30-C, Tabela 9.2;
- *abaixo de 46°C* ($\dot{\epsilon}=0,024 \text{ \% s}^{-1}$), 50°C ($\dot{\epsilon}=0,042 \text{ \% s}^{-1}$), 52°C ($\dot{\epsilon}=0,060 \text{ \% s}^{-1}$ e $\dot{\epsilon}=0,078 \text{ \% s}^{-1}$) no material 80/20, Tabela 9.3.

Níveis insignificantes de tensão, em outro extremo, são verificados nas temperaturas:

- *acima de 58°C*, em geral em todas as taxas de deformação no material 60/40-C, Tabela 9.1;
- *acima de 54°C* para $\dot{\epsilon}=0,048 \text{ \% s}^{-1}$ e 56°C para $\dot{\epsilon}=0,078 \text{ \% s}^{-1}$ a $\dot{\epsilon}=0,138 \text{ \% s}^{-1}$ no material 70/30-C, Tabela 9.2;
- *acima de 64°C* ($\dot{\epsilon}=0,024 \text{ \% s}^{-1}$), 68°C ($\dot{\epsilon}=0,042 \text{ \% s}^{-1}$), 72°C ($\dot{\epsilon}=0,060 \text{ \% s}^{-1}$ e $\dot{\epsilon}=0,078 \text{ \% s}^{-1}$) no material 80/20, Tabela 9.3.

Estes valores determinam os limites possíveis de realização de ensaios. Nestes limites, além do ensaio de tração monotônico completo, considera-se o valor máximo da deformação pro-

gramado para ser atingido pela última tração nos ensaios de encruamento-relaxação, que estabelece uma limitação ainda maior dentro dos extremos da região.

O comportamento geral de uma mistura, com relação aos valores limites de temperatura e taxa de deformação, pode ser analisado fixando-se uma determinada temperatura e analisando-se o que pode acontecer ao corpo de prova em taxas de deformação altas e baixas, conforme se mostra a seguir. Inicialmente observa-se que, a temperaturas relativamente muito baixas, por exemplo a 34°C para o material 60/40-C (Tabela 9.1), o comportamento é fundamentalmente frágil, bastante afetado pela geometria do corpo de prova, processo de fabricação, acabamento, e tipo de fixação. Nesta situação, um ensaio a altas taxas de deformação, por exemplo a 0,600 % s⁻¹ para o material 60/40-C, nem mesmo chega a se iniciar, ocorrendo ruptura imediata do corpo de prova ao se iniciar a tração. Para taxas de deformação mais baixas, por exemplo 0,420 % s⁻¹ ou 0,240 % s⁻¹ no material 60/40-C, consegue-se iniciar um ensaio nesta baixa temperatura (34°C), mas o corpo de prova se rompe antes de se chegar aos níveis máximos de deformação requeridos para executarem-se 6 ou 7 trações-relaxações sucessivas. Em seguida, aumentando-se a temperatura, já é possível efetuarem-se ensaios completos, porém restritos a certas faixas de taxa de deformação. Isto é exemplificado melhor pelo material 80/20 (Tabela 9.3), com suas faixas bem marcantes, onde se realizam ensaios completos sem quebra do corpo de prova para $\dot{\epsilon}=0,060$ % s⁻¹ e $\dot{\epsilon}=0,078$ % s⁻¹ numa temperatura maior que 54°C, para $\dot{\epsilon}=0,042$ % s⁻¹ numa temperatura maior que 52°C e para $\dot{\epsilon}=0,024$ % s⁻¹ numa temperatura maior que 48°C. Neste caso, em taxas mais elevadas, pode ainda ocorrer ruptura do corpo de prova antes de se chegar à deformação máxima prevista para a última relaxação, como para $\dot{\epsilon}=0,078$ % s⁻¹ numa temperatura de 55°C no material 80/20-C. A seguir, numa temperatura sensivelmente alta, podem-se realizar ensaios sob quaisquer taxas de deformação, encontrando-se o corpo de prova em comportamento nitidamente viscoso para toda a gama de taxas de deformação. Isto acontece para temperaturas acima de 40°C ou 42°C para o material 60/40-C, 44°C para o 70/30-C e 56°C para o 80/20-C. Finalmente, em tempera-

turas bastante altas, o material se deforma como um elastômero viscoplástico, i.e., verificam-se grandes deformações antes da ruptura, como acima de 54°C/56°C para o material 60/40-C, 52°C/56°C para o 70/30-C, e de 62°C/66°C/70°C para as diversas faixas de taxa de deformação para o material 80/20-C. No entanto, devido mesmo à facilidade de deformação, as tensões resultantes são muito baixas. Assim, não se têm valores significativos de tensão, o que dificulta a precisão das medidas. As curvas de relaxação geralmente se confundem para as diversas taxas, como mostram as Figuras 9.1a e 9.1b.

O fenômeno de retração da deformação do corpo de prova após ruptura não é perfeitamente documentável nos ensaios da forma como realizados. Inicialmente, observa-se que nem sempre o corpo de prova se rompe externamente à região de apoio do extensômetro. Pode-se induzir uma ruptura entre o fuste e a cabeça do corpo de prova, através de um raio de concordância mínimo entre a cabeça e o fuste, o que vai introduzir uma concentração de tensões e induzir à ruptura neste local. No entanto, mesmo nos casos onde se consegue esta ruptura externamente à região de apoio do extensômetro, e conseqüente o registro da retração, pode ocorrer um reposicionamento de alguma das pinças do extensômetro, devido ao impacto da ruptura, o que modifica sensivelmente a medida da deformação exata no início da retração. Obviamente este valor de deformação máxima pode ser ainda obtido através do último valor de deformação antes da ruptura, no entanto a realização das medidas de retração de maneira direta, sem a necessidade de reconstituições, forneceria resultados mais precisos. Assim, a retração é aqui mostrada de maneira qualitativa, pois a retração real, principalmente em sua porção elástica, pode ser sensivelmente diferente daquela registrada pelo extensômetro. Necessita-se, de fato, de um estudo sobre a fixação do extensômetro, ou sobre a reconstituição dos dados, para poderem-se utilizar os dados de retração quantitativamente com precisão. Como esta retração não é utilizada na caracterização, que é unitária e não separa os diversos tipos de deformação, não se preocupou com o estudo desta fixação ou reconstituições.

Registrou-se o fenômeno da retração da deformação de fato como um dado extra, principalmente como uma maneira qualitativa de se identificar e avaliar a presença da elasticidade. Este fenômeno, no entanto, é bastante interessante do ponto de vista da Elasticidade e Viscoplasticidade. Já que o regime elástico, apesar de identificado após a ruptura, se confunde desde o início do gráfico com o regime viscoplástico, não é possível separarem-se os fenômenos elásticos dos viscoplásticos durante os ensaios de encruamento-relaxação. Sendo assim, o expediente de se registrar a retração após a ruptura fornece uma oportunidade para se separarem estes fenômenos. Através do exame dos gráficos de retração pode-se identificar claramente uma retração quase instantânea (elasticidade) e um retorno com o tempo, (viscoelasticidade) conforme será comentado posteriormente no item 11.5. Não se efetuou, aqui, um equacionamento separado da viscoelasticidade, pois está-se realizando uma modelagem unitária dos comportamentos elástico e viscoelastoplástico simultaneamente.

No caso de ensaios cíclicos, foi feito um levantamento não tão extenso, como na tração-relaxação, porém sistemático do tipo de comportamento, conforme a relação de ensaios da Tabela 9.4. O comportamento verificado foi isotrópico, isto é, o ciclos tendem a se estabilizar numa mesma posição e permanecer com uma mesma amplitude de tensão e deformação, qualquer que seja o número de ciclos efetuados, cf. a Figura A1.16. Na maioria dos casos obtiveram-se resultados sem ruptura do corpo de prova para as duas amplitudes menores, 2,25 mm e 4,5 mm, para os diversos valores de temperatura-taxa de deformação escolhidos. Vários problemas, no entanto, apareceram ao se tentar aumentar esta amplitude, inviabilizando um estudo pormenorizado do comportamento cíclico. Por um lado, os corpos de prova não se adaptaram bem a uma faixa maior de amplitudes. Na amplitude de $\pm 4,5$ mm observou-se a flambagem na compressão, e com $\pm 7,5$ mm verificou-se quebra dos corpos de prova em praticamente todos os ensaios. Ao se aumentar sensivelmente o diâmetro do corpo de prova para evitar a flambagem, verifica-se uma facilidade de ruptura à tração, num número relativamente

baixo de ciclos, em temperaturas não tão baixas. Isto pode ser devido à mudança sensível da geometria relativamente à cabeça do corpo de prova, pois, ao se aumentar sensivelmente a espessura, deveria-se aumentar, também, as dimensões da cabeça. Isto implicaria, por sua vez, num redimensionamento ou ampliação das cunhas e garras. Desse modo, a quantificação da variação das amplitudes de tensão e deformação requer um redimensionamento à parte das garras e cunhas, ou seja um estudo separado de fixação. Por outro lado, o levantamento sistemático da variação entre as amplitudes, utilizando-se as eqs. (10.10) a (10.12), para cada temperatura e para cada taxa de deformação, implica um número de ensaios de quatro a cinco vezes maior, por necessitar-se de um mínimo de quatro a cinco pontos para descrever cada equação. O tempo de ensaio e o custo de cada ensaio, tanto na sua realização quanto na preparação e análise dos resultados, são fatores extremamente limitantes no tipo de trabalho aqui realizado. Desse modo, apesar de indicar-se a formulação correspondente, eqs. (10.10) a (10.12), como fundamento para o estudo de tal comportamento, não se realizaram ensaios sistemáticos para a determinação dos parâmetros K_c e M_c , o que além de apresentar custo sensivelmente alto, está além de uma caracterização com vistas à simulação, conforme os objetivos deste trabalho.

Um tipo de ensaio para o qual não se obteve nem um conjunto de dados significativo foi a variação da razão de Poisson ν . Foram efetuados ensaios, mas os resultados não foram satisfatórios. Inicialmente, foi necessário realizarem-se duas séries de medidas dentro de um ensaio, uma para medir a contração somente devido à pressão do extensômetro radial, com a máquina parada mas registrando as medidas, outra para medir a contração devido à tração. Como, por um lado, a contração devido à pressão de fixação do extensômetro radial mostrou-se considerável e, por outro lado, a contração devido à tração é bem pequena, o procedimento não permitiu medidas sequer confiáveis da variação de ν . Possivelmente tais medidas exigirão o uso de um extensômetro ótico, já que qualquer pressão lateral vai afetar bastante as medidas.

Outros ensaios, como de torção, não foram cogitados desde o início, devido a dificuldades ou inexistência de equipamento. A caracterização aqui efetivada é aquela possível de ser feita com uma máquina universal de ensaios padrão, no entanto requerendo controle e aquisição de dados eletrônicos.

11.3 O Material e suas Propriedades

O estudo aqui realizado fornece subsídios para o entendimento das características viscoplásticas de misturas de resinas rígidas e flexíveis. Considere-se, por exemplo, que o material empregado para o equacionamento final, identificado como 60/40-C, 70/30-C e 80/20-C, é menos viscoso, mais ressecado que os anteriores, identificados como 60/40-A, etc. e 60/40-B, etc. Estes materiais, ou outro qualquer mais viscoso que o material C, terá comportamento análogo ao aqui equacionado, no entanto em temperaturas mais baixas e/ou taxas de deformação mais altas. Os materiais A, aqui classificados como tipo acentuadamente viscoso, se apresentam a uma análise visual com uma viscosidade de um óleo mais fino. O material C, utilizado para o levantamento de parâmetros efetuado, tem uma característica nitidamente mais fluida, apesar de ainda sensivelmente viscosa.

Na fundição de um material fotoviscoplastico, após misturarem-se as resinas rígida e flexível líquidas com os endurecedores, inicia-se internamente um processo de formação de uma estrutura tridimensional complexa, conforme disposto nos itens 5.6 e 5.7. Durante a cura do material, esta estrutura se movimenta para estabilizar-se em posições de equilíbrio, de menor energia, o que resulta um material sem tensões internas, conforme verificado experimentalmente no laboratório através da análise dos cilindros e placas recém-fundidos, que se mostraram completamente sem franjas residuais. Assim, após a cura, a partir das resinas originais forma-se um novo material, um sólido viscoso, originalmente sem tensões internas. No entan-

to, após retirar-se o material endurecido de seu molde, qualquer solicitação sobre este material, até mesmo o peso próprio de uma placa armazenada verticalmente, apoiada sobre uma de suas extremidades, dará início a um processo de fluência, i.e. de deformação contínua. Modificando-se a posição desta placa para a horizontal, apoiada sobre toda a sua maior extensão, a fim de impedir a continuidade da deformação, inicia-se imediatamente a relaxação das tensões que haviam sido induzidas, além de novas deformações. Deste modo, após o endurecimento do material, inicialmente sem tensões internas, toda atuação mecânica sensível sobre o mesmo produzirá tensões e deformações. Um cuidado importante, nesta situação, se refere à armazenagem dos corpos de prova, que podem se deformar facilmente. Os corpos de prova cilíndricos já usinados foram armazenados apoiados ao longo de seu fuste, sobre um apoio plano de isopor recortado numa largura um pouco menor que o comprimento do fuste, deixando-se as cabeças sem apoiar. Corpos de prova do material 60/40 podem apresentar uma pequena inclinação do fuste, visualmente quase imperceptível, se deixados apoiados sobre as cabeças.

Deve-se observar que, em peças fabricadas com estas misturas de resinas, uma grande deformação, ou até mesmo um "vinco" em alguma parte da peça, pode retornar totalmente a zero. Isto ocorre ao se fazer um "recozimento" da peça, por exemplo de um corpo de prova ensaiado, quando pode-se retornar quase que qualquer deformação ou configuração inicial, porém ao custo de um aumento da resistência e fragilidade. Isto poderia indicar que o material é, de fato, viscoelástico. No entanto, o retorno sensível da deformação está condicionado a uma temperatura de recozimento bem alta, próxima àquela da cura do material. Em situações comuns, o retorno leva um determinado tempo, para cada temperatura, tempo este que pode ser bastante longo e, portanto, para fins práticos de ensaio, a parte da deformação que não retorna num tempo curto, por exemplo até a realização das medidas desejadas, pode ser considerada como viscoplástica.

As resinas rígida e flexível utilizadas para as misturas, bem como os endurecedores, apresentam uma composição química inalterada pelos fabricantes. Isto proporciona o estabelecimento de misturas típicas, cujas características são padrão para um mesmo material de modelagem. No entanto, com o decorrer do tempo, surgem novas necessidades nas diversas aplicações destas resinas, ou novas tecnologias e materiais e, como conseqüência, de tempos em tempos alguns fabricantes podem mudar a composição química de seus produtos, mudando suas características básicas. Neste caso, devem ser realizados novos estudos quantitativos para se determinarem aquelas misturas mais adequadas à prática da Fotomecânica e suas propriedades fundamentais. Com relação aos materiais aqui empregados, sua composição química básica tem se mantido inalterada através dos últimos anos. No entanto, além da composição química propriamente dita, um outro fator passou a ter um papel fundamental com relação às propriedades das misturas utilizadas, qual seja o grau de copolimerização das resinas. Este fator se tornou de extrema importância ao se expandir o uso destas resinas para aplicações essencialmente viscosas. Num estudo fotoviscoplastico, não só a composição química interessa, mas também o grau de copolimerização das resinas originais, pois este grau determina uma maior ou menor viscosidade das resinas originais antes de sua mistura, o que por sua vez vai afetar o grau de viscosidade das misturas finais. O grau de copolimerização é dado pelo comprimento médio das cadeia de polímeros. Basicamente, as resinas podem ser fornecidas seja com um grau relativamente baixo de copolimerização, apresentando então um caráter bem fluido, seja com um grau mais avançado de copolimerização, quando se apresentam bem mais viscosas. O baixo grau de copolimerização é perceptível por uma baixa viscosidade das resina. Resinas originais com alto grau de copolimerização resultam materiais com características viscosas pronunciadas, perceptíveis mesmo à temperatura ambiente. Já os corpos de prova feitos de resinas originais com baixa copolimerização têm uma aparência ressecada, sendo necessárias temperaturas mais elevadas para que se obtenha destes cor-

pos de prova um comportamento nitidamente viscoso. O grau maior ou menor de copolimerização se aplica para os dois tipos de resina originais, rígida ou flexível, notando-se, assim, subtipos, onde a resina rígida apresenta uma gama de variedades em sua viscosidade entre lotes, que poderão ser de bastante viscosos até moderadamente viscosos, i.e. com uma diminuição sensível da viscosidade. O mesmo ocorre com a resina flexível, que pode apresentar subgrupos, com uma viscosidade de intensidade moderada até quase fluida, i.e. até materiais com características muito pouco viscosas.

Como um outro aspecto do grau de copolimerização, as resinas mais viscosas tendem a ter um prazo de utilização reduzido. Com o passar do tempo, a resina se torna cada vez mais densa e viscosa, devido à continuidade do processo de copolimerização, e este aumento da densidade e viscosidade torna difícil conseguir uma mistura homogênea do endurecedor por todo o volume da mistura. Assim, em casos de grande viscosidade, a mistura não endurece completamente, por não se conseguir uma distribuição do endurecedor por todo o volume da mistura, resultando um material não homogêneo, com corpos de prova apresentando porções que não endurecem. Como conseqüência, após um período de tempo relativamente curto as resinas originais mais viscosas não podem ser empregadas para a fabricação das misturas. Por outro lado, as resinas originalmente mais fluidas podem ser utilizadas por um período de tempo mais dilatado. No entanto, com o processo de copolimerização sempre atuando, um longo período entre utilizações sucessivas pode implicar mudanças nas propriedades, já que a resina, antes mais fluida, terá se tornado sensivelmente mais viscosa. Experimentos com resinas mais fluidas mostram que se pode alterar sensivelmente suas características através de um "recozimento" prévio, fazendo suas características de viscosidade se aproximarem daquelas das resinas mais viscosas. No entanto, é difícil controlar artesanalmente o grau final de copolimerização deste recozimento. No recozimento, o que se faz é reiniciar ou acelerar o processo de copolimerização, aumentando-se o tamanho das cadeias de polímeros. Como a vis-

cosidade depende do comprimento da cadeia polimérica, cadeias maiores definirão um comportamento mais viscoso. O aumento da densidade provém da perda de massa, ou de água, que é liberada pelo processo de copolimerização e posteriormente evaporada. Durante um recozimento, pode-se perceber visualmente uma diminuição de volume da resina.

11.4 Sobre a Formulação do Comportamento Mecânico

Existe, na literatura, uma quantidade imensa de formulações algébricas e modelos, para elastoplasticidade, viscoplasticidade, fluência, alguns dos quais mencionados nos Capítulos 3 e 4 e a maior parte somente delineada na bibliografia. A maioria se refere a casos idealizados e outros a modelagens baseadas em certos resultados experimentais específicos. Sempre se parte de uma curva básica, relacionado tensão e deformação, ou tensão e tempo, ou outra, aplicam-se métodos matemáticos para equacionar esta curva, utilizando-se ainda teoremas de energia e outros artifícios para derivar conseqüências do comportamento idealizado. Estes equacionamentos teóricos da literatura, na realidade, "em princípio" não se aplicam num estudo eminentemente experimental, voltado para a prática experimental. Neste caso, será a fenomenologia levantada no trabalho experimental, proveniente dos ensaios realizados, as equações numéricas iniciais desenvolvidas para analisar quantitativamente os comportamentos observados, que poderão ser desenvolvidos novas modelagens eminentemente temáticas, numérico-experimentais, etc. que irão compor nova bibliografia. No estágio atual de modelagem deste trabalho, não foram feitas comparações entre as relações aqui obtidas com outras similares da literatura, sejam experimentais, sejam teóricas. Tais comparações não são retas, pois as resinas apresentam uma diversidade muito grande de propriedades e comportamentos, sendo que a modelagem aqui realizada é totalmente inédita. Assim, serão necessários estudos razoavelmente aprofundados para emitirem-se juízos comparativos entre as formulações aqui desenvolvidas e outras.

11.4.1 Formulação Básica Tensão×Deformação e Tensão×Tempo

A análise detalhada da nomenclatura usualmente empregada em Elasticidade e Plasticidade, e das implicações desta nomenclatura na interpretação dos conceitos subjacentes e seus desenvolvimentos, é necessária para o entendimento perfeito dos fenômenos em estudo. Inicialmente consideremos a nomenclatura "domínio elástico", que descreve um comportamento *exclusivamente elástico*, como na Figura 3.1a, curvas (1) e (2). De maneira diversa, quando se utiliza o termo "domínio plástico", como por exemplo para as curvas (3), (4) e (5) da Figura 3.1a, está-se referindo, de fato, a um *comportamento elastoplástico*, já que a elasticidade não se restringe ao regime elástico inicial. Isto é melhor visualizado no descarregamento de um ensaio de tração monotônico, curva (6) da Figura 3.1a, que é inteiramente linear, mostrando a porção da deformação elástica acontecida no domínio plástico (notada ϵ_0 nesta figura). Como o descarregamento é exclusivamente elástico, ele mostra o retorno das deformações elásticas ocorridas nos domínios elástico e plástico. Também no modelo reológico de uma mola em série com um patim, Figura 3.1b, onde a tensão atua sempre na mola e no patim, mostra-se claramente a continuidade das deformações elásticas durante o regime plástico. Sendo assim, tratando-se da denominação de um conjunto de comportamentos típicos, o termo "Plasticidade" indica, em termos gerais, que o comportamento é caracterizado pela existência da deformação residual permanente, a deformação plástica, mas também por uma deformação elástica, maior ou menor. No entanto, é comum, na utilização do diagrama tensão×deformação em plasticidade, tanto considerarem-se as deformações elásticas em ambos os domínios elástico e plástico, como no modelo de Ramberg-Osgood, eq. (3.7) e Figura 3.3, quanto se desprezarem as deformações elásticas no regime plástico, como no modelo de Swift, reescrito na Figura 3.3. Surgem daí aparentes conflitos nas formulações, que são de fato explicados através da simplificação da deformação total como sendo somente plástica, $\epsilon \approx \epsilon_p$

no regime plástico, feita pelas formulações que desprezam a deformação elástica no domínio plástico (p.ex. Swift), por serem relativamente muito pequenas. Neste trabalho, os fenômenos plásticos ou elastoplásticos são ainda classificados sob a denominação de *Inelasticidade*. Isto tem por objetivo contrastá-los com a *Anelasticidade*, onde encontramos os fenômenos elástico e plástico dependentes do tempo. A dependência das deformações com o tempo, por exemplo sob a forma de uma taxa temporal de aplicação de carga, em deformação ou tensão, introduz novas dimensões aos estudos de tensão/deformação, fenômenos denominados "viscosos", ou "Viscosidade", onde a taxa da sollicitação e a temperatura são altamente significantes.

A viscosidade é um fenômeno que pode, teoricamente, apresentar-se somente no regime plástico, com um regime elástico inicial não viscoso. Este é o enfoque geralmente utilizado para a viscoplasticidade na literatura, onde se idealiza um regime elástico linear (i.e., não-viscoso) inicial, seguido de um regime plástico viscoso, como descrito pelas eqs. (3.5) a (3.8). Este regime viscoplástico, analogamente às considerações feitas para o regime elastoplástico discutido acima, é na realidade um regime viscoelastoplástico. A viscoplasticidade experimental é descrita neste trabalho considerando-se as deformações totais, sem separá-las em elásticas, plásticas ou viscosas.

O extenso estudo do diagrama tensão×deformação aqui efetuado, item 3.2, tem consequências fundamentais. A primeira, de caráter teórico, permite a obtenção das diversas formulações exponenciais mais utilizadas para um diagrama $\sigma \times \epsilon$ utilizando-se as equações gerais (inéditas) aqui desenvolvidas, eqs. (3.5) a (3.8). Assim, através das eqs. (3.5) e (3.6) e dos parâmetros da Tabela 3.1 podem-se obter diretamente equações bastante diversas como a de Ramberg-Osgood, Ludwick, Hollomon ou relação exponencial, Swift, que não são todas algebricamente transformáveis uma às outras fora do contexto de "quantidades componentes" introduzido (v. item 3.2.2). As equações (3.5) e (3.6) são ainda compactadas numa única expressão, eq. (3.8), que descreve estas e outras relações $\sigma=f(\epsilon)$, ou $\epsilon=f(\sigma)$, conforme mostra a

Figura 3.3. Este estudo teórico sobre a relação básica tensão×deformação é completamente inédito na área. A segunda consequência importante do desenvolvimento sobre o diagrama tensão×deformação aqui realizado é a constatação de que os modelos unitários, que descrevem todas as deformações juntas, realizam uma descrição tão eficaz quanto aquela dos modelos que separam comportamento viscoelástico de comportamento viscoplástico. Uma "separação" algébrica de comportamentos pode ser posteriormente efetuada, caso se mostre necessária e experimentalmente exequível. Como exemplo disto têm-se os gráficos teóricos mostrados na Figura 3.2, descrevendo diversas componentes do comportamento plástico. Na viscoplasticidade, este tipo de separação é feita, por exemplo, nos modelos que decompõem a tensão total numa tensão viscosa mais uma tensão plástica (Lemaitre e Chaboche, 1985). No entanto, os modelos unitários são de grande utilidade quando é difícil, ou mesmo impossível, separarem-se experimentalmente os comportamentos elástico, viscoelástico e viscoplástico como é o caso deste trabalho. Em muitos casos, onde a deformação elástica no regime viscoplástico é muitas vezes bastante pequena, um modelo unitário utilizando as deformações totais como deformações plásticas é uma opção realística, experimentalmente melhor fundamentada do que tentativas de identificar e obter experimentalmente deformações elásticas em geral quantitativamente insignificantes, principalmente no início do diagrama. Finalmente, o estudo do diagrama tensão×deformação faz parte, ainda, do equacionamento básico do comportamento viscoso. Isto advém do fato de que, quando do estudo experimental da Viscoplasticidade, existirá um diagrama tensão×deformação para cada combinação temperatura-taxa temporal de deformação, conforme esquematizam as Figura 3.1c e exemplificam os diversos diagramas experimentais das Figuras A1.1 a A1.4. Sendo assim, sempre que se realizam ensaios originando gráficos tensão×deformação, deve-se recorrer ao estudo das formas básicas de se formular este diagrama para um equacionamento final eficiente.

Ao se realizar um estudo original sobre um material ou comportamento, ainda não amplamente utilizados, deve-se, como passo importante do estudo, "reavaliar" as quantidades usualmente utilizadas em projetos, relativas a comportamentos já largamente estabelecidos, como por exemplo o módulo de elasticidade e o limite de escoamento. Estas duas "propriedades" citadas são, na realidade, quantidades algébricas decorrentes de um tipo de gráfico bem específico encontrado no comportamento elastoplástico. Num diagrama tensão x deformação completamente não linear, sem a distinção de um domínio elástico inicial, como os aqui obtidos, pode-se falar em "módulo de elasticidade" de uma maneira alusiva: módulo de elasticidade é a inclinação de uma reta num diagrama com uma parte inicial elástica linear ou quase linear. Nos diagramas da Viscoplasticidade obtidos neste trabalho, nitidamente não-lineares desde o início, não foi identificado um regime linear elástico inicial, por menor que fosse. A elasticidade também não é separada da viscoplasticidade. Sendo assim, para os comportamentos viscoplásticos aqui obtidos, não é de fato possível obter-se um módulo de elasticidade da forma como se faz nos gráficos do comportamento elastoplástico.

Com relação ao módulo de elasticidade, devem ser feitas algumas observações. Este trabalho não procura, em sua modelagem básica, definir ou identificar um "módulo de elasticidade" nos diagramas obtidos. Isto porque o módulo de elasticidade é característico de diagramas tensão x deformação com uma parte inicial exclusivamente elástica, linear ou aproximadamente linear, diferentemente dos resultados aqui obtidos, onde os gráficos apresentam uma curva inteiramente não linear, com o comportamento viscoso se mostrando desde o início do ensaio concomitantemente ao comportamento elástico. Este diagrama inteiramente não-linear é uma característica dos diagramas tensão x deformação viscoplásticos. Alguns apresentam uma forma similar a uma porção linear inicial, como nas Figuras 9.4c, 9.5c, 9.5e, 9.6a, 9.6c, 9.6d, no entanto trata-se de um crescimento inicial rápido da tensão, para baixas temperaturas ou altas taxa de deformação, e não de um domínio elástico inicial. Apesar de poderem-se estabelecer modelos teóricos com um domínio elástico inicial bem pequeno, na prática do equa-

cionamento de resultados de ensaios isto não é de fato útil. Desse modo, na descrição do comportamento fenomenológico, o módulo de elasticidade de fato não é uma "propriedade intrínseca", que pode ser sempre identificada e determinada. O módulo de elasticidade está relacionado na experimentação, à descrição de uma porção da curva do diagrama tensão×deformação característico de um certo comportamento, inicialmente elástico linear e posteriormente plástico. No caso deste trabalho, não é consistente procurar-se determinar experimentalmente o módulo de elasticidade, nem em um regime elástico inicial, já que não se verificam de fato. O efeito viscoso se apresenta desde as deformações iniciais, e torna-se necessária uma descrição unitária dos diagramas tensão×deformação, num comportamento concomitantemente elástico e viscoelastoplástico. Apesar de se identificar a presença da elasticidade, através dos ensaios de retração da deformação após a ruptura, não foi ainda estabelecido um método seguro para determinar as características elástica através destes ensaios, nem de se separarem os comportamentos viscosos do comportamento elástico. Para estes materiais, é mais apropriado e eficiente utilizarem-se os parâmetros numéricos K e M de regressões exponenciais, que descrevem a curva tensão×deformação total como variáveis caracterizadoras do comportamento.

Apesar de não se identificar um módulo de elasticidade nas gráficos experimentais, para se obterem as curvas de fluência esbarra-se na necessidade de se determinar um valor para o módulo de elasticidade, referente ao comportamento elástico existente junto com o comportamento viscoelastoplástico, já que se utiliza uma relação separando o comportamento elástico e plástico, $\epsilon_{vp} = \epsilon - \epsilon_e$, para realizar o procedimento numérico de obtenção da fluência, eqs. (8.7) a (8.11) e Figura 8.10. Por isso, foi feita uma avaliação do módulo de elasticidade, i.e., do valor de E na relação $\sigma = E \epsilon$, através de considerações sobre a grandeza entre as deformações elástica e total. Considerou-se que a deformação elástica é bem menor que a deformação total, $\epsilon_e \ll \epsilon$, eq. (8.9), e atribuiu-se um valor arbitrário a esta relação, $\epsilon_e = p \times \epsilon$, eq. (8.10). Neste caso, trata-se de uma "redefinição" do módulo de elasticidade, baseada na grandeza relativa

entre deformações, de utilização restrita a este procedimento numérico. Apesar de não ser um valor experimentalmente verificado, o valor arbitrado para o módulo pode ser reavaliado/reajustado pelo coeficiente p , e sua expressão é correta do ponto de vista teórico. Sendo assim, a fluência, na forma como é aqui equacionada, tem base experimental, porém sofre restrições numéricas e aproximações algébricas.

As equações exponenciais são o tipo clássico de formulação empregada na caracterização básica de materiais. Nestas equações, são indicadores respectivamente da resistência e do endurecimento/encruamento os coeficientes K e M da plasticidade, que são únicos para um material, bem como na viscoplasticidade os coeficientes K e M numa dada temperatura e taxa de deformação especificada. O coeficiente N da viscoplasticidade, indicador da viscosidade, não é utilizado pelos equacionamentos como aqui desenvolvidos, sendo substituído pela variável $\dot{\epsilon}$, como explicado no item 10.1. Deve-se observar que os coeficientes M , como os mostrados na Tabela 10.1 para o material 60/40-C, provêm de uma relação $\sigma = K \epsilon^M$ e não $\sigma = K \epsilon^{1/M}$, i.e. o coeficiente M da forma como aqui utilizado é o inverso daquele utilizado na literatura. Este procedimento justifica-se pelas características dos valores numéricos em cada material. Deve-se lembrar, inicialmente, que os valores de K e M provêm de uma regressão pelo método dos mínimos quadrados, utilizando-se um plano ($\ln \sigma$, $\ln \epsilon$) e uma equação linear $y = a + bx$. Após a regressão, faz-se o coeficiente $b = 1/M$, para o caso geral da literatura, e da relação $K = e^a$ se encontra K . Utiliza-se a relação $b = 1/M$ quando os valores de b são muito pequenos. No caso dos coeficientes deste trabalho, preferiu-se fazer $b = M$, o que produz coeficientes K e M de mesma ordem de grandeza, confira na Tabela 10.1.

Quando o diagrama tensão×deformação tem um domínio elástico inicial, a regressão é geralmente feita somente para valores da curva maiores que σ_y , como na equação de Ramberg-Osgood, eq. (3.7) (veja o item 3.2.2). Neste caso, o valor de K fornece o ponto de interse-

ção com o eixo dos y 's, i.e. o valor do limite de escoamento ou tensão de escoamento σ_y . No comportamento viscoelastoplástico idealizado, como na Figura 3.1b, pode-se fazer uma extensão desta situação e designar os limites como $\sigma_{Y,plást}$ para o comportamento plástico e $\sigma_{Y,viscopl}$ para o comportamento viscoplástico. Como a denominação “escoamento” implica a existência do patamar de escoamento, e este nem sempre se verifica em todos os casos de plasticidade, uma denominação genérica para o limite entre um regime elástico e outro inelástico foi designado como σ_{EIP} , conforme estabelecido nos desenvolvimentos do item 3.2. No entanto, nos diagramas experimentais obtidos aqui não se verificou um domínio elástico inicial, e assim os valores de K , como os da Tabela 10.1 para o material 60/40-C, não indicam nenhum limite entre domínios. Assim, em gráficos como os das Figuras 9.4 a 9.6 e A1.1 a A1.4, o valor de K não está indicando um limite entre domínios, no entanto este parâmetro vai estar ainda ligado à medida da resistência entre estes gráficos. Neste caso, quanto maior o valor de K , mais alto o gráfico vai cortar o eixo dos y 's, o que vai indicar que o gráfico vai atingir um valor mais alto de tensão, principalmente nos gráficos com crescimento inicial rápido da tensão das Figuras 9.4c, 9.5c, 9.5e, 9.6a, 9.6c e 9.6d, e então maior será a resistência. Por sua vez, o coeficiente M fornece a inclinação da reta de regressão e, assim, quanto maior M , maior a inclinação geral da curva, e maior o endurecimento. Deve-se observar que, neste caso, gráficos como os das Figuras 9.4a, 9.4b, 9.4d, 9.4e, 9.5a, 9.5b, 9.5d, 9.6b, 9.6e, de curvatura mais suave, vão mostrar um maior endurecimento, i.e., uma evolução maior da tensão durante o processo de tração, enquanto que nos gráficos restantes (Figuras 9.4c, 9.5c, 9.5e, 9.6a, 9.6c e 9.6d), que atingem logo no início da tração um valor de tensão bem próximo ao máximo, vão mostrar um menor endurecimento, i.e., uma menor variação do valor da tensão durante a tração, pois um valor bem próximo ao máximo é atingido logo no início da tração. Os coeficientes K e M são parâmetros amplamente utilizados na literatura, em plasticidade e viscoplasticidade. Outros tipos de formulações são encontradas, mas as fórmulas exponenciais são as mais empregadas, principalmente na prática da caracterização experimental do comportamento e das propriedades

básicas. Até mesmo formulações complexas da Viscoplasticidade (Lemaitre e Chaboche, 1985) são fundamentadas em descrições experimentais básicas descritas por expressões logarítmicas e polinômios.

Entende-se aqui como comportamento básico a variação das curvas tensão×deformação e tensão×tempo com a temperatura e taxa de deformação, para cada mistura, indicado pelos parâmetros numéricos das equações de regressão. Na tração, os parâmetros K , M , \mathcal{K} , \mathcal{M} , \mathcal{N} , k_i , m_i e n_i estão relacionados:

- K e M à descrição da curva tensão×deformação numa dada temperatura θ sob uma dada taxa de deformação $\dot{\epsilon}$;
- \mathcal{K} , \mathcal{M} , \mathcal{N} à variação dos parâmetros K e M com a temperatura, numa dada taxa de deformação, i.e., à variação do formato da curva tensão×deformação com a temperatura, mantida a taxa de deformação constante;
- k_i , m_i , n_i à variação dos parâmetros \mathcal{K} , \mathcal{M} , \mathcal{N} com a taxa de deformação, i.e., em última análise à variação no formato de uma determinada curva tensão×deformação com a variação da taxa $\dot{\epsilon}$, para um determinado valor de temperatura.

Na relaxação, os parâmetros A , D , G , α_i , β_i , γ_i , a_i , b_i , c_i , d_i , e_i , f_i , g_i , h_i e l_i estão relacionados:

- A , D , G à descrição de uma curva de relaxação tensão×tempo, para um valor de $\sigma_{\text{máx}}$ atingido antes da relaxação, numa dada temperatura θ sob uma dada taxa de deformação $\dot{\epsilon}$;
- α_i , β_i , γ_i à variação dos parâmetros A , D , G com a temperatura, numa dada taxa de deformação, i.e., à variação do formato da curva tensão×tempo com a temperatura, mantida a taxa de deformação constante;
- a_i , b_i , c_i , d_i , e_i , f_i , g_i , h_i , l_i à variação dos parâmetros α_i , β_i , γ_i com a taxa de deformação, i.e., em última análise à variação no formato de uma determinada curva tensão×deformação

com a variação da taxa $\dot{\epsilon}$, para um determinado valor de temperatura.

Devido às características bem comportadas dos diagramas tensão-deformação e tensão-tempo resultantes dos ensaios, equações exponenciais, ou no máximo polinomiais de segundo ou terceiro grau, descrevem com bastante precisão estes diagramas. Assim, o tipo de curvas resultantes dos ensaios, que apresentam crescimento ou decréscimo monotônico, sem grandes flutuações, oscilações ou singularidades, permite que o comportamento do material seja quantificado através do uso de relações razoavelmente simples, como regressões exponenciais ou interpolações polinomiais. Isto é de extrema importância, pois desse modo pode-se caracterizar o comportamento do material pelos poucos parâmetros destas equações, interligados segundo o esquema de formulação acoplada utilizado. Uma relação direta e única entre parâmetros e propriedades é fornecida pelas relações exponenciais, do tipo da eq. (3.4), onde o coeficiente K está diretamente e exclusivamente ligado à resistência e o coeficiente M ao endurecimento. Devido a esta relação direta e exclusiva, as formulações exponenciais são preferidas, ao invés de polinômios ou mesmo equacionamentos mais complexos. No caso das formulações polinomiais, a relação não é direta, já que não se pode relacionar cada coeficiente com uma propriedade exclusiva, ou analisar separadamente o aumento/decréscimo de coeficientes obtidos numericamente. Numa expressão polinomial, cada coeficiente numérico está intimamente ligado aos outros coeficientes da expressão, e todos estão relacionados ao conjunto de dados específicos que os geraram. Assim, os coeficientes das Tabelas 10.8 e 10.9 não podem ser comparados um a um, entre formulações, pois não têm significação individual, fora do contexto de sua própria expressão, já que são coeficientes obtidos numericamente.

As fórmulas polinomiais são a melhor opção quando não é possível uma boa descrição somente com expressões logarítmicas. Estas formulações mostraram-se de bom ajuste para as curvas de relaxação, a não ser em alguns casos comentados no item 11.5. No entanto, em casos de relaxação onde se podem identificar curvas com dois segmentos com decaimentos

bastante diversos, como nas Figuras 10.1 e 10.2, inicialmente bastante acentuada e depois mais suave, poder-se-ia subdividir o domínio e descrever cada segmento com uma relação separada. De fato, principalmente na Figura 10.2 percebe-se que a curva de regressão não acompanha o início mais acentuado do comportamento, no início do gráfico. Neste caso, uma equação distinta para a pequena porção inicial e outra para o restante da curva podem fornecer uma descrição mais acurada, pelo menos localmente. No entanto, tal descrição, razoavelmente simples num caso isolado, torna-se impraticável para um conjunto de curvas, devido à complexidade introduzida pela subdivisão do domínio. Este tipo de subdivisão é análogo ao que se faz, por exemplo, através de equações distintas para fluência primária e fluência secundária. Neste trabalho, não se chegou a caracterizar a relaxação/fluência para períodos suficientemente longos que necessitassem nitidamente estas divisões no equacionamento. Observe-se, então, que os resultados de um ensaio de relaxação mais longo que os aqui realizados podem necessitar de uma formulação, para a relaxação, dividida em partes. Sendo assim, uma relaxação que dure mais tempo vai apresentar uma curva que necessariamente deverá ser decomposta em pelo menos duas partes: uma parte inicial de decaimento rápido, e uma parte posterior de decaimento mais lento.

11.4.2 Formulação Genérica

A modelagem de forma ampla do comportamento de um material leva a alguns problemas, relacionados ao número de variáveis físicas envolvidas. Quanto maior a quantidade de parâmetros físicos simultaneamente envolvidos, maior será a dificuldade de se planejar experimentos e equacionar os resultados, já que acrescentam-se novas dimensões ao equacionamento e aumenta-se o número de equações numéricas com seus parâmetros. Nesta situação, ao invés de utilizarem-se simples pares de dados em planos (σ, ϵ) ou (σ, t) , passa-se a ter de trabalhar com conjuntos de dados em espaços $(\sigma, \epsilon, \dot{\epsilon}, \theta)$ ou $(\sigma, t, \dot{\epsilon}, \theta)$. Com relação às equações numéricas propriamente ditas, geralmente considera-se que uma quantidade maior de

termos num polinômio melhora a precisão do mesmo (até certo ponto). No entanto, como vão-se utilizar estes polinômios de forma interdependente ou acoplada, os coeficientes de um polinômio devem ser subseqüentemente relacionados a uma variável física, e assim quanto maior o número de termos de um polinômio inicial, maior será o número de relações a serem estabelecidas na seqüência. E quanto maior o número de relações envolvidas, por sua vez, maior será a possibilidade de um coeficiente de correlação baixo para alguma das numerosas equações necessárias para o modelo completo. Sendo assim, quanto maior o número de equações, maior a dificuldade em se relacionar todas com um bom coeficiente através de um tipo algébrico uniforme para todas as relações num mesmo nível. Deve-se observar, neste ponto, que sem um tipo algébrico unificado para cada nível de equacionamento não é possível avançar até o modelo final acoplado.

Por outro lado, o equacionamento numérico em si mesmo, em suas várias equações, não é essencialmente geral, i.e., as relações obtidas não são de fácil manipulação algébrica, ou mesmo não se prestam a posteriores manipulações algébricas, havendo assim a necessidade de se desenvolverem as relações explicitando as variáveis desejadas numa forma restrita. É preciso, assim, programar os ensaios visando o equacionamento, ou seja, é preciso realizar ensaios de acordo com as necessidades dos equacionamento, como nos esquemas das Figuras 8.7 e 8.8. Ao final, as equações interligadas devem explicitar a temperatura θ de ensaio como a variável independente, dados os parâmetros K , M e a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$, como sintetizado nas eqs. (10.13). Isto permite determinar-se esta temperatura, dadas todas as outras variáveis e coeficientes. Sendo assim, para se analisarem outros aspectos do comportamento, novas relações devem ser trabalhadas, explicitando as variáveis de interesse em cada caso. Assim, caso sejam de interesse relações explicitando outras variáveis, as equações em cada nível de formulação devem (e podem perfeitamente) ser rearranjadas, e novas regressões realizadas, para descrever e estudar os processos intermediários sob outros aspectos. Como exemplo, os coeficientes K e M podem ser utilizados para outros tipos de equaciona-

mento. Pode-se reescrever a eq. (10.3) explicitando o coeficiente K , $K = K(\mathcal{K}, \mathcal{M}, \mathcal{N}, M, \theta)$, fazendo-se a respectiva regressão e obtendo-se coeficientes \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} que mostrarão, agora, o que acontece com o coeficiente K ao se variar a temperatura e o coeficiente M , numa dada taxa $\dot{\epsilon}_1$. Desse modo, pode-se estudar o que acontece com a resistência, indicada por K , ao se variar a temperatura θ e o grau de endurecimento, indicado por M . Por exemplo, pode-se quantificar, para determinados graus de endurecimento, i.e. determinados valores M_i , como a temperatura aumenta ou diminui a resistência, i.e. K , numa dada taxa de deformação. E, analogamente, explicitando-se M , $M = M(\mathcal{K}, \mathcal{M}, \mathcal{N}, K, \theta)$, pode-se estudar quantitativamente o que acontece ao grau de endurecimento quando se varia a temperatura e a resistência, onde os coeficientes \mathcal{K} , \mathcal{M} e \mathcal{N} foram usados para um terceiro tipo distinto de comportamento (para evitar complexidades de notação, está-se utilizando, nestes exemplos, os mesmos coeficientes para exemplificar diversas regressões possíveis). Neste caso, para determinados níveis de resistência, i.e. determinados valores K_i , pode-se quantificar como a temperatura leva a um grau maior ou menor do endurecimento.

Ainda neste estágio de equacionamento, as variações mencionadas nestes dois exemplos podem ser expressas por novos equacionamentos, expandindo-se o estudo agora para um contexto numérico com base experimental. No primeiro exemplo, para uma série de valores fixos de M_i na equação $K = K(\mathcal{K}, \mathcal{M}, \mathcal{N}, M, \theta)$, podem-se atribuir valores a θ e listarem-se os respectivos valores de K , cujos resultados numéricos (K, θ) dão oportunidade a se fazer um estudo particular da relação $K = K(k_i, \theta)$, para cada nível estabelecido M_i , i.e., um estudo numérico-experimental fornecendo equações sobre a influência da temperatura na resistência, para níveis de endurecimento M_i pré-estabelecidos, todos para um determinado valor de $\dot{\epsilon}_1 = \text{constante}$. No segundo exemplo, da equação $M = M(\mathcal{K}, \mathcal{M}, \mathcal{N}, K, \theta)$ podem-se obter relações $M = M(m_i, \theta)$ uma série de valores fixos de K_i , a um determinado valor de $\dot{\epsilon}_1 = \text{constante}$, as quais levam a um estudo numérico-experimental da influência da temperatura no grau de en-

durecimento, para os níveis de resistência K_I pré-estabelecidos. Obviamente tratam-se de outros equacionamentos, onde os coeficientes numéricos têm uso diferente daquele realizado pelas equações aqui estabelecidas, eqs. (10.3).

O modelo aqui desenvolvido, iniciando-se com as eqs. (8.1) a (8.5) e a eq. (8.14), desenvolvido pelas eqs. (10.2) a (10.5) para tração, eqs. (10.6) a (10.8) para relaxação, e eq. (10.9) para fluência, sintetizado nas eqs. (10.13) e (10.14) e nas Tabelas 10.8 e 10.9 para todos os materiais, *não foi* idealizado para ser utilizado como uma formulário para cálculos diretos ou para determinação do estado de tensões/deformações. Ao contrário, foi idealizado para ser utilizado no planejamento de ensaios experimentais de simulação fotomecânica, principalmente para se determinar a temperatura de ensaio em que uma determinada proporção de resinas descreve o comportamento fundamental do material, fornecido pelas variáveis de simulação K , M e $\dot{\epsilon}$. Para sua utilização, devem-se usar as eqs. (10.13) e (10.14), as Tabelas 10.8 e 10.9 e o esquema para simulação do item 10.7. Entende-se aqui como comportamento fundamental a variação das curvas tensão \times deformação (tração) e tensão \times tempo (relaxação) com a temperatura de ensaio e com a taxa temporal de deformação aplicada, para cada uma das misturas. Inclui-se, ainda, o tipo de encruamento como uma característica básica para identificar o comportamento, mas cujos parâmetros não são necessários para a simulação. Todos os outros tipos de comportamento, inclusive a fluência, são decorrentes deste comportamento fundamental, com relação à simulação experimental. Assim, a modelagem da fluência, eq. (10.9) e item 10.5.1-C, não é essencial para se realizarem as simulações.

Na realidade este modelo, na forma como idealizado, não visa um cálculo direto, pois os ensaios de simulação fotomecânica são realizados exatamente para a determinação do estado interno de tensões/deformações, em casos de carregamento ou geometria complexos, que são de solução analítica ou numérica difícil ou mesmo impraticável. No entanto, como as equações aqui obtidas tratam do desenvolvimento de propriedades fundamentais, basicamen-

te através de diagramas tensão×deformação e tensão×tempo, elas podem ser incorporadas ou expandidas em modelos algébricos ou numéricos, conforme indicado no Capítulo 3 e delineado no parágrafo acima. Isto porque todos os modelos numéricos ou algébricos da literatura adotam, em algum ponto, uma relação básica entre tensão e deformação, que é justamente uma das relações obtidas neste trabalho. Por exemplo, dos parâmetros numéricos aqui levantados, alguns estão relacionando propriedades fundamentais à tração e relaxação, como os parâmetros K e M, Tabela 10.1 (material 60/40-C), que descrevem a curva tensão×deformação numa dada temperatura e sob uma determinada taxa de deformação, e os parâmetros A, D e G, Tabela 10.4 (material 60/40-C), que descrevem a curva tensão×tempo numa dada temperatura e sob uma determinada taxa de deformação. Para o desenvolvimento de modelos mais elaborados, no entanto, além destas relações fundamentais são necessários critérios de ruptura, que devem levar do comportamento unidimensional experimental ao comportamento tridimensional. Estes critérios não são estudados neste trabalho. Ainda assim, o estudo experimental realizado poderá ser ainda utilizado, fazendo-se estudos sobre as porções dos diagramas em grandes deformações e próximo à ruptura, para se analisar quais componentes de tensão são mais críticas à ruptura e, assim, lançar as bases de um critério de plasticidade. Tais porções dos diagramas não foram utilizadas, pois estão fora do escopo deste trabalho, que trata do estudo destes materiais para simulação numérico-experimental. No entanto, todos os dados dos ensaios completos até ruptura estão registrados, e poderão ser futuramente analisados.

O estudo numérico-experimental realizado, em seu aspecto geral, tem duas características importantes: (i) caracterização ampla do comportamento, i.e., utilização de ensaios além do de tração simples, (ii) utilização de expressões algebricamente/numericamente simples ou diretas. Com isso, dá-se uma maior ênfase ao estudo do comportamento fenomenológico propriamente dito. O aperfeiçoamento da formulação, ou mesmo a utilização de outros tipos algébricos, como polinômios ou "splines", seja para todos os casos ou ainda formulações diferenci-

adas para cada comportamento ou material, são passos seguintes no desenvolvimento do modelo ora iniciado. Isto decorre, inicialmente, das próprias características deste trabalho em si, que se situa na fase inicial de desenvolvimento deste modelo. Esta primeira etapa partiu do projeto e aperfeiçoamento dos ensaios e equipamentos, realizou ensaios para a formação de uma base de dados sistemática (até então inexistente), e ainda efetuou uma descrição inicial dos fenômenos envolvidos para poder quantificar o comportamento básico. Por outro lado, o equacionamento utilizado foi desenvolvido tendo em vista a utilização das resinas fotovisco-plásticas como material de modelagem.

11.5 Resultados Experimentais

O comportamento típico à tração de qualquer uma das proporções de mistura de resinas estudadas tem, em resumo, as seguintes características básicas:

- a uma mesma temperatura, aumentando-se a taxa de deformação aplicada, aumenta-se a tensão atuante para uma mesma deformação;
- a uma mesma taxa de deformação, aumentando-se a temperatura, diminui-se a tensão para uma mesma deformação.

Para a faixa de valores de temperatura e da taxa temporal de deformação utilizados nestes ensaios, quais sejam, 38°C a 58°C e 0,060 % s⁻¹ a 0,600 % s⁻¹ para o material 60/40-C, 38°C a 56°C e 0,048 % s⁻¹ a 0,138 % s⁻¹ para o material 70/30-C, 49°C a 70°C e 0,024 % s⁻¹ a 0,078 % s⁻¹ para o material 80/20-C, o efeito da temperatura é bem mais intenso no aumento da força resultante. Isto é mostrado pelos gráficos das Figuras A1.1 a A1.4. Na seqüência dos gráficos das Figuras A1.1a, A1.1b, A1.1c e A1.1a, percebe-se que a tensão máxima varia significativamente do gráfico inferior ao superior, por exemplo de 0,003 kN/mm² a 0,02 kN/mm² com um aumento de 667% na Figura A1.1a, de 0,006 kN/mm² a 0,03 kN/mm² com um aumento de 500% na Figura A1.1c, enquanto que a variação entre as tensões máximas de gráficos

na mesma posição, i.e., na mesma temperatura, em colunas sucessivas, i.e., em velocidades crescentes, nestas figuras não é tão significativa, por exemplo de 0,020 kN/mm² no 1º gráfico da Figura A1.1a para 0,030 no 1º gráfico da Figura A1.2a, um aumento de 150%, e de 0,010 kN/mm² no 3º gráfico da Figura A1.1a para 0,018 no 3º gráfico da Figura A1.2a, um aumento de 180%.

Ao se observarem as curvas de tração monotônica contínuas, Figuras 9.4 a 9.6, constata-se que alguns diagramas não apresentam uma curva somente crescente. Certas curvas $\sigma \times \epsilon$ crescem, depois decrescem, e voltam a crescer mais uma vez, até a ruptura final, como na Figura 9.6a e b. Tal comportamento é largamente registrado na literatura, e possivelmente se refere ao deslocamento interno das longas cadeias poliméricas, que terão momentos de maior ou menor resistência devido a maior ou menor dificuldade destas cadeias em se movimentarem, i.e. se esticarem livremente após superarem os mecanismos internos de resistência, até possível ruptura de cadeias, quando então a resistência cai, havendo finalmente novo aumento da resistência, até o início da ruptura final por diminuição de área.

Nos gráficos para um ensaio de tração completa, Figuras 9.4 a 9.6, observa-se que, nos materiais mais rígidos 70/30-C e 80/20-C, quanto maior a resistência, mais o gráfico se mostra como uma curva dividida em duas porções, com duas inclinações distintas, uma inicial acentuada, e outra posterior quase imperceptível, como mostram as Figuras 9.5c, 9.5e, 9.6a, 9.6c, 9.6d. Por outro lado, no material mais viscoso 60/40-C e nos gráficos com tensões em níveis inferiores dos outros materiais observa-se uma curva única, com uma curvatura mais suave, como nas Figuras 9.4a, 9.4b, 9.4d, 9.4e, 9.5a, 9.5b, 9.5d, 9.6b, 9.6e. Assim, uma maior viscosidade não implica tensões menores, mas sim uma curva mais suave.

Característica interessante deste material se refere a um processo interno de "relaxação-

recuperação”, que ocorre durante ensaios realizados a altas temperaturas e baixas taxas de deformação. Combinações de alta temperatura com baixa taxa de deformação resultam diagramas tensão×deformação inteiramente ondulados, completamente diferentes dos esperados, como mostrado nas Figuras 9.5d e 9.6e. Neste tipo de diagrama, a tensão sobe até um certo nível, e depois diminui, como se existisse uma relaxação momentânea, voltando a subir logo após, como num processo de recuperação. Isto se repete sucessivamente, com a tensão dos picos e vales crescendo, até a ruptura final. Além deste diagrama claramente atípico, outros diagramas, mesmo aparentemente típicos, fogem da tendência geral de aumento da curvatura do diagrama, como o diagrama da Figura 9.5b. Trata-se, neste caso, de uma transição entre os diagramas típicos esperados e os diagramas inteiramente ondulados. Uma explicação para a ondulação pode ser um “recozimento” durante o próprio ensaio, já que as taxas de deformação são muito baixas nestes casos e o ensaio se torna bastante longo, onde o recozimento aliviará em tempo real as deformações induzidas pela tração. Assim, o diagrama tensão×deformação, para algumas velocidades e taxas de deformação, apresentará uma forma sinuosa do regime viscoplástico, e não um formato somente crescente e posteriormente somente decrescente como nos demais diagramas, compare os diagramas das Figuras 9.5d e 9.6e com os demais diagramas das Figuras 9.5 e 9.6. Outra característica marcante em todos os diagramas é a presença de uma pequena diminuição instantânea de tensão, quase imediatamente recuperada, próximo à ruptura, identificável em todos os gráficos das Figuras 9.4 a 9.6, na forma de um pequeno “risco” vertical a partir da curva, ou um pequeno “y”, na porção próxima à ruptura. Trata-se da versão, para os polímeros, do aparecimento da estricção, no entanto não se verificando o aparecimento de um “pescoço”, mas sim de uma diminuição localizada da área da seção transversal devido ao início de uma trinca. Isto ocorre através de uma primeira fratura macroscópica quase instantânea, de dimensões consideráveis (variável, até cerca de 20% da área). Nos corpos de prova rompidos, observam-se geralmente duas zonas distintas na seção transversal rompida, uma zona análoga à fratura frágil nos metais, i.e. lisa e brilhante,

proveniente da redução de área devido à fissura instantânea localizada (versão da estrição para os polímeros mencionada acima), e outra análoga à fratura dútil, composta por uma superfície rugosa e fosca, proveniente de rupturas bem pequenas que continuam até a separação final do corpo de prova.

Dentre os diagramas, alguns mostram uma pequena ondulação única ou queda de tensão logo no início do ensaio, como nas Figuras 9.4a e 9.5b. No decorrer dos ensaios verificou-se que esta ondulação inicial assemelha-se a uma versão de "escoamento" para estes materiais, não sendo no entanto perfeitamente sistemática. De fato, vários gráficos experimentais mostram um decaimento de tensão logo no início do ensaio, com posterior recuperação, com e sem uma espécie de patamar. Diversos tipos de decaimentos são encontradas, confira as Figuras A1.1 a A1.4. Estes decaimentos se mostram:

- quase imperceptíveis, como no 5º diagrama da Figura A1.1a, 1º diagrama da Figura A1.1c, 4º diagrama da Figura A1.3b;
- razoavelmente nítidos, como no 1º e 2º diagramas da Figura A1.1a, 5º diagrama da Figura A1.3b, 2º diagrama da Figura A1.4b, 1º diagrama da Figura A1.4c;
- bastante pronunciados, como no 3º diagrama da Figura A1.2b, 3º diagrama da Figura A1.3b, 4º diagrama da Figura A1.3c.

Trata-se de uma versão de escoamento para os materiais poliméricos, que, no entanto, não se verifica entre regimes elástico e viscoplástico, mas sim no início do regime único viscoelastoplástico. O escoamento não é desconhecido dos materiais poliméricos, no entanto não é comumente encontrado na viscoplasticidade. No caso estudado, as resinas utilizadas na série sistemática final de ensaios têm um baixo grau de copolimerização, e produzem um material mais ressecado, menos viscoso, quando comparado com material produzido com resina com maior grau de copolimerização (mais viscosa). Isto tende a aproximar o comportamento destes materiais em direção à plasticidade, em alguns casos, o que possivelmente cause o aparecimento deste escoamento.

Além do aparecimento não perfeitamente sistemático do "escoamento", uma inspeção visual dos diagramas tensão×deformação mostra que o comportamento viscoelastoplástico não é *perfeitamente ou uniformemente unívoco* em seus diagramas como o comportamento elastoplástico. Consideremos, inicialmente, que o comportamento elastoplástico, praticamente insensível às variações de temperatura ou da taxa de deformação dentro de limites amplos, se dá sempre de forma única, sem modificações sensíveis, a não ser variações estatísticas. De modo bem diverso, a viscoplasticidade é um processo essencialmente dependente do tempo e da temperatura, com deformações consideráveis, estando o material sujeito a um desenvolvimento de deformações internas considerável e bastante complexo com relação à movimentação das longas cadeias poliméricas. Sendo assim, o fluxo interno de tensões/deformações na viscoplasticidade pode resultar macroscopicamente certas modificações não perfeitamente uniformes nos diagramas. De fato, as diversas seqüências de diagramas das Figuras A1.1 a A1.4 não se mostram perfeitamente consistentes em suas modificações. Certas seqüência de diagramas se mostram mais uniformes em sua modificações, como na Figuras A1.1b (com exceção do 2º diagrama), onde todos são aproximadamente iguais a não ser pelos valores crescentes de tensão, Figura A1.2a, analogamente à anterior, com um "abaixamento" na porção central do diagrama similar a todos, Figura A1.3a, analogamente à A1.1b, Figura A1.4a (com exceção do 4º diagrama), onde há uma transformação coerente do diagrama desde o primeiro ao último, Figura A1.4b, analogamente à A1.4a e Figura A1.4c (com exceção do 1º diagrama), também analogamente à A1.4a. No entanto, as demais seqüências apresentam diagramas com vários padrões de mudança de formas, principalmente relacionado com o "escoamento" inicial mencionado acima, que pode sensivelmente mudar o formato da curva. Isto é documentado na literatura (Schultz, 1974) para polímeros semicristalinos, onde diferentes taxas de deformação, a uma mesma temperatura, podem produzir "instabilidades" no comportamento, como o aparecimento de pequenos "picos" no diagrama. No caso em estudo, deve existir uma componente interna que vai introduzir uma certa instabilidade. Isto seria de se esperar, consi-

derando-se a classificação reológica do comportamento viscoso, intermediária entre um sólido e um fluido (Javornicky, 1974). Já que certas características do fluido são atribuídas a este comportamento, como a fluidez, também certos fenômenos típicos de fluidos, como mudança de regime, podem ser procurados e identificados no comportamento viscoso. É clara a existência de uma certa “turbulência”, ou de uma componente de instabilidade no comportamento deste material. Os processos internos “quase fluidos” ligados ao “desenrolar” das grandes cadeias poliméricas devem estar na raiz destas instabilidades. Não foram aqui identificadas as variáveis responsáveis pelo aparecimento (ou não) do escoamento e da não uniformidade geral entre mudanças. Além de estar fora do tipo de caracterização realizada neste trabalho, essencialmente macroscópica, a presença ou não destas irregularidades não afeta sensivelmente os resultados para as curvas em separado, já que na linearização da curva total a presença ou não de um pequeno pico local ou ligeiras mudanças no formato da curva não influi significativamente nos parâmetros K e M.

É interessante observar que a temperatura não é o fator preponderante no fenômeno da relaxação, no que se refere ao seu desenvolvimento inicial mais ou menos rápido, como seria de se esperar fazendo uma extensão do que acontece com a tração. O desenvolvimento inicial da relaxação está ligado à velocidade com que se atinge um determinado nível de tensão: quanto mais rápida for a taxa de deformação da tração, mais rápida será a relaxação, conforme mostra a sucessão de diagramas $F \times t$ das Figuras A1.6, A1.8 e A1.10. Isto é especialmente observado contrastando-se as Figuras A1.6a e A1.6d, onde a curva de relaxação $F \times t$ da Figura A1.6d, realizada após uma tração com taxa $\dot{\epsilon} = 0,006 \text{ s}^{-1}$, apresenta uma queda de quase 2 kN em 5 s, enquanto que a queda na Figura A1.6a atinge pouco mais de 0,5 kN em 5 s. Isto pode ser devido ao fato de que, ao se realizar uma tração mais rapidamente, ativam-se primeiro mecanismos internos mais fáceis de se estenderem, ao passo que, se se faz uma tração bem mais lenta, é dada oportunidade para que todos os mecanismos existentes sejam ativa-

dos e participem da deformação, criando depois barreiras para a relaxação. Como não foi feita uma análise das estruturas internas subjacentes, o que está fora dos objetivos do trabalho, não podemos aqui citar tais mecanismos especificamente, somente lembrando que, conforme descrito no Capítulo 5, os principais mecanismos de deformação são o estiramento das cadeias básicas dos polímeros e suas ramificações, e das estruturas tridimensionais da estrutura como um todo.

A variação dos coeficientes K e M nem sempre foi perfeitamente consistente, confira os coeficientes listados no Apêndice 2, itens A2.1-2, A2.2-2, A2.3-2. Em cada taxa de deformação, em todos os materiais, um ou outro coeficiente fugiu sensivelmente dos valores esperados, i.e. de uma variação monotonicamente crescente, como nos pontos marcados com um asterisco ("**") na seguinte série de valores para o material 60/40 na taxa $\dot{\epsilon} = 0,0006 \text{ s}^{-1}$:

θ	K	M	
39	0.1730777	0.6329494	
43	0.1046264	0.5519194	*
46	0.1178489	0.7127961	
50	0.0307471	0.421229	*
54.5	0.0346255	0.716438	
57	0.0129801	0.3440971	

No entanto, somente em casos de um valor altamente divergente o mesmo foi ignorado na regressão. Analogamente ao comentado no item 11.2, com relação a estudos estatísticos, uma quantidade maior de dados obviamente ajuda na análise, mas análises estatísticas neste caso, mesmo não tão extensas, são proibitivas, conforme mostrado neste mesmo item 11.2. Segundo a metodologia utilizada, procura-se avaliar os resultados com o melhor julgamento possível, baseado em experiência adquirida durante o próprio estudo sobre o comportamento dos materiais, durante a análise dos melhores resultados dentre os já obtidos. Assim, observa-se que, em todas as séries do Apêndice 2, itens A2.1-2, A2.2-2, A2.3-2, aparecem valores que não seguem o padrão geral. No entanto, ao final, estes valores são suavizados pela regressão, e os respectivos coeficientes de regressão são significativos para descrever a relação pretendida.

No caso mostrado acima, para o material 60/40-C, obteve-se $r^2 = 0.9050673$, um coeficiente perfeitamente aceitável para o processo em estudo.

Com relação aos coeficientes de correlação, muitos não mostraram um bom ajuste de equações. Isto é mostrado, para o material 60/40-C, pelo valor de $r^2=0,807$ na Tabela 10.2 e $r^2=0,717$ na Tabela 10.3, ambos para tração. Para relaxação, encontram-se vários valores de r^2 próximos a 0,800 na Tabela 10.4, vários r^2 próximos a 0,800 e valores de $r^2=0,718$ e $r^2=0,683$ na Tabela 10.5, e ainda vários r^2 próximos a 0,800 e valores de $r^2=0,630$ e $r^2=0,603$ na Tabela 10.6. Para os três materiais, conforme indicado no item 10.5.1, conclui-se o seguinte:

- o material 80/20-C apresenta ótimos coeficientes de correlação, tanto para tração, maiores que 0,99, quanto para relaxação, maiores que 0,97;
- o material 60/40-C apresenta alguns coeficientes bons na tração, 0,94 e 0,98, no entanto mostrando um coeficiente de 0,71, e na relaxação coeficientes em geral maiores que 0,93, no entanto com 3 coeficientes baixos, de 0,76 a 0,78;
- o material 70/30-C apresenta um coeficiente ótimo na tração, 0,99, e dois péssimos, iguais a 0,51, sendo que na relaxação não apresenta nenhum coeficiente de fato considerável.

Os materiais 80/20-C e 60/40-C, assim, um nitidamente mais rígido e o outro nitidamente mais viscoso, se adaptaram bem à modelagem idealizada, ou seja, as equações obtidas podem ser utilizadas para descrever o comportamento destes materiais. No entanto, as relações do material 70/30-C *não* apresenta coeficientes de correlação linear que justifiquem seu uso. Sendo assim, deve-se descartar o material 70/30-C como material de modelagem. Esta discrepância de coeficientes do material 70/30-C pode estar ligada ao comportamento não perfeitamente unívoco das resinas, indicado no início deste item (11.5). Assim, estando o material 70/30-C a meio caminho entre um comportamento mais rígido ou mais viscoso, vai tender ora a um tipo de comportamento, ora a outro, o que é refletido nas relações, que não se ajustam entre si (de acordo com as necessidades da modelagem aqui realizada). Este material mostra, assim, um comportamento com um certo grau de indeterminismo, com relação a um tratamen-

to uniforme de seu comportamento amplo, e talvez, para este material, seria melhor continuarem-se os estudos conforme a prática da literatura, isto é, o estudo de solicitações particulares.

Os gráficos de retração da deformação, ϵ_{xt} , Figuras A1.5 a A1.10, permitem constatar a existência do comportamento elástico. A elasticidade se mostra através da porção inicial da curva, vertical e paralela ao eixo dos ϵ 's, o que indica um retorno imediato da deformação. Esta parcela é bastante evidente nos gráficos das Figuras A1.5a, A1.5d, A1.5e, A1.6a, A1.6b, A1.6d, A1.7a, A1.7b, A1.7c, A1.8a, A1.9b A1.9c. A Figura A1.7a é um caso de interesse especial para a visualização da elasticidade. No ensaio desta figura, o corpo de prova se rompeu no início da primeira tração, antes do aparecimento de grandes deformações viscoplásticas. Sendo assim, a deformação elástica se mostra bem maior que a viscoplástica, o que é mostrado por uma porção significativa do gráfico perpendicular ao eixo dos ϵ 's. Em todos os outros diagramas, existe uma deformação viscoplástica acumulada em sete ou oito trações, que superaram a deformação elástica. Por outro lado, o retorno da deformação com o tempo se refere a uma deformação viscoelástica. Comparando-se deformações elásticas e viscoelásticas, na Figura A1.6c a deformação que retornou de $\epsilon=0,170$ até aproximadamente $\epsilon=0,155$ é elástica, já que ocorreu num tempo bastante curto, quase instantâneo (1s a 2s), enquanto que a deformação retornada de $\epsilon=0,155$ a $\epsilon=0,115$ é viscoelástica, pois leva cerca de 600 s para atingir o valor final. Deve-se ter em mente que, em viscoplasticidade, as medidas são sempre relativas, e a viscosidade sempre aparece, em maior ou menor grau. O tempo de 1 a 2s é ainda considerável na elastoplasticidade.

A partir destes gráficos de retorno da deformação, ϵ_{xt} , Figuras A1.5 a A1.10, bem como a partir de observações durante os ensaios sobre a retração das partes do corpo de prova após a ruptura, verifica-se que a *elasticidade* presente no regime viscoplástico aqui estudado pode ser considerada como estando constituída de duas partes: uma parte instantânea e,

portanto, não-viscosa, como a deformação de 0,17 a 0,155 na Figura A1.6c, e uma parte dependente do tempo, ou seja, viscosa, como a deformação de 0,155 a 0,115 na Figura A1.6c. Temos, portanto, Elasticidade e Viscoelasticidade atuantes. O estudo das curvas ϵ_{xt} , procurando-se uma maneira de se quantificar a elasticidade e viscoelasticidade, para posteriormente subtraí-las da viscoplasticidade na tração, deverá fornecer uma metodologia para se separar o comportamento elástico (viscoso e não-viscoso) do comportamento viscoplástico. Este estudo não é de interesse neste trabalho, já que se pretende quantificar o comportamento global elastoviscoplástico do material para o projeto de simulações.

O desenvolvimento das tensões em ensaios com materiais viscoplásticos é bastante complexo, pois se trata do desenvolvimento de deformações consideráveis, sujeitas a processo de relaxação e fluência. Sendo assim, qualquer ação sobre o corpo de prova, como o próprio modo de fixação, vai influenciar o comportamento. Como exemplo, o grau de compressão das garras sobre a cabeça do corpo de prova na fixação vai produzir certos efeitos nos resultados, como mostram os “laços” intermediários nos ensaios cíclicos, junto ao zero da tensão, como nas Figuras A1.16a, b e f, que resultam um comportamento final diferente, dependente da maior ou menor pré-compressão. Quando da fixação, introduz-se uma pré-compressão maior ou menor na cabeça dos corpos de prova, ao se apertar a tampa de fixação rosqueada. Esta tampa, juntamente com as cunhas, produz um esforço de compressão da cabeça do corpo de prova sobre a base de apoio da mesma, na mesma direção dos esforços de tração/compressão que serão aplicados no ensaio. Esta pré-compressão provoca uma pré-tensão, que se relaxa com o tempo após finalizar-se a fixação. No entanto, a deformação provocada permanece. Na primeira tração, após a fixação, não se parte, assim, de um estado “zero” de deformações (como na Figura A1.16c, d, g e h), pelo menos no que se refere às porções de material das cabeças do corpo de prova. A pré-deformação que ficou vai, assim, influ-

enciar o desenvolvimento das deformações ao longo do corpo de prova, principalmente por se tratar de uma reversão de esforços.

Pode-se também observar o desenvolvimento complexo das tensões internas em comportamento viscoso através do desenvolvimento das franjas nos ensaios óticos. Nestes ensaios, quando se aplica uma nova punção, após uma relaxação, pode-se ver esta nova punção inicialmente “desfazendo” o estado de deformações anteriormente existente, para somente depois aparecerem franjas devido somente à uma punção pura, cf. as descrições do item 9.6.2 e as imagens no vídeo. Quando se retira a punção, no final do ensaio, o material não volta a um estado indeformado imediatamente, mas observa-se, sucessivamente, uma diminuição e depois um aumento de tensão em vários pontos, até que os aumentos cessam e a tensão passa somente a diminuir. Tudo como resultado do “fluxo” ou movimentação complexa da estrutura interna.

Quando de uma simulação em Fotomecânica, não se quer simplesmente uma mistura que simule mecanicamente o comportamento do protótipo. Quer-se uma mistura que possibilite a formação de parâmetros óticos de maneira sensível. Sendo assim, uma boa sensibilidade do material, i.e., uma boa resposta ótica é fundamental. Desse modo, a série de ensaios óticos sistemáticos se mostrou necessária para demonstrar, oticamente, a capacidade de cada mistura em produzir um desenvolvimento de franjas de maneira sensível, cf. os ensaios na fita de vídeo, onde a 3ª punção provoca um nível de franjas considerável. Na realidade, numa simulação experimental, serão as quantidades óticas que irão descrever o desenvolvimento das quantidades mecânicas.

Com relação ao comportamento observado no vídeo, relaxação, neste caso, não significa simplesmente uma diminuição de tensões. Aqui não se trata de um ensaio uniaxial, mas uma flexão a três pontos, onde ocorre uma “punção” no meio da viga bi-apoiada e uma distribu-

ição complexa de tensões. A relaxação, neste caso, vai incluir uma “redistribuição” de esforços por sobre o domínio. Com relação à influência da taxa de deformação, *não* é válido o raciocínio de que, ao se aumentar a taxa de deformação, vai-se chegar a uma mesma distribuição de tensões, só que mais ou menos rápido. Deve-se lembrar, dos ensaios de tração monotônica, que uma taxa temporal de deformação maior não só provoca um nível de tensões maior, como também modifica a forma do diagrama, cf. as Figuras 9.4 a 9.6. Assim, ao se aumentar a taxa de deformação, num ensaio ótico, vai-se provocar uma quantidade maior de franjas, mas também uma distribuição diferente.

O comportamento ótico em casos viscosos, onde existe um desenvolvimento complexo das tensões/deformações com o tempo, só é possível de ser visualizado através do exame de filmagens, ou então de fotografias sucessivas. Para fins de caracterização geral do comportamento, neste trabalho faz-se uma inspeção visual dos ensaios filmados para identificar-se o nível de aparecimento de franjas e a facilidade de distinção entre as mesmas, conforme a descrição do item 9.6.2 sobre as amostras de ensaio na fita de vídeo. Esta identificação é em parte subjetiva e em parte quantitativa, já que se podem contar as franjas existentes. Para níveis de deformação muito pequenos, como na primeira punção, não houve uma formação de franjas a nível satisfatório. No entanto, ensaios viscoplásticos são realizados geralmente em grandes deformações e, assim, o nível de franjas para este caso, que é o da terceira punção, parece satisfatório para descrever o estado de tensões/deformações sobre todo o domínio. Trata-se de um indicio sobre a maior ou menor facilidade para a quantificação das franjas isocromáticas. Os problemas da quantificação de franjas propriamente dita, num caso específico de simulação, deverá contar com recursos para trabalho quadro a quadro das imagens filmadas. Cada quadro deverá ser analisado, e o conjunto de quadros fornecerá o desenvolvimento das deformações, em intervalos de tempo segundo os intervalos entre quadros filmados. Será necessário, também, uma calibração para cada temperatura e cada taxa temporal de deformação.

Outra questão envolve um estudo para a quantificação das franjas a partir de cada quadro filmado, já que não se poderá utilizar do expediente de exame através do giro das placas analisadoras (para se "levar" uma franja até um ponto), comum na Fotoelasticidade Plana ou no congelamento de tensões. Este tipo de estudo é análogo àquele efetuado para a análise de franjas fotografadas. Uma opção se refere à fixação na tela do monitor de malhas de referência, analogamente ao que se faz num polariscópio plano.

Assim, a quantificação, com precisão relativa, do desenvolvimento das franjas durante um ensaio fotoviscoelastoplástico depende de estudos e desenvolvimento de equipamentos. O Departamento de Projetos e Sistemas Mecânicos ainda não possui equipamentos necessários para este tipo de análise, ficando a determinação quantitativa dos experimentos realizados condicionado à aquisição ou desenvolvimento de tais recursos. No entanto, além de comprovada qualitativamente a eficiência das misturas para estudos fotoviscoelásticos, levantou-se uma base de dados significativa para posterior análise por tais equipamentos.

CONCLUSÃO

Conforme apresentado neste trabalho, a viscosidade é uma propriedade básica dos materiais, que produz um comportamento tal que a tensão e a deformação se tornam sensivelmente dependentes do tempo, na forma da taxa temporal da solicitação aplicada, e também da temperatura de ensaio, ambos influenciando na resposta do material. Os temas desta dissertação foram os ensaios mecânicos e óticos, a identificação de parâmetros caracterizadores e a modelagem do comportamento viscoplástico mecânico, bem como o levantamento do comportamento ótico, relativos a misturas de resina de poliéster, com a utilização simultânea de conceitos de plasticidade e viscoplasticidade, ensaios mecânicos, materiais poliméricos, fotomecânica, direcionados para a análise numérico-experimental de tensões e deformações. As contribuições principais desta dissertação são:

- o desenvolvimento de um estudo inédito sobre as formulações de diagramas tensão-deformação, fundamentais em estudos de Plasticidade e Viscoplasticidade, culminando no desenvolvimento de uma formulação que generaliza as equações exponenciais usualmente empregadas, formulação dada pelas eq. (3.5) e (3.6), denominadas modelos 1 e 2, modelos estes compactados na eq. (3.8);
- desenvolvimento de uma formulação interdependente (também chamada acoplada ou “imbricada”) para a descrição do comportamento à tração e à relaxação, sintetizada pelas eqs. (10.13) e (10.14), e ainda de uma formulação para a descrição do comportamento à fluência, eq. (10.9), a partir de uma série de resultados de ensaios envolvendo as variáveis tensão, deformação, taxa de deformação, tempo, e temperatura, com as condições de ensaio indicadas nas Tabelas 9.1 a 9.3 (resumidas nas Tabelas 10.10 a 10.12), em cuja formulação se relacionam propriedades físicas e parâmetros numéricos caracterizadores do

comportamento, conforme exemplificado no item 10.1 para a tração, 10.2 para a relaxação e 10.3 para a fluência, sendo este tipo de formulação ainda não utilizado na Fotomecânica.

- desenvolvimento de uma metodologia inédita de ensaios, conjugada a esta formulação para o estudo de materiais poliméricos fotomecânicos, cujos materiais, equipamentos e metodologia de ensaios e formulação estão descritos respectivamente nos itens 8.1, 8.2 e 8.3;
- desenvolvimento de equipamento de ensaio de baixo custo, composto por um forno com temperatura controlada e garras especiais, para estudos do comportamento de corpos de prova fotoviscoplasticos, conforme descrito nos itens 8.2.1 e 8.2.2, formando um conjunto de dispositivos para ensaios ainda não disponível na área;
- formação de duas bases de dados inéditas em Fotoviscoplasticidade, uma com resultados de ensaios de tração com relaxações múltiplas, contendo resultados de tração, relaxação, retração da deformação após ruptura, além de resultados de ensaios cíclicos, e outra com resultados filmados de ensaios óticos de punção e relaxação em flexão a três pontos, todos sistematicamente a várias temperaturas e várias taxas de deformação conforme as Tabelas 9.1 a 9.3 para ensaios de tração-relaxação-retração, Tabela 9.4 para ensaios cíclicos e Tabela 9.5 para ensaios óticos.

A partir do equipamento, metodologia de ensaios, base de dados e formulações desenvolvidas, sugerem-se vários temas de continuidade, a partir deste trabalho. O equipamento pode ser utilizado no ensaio de materiais poliméricos em geral, ou plásticos, no estudo de

suas propriedades em temperaturas controladas até 80°C. A metodologia de ensaios pode ser aplicada para a realização destes testes em outros materiais poliméricos e misturas, fotomecânicos ou não, para sua caracterização ampla com relação à variação simultânea da taxa temporal de deformação e da temperatura. As propriedades levantadas podem ser comparadas àquelas das misturas de resinas aqui utilizadas, principalmente comparando-se as propriedades de materiais fotomecânicos. Utilizando-se a base de dados levantada, pode-se fazer estudos sobre a formulação da mesma, procurando outros tipos de formulações, num estudo algébrico-numérico mais aprofundado da descrição dos diversos comportamentos. A fluência, em especial, pode ser bastante explorada, pois apesar de ser aqui um comportamento derivado da relaxação, podem ser feitos vários tipos de formulações para a fluência análogos aos realizados para a tração e relaxação, relacionados à variação dos diversos coeficientes da fluência com a temperatura e taxa de deformação. Há, ainda, as porções não utilizadas dos ensaios, referentes à porção final do diagrama $\sigma \times \epsilon$ próximo à ruptura, que podem ser utilizados para estudo das condições de ruptura (fora do escopo deste trabalho). Finalmente, os gráficos e formulações aqui utilizados podem também ser incorporados em programas de simulação numérica do comportamento viscoplástico à tração e à relaxação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 1992, "Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração - NBR 6152".
- Adams, C. and Beese, J. G., 1974, "Empirical Equations for Describing the Strain-Hardening Characteristics of Metals Subjected to Moderate Strains", Trans. ASME, series H, vol. 96, pp. 123-126.
- Adams, M. J., Briscoe, B. J., Corfield, G. M., Lawrence, C. J. and Papathanasiou, T. D., 1997, "An analysis of the plane-strain compression of viscoplastic materials", J. Appl. Mech., vol. 64, pp. 420-424.
- Alfrey, T. and Gurnee, E. F., 1967, "Organic Polymers", Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Arruda, E. M., Ahzi, S., Li, Y. and Ganesan, A., 1997, "Rate dependent deformation of semi-crystalline polypropylene near room temperature", J. Eng. Mat. Tech., vol. 119, pp. 216-222.
- ASTM (American Society for Testing and Materials), 1978, "Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-value) of Sheet Materials - Method number E 646-78".
- ASTM (American Society for Testing and Materials), 1993, "E646-93 Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Sheet Materials".
- Baker, J. F., Horne, M. R. and Heyman, J., 1956, "The Steel Skeleton, vol II: Plastic Behaviour and Design", The Cambridge University Press, Cambridge.
- Barbosa, J. M., Mattos, H. C. e Rachid, F. B. F., 1993, "Simulação de Carregamentos Cíclicos a Alta Freqüência em Barras Elastoviscoplasticas", XII COBEM, Brasília, Brasil.
- Bazant, Z. P. and Cedolin, L., 1991, "Stability of Structures: Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories", Oxford University Press, Oxford.
- Belhedi, B., 1988, "Étude Préliminaire pour la Comprehension d'une Certaine Classe de Lois de Comportement", Tese grau 'DEA-Science des Matériaux', Univ. de Besançon, França.

- Billa, R., 1989, "Sur le Comportement de Deux Aciers Inoxydables Austénitiques (17-12 SPH e AMCR 0033); Mise en Evidence des Interactions Dislocations-configurations de Defauts Ponctuels; Propositions pour une Formulation Anisotherme", Tese grau 'Docteur en Sciences pour l'Ingénieur', Univ. de Franche-Comté, França.
- Burger, C. P., 1980, "Nonlinear Photomechanics", *Experim. Mech.*, vol. 20, n. 11, pp. 381-389.
- Burger, C. P. and Gomide, H. A., 1982, "Three-dimensional Strains in Rolled Slabs by Photoplastic Simulation", *Experim. Mech.*, vol. 22, n. 12, pp. 441-447.
- Chaboche, J. L., 1986, "Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity", *Int. J. Plasticity*, vol. 2, n. 2, pp. 149-188.
- Chaudonneret, M., 1977, "Méthode des équations intégrales appliquées à la résolution de problèmes de viscoplasticité", *J. Mécan. Appliquée*, vol. 1, n. 2, pp. 113-132.
- Chen, W. and Zhang, X., 1997, "Dynamic response of Epon 828/T-403 under multiaxial loading at various temperatures", *J. Eng. Mat. Tech.*, vol. 119, pp. 305-308.
- Cherry, B. W., 1992, "Polymer Surfaces", Cambridge University Press, New York.
- Chimisso, F. E. G. e Mattos, H. C., 1993, "Um Modelo de Dano para Barras Elasto-plásticas", XII COBEM, Brasília, Brasil.
- Dally, J. W. and Mulc, A., 1973, "Polycarbonate as a Model for Three-dimensional Photoplasticity", *J. Appl. Mech.*, series E, n. 95, pp. 600-605.
- Datsko, J., 1966, "Material Properties and Manufacturing Processes", John Wiley, New York.
- Delobelle, P., 1988, "Sur les Lois de Comportement Viscoplastique à Variables Internes", *Rev. Phys. Appliqué*, n. 23.
- Dieter, G. E., 1981, "Metalurgia Mecânica", Guanabara Dois, Rio de Janeiro.
- Dieter, G. E., 1988, "Mechanical Behavior of Materials under Tension", in *Metals Handbook*.
- Donnell, L. H., 1938, "Suggested New Definition for Proportional Limit and Yield Point", *Mech. Eng.*, vol 60, nº 11, novewmbro, pp. 837-838.

- Freire, J. L. F., Lage, J. D. and Vieira, R. D., 1983, "Loaded and Unloaded optical Response of Polyester Model Materials", *Experim. Mech.*, vol. 23, n. 12, pp. 450-456.
- Gilat, A. and Pao, Y. H., 1988, "High-rate Decremental-strain-rate Test", *Experim. Mech.*, vol. 28, series A, pp. 332-325.
- Gomide, H. A. and Burger, C. P., 1981, "Three-dimensional Strain Distributions in Upset Rings by Photoplastic Simulation", *Experim. Mech.*, vol. 21, n. 4, pp. 361-370.
- Gomide, H. A. e Oliveira, S. A. G., 1990, "Estudo da Influência do Atrito no Fluxo das Deformações Plásticas em Cilindros Comprimidos, usando Fotoplasticidade", IV Simp. Conform. Plást. Metais, pp. 247-262, São Paulo, Brasil.
- Gopinathan, V., 1982, "Plasticity Theory and its Applications in Metal Forming", John Wiley, New York.
- Govindjee, S. and Reese, S., 1997, "A presentation of two large deformation viscoelasticity models", *J. Eng. Mat. Tech.*, vol. 119, pp. 251-255.
- G'Sell, C. and Souahi, A., 1997, "Influence of crosslinking on the plastic behavior of amorphous polymers at large strains", *J. Eng. Mat. Tech.*, vol. 119, pp. 223-227.
- Hamad, W. Y. and Eichhorn, S., 1997, "Deformation micromechanics of regenerated cellulose fibers using Raman spectroscopy", *J. of Eng. Mat. Tech.*, vol. 119, pp. 309-313.
- Hashigushi, K., 1980, "Constitutive equations of elastoplastic materials with elastic-plastic transition", *J. Appl. Mech.*, vol 47, pp 266-272.
- Hayden, H. W., Moffatt, W. G. and Wulff, J., 1965, "The Structure and Properties of Materials: volume III: Mechanical Behavior", John Wiley, New York.
- Hertzberg, R. W., 1983, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", John Wiley, New York.
- Hertzberg, R. W. and Manson, J. A., 1980, "Fatigue of Engineering Plastics", Academic Press, New York.
- Hill, R., 1985, "The Mathematical Theory of Plasticity", Oxford University Press, Oxford.

- Hirano, T., Imai, Y., Hayashi, Y., 1997, "Photovisco-elasto-plastic Analysis Tested on Polyester by the Scattered-light Method", *Experim. Mech.*, vol. 37, n. 2.
- Hollomon, J. H., 1945, "Tensile Deformation", *Trans. AIME*, vol 162, p. 268.
- Hopperstad, O. S., Remseth, S., 1995, "A return mapping algorithm for a class of cyclic plasticity models", *Int. J. Num. Meth. Eng.*, vol. 38, pp. 549-564.
- Hull, D., 1992, "An Introduction to Composite Materials", Cambridge University Press, New York.
- Hsiao, S.-W., 1997, "Numerical analysis of deep drawing process for thermoplastic composite laminates", *J. of Eng. Mat. Tech.*, vol. 119, pp. 314-318.
- Ishikawa, I. and Tadano, S., 1989, "Photoplastic Stress Analysis Considering Rate Effect", *Experim. Mech.* vol. 29, n. 1, pp. 49-53.
- Javornicky, J., 1974, "Photoplasticity", Elsevier, New York.
- Johnson, A. R., Tessler, A. and Dambach, M., 1997, "Dynamics of Thick Viscoelastic Beams", *J. Eng. Mat. Tech.*, vol. 119, pp. 273-278.
- Johnson, W., Mellor, P. B., 1962, "Plasticity for Engineers", D. Van Nostrand.
- Kachanov, L. M., 1971, "Foundations of the Theory of Plasticity", North-Holland, Amsterdam.
- Kawahara, W. A., 1990, "Uniaxial Compression of Strain-Rate Sensitive Materials", *Closed Loop*, vol. 17, n. 3.
- Kllinsinski, M., 1988, "Plasticity Theory based on Fuzzy Sets", *J. Eng. Mech.*, vol. 114, n. 4.
- Kleemola, H. J. and Nieminen, M. A., 1974, "On the Strain-Hardening Parameters of Metals", *Met. Trans.*, vol. 5, pp. 1863-1866.
- Klisinsk, M., 1988, "Plasticity Theory Based on Fuzzy Sets", *J. Eng. Mech.*, vol. 114, n. 4, pp. 563-582.
- Kraus, H., 1979, "Creep Analysis", John Wiley, New York.
- Krieg, R. D., 1995, "A practical two surface plasticity theory", *J. of Appl. Mech.*, setembro, pp. 641-646.

- Lee, J. H. and Simon, D. F., 1993, "Rate Effect in the Strain Distribution of Necking and Neck Propagation of Polycarbonate Bars using Photoplasticity", III PACAM, São Paulo, Brasil.
- Lee, S. S. and Westman, R. A., 1995, "Application of High-Order Quadrature Rules to Time-Domain Boundary Elements Analysis of Viscoelasticity", *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 38, pp. 607-629.
- Lefebvre, D., Chebl, C., Thibodeau, L. and Khazzari, E., 1993, "A High-strain Biaxial-testing Rig for Thin-walled Tubes under Axial Load and Pressure", *Experim. Mech.*, vol. 23, n. 12, pp. 384-392.
- Lemaitre, J., 1971, "Sur la Détermination des Lois de Comportement des Matériaux Élastoviscoplastiques", Tese de Doutorado, Univ. Paris XI (Orsay), França.
- Lemaitre, J. et Chaboche, J.-L., 1985, "Mécanique des Matériaux Solides", Bordas, Paris.
- Leveque, E., 1992, "A Propos de la Modélisation du Comportement Viscoplastique de l'Acier Inoxydable 17-12 MoSPH entre 550 et 560°C", Tese de Doutorado, Univ. de Franche-Comté, França.
- Li, J. et Weng, G. J., 1997, "Influence of Inclusion Microgeometry on Some Thermomechanical Properties of Isotropic Polymer-Matrix Composites", *J. Eng. Mat. Tech.*, vol. 119, pp. 242-250.
- Lopes, L. V., Al-qureshi, H. A., "Método para Caracterização do Comportamento Plástico de Material Metálico, Segundo a Expressão de Swift", IV Simp. Conform. Plást. Metais, pp. 9-21, São Paulo, Brasil.
- Lubliner, J., 1990, "Plasticity Theory", MacMillan, New York.
- Maire, J. F., 1992, "Études Théorique et Expérimentale du Comportement de Matériaux Composites en Contraintes Planes", Tese grau 'Docteur en Sciences pour l'Ingénieur', Univ. de Franche-Comté, França.
- Massonet, C. E., Save, M.A., 1965, "Plastic Analysis and Design: Volume One: Beams and Frames", Blaisdell.

- Mattos, J. M. A. e Rachid, F. B. F., 1993, "Simulação de Carregamentos Cíclicos a Alta Freqüência em Barras Elastoviscoplasticas", XII COBEM, Brasília, Brasil.
- McClintock, F. A. and Argon, A. S., 1966, "Mechanical Behavior of Materials", Addison-Wesley, Reading.
- Mckeigham, P. C. and Hilberry, B. M., 1991, "An Algorithm for Determining Tensile Properties from Digitally Recorded Tensile Test Data", *Experim. Techn.*, novembro-dezembro.
- Morris, D. H. and Riley, W. F., 1972, "A Photomechanics Material for Elastoplastic Stress Analysis", *Experim. Mech.*, vol. 12, n. 10, pp. 448-453.
- Mróz, Z., 1969, "An attempt to describe the behavior of metals under monotonic and cyclic loads using a more general workhardening model." *Acta Mechanica*, vol. 7, n. 1, pp 199-212.
- Mróz, Z., 1983, "Hardening and degradation rules for metals under monotonic and cyclic loading." *J. Eng. Mat. Techn.*, vol. 105, n. 2, pp 113-118.
- Mróz, Z. and Lind, N.C., 1975, "Simplified theories of cyclic plasticity." *Acta Mechanica*, vol. 22, n.1, pp. 131-152.
- Neal, B. G., 1977, "The Plastic Methods of Structural Analysis", Chapman and Hall.
- Neuder, M., 1980, "Identification des Lois de Comportement de Plasticité à partir de l'Éssai d'Indentation", Tese grau 'Docteur de 3ème Cycle', Univ. Pierre et Marie Curie (Paris VI), França.
- Nielsen, L. E., 1962, "Mechanical Properties of Polymers", Reinhold.
- Nishitani, T., 1979, "Experimental Stress Analysis for Process of Nonsteady Inelastic Deformation by Photoviscoplasticity", *Experim. Mech.*, vol. 19, n. 3, pp 102-108.
- Nishitani, T., 1981, "Photoviscoplastic investigations of slip-line fields and principal-stress trajectories in viscoelastoplastic strip for drawing with back tension", *Experim. Mech.*, vol. 21, n. 6, pp 219-226.
- Nowick, A. S. and Berry, B. S., 1972, *Anelastic relaxation in crystalline solids*, Academic Press, New York.

- Oliveira, L. C., Gomide, H. A., Rade, R. S. L., 1997a, "Determination of the Viscoplastic Characteristics of a Polyester Resin Mixture", XIV COBEM, Bauru, Brasil. (em CD)
- Oliveira, L. C., Gomide, H. A., Rade, R. S. L., 1997b, "Estudo das Características Viscoplasticas de uma Mistura de Resinas de Poliéster", I Sem. Curso Pós-grad. Eng. Mec., Univ. Fed. Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Oliveira, L. C., Gomide, H. A. & Rade, R. S. L., 1998a, "Modelização Básica das Características Viscoplasticas de uma Mistura de Resinas", V CEM-NNE, Fortaleza, Brasil. (em CD)
- Oliveira, L. C., Gomide, H. A., Rade, R. S. L., 1998b, "Caracterização e Modelagem do Comportamento Mecânico e Ótico no Regime Inelástico-Anelástico de Misturas de Resina de Poliéster", II Sem. Curso Pós-grad. Eng. Mec., Univ. Fed. Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Oliveira, L.C, Gomide, H.A. & Rade, R.S.L., 1999a, "Viscoplastic Modeling of the Strengthening and Relaxation of a Polyester Resin", III Sem. Curso Pós-grad. Eng. Mec., Univ. Fed. Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Oliveira, L.C, Gomide, H.A. & Rade, R.S.L., 1999b, "Fenomenologia Típica de Misturas de Resinas Fotoviscoplasticas", VI PACAM, Rio de Janeiro.
- Opperstad, O. S. and Remseth, S., 1995, "A Return Mapping Algorithm for a Class of Cyclic Plasticity Models", Int. J. Num. Meth. Eng., vol 38, pp. 549-564.
- Osgood, W. R., 1940, "A Rational Definition of Yield Strength", ASME Journ. Appl. Mech., vol. 7, nº 2, pp. A61-A62.
- Persoz, B., 1960, "Introduction à l'étude de la rhéologie", Dunod, Paris.
- Phillips, A., 1956, "Introduction to Plasticity", Ronald Press Co., New York.
- Poirier, J. P., 1976, "Plasticité à Haute Température des Solides Cristallins", Éditions Eyrolles, Paris.
- Popelar, C. F. and Liechti, K. M., 1997, "Multiaxial nonlinear viscoelastic characterization and modeling of a structural adhesive", J. Eng. Mat. Tech., vol. 119, pp. 205-210.

- Prasad, P. N. and Williams, D. J., 1990, "Introduction to Nonlinear Optical Effects in Molecules and Polymers", John Wiley, New York.
- Raghava, R. S. and Caddell, R. M., 1973, "A Macroscopic Yield Criterion for Crystalline Polymers", *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 15.
- Rade, R. S. L., 1994, "Une Étude Comparative de Deux Modèles de Comportement Viscoplastique Endommagé pour les Matériaux Composites Stratifiés", Tese, grau 'Docteur en Sciences pour l'Ingénieur', Univ. de Franche-Comté, França.
- Radenkovic, D. et Salençon, J., 1974, "Plasticité et Viscoplasticité", Ediscience-McGrawHill, New York.
- Ramberg, W. and Osgood, W. R., 1943, "Description of Stress-strain Curves by Three Parameters", National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), Techn. Note no. 902.
- Roe, R. J., 1990, "Computer Simulation of Polymers", Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Rojas, F. R. V., Oliveira, L C, Gomide, H A, Rade, R S L, 1998, "Ensaio Caracterizadores das Propriedades Mecânicas em Resinas de Poliéster", V CREEM.
- Shimamoto, A., Takakashi, S., 1990, "Calibration of Materials for Photoelastoplastic Models", *Experim. Mech.*, vol. 30, n. 6.
- Schapery, R. A., 1966, "A theory of nonlinear thermoelasticity based on irreversible thermodynamics", 5th U.S. Nat. Congr. Appl. Mech., ASME, pp. 511-530
- Schapery, R. A., 1969, "On the characterization of nonlinear viscoelastic materials", *J. Polymer Eng. Sciences*, vol. 9, pp. 295-310.
- Schultz, J., 1974, "Polymer Materials Science", Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Schwartz, M. M., 1992, "Composite Materials Handbook", 2^a ed., McGraw-Hill, 459 pp.
- Schwartz, M. M., 1996, "Composite Materials, Volume I: Properties, Non-Destructive Testing, and Repair", 1^a ed., Prentice Hall Professional Technical Reference, 432 pp.
- Seeney, J., Collins, T. L. D., Coates, P. D., Unwin, A. P., Ward. I. M., 1997, "Large deformations of semicrystalline polymer modeled using the necking network concept", *J.*

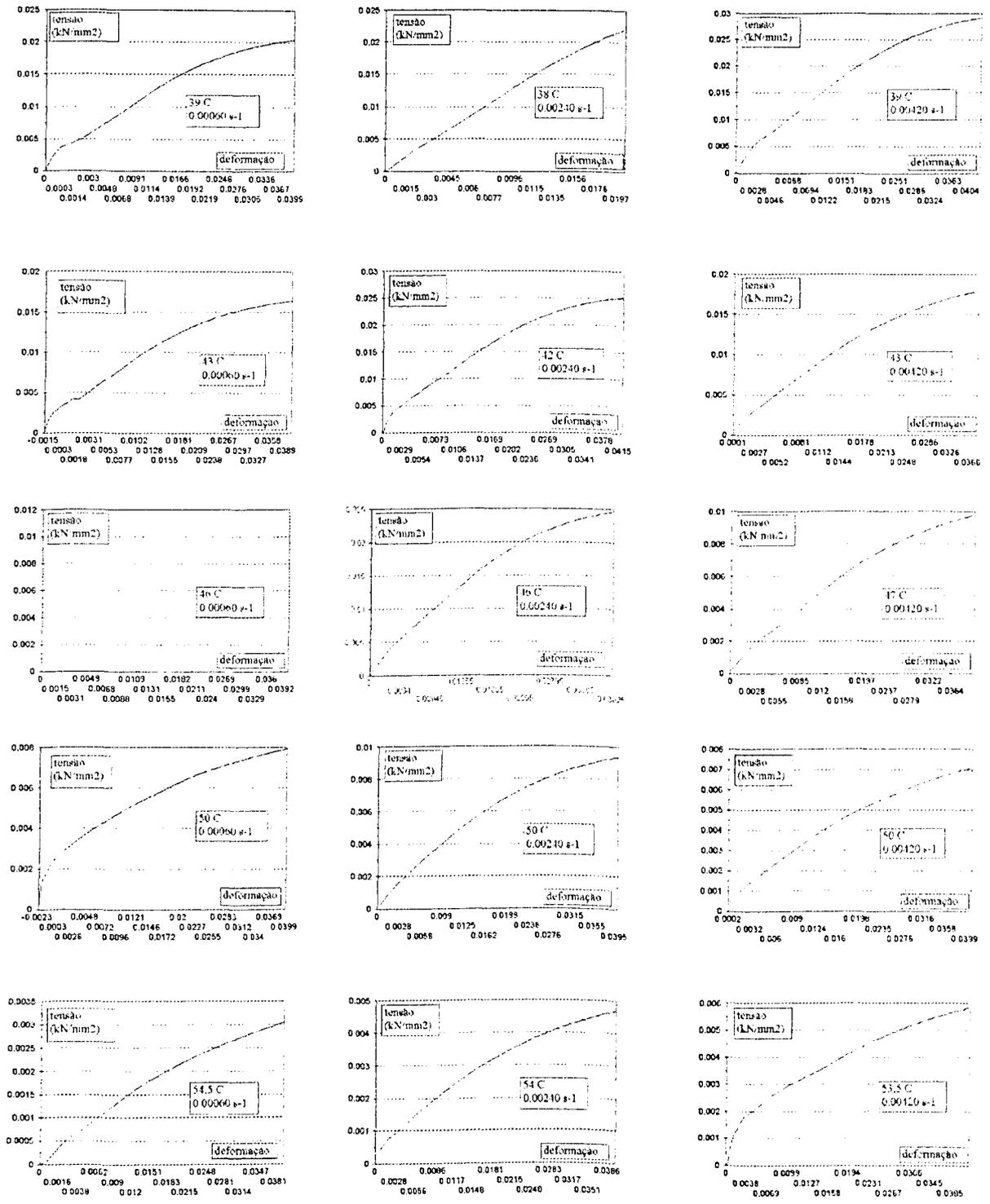
Eng. Mat. Tech., vol. 119, pp. 228-232.

- Sharpe JR., W. N., 1992, "On the Measurement of Elastoplastic Stresses", *Experim. Mech.*, vol. 32, n. 1.
- Shimamoto, A. and Takahashi, S., 1990, "Calibration of Materials for Photoelastoplastic Models", *Experim. Mech.*, vol. 30, n. 6.
- Siqueira, R. C. e Gomide, H. A., 1994, "Identificação das Propriedades Elastoplásticas de Materiais Fotoplásticos", III CEM-NNE, pp. 504-512.
- Souza, S. A., 1982, "Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos", 5ª ed., Edgard Blücher, São Paulo.
- Suresh, S., 1992, "Fatigue of Materials", Cambridge University Press, New York.
- Tachibana, Y. and Krempl, E., 1995, "Modeling of high homologous temperature deformation behavior using the viscoplasticity theory based on overstress (VBO): Part I - creep and tensile behavior", *Int. J. Num. Meth. in Eng.*, vol. 38, pp. 456-461.
- Trivaudey, F., 1988, "Introduction de l'Endommagement de Fluage dans un Modèle Viscoplastique Unifié à Variables Internes - Étude de Deux Alliages Industriels: Acier Inoxydable 17-12 SPH et Inconel 718", Tese para grau de 'Docteur, mention Sciences pour l'Ingénieur', Univ. de Franche-Comté em Besançon.
- Tsu-wei-chow, 1992, "Microstructural Design of Fiber Composites", Cambridge University Press, New York, 408 pp.
- Tuttle, M. E. and Semeliss, M., WONG, R., 1992, "The Elastic and Yield Behavior of Polyethylene Tubes Subjected to Biaxial Loadings", *Experim. Mech.*, vol. 32, n. 3.
- Valanis, K. C. and Lee, C. F., 1984, "Endochronic theory of cyclic plasticity with applications." *J. Appl. Mech.*, vol. 51, n. 2, pp. 367-374.
- Valliappan, S. and Pham, T. D., 1995, "Elasto-plastic Finite Element Analysis with Fuzzy Parameters", *Int. J. Num. Meth. Eng.*, vol 38.
- Ward, I. M., 1985, "Mechanical Properties of Solid Polymers", 2nd ed., John Wiley, New York.

- Wagner, D. A., Gur, Y., Ward, S. M. and Samus, M. A., 1997, "Modeling Foam Damping Materials in Automotive Structures", J. Eng. Mat. Techn., vol. 119, pp. 279-283.
- Weiss, J. and Bord, C., 1983a, "Les Matériaux Composites: vol. I : Structure, Constituants, Fabrication", CEP Édition.
- Weiss, J. and Bord, C., 1983b, "Les Matériaux Composites: vol. II : Calculs, Essais et Contrôles, Conception", CEP Édition.
- White, S. R. and Hartman, A. B., 1997, "Effect of cure state on stress relaxation in 3501-6 epoxy resin", J. Eng. Mat. Tech., vol. 119, pp. 262-265.
- Wu, H. C. and Ho, C. C., 1995, "An investigation of transient creep by means of endochronic viscoplasticity and experiment", J. Eng. Mat. Tech., vol. 117, pp. 260-268.
- Yi, S. and Hilton, H. H., 1997, "Free Edge Stress in Elastic and Viscoelastic Composites under Uniaxial Extension, Bending, and Twisting Loads", J. Eng. Mat. Tech., vol. 119, pp. 266-272.
- Zachary, L. W. and Riley, W. F., 1977, "Optical Response and Yield Behavior of a Polyester Model Material", Experim. Mech., vol. 17, n. 9, pp. 321-326.
- Zhang, J., Lin, Z., Wong, A., Kikuchi, N., Li, V. C., Yee, A. F. and Nusholtz, G. S., 1997, "Constitutive modeling and material characterization of polymeric foams", J. Eng. Mat. Tech., vol. 119, pp. 284-291, julho.

APÊNDICES

1. VISUALIZAÇÃO GRÁFICA DE RESULTADOS

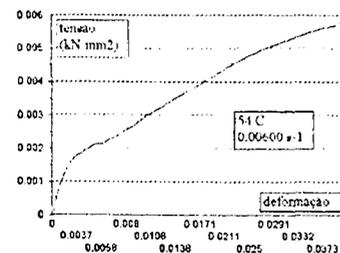
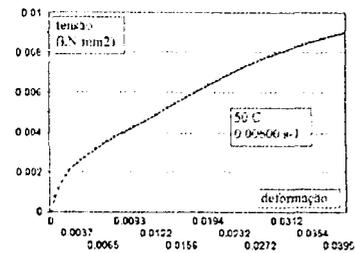
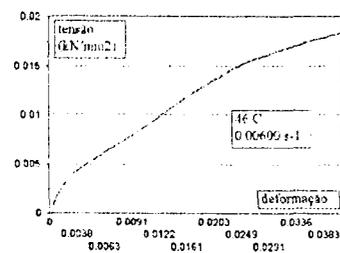
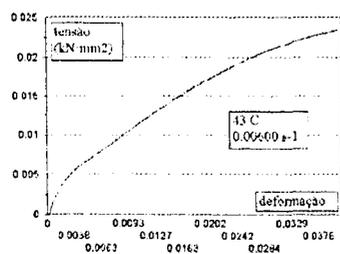
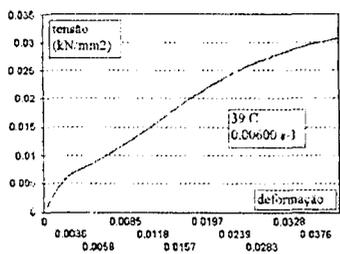


(a) material 60/40
 $\dot{\epsilon} = 0,00060 \text{ s}^{-1}$
 39°C a 54,5°C

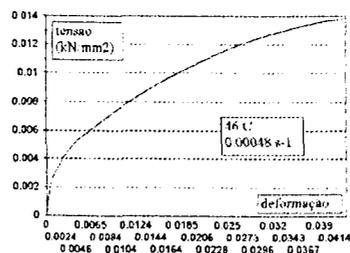
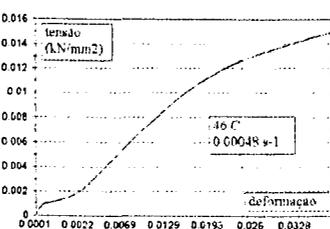
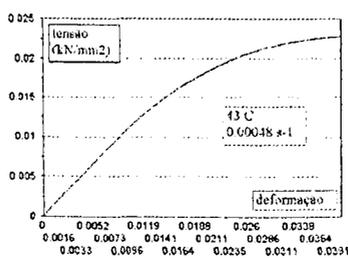
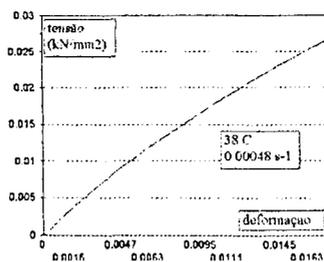
(b) material 60/40
 $\dot{\epsilon} = 0,00240 \text{ s}^{-1}$
 38°C a 54°C

(c) material 60/40
 $\dot{\epsilon} = 0,00420 \text{ s}^{-1}$
 39°C a 53,5°C

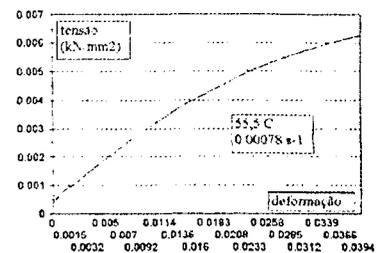
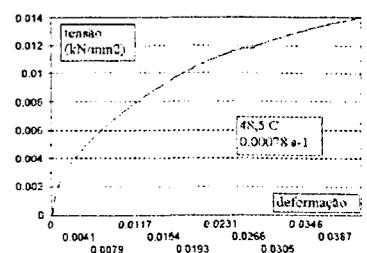
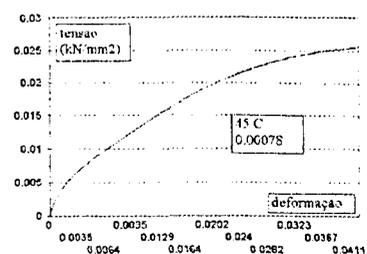
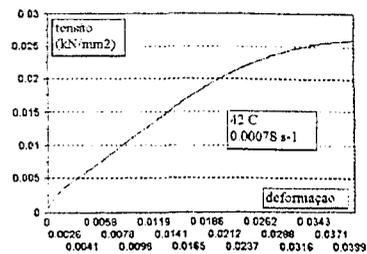
Fig. A1.1 - Variação, durante a primeira tração, de $\sigma_x \epsilon$ com ϵ e com a temperatura, material 60/40 (valores zerados, i.e., de cálculo; continua na Fig. A1.2)



(a) material 60/40
 $\dot{\epsilon} = 0,00600 \text{ s}^{-1}$
 39°C a 54°C

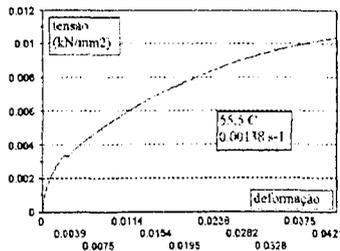
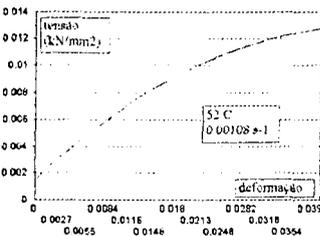
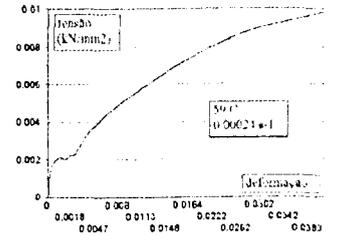
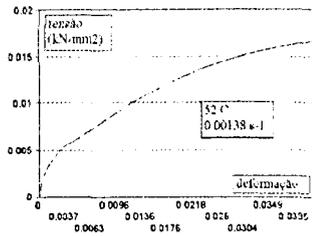
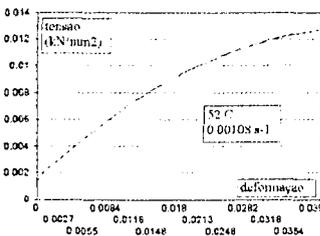
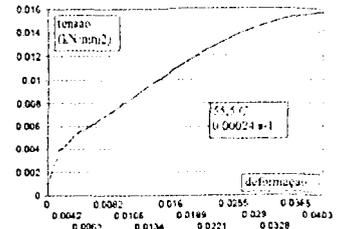
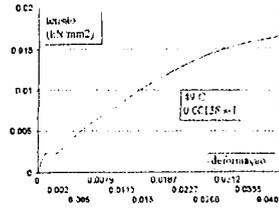
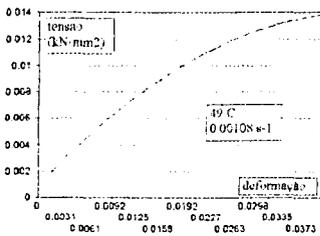
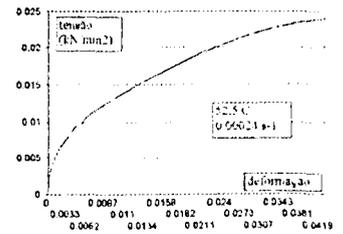
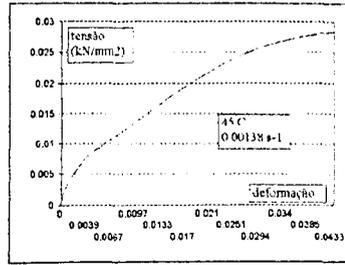
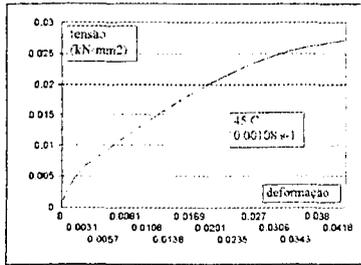
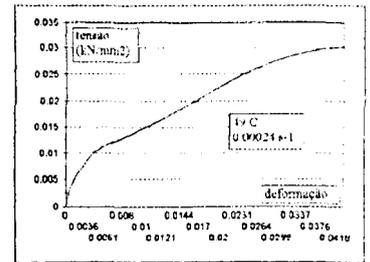
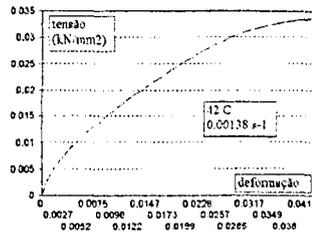
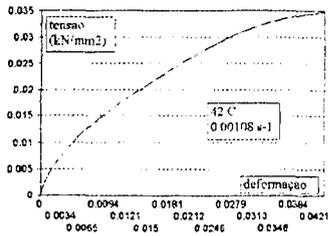


(b) material 70/30
 $\dot{\epsilon} = 0,00048 \text{ s}^{-1}$
 38°C a 46°C



(c) material 70/30
 $\dot{\epsilon} = 0,00078 \text{ s}^{-1}$
 42°C a 55,5°C

Fig. A1.2 - Variação, durante a primeira tração, de $\sigma \times \epsilon$ com $\dot{\epsilon}$ e com a temperatura, materiais 60/40 (continuação da Fig. A.1) e 70/30 (continua na Fig. A1.3). Valores zerados, i.e., de cálculo

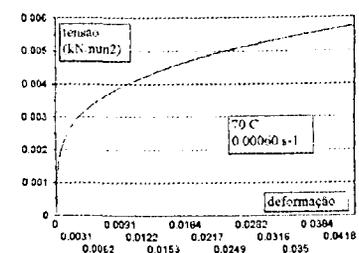
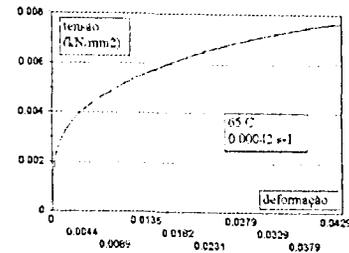
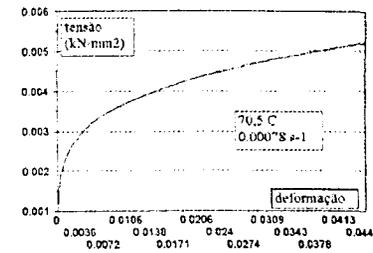
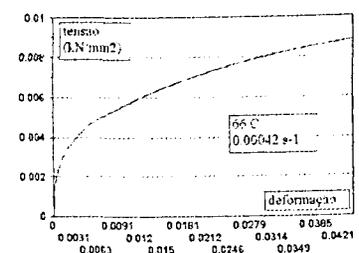
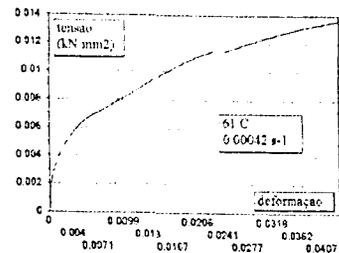
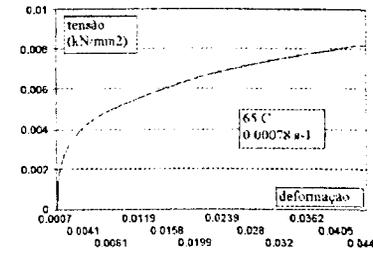
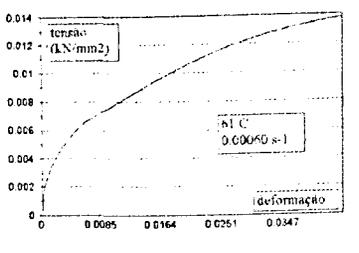
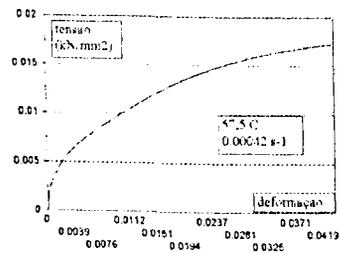
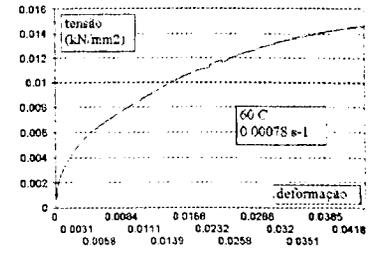
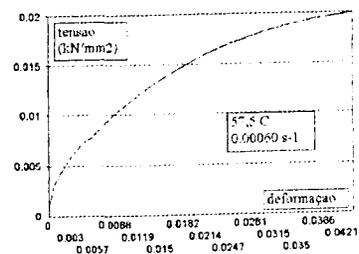
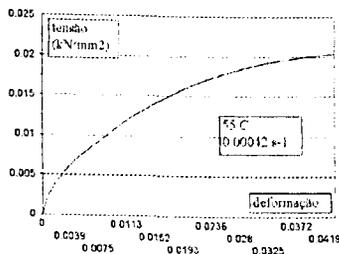
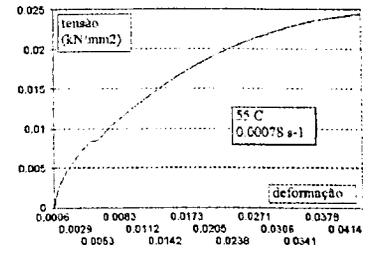
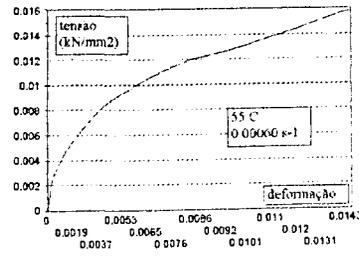
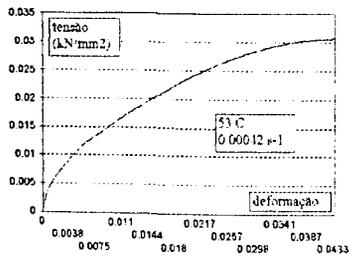


(a) material 70/30
 $\dot{\epsilon} = 0,00108 \text{ s}^{-1}$
 42°C a 56°C

(b) material 70/30
 $\dot{\epsilon} = 0,00138 \text{ s}^{-1}$
 42°C a 55,5°C

(c) material 80/20
 $\dot{\epsilon} = 0,00024 \text{ s}^{-1}$
 49°C a 59°C

Fig. A1.3 - Variação, durante a primeira tração, de σ/ϵ com ϵ e com a temperatura, materiais 70/30 (continuação da Fig. A.2) e 80/20 (continua na Fig. A1.4). Valores zerados, i.e., de cálculo

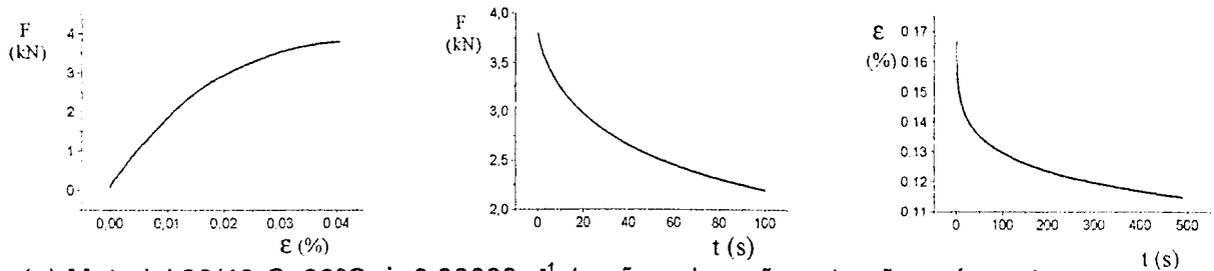


(a) material 80/20
 $\dot{\epsilon} = 0,00042 \text{ s}^{-1}$
 53°C a 65°C

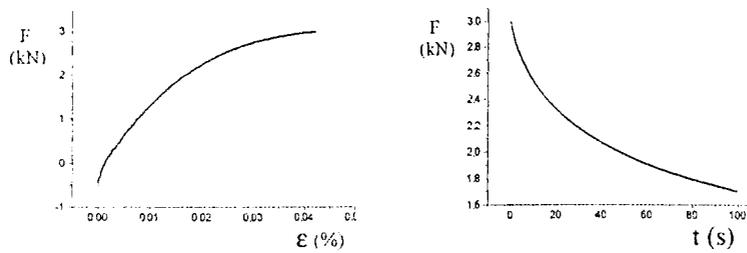
(b) material 80/20
 $\dot{\epsilon} = 0,00060 \text{ s}^{-1}$
 55°C a 70°C

(c) material 80/20
 $\dot{\epsilon} = 0,00078 \text{ s}^{-1}$
 55°C a 70°C

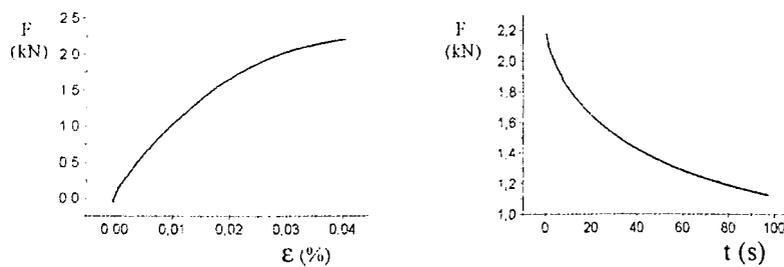
Fig. A1.4 - Variação, durante a primeira tração, de σ/ϵ com ϵ e com a temperatura, material 80/20 (continuação da Fig. A1.3). Valores zerados, i.e., de cálculo



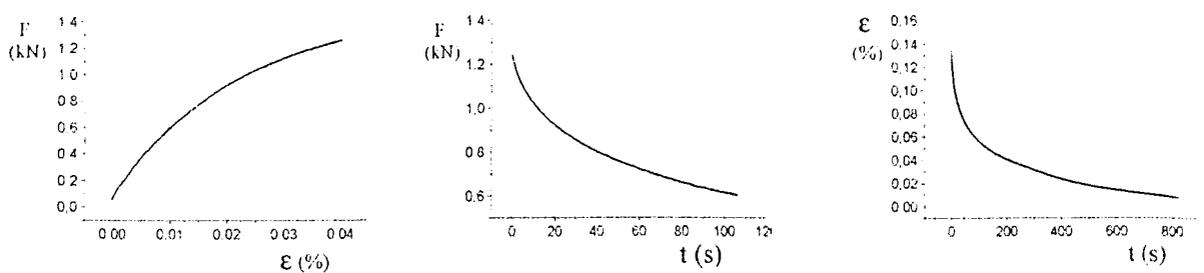
(a) Material 60/40-C, 39°C, $\dot{\epsilon}=0,00060 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação, retração após ruptura.



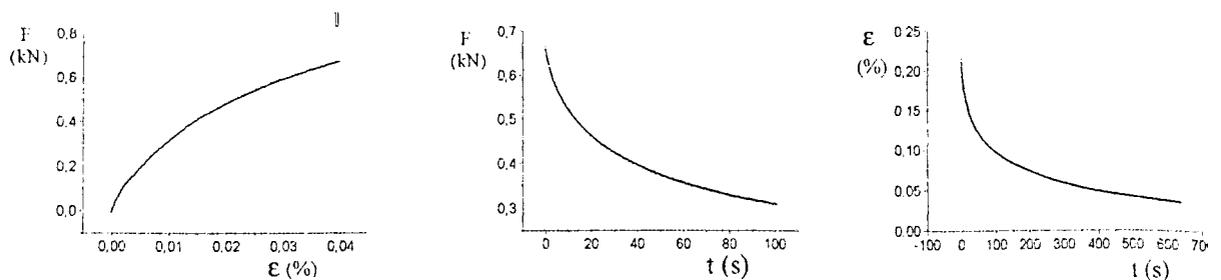
(b) Material 60/40-C, 43°C, $\dot{\epsilon}=0,00060 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação.



(c) Material 60/40-C, 46°C, $\dot{\epsilon}=0,00060 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação.

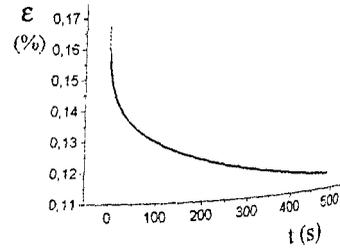
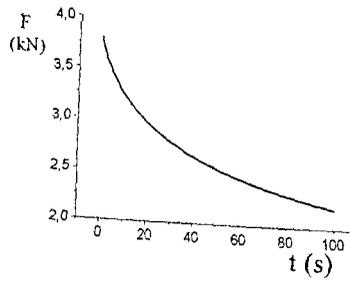
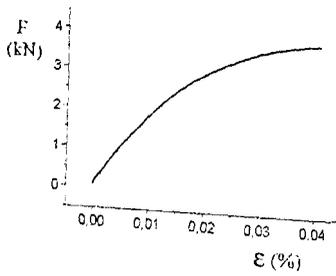


(d) Material 60/40-C, 50°C, $\dot{\epsilon}=0,00060 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação, retração após ruptura.

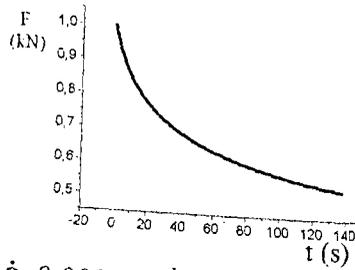
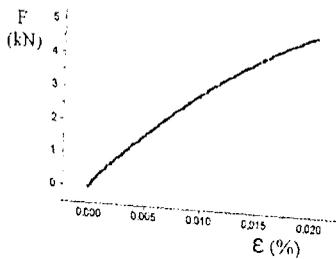


(e) Material 60/40-C, 55°C, $\dot{\epsilon}=0,00060 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação, retração após ruptura.

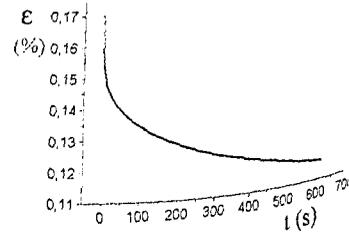
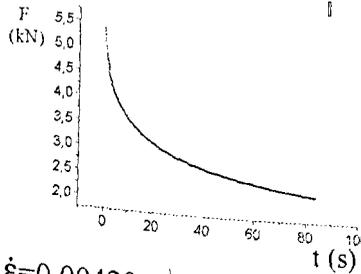
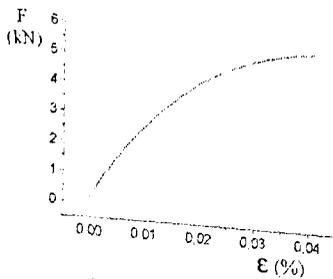
Fig. A1.5 - Variação de $F \times \epsilon$, $F \times t$ e $\epsilon \times t$ com a temperatura, $\dot{\epsilon}=\text{constante}$ (valores não zerados)



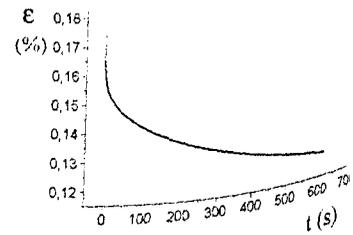
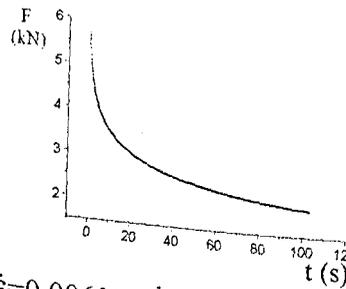
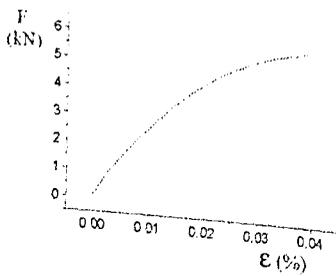
(a) Material 60/40-C, 39°C, $\dot{\epsilon}=0,00060 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação, retração após ruptura.



(b) Material 60/40-C, 38°C, $\dot{\epsilon}=0,00240 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação, retração após ruptura.

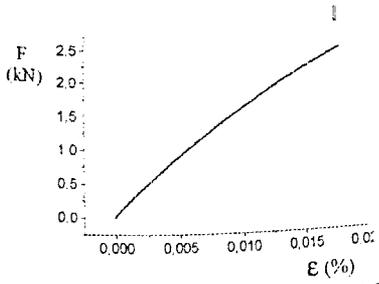


(c) Material 60/40-C, 39°C, $\dot{\epsilon}=0,00420 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação, retração após ruptura.

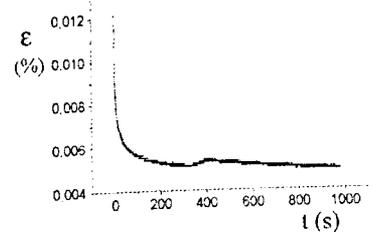


(d) Material 60/40-C, 39°C, $\dot{\epsilon}=0,00600 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação, retração após ruptura.

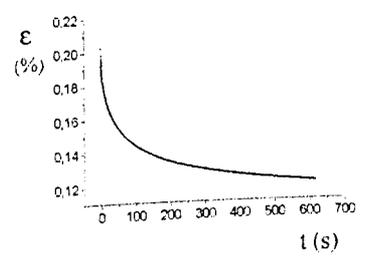
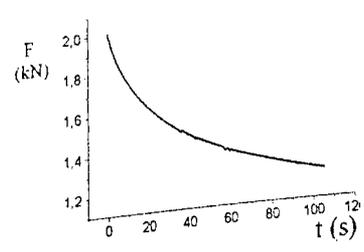
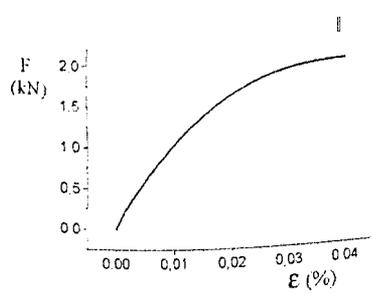
Fig. A1.6 - Variação de $F \times \epsilon$, $F \times t$ e $\epsilon \times t$ com $\dot{\epsilon}$, a temperatura constante (valores não zerados, $\epsilon \times t$ nem sempre disponível)



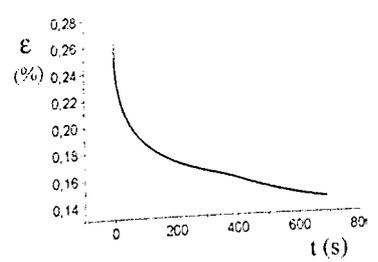
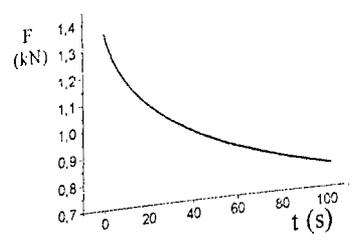
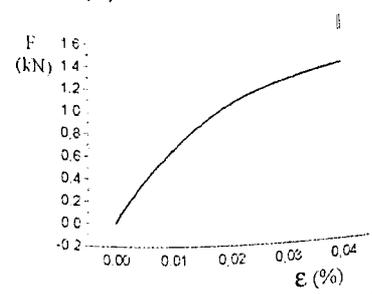
(c.p. rompeu na primeira tração)



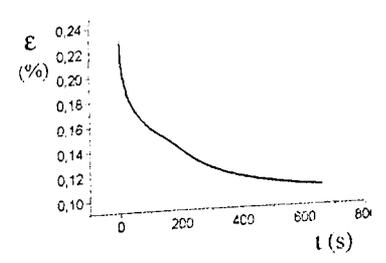
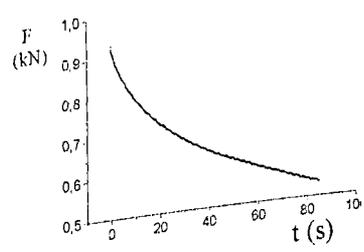
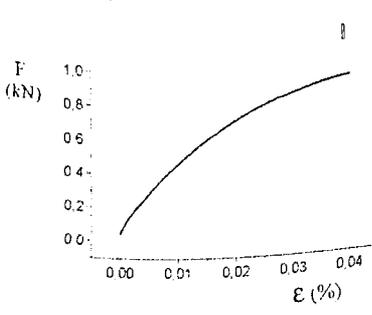
(a) Material 70/30-C, 38°C, $\dot{\epsilon}=0,00048 \text{ s}^{-1}$: tração, retração após ruptura.



(b) Material 70/30-C, 43°C, $\dot{\epsilon}=0,00048 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação, retração após ruptura.

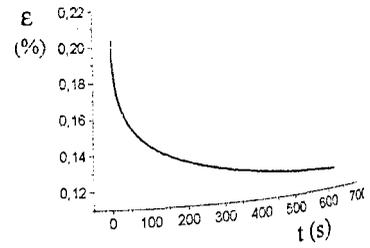
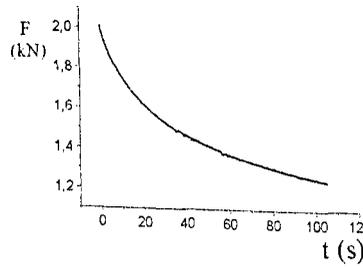
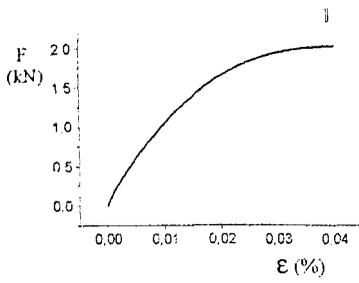


(c) Material 70/30-C, 46°C, $\dot{\epsilon}=0,00048 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação, retração após ruptura.

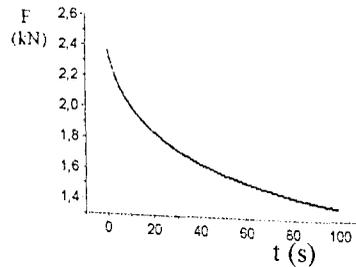
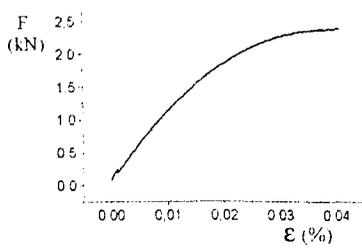


(d) Material 70/30-C, 51°C, $\dot{\epsilon}=0,00048 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação, retração após ruptura.

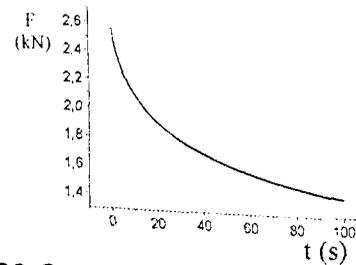
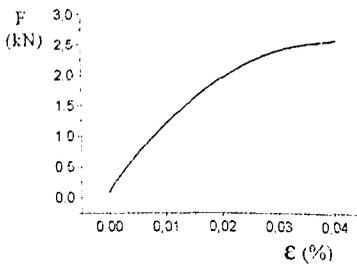
Fig. A1.7 - Variação de $F \times \epsilon$, F_{xt} e ϵ_{xt} com a temperatura, $\dot{\epsilon}=\text{constante}$ (valores não zerados, ϵ_{xt} nem sempre disponível, em (a) ocorreu ruptura durante a primeira tração)



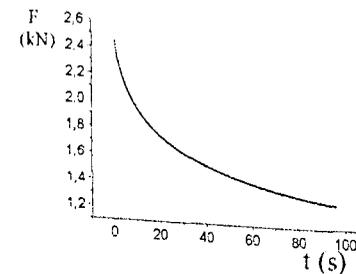
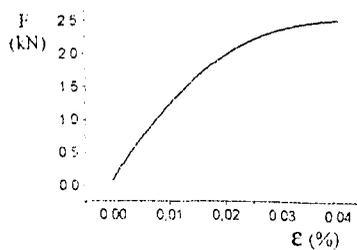
(a) Material 70/30-C, 43°C, $\dot{\epsilon}=0,00048 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação, retração após ruptura.



(b) Material 70/30-C, 42°C, $\dot{\epsilon}=0,00078 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação.

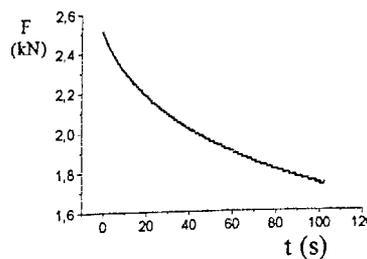
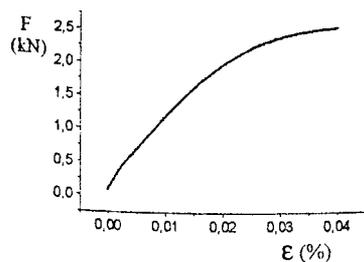


(c) Material 70/30-C, 42°C, $\dot{\epsilon}=0,00108 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação.

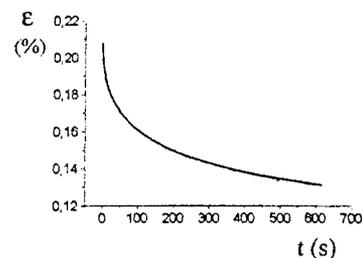
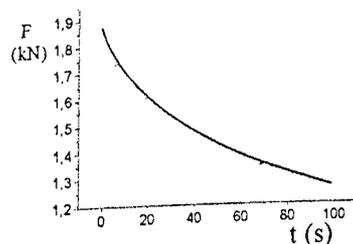
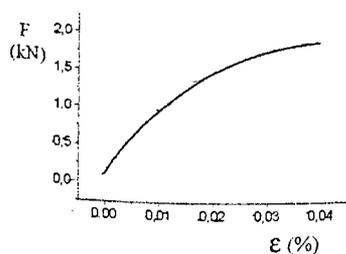


(d) Material 70/30-C, 42°C, $\dot{\epsilon}=0,00138 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação.

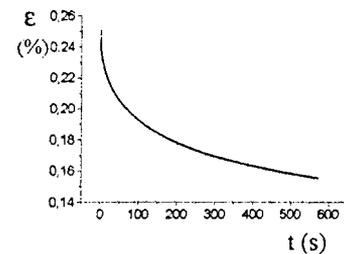
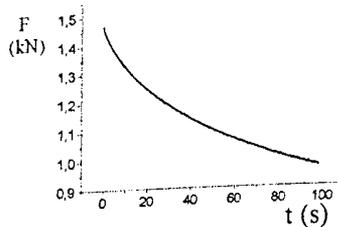
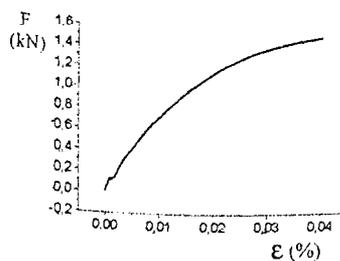
Fig. A1.8 - Variação de F_{ϵ} , F_{xt} e ϵ_{xt} com $\dot{\epsilon}$, a temperatura constante (valores não zerados, ϵ_{xt} nem sempre disponível)



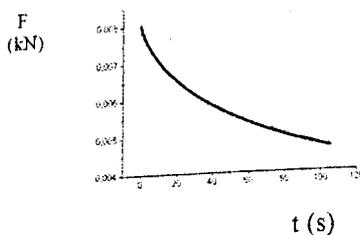
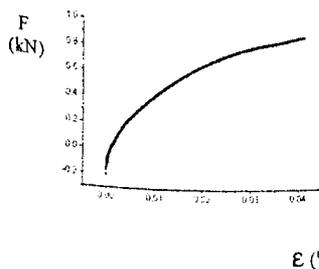
(a) Material 80/20-C, 49°C, $\dot{\epsilon}=0,00024 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação, retração após ruptura.



(b) Material 80/20-C, 53°C, $\dot{\epsilon}=0,00024 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação, retração após ruptura.

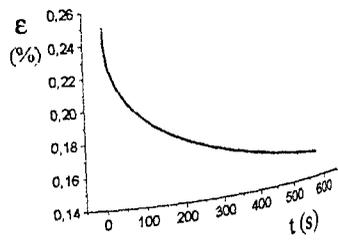
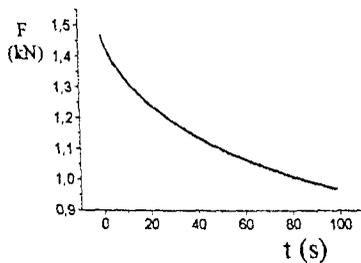
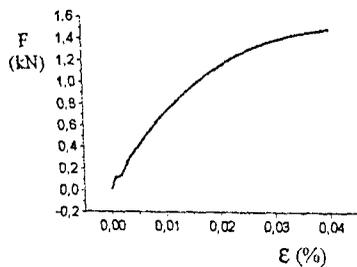


(c) Material 80/20-C, 55°C, $\dot{\epsilon}=0,00024 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação, retração após ruptura.

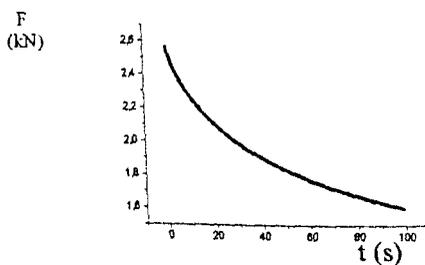
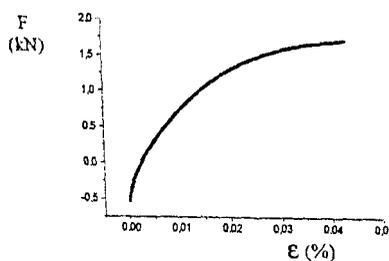


(d) Material 80/20-C, 60°C, $\dot{\epsilon}=0,00024 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação.

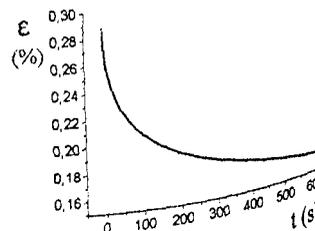
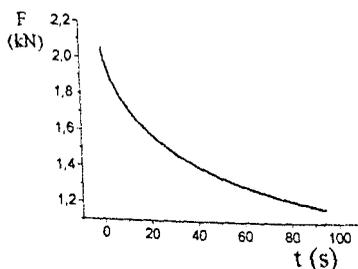
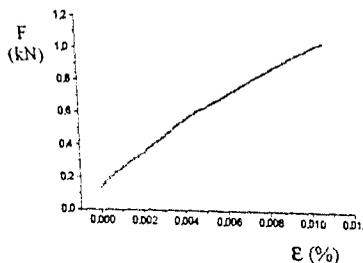
Fig. A1.9 - Variação de $F_{x\epsilon}$, F_{xt} e ϵ_{xt} com a temperatura, $\dot{\epsilon}=\text{constante}$ (valores não zerados, ϵ_{xt} nem sempre disponível)



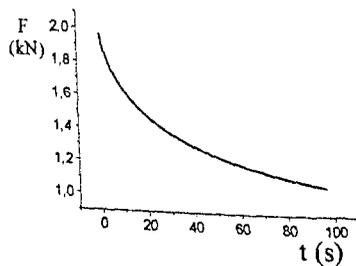
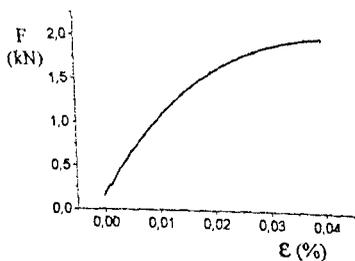
(a) Material 80/20-C, 55°C, $\dot{\epsilon}=0,00024 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação, retração após ruptura.



(b) Material 80/20-C, 55°C, $\dot{\epsilon}=0,00042 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação.



(c) Material 80/20-C, 55°C, $\dot{\epsilon}=0,00060 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação.



(a) Material 80/20-C, 55°C, $\dot{\epsilon}=0,00078 \text{ s}^{-1}$: tração, relaxação.

Fig. A1.10 - Variação de $F_{x\epsilon}$, F_{xt} e ϵ_{xt} com $\dot{\epsilon}$, a temperatura constante (valores não zero ϵ_{xt} nem sempre disponível)

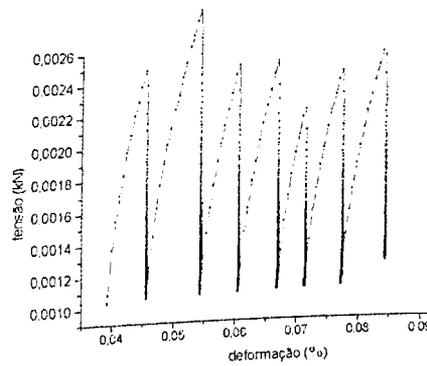
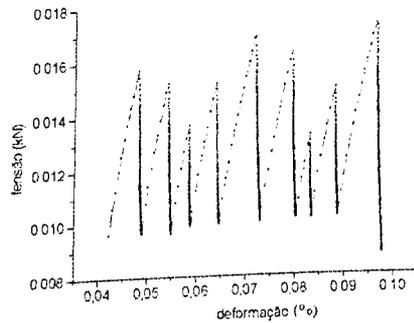
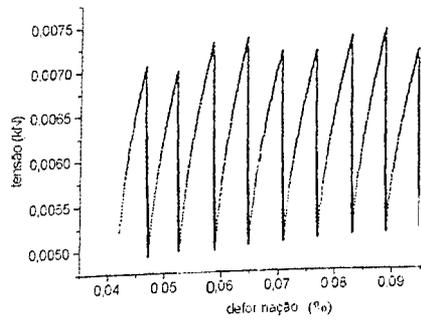
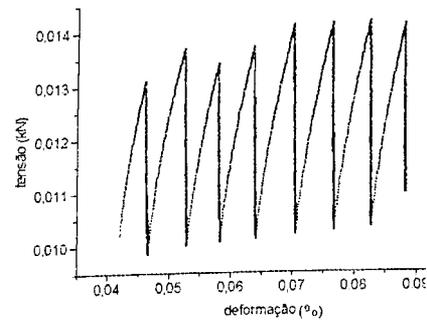
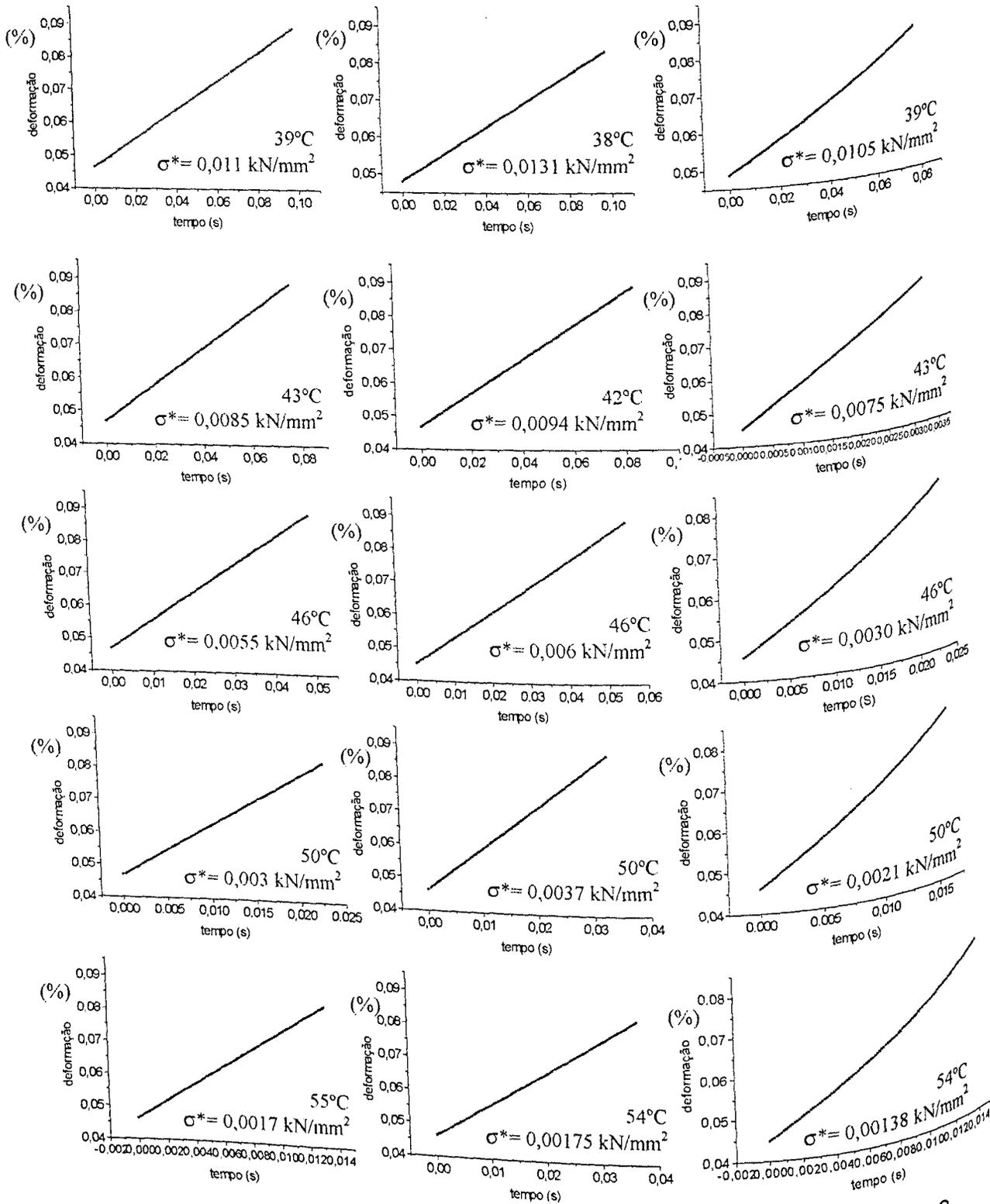


Fig. A1.11: Ensaio de encruamento com relaxações múltiplas, material 60/40-C, para valores extremos de temperatura e taxa de deformação ensaiados

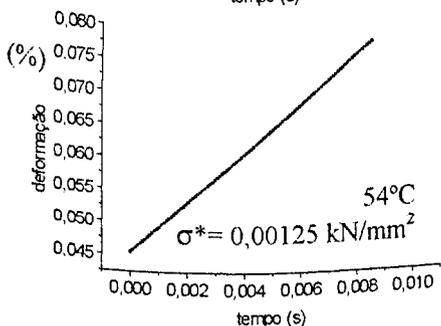
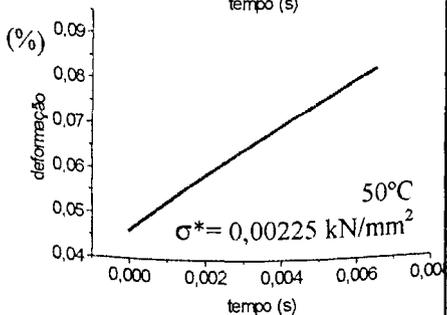
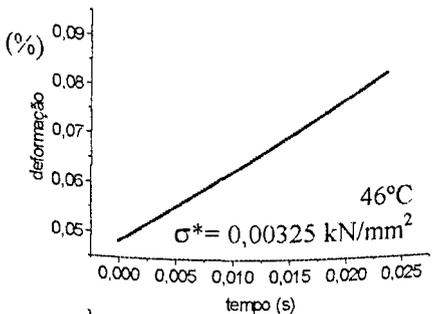
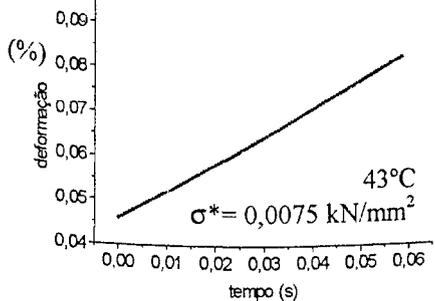
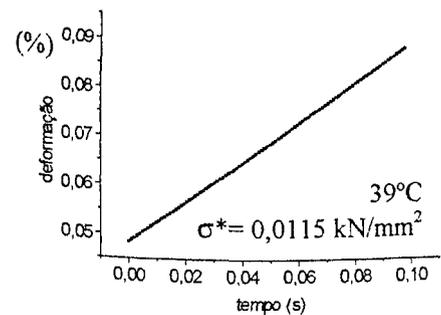


(a) material 60/40-C
 $\dot{\epsilon} = 0,00060 \text{ s}^{-1}$
 39°C a 55°C

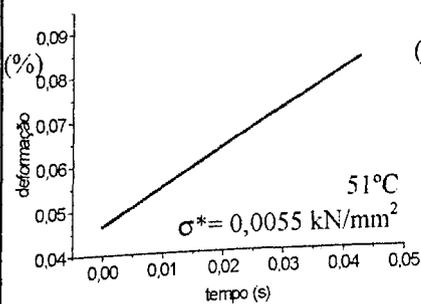
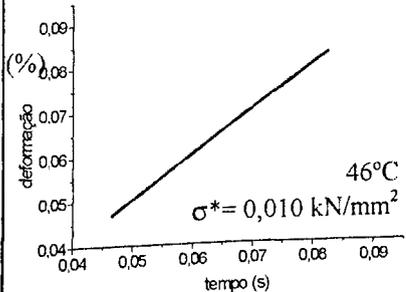
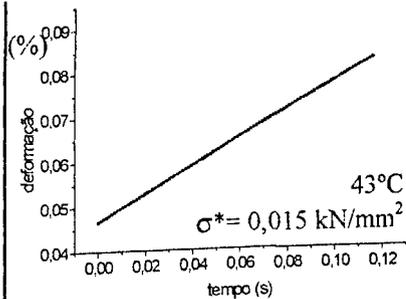
(b) material 60/40-C
 $\dot{\epsilon} = 0,00240 \text{ s}^{-1}$
 38°C a 54°C

(c) material 60/40-C
 $\dot{\epsilon} = 0,00420 \text{ s}^{-1}$
 39°C a 54°C

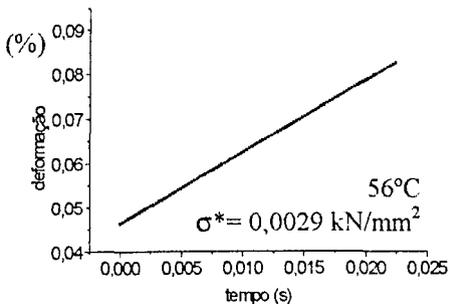
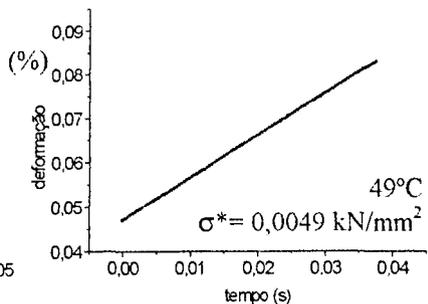
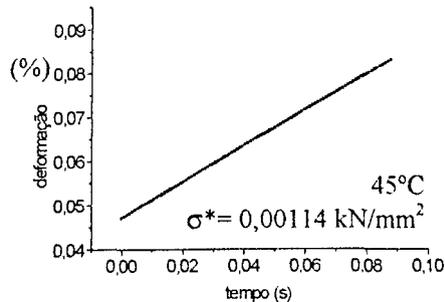
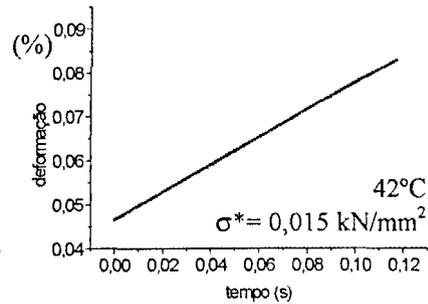
Fig. A1.12 - Variação da fluência, ext, com a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ e com a temperatura, material 60/40-C (continua na Fig. A1.13)



(a) material 60/40-C
 $\dot{\epsilon} = 0,00600 \text{ s}^{-1}$
 39°C a 54°C



(b) material 70/30-C
 $\dot{\epsilon} = 0,00048 \text{ s}^{-1}$
 38°C a 46°C



(c) material 70/30-C
 $\dot{\epsilon} = 0,00078 \text{ s}^{-1}$
 42°C a 56°C

Fig. A1.13 - Variação da fluência, ext, com a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ e com a temperatura, materiais 60/40-C (continuação da Fig. A1.12) e 70/30-C (continua na Fig. A1.14)

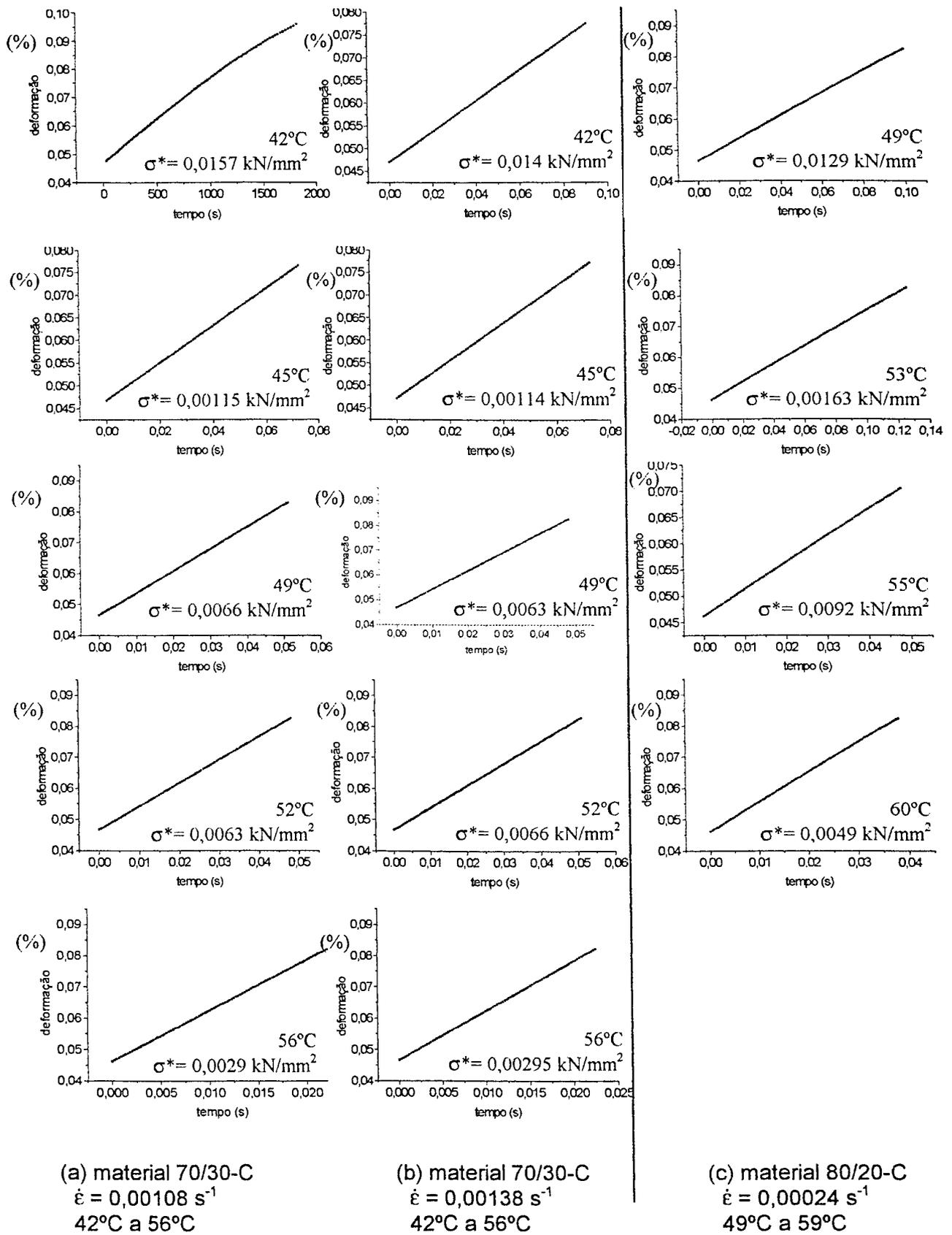
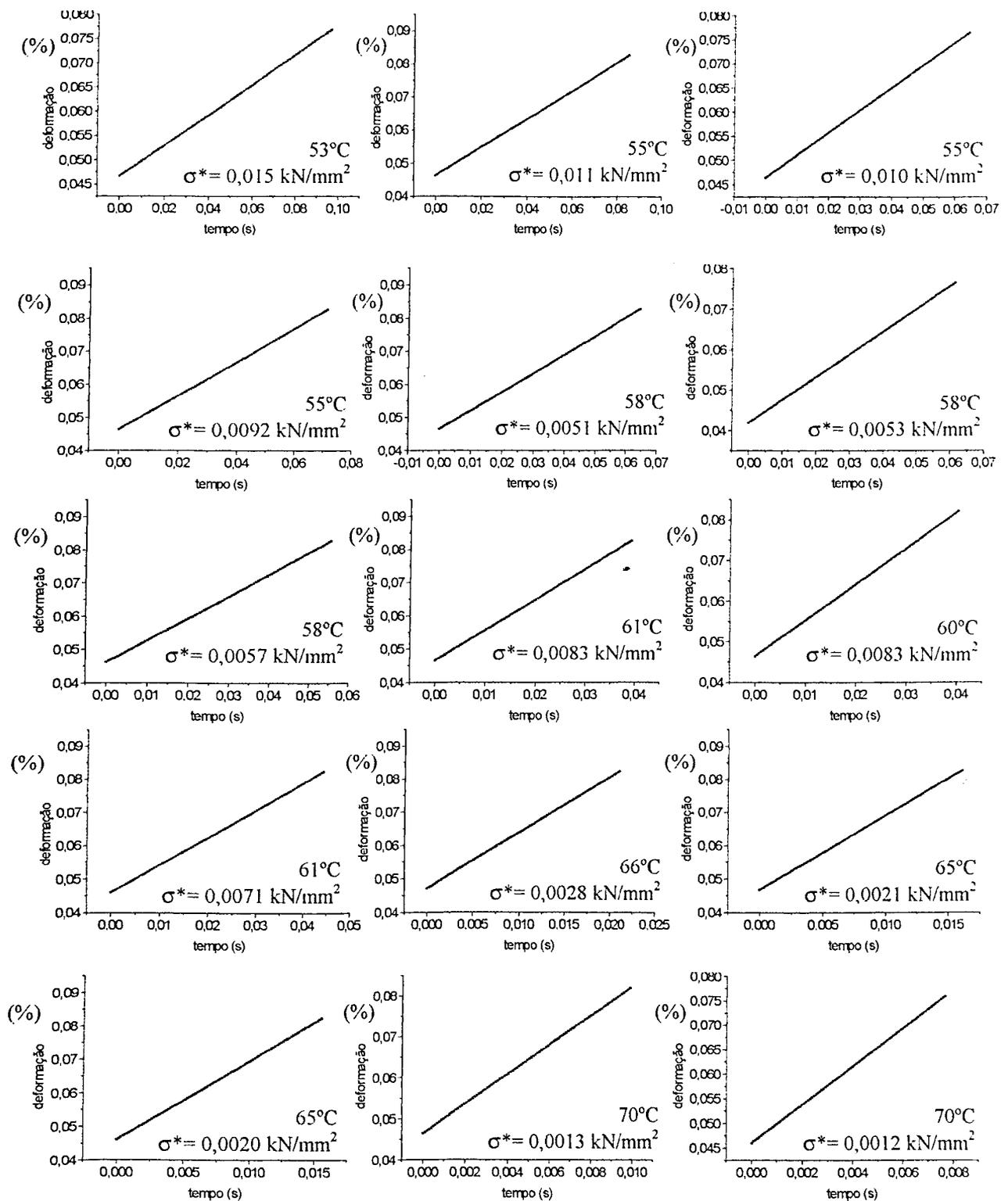


Fig. A1.14 - Variação da fluência, ϵ_{xt} , com a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ e com a temperatura, materiais 70/30-C (continuação da Fig. A1.13) e 80/20-C (continua na Fig. A1.15)

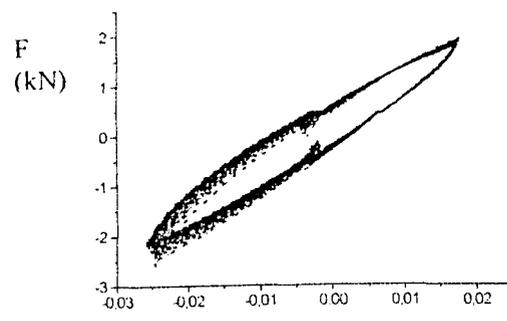
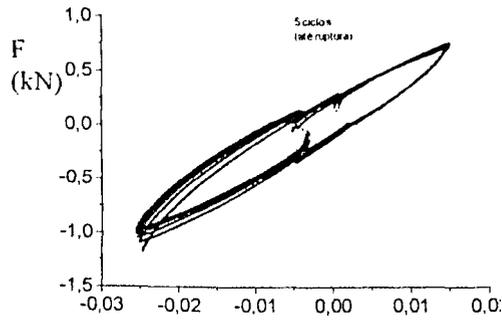


(a) material 80/20-C
 $\dot{\epsilon} = 0,00042 \text{ s}^{-1}$
 53°C a 65°C

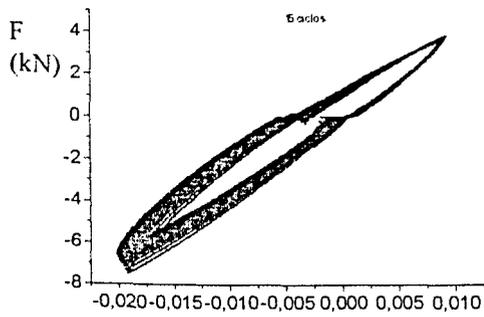
(b) material 80/20-C
 $\dot{\epsilon} = 0,00060 \text{ s}^{-1}$
 55°C a 70°C

(c) material 80/20-C
 $\dot{\epsilon} = 0,00078 \text{ s}^{-1}$
 55°C a 70°C

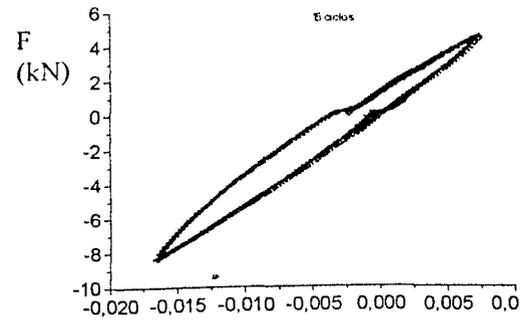
Fig. A1.15 - Variação da fluência, ϵ_{ext} , com a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ e com a temperatura, material 80/20-C (continuação da Fig. A1.14)



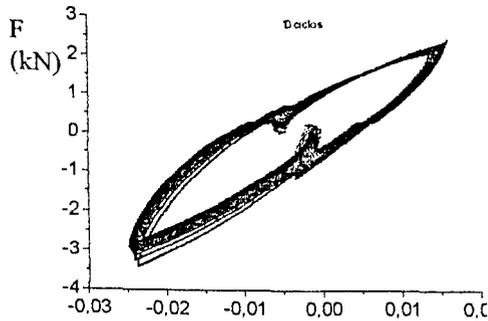
(a) Mat.60/40-C, 30°C, $\dot{\epsilon}=0,001 \% s^{-1}$ ($\pm 22,3$ mm) (b) Mat.60/40-C, 30°C, $\dot{\epsilon}=0,060 \% s^{-1}$



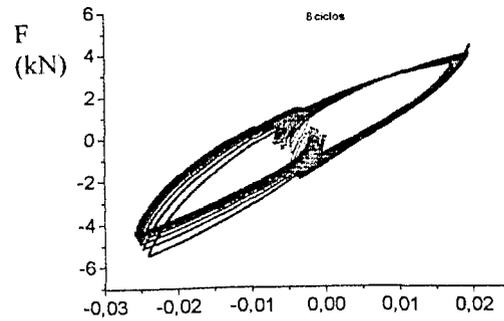
(c) Mat.70/30-C, 42°C, $\dot{\epsilon}=0,005\%/s$



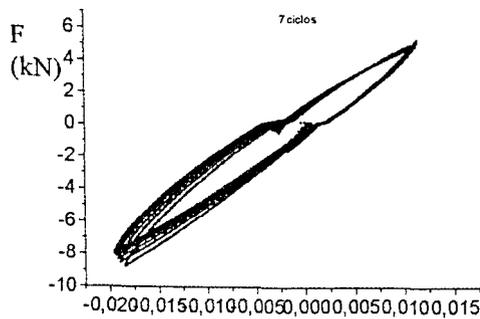
(d) Mat.70/30-C, 37°C, $\dot{\epsilon}=0,014\%/s$



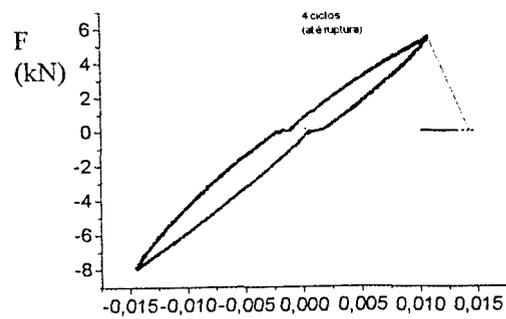
(e) Mat.70/30-C, 52°C, $\dot{\epsilon}=0,005 \% s^{-1}$



(f) Mat.80/20-C, 52°C, $\dot{\epsilon}=0,002 \% s^{-1}$



(g) Mat.80/20-C, 44°C, $\dot{\epsilon}=0,002 \% s^{-1}$



(h) Mat.80/20-C, 44°C, $\dot{\epsilon}=0,008 \% s^{-1}$

Fig. A1.16 - Comportamento cíclico, deslocamento imposto de $\pm 2,25$ mm ($\pm 22,3$ mm em (a)), vários materiais, temperaturas e taxas de deformação

2. PARÂMETROS NUMÉRICOS E VISUALIZAÇÃO GRÁFICA DE EQUAÇÕES

Impressão do conteúdo das planilhas do disquete anexo, com os parâmetros e os coeficientes de correlação, porém com algumas restrições na visualização

A2.1 *Resumo dos parâmetros e coeficientes de correlação linear para as equações descrevendo o comportamento à tração - Material 60/40-C*

1- Valores dos coeficientes "a" e "b" de regressões logarítmicas com os dados tensãoXdeformação dos corpos de prova indicados

Equação final na forma $y=a+bx$, "a" chamado constante ('ct') e "b" coeficiente de x ('x coef')

São feitas e mostradas, para o material 60/40, 4 a 5 regressões, iniciando-se nos pontos 1, 5, 10, 20, i.e. no primeiro, segundo, vigésimo etc. ponto do arquivo de dados (em geral)

-LEGENDA: fi1: nome do corpo de prova ("1" indica primeira tração); 0.99: valor mínimo do coeficiente de correlação linear R² para os valores mostrados;

0.0006: taxa de deformação aplicada (s-1); 39: temperatura de ensaio (oC)

Ponto de início da re ct = a				Ponto de início da re ct = a				Ponto de início da re ct = a				Ponto de início da re ct = a			
x coef = b		x coef = b		x coef = b		x coef = b		x coef = b		x coef = b		x coef = b			
fi1	1	-1.72	0.641205	fe1	2	-0.33479	0.873676	hk1	2	-1.331	0.655271	hj1	2	-1.25065	0.666331
0.99	5	-1.75401	0.632949	0.997	7	-0.45365	0.848001	0.985	6	-1.41726	0.633373	0.991	6	-1.3193	0.648853
0.0006	10	-1.76764	0.629597	0.0024	12	-0.48736	0.840551	0.0042	12	-1.49531	0.612943	0.006	11	-1.37513	0.63413
39	19	-1.78478	0.62532	38	16	-0.51899	0.833443	39	21	-1.54736	0.599061	39	39		
fj09_1	2	-2.26996	0.54886	20	-0.54934	0.826565	hm1	2	-1.71778	0.625915	hl1	2	-1.61742	0.635103	
0.992	6	-2.25736	0.551919	ff1	2	-1.54786	0.637501	0.99	6	-1.79524	0.606215	0.987	6	-1.69217	0.616012
0.0006	11	-2.2498	0.553776	0.987	6	-1.55822	0.634862	0.0042	11	-1.85338	0.591038	0.006	11	-1.76549	0.596626
43	20	-2.24324	0.55541	0.0024	15	-1.58819	0.627064	43	15	-1.88868	0.581665	43	43		
fg1	2	-2.10002	0.72204	42	21	-1.61728	0.619362	gw1	1	-1.85436	0.796518	hc1	2	-1.87415	0.634158
0.991	6	-2.13835	0.712796	fb1	2	-1.3812	0.683521	0.979	7	-2.26771	0.696413	0.989	6	-1.94585	0.615833
0.0006	13	-2.16301	0.706771	0.984	6	-1.43171	0.67094	0.0042	11	-2.37249	0.669771	0.006	11	-2.01328	0.598003
46	20	-2.18086	0.70236	0.0024	15	-1.48097	0.658363	46	16	-2.44136	0.651923	46	46		
fh1	1	-3.48173	0.421285	46	20	-1.47166	0.660794	go1	2	-2.50803	0.634404	gp1	2	-2.42691	0.593421
0.997	5	-3.48196	0.421229	fc1	2	-2.28634	0.699993	0.991	2	-2.39911	0.627187	0.99	7	-2.49476	0.575676
0.0006	10	-3.47001	0.424234	0.989	7	-2.39702	0.672449	0.0042	7	-2.50476	0.60018	0.006	12	-2.55005	0.560699
50	20	-3.4573	0.427479	0.0024	15	-2.49425	0.647459	0.0042	16	-2.60823	0.572778	46	46		
fj14_1	2	-3.24998	0.74394	50	20	-2.5508	0.632645	47	2	-3.14896	0.517456	gn1	1	-1.98016	0.787456
0.976	7	-3.36316	0.716438	fd1	2	-3.57328	0.474104	gb1	2	-3.14896	0.517456	0.971	6	-2.43695	0.672408
0.0006	12	-3.44356	0.696782	0.997	7	-3.59153	0.469437	0.995	6	-3.16623	0.512951	0.006	11	-2.5994	0.629723
54.5	20	-3.52959	0.675527	0.0024	16	-3.58917	0.47006	0.0042	15	-3.24671	0.491319	49	16	-2.72598	0.595681
fk1	1	-4.34765	0.343273	54	20	-3.58921	0.470047	49	2	-3.00805	0.532273	22	-2.85402	0.560576	
0.996	5	-4.34434	0.344097					gq1	2	-3.00805	0.532273	gr1	2	-2.848	0.564503
0.0006	11	-4.33379	0.346776					0.994	7	-3.04652	0.522327	0.997	6	-2.89884	0.5515
57	20	-4.32094	0.350074					0.0042	16	-3.09266	0.509943	0.006	11	-2.92302	0.5451
								50	50			50	50		
								gi1	2	-3.5685	0.487606				
								0.998	7	-3.5731	0.486467	gk1	2	-3.4763	0.511874
								0.0042	16	-3.566	0.488315	0.995	6	-3.48537	0.509589
								53.5				0.006	11	-3.48145	0.510609
												54			

2- Valores dos coeficientes K e M de cada curva tensãoXdeformação, a uma dada taxa de deformação (epspt) e a uma dada temperatura calculados/obtidos a partir de coeficientes a e b selecionados das regressões acima, geralmente aqueles coeficientes do ponto de início = 5

- Forma da equação relacionando a temperatura e os coeficientes K e M, para uma faixa de taxa de deformação dada:

temperatura = Kman + Mman * K + Nman * M, OBS: as letras K, M e N manuscritas são aqui notadas como Kman, Mman, Nman

onde Kman (K maiúsculo manuscrito) é o valor denominado 'Constant' e Mman, Nman são denominados 'X Coefficient(s)'

- LEGENDA: epspt = taxa de deformação; Kman (K maiúsculo manuscrito) = 'Constant'; Mman, Nman = 'X Coefficient(s)',

sendo que a as letras K, M e N manuscritas da tese são aqui notadas como Kman, Mman, Nman

Constant = constante, i.e. valor de "a" em y=a+bx; Std Err of Y Est = erro padrão da estimativa de y; R Squared = R^2, coeficiente de correlação linear; No. of Observations = número de observações;

X Coefficient(s) = coeficiente do x, i.e. valor de "b" em y=a+bx; Degrees of Freedom = graus de liberdade; Std Err of Coef = erro padrão do coeficiente

(obs.: epspt = taxa de deformação)

epspt (s-1)	temperat p/ regressão
0.0008	(v. eq. 1) erro relat (%)
39	0.173078 0.632949 38.10575 2.292947
43	0.104826 0.551919 45.26041 5.25677
48	0.117849 0.712796 44.95668 2.268094
50	0.030747 0.421229 52.68139 5.322788
54.5	0.034826 0.716438 54.41388 0.15801
57	0.01298 0.344097 54.10188 5.084416

epspt (s-1)	temperat p/ regressão
0.0024	(v. eq. 2) erro relat (%)
38	0.635303 0.848001 36.7389 3.318688
42	0.210511 0.634862 46.8215 11.47976
48	0.238899 0.67094 45.89458 0.229175
50	0.090988 0.672449 48.52744 2.945122
54	0.027556 0.469437 52.01758 3.671143

epspt (s-1)	temperat p/ regressão
0.0042	(v. eq. 3) erro relat (%)
39	0.242377 0.633373 38.82537 0.447758
43	0.166087 0.606215 43.12035 0.279889
48	0.103549 0.696413 45.47487 1.141589
47	0.081695 0.60018 47.62246 1.324389
49	0.042162 0.512951 50.60672 3.279027
50	0.047524 0.522327 50.22744 0.45487
53.5	0.028069 0.486467 51.62278 3.508816

epspt (s-1)	temperat p/ regressão
0.006	(v. eq. 4) erro relat (%)
39	0.287322 0.648853 38.58581 1.062022
43	0.184119 0.616012 43.2403 0.558849
46	0.142866 0.615833 45.47473 1.141882
48	0.082517 0.575676 48.92517 6.35907
49	0.087427 0.672408 48.21888 1.594533
50	0.055087 0.5515 50.52043 1.040861
54	0.030642 0.509589 52.03487 3.639133

eq. 1	temperat=
	=53.01771297329+(-113.31148599346*K)+(7.425122389351*M)
Constant	53.01771 =Kman
Std Err of Y Est	2.737832
R Squared	0.905087
No. of Observations	6
Degrees of Freedom	3
X Coefficient(s)	-113.311 7.425122 =Mman, Nman
Std Err of Coef.	23.38754 9.500433

eq. 2	temperat=
	=57.953546234126+(-17.918613549702*K)+(-11.593029788985*M)
Constant	57.95355 =Kman
Std Err of Y Est	3.933623
R Squared	0.806583
No. of Observations	5
Degrees of Freedom	2
X Coefficient(s)	-17.9186 -11.593 =Mman, Nman
Std Err of Coef.	18.26608 32.12703

eq. 3	temperat=
	=58.14420007001+(-52.60615759364*K)+(-10.370346517407*M)
Constant	58.1442 =Kman
Std Err of Y Est	1.310098
R Squared	0.949492
No. of Observations	7
Degrees of Freedom	4
X Coefficient(s)	-52.6062 -10.3703 =Mman, Nman
Std Err of Coef.	9.106581 9.392922

eq. 4	temperat=
	=56.0152431214+(-54.143480726971*K)+(-4.5552272962879*M)
Constant	56.01524 =Kman
Std Err of Y Est	1.857747
R Squared	0.903751
No. of Observations	7
Degrees of Freedom	4
X Coefficient(s)	-54.1435 -4.55523 =Mman, Nman
Std Err of Coef.	12.13708 17.715

3- Equações relacionando os coeficientes Kman, Mman e Nman mostrados acima com a taxa de deformação (epspt), com o coeficiente de correlação linear r^2 de cada equação
 kmn1, ... : nome do arquivo gráfico mostrando os resultados experimentais e as curvas interpoladas

3.1- Kman = k1+k2*epspt +k3*epspt^2

kmn1	Kman =
	=50.870442+(0.41079899*epspt)+(-0.0054512269*(epspt^2))
R^2=0,98268	

epspt (s-1)	epspt*100	Kman	Kman barr	erro relat
0.0008	6	53.01771	53.13899	0.228751
0.0024	24	57.95355	57.58971	0.627805
0.0042	42	58.1442	58.50804	0.625746
0.006	60	56.01524	55.89396	0.21651

3.2- Mman = m1+m2*epspt +m3*epspt^2

kmn2	Mman =
	=-136.83558+(5.7296863*epspt)+(-0.074791836*(epspt^2))
R^2=0,71681	(coeficiente baixo; v. item 10.5 da tese)

epspt (s-1)	epspt*100	Mman	Mman barr	erro relat
0.0008	6	-113.311	-105.15	7.202728
0.0024	24	-17.9186	-42.4032	136.6433
0.0042	42	-52.6062	-28.1216	46.54322
0.006	60	-54.1435	-62.305	15.07389

3.3- Nman = n1+n2*epspt +n3*epspt^2

kmn3	Nman =
	=14.698114+(-1.4575374*epspt)+(0.019161478*(epspt^2))
R^2=0,94599	

epspt (s-1)	epspt*100	Nman	Nman barr	erro relat
0.0006	6	7.425122	6.642703	10.53746
0.0024	24	-11.593	-9.24577	20.24714
0.0042	42	-10.3703	-12.7176	22.63437
0.006	60	-4.55523	-3.77281	17.17627

2- Valores dos coeficientes K e M de cada curva tensãoXdeformação, a uma dada taxa de deformação (epspt) e a uma dada temperatura calculados/obtidos a partir de coeficientes a e b selecionados das regressões acima, geralmente aqueles coeficientes do ponto de início = 5

- Forma da equação relacionando a temperatura e os coeficientes K e M, para uma faixa de taxa de deformação dada:

temperatura = Kman + Mman * K + Nman * M, OBS: as letras K, M e N manuscritas são aqui notadas como Kman, Mman, Nman

onde Kman (K maiúsculo manuscrito) é o valor denominado 'Constant' e Mman, Nman são denominados 'X Coefficient(s)'

- LEGENDA: epspt = taxa de deformação; Kman (K maiúsculo manuscrito) = 'Constant'; Mman, Nman = 'X Coefficient(s)',

sendo que a as letras K, M e N manuscritas da tese são aqui notadas como Kman, Mman, Nman

Constant = constante, i.e. valor de "a" em y=a+bx; Std Err of Y Est = erro padrão da estimativa de y; R Squared = R^2, coeficiente de correlação linear; No. of Observations = número de observações;

X Coefficient(s) = coeficiente do x, i.e. valor de "b" em y=a+bx; Degrees of Freedom = graus de liberdade; Std Err of Coef = erro padrão do coeficiente

(obs.: epspt = taxa de deformação)

epspt (s-1) 0.00048				epspt (s-1) 0.00078				epspt (s-1) 0.00108				epspt (s-1) 0.00138							
temperat (K = e^a M = b		temperat p/ regressão		temperat (K = e^a M = b		temperat p/ regressão		temperat (K = e^a M = b		temperat p/ regressão		temperat (K = e^a M = b		temperat p/ regressão					
(v. eq. 1)	erro relat (%)	(v. eq. 2)	erro relat (%)	(v. eq. 3)	erro relat (%)	(v. eq. 4)	erro relat (%)	(v. eq. 1)	erro relat (%)	(v. eq. 2)	erro relat (%)	(v. eq. 3)	erro relat (%)	(v. eq. 4)	erro relat (%)				
38	0.997529	0.882308	37.78567	0.584034	42	0.267511	0.653464	41.18683	1.93859	42	0.269433	0.617173	41.3692	1.50191	42	0.265021	0.816205	41.42249	1.375028
43	0.309758	0.742386	44.40991	3.278855	45	0.170554	0.565291	48.45155	3.225861	45	0.184757	0.576613	46.12677	2.503928	45	0.19434	0.579104	45.65167	1.448153
46	0.202135	0.750066	44.83749	2.309796	48.5	0.074916	0.509781	43.32157	0.3679	49	0.126707	0.607677	48.56902	0.879545	49	0.13589	0.626242	49.06857	0.13993
51	0.061307	0.45569	50.56893	0.260919	55.5	0.036138	0.430842	55.04025	0.828375	52	0.080982	0.49238	52.43787	0.842058	52	0.075587	0.462253	52.81356	1.564546
										56	0.037926	0.425762	55.49714	0.897961	55.5	0.046435	0.460667	54.54371	1.723038

eq. 1		eq. 2		eq. 3		eq. 4	
temperat=		temperat=		temperat=		temperat=	
=59.085041229075+(-6.1302720765021*K)+(-17.209689640519		=99.038242728611+(41.752001429927*K)+(-105.62292981396		=63.30051539341+(-49.519295230978*K)+(-13.917004843613		=57.773227285042+(-59.291884834916*K)+(-1.0339459606452	
Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:		Regression Output:	
Constant	59.08504 =Kman	Constant	99.03824 =Kman	Constant	63.30052 =Kman	Constant	57.77323 =Kman
Std Err of Y Est	1.783369	Std Err of Y Est	1.735443	Std Err of Y Est	1.07188	Std Err of Y Est	1.081495
R Squared	0.964265	R Squared	0.970254	R Squared	0.981288	R Squared	0.979799
No. of Observations	4	No. of Observations	4	No. of Observations	5	No. of Observations	5
Degrees of Freedom	1	Degrees of Freedom	1	Degrees of Freedom	2	Degrees of Freedom	2
X Coefficient(s)	-6.13027 -17.2097 =Mman, Nman	X Coefficient(s)	41.752 -105.623 =Mman, Nman	X Coefficient(s)	-49.5193 -13.917 =Mman, Nman	X Coefficient(s)	-59.2919 -1.03395 =Mman, Nman
Std Err of Coef.	4.074784 9.424188	Std Err of Coef.	48.92066 54.07574	Std Err of Coef.	11.04539 12.15414	Std Err of Coef.	10.48383 11.37354

3- Equações relacionando os coeficientes Kman, Mman e Nman mostrados acima com a taxa de deformação (epspt), com o coeficiente de correlação linear r^2 de cada equação

LEGENDA: epspt = taxa de deformação; R^2 = coeficiente de correlação linear

kmn1, ... : nome do arquivo gráfico mostrando os resultados experimentais e as curvas interpoladas

3.1- Kman =k1+k2*epspt+k3*epspt^2

3.2- Mman =m1+m2*epspt+m3*epspt^2

3.3- Nman =n1+n2*epspt+n3*epspt^2

kmn4

Kman =

=53.069079+(2.0957296*epspt)+(-0.035092971*(epspt^2))

R^2=0,51518 (coeficiente muito baixo; v.discussão)

kmn5

Mman =

=-28.111997+(3.9047036*epspt)+(-0.041211081*(epspt^2))

R^2=0,99999

kmn6

Nman =

=-6.6933744+(-4.3795331*epspt)+(0.078160698*(epspt^2))

R^2=0,5142 (coeficiente muito baixo; v.discussão)

epspt (s-1) epspt*100i Kman Kman barr erro relat

0.0006	6	59.08504	84.38011	8.961775
0.0024	24	99.03824	83.15304	16.03947
0.0042	42	63.30052	79.18572	25.09491
0.006	60	57.77323	52.47816	9.165262

epspt (s-1) epspt*100i Mman Mman barr erro relat

0.0006	6	-6.13027	-6.18737	0.60523
0.0024	24	41.752	41.86331	0.268587
0.0042	42	63.30052	63.18921	0.175841
0.006	60	57.77323	57.81033	0.064217

epspt (s-1) epspt*100i Nman Nman barr erro relat

0.0006	6	-17.2097	-30.1568	75.23145
0.0024	24	-105.623	-66.7816	38.77357
0.0042	42	-13.917	-52.7583	279.0923
0.006	60	-1.03395	11.91315	1252.203

A2.3 Resumo dos parâmetros e coeficientes de correlação linear para as equações descrevendo o comportamento à tração - Material 80/20-C

1- Valores dos coeficientes "a" e "b" de regressões logarítmicas com os dados tensãoXdeformação dos corpos de prova indicados

Equação final na forma $y=a+bx$, "a" chamado constante ('ct') e "b" coeficiente de x ('x coef')

São feitas, para o material 80/20, somente regressões iniciando-se no ponto 6, i.e. no sexto ponto do arquivo de dados (em geral)

-LEGENDA: hq1: nome do corpo de prova ("1" indica primeira tração);

0.0024: taxa de deformação aplicada (s-1); 49: temperatura de ensaio (oC)

Ponto de início da re ct = a			Ponto de início da re ct = a			Ponto de início da re ct = a			Ponto de início da re ct = a		
	x coef = b			x coef=b			x coef=b			x coef=b	
hq1	6 -1.59375 0.570951	ho1	6 -1.71566 0.528745	ht1	7 -1.96649 0.51505	hn1	7 -0.15984 0.778883				
0.00024		0.00042		0.0006		0.00078					
49		53?		55		44					
hp1	6 -2.25517 0.447154	hv1	6 -2.04209 0.547494	ib1	7 -2.35773 0.472102	hr1	7 -0.70436 0.688642				
0.00024		0.00042		0.0006							
52.5		55		57.5		45.5					
hs1	6 -2.31843 0.546159	ia	6 -2.65799 0.426577	hy1	7 -2.97822 0.405703	hu1	7 -1.99088 0.520512				
0.00024		0.00042		0.0006							
55		57.5		61		55					
hw1	6 -3.04667 0.474039	hx1	6 -3.09003 0.372541	ie1	7 -3.72668 0.315308	hz1	7 -2.74778 0.440265				
0.00024		0.00042		0.0006							
59		61		66		60.5					
		id1	6 -3.98634 0.278231	lg1	7 -4.35085 0.255942	if1	7 -3.89584 0.291025				
		0.00042		0.0006							
		65		70		65					
						ih1	7 -4.56533 0.225282				
						70.5		55 -1.96649			

2- Valores dos coeficientes K e M de cada curva tensãoXdeformação, a uma dada taxa de deformação (epspt) e a uma dada temperatura calculados/obtidos a partir de coeficientes a e b selecionados das regressões acima, geralmente aqueles coeficientes do ponto de início = 5

- Forma da equação relacionando a temperatura e os coeficientes K e M, para uma faixa de taxa de deformação dada:

temperatura = Kman + Mman * K + Nman * M, OBS: as letras K, M e N manuscritas são aqui notadas como Kman, Mman, Nman

onde Kman (K maiúsculo manuscrito) é o valor denominado 'Constant' e Mman, Nman são denominados 'X Coefficient(s)'

- LEGENDA: epspt = taxa de deformação; Kman (K maiúsculo manuscrito) = 'Constant'; Mman, Nman = 'X Coefficient(s)',

sendo que a as letras K, M e N manuscritas da tese são aqui notadas como Kman, Mman, Nman

Constant = constante, i.e. valor de "a" em y=a+bx; Std Err of Y Est = erro padrão da estimativa de y; R Squared = R^2, coeficiente de correlação linear; No. of Observations = número de observações;

X Coefficient(s) = coeficiente do x, i.e. valor de "b" em y=a+bx; Degrees of Freedom = graus de liberdade; Std Err of Coef = erro padrão do coeficiente

(obs.: epspt = taxa de deformação)

epspt (s-1)	temperat p/ regressão			
0.0006	K = e^a	M = b	(v. eq. 1)	erro relat (%)
49	0.203162	0.570951	48.50439	1.011449
52.5	0.104855	0.447154	53.06649	1.079029
55	0.098428	0.546159	55.87717	1.594851
59	0.047517	0.474039	58.05195	1.606362

epspt (s-1)	temperat p/ regressão			
0.0024	K = e^a	M = b	(v. eq. 2)	erro relat (%)
53	0.179845	0.528745	53.24	0.452825
55	0.129757	0.547494	54.00009	1.818009
57.5	0.070089	0.428577	58.89292	2.422468
61	0.0455	0.372541	61.0263	0.043118
65	0.018568	0.278231	64.34069	1.014328

epspt (s-1)	temperat p/ regressão			
0.0042	K = e^a	M = b	(v. eq. 3)	erro relat (%)
55	0.139948	0.51505	55.09899	0.179987
57.5	0.094835	0.472102	57.31502	0.321705
61	0.050884	0.405703	60.98406	0.026124
66	0.024073	0.315308	66.28168	0.426782
70	0.012896	0.255942	69.82025	0.25679

epspt (s-1)	temperat p/ regressão			
0.006	K = e^a	M = b	(v. eq. 4)	erro relat (%)
44	0.852279	0.778883	43.22096	1.770544
45.5	0.494423	0.688642	47.03084	3.364478
55	0.136576	0.520512	54.89127	0.197699
60.5	0.06407	0.440265	58.88548	2.66866
65	0.020326	0.291025	66.53854	2.366988
70.5	0.010406	0.225282	71.67813	1.67111

eq. 1
temperat=
=50.540446460159+(-75.948491461225*K)+(23.458701436656*M)=72.560280107822+(-25.59438353699*K)+(-27.834326384605*M)

Regression Output:

Constant	50.54045 =Kman
Std Err of Y Est	1.494912
R Squared	0.957983
No. of Observations	4
Degrees of Freedom	1
X Coefficient(s)	-75.9485 23.4587 =Mman, Nman
Std Err of Coef.	18.24583 20.29118

eq. 2
temperat=
=72.560280107822+(-25.59438353699*K)+(-27.834326384605*M)

Regression Output:

Constant	72.56028 =Kman
Std Err of Y Est	1.310156
R Squared	0.962603
No. of Observations	5
Degrees of Freedom	2
X Coefficient(s)	-25.59438 -27.83432 =Mman, Nman
Std Err of Coef.	26.20281 15.34979

eq. 3
temperat=
=85.402063087505+(9.2395434648871*K)+(-61.3456976610811*M)

Regression Output:

Constant	85.40206 =Kman
Std Err of Y Est	0.279217
R Squared	0.998962
No. of Observations	5
Degrees of Freedom	2
X Coefficient(s)	9.2395434 -61.34569 =Mman, Nman
Std Err of Coef.	9.108623 4.464457

eq. 4
temperat=
=81.622694278693+(2.4673283128261*K)+(-52.0034282953821*M)

Regression Output:

Constant	81.62269 =Kman
Std Err of Y Est	1.659076
R Squared	0.985343
No. of Observations	6
Degrees of Freedom	3
X Coefficient(s)	2.467328 -52.0034 =Mman, Nman
Std Err of Coef.	5.335985 8.358682

3- Equações relacionando os coeficientes Kman, Mman e Nman mostrados acima com a taxa de deformação (epspt), com o coeficiente de correlação linear R^2 de cada equação

LEGENDA: epspt = taxa de deformação; R^2 = coeficiente de correlação linear

kmn1, ... : nome do arquivo gráfico mostrando os resultados experimentais e as curvas interpoladas

3.1- Kman =k1+k2*epspt +k3*epspt^2

kmn7
Kman =
=39.465561+(1.903229*epspt)+(-0.019906792*(epspt^2))
R^2=0,99622

3.2- Mman =m1+m2*epspt +m3*epspt^2

kmn8
Mman =
=-102.12392+(4.4096631*epspt)+(-0.044078955*(epspt^2))
R^2=0,99243

3.3- Nman =n1+n2*epspt +n3*epspt^2

kmn9
Nman =
=50.218698+(-4.5317853*epspt)+(0.046786498*(epspt^2))
R^2=0,99274

epspt (s-1)	epspt*100	Kman	Kman barr	erro relat
0.0006	6	50.54045	50.16829	0.736361
0.0024	24	72.56028	73.87674	1.538672
0.0042	42	85.40206	84.2856	1.307305
0.006	60	81.62269	81.99485	0.455946

epspt (s-1)	epspt*100	Mman	Mman barr	erro relat
0.0006	6	-75.9485	-77.2528	1.717338
0.0024	24	-25.5944	-21.6815	15.28812
0.0042	42	9.239543	5.326654	42.34939
0.006	60	2.467328	3.771628	52.86283

epspt (s-1)	epspt*100	Nman	Nman barr	erro relat
0.0006	6	23.4587	24.7123	5.343854
0.0024	24	-27.8343	-31.5951	13.51137
0.0042	42	-61.3457	-57.5849	6.130496
0.006	60	-52.0034	-53.257	2.410608

A2.4 Resumo dos parâmetros e coeficientes de correlação linear para as equações descrevendo o comportamento à relaxação - Material 60/40-C

- 1) Parâmetros da relação tensão=f(tempo)

LEGENDA: c.p. = corpo de prova; fg2 = nome do corpo de prova ("2" indica relaxação); epspt = taxa de deformação;
 Parameter = identificação do parâmetro; Value = valor do parâmetro; R^2 = coeficiente de correlação linear
 na nomenclatura do programa numérico: $y = A0 + A1 x + A2 x^2 + A3 x^3 + \dots$, onde "y" representa a tensão e "x" o tempo
 na nomenclatura da tese: $tensão = A + D * t + G * t^2$, t = tempo
 i.e. os parâmetros notados A0, A1 e A2 correspondem aos parâmetros A, D e G

epspt=0.00060 s-1

c.p.:	fg2	fh2	fi2	fj09_2	fj14_2	fk2
temperat:	46	50	39	43	55	57
	Parameter Value					
A0	0,9204412 A0	0,8962537 A0	0,9301661 A0	0,9301661 A0	0,8727255 A0	0,88930384
A1	-0,008595 A1	-0,007956 A1	-0,007274 A1	-0,007274 A1	-0,009078 A1	-0,0092941070
A2	4,7374922 A2	3,9956581 A2	3,9613834 A2	3,9613834 A2	5,2185777 A2	5,2217601E-5
R^2	=0,98619	=0,98131	=0,98355	=0,98355	=0,97314	=0,98126

epspt=0.00240 s-1

c.p.:	fb2	fc2	fd2	fe2	ff2
temperat:	46	50	54	38	42
	Parameter Value				
A0	0,7940762 A0	0,7811740 A0	0,7455649 A0	0,9057760 A0	0,83451103
A1	-0,009429 A1	-0,009879 A1	-0,010190 A1	-0,005984 A1	-0,0091745952
A2	5,4630372 A2	5,8091889 A2	6,1470346 A2	2,5267503 A2	5,5197128E-5
R^2	=0,94305	=0,94187	=0,92587	=0,97122	=0,95332

epspt=0.0042 s-1

c.p.:	gb2	gi2	go2	gq	gw2	hk2	hm2
temperat:	49	53.5	47	50	46	39	43
	Parameter Value						
A0	0,6947821 A0	0,6752787 A0	0,7132888 A0	0,7026047 A0	0,7557353 A0	0,7932873 A0	0,76354901
A1	-0,010924 A1	-0,010692 A1	-0,010847 A1	-0,010855 A1	-0,015311 A1	-0,011002 A1	-0,0099350587
A2	7,3749768 A2	7,0010715 A2	7,0658576 A2	7,0132773 A2	1,3833899 A2	8,2764574 A2	6,4734323E-5
R^2	=0,90472	=0,8976	=0,91545	=0,90811	=0,92694	=0,93064	=0,92438

epspt=0.006 s-1

c.p.:	gk	gn2	gp	gr	hc	hj	hl
temperat:	54	49	46	50	46	39	43
	Parameter Value						
A0	0,6255838 A0	0,6970427 A0	0,6742270 A0	0,6573961 A0	0,7024426 A0	0,7351743 A0	0,71911731
A1	-0,010543 A1	-0,010431 A1	-0,010549 A1	-0,010930 A1	-0,009797 A1	-0,008947 A1	-0,0092669463
A2	7,0435625 A2	6,5446195 A2	7,0595952 A2	7,416214E A2	6,2814885 A2	5,5874264 A2	5,8426449E-5
R^2	=0,86607	=0,90614	=0,89573	=0,88884	=0,89999	=0,90498	=0,90142

- 2) Parâmetros das relações A=f(temperatura), D=f(temperatura), G=f(temperatura) entre os parâmetros A, D e G dados acima e a temperatura

relações: $A = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot \text{temperatura} + \alpha_3 \cdot \text{temperatura}^2$
 $D = \delta_1 + \delta_2 \cdot \text{temperatura} + \delta_3 \cdot \text{temperatura}^2$
 $G = \gamma_1 + \gamma_2 \cdot \text{temperatura} + \gamma_3 \cdot \text{temperatura}^2$

- 2.1) relação de temperaturas e coeficientes (resumo dos parâmetros dados acima)

LEGENDA: epspt=taxa de deformação; adg1_1, ... : nome do arquivo gráfico mostrando os resultados experimentais e as curvas interpoladas

adg1_1			adg2_1			adg3_1			adg4_1		
epspt=0.0006 (s-1)			epspt=0.0024 (s-1)			epspt=0.0042 (s-1)			epspt=0.006 (s-1)		
temperat (A)	D	G	temperat (A)	D	G	temperat (A)	D	G	temperat (A)	D	G
46	0.920441	-0.0086	38	0.905776	-0.005984	39	0.793287	-0.011002	39	0.735174	-0.008947
50	0.896254	-0.00796	42	0.834511	-0.009174	43	0.783549	-0.009935	43	0.719117	-0.009268
39	0.930166	-0.00727	46	0.794076	-0.009428	46	0.755735	-0.015311	46	0.702442	-0.009797
43	0.930166	-0.00727	50	0.781174	-0.009878	47	0.713288	-0.010847	46	0.674227	-0.010549
54.5	0.872726	-0.00908	54	0.745564	-0.010190	49	0.694782	-0.010924	49	0.697042	-0.010431
57	0.889304	-0.00929				50	0.702604	-0.010855	50	0.657398	-0.010930
						53.5	0.875278	-0.010692	54	0.625583	-0.010543

- 2.2) parâmetros α_i , δ_i , γ_i das relações $A=A(\alpha_i, \text{temperatura})$, $D=D(\delta_i, \text{temperatura})$ e $G=G(\gamma_i, \text{temperatura})$

LEGENDA: Parameter = identificação do parâmetro; Value = valor do parâmetro; R^2 = coeficiente de correlação linear

epspt=0.0006 (s-1)			epspt=0.0024 (s-1)			epspt=0.0042 (s-1)			epspt=0.006 (s-1)		
A	D	G	A	D	G	A	D	G	A	D	G
Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value
alpha 1	1,055929	delta 1	-0,005343	gamma 1	8,547241	alpha 1	2,161649	delta 1	0,053311	gamma 1	-4,822281
alpha 2	-0,003007	delta 2	-3,651258	gamma 2	-2,455536	alpha 2	-0,049940	delta 2	-0,002512	gamma 2	2,203793
alpha 3	-1,825669	delta 3	-1,151522	gamma 3	3,301620	alpha 3	4,412695	delta 3	2,483572	gamma 3	-2,190806
R^2=0,84042	R^2=0,80381	R^2=0,68344	R^2=0,97877	R^2=0,91697	R^2=0,86654	R^2=0,92341	R^2=0,83318	R^2=0,91315	R^2=0,86443	R^2=0,80844	R^2=0,71769

- 3) Parâmetros das relações $\alpha_i=f(\text{epspt})$, $\delta_i=f(\text{epspt})$, $\gamma_i=f(\text{epspt})$ entre os parâmetros α_i , δ_i , γ_i dados acima e a taxa de deformação

relações: $\alpha_i = a_i + b_i \cdot \text{epspt} + c_i \cdot \text{epspt}^2$
 $\delta_i = d_i + e_i \cdot \text{epspt} + f_i \cdot \text{epspt}^2$
 $\gamma_i = g_i + h_i \cdot \text{epspt} + i_i \cdot \text{epspt}^2$

- 3.1) relação de temperaturas e coeficientes (resumido dos parâmetros acima)

LEGENDA: epspt=taxa de deformação

alfbg1, ... : nome do arquivo gráfico mostrando os resultados experimentais e as curvas interpoladas

alfbg1_1			alfbg2_1			alfbg3_1		
epspt (s-1)			epspt (s-1)			epspt (s-1)		
alfa-1	alfa-2	alfa-3	delta-1	delta-2	delta-3	gama-1	gama-2	gama-3
0.0006	1,055929	-0,003007	0.0006	-0,005343	-3,651258	0.0006	8,547241	-2,455536
0.0024	2,161649	-0,049940	0.0024	0,053311	-0,002512	0.0024	-4,822281	2,203793
0.0042	1,183047	-0,010828	0.0042	0,041749	-0,002341	0.0042	-5,180028	2,719695
0.006	0,557169	0,012949	0.006	0,013833	-9,053618	0.006	-1,092750	6,421385

- 3.2) parâmetros a_i , b_i , c_i , d_i , e_i , f_i , g_i , h_i , i_i das relações $A=A(a_i, \text{temperatura})$, $D=D(d_i, \text{temperatura})$ e $G=G(g_i, \text{temperatura})$

LEGENDA: Parameter = identificação do parâmetro; Value = valor do parâmetro; sd = desvio padrão; R^2 = coeficiente de correlação linear

alfa1	alfa2	alfa3	delta1	delta2	delta3	gama1	gama2	gama3
Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	sd	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value
a1	0,779278	a2	0,008866	a3	-1,040432	d1	-0,028229	0,00033
b1	744,3386	b2	-31,17818	b3	0,288571	e1	46,64088	0,24369
c1	-133810,9	c2	5456,133	c3	-52,63643	f1	-6679,863	35,87094
R^2=0,78049	R^2=0,76011	R^2=0,78139	R^2=0,93172			R^2=0,97672	R^2=0,99469	R^2=0,99737

A2.5 Resumo dos parâmetros e coeficientes de correlação linear para as equações descrevendo o comportamento à relaxação - Material 70/30-C

- 1) Parâmetros da relação tensão=f(tempo)

LEGENDA: c.p. = corpo de prova; fg2 = nome do corpo de prova ("2" indica relaxação); epspt = taxa de deformação;
 Parameter = identificação do parâmetro; Value = valor do parâmetro; sd = desvio padrão; R^2 = coeficiente de correlação linear
 na nomenclatura do programa numérico: $y = A0 + A1 x + A2 x^2 + A3 x^3 + \dots$, onde "y" representa a tensão e "x" o tempo
 na nomenclatura da tese: $tensão = A + D * t + G * t^2$, t = tempo
 i.e. os parâmetros notados A0, A1 e A2 correspondem aos parâmetros A, D e G

eps=0.00048 s-1

c.p.:	fo	fq	fr
teta:	43	46	51
	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value
A0	0,933708E A0	0,929667E A0	0,92962080
A1	-0,006391 A1	-0,007110 A1	-0,0080011589
A2	3,396626E A2	3,775866E A2	4,7263435E-5
R^2	=0,98021	=0,98473	=0,98616

eps=0.00078 s-1

c.p.:	gs	fs	ft	ga
teta:	42	45	48.5	55.5
	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value
A0	0,919309E A0	0,9109661 A0	0,8834924 A0	0,87757376
A1	-0,007279 A1	-0,008031 A1	-0,008057 A1	-0,010232272
A2	4,113969E A2	4,678758E A2	3,8478984 A2	6,1947254E-5
R^2	=0,97894	=0,97459	=0,97967	=0,9704

eps=0.00108 s-1

c.p.:	gt	gv	gy	gz	gb
teta:	42	45	49	52	56
	Parameter Value				
A0	0,899285E A0	0,892780E A0	0,874823E A0	0,873913E A0	0,84533901
A1	-0,007573 A1	-0,008596 A1	-0,009305 A1	-0,008746 A1	-0,010582947
A2	4,384830E A2	5,282607E A2	5,587354E A2	5,106802E A2	6,530311E-5
R^2	=0,97019	=0,97106	=0,96762	=0,96731	=0,96476

eps=0.0138 s-1

c.p.:	gu	gw	gx	ha	gc
teta:	42	45	49	52	55.5
	Parameter Value				
A0	0,877683E A0	0,868523E A0	0,8470934 A0	0,843870E A0	0,82494896
A1	-0,008609 A1	-0,008686 A1	-0,009512 A1	-0,009234 A1	-0,010593216
A2	5,328346E A2	5,2724324 A2	5,640735E A2	5,446156E A2	6,5157323E-5
R^2	=0,96342	=0,9609	=0,96096	=0,95704	=0,9557

- 2) Parâmetros das relações $A=f(\text{temperatura})$, $D=f(\text{temperatura})$, $G=f(\text{temperatura})$ entre os parâmetros A, D e G dados acima e a temperatura

relações: $A = \text{alfa1} + \text{alfa2} * \text{temperatura} + \text{alfa3} * \text{temperatura}^2$
 $D = \text{delta1} + \text{delta2} * \text{temperatura} + \text{delta3} * \text{temperatura}^2$
 $G = \text{gama1} + \text{gama2} * \text{temperatura} + \text{gama3} * \text{temperatura}^2$

- 2.1) relação de temperaturas e coeficientes (resumo dos parâmetros dados acima)

LEGENDA: epspt=taxa de deformação; adg5_1, ... : nome do arquivo gráfico mostrando os resultados experimentais e as curvas interpoladas

adg9_1 adg9_2 adg9_3			adg10_1 adg10_2 adg10_3			adg11_1 adg11_2 adg11_3			adg12_1 adg12_2 adg12_3		
epspt=0,00048 (s-1)			epspt=0,00078 (s-1)			epspt=0,00108 (s-1)			epspt=0,00138 (s-1)		
temperat (A)	D	G	temperat (A)	D	G	temperat (A)	D	G	temperat (A)	D	G
43 0,933708	-0,008391	3,3966282E-5	45 0,910966	-0,008031	4,8787583E-5	58 0,845339	-0,010582	6,530311E-5	55,5 0,824848	-0,010593	6,5157323E-5
46 0,9296671	-0,0071103	3,7758665E-5	48,5 0,883492	-0,008057	3,8478984E-5	42 0,899285	-0,007573	4,3848309E-5	42 0,877683	-0,008609	5,3283468E-5
51 0,929820	-0,008001	4,7263435E-5	55,5 0,877573	-0,010232	6,1947254E-5	45 0,892780	-0,008596	5,2826076E-5	45 0,866523	-0,008686	5,2724324E-5
			42 0,819309	-0,007279	4,1139696E-5	49 0,874823	-0,009305	5,5873542E-5	49 0,847093	-0,009512	5,6407352E-5
						52 0,873913	-0,008746	5,106802E-5	52 0,843870	-0,009234	5,4481568E-5
						53,5 0,675278	-0,010692	7,0010715E-5	54 0,825583	-0,010543	7,0435625E-5

- 2.2) parâmetros alfa_i, delta_i, gama_i das relações $A=A(\text{alfa}_i, \text{temperatura})$, $D=D(\text{delta}_i, \text{temperatura})$ e $G=G(\text{gama}_i, \text{temperatura})$

LEGENDA: Parameter = identificação do parâmetro; Value = valor do parâmetro; R^2 = coeficiente de correlação linear

epspt=0,00048 (s-1)			epspt=0,00078 (s-1)			epspt=0,00108 (s-1)			epspt=0,00138 (s-1)		
A	D	G	A	D	G	A	D	G	A	D	G
Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value
alfa 1 0,952455	delta1 0,002112	gama1 -3,904123	alfa 1 1,677289	delta1 -0,022975	gama1 4,788807	alfa 1 0,709897	delta1 -0,006953	gama1 5,484636	alfa 1 1,021664	delta1 -0,024848	gama1 2,7531387E-4
alfa 2 -4,597911	delta2 -1,988593	gama2 1,686514	alfa 2 -0,029030	delta2 8,066869	gama2 -1,919836	alfa 2 0,010623	delta2 9,786125	gama2 -1,249002	alfa 2 -0,003096	delta2 7,806305	gama2 -9,8513696E-6
alfa 3 0	delta3 0	gama3 0	alfa 3 2,631841	delta3 -1,038613	gama3 2,103473	alfa 3 -1,459302	delta3 -2,819293	gama3 2,489142	alfa 3 -7,708215	delta3 -9,393294	gama3 1,0892316E-7
R^2=0,62708	R^2=0,99333	R^2=0,99008	R^2=0,83299	R^2=0,96369	R^2=0,82556	R^2=0,96044	R^2=0,80659	R^2=0,71528	R^2=0,97721	R^2=0,87175	R^2=0,84313

- 3) Parâmetros das relações $\text{alfa}_i=f(\text{epspt})$, $\text{delta}_i=f(\text{epspt})$, $\text{gama}_i=f(\text{epspt})$ entre os parâmetros alfa_i, delta_i, gama_i dados acima e a taxa de deformação

relações: $\text{alfa}_i = \text{a}_i + \text{b}_i * \text{teta} + \text{c}_i * \text{teta}^2$
 $\text{delta}_i = \text{d}_i + \text{e}_i * \text{teta} + \text{f}_i * \text{teta}^2$
 $\text{gama}_i = \text{g}_i + \text{h}_i * \text{teta} + \text{l}_i * \text{teta}^2$

- 3.1) relação de temperaturas e coeficientes (resumido dos parâmetros acima)

LEGENDA: epspt=taxa de deformação

alfbg1, ... : nome do arquivo gráfico mostrando os resultados experimentais e as curvas interpoladas

alfbg4_1 alfbg4_2 alfbg4_3			alfbg5_1 alfbg5_2 alfbg5_3			alfbg6_1 alfbg6_2 alfbg6_3		
epspt			epspt			epspt		
alfa-1	alfa-2	alfa-3	delta-1	delta-2	delta-3	gama-1	gama-2	gama-3
0,00048 0,952455	-4,597911	0	0,00048 0,002112	-1,988583	0	0,00048 -3,904123	1,686514	0
0,00078 1,677289	-0,029030	2,6318419E-4	0,00078 -0,022975	8,066869	-1,038613E-5	0,00078 4,788807	-1,919836	2,103473E-7
0,00108 0,709897	0,010623	-1,4593026E-4	0,00108 -0,006953	9,786125	-2,819293E-8	0,00108 5,484636	-1,249002	2,4891421E-8
0,00138 1,021664	-0,003096	-7,7082155E-8	0,00138 -0,024848	7,806305	-9,393294E-6	0,00138 2,753138	-9,851369	1,0892316E-7

- 3.2) parâmetros a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i, g_i, h_i, l_i das relações $A=A(\text{alfa}_i, \text{temperatura})$, $D=D(\text{delta}_i, \text{temperatura})$ e $G=G(\text{gama}_i, \text{temperatura})$

LEGENDA: Parameter = identificação do parâmetro; Value = valor do parâmetro; sd = desvio padrão; R^2 = coeficiente de correlação linear

alfa1	alfa2	alfa3	delta1	delta2	delta3	gama1	gama2	gama3
Parameter Value								
a1 0,462546	a2 0,015706	a3 -9,979033	d1 0,021973	d2 -9,942105	d3 8,707718	g1 -5,900795	g2 2,368332	g3 -2,2176627E-7
b1 1880,919	b2 -66,14618	b3 0,501558	e1 -58,78342	e2 2,410890	e3 -0,026567	h1 1,709858	h2 -0,068014	h3 6,9973493E-4
c1 -1147406	c2 41251,52	c3 -347,11701	f1 19980,36	f2 -896,6001	f3 10,58925	l1 -826,26212	l2 34,11808	l3 -0,35087656
R^2=0,13842	R^2=0,1248	R^2=0,15117	R^2=0,44237	R^2=0,38278	R^2=0,32572	R^2=0,22046	R^2=0,19445	R^2=0,18391

A2.6 *Resumo dos parâmetros e coeficientes de correlação linear para as equações descrevendo o comportamento à relaxação - Material 80/20-C*

- 1) Parâmetros da relação tensão=f(tempo)

LEGENDA: c.p. = corpo de prova; fg2 = nome do corpo de prova ("2" indica relaxação); epspt = taxa de deformação;
 Parameter = identificação do parâmetro; Value = valor do parâmetro; sd = desvio padrão; R^2 = coeficiente de correlação linear
 na nomenclatura do programa numérico: $y = A0 + A1 x + A2 x^2 + A3 x^3 + \dots$, onde "y" representa a tensão e "x" o tempo
 na nomenclatura da tese: $tensão = A + D * t + G * t^2$, t = tempo
 i.e. os parâmetros notados A0, A1 e A2 correspondem aos parâmetros A, D e G

eps=0.00024 s-1

c.p.:	hp	hq	hs	hw
teta:	52.5	49	55	59
	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value
A0	0,967331	0,966258	0,961179	0,943396
A1	-0,005471	-0,005049	-0,005685	-0,006581
A2	2,682506	2,375236	2,791430	3,107122
R^2	0,99297	0,99331	0,99281	0,99102

eps=0.00042 s-1

c.p.:	ho	hv	hx	ia
teta:	53	55	61	57.5
	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value
A0	0,948677	0,934133	0,928729	0,938524
A1	-0,006480	-0,007353	-0,008071	-0,007679
A2	3,420746	3,873914	4,491744	4,402219
R^2	0,98784	0,98677	0,98574	0,98739

eps=0.0006 s-1

c.p.:	ht	hy	ib	ie	ig
teta:	55	61	57.5	66	70
	Parameter Value				
A0	0,928462	0,905121	0,919423	0,879838	0,856808
A1	-0,007730	-0,009004	-0,008251	-0,010007	-0,010834
A2	4,472115	5,221175	4,866097	6,2238E-5	6,977975
R^2	0,9828	0,98058	0,98137	0,97434	0,96942

eps=0.00078 s-1

c.p.:	hu	hz	ic	if	ih
teta:	55	60.5	57.5	65	70.5
	Parameter Value				
A0	0,907504	0,891866	0,757501	0,848150	0,830429
A1	-0,008253	-0,009454	-0,006065	-0,010592	-0,010392
A2	4,850022	5,740707	2,815844	6,609072	6,642698
R^2	0,97694	0,97658	0,91898	0,96737	0,95861

- 2) Parâmetros das relações $A=f(\text{temperatura})$, $D=f(\text{temperatura})$, $G=f(\text{temperatura})$ entre os parâmetros A, D e G dados acima e a temperatura

relações: $A = \text{alfa1} + \text{alfa2} * \text{temperatura} + \text{alfa3} * \text{temperatura}^2$
 $D = \text{delta1} + \text{delta2} * \text{temperatura} + \text{delta3} * \text{temperatura}^2$
 $G = \text{gama1} + \text{gama2} * \text{temperatura} + \text{gama3} * \text{temperatura}^2$

- 2.1) relação de temperaturas e coeficientes (resumo dos parâmetros dados acima)

LEGENDA: epspt=taxa de deformação; adg1, ... : nome do arquivo gráfico mostrando os resultados experimentais e as curvas interpoladas

adg5_1			adg6_1			adg7_1			adg8_1		
epspt=0.00024 (s-1)			epspt=0.00042 (s-1)			epspt=0.0006 (s-1)			epspt=0.00078 (s-1)		
temperat (A)	D	G	temperat (A)	D	G	temperat (A)	D	G	A	D	G
52.5	0.967331	-0,005471	53	0,948677E-5	-0,006480	55	0,928462E-5	-0,007730	55	0,907504E-5	-0,008253
49	0.966258	-0,005049	55	0.934133E-5	-0,007353	61	0.905121E-5	-0,009004	60.5	0.891866E-5	-0,009454
55	0.961179	-0,005685	81	0.928729E-5	-0,008071	57.5	0.919423E-5	-0,008251	57.5	0.757501E-5	-0,006065
59	0.943396	-0,006581	57.5	0.938524E-5	-0,007679	68	0.879838E-5	-0,010007	65	0.848150E-5	-0,010592
			85	0.901771E-5	-0,009910	70	0,856808E-5	-0,010834	70.5	0,830429E-5	-0,010392

- 2.2) parâmetros alfa_i , delta_i , gama_i das relações $A=A(\text{alfa}_i, \text{temperatura})$, $D=D(\text{delta}_i, \text{temperatura})$ e $G=G(\text{gama}_i, \text{temperatura})$

LEGENDA: Parameter = identificação do parâmetro; Value = valor do parâmetro; R^2 = coeficiente de correlação linear

epspt=0.00024 (s-1)			epspt=0.00042 (s-1)			epspt=0.0006 (s-1)			epspt=0.00078 (s-1)		
A	D	G	A	D	G	A	D	G	A	D	G
Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value	Parameter Value
alfa 1	-0,012403	delta1	-0,022903	gama1	-2,56994E	alfa 1	0,253112E	delta1	-0,028340	gama1	2,402455E
alfa 2	0,038481	delta2	7,903571E	gama2	1,2578631E	alfa 2	0,026419E	delta2	9,479862E	gama2	-8,605454E
alfa 3	-3,776742	delta3	-8,702019	gama3	-5,033668E	alfa 3	-2,525453	delta3	-1,019117	gama3	8,950688E
R^2=0,99895	R^2=0,99054	R^2=0,9904	R^2=0,91406	R^2=0,94765	R^2=0,93981	R^2=0,99997	R^2=0,99993	R^2=0,99657	R^2=0,94652	R^2=0,96402	R^2=0,97425

- 3) Parâmetros das relações $\text{alfa}_i=f(\text{epspt})$, $\text{delta}_i=f(\text{epspt})$, $\text{gama}_i=f(\text{epspt})$ entre os parâmetros alfa_i , delta_i , gama_i dados acima e a taxa de deformação

relações: $\text{alfa}_i = \text{a}_i + \text{b}_i * \text{teta} + \text{c}_i * \text{teta}^2$
 $\text{delta}_i = \text{d}_i + \text{e}_i * \text{teta} + \text{f}_i * \text{teta}^2$
 $\text{gama}_i = \text{g}_i + \text{h}_i * \text{teta} + \text{l}_i * \text{teta}^2$

- 3.1) relação de temperaturas e coeficientes (resumido dos parâmetros acima)

LEGENDA: epspt=taxa de deformação

alfbg1, ... : nome do arquivo gráfico mostrando os resultados experimentais e as curvas interpoladas

alfbg7_1			alfbg8_1			alfbg9_1		
epspt			epspt			epspt		
alfa-1	alfa-2	alfa-3	delta-1	delta-2	delta-3	gama-1	gama-2	gama-3
0.00024	-0.0124	0.038481	0.00024	-0.0229	0.00079	0.00024	-2.6E-05	1.3E-06
0.00042	0.253113	0.02642	0.00042	-0.02834	0.000948	0.00042	0.00024	-8.6E-06
0.0006	0.825363	0.007106	0.0006	0.005045	-0.00025	0.0006	9E-05	-2.8E-06
0.00078	1.130679	-1.9E-05	0.00078	0.049239	-0.00174	0.00078	-0.00032	1.1E-05

- 3.2) parâmetros a_i , b_i , c_i , d_i , e_i , f_i , g_i , h_i , l_i das relações $A=A(\text{alfa}_i, \text{temperatura})$, $D=D(\text{delta}_i, \text{temperatura})$ e $G=G(\text{gama}_i, \text{temperatura})$

LEGENDA: Parameter = identificação do parâmetro; Value = valor do parâmetro; sd = desvio padrão; R^2 = coeficiente de correlação linear

alfa1	alfa2	alfa3	delta1	delta2	delta3	gama1	gama2	gama3	
Parameter Value									
a1	-0,517129	a2	0,064559E	a3	-6,189122	d1	0,014076E	d2	-3,653155
b1	1909,809E	b2	-113,7494	b3	1,070296E	e1	-251,8318	e2	8,092296E
c1	307101,8E	c2	38091,04E	c3	-376,5432	f1	382958,3E	f2	-12728,39
R^2=0,97987	R^2=0,97976	R^2=0,99153	R^2=0,98861	R^2=0,98769	R^2=0,9842	R^2=0,9928	R^2=0,98501	R^2=0,97327	

A2.7 Resumo dos parâmetros e coeficientes de correlação linear para as equações descrevendo o comportamento à fluência - Material 60/40

- LEGENDA:

fi: nome do corpo de prova; 39oC: temperatura de ensaio;
 sigma*: valor de tensão constante referente à curva de fluência dada; E = valor estimado do módulo de elasticidade;
 eps pl pt = epron plástico ponto, i.e. taxa de deformação
 (o valor mostrado se refere à tangente à curva tensão x tempo no ponto sigma*,
 que é aproximadamente igual à taxa temporal de deformação neste ponto)
 -eps pl = epron plástico, i.e. deformação plástica
 a, d, g: parâmetros "A", "D" e "G" da fluência (não são possíveis Índices subscritos na planilha)

1)- Coeficientes das curvas intermediárias
 relacionando as variáveis:
 1/taxa de deformação x deformação plástica

2)- Coeficientes das curvas de fluência
 Forma da regressão polinomial:
 deformação = a + d * t + g * t^2
 onde t = tempo

Parameter = coeficiente;
 Value = valor do coeficiente;
 SD, sd = desvio padrão;
 R = coeficiente de correlação linear

a)- taxa temporal de deformação = 0,00060 s-1

fi 39oC sigma* = 0,011 kN/mm2
 E=~ 2.345416 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.426378	2.345335	0.0463
0.426376	2.345345	0.0527
0.426375	2.345352	0.0581
0.426373	2.345362	0.0639
0.426372	2.345371	0.0704
0.426371	2.345376	0.0766
0.42637	2.345381	0.0826
0.426369	2.345386	0.0882

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 1/epsplpt = 2.3452226+(0.0030471616*())+(-0.013582161*()^2)
 R^2=0,99875 SD =7,5631E-7

Parameter	Value	sd
a	0,046299	3,2472E-9
d	0,426377	1,5272E-7
g	-5,041439	1,5038E-6

R =1
 R^2=1
 SD =1,1094E-8

fj09 43oC sigma* = 0,0085 kN/mm2
 E=~ 1.812367 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.551781	1.812314	0.0469
0.551779	1.81232	0.0527
0.551777	1.812327	0.0584
0.551775	1.812334	0.0645
0.551773	1.81234	0.0709
0.551774	1.812337	0.0765
0.551774	1.812336	0.0827
0.551774	1.812337	0.0886

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 1/epsplpt = 1.812185+(0.0038917291*())+(-0.02468651*()^2)
 R^2=0,96317 SD =2,1051E-6

Parameter	Value	sd
a	0,046900	5,0301E-9
d	0,551778	3,0761E-7
g	-4,525253	3,9387E-6

R =1
 R^2=1
 SD =1,7185E-8

fg 46oC sigma* = 0,0055 kN/mm2
 E=~ 1.172708 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.852744	1.172685	0.0469
0.852743	1.172687	0.0524
0.852739	1.172692	0.0587
0.852739	1.172691	0.0647
0.852739	1.172692	0.0708
0.852737	1.172694	0.0768
0.852735	1.172697	0.0829
0.852736	1.172695	0.0888

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 1/epsplpt = 1.1726532+(0.00089556367*())+(-0.0046494069*()^2)
 R^2=0,91211 SD =1,4688E-6

Parameter	Value	sd
a	0,046900	1,7491E-6
d	0,852334	0,00016
g	0,006766	0,00324

R =1
 R^2=1
 SD =5,9786E-6

fh 50oC sigma* = 0,003 kN/mm2
E=~ 0,639659 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
1.56335	0.639652	0.0467
1.563348	0.639653	0.0522
1.563344	0.639655	0.0587
1.563343	0.639655	0.0644
1.563342	0.639655	0.0704
1.56334	0.639656	0.0763
1.563339	0.639656	0.0824

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 0.6396363+(0.00045405837*())+(-0.0025683257*()^2)
R^2=0,97571 SD =3,1303E-7

fj14 55oC sigma* = 0,0017 kN/mm2
E=~ 0,362473 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
2.758846	0.36247	0.0464
2.758847	0.36247	0.0526
2.758842	0.362471	0.0584
2.758836	0.362472	0.0645
2.758836	0.362472	0.0704
2.758835	0.362472	0.0765
2.758835	0.362472	0.0826

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 0.36246338+(0.00020031081*())+(-0.0011756561*()^2)
R^2=0,88538 SD =2,8713E-7

b) taxa temporal de deformação = 0,00240 s-1

fe 58oC sigma* = 0,0131 kN/mm2
E=~ 2,793177 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.358025	2.793101	0.048
0.358024	2.793108	0.0539
0.358023	2.793117	0.0596
0.358023	2.79312	0.064
0.358022	2.793123	0.0709
0.358021	2.793131	0.0774
0.358023	2.793117	0.0831

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 2.7929076+(0.0059363285*())+(-0.040529879*()^2)
R^2=0,88343 SD =4,1386E-6

ff -42oC sigma* = 0,0094 kN/mm2
E=~ 2,004264 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.498949	2.004211	0.0469
0.49895	2.004207	0.0525
0.498947	2.004222	0.0601
0.498948	2.004218	0.0645
0.498945	2.004229	0.0705
0.498944	2.004232	0.0764
0.498945	2.004228	0.0828
0.498944	2.004233	0.0887

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 2.004139+(0.0019172118*())+(-0.009720535*()^2)
R^2=0,8412 SD =4,5737E-6

fb 46oC sigma* = 0,006 kN/mm2
E=~ 1,279318 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.781714	1.279241	0.0451
0.781689	1.279281	0.0506
0.781682	1.279292	0.0575
0.781679	1.279297	0.0646
0.781682	1.279293	0.0711
0.781681	1.279295	0.0767
0.781678	1.279299	0.0829
0.781676	1.279303	0.0885

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 1.2790151+(0.0074755517*())+(-0.0486338*()^2)
R^2=0,80415 SD =0,00001

Parameter Value sd

Parameter	Value	sd
a	0,0466837	5,7265E-6
d	1,5661148	0,00116
g	-0,099550	0,04909

R =1
R^2=1
SD =0,00002

Parameter Value sd

Parameter	Value	sd
a	0,0464000	2,3667E-8
d	2,7588440	8,336E-6
g	-4,038845	0,00061

R =1
R^2=1
SD =8,0858E-8

Parameter Value sd

Parameter	Value	sd
a	0,0480000	3,191E-9
d	0,3580240	1,5043E-7
g	-1,442715	1,4848E-6

R =1
R^2=1
SD =1,0902E-8

Parameter Value sd

Parameter	Value	sd
a	0,0469000	4,3255E-9
d	0,4989495	2,3863E-7
g	-3,793446	2,7562E-6

R =1
R^2=1
SD =1,4778E-8

Parameter Value sd

Parameter	Value	sd
a	0,0451000	8,4886E-9
d	0,7816951	7,1376E-7
g	-2,411434	0,00001

R =1
R^2=1
SD =2,8863E-8

fc 50oC sigma* = 0,037 kN/mm2
E=~ 0.788913 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
1.267599	0.788893	0.0464
1.267589	0.788899	0.0533
1.267586	0.788901	0.059
1.267581	0.788904	0.065
1.267579	0.788905	0.0715
1.26758	0.788905	0.0777
1.267579	0.788906	0.0827
1.267576	0.788907	0.0879

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 0.78884198+(0.0015536328*())+(-0.0093464563*()^2)
R^2=0,96639 SD =1,0112E-6

fd 54oC sigma* = 0,00175 kN/mm2
E=~ 0.373134 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
2.680026	0.373131	0.0462
2.680025	0.373131	0.0528
2.680022	0.373131	0.0579
2.680011	0.373133	0.0654
2.680015	0.373132	0.0704
2.680009	0.373133	0.0771
2.680009	0.373133	0.0827

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 0.99997329+(0.00043678018*())+(-0.0017938509*()^2)
R^2=0,88725 SD =4,4166E-7

c) taxa temporal de deformação = 0,00420 s-1

hk 39oC sigma* = 0,0105 kN/mm2
E=~ 2.238806 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.446681	2.238734	0.0487
0.446682	2.238731	0.0533
0.446679	2.238745	0.0596
0.44668	2.23874	0.0633
0.446677	2.238756	0.0708
0.446676	2.238759	0.0775
0.446676	2.238762	0.0832

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 2.2386829+(0.001015373*())+(-0.00058014778*()^2)
R^2=0,89958 SD =4,8479E-6

hm 43oC sigma* = 0,0075 kN/mm2
E=~ 1.599147 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.625354	1.599095	0.0452
0.62535	1.599104	0.0524
0.625348	1.599109	0.0588
0.625346	1.599115	0.0655
0.625346	1.599115	0.0711
0.625344	1.599121	0.0774
0.625343	1.599122	0.0828

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 0.045200006+(0.62535228*())+(-8.9305754E-05*()^2)
R^2=1 SD =1,8626E-8

go 46oC sigma* = 0,0030 kN/mm2
E=~ 0.639659 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
1.563358	0.639649	0.0457
1.563354	0.639651	0.0524
1.563357	0.639649	0.0568
1.56335	0.639652	0.0644
1.563347	0.639653	0.0705
1.563348	0.639653	0.0756
1.563345	0.639654	0.0815

Parameter	Value	sd
a	0,046383E 5,7476E-6	
d	1,269537E 0,00081	
g	-0,049059 0,02397	
R	=1	
R^2	=1	
SD	=0,00002	

Parameter	Value	sd
a	0,046199E 7,4242E-9	
d	1,000012E 9,4008E-7	
g	-1,799485 0,00002	
R	=1	
R^2	=1	
SD	=2,5365E-8	

Parameter	Value	sd
a	0,048700E 3,8511E-9	
d	0,446681E 2,3044E-7	
g	-4,114821 2,8871E-6	
R	=1	
R^2	=1	
SD	=1,3157E-8	

Parameter	Value	sd
a	0,045272E 7,885E-6	
d	13,28367E 0,0117	
g	-501,3935 3,58594	
R	=1	
R^2	=0,99999	
SD	=0,00003	

Parameter	Value	sd
a	0,045699E 1,3596E-8	
d	1,563357E 2,7441E-6	
g	-2,425463 0,00012	
R	=1	
R^2	=1	
SD	=4,6452E-8	

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 $1/epsplpt = 0.63964309 + (0.00011092845 * ()) + (0.00031421117 * ()^2)$
 $R^2 = 0,89825 \quad SD = 8,0509E-7$

gq 50oC sigma* = 0,0021 kN/mm2
 E=~ 0,447761 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
2.233358	0.447756	0.046
2.233356	0.447757	0.0511
2.233352	0.447758	0.0574
2.233348	0.447758	0.0636
2.233346	0.447759	0.07
2.233344	0.447759	0.0764
2.233344	0.447759	0.0817

Paramete	Value	sd
a	0,046000	1,6586E-8
d	2,233344	4,7954E-6
g	-6,364990	0,00029
R	=1	
R^2	=1	
SD	=5,6665E-8	

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 $1/epsplpt = 0.44774625 + (0.00028748455 * ()) + (-0.0015787695 * ()^2)$
 $R^2 = 0,98698 \quad SD = 1,6153E-7$

gi 54oC sigma* = 0,00138 kN/mm2
 E=~ 0,373134 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
2.680023	0.373131	0.0448
2.680017	0.373132	0.0513
2.680011	0.373133	0.059
2.68001	0.373133	0.0647
2.680007	0.373133	0.0717
2.680006	0.373134	0.0783
2.680009	0.373133	0.082

Paramete	Value	sd
a	0,044800	2,2358E-8
d	2,680008	7,4444E-6
g	1,656498	0,00052
R	=1	
R^2	=1	
SD	=7,6386E-8	

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 $1/epsplpt = 0.37311859 + (0.00040179388 * ()) + (-0.0027334878 * ()^2)$
 $R^2 = 0,96678 \quad SD = 1,9003E-7$

d) taxa temporal de deformação = 0,00600 s-1

hj 39oC sigma* = 0,0115 kN/mm2
 E=~ 2,452026 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.407889	2.451649	0.0484
0.407899	2.451589	0.0544
0.408085	2.450471	0.0584
0.40789	2.451641	0.0641
0.407858	2.451832	0.0724
0.40786	2.451824	0.0798
0.407882	2.45169	0.0829
0.407849	2.45189	

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 $1/epsplpt = 2.4516021 + (-0.0028929613 * ()) + (0.064992417 * ()^2)$
 $R^2 = 0,60263 \quad SD = 0,00009$

bi 43oC sigma* = 0,0075 kN/mm2
 E=~ 1,599147 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.625352	1.599099	0.046
0.625348	1.599111	0.0529
0.625345	1.599116	0.0603
0.625345	1.599117	0.0659
0.625343	1.599122	0.0726
0.625344	1.599121	0.0766
0.625342	1.599126	0.0824

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 $1/epsplpt = 1.5990103 + (0.0027100579 * ()) + (-0.016127356 * ()^2)$
 $R^2 = 0,95422 \quad SD = 2,3223E-6$

Paramete	Value	sd
a	0,048399	4,697E-8
d	0,407897	2,2303E-6
g	-2,076574	2,2173E-6
R	=1	
R^2	=1	
SD	=1,6048E-8	

Paramete	Value	sd
a	0,046000	5,41E-8
d	0,625349	4,29E-6
g	-7,596408	7,14E-6
R	=1	
R^2	=1	
SD	=1,8485E-8	

gp 46oC sigma* = 0,00325 kN/mm2
E=~ 0,692964 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
1.443097	0.692954	0.0483
1.443097	0.692954	0.0541
1.443105	0.69295	0.058
1.443101	0.692952	0.0633
1.443088	0.692958	0.0717
1.44309	0.692957	0.077
1.443089	0.692958	0.0824

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 $1/epsplpt = 0.69298342 + (-0.0011245224 * ()) + (0.010451123 * ())^2$
 R^2=0,62997 SD =3,3737E-6

gr 50oC sigma* = 0,00225 kN/mm2
E=~ 0,479744 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
2.084473	0.479737	0.0462
2.084468	0.479739	0.0532
2.084468	0.479739	0.0583
2.08446	0.47974	0.0649
2.084464	0.47974	0.0691
2.084456	0.479741	0.076
2.084455	0.479742	0.0823

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 $1/epsplpt = 0.046199988 + (2.0844734 * ()) + (-0.00051110229 * ())^2$
 R^2=1 SD =6,0519E-8

gk 54oC sigma* = 0,00125 kN/mm2
E=~ 0,266525 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
3.752028	0.266523	0.0456
3.752015	0.266523	0.0544
3.752014	0.266524	0.0606
3.75201	0.266524	0.0669
3.752012	0.266524	0.0714
3.752007	0.266524	0.0774

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 $1/epsplpt = 0.26651476 + (0.00024928911 * ()) + (-0.0017000208 * ())^2$
 R^2=0,92236 SD =1,8954E-7

Paramete: Value sd

Paramete	Value	sd
a	0,048299	1,074E-8
d	1,443109	2,1006E-6
g	-5,856197	0,00009

R =1
R^2=1
SD =3,6692E-8

Paramete: Value sd

Paramete	Value	sd
a	0,046361	0,00002
d	6,639581	0,01252
g	-175,8718	1,90646

R =0,99998
R^2=0,99997
SD =0,00006

Paramete: Value sd

Paramete	Value	sd
a	0,045600	3,1706E-8
d	3,752020	0,00002
g	-6,081728	0,00197

R =1
R^2=1
SD =1,0832E-7

A2.8 Resumo dos parâmetros e coeficientes de correlação linear para as equações descrevendo o comportamento à fluência - Material 70/30

- LEGENDA:

fi: nome do corpo de prova; 39oC: temperatura de ensaio;
 sigma*: valor de tensão constante referente à curva de fluência dada; E = valor estimado do módulo de elasticidade;
 eps pl pt = epsilon plástico ponto, i.e. taxa de deformação
 (o valor mostrado se refere à tangente à curva tensão/tempo no ponto sigma*,
 que é aproximadamente igual à taxa temporal de deformação neste ponto)
 eps pl = epsilon plástico, i.e. deformação plástica
 a, d, g: parâmetros "A", "D" e "G" da fluência (não são possíveis índices subscritos na planilha)

1)- Coeficientes das curvas intermediárias
 relacionando as variáveis:
 1/taxa deformação x deformação plástica

2)- Coeficientes das curvas de fluência
 Forma da regressão polinomial:
 deformação = a + d * t + g * t²
 onde t = tempo

Parameter = coeficiente;
 Value = valor do coeficiente;
 SD, sd = desvio padrão;
 R = coeficiente de correlação linear

a) taxa temporal de deformação = 0,00048 s⁻¹

fo 43oC sigma* = 0,015 kN/mm²
 E=-- 3.198294 kN/mm²

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.312679	3.198165	0.0466
0.312677	3.198184	0.0526
0.312698	3.197973	0.0588
0.31269	3.198054	0.0648
0.312687	3.198091	0.0707
0.312684	3.198113	0.0768
0.312683	3.198125	0.0827

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 1/epsplpt = 3.1995473+(-0.045407993*())+(0.34431083*()^2)
 R^2=0,45702 SD =0,00006

Parameter	Value	sd
a	0,0465999	8,9788E-9
d	0,3126869	3,5944E-7
g	1,1071605	3,0126E-6

R =1
 R^2=1
 SD =3,0676E-8

fq 46oC sigma* = 0,010 kN/mm²
 E=~ 2.132196 kN/mm²

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.469018	2.132115	0.0466
0.469014	2.132131	0.0525
0.46902	2.132103	0.0587
0.469021	2.132101	0.0647
0.469019	2.13211	0.0703
0.469016	2.132124	0.0765
0.469012	2.132144	0.0827

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 1/epsplpt = 2.1324166+(-0.010052066*())+(0.081330717*()^2)
 R^2=0,66353 SD =0,00001

Parameter	Value	sd
a	3,61E-4	4,3238E-17
d	1,0000000	1,3656E-15
g	-4,490877	1,0563E-14

R =1
 R^2=1
 SD =1,0258E-17

fr 51oC sigma* = 0,0055 kN/mm²
 E=~ 1.172708 kN/mm²

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.852745	1.172684	0.0464
0.852742	1.172687	0.0526
0.852739	1.172692	0.0587
0.852735	1.172697	0.0645
0.852737	1.172695	0.0704
0.852737	1.172695	0.0767
0.852735	1.172698	0.0827

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 1/epsplpt = 1.1726148+(0.0021066401*())+(-0.013531732*()^2)
 R^2=0,92619 SD =1,7393E-6

Parameter	Value	sd
a	0,0464000	7,2875E-9
d	0,8527429	7,9121E-7
g	-1,259886	0,00002

R =1
 R^2=1
 SD =2,4898E-8

b) taxa temporal de deformação = 0,00078 s-1

gs 42oC sigma* = 0,015 kN/mm2
E=~ 3.198294 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.312676	3.198195	0.0466
0.312676	3.1982	0.0531
0.312675	3.198207	0.0593
0.312674	3.198217	0.065
0.31267	3.198257	0.0712
0.312692	3.198037	0.0775
0.312723	3.197717	0.083

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 3.1952515+(0.10227087*())+(-0.86440288*()^2)
R^2=0,86537 SD =0,00009

fs 45oC sigma* = 0,0114 kN/mm2
E=~ 2.430704 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.411421	2.430603	0.0471
0.411423	2.430591	0.0533
0.41142	2.430604	0.0592
0.411419	2.430615	0.0652
0.411415	2.430634	0.071
0.411412	2.430654	0.0772

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 2.4308407+(-0.0093967609*())+(0.090739425*()^2)
R^2=0,97058 SD =5,1528E-6

ft 49oC sigma* = 0,0049 kN/mm2
E=~ 1.044776 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.957159	1.044759	0.0471
0.957154	1.044764	0.053
0.957154	1.044764	0.0588
0.957154	1.044764	0.0649
0.957151	1.044767	0.0704
0.957151	1.044767	0.0769
0.957151	1.044768	0.083

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 1.0447261+(0.0010144431*())+(-0.0062417545*()^2)
R^2=0,86113 SD =1,3482E-6

ga 56oC sigma* = 0,0029 kN/mm2
E=~ 0.618337 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
1.617257	0.618331	0.0463
1.617255	0.618332	0.0526
1.617252	0.618333	0.0586
1.61725	0.618334	0.0644
1.617248	0.618334	0.0701
1.617247	0.618335	0.0763
1.617247	0.618335	0.0825

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 0.61831875+(0.00034912981*())+(-0.0018628109*()^2)
R^2=0,99612 SD =1,0955E-7

Paramete: Value sd

Paramete	Value	sd
a	0,046600	2,5151E-8
d	0,312659	9,9853E-7
g	1,544157	8,2999E-6

R =1
R^2=1
SD =8,5929E-8

Paramete: Value sd

Paramete	Value	sd
a	0,047099	5,1326E-9
d	0,411425	12,711E-7
g	-8,562408	2,998E-6

R =1
R^2=1
SD =1,7536E-8

Paramete: Value sd

Paramete	Value	sd
a	0,047100	8,1449E-9
d	0,957156	11,0036E-6
g	-9,87103E	0,00003

R =1
R^2=1
SD =2,7827E-8

Paramete: Value sd

Paramete	Value	sd
a	0,046300	1,3836E-8
d	1,617256	2,8567E-6
g	-2,551389	0,00012

R =1
R^2=1
SD =4,7269E-8

c) taxa temporal de deformação = 0,00108 s⁻¹

gt 42oC sigma* = 0,0157 kN/mm2
E=~ 3.347548 kN/mm2

eps	pl	pt	1/epsplpt	eps	pl
0.298736	3.347433			0.0467	
0.298736	3.347442			0.0533	
0.298735	3.347452			0.0591	
0.298734	3.347457			0.065	
0.298737	3.347424			0.0716	
0.298733	3.347467			0.0776	
0.298732	3.347485			0.0957	

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 3.3473604+(0.0017819442*())+(-0.0045232052*()^2)
R^2=0,99601 SD =1,661E-6

gv 45oC sigma* = 0,0115 kN/mm2
E=~ 2.452026 kN/mm2

eps	pl	pt	1/epsplpt	eps	pl
0.407837	2.45196			0.0468	
0.407836	2.451967			0.0526	
0.407834	2.451976			0.0592	
0.407834	2.451981			0.0647	
0.407834	2.451979			0.0715	
0.407965	2.451188			0.0764	

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 2.4517795+(0.0058027544*())+(-0.041951046*()^2)
R^2=0,97483 SD =1,9879E-6

gy 49oC sigma* = 0,0066 kN/mm2
E=~ 1.407249 kN/mm2

eps	pl	pt	1/epsplpt	eps	pl
0.71062	1.407222			0.0465	
0.710617	1.407227			0.0527	
0.710616	1.40723			0.0588	
0.710615	1.407232			0.0652	
0.710614	1.407233			0.0712	
0.710613	1.407236			0.0772	
0.710612	1.407238			0.083	

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 1.4071822+(0.001136378*())+(-0.0056620758*()^2)
R^2=0,9814 SD =9,0549E-7

gz 52oC sigma* = 0,0063 kN/mm2
E=~ 1.343284 kN/mm2

eps	pl	pt	1/epsplpt	eps	pl
0.744457	1.343262			0.0467	
0.744455	1.343265			0.0531	
0.744454	1.343267			0.0586	
0.744453	1.343268			0.065	
0.744451	1.343272			0.0708	
0.74445	1.343273			0.0769	
0.744449	1.343275			0.0826	

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 1.3432362+(0.00064751935*())+(-0.0021745979*()^2)
R^2=0,99344 SD =4,7171E-7

Paramete	Value	sd
a	0,046700	2,5214E-9
d	0,298736	7,1046E-8
g	-1,500074	4,1913E-7

R =1
R^2=1
SD =8,6145E-9

Paramete	Value	sd
a	0,046800	3,5397E-9
d	0,407836	2,254E-7
g	-2,417498	3,0052E-6

R =1
R^2=1
SD =1,2093E-8

Paramete	Value	sd
a	0,046500	6,1325E-9
d	0,710618	5,518E-7
g	-7,285186	0,00001

R =1
R^2=1
SD =2,0952E-8

Paramete	Value	sd
a	0,046700	6,5262E-9
d	0,744456	16,2547E-7
g	-7,424360	0,00001

R =1
R^2=1
SD =2,2297E-8

gb 56oC sigma* = 0,0029 kN/mm2
E=~ 0.618337 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
1.617261	0.618329	0.0463
1.61726	0.61833	0.0524
1.617256	0.618331	0.0585
1.617253	0.618332	0.0647
1.617253	0.618333	0.0707
1.617251	0.618333	0.0765
1.617249	0.618334	0.0823

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 $1/epsplpt = 0.61831648 + (0.00034937408 * ()) + (-0.0016759239 * ()^2)$
R^2=0,98653 SD =2,5093E-7

d) taxa temporal de deformação = 0,00138 s-1

gu 42oC sigma* = 0,014 kN/mm2
E=~ 2.985075 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.335011	2.984976	0.047
0.33501	2.984985	0.0531
0.335009	2.984991	0.0595
0.335009	2.984999	0.0653
0.335048	2.98465	0.0711
0.335008	2.985003	0.0773

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 $1/epsplpt = 2.9848271 + (0.0045967234 * ()) + (-0.030478541 * ()^2)$
R^2=0,98924 SD =1,4565E-6

gw 45oC sigma* = 0,0114 kN/mm2
E=~ 2.430704 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.411415	2.430639	0.0472
0.411413	2.430649	0.0531
0.411429	2.430555	0.0592
0.411411	2.430657	0.0652
0.411431	2.430542	0.0707
0.411551	2.42983	0.0771

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 $1/epsplpt = 2.4247498 + (0.21134091 * ()) + (-1.8677768 * ()^2)$
R^2=0,83374 SD =0,00017

gx 49oC sigma* = 0,0063 kN/mm2
E=~ 1.343284 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.744458	1.343259	0.0471
0.744457	1.34326	0.0528
0.744455	1.343264	0.0588
0.744454	1.343267	0.0653
0.744453	1.343268	0.071
0.744452	1.34327	0.0764
0.744451	1.343271	0.0826

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 $1/epsplpt = 1.3432294 + (0.00077295424 * ()) + (-0.0032374789 * ()^2)$
R^2=0,98281 SD =7,3664E-7

Paramete	Value	sd
a	0,046299	1,1871E-8
d	1,617256	2,4647E-6
g	2,122373	10,00011

R =1
R^2=1
SD =4,0557E-8

Paramete	Value	sd
a	0,047000	2,8222E-9
d	0,335010	1,4421E-7
g	-1,380279	1,5429E-6

R =1
R^2=1
SD =9,6421E-9

Paramete	Value	sd
a	0,047200	3,9658E-8
d	0,411369	2,5221E-6
g	7,451891	0,00003

R =1
R^2=1
SD =1,3549E-7

Paramete	Value	sd
a	0,047100	6,3968E-9
d	0,744457	6,1998E-7
g	-7,496181	0,00001

R =1
R^2=1
SD =2,1855E-8

ha 52oC sigma* = 0,0029 kN/mm2
 E=~ 1.407249 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.71064	1.407182	0.0467
0.710637	1.407188	0.0524
0.710628	1.407206	0.059
0.710623	1.407216	0.0648
0.71062	1.407222	0.0711
0.710619	1.407224	0.0769
0.710617	1.407228	0.0829

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 $1/epsplpt = 1.4069959 + (0.0053973624 * ()) + (-0.031363701 * ()^2)$
 R^2=0,98095 SD =3,0733E-6

gc 56oC sigma* = 0,00295 kN/mm2
 E=~ 0.628998 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
1.589847	0.628992	0.0466
1.589845	0.628992	0.0525
1.589842	0.628993	0.0584
1.589841	0.628994	0.0647
1.589839	0.628994	0.0703
1.589837	0.628995	0.0768
1.589837	0.628995	0.0823

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 $1/epsplpt = 0.6289816 + (0.0002654651 * ()) + (-0.0011782972 * ()^2)$
 R^2=0,99164 SD =1,659E-7

Paramete:	Value	sd
a	0,0467006	6,1185E-9
d	0,7106367	5,5512E-7
g	-2,334590	0,00001

R =1
 R^2=1
 SD =2,0904E-8

Paramete:	Value	sd
a	0,0465996	1,3731E-8
d	1,5898466	2,8261E-6
g	-2,231269	0,00012

R =1
 R^2=1
 SD =4,6912E-8

A2.9 Resumo dos parâmetros e coeficientes de correlação linear para as equações descrevendo o comportamento à fluência - Material 80/20

- LEGENDA:

fi: nome do corpo de prova; 39oC: temperatura de ensaio;
 sigma*: valor de tensão constante referente à curva de fluência dada; E = valor estimado do módulo de elasticidade;
 eps pl pt = epron plástico ponto, i.e. taxa de deformação
 (o valor mostrado se refere à tangente à curva tensãoxtempo no ponto sigma*,
 que é aproximadamente igual à taxa temporal de deformação neste ponto)
 eps pl = epron plástico, i.e. deformação plástica
 a, d, g: parâmetros "Af", "Df" e "Gf" da fluência (não são possíveis índices subscritos na planilha)

1)- Coeficientes das curvas intermediárias
 relacionando as variáveis:
 1/taxa deformação x deformação plástica

2)- Coeficientes das curvas de fluência
 Forma da regressão polinomial:
 deformação = a + d * t + g * t^2
 onde t = tempo

Parameter = coeficiente;
 Value = valor do coeficiente;
 SD, sd = desvio padrão;
 R = coeficiente de correlação linear

a) taxa temporal de deformação = 0,00024 s-1

hq 49oC sigma* = 0,0129 kN/mm2
 E=~ 2.750533 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.363578	2.750443	0.0465
0.363577	2.750448	0.0525
0.363576	2.750453	0.0585
0.363576	2.750457	0.0646
0.363576	2.750456	0.0706

Parameter	Value	sd
a	0,0465000	3,2645E-9
d	0,3635770	1,5195E-7
g	-7,1683171	1,4809E-6

R =1
 R^2=1
 SD =1,1153E-8

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 1/epsplpt = 2.7503373+(0.003369582*())+(-0.023761029*()^2)
 R^2=0,98305 SD =1,0814E-6

hp 53oC sigma* = 0,0163 kN/mm2
 E=~ 3.47548 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.287742	3.475338	0.0463
0.287741	3.475349	0.0523
0.28774	3.475355	0.0582
0.287739	3.475369	0.0644
0.287739	3.475373	0.0704
0.287738	3.475382	0.0763
0.287737	3.475392	0.0824

Parameter	Value	sd
a	0,0462999	2,1125E-9
d	0,2877417	7,7819E-8
g	-1,804828	6,002E-7

R =1
 R^2=1
 SD =7,2173E-9

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 1/epsplpt = 3.475261+(0.0018159654*())+(-0.0028705522*()^2)
 R^2=0.99183 SD =2,0907E-6

hs 55oC sigma* = 0,0092 kN/mm2
 E=~ 1.96162 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.509794	1.961577	0.0461
0.509792	1.961585	0.0525
0.509791	1.96159	0.0584
0.509787	1.961603	0.0645
0.509808	1.961523	0.0704

Parameter	Value	sd
a	0,0461000	6,2686E-9
d	0,5097857	6,078E-7
g	1,0006496	0,00001

R =1
 R^2=1
 SD =2,1417E-8

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 1/epsplpt = 1.9605961+(0.035914672*())+(-0.32087497*()^2)
 R^2=0,71874 SD =0,00002

hw 60oC sigma* = 0,0049 kN/mm2
E=~ 1,044776 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.957157	1.04476	0.0461
0.957157	1.044761	0.0524
0.957156	1.044762	0.0582
0.957155	1.044763	0.0645
0.957153	1.044765	0.0705
0.957152	1.044766	0.0765
0.957151	1.044767	0.0824

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 1.0447549+(5.6558727E-05*())+(0.0011762423*()^2)
R^2=0,98523 SD =4,0791E-7

b) taxa temporal de deformação = 0,00042 s-1

ho 53oC sigma* = 0,015 kN/mm2
E=~ 3,198294 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.312678	3.198183	0.0467
0.312677	3.198191	0.0526
0.312676	3.198198	0.0587
0.312676	3.1982	0.0646
0.312675	3.198208	0.0708

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 3.1980597+(0.0035278754*())+(-0.020127665*()^2)
R^2=0,95755 SD =3,3222E-6

hv 55oC sigma* = 0,092 kN/mm2
E=~ 1,96162 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.509796	1.961569	0.0464
0.509795	1.961575	0.0526
0.509794	1.961578	0.0586
0.509793	1.961582	0.0648
0.509792	1.961586	0.0707
0.509791	1.961589	0.0766
0.509787	1.961602	0.0827

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 1.9615789+(-0.00072638172*())+(0.01176865*()^2)
R^2=0,96496 SD =2,4416E-6

ia 58oC sigma* = 0,0057 kN/mm2
E=~ 1,513859 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.660576	1.513829	0.0461
0.660575	1.513834	0.0523
0.660573	1.513837	0.0586
0.660572	1.513839	0.0643
0.660571	1.513843	0.0705
0.66057	1.513844	0.0764
0.660568	1.51385	0.0827

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 1.5138028+(0.0006302213*())+(-0.00090399585*()^2)
R^2=0,98516 SD =1,0126E-6

hx 61oC sigma* = 0,0071 kN/mm2
E=~ 1,215352 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.822836	1.215309	0.046
0.822833	1.215314	0.0521
0.822827	1.215322	0.0585
0.822827	1.215322	0.0644
0.822825	1.215325	0.0704
0.822823	1.215328	0.0761
0.822821	1.215332	0.0824

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 1.2152503+(0.0016830554*())+(-0.0085925631*()^2)
R^2=0,95944 SD =1,9311E-6

Parameter	Value	sd
a	0,04609998,0219E-10	
d	0,95715799,7759E-8	
g	-9,115737-2,4943E-6	

R =1
R^2=1
SD =2,7407E-9

Parameter	Value	sd
a	0,04670002,7416E-9	
d	0,31267741,3162E-7	
g	-1,572351'1,3231E-6	

R =1
R^2=1
SD =9,3667E-9

Parameter	Value	sd
a	0,04639994,2481E-9	
d	0,50979682,7573E-7	
g	-5,763436;3,7471E-6	

R =1
R^2=1
SD =1,4514E-8

Parameter	Value	sd
a	0,04609995,6118E-9	
d	0,66057614,6811E-7	
g	-7,594177-8,1753E-6	

R =1
R^2=1
SD =1,9173E-8

Parameter	Value	sd
a	0,04600007,0063E-9	
d	0,82283397,3198E-7	
g	-1,557316;0,00002	

R =1
R^2=1
SD =2,3937E-8

id 65oC sigma* = 0,0020 kN/mm2
E=~ 0.426439 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
2.345017	0.426436	0.0461
2.345014	0.426437	0.0524
2.345012	0.426437	0.0584
2.34501	0.426437	0.0642
2.345008	0.426438	0.0705
2.345007	0.426438	0.0763
2.345006	0.426438	0.0824

relação 1/epsplpt = f(eps pl):

1/epsplpt = 0.42643052+(0.00015912981*())+(-0.00079964569*()^2)
R^2=0,99031 SD =8,9873E-8

c) taxa temporal de deformação = 0,00060 s-1

ht 55oC sigma* = 0,011 kN/mm2
E=~ 2.345416 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.426376	2.345348	0.0464
0.426376	2.34535	0.0525
0.426374	2.345358	0.0584
0.426373	2.345362	0.065
0.426373	2.345363	0.0703
0.426372	2.345369	0.0767
0.426372	2.345367	0.0827

relação 1/epsplpt = f(eps pl):

1/epsplpt = 2.3452784+(0.0019735569*())+(-0.010706417*()^2)
R^2=0,96736 SD =1,7688E-6

ib 58oC sigma* = 0,0051 kN/mm2
E=~ 1.769723 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.565075	1.769676	0.0465
0.565074	1.76968	0.0528
0.565073	1.769684	0.0587
0.565072	1.769687	0.0645
0.565069	1.769694	0.0708
0.565069	1.769695	0.0768
0.565068	1.7697	0.0829

relação 1/epsplpt = f(eps pl):

1/epsplpt = 1.7696465+(0.00062373693*())+(0.00025387848*()^2)
R^2=0,987 SD =1,2054E-6

hy 61oC sigma* = 0,0083 kN/mm2
E=~ 1.08742 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.919629	1.087395	0.0465
0.919628	1.087397	0.0524
0.919625	1.0874	0.0585
0.919623	1.087402	0.0645
0.919622	1.087404	0.0705
0.91962	1.087406	0.0765
0.919618	1.087408	0.0826

relação 1/epsplpt = f(eps pl):

1/epsplpt = 1.0873764+(0.0004281418*())+(-0.00056260731*()^2)
R^2=0,99438 SD =4,2563E-7

ie 66oC sigma* = 0,0028 kN/mm2
E=~ 0.597015 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
1.675027	0.597005	0.0471
1.675027	0.597005	0.0523
1.67502	0.597008	0.0584
1.675017	0.597009	0.0646
1.675015	0.59701	0.0701
1.675012	0.597011	0.0765
1.67501	0.597011	0.0824

relação 1/epsplpt = f(eps pl):

1/epsplpt = 0.59698794+(0.00045221433*())+(-0.0020095887*()^2)
R^2=0,98586 SD =3,6329E-7

Parameter	Value	sd
a	0,0460999	1,9311E-8
d	2,3450215	5,7656E-6
g	-6,880160	0,00036

R =1
R^2=1
SD =6,5976E-8

Parameter	Value	sd
a	0,0464000	3,6369E-9
d	0,4263754	1,9744E-7
g	-2,1314991	2,244E-6

R =1
R^2=1
SD =1,2426E-8

Parameter	Value	sd
a	0,0464999	4,9293E-9
d	0,5650751	3,5367E-7
g	-5,906954	5,3127E-6

R =1
R^2=1
SD =1,6841E-8

Parameter	Value	sd
a	0,0465000	8,0117E-9
d	0,9196268	9,4326E-7
g	-9,237910	0,00002

R =1
R^2=1
SD =2,7372E-8

Parameter	Value	sd
a	0,0471000	1,4236E-8
d	1,6750271	3,1221E-6
g	-4,7097211	0,00014

R =1
R^2=1
SD =4,8639E-8

ig 70oC sigma* = 0,0013kN/mm2
E=~ 0.277186 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
3.607709	0.277184	0.0464
3.607706	0.277184	0.0526
3.607704	0.277185	0.0582
3.6077	0.277185	0.0645
3.607698	0.277185	0.0702
3.607696	0.277185	0.0759
3.607694	0.277185	0.082

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 0.27718123+(8.2355846E-05*())+(-0.00039630566*()^2)
R^2=0,99013 SD =4,9543E-8

d) taxa temporal de deformação = 0,00078 s-1

hu 55oC sigma* = 0,010 kN/mm2
E=~ 2.132196 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.469012	2.132142	0.0464
0.46901	2.13215	0.0528
0.46901	2.132152	0.0588
0.469008	2.13216	0.0653
0.469006	2.13217	0.0708
0.469069	2.131883	0.0765

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 2.1321583+(-0.0013488984*())+(0.021224199*()^2)
R^2=0,9561 SD =3,3786E-6

ic 58oC sigma* = 0,0053 kN/mm2
E=~ 1.769723 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.565076	1.769673	0.042
0.565078	1.769668	0.0471
0.565077	1.769671	0.0529
0.565076	1.769673	0.0586
0.565074	1.769681	0.0649
0.565073	1.769684	0.0708
0.565072	1.769686	0.0765

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 1.7697253+(-0.0023397114*())+(0.024458444*()^2)
R^2=0,93804 SD =2,3987E-6

hz 60oC sigma* = 0,0083 kN/mm2
E=~ 1.130064 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
0.884927	1.130036	0.0465
0.884925	1.13004	0.0527
0.884922	1.130043	0.0589
0.884921	1.130045	0.0643
0.884918	1.130048	0.0706
0.884917	1.13005	0.0768
0.884915	1.130052	0.0821

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 1.1300005+(0.00096025636*())+(-0.0040927206*()^2)
R^2=0,99671 SD =3,9399E-7

if 65oC sigma* = 0,0021 kN/mm2
E=~ 0.447761 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
2.233356	0.447757	0.0468
2.233353	0.447757	0.0528
2.233349	0.447758	0.0584
2.233346	0.447759	0.0644
2.233343	0.447759	0.0704
2.233341	0.44776	0.0762
2.233339	0.44776	0.0826

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
1/epsplpt = 0.44774697+(0.00026744798*())+(-0.0013292142*()^2)
R^2=0,99877 SD =5,3147E-8

Parameter Value sd

Parameter	Value	sd
a	0,0463999	3,0448E-8
d	3,6077027	0,00001
g	-5,447113	0,0014

R =1
R^2=1
SD =1,0402E-7

Parameter Value sd

Parameter	Value	sd
a	0,0463999	4,1589E-9
d	0,4690128	2,995E-7
g	-6,508217	4,5157E-6

R =1
R^2=1
SD =1,4209E-8

Parameter Value sd

Parameter	Value	sd
a	0,0419999	1,0937E-9
d	0,5650789	8,2796E-8
g	-5,115796	1,3122E-6

R =1
R^2=1
SD =3,7368E-9

Parameter Value sd

Parameter	Value	sd
a	0,0465000	7,3485E-9
d	0,8849262	8,44E-7
g	-1,343040	0,00002

R =1
R^2=1
SD =2,51E-8

Parameter Value sd

Parameter	Value	sd
a	0,0467999	1,7029E-8
d	2,2333716	4,9097E-6
g	-0,001686	0,0003

R =1
R^2=1
SD =5,8178E-8

ih 70oC sigma* = 0,0012 kN/mm2
 E=~ 0.255864 kN/mm2

eps pl pt	1/epsplpt	eps pl
3.908356	0.255862	0.046
3.90835	0.255862	0.0525
3.908345	0.255863	0.058
3.908342	0.255863	0.0645
3.908339	0.255863	0.0699
3.908336	0.255863	0.0759

Paramete:	Value	sd
a	0,046000	3,2971E-8
d	3,908342	0,00002
g	-8,341543	0,00252

R =1
 R^2=1
 SD =1,1265E-7

relação 1/epsplpt = f(eps pl):
 $1/epsplpt = 0.2558583 + (0.00010672261 * ()) + (-0.00052834971 * ()^2)$
 R^2=0,9842 SD=7,7474E-8