

MON  
620.178  
048d  
TES/ME

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS PARA FOTOELASTICIDADE  
DE REFLEXÃO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, por SONIA APARECIDA GOULART DE OLIVEIRA, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica aprovada em 05/08/88 pela Banca Examinadora:

Prof. Henner Alberto Gomide, (Orientador)  
Ph.D. (UFU)

Prof. Perrin Smith Neto, Dr. Engº (UFU)

Prof. Nelson Back, Ph.D. (UFSC)

Engº João Amos Toledo Cullen (Metal Leve S.A.)

DIRBI/UFU 620.178 048d /TES/FU  
00041/90



1000017157

Uberlândia, 05 de agosto de 1988

## AGRADECIMENTOS

- ao Prof. Henner Alberto Gomide, orientador da dissertação, pelo incentivo e a confiança depositada;
- a todas as pessoas que contribuíram para a execução deste trabalho, especialmente a Inez Vidal Magalhães, Márcio Melazo e Elmo Antônio de Medeiros;
- ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFU, pelo apoio;
- ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela ajuda financeira recebida durante o curso.

# DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS PARA FOTOELASTICIDADE DE REFLEXÃO

## SUMÁRIO

. LISTA DE SÍMBOLOS	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
2.1. Tensões e Deformações na Camada Fotoelástica	5
2.2. Resposta Ótica do Material Fotoelástico	7
2.3. Sensibilidade da Camada Fotoelástica	9
2.4. Materiais para Fotoelasticidade de Reflexão	10
2.5. Separação de Tensões	12
3. SELEÇÃO DOS MATERIAIS	17
3.1. Componentes Básicos das Misturas	17
3.1.1. Resina Epoxi	17
3.1.2. Endurecedores	18
3.2. Obtenção dos Materiais	19
4. TÉCNICAS DE PREPARAÇÃO E COLAGEM DO MATERIAL	25
4.1. Preparação do Molde	25
4.2. Preparação dos Materiais	27
4.2.1. Mistura dos Componentes	28
4.2.2. Ciclo de Polimerização dos Materiais	29
4.2.3. Remoção do Material do Molde e Modelagem	31
4.3. Colagem dos Materiais	34
4.4. Aplicações dos Materiais	36
5. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	38
5.1. Módulo de Elasticidade	39
5.2. Razão de Poisson	41
5.3. Constante Ótica	43

5.4. Variação das Propriedades Óticas com o Tempo	44
5.5. Variação das Propriedades Óticas com a Temperatura	45
5.6. Linearidade	47
5.7. Geração de Calor Durante o Período de Edurecimento	48
5.8. Efeitos de Reforço	49
5.8.1. Problemas de Estado Plano de Tensões	49
5.8.2. Problemas de Flexão de Vigas e Placas	52
5.8.3. Problemas de Torção em Seção Circular	55
6. MATERIAL PARA FOTOELASTICIDADE BIDIMENSIONAL	59
6.1. Obtenção do Material	61
6.2. Propriedades do Material	61
7. DISCUSSÃO	63
7.1. Materiais Desenvolvidos	63
7.2. Propriedades dos Materiais	65
7.3. Utilização dos Materiais	69
8. CONCLUSÃO	73
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
10. APÊNDICE	78
10.1. Apêndice A	78
10.2. Apêndice B	78

OLIVEIRA, S.A.G., Desenvolvimento de Materiais Para Fotoelasticidade de Reflexão. Uberlândia, 1988, 93 p.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de materiais para fotoelasticidade de reflexão, usando matéria prima nacional. Esta técnica tem sido pouco usada no Brasil devido a problemas de importação. Para a obtenção destes materiais, usou-se quatro tipos de resina epoxi e quatro tipos de endurecedores à base de aminas, todos produzidos pela CIBA GEIGY - Química S.A. do Brasil. Combinando os componentes básicos em proporções variadas obteve-se várias composições, das quais foram selecionadas as duas melhores, baseado nas propriedades requeridas para uso do material em fotoelasticidade de reflexão. Neste trabalho é descrito o procedimento de obtenção e utilização dos materiais, bem como a determinação das propriedades necessárias para o estudo das tensões/deformações usando a técnica da fotoelasticidade de reflexão. A partir da proposta inicial do trabalho, chegou-se também a um material para uso em fotoelasticidade de transmissão bidimensional, com características similares aos materiais importados.

---

Fotoelasticidade de reflexão, materiais fotoelásticos, análise de tensões/deformações, fotoelasticidade bidimensional.

OLIVEIRA, S.A.G., Development of Materials for the Photoelastic Coating Technique, Uberlândia, 1988, 93 p.

### ABSTRACT

This work deal with the development of a material for the photoelastic coating technique, using Brazilian raw materials. This technique has not been largely used in Brazil owing to difficulties with the importation of the photoelastic materials. To obtain the materials it was used four kinds of epoxy resins and four kinds of amines curing agents as a hardener, all produced by CIBA GEIGY - Química S.A. do Brazil. By the combination of the basic components in different amount, several composition were obtained. Among these, the two ones that showed the best properties for photoelastic coating were chosen. This work describes interily the procedure used to obtain the materials, the determination of the properties required to apply the technique and shows the general application. During the development of this work, it was also obtained and presented in a particular chapter a new material for bidimensional photoelasticity, with properties similar to the imported materials.

---

Photoelastic coating, photoelastic materials, stress/strain analysis, bidimensional photoelasticity.

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado	Unidade
$C_c$	Coeficiente de sensibilidade da camada fotoelástica	*
$C_s$	Coeficiente de sensibilidade do espécimen	Pa <sup>-1</sup>
$E^c$	Módulo de elasticidade do material fotoelástico	MPa
$E_s$	Módulo de elasticidade do material do espécimen	MPa
$F_{CB}$	Fator de correção (reforço) para flexão de vigas e placas	*
$F_{CR}$	Fator de correção (reforço) para problemas de estado plano de <u>ten</u> são	*
$F_{CT}$	Fator de correção (reforço) para torção em seção circular	*
$G^c$	Módulo de rigidez transversal do material do fotoelástico	MPa
$G^s$	Módulo de rigidez transversal do material do espécimen	MPa
$I$	Momento de inércia	m <sup>4</sup>
$K$	Constante ótica	*
$K_\epsilon$	Valor da franja para deformação	m/franja
$K_\sigma$	Valor da franja para tensão	KN/m

Símbolo	Significado	Unidade
$N$	Ordem de franja	*
$N_b$	Ordem de franja no corte simples (bordo)	*
$N_c$	Ordem de franja no corte duplo (centro)	*
$N_i$	Ordem de franja na incisão	*
$N_{max}$	Ordem de franja máxima	*
$N_0$	Ordem de franja com incidência normal	*
$N_\theta$	Ordem de franja com incidência oblíqua	*
$Q$	Figura de mérito	$m^{-1}$
$S_y$	Limite de escoamento	Pa
$S_\sigma$	Índice de sensibilidade à tensão	$Pa^{-1}$
$T_c$	Temperatura crítica	$^{\circ}C$
$t^c$	espessura da camada fotoelástica	m
$t^s$	espessura do espécimen	m
$\delta$	deflexão	mm
$\epsilon_1^c, \epsilon_2^c, \epsilon_3^c$	Deformações principais na camada fotoelástica	m/m
$\epsilon_1^s, \epsilon_2^s, \epsilon_3^s$	Deformações principais no espécimen	m/m
$\epsilon'_2$	Deformação principal secundária (normal ao plano de incidência)	m/m



Símbolo	Significado	Unidade
$\theta$	ângulo de incidência	rd
$\lambda$	comprimento de onda	nm
$\nu^c$	Razão de Poisson do material fotoelástico	*
$\nu^s$	Razão de Poisson do material do espécimen	*
$\sigma_x^c, \sigma_y^c, \sigma_z^c$	Tensões na camada nas direções indicadas	Pa
$\sigma_x^s, \sigma_y^s, \sigma_z^s$	Tensões no espécimen nas direções indicadas	Pa
$\sigma_1^c, \sigma_2^c, \sigma_3^c$	Tensões principais na camada fotoelástica	Pa
$\sigma_1^s, \sigma_2^s, \sigma_3^s$	Tensões principais no espécimen	Pa

---

\* Termos adimensionais

# DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS PARA FOTOELASTICIDADE DE REFLEXÃO

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente no Brasil o uso de técnicas experimentais de análise de tensões tem aumentado muito devido aos avanços tecnológicos da indústria nacional. Dentre estas técnicas pode-se destacar a fotoelasticidade, extensometria e camada frágil. As técnicas experimentais são muito usadas para estabelecer condições de projeto, melhorar a confiabilidade e qualidade dos produtos e otimizar componentes estruturais, pois podem reduzir consideravelmente o tempo e o custo de muitos testes, constituindo, portanto, em ferramentas de grande valor na engenharia.

A fotoelasticidade de reflexão é uma das técnicas experimentais mais novas, usada para determinar as deformações/tensões na superfície dos corpos, através da observação dos efeitos óticos no material fotoelástico colado nesta superfície. Este conceito foi introduzido na França nos anos 30, mas só alcançou um desenvolvimento significativo na década de 50 com Zandman et alii [1,6,8,15] e D'Agostino et alii [2]. Nos dias de hoje, esta técnica vem sendo largamente empregada na solução dos mais diversos problemas. Várias empresas no exterior fabricam materiais e equipamentos para o uso em fotoelasticidade

de de reflexão, dispondo de catálogos com instruções para sua seleção e aplicação [3,4,5]. Outro importante estudo realizado por Zandman et alii [6,7], refere-se a influência da camada de material fotoelástico nos resultados obtidos. Zandman, Redner e Dally publicaram uma monografia [8], reunindo os estudos feitos até a data, no campo da fotoelasticidade de reflexão.

Vários trabalhos, mais recentemente, foram publicados enfocando métodos de separação de tensões na camada fotoelástica. O'Regan [9] propôs um método de separação usando tiras de material fotoelástico colocadas, segundo uma direção, que combinadas com medidas feitas com a camada contínua, possibilita a separação das tensões. O método da incidência oblíqua, que tradicionalmente já era usado em fotoelasticidade de transmissão, ainda continua sendo o mais usado, apesar das dificuldades. Hung e Pottinger [10] e Komorowski e Stupnick [11], introduziram algumas inovações neste método, visando a simplificação desta técnica de separação. Durelli e Rajaiah [12] desenvolveram um método que consiste em separar as tensões/deformações em um ponto, através da análise de distribuição das tensões em torno de um pequeno furo, feito na camada fotoelástica, que proporciona as condições de contorno desejadas. Mais recentemente, Redner [13,14] propôs um novo método simples e inovador para separar as tensões/deformações. Este método, o da incisão (slitting method) consiste em produzir contornos livres através de cortes ao longo das direções de deformações principais.

A fotoelasticidade de reflexão tem recebido por parte de vários autores uma atenção especial na resolução de problemas

envolvendo deformações elásticas e plásticas [15,16], bem como problemas envolvendo materiais anisotrópicos [17]. Oliveira e Gomide [18], com base na potencialidade da técnica e de sua pouca aplicação no Brasil, publicaram um trabalho propondo o seu ensino nos cursos de engenharia.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de materiais para serem utilizados na técnica da fotoelasticidade de reflexão, usando componentes produzidos no Brasil. Os componentes usados na obtenção dos materiais foram resina epoxi (Araldite) e endurecedores à base de aminas, produzidas pela CIBA-GEIGY Química S.A. do Brasil. São apresentadas as técnicas de obtenção e as propriedades mecânicas e óticas de dois tipos de materiais, considerados ideais, para uso em fotoelasticidade de reflexão, com aplicação em superfícies plana, curvas e/ou irregulares. É apresentado também a obtenção de um material para uso em fotoelasticidade de transmissão bidimensional, obtido como um fruto da proposta principal deste trabalho.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Várias técnicas experimentais podem ser usadas para a determinação da distribuição de tensões e deformações com o objetivo de solucionar problemas em engenharia, que teriam soluções complexas ou aproximadas usando métodos analíticos ou numéricos. Entre as técnicas mais utilizadas encontram-se a extensometria, a fotoelasticidade de transmissão e a técnica da camada frágil. A primeira é bastante precisa e fácil de ser utilizada, mas apresenta algumas restrições, entre elas a de fornecer resultados apenas ponto a ponto. A fotoelasticidade de transmissão, também bastante precisa, fornece uma visão geral do campo de tensões, mas depende da confecção de modelos que, muitas vezes, torna complicada a utilização da mesma. A técnica da camada frágil é de baixo custo, fornece uma boa visão do campo de deformações, mas não é muito precisa, sendo os resultados altamente influenciados por condições ambientais de umidade e temperatura.

A técnica da fotoelasticidade de reflexão apresenta algumas vantagens sobre as técnicas mencionadas e elimina algumas desvantagens. Esta técnica é relativamente precisa, fornece uma visualização global do campo de tensões/deformações e não requer a confecção de modelos. A obtenção dos parâmetros pode ser feita diretamente na estrutura ou componente mecânico, quando estes se encontram submetidos a carregamentos reais. Esta

técnica consiste em colar na superfície do espécimen, a ser analisado [8, 19], uma camada de material fotoelástico, com uma cola apropriada que produza uma superfície reflexiva na interface espécimen/camada. Quando o espécimen é carregado, a deformação na superfície do mesmo é transmitida para a camada fotoelástica e através da análise dos fenômenos óticos que ocorrem no material fotoelástico, pode-se determinar as tensões/deformações na superfície do espécimen.

## 2.1. Tensões e Deformações na Camada Fotoelástica

Seja a superfície do espécimen, submetida a um estado plano de tensões, a qual foi colada uma camada de material fotoelástico, como mostrado na Figura 2.1.

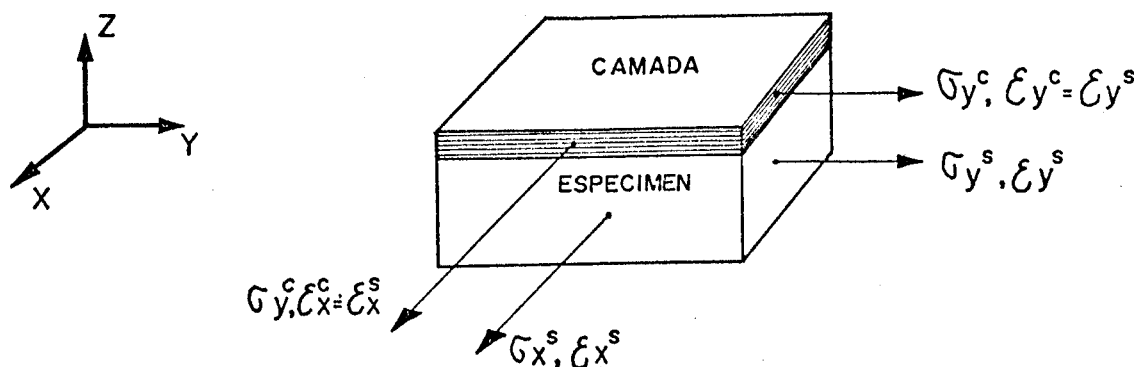


Fig. 2.1 - Espécimen plano com camada de material fotoelástico colada na superfície.

Como a camada fotoelástica é de pequena espessura, assu-

me-se que o estado de tensão nesta também é plano, ou seja:

$$\sigma_z^c = \sigma_z^s = 0 \quad (2.1)$$

Utilizando os conceitos básicos da teoria da elasticidade [19], o estado de tensão no espécimen está relacionado com o estado de tensão no material fotoelástico através da relação:

$$\sigma_1^c - \sigma_2^c = \frac{E^c}{E^s} \frac{(1 + \nu^s)}{(1 + \nu^c)} (\sigma_1^s - \sigma_2^s) \quad (2.2)$$

onde,

$\sigma_1^c$  ,  $\sigma_2^c$ : tensões principais na camada

$\sigma_1^s$  ,  $\sigma_2^s$ : tensões principais no espécimen

$E^c$  ,  $E^s$ : módulo de elasticidade da camada e do espécimen, respectivamente

$\nu^c$  ,  $\nu^s$ : razão de Poisson da camada e do espécimen, respectivamente

Considerando que na superfície de contato a aderência é perfeita, as deformações em qualquer direção são iguais na camada e no espécimen, logo:

$$\epsilon_1^c - \epsilon_2^c = \epsilon_1^s - \epsilon_2^s \quad (2.3)$$

onde,

$\epsilon_1^c$  ,  $\epsilon_2^c$ : deformações principais na camada

$\epsilon_1^s$ ,  $\epsilon_2^s$ : deformações principais no espécimen

Neste trabalho os índices c se referem à camada e s ao espécimen. Nas equações (2.2) e (2.3), não são levados em consideração nenhum dos efeitos causados pela espessura da camada. Estes efeitos de reforço, deformação na direção normal ao plano do espécimen e efeitos causados pela diferença entre a razão de Poisson do espécimen e da camada, podem ser calculados [6,7,8].

## 2.2. Resposta Ótica do Material Fotoelástico

O instrumento usado para a medida dos parâmetros fotoelásticos nesta técnica é o polariscópio de reflexão [18], que segue o esquema mostrado na Figura 2.2.

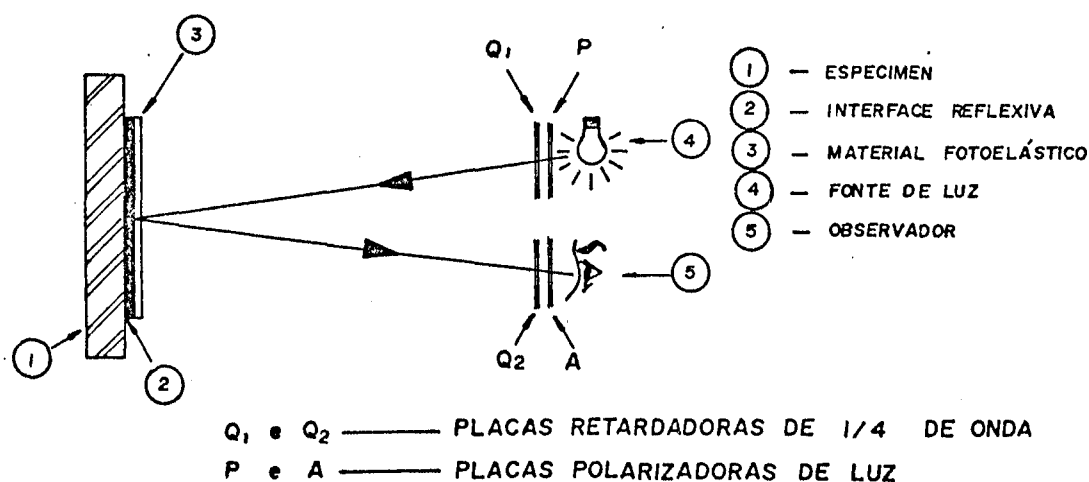


Fig. 2.2 - Esquema do polariscópio de reflexão



O conjunto espécimen/camada deve manter uma certa distância do polariscópio, para que a incidência do raio luminoso possa ser considerada normal.

Quando o espécimen contendo uma camada de material fotoelástico é carregado e observado no polariscópio de reflexão, o estado de deformação no material fotoelástico produz efeitos óticos que podem ser medidos através dos parâmetros das isoclínicas e das isocromáticas. As isoclínicas indicam o lugar geométrico dos pontos onde as tensões/deformações principais possuem a mesma direção dos eixos de polarização do polariscópio. As isocromáticas indicam o lugar dos pontos que apresentam a mesma diferença entre as tensões principais [8,19].

A relação entre os efeitos óticos medidos pelos parâmetros das isocromáticas e a diferença entre as tensões principais é dada pela lei ótica das tensões [8,19], que considera a dupla passagem da luz através da camada, ou seja:

$$\sigma_1^c - \sigma_2^c = \frac{N K_\sigma}{2t^c} \quad (2.4)$$

onde,

$N$  : ordem de franja no ponto

$K_\sigma$  : valor da franja para tensão (constante ótica)

$t^c$  : espessura da camada

Combinando as equações (2.2) e (2.4), fica determinado a diferença das tensões no espécimen, que é dada pela equação:

$$\sigma_1^s - \sigma_2^s = \frac{E^s}{E^c} \frac{(1 + \nu^c)}{(1 + \nu^s)} \frac{N K_\sigma}{2t^c} \quad (2.5)$$

Sendo a lei ótica válida também para deformação [8,19], tem-se que:

$$\epsilon_1^s - \epsilon_2^s = \epsilon_1^c - \epsilon_2^c = \frac{N K_\epsilon}{2t^c} \quad (2.6)$$

onde,

$K_\epsilon$  : Valor da Franja para deformações (constante ótica)

Para um material que se comporta elasticamente, a constante ótica do material se relaciona com os valores da franja para tensões e deformações, segundo a expressão:

$$K_\sigma = \frac{E^c}{1 + \nu^c} \quad K_\epsilon = \frac{E^c}{1 + \nu^c} \cdot \frac{\lambda}{K} \quad (2.7)$$

onde,

$K$  : constante ótica

$\lambda$  : comprimento de onda da luz utilizada

### 2.3. Sensibilidade da Camada Fotoelástica

A resposta ótica do material fotoelástico em um conjunto espécimen/camada, pode ser avaliado definindo-se um índice de sensibilidade à tensão, como segue:

$$S_{\sigma} = \frac{N}{(\sigma_1^S - \sigma_2^S)} \quad (2.8)$$

Combinando as equações (2.5) e (2.7) e substituindo na equação (2.8), tem-se:

$$S_{\sigma} = \frac{2t^c}{K_E} \left[ \frac{(1 + \nu^S)}{E^S} \right] = C_c \cdot C_s \quad (2.9)$$

onde,

$$C_c = \frac{2t^c}{K_E} : \text{coeficiente de sensibilidade da camada}$$

$$C_s = \frac{1 + \nu^S}{E^S} : \text{coeficiente de sensibilidade do espécimen}$$

Analisando a expressão (2.9), pode-se afirmar que a sensibilidade do conjunto depende da constante ótica e espessura do material fotoelástico, bem como das propriedades elásticas do espécimen. Assim, para um material com limite de escoamento  $S_y$ , pelo critério da máxima tensão cisalhante, o número máximo de franjas será dado pela equação:

$$N_{\max} = \frac{2t^c}{K_E} \left[ \frac{(1 + \nu^S)}{E^S} \right] S_y \quad (2.10)$$

## 2.4. Materiais para Fotoelasticidade de Reflexão

Os materiais utilizados nesta técnica apresentam uma birrefringência temporária, isto é, quando estão livres de solici

tações externas são óticamente isotrópicas, mas quando são solicitados, apresentam uma dupla refração do vetor luz ou índices de refração diferentes e máximos em direções ortogonais. Nesta técnica os materiais usados são normalmente resinas epoxi curadas com aminas ou anidridos, policarbonatos, além de outros. Estes materiais são selecionados tendo em vista suas propriedades [3,8], como:

- constante ótica (K) alta para maximizar o número de franjas por unidade de deformação;
- baixo módulo de elasticidade ( $E^c$ ) para minimizar o efeito de reforço;
- alta resistência à relaxação ótica e mecânica, para garantir uma estabilidade das medidas com o tempo;
- alto limite de proporcionalidade com relação à deformação, para maximizar a faixa de utilização do material quanto à solicitação;
- ser de fácil colagem para garantir uma perfeita transmissão das deformações na interface espécimen/camada.

Além destas propriedades, o material deve ser de fácil obtenção, transparente, fácil de ser usinado, não apresentar manchas óticas, livre de tensões residuais, baixo custo e possuir características que possibilite a sua utilização em superfícies irregulares.

A seleção do material deve ser feita de acordo com a aplicação [3], levando-se em consideração os fatores ou propriedades tendo em vista as prioridades do problema.

## 2.5. Separação de Tensões

Como na fotoelasticidade de transmissão, os parâmetros óticos obtidos permitem a determinação completa do estado de tensões/deformações na superfície do espécimen [8,19]. Assim a ordem de franja, definida pelas isocromáticas, permite a determinação da diferença das tensões principais no espécimen e as isoclínicas a determinação das direções das tensões principais. Uma vez obtidos estes parâmetros, vários métodos de separação de tensões podem ser empregados, para determinar as tensões principais.

O método de separação de tensões mais usado em fotoelasticidade de reflexão é o da incidência oblíqua. Este consiste em obter as ordens das franjas com a luz incidindo o modelo segundo a direção normal e segundo uma outra direção que faz um ângulo ( $\theta$ ) com a normal.

A figura 2.3 mostra, esquematicamente, a incidência normal e oblíqua ao plano que contém as tensões a serem determinadas.

Para a incidência normal a ordem de franja ( $N_0$ ) é dada pela equação:

$$N_0 = \frac{2t^c}{K_E} (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (2.11)$$

Se o polariscópio ou o conjunto espécimen/camada sofre uma rotação em torno de  $\epsilon_1$  de um ângulo  $\theta$ , como mostra a Figura 2.3a, a ordem de franja ( $N_\theta$ ) para incidência oblíqua, é dada pela equação:

$$N_{\theta} = \frac{2t^c}{K_{\epsilon} \cos \theta} (\epsilon_1 - \epsilon_2') \quad (2.12)$$

onde,

$\epsilon_2'$ : deformação principal secundária no plano normal ao de incidência e reflexão da luz.

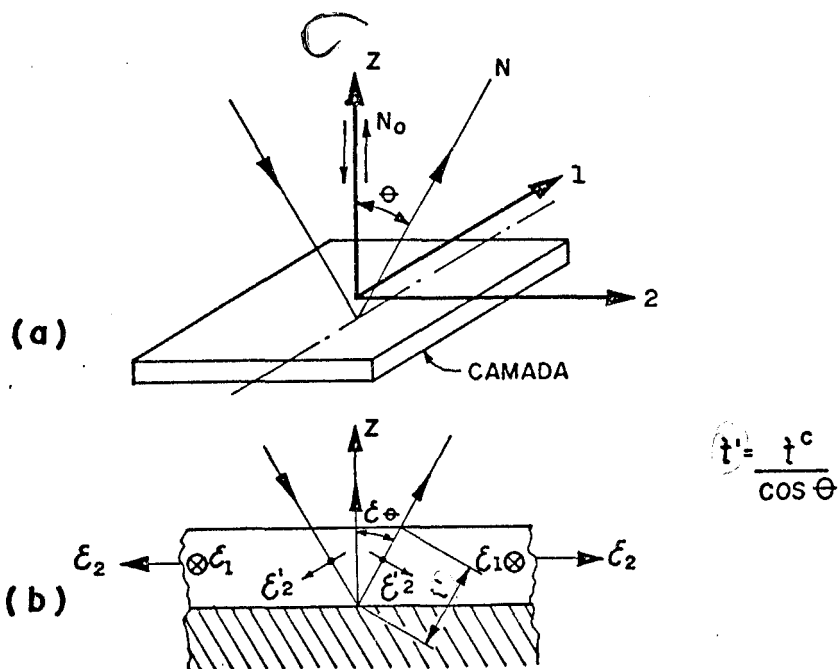


Fig. 2.3 - Esquema do método de incidência oblíqua. a) Sistema de coordenada e ângulo de incidência. b) Direção das deformações no plano normal à direção principal (eixo 1).

Fazendo as transformações de coordenadas pertinentes e combinando as equações (2.11) e (2.12), obtém-se as equações de  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$  separadamente:

$$\epsilon_1^s = \frac{K_E}{2t^c} \frac{1}{(1 + \nu^c) \sin^2 \theta} [(1 - \nu^c) \cos \theta N_\theta - (\cos^2 \theta - \nu^c) N_0] \quad (2.13)$$

$$\epsilon_2^s = \frac{K_E}{2t^c} \frac{1}{(1 + \nu^c) \sin^2 \theta} [(1 - \nu^c) \cos \theta N_\theta - (1 + \nu^c \cos^2 \theta) N_0]$$

Com os valores determinados nas equações (2.13), pode-se chegar aos valores das tensões  $\sigma_1^s$  e  $\sigma_2^s$  através das equações da teoria da elasticidade [19].

Outro método de separação de tensões/deformações, de publicação mais recente [14], é o da incisão (slitting method), simples de ser aplicado, não exigindo equipamentos especiais. Neste método, a diferença entre as deformações principais ( $\epsilon_1 - \epsilon_2$ ) e suas direções, nos pontos que se pretende determinar as tensões/deformações separadamente, são medidas inicialmente de forma convencional. Logo após, são feitos nestes pontos cortes usando uma ferramenta fina e circular, ao longo da direção de máxima deformação  $\epsilon_1$ , ou seja, uma incisão ao longo da isoclínica. O corte pode ser simples, um sulco, ou duplo como mostra a Figura 2.4, e pode ser feito com o conjunto espécimen/camada carregado, em superfícies planas ou irregulares. Após o corte, a ordem de franja é medida na borda do corte simples (Nb) ou no centro do corte duplo (Nc).

Se N é a ordem de franja medida com a incidência normal e a camada fotoelástica contínua, da lei ótica tem-se:

$$\epsilon_1 - \epsilon_2 = \frac{N K_E}{2t^c} \quad (2.14)$$

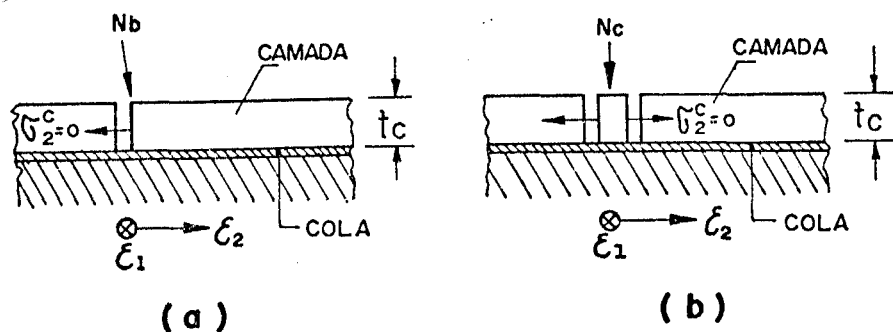


Fig. 2.4 - Corte na camada fotoelástica para aplicação do método da incisão a) corte simples b) corte duplo, com largura igual a espessura da camada.

A deformação  $\epsilon_1$  na direção do corte é igual para a camada e o espécimen, logo:

$$\epsilon_1^c = \epsilon_1^s = \epsilon_1 \quad (2.15)$$

A tensão  $\sigma_2^c$  na superfície gerada pelo corte, é zero (Fig. 2.4), o que significa um estado uniaxial de tensão no contorno livre, logo:

$$\epsilon_2^c = -\nu^c \epsilon_1^c \quad (2.16)$$

Aplicando-se a lei ótica no contorno livre tem-se:

$$\epsilon_1^c - \epsilon_2^c = \frac{N_t K_\epsilon}{2t^c} \quad (2.17)$$

onde,



$N_1$  : ordem de franja na incisão ( $N_c$  ou  $N_b$ ).

Substituindo (2.15) e (2.16) na equação (2.17), tem-se:

$$\varepsilon_1 = \frac{N_1 K_\varepsilon}{2t^c (1 + \nu^c)} \quad (2.18)$$

Com as equações (2.14) e (2.18), os valores das deformações ficam determinados separadamente.

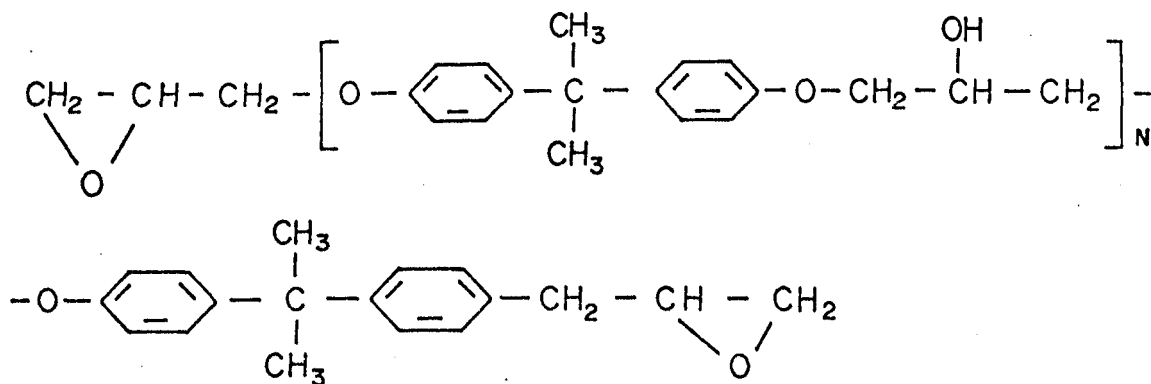
### 3. SELEÇÃO DOS MATERIAIS

#### 3.1. Componentes das Misturas

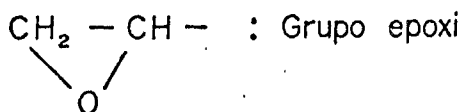
Com o objetivo de obter materiais plásticos para fotoelasticidade de reflexão foram selecionados vários materiais produzidos no Brasil, com base nas recomendações existentes na bibliografia disponível [8,19,20]. A resina básica escolhida foi a resina epoxi e o agente endurecedor, materiais a base de aminas. As resinas e endurecedores utilizados, são produzidos pela CIBA-GEIGY Química S.A. do Brasil.

##### 3.1.1. Resina Epoxi

A resina epoxi, que constitui a base do material a ser desenvolvido, pode ser representado por uma fórmula estrutural do tipo [20]:



onde,



N : número que pode variar de 0 a 10

A resina epoxi da CIBA-GEIGY tem a marca registrada de ARALDITE, podendo ser de vários tipos, dependendo de suas propriedades e finalidades. Desta forma, os quatro tipos de Araldite escolhidos foram:

- ARALDITE CY205, resina epoxi isenta de solventes, de cor amarelo claro, com viscosidade de 15000 a 25000 mPa.s à 25°C;
- ARALDITE MY750, resina epoxi não modificada, à base de Bisfenol A, de alta viscosidade, 12000 a 16000 mPa.s à 25°C;
- ARALDITE CY248, resina epoxi livre de solventes, cor amarelo claro, de baixa viscosidade, 1400 a 1700 mPa.s à 25°C;
- ARALDITE XGY1109, resina epoxi modificada com diluentes reativos, à base de bisfenol A e de baixa viscosidade, 1200 a 1500 mPa.s à 25°C.

### 3.1.2. Endurecedores

Os endurecedores usados à base de aminas, são agentes capazes de desencadear a ligação de duas moléculas de epoxi, atra

vés do grupo epoxi. A reação ou efeito de ligação, ocorre mediante uma reação exotérmica a uma velocidade que depende da quantidade, dos tipos de componentes e da temperatura. Quatro tipos de endurecedores foram escolhidos, todos fornecidos no estado líquido, sendo:

- ENDURECEDOR HY943, composto de uma amina alifática de cor clara, com viscosidade de 3300 a 6000 mPa.s à 25°C, sendo um endurecedor muito reativo quando combinado com Araldite à base de bisfenol A;
- ENDURECEDOR HY951, produto à base de poliaminas alifáticas, com viscosidade entre 10 e 20 mPa.s à 25°C;
- ENDURECEDOR HY956, produto à base de amins, de cor clara, usado como agente de cura do Araldite, principalmente o CY248, viscosidade de 420 a 680 mPa.s à 25°C;
- ENDURECEDOR HY960, produto à base de amins, de cor amarela, apresenta baixa viscosidade à temperatura ambiente.

### 3.2. Obtenção dos Materiais

Os materiais foram obtidos através da combinação proporcional das resinas com cada tipo de endurecedor, usando métodos totalmente empíricos. As proporções usadas foram de 100pp (partes em peso) de resina com Xpp de endurecedor, com X variando entre 10 e 50. A nomenclatura adotada para designar cada combinação ou material, foi:

RESINA/100 - ENDURECEDOR/X

A primeira etapa de testes foi feita utilizando cada uma das quatro resinas com os quatro tipos de endurecedores, num total de dezesseis combinações. A proporção usada foi de 100pp de resina e 50pp de endurecedor, curados à temperatura ambiente (23°C a 27°C). Observando-se os materiais obtidos, foi montada a Tabela 3.1 onde os componentes, resinas e endurecedores, foram ordenados segundo as características observadas relativas a transparência e fragilidade. A Tabela 3.1 mostra também, características como cor e acabamento superficial. A figura 3.1 mostra os materiais obtidos, posicionados segundo a distribuição mostrada na Tabela 3.1.



Fig. 3.1 - Amostras dos materiais mostrados na Tabela 3.1, na proporção de 100pp de resina e 50pp de endurecedor.

Tab. 3.1: Distribuição dos materiais obtidos segundo o grau de transparência e fragilidade, fundidos à temperatura ambiente, com as principais características observadas e na proporção de 100pp de resina e 50pp de endurecedor.

	HY951	HY956	HY943	HY960
CY248	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Branco</li> <li>- Opaco</li> <li>- Não Endureceu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Branco</li> <li>- Opaco</li> <li>- Viscoelástico</li> <li>- Defeitos Superficiais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Branco</li> <li>- Transparente</li> <li>- Viscoelástico</li> <li>- Manchas Brancas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amarelo</li> <li>- Transparente</li> <li>- Quebradiço</li> </ul>
XGY1109	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Branco</li> <li>- Semi-transparente</li> <li>- Não Endureceu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Branco</li> <li>- Transparente</li> <li>- Viscoelástico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Branco</li> <li>- Transparente</li> <li>- Endurecimento Normal</li> <li>- Manchas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amarelo</li> <li>- Transparente</li> <li>- Muito Quebradiço</li> </ul>
CY205	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Branco</li> <li>- Transparente</li> <li>- Viscoelástico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Branco</li> <li>- Transparente</li> <li>- Endurecimento Normal</li> <li>- Defeitos Superficiais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Branco</li> <li>- Transparente</li> <li>- Endurecimento Rápido</li> <li>- Quebradiço</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amarelo</li> <li>- Transparente</li> <li>- Muito Quebradiço</li> </ul>
MY750	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Branco</li> <li>- Transparente</li> <li>- Viscoelástico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Branco</li> <li>- Transparente</li> <li>- Endurecimento Normal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Branco</li> <li>- Transparente</li> <li>- Endurecimento Rápido</li> <li>- Quebradiço</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amarelo</li> <li>- Transparente</li> <li>- Super Quebradiço</li> </ul>

OBS.: A fragilidade e transparência crescem da esquerda para a direita e de cima para baixo.

A segunda etapa de testes foi feita variando as proporções de cada endurecedor, sendo que as proporções usadas foram de 100pp de resina e 10, 20, 30 e 40pp de endurecedor. Nesta etapa, excluiu-se as combinações que não endureceram. Após a obtenção de todas as amostras, foi feita uma inspeção para eliminar as combinações que não resultaram em materiais adequados. Assim, foram eliminadas aquelas cujo material era viscoelástico ou muito quebradiço. Da mesma forma, foram eliminadas, as combinações que apresentaram manchas óticas ao serem examinadas no Polariscópio. A partir destes testes, selecionou-se dezenove amostras para estudos e análises subsequentes. A resina CY248 e o endurecedor HY960 foram eliminados nestes primeiros testes, por não produzirem nenhum material que atendesse aos critérios adotados preliminarmente. As amostras selecionadas foram:

CY205/100 - HY951/20;30  
CY205/100 - HY943/20;30;40;50  
CY205/100 - HY956/30;40  
MY750/100 - HY951/20;30  
MY750/100 - HY943/20;30;40;50  
MY750/100 - HY956/20  
XGY1109/100- HY943/20;30  
XGY1109/100- HY956/20;30

Estas combinações foram novamente obtidas e com base nas dificuldades, devido a alta viscosidade de alguns componentes que acarretam problemas na eliminação de bolhas, foram eliminados os materiais compostos de resina MY750, curada com qual

quer dos endurecedores, e resina CY205 curada com HY943.

De posse dos oito materiais restantes, foram feitas medidas preliminares do módulo de elasticidade ( $E$ ) e do valor da franja para tensão ( $K_{\sigma}$ ), usando os métodos que serão descritos no capítulo 5. Os valores do módulo de elasticidade ( $E$ ) valor da franja para tensão ( $K_{\sigma}$ ) e figura de mérito ( $Q = E/K_{\sigma}$ ) [19], estão apresentados na Tabela 3.2.

Tab. 3.2: Valores das propriedades  $E$ ,  $K_{\sigma}$  e  $Q$  para os materiais selecionados, cu rados a temperatura ambiente.

MATERIAL	$K_{\sigma}$ (N/m) $\times 10^3$	$E$ (mPa)	$Q$ (1/m) $\times 10^3$
* CY205/100 - HY951/20	14,1	3924	278
CY205/100 - HY951/30	16,5	3129	190
CY205/100 - HY956/30	17,9	3414	191
CY205/100 - HY956/40	18,4	3218	174
XGY1109/100 - HY956/20	15,6	3689	236
XGY1109/100 - HY956/30	15,4	3139	204
XGY1109/100 - HY943/20	15,5	4120	266
* XGY1109/100 - HY943/30	14,4	4100	284

\* Materiais que apresentaram melhores propriedades

Com os resultados mostrados na tabela 3.2, foram selecionados os dois materiais com maior figura de mérito, que também são portadores das outras propriedades requeridas para um bom material, ou seja: boa transparência, isento de bolhas e manchas, resposta ótica dentro dos níveis requeridos e facilidade



de obtenção. Os materiais com maior figura de mérito ( $Q = E/K_{\sigma}$ ) foram escolhidos pois, apresentam maior sensibilidade, isto é, quanto menor  $K_{\sigma}$  e maior  $E^c$  mais sensível é o material, dando maior número de franjas para um mesmo estado de tensões, conforme Eq. 2.5.. Assim, os materiais selecionados, os quais se rão mais detidamente analisados, foram:

CY205/100 - HY951/20  
XGY1109/100 - HY943/30

## 4. TÉCNICAS DE PREPARAÇÃO E COLAGEM DO MATERIAL

O sucesso na obtenção de resultados usando a técnica da fotoelasticidade de reflexão, depende de vários fatores. A preparação dos moldes, fundição dos materiais e a colagem do material fotoelástico no espécimen constituem etapas importantes a serem analisadas.

### 4.1. Preparação do Molde

A obtenção de materiais fotoelásticos para camada de reflexão, depende muito da preparação adequada do molde. Por isto, o material deve ser fundido em moldes especiais, devido ao grande poder de adesão do Araldite durante o período de endurecimento.

Neste trabalho, usou-se dois tipos de moldes. Primeiramente, usou-se um vidro plano impregnado com um agente desmoldante da Dow Corning do Brasil, sendo que as laterais do molde foram feitas com barras de borracha de silicone (RTV-B - Dow Corning). Este tipo de molde tem como vantagem a facilidade de preparação, mas apresenta o inconveniente de não proporcionar uma superfície perfeitamente lisa do material em contato com o desmoldante. Isto pode ser contornado, no caso de placas planas, através de polimento superficial, não recomendado em função

das dificuldades e aumento de custo.

No segundo e mais adequado tipo de molde, foi usado um vidro revestido com uma camada de borracha de silicone, dispensando o uso de desmoldante, sendo as laterais as mesmas usadas no primeiro tipo. Este pode ser obtido colocando sobre uma mesa niveladora uma placa de acrílico flexível, de aproximadamente 3mm de espessura, com uma superfície perfeitamente polida. A borracha de silicone após preparada, segundo as instruções do fabricante, deve ser colocada na superfície do acrílico, em quantidade suficiente para produzir uma camada de aproximadamente 1mm de espessura, quando espalhada na área do molde. Devem ser tomados os devidos cuidados para eliminar eventuais bolhas de ar na borracha. Em seguida, uma placa de vidro é pressionada sobre a borracha, fazendo com que esta se espalhe uniformemente na superfície do vidro, previamente impregnado com Primer 1200 da Dow Corning do Brasil, para propiciar uma perfeita aderência da borracha no mesmo. Após o período de endurecimento da borracha, 24 horas, a placa de acrílico flexível é retirada, produzindo uma superfície de borracha perfeitamente lisa. A figura 4.1 mostra o molde pronto para receber a mistura líquida resina/endurecedor. A uniformidade na espessura dos materiais, depende de um perfeito nivelamento do molde.

Com este processo a superfície do material obtido é lisa, dispensando o polimento das placas. Tomando certos cuidados, o molde pode ser reutilizado. O cálculo das dimensões da área útil do molde, deve ser feito levando em consideração as dimensões da placa desejada ou a área da superfície do espécimen, a

ser coberta com a camada fotoelástica. À estas dimensões, devem ser acrescentadas as do modelo de calibração, bem como 10mm a mais em cada uma das dimensões finais. Este último é para compensar o corte das laterais, devido a formação dos meniscos nas bordas do molde, que causam uma diferença de espessura no contorno das placas.

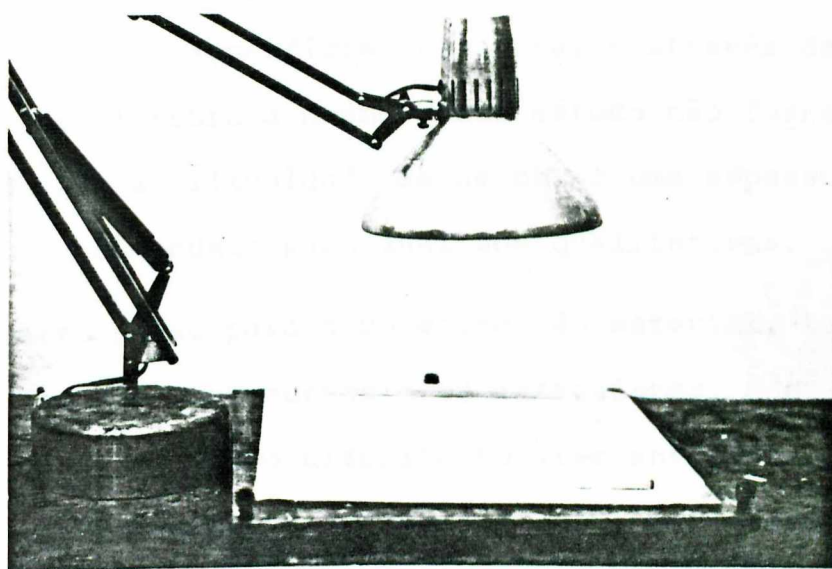


Fig. 41 - Molde de borracha, pronto para fundição.

#### 4.2. Preparação dos Materiais

A aplicação do material para fotoelasticidade de reflexão, pode ser feita de várias formas [1], dependendo da superfície a ser analisada e do grau de precisão desejado. Para superfí

cies planas, pode ser usada uma placa plana completamente polimerizada, cortada no formato desejado e colada à superfície. Se esta for, além de plana, perfeitamente polida (reflexiva), o material fotoelástico pode ser fundido diretamente sobre as partes a serem analisadas [19]. No caso de superfícies curvas e/ou irregulares o material, semi-polimerizado, pode ser modelado diretamente sobre o espécimen, como será descrito posteriormente. Outra forma de aplicar o material, que pode ser usada em qualquer tipo de superfície reflexiva, é através da pulverização do material sobre a mesma. Este método não fornece boa precisão, devido a dificuldade de se obter uma espessura uniforme, sendo recomendado para análises qualitativas.

O primeiro passo para a obtenção do material, tanto para superfícies planas como curvas e/ou irregulares, é a preparação do molde. Assim, como descrito no item anterior, o molde deve estar perfeitamente nivelado para garantir a espessura uniforme do material. A preparação do material pode ser dividida nas seguintes etapas: mistura dos componentes, polimerização parcial da mistura, remoção do material do molde e modelagem do mesmo à superfície do espécimen.

#### 4.2.1. Mistura dos Componentes

Nesta etapa os componentes, resina e endurecedor, são pesados, misturados e vazados no molde [5]. Assim, o procedimento inicial é aquecer o molde até a temperatura desejada, sendo que no presente trabalho a temperatura usada foi de 35°C a 45°C. Isto pode ser facilmente conseguido usando lâmpadas in-

candescentes, de preferência com raios infra-vermelhos, que devem permanecer ligadas até o momento de vaziar o material. Em seguida, os componentes da mistura devem ser pesados separadamente, sendo o cálculo das quantidades de cada componente feito considerando a massa específica da mistura igual a  $1200\text{Kg/m}^3$ , mais 5% para eventuais perdas. Os componentes devem ser aquecidos a uma temperatura próxima à do molde. Este aquecimento facilita a mistura dos componentes, pois diminui a viscosidade dos mesmos e conseqüentemente a probabilidade de formação de bolhas de ar, além de proporcionar uma reação ou cura mais uniforme ao longo da superfície ou placa do material a ser obtida.

Quando a temperatura do molde e dos componentes, separadamente, atingir a faixa mencionada, junta-se lentamente o endurecedor à resina, misturando-os com um termômetro de haste, até que a mistura fique homogênea. A mistura deve ser feita lentamente para evitar a formação de bolhas. Deve ser observada também a temperatura da mistura no início da reação de cura, para que a mesma não ultrapasse 50°C, até sua total homogeneização. Vaziar a mistura no molde lentamente, espalhando a mistura para que esta ocupe toda a área útil do molde. Retirar as bolhas de ar, que eventualmente apareçam e cobrir o molde para evitar impurezas na superfície.

#### 4.2.2. Ciclo de Polimerização dos Materiais

A mistura, resina/endurecedor, depois de preparada e vazada no molde, passa por alguns estágios distintos e importantes

durante a cura. Após um determinado tempo, o material atinge um estágio denominado semi-polimerizado, no qual ele se encontra mecânicamente estável, mas altamente flexível, podendo ser modelado na superfície que se deseja analisar. O tempo para atingir este estágio, depende da temperatura ambiente e da espessura do material. Como é sabido, a reação na cura dos materiais é exotérmica e a temperatura atua como catalizador. Assim sendo, como o material é mal condutor de calor, quanto maior a espessura da placa e mais alta a temperatura ambiente, menor o tempo gasto para atingir o estágio de semi-polimerização. É importante mencionar que, grandes gradientes de temperatura ao longo da placa provoca a obtenção de materiais óticamente anisotrópicos.

Para o CY205/100 - HY951/20 o tempo de semi-polimerização foi de 1:30 horas, para uma temperatura ambiente de aproximadamente 25°C e uma espessura de 2mm. Para o XGY1109/100 - HY943/30 o tempo foi de 40 minutos, para uma temperatura ambiente de 28°C e uma espessura de 2mm.

O teste para verificar o estágio de semi-polimerização do material é feito tocando-o com um instrumento de ponta. Se o material sofrer uma pequena depressão, sem no entanto aderir ao instrumento, este se encontra no estado sólido semi-polimerizado podendo ser desmoldado facilmente. Neste estágio o material se encontra pronto para ser modelado em uma superfície curva e/ou irregular. O material semi-polimerizado tem uma tendência a se alongar quando tracionado levemente e pode ser cortado facilmente com uma tesoura. A principal característica do material neste estágio, além da alta flexibilidade, é a falta de me-

mória fotoelástica, isto é, o material pode ser deformado sem apresentar qualquer tipo de efeito ótico depois de totalmente polimerizado.

Cuidados devem ser tomados no sentido de preparar a superfície do espécimen sobre a qual o material vai ser modelado. Esta deve ser perfeitamente lisa, sem nenhuma proteção superficial. Depois de preparada a superfície deve ser coberta com uma película de óleo mineral, para evitar que o material semi-polimerizado venha aderir à mesma durante a sua última fase de polimerização.

O último estágio de polimerização, no qual o material fica perfeitamente rígido, ocorre no período de 3 a 5 horas. Este tempo, como no estágio anterior, depende da espessura da placa e da temperatura ambiente.

#### 4.2.3. Remoção do Material do Molde e Modelagem

Esta etapa, para obtenção de placas planas cuja remoção do material do molde é feita após a completa polimerização, consiste apenas em soltar lentamente a placa do molde, após a retirada das molduras. Os meniscos ou imperfeições nas bordas, podem ser cortados usando uma serra de fita. No caso de superfícies curvas e/ou irregulares, quando o material atinge o estágio de semi-polimerização descrito anteriormente, o procedimento deve ser o seguinte:

- a) - passar óleo mineral na superfície livre do material e em ambas as mãos (o óleo protege o material evitando



- marcas ao ser manuseado);
- b) - remover as molduras de borracha do molde;
  - c) - marcar levemente com um lápis os cortes que devem ser feitos no material;
  - d) - remover o material do molde, puxando-o com movimentos contínuos e lentos, evitando dobras (a figura 4.2 mostra a remoção de uma placa do molde);
  - e) - cortar o material nos locais pré-marcados com uma tesoura, inclusive as bordas.

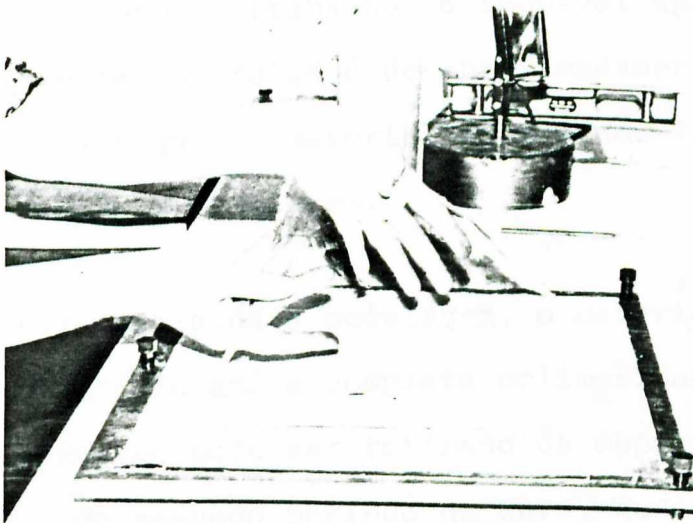


Fig. 4.2 - Remoção do material do molde.

Após esta etapa, o material encontra-se pronto para a modelagem. Esta é feita colocando lentamente o material sobre

a superfície da peça previamente preparada, procurando evitar a formação de bolhas de ar entre a superfície e o material. Nestas operações devem ser tomados alguns cuidados, tais como:

- a) - quando o material estiver sendo modelado, este não deve ser pressionado ou forçado sobre a superfície, para evitar a distensão do mesmo, que pode acarretar variação de espessura;
- b) - no caso de formação de bolsas de ar (bolhas) entre o material e a superfície, este deve ser cuidadosamente retirado e modelado novamente;
- c) - o tempo de trabalho disponível após a remoção do material do molde é de aproximadamente 15 minutos, após o qual o material fica menos flexível, dificultando a modelagem.

Uma vez concluída a modelagem, o material deve permanecer sobre a superfície até a completa polimerização. A seguir, o modelo fotoelástico pode ser retirado da superfície e usinado se necessário. Um segundo período de cura, que consiste em deixar o material durante 24 horas à temperatura de 70°C, deve ser feito sempre que possível, visando melhorar as propriedades óticas e mecânicas dos materiais, como será mostrado no capítulo 5. Neste procedimento final de cura, o modelo deve permanecer sobre a superfície a qual foi modelado, para evitar a deformação do mesmo.

Os componentes usados na preparação do material podem causar dermatites ou reações alérgicas. Portanto, devem ser toma-

dos certos cuidados com o seu manuseio, evitando o contato com a pele e com os olhos, bem como a inalação de seus vapores. Todas as etapas de preparação devem ser feitas em local ventilado, sendo aconselhável o uso de mascaras.

### 4.3. Colagem dos Materiais

Os resultados obtidos com a técnica de fotoelasticidade de reflexão, dependem de uma completa adesão entre o espécimen e a camada fotoelástica. Para isto, podem ser usados dois procedimentos, dependendo da superfície. Se esta for reflexiva (polidas), pode-se usar uma cola transparente para fixar a camada ao espécimen. No caso de uma superfície fosca, deve-se utilizar uma cola que produza uma superfície reflexiva. No primeiro caso, deve ser levado em conta as propriedades óticas e a espesura da camada de cola, uma vez que esta irá influenciar nos efeitos óticos observados. A cola reflexiva, por ser opaca, não influencia nos efeitos óticos, sendo por isto mais recomendada para qualquer tipo de superfície [1]. Nas aplicações mostradas no item 4.4, a cola utilizada foi o Araldite - 24 horas, misturada com purpurina.

Para conseguir uma colagem e posicionamento perfeitos, é necessário tomar certos cuidados, como limpar completamente a superfície e o molde com um solvente próprio e delimitar no espécimen a área que vai receber a cola. A cola deve ser preparada segundo as instruções do fabricante, acrescentando à mistura entre 5 e 10 partes em peso de purpurina ou pó de alumínio. A se

guir, espalhar a cola na área demarcada, procurando obter uma camada uniforme e de pequena espessura. O modelo fotoelástico é então posicionado e pressionado levemente sobre a camada de cola, de uma extremidade à outra para evitar a formação de bolhas de ar. No caso de aparecimento de bolhas, o material deve ser retirado e colado novamente. A figura 4.3 mostra um modelo irregular feito com o material fotoelástico desenvolvido (XGY 1109/100 - HY943/30) e o respectivo espécimen, prontos para serem colados. O modelo mostrado foi obtido segundo os procedimentos do item 4.2.3.

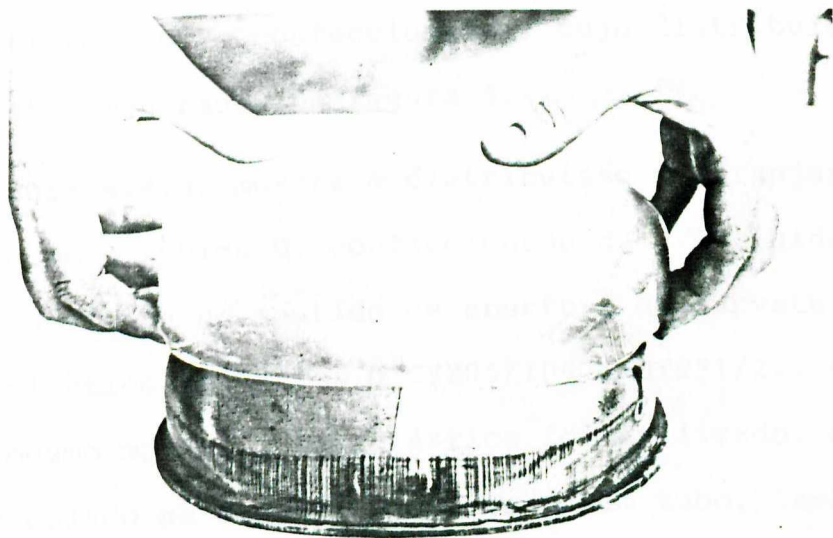


Fig. 4.3 - Modelo irregular e espécimen prontos para serem colados.

Nos contornos livres do material fotoelástico, onde ocorre uma descontinuidade do conjunto espécimen/camada, é conse-

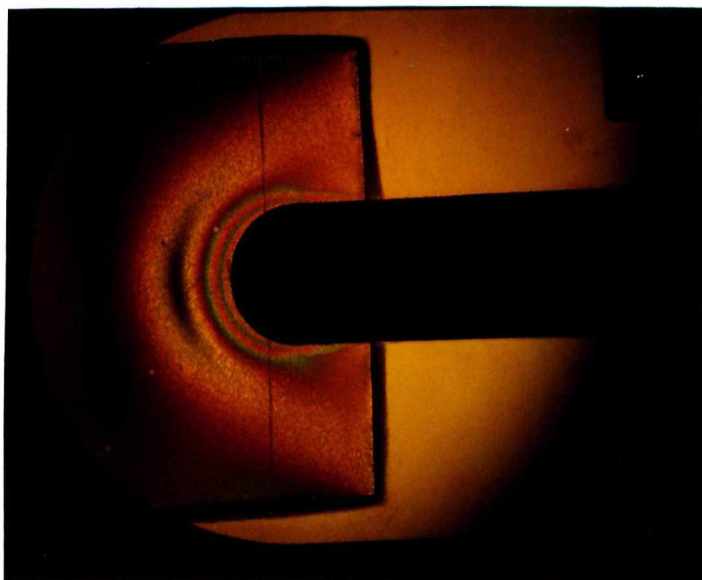
lhável manter uma camada de cola, no formato de uma solda em ângulo, devido às tensões cisalhantes geradas na descontinuidade. Concluída a colagem, o conjunto deve ser mantido a temperatura ambiente até a completa cura da cola.

#### 4.4. Aplicações dos Materiais

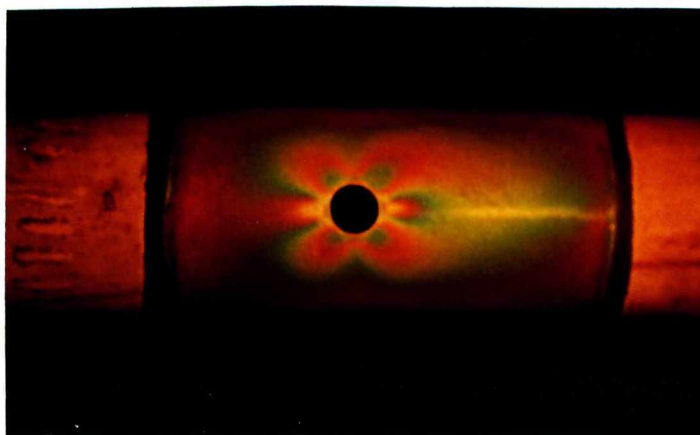
Como foi visto anteriormente, os materiais fotoelásticos desenvolvidos podem ser aplicados na análise da distribuição das tensões/deformações em superfícies planas, curvas e irregulares. Com o objetivo de demonstrar estas aplicações, três modelos distintos foram confeccionados, cuja distribuição das franjas estão mostradas na figura 4.4.

A figura 4.4.a, mostra a distribuição de franjas em um modelo plano de uma viga U, confeccionado de PVC rígido, onde a carga foi aplicada no sentido de abertura da curvatura. O material fotoelástico usado foi o CY205/100 - HY951/20. Na figura 4.4.b, o mesmo material fotoelástico foi utilizado, sendo este moldado e colado na superfície curva de um tubo, também de PVC rígido, com um furo circular. O tubo, engastado, foi submetido a uma flexão variável ao longo de seu eixo, de tal forma a provocar tração na região do furo, gerando a típica distribuição mostrada. Uma aplicação em um modelo mais complexo, superfície irregular, o material XGY1109/100 - HY943/30 foi usado em uma calota de aço, como já ilustrado na figura 4.3. A estrutura foi solicitada através de um parafuso no sentido de abertura da mesma, acarretando a distribuição das franjas mostrada na figura 4.4.c.

a)



b)



c)

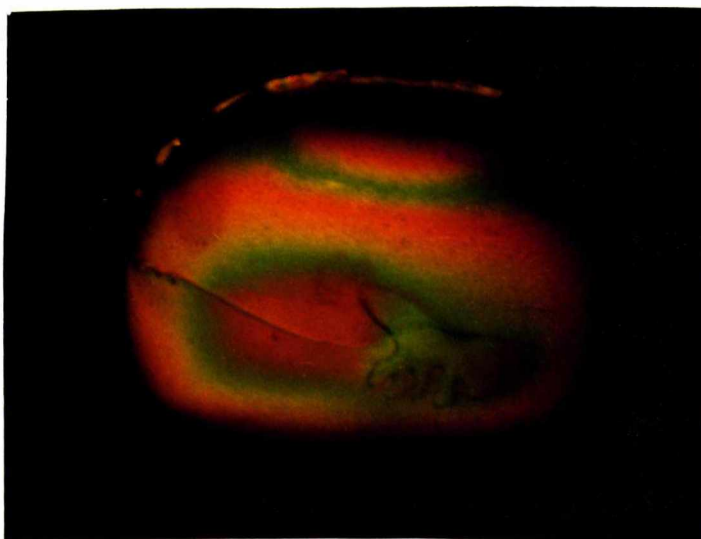


Fig. 4.4 - Distribuição das franjas a) modelo plano - viga U, b) superfície cilíndrica com furo, c) calota irregular mostrada na Fig. 4.3 .

## 5. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Como foi visto no capítulo 2, os materiais para fotoelasticidade de reflexão devem apresentar características e propriedades específicas para a determinação das tensões/deformações no espécimen, a partir de fenômenos óticos observados na camada fotoelástica. Algumas destas propriedades, como módulo de elasticidade ( $E$ ), constante ótica ( $K$ ) e razão de Poisson ( $\nu$ ), estão diretamente ligadas à sensibilidade da camada e são essenciais na determinação das tensões/deformações. Outras propriedades e características que influenciam na escolha do melhor material são: fluência, variação da constante ótica com a temperatura, linearidade, geração interna de calor durante a cura e o efeito de reforço.

As propriedades óticas e mecânicas dos materiais sofrem modificações quando estes, após a obtenção à temperatura ambiente, passam por um período final de cura a uma temperatura de  $70^{\circ}\text{C}$ , durante 24 horas. Este tratamento térmico permite uma completa reação interna ou total polimerização do material. Foram feitas medidas comparativas do módulo de elasticidade ( $E$ ) e do valor da franja para tensão ( $K_{\sigma}$ ), dos oito materiais desenvolvidos e mostrados na Tabela 3.1. Os valores desta tabela, obtidos antes da cura completa, foram comparados com os valores obtidos após a cura final a  $70^{\circ}\text{C}$ . Os resultados mostram uma dimi

nuição do módulo de elasticidade que irá, conseqüentemente, minimizar o efeito de reforço na estrutura. O valor da franja para tensão, que segundo a equação (2.7) é inversamente proporcional a constante ótica, também diminui consideravelmente, aumentando o valor da constante ótica ou sensibilidade ótica do material. A Tabela A.1\* mostra estes valores comparativos. As propriedades determinadas neste capítulo foram obtidas de materiais que, após a obtenção, foram submetidos ao tratamento de cura final.

## 5.1. Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade é a propriedade que controla as distorções no material. Como já mencionado, na fotoelasticidade de reflexão é aconselhável um material com módulo de elasticidade baixo, para atenuar o efeito de reforço causado pela camada fotoelástica na região do espécimen que será analisada.

Neste trabalho, o módulo de elasticidade foi determinado usando dois procedimentos. No primeiro, mediu-se a deflexão máxima em uma viga bi-apoiada submetida a momento constante, como mostrado na figura 5.1, sendo a deflexão medida usando relógio comparador.

---

\*As letras A e B, antes da numeração das Tabelas e Figuras, referem-se aos respectivos Apêndices.



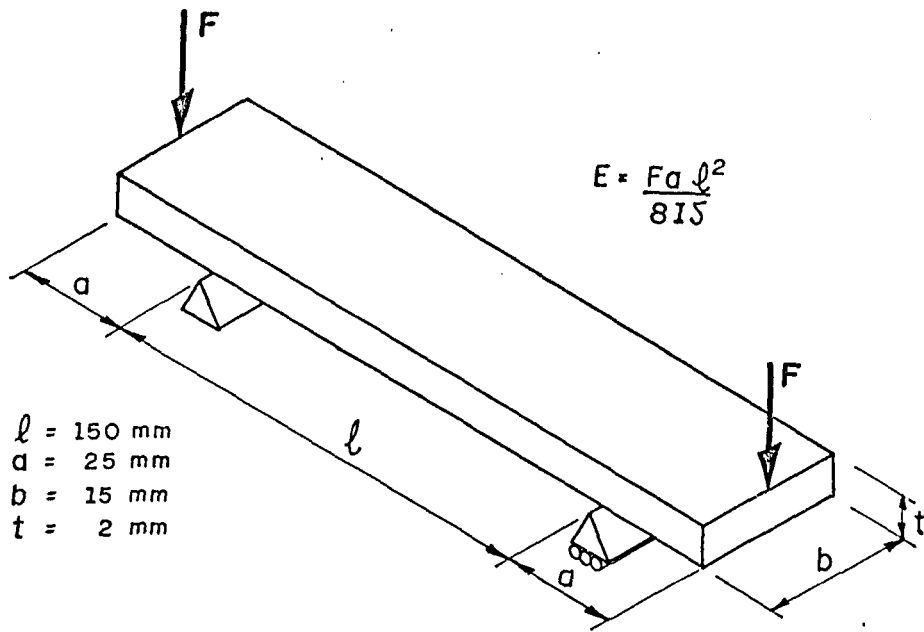


Fig. 5.1 - Esquema da viga usada para medir o módulo de elasticidade.

A figura 5.1 mostra também, a equação de deflexão da viga usada para determinar o módulo de elasticidade. Nesta equação,  $I$  é o momento de inércia da seção transversal e  $\delta$  é a deflexão máxima. Este método, apesar de não ser muito preciso, é simples e permitiu uma avaliação comparativa e seletiva das diversas composições citadas nas Tabelas 3.1 e A1.

O valor do módulo de elasticidade dos dois materiais selecionados, foi finalmente determinado usando uma viga engastada, submetida a um momento variável, na qual foram colados extensômetros elétricos resistivos em meia ponte. A figura 5.2 mostra o esquema da viga e a equação usada para medir o módulo de elasticidade. Os valores foram obtidos a partir de uma regressão linear, onde variou-se a carga e mediu-se a deformação, co

mo mostrado nas figuras B1 e B2. Estas figuras mostram também as dimensões dos modelos utilizados.

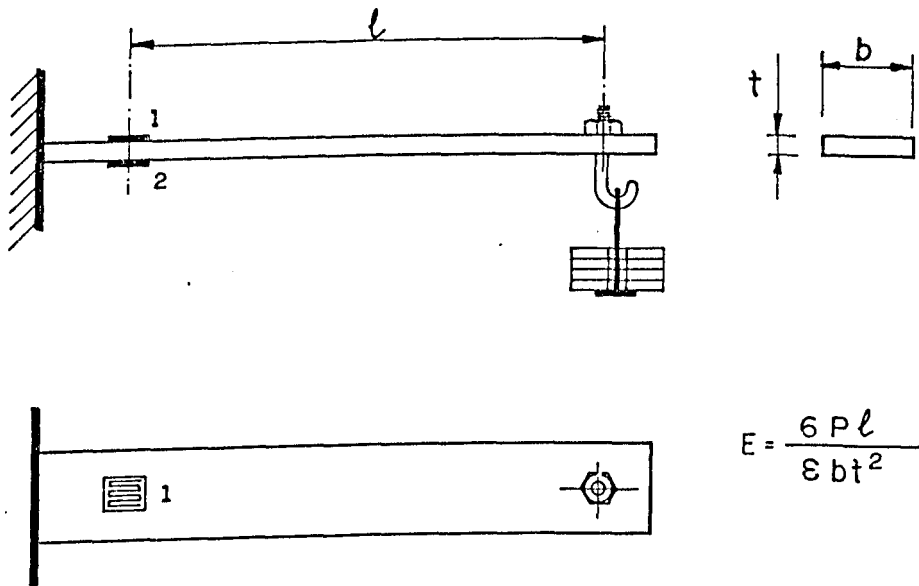


Fig. 5.2 - Esquema da viga engastada usada para medir o módulo de elasticidade usando extensômetro.

Os módulos de elasticidade obtidos para os materiais selecionados, foram:

CY205/100 - HY951/20 - E = 3135 MPa  
 XGY1109/100 - HY943/30 - E = 3217 MPa

## 5.2. Razão de Poisson

A razão de Poisson ou coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), é a ra-

ção entre a deformação transversal e a deformação no sentido do esforço aplicado. Da mesma forma que o módulo de elasticidade, a razão de Poisson foi determinada usando extensômetros elétricos resistivos, colados a uma viga engastada, como mostra a figura 5.3. As dimensões dos modelos, foram as mesmas do item anterior. Os extensômetros usados foram do tipo KFC-3-C1-11 da KYOWA.

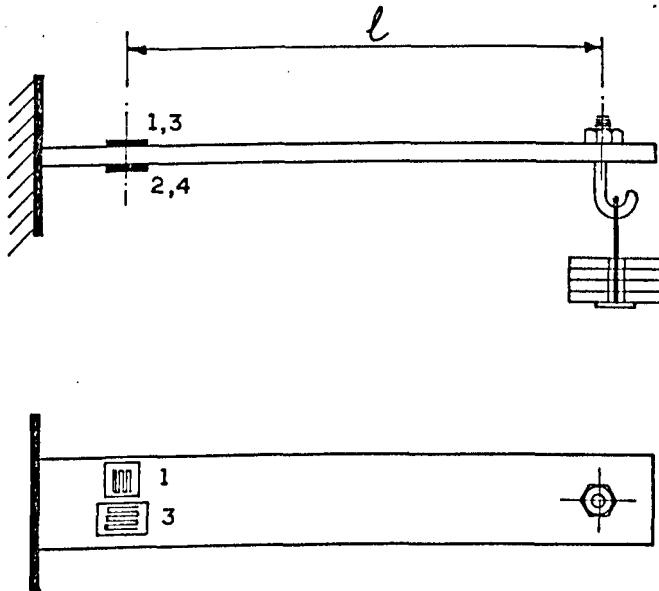


Fig. 5.3 - Vista esquemática da viga engastada com extensômetros, usada para medir razão de Poisson.

Os resultados obtidos através de uma regressão linear, mostrados nas figuras B3 e B4, foram:

$$\text{CY205/100} - \text{HY951/20} - \nu = 0,367$$

$$\text{XGY1109/100} - \text{HY943/30} - \nu = 0,373$$

### 5.3. Constante Ótica

Para se fazer qualquer medida quantitativa usando técnica fotoelástica, é necessário conhecer as propriedades óticas do material, ou seja, o valor da franja para tensão ( $K_\sigma$ ) ou para deformação ( $K_\epsilon$ ). Por esta razão é necessário fazer uma calibração do material fotoelástico, sempre recomendada quando for obtido um novo lote de material. Vários modelos de calibração podem ser usados, uma vez conhecida a solução analítica da distribuição das tensões no mesmo [8]. Assim, a calibração pode ser feita, medindo-se a ordem de franja ( $N$ ), usando polariscópio de reflexão ou transmissão. Neste último, o modelo é confeccionado com o próprio material fotoelástico, sendo este método mais confiável e prático. Neste trabalho, usou-se a fotoelasticidade de transmissão para calibrar os materiais, utilizando discos diametralmente comprimidos e barras tracionadas. A figura 5.4 mostra os modelos e as respectivas formulações.

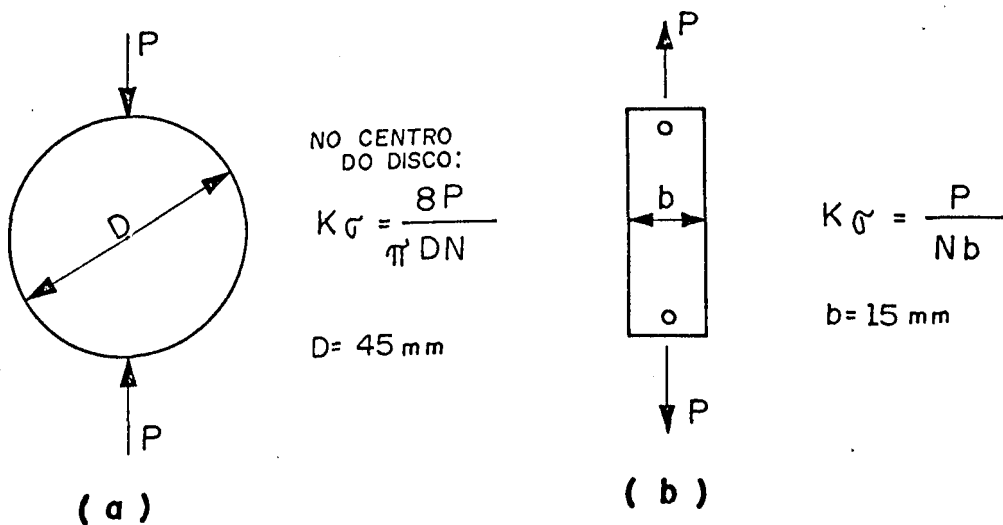


Fig. 5.4 - Modelos usados na obtenção do valor da franja para tensão a) disco comprimido b) barra tracionada.

Uma vez determinado o valor da franja para tensão ( $K_{\sigma}$ ), de termina-se o valor da franja para deformação ( $K_{\epsilon}$ ) e a constante ótica ( $K$ ), usando as equações (2.7). A Tabela 5.1 mostra estes valores.

Tab. 5.1: Valor da franja para tensão, deformação e constante ótica dos materiais selecionados.

MATERIAIS	$K_{\sigma}$ (N/mm)	$K_{\epsilon}$ (1/mm)	K
CY205/100 - HY951/20	12,4	$5,4 \times 10^{-3}$	0,107
XGY1109/100 - HY943/30	14,7	$6,3 \times 10^{-3}$	0,092

\*medido com luz branca  $\lambda \approx 577$  nm

#### 5.4. Variação das Propriedades Óticas com o Tempo

Quando um elemento é submetido a uma tensão constante durante um determinado período de tempo, ocorre um acréscimo de deformação, denominado de fluência (Creep). No caso dos materiais fotoelásticos, podem ocorrer a fluência mecânica e a ótica, ou seja, além do acréscimo na deformação, o material apresenta também um acréscimo na resposta ótica [19]. A figura 5.5 mostra as curvas obtidas para a variação do valor da franja para tensão ( $K_{\sigma}$ ), em função do tempo. As curvas foram construídas a partir de uma barra submetida a tração pura e constante.

Como o valor da franja para tensão é inversamente propor-

cional à constante ótica ( $K$ ), o gráfico foi plotado com o inverso de  $K_{\sigma}$  no eixo das ordenadas e o tempo no eixo das abscissas.

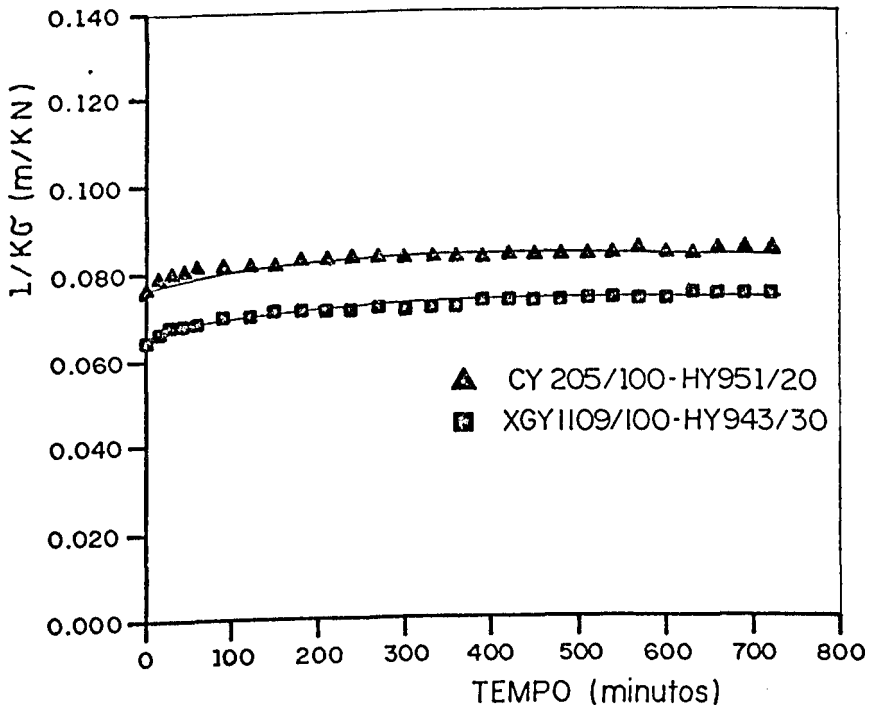


Fig. 5.5 - Variação do valor da franja para tensão com o tempo, para os dois materiais. Tensão constante  $\sigma = 15$  MPa.

## 5.5. Variação das Propriedades Óticas com a Temperatura

Todas as propriedades determinadas neste trabalho foram obtidas à temperatura ambiente. O estudo da variação das propriedades óticas dos materiais com a temperatura, é necessário

para determinar a faixa de temperatura em que o material pode ser utilizado, sem com isto incorrer em erros significativos. As curvas de variação do valor da franja para tensão com a temperatura, estão apresentadas na figura 5.6 . Os dados foram obtidos a partir de um disco comprimido diametralmente (ver Fig. 5.4a), carregado dentro de um forno fotoelástico da Fotolastic INC., modelo P-2301-M, equipado com um polariscópio de transmissão. As curvas permitem, também, determinar a temperatura crítica do material [21], ou seja, temperatura de congelamento das tensões.

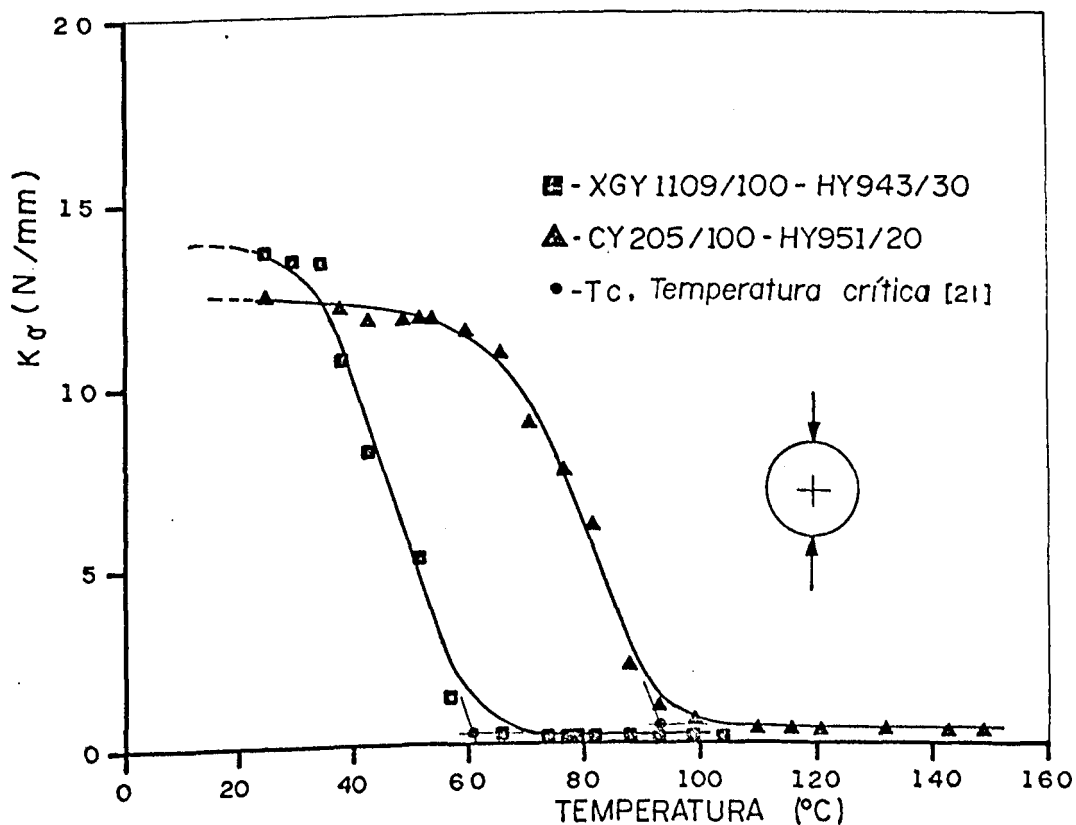


Fig. 5.6 - Variação do valor da franja para a tensão com a temperatura dos materiais.

## 5.6. Linearidade

Como os materiais desenvolvidos serão usados para determinar tensões/deformações em espécimens, baseado nos princípios da teoria da elasticidade [19], estes devem apresentar uma linearidade nas relações tensão/deformação e tensão/resposta ótica. A figura 5.7 mostra as curvas de tensão x ordem de franja dos materiais. Os valores foram obtidos em barras planas traçadas, variando a carga aplicada e medindo-se as ordens de franja correspondente. Os limites de linearidade foram obtidos assumindo um desvio inferior a 0,2% no coeficiente de correlação da reta na fase elástica, e estão mostrados na figura 5.7.

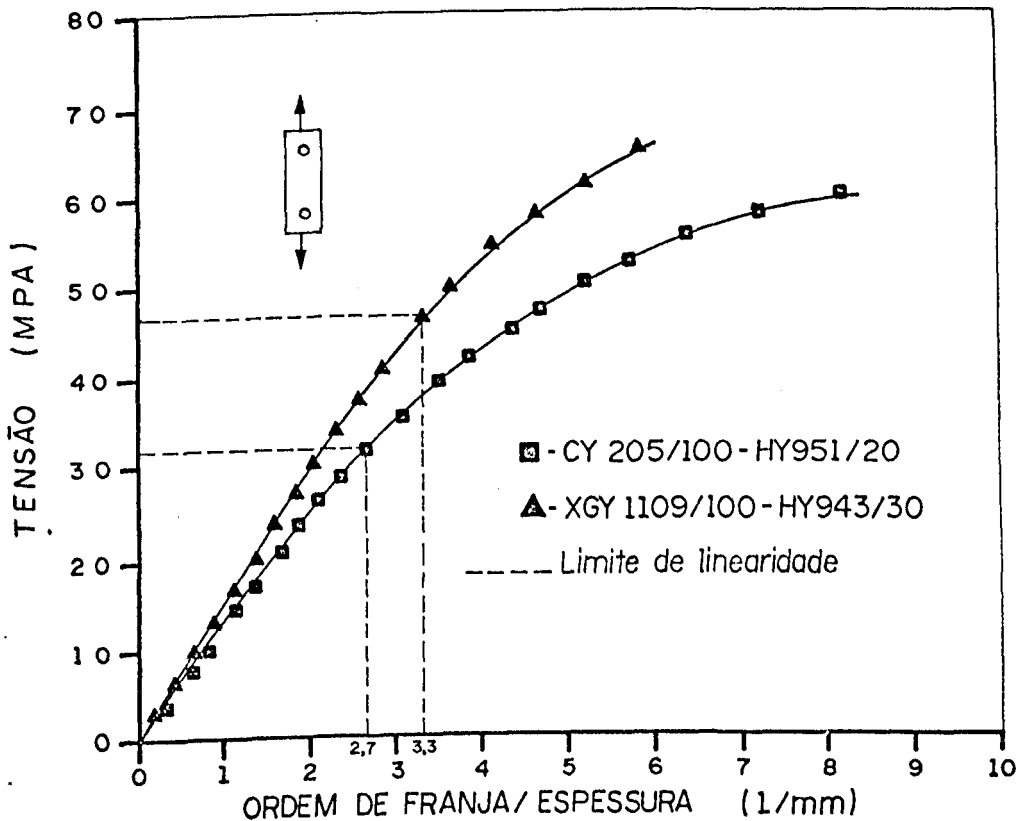


Fig. 5.7 - Variação da ordem de franja com a tensão para os materiais.



## 5.7. Geração de Calor Durante o Período de Endurecimento

A reação química que ocorre na resina provocado pelo endurecedor é uma reação exotérmica, isto é, as ligações ocorrem com liberação de energia em forma de calor. O calor liberado provoca um aumento de temperatura na mistura, que age como catalizador, desencadeando ainda mais a reação. Dependendo da intensidade e rapidez da reação, ou seja, se a temperatura subir muito durante o endurecimento, pode provocar o aparecimento de tensões térmicas residuais, anisotropia ótica ou até mesmo a formação de bolhas. A elevação da temperatura durante a cura, vai depender da espessura da placa que está sendo obtida. Quanto maior a espessura, menor a dissipação de calor e consequentemente maior a temperatura. As figuras B5, B6, B7 e B8 mostram a variação da temperatura, dos dois materiais desenvolvidos, para duas espessuras diferentes. A temperatura foi medida utilizando um termopar cobre-constantan, localizado no centro da amostra, com medidas simultâneas em função do tempo, utilizando um sistema de aquisição de dados, HP 3054A. Como é sabido, em fotoelasticidade de reflexão, a espessura da camada utilizada é de no máximo 3mm. Para ambos os materiais, esta espessura é conseguida sem que ocorra uma elevação de temperatura que comprometa os materiais, sendo que o material XGY1109/100 - HY943/30 pode ser fundido em espessuras maiores, por apresentar uma geração de calor baixa. Este material pode ser utilizado em fotoelasticidade de transmissão bidimensional, como será visto no Capítulo 6.

## 5.8. Efeitos de Reforço

A camada de material fotoelástico colada no espécimen, possui uma espessura que não foi levada em consideração na formulação das equações usadas para determinar as tensões/deformações no espécimen, a partir de efeitos óticos que aparecem no material fotoelástico [6,8,19]. A camada de material fotoelástico causa um reforço no espécimen, alterando o estado de tensão/deformação real no mesmo devido a um aumento na seção. A camada fotoelástica absorve parte dos esforços que deveriam ser suportados pelo espécimen. Em muitos casos, é possível calcular o efeito de reforço devido a camada fotoelástica e com isto estabelecer o fator de correção adequado.

### 5.8.1. Problemas de Estado Plano de Tensões

Considera-se para o presente estudo um espécimen plano, no qual foi colado um material fotoelástico, submetido a um estado plano de tensão. A figura 5.8, mostra um elemento infinitesimal tirado deste espécimen, na direção das tensões principais.

Sendo  $F_{CR}$  o fator de correção para um problema de estado plano de tensão, e considerando as deformações no espécimen iguais às deformações na camada fotoelástica na interface, tem-se:

$$(\epsilon_1^s - \epsilon_2^s)_v = F_{CR} (\epsilon_1^c - \epsilon_2^c) \quad (5.1)$$

onde,

$(\epsilon_1^s - \epsilon_2^s)_v$  : Diferença entre as deformações principais verdadeiras

$(\epsilon_1^c - \epsilon_2^c)$  : Diferença entre as deformações principais na camada, indicada pelos efeitos óticos

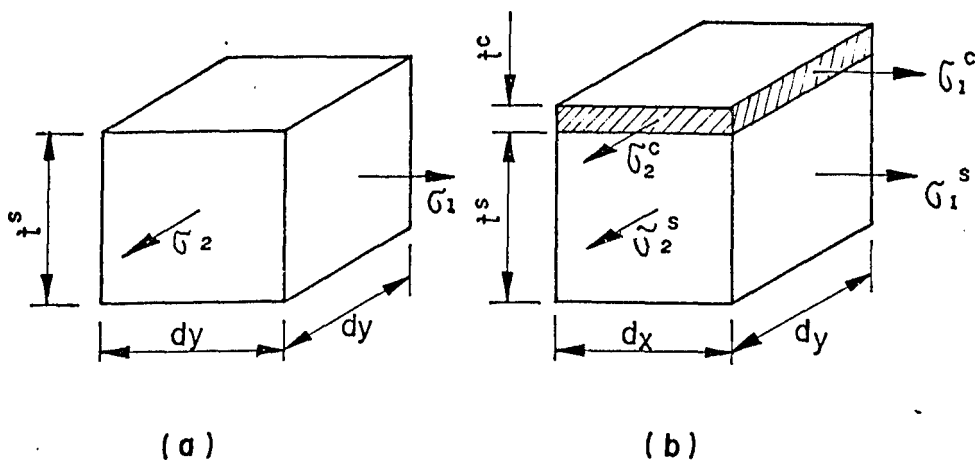


Fig. 5.8 - Elemento infinitesimal de um espécimen submetido a um estado plano de tensão, a) sem material fotoelástico, b) com material fotoelástico.

Fazendo-se um balanço de forças nos elementos mostrados na figura 5.8, para uma mesma força aplicada no espécimen com e sem camada fotoelástica e utilizando as relações entre tensões e deformações da teoria da elasticidade, tem-se:

$$(\epsilon_1^s - \epsilon_2^s)_v = \left[ 1 + \frac{t^c}{t^s} \cdot \frac{E^c}{E^s} \cdot \frac{(1 + \nu^s)}{(1 + \nu^c)} \right] (\epsilon_1^c - \epsilon_2^c) \quad (5.2)$$

onde,

- $\epsilon_1^s, \epsilon_2^s, \epsilon_1^c, \epsilon_2^c$  : Deformações principais no espécimen e na camada, respectivamente
- $t^s, t^c$  : Espessura do espécimen e da camada
- $\nu^s, \nu^c$  : Razão de Poisson do material do espécimen e da camada
- $E^s, E^c$  : Módulo de elasticidade do espécimen e da camada

Comparando as equações (5.1) e (5.2), o fator de correção devido ao reforço  $F_{CR}$ , para um conjunto camada/espécimen submetido a um estado plano de tensão, é dado por:

$$F_{CR} = 1 + \frac{t^c}{t^s} \cdot \frac{E^c}{E^s} \frac{(1 + \nu^s)}{(1 + \nu^c)} \quad (5.3)$$

A figura 5.9 mostra a variação de  $F_{CR}$  em função de  $t^c/t^s$ , para espécimens de vários materiais e camada fotoelástica de CY205/100 - HY951/20. O gráfico para o XGY1109/100 - HY943/30 está mostrado na figura B9.

As propriedades dos materiais usados na obtenção dos gráficos foram:

$$\text{Aço} - E = 207 \text{ GPa} \quad ; \quad \nu = 0,292$$

$$\text{Ferro Fundido} - E = 100 \text{ GPa} \quad ; \quad \nu = 0,211$$

$$\text{Alumínio} - E = 77 \text{ GPa} \quad ; \quad \nu = 0,334$$

$$\text{PVC} - E = 3,3 \text{ GPa} \quad ; \quad \nu = 0,370$$

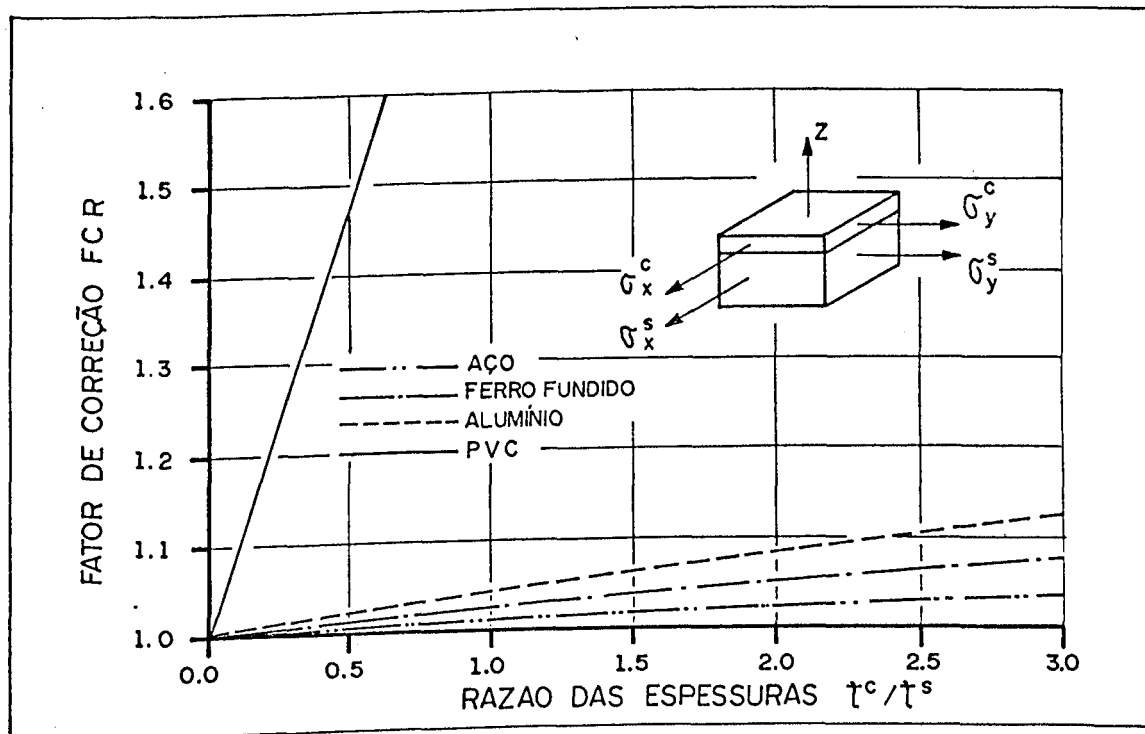


Fig. 5.9 - Fator de correção  $F_{CR}$  para camada de CY205/100 - HY951/20 e espécimen em aço, ferro fundido, alumínio e PVC.

### 5.8.2. Problemas de Flexão de Vigas e Placas

A análise do comportamento da camada fotoelástica em problemas de flexão perpendicular ao plano da camada, é de fundamental importância, devido a grande influência da espessura da camada nos resultados obtidos. Além do efeito de reforço, resultante da porção do momento suportada pela camada, dois fatores adicionais devem ser consideradas: a variação da deformação ao longo da espessura e o deslocamento da linha neutra quando o reforço estiver apenas de um lado do espécimen. A figura 5.10 mostra um elemento infinitesimal tirado de um componente

sujeito a momento puro, no qual foi colado uma camada de material fotoelástico.

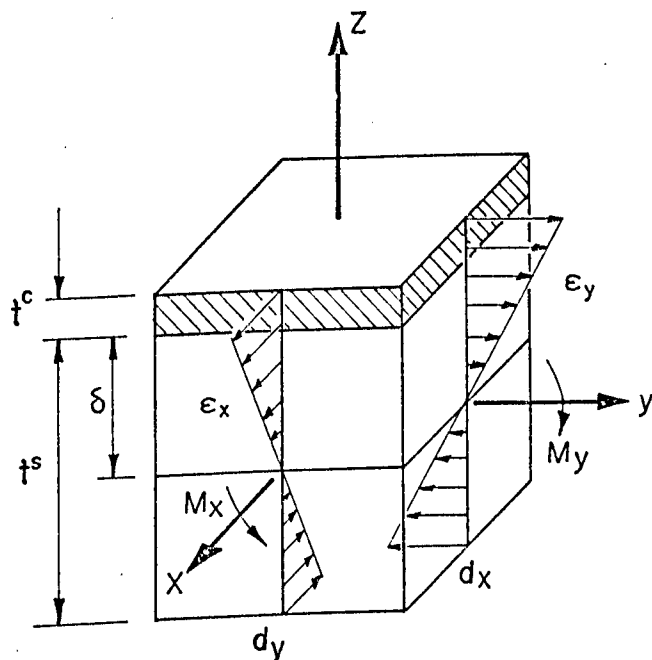


Fig. 5.10 - Elemento infinitesimal de um componente, com material fotoelástico, submetido a momento puro.

Sendo  $F_{CB}$  o fator de correção para um conjunto espécimen/camada submetido a momento fletor, tem-se:

$$(\epsilon_1^S - \epsilon_2^S)_V = F_{CB} (\epsilon_1^C - \epsilon_2^C) \quad (5.4)$$

Assumindo-se que:

- os materiais do espécimen e da camada são elásticos e i

trópicos.

- as deformações na interface espécimen/camada são iguais
- a deformação normal, no espécimen e na camada, aumenta linearmente com a distância da linha neutra

tem-se finalmente que [6],

$$F_{CB} = \frac{1 + B.C}{1 + C} \left[ 4(1 + B.C^3) - \frac{3(1 - B.C^2)^2}{1 + B.C} \right] \quad (5.5)$$

onde,

$$B = \frac{E^C}{E^S} \left[ \frac{1 - (\nu^S)^2}{1 - (\nu^C)^2} \right]$$

$$C = \frac{t^C}{t^S}$$

As curvas da figura 5.11 mostram a variação de  $F_{CB}$  em função de  $t^C/t^S$  para diversos materiais, tendo como reforço o XGY1109/100 - HY943/30. O gráfico do CY205/100 - HY951/20, es tá mostrado na figura B10.

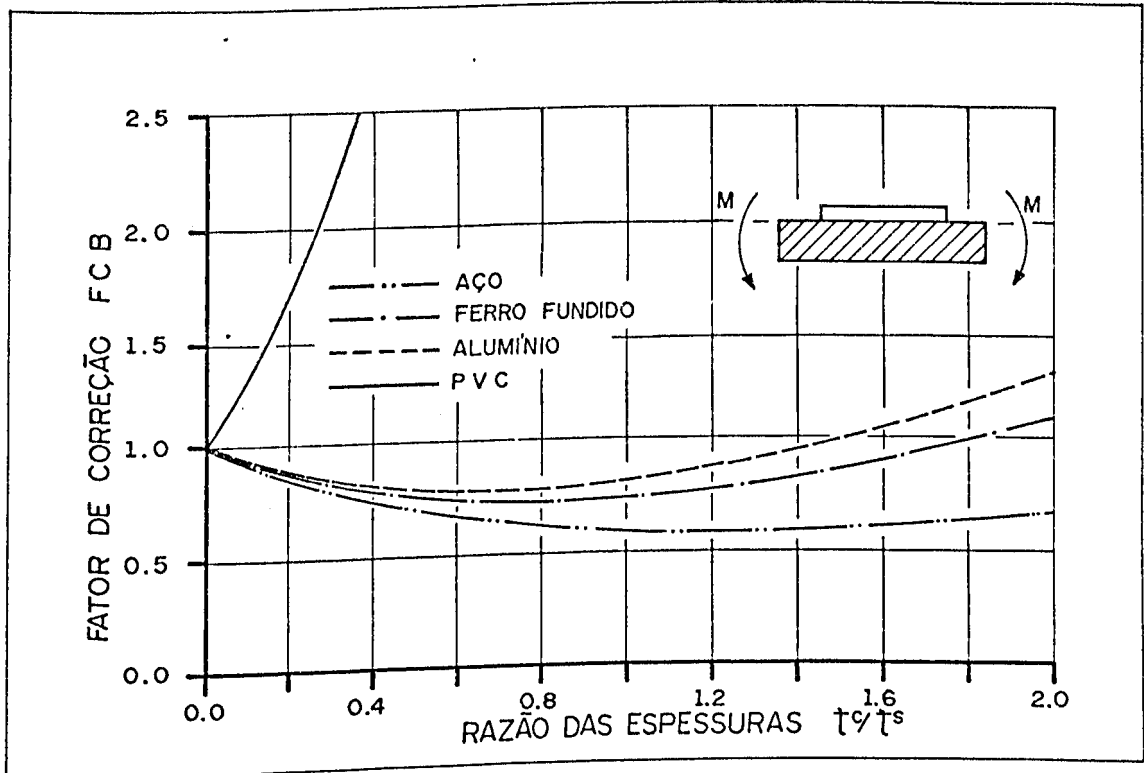


Fig. 5.11 - Fator de correção  $F_{CB}$  para o aço, ferro fundido, alumínio e PVC, com reforço de XGY1109/100 - HY943/30.

### 5.8.3. Problemas de Torção em Seção Circular

Neste caso, existem dois fatores que influenciam nos resultados obtidos usando camada fotoelástica. Um deles é o reforço devido a espessura do material e o outro, o gradiente de deformação ao longo da espessura. A figura 5.12 mostra um eixo cilíndrico, submetido a torção.

Sendo  $F_{CT}$  o fator de correção para as deformações determinadas por efeitos óticos na camada, em relação às deformações



desenvolvidas na superfície de um eixo sem material fotoelástico, para um mesmo torque, tem-se:

$$(\epsilon_1^s - \epsilon_2^s)_V = F_{CT} (\epsilon_1^c - \epsilon_2^c) \quad (5.6)$$

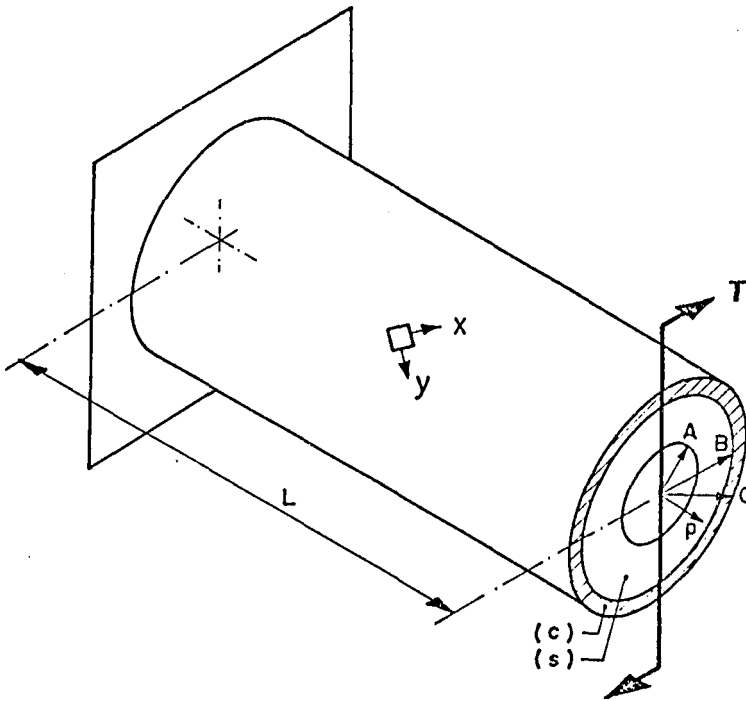


Fig. 5.12 - Eixo circular vazado, submetido a torção com material fotoelástico.

O valor de  $F_{CT}$  depende das propriedades físicas dos materiais da camada e do eixo, e da geometria dos mesmos [6].

Assim, tem-se que:

$$F_{CT} = \frac{2}{1 + (C/B)} \left\{ 1 + \frac{G^c [(C/B)^4 - 1]}{G^s [1 + (A/B)^4]} \right\} \quad (5.7)$$

onde,

$G^S, G^C$  : módulo de rigidez transversal do epêcimen e da camada respectivamente.

A, B, C: parâmetros geométricos mostrados na figura 5.12.

A figura 5.13 mostra as curvas de variação do fator de correção em função da geometria, para o aço, tendo como reforço o CY205/100 - HY951/20.

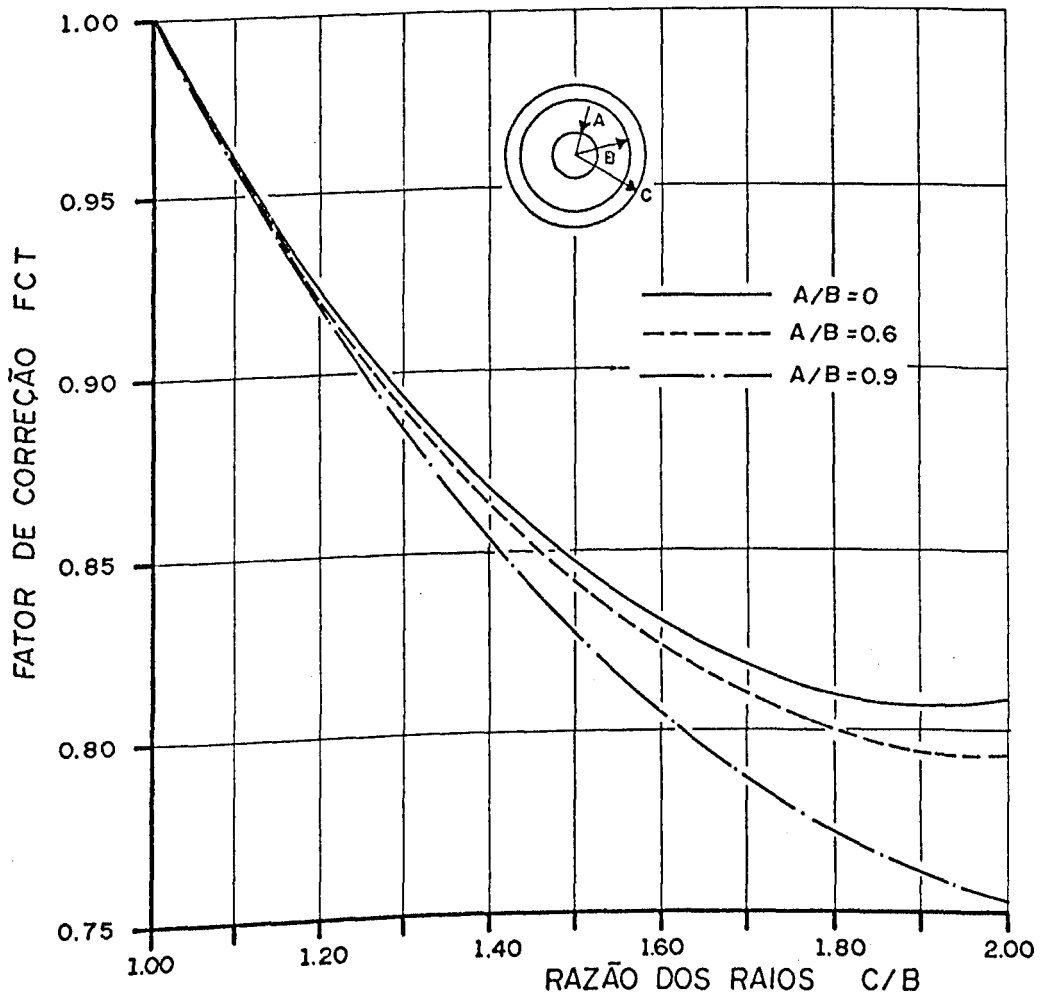


Fig. 5.13 - Gráfico de reforço para eixos circulares de aço carbono, submetido a torção, tendo como reforço o CY205/100 - HY951/20

Os outros gráficos para diversos materiais, tendo como reforço os dois materiais desenvolvidos, estão mostrados nas figuras B11, B12, B13, B14, B15, B16 e B17.

## 6. MATERIAL PARA FOTOELASTICIDADE BIDIMENSIONAL

Na técnica de fotoelasticidade de reflexão, a espessura da camada influencia os resultados, devido ao efeito do reforço. Para minimizar esta influência, a espessura utilizada nesta técnica é de no máximo 3mm, dependendo da aplicação. Para a fotoelasticidade bidimensional, onde são confeccionados modelos planos de material fotoelástico a espessura utilizada varia entre 3 e 10mm [19].

Como mencionado anteriormente, este capítulo apresenta o desenvolvimento de um material para fotoelasticidade plana, como um sub-produto do trabalho principal. Desta forma, a partir dos testes para medir a geração de calor no processo de cura dos materiais para fotoelasticidade de reflexão, conclui-se que o material composto de resina epoxi XGY1109, curada com o endurecedor HY943, na proporção de 100 partes em peso de resina com 30 partes em peso do endurecedor, apresentou-se como um bom material para fotoelasticidade plana. Este pode ser fundido em espessuras maiores, sem que a geração interna de calor comprometa suas propriedades óticas. Nas figuras B5 a B8 pode ser observado que a variação da temperatura com o tempo para o XGY1109 ou geração de calor durante a cura, é menor que o do CY205.

O material para fotoelasticidade plana deve ser transparente, ter boa resposta ótica, ser de fácil obtenção e sobretudo

do livre de tensões residuais e manchas. Assim, para obter estas características, a temperatura durante a cura não deve ultrapassar a temperatura crítica do material.

Utilizando a resina XGY1109 com endurecedor HY943 nas proporções citadas, foram obtidos vários modelos com diferentes espessuras, com a finalidade de determinar a máxima espessura, com geração de calor dentro dos limites da temperatura crítica. A espessura máxima encontrada foi 5mm, estando dentro da faixa recomendada para materiais para fotoelasticidade plana [19]. A figura 6.1 mostra a variação da temperatura com o tempo durante a cura, para uma placa de 5mm de espessura. Nesta figura pode ser observado que a máxima temperatura alcançada foi de 59°C, menor que a temperatura crítica de 61°C (Fig. 5.6).

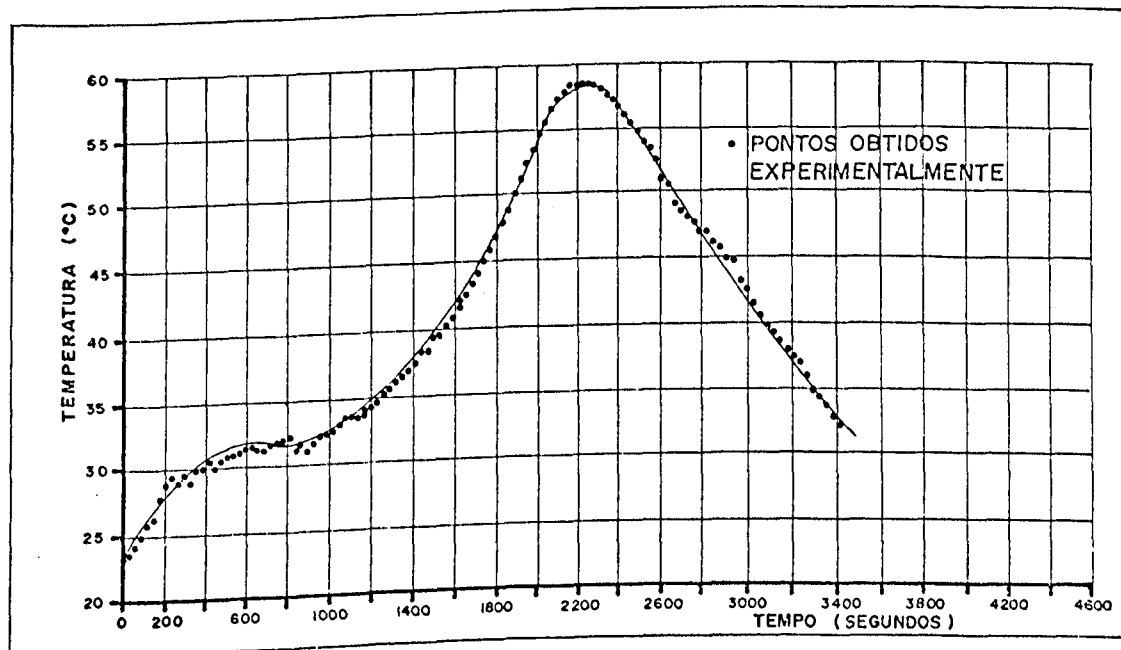


Fig. 6.1 - Variação da temperatura com o tempo para uma placa de XGY1109/100 - HY943/30 de 5mm de espessura.

## 6.1. Obtenção do Material

O método de obtenção de placas com espessura variando entre 3 e 5mm é praticamente o mesmo descrito no Capítulo 4. Para placas com estas espessuras, alguns cuidados específicos devem ser tomados. Os moldes e os componentes não devem ser aquecidos, sendo recomendado a preparação, fundição e cura do material a temperatura entre 20°C e 23°C. Os moldes devem ter bases perfeitamente lisas, como já descrito, e terem suas superfícies livres protegidas, permitindo a obtenção de placas sem a necessidade de polimento. A desmoldagem da placa é feita após a polimerização completa do material, sendo o tempo necessário para a cura entre 8 e 10 horas.

## 6.2. Propriedades do Material

As propriedades do material proposto são as mesmas descritas no Capítulo 5, pois estas propriedades dependem da composição do material. A calibração do material deve ser feita para cada placa fundida.

A Tabela 6.1 mostra os valores das principais propriedades do material desenvolvido. Além destas propriedades o material apresenta boa transparência, taxa de fluência baixa e baixo custo, comparado com os materiais importados. O material é fácil de ser obtido e usinado, desde que em ambos os casos a temperatura não atinja a temperatura crítica do material. As tensões residuais causadas por usinagem, podem ser eliminadas com um tratamento térmico, que consiste em submeter o modelo a

uma temperatura acima da crítica, por um período entre 2 e 5 horas, seguido de um resfriamento lento.

Tab. 6.1. - Propriedades do material para fotoelasticidade plana, composição: XGY1109/100 - HY943/30.

PROPRIEDADES	UNIDADE	VALOR
Módulo de elasticidade $E^c$	MPa	3217
Valor da franja p/tensão $K_G$	KN/m	14,7*
Constante Ótica K	-	0,092
Ordem de franja máxima $N_{max}$	Franja/mm	3,3
Temperatura crítica $T_c$	°C	61

\* Medido com luz branca -  $\lambda \cong 577nm$

## 7. DISCUSSÃO

Nesta etapa do trabalho serão discutidos os resultados obtidos durante o desenvolvimento do material para fotoelasticidade de reflexão. Este trabalho traz informações importantes, constituindo em mais uma contribuição para a fotoelasticidade no Brasil. A sua elaboração foi feita de forma criteriosa, colocando ao alcance dos pesquisadores da área uma visão geral do estado da arte, com os principais fundamentos teóricos e toda a metodologia de seleção, obtenção e aplicação dos materiais. Três pontos serão discutidos, com base nos resultados experimentais obtidos, sendo:

- materiais desenvolvidos;
- propriedade dos materiais;
- utilização dos materiais.

### 7.1. Materiais Desenvolvidos

Os componentes citados no Capítulo 3, resinas expoxi e endurecedores, foram selecionados com base nas recomendações bibliográficas e a partir da disponibilidade dos mesmos no mercado nacional. A combinação destes componentes foi feita, inicialmente, de forma empírica. Assim, uma inspeção na tabela 3.1



mostra que após a obtenção dos materiais, critérios bem definidos foram utilizados para a escolha dos mesmos. Como pode ser visto, as resinas tratadas com 50 pp de endurecedor e curada à temperatura ambiente, permitiram sua ordenação comparativamente, quanto ao maior ou menor grau de reação (endurecimento) de cada composição, transparência, fragilidade e manchas superficiais. Desta forma, uma segunda etapa foi feita com variação nas proporções dos endurecedores, permitindo selecionar oito composições, que estão mostradas na Tabela 3.2, com os respectivos valores do valor da franja para tensão ( $K_G$ ) e do módulo de elasticidade (E). Os materiais escolhidos, além de atender a todas as condições requeridas para fotoelasticidade de reflexão, apresentam resposta ótica maior ou igual a dos materiais importados.

Os materiais desenvolvidos, devido a alta sensibilidade ótica, podem ser utilizados para determinar tensões/deformações em estruturas ou partes mecânicas de diferentes materiais na fase elástica. Neste trabalho, não foi obtido nenhum material com baixa sensibilidade ótica, sendo estes materiais usados em aplicações onde ocorrem grandes deformações. Estudos nesta direção devem ser realizados, objetivando análise de tensões/deformações em borracha, madeira e a possibilidade de aplicação destes em fitomecânica, no estudo de crescimento de plantas. Outra aplicação destes materiais é no estudo de estruturas com grandes deformações ou com deformações plásticas.

Com relação à metodologia descrita para a obtenção dos materiais, alguns pontos importantes devem ainda ser mencionados, fruto das observações tiradas das experiências realizadas. A

preparação do molde, deve visar a obtenção de um material que, além de transparente, possua uma superfície lisa, evitando qualquer tipo de polimento. Alguns testes de polimento foram realizados, com cuidados especiais para evitar tensões residuais provocadas pela elevação da temperatura, com resultados satisfatórios. O polimento foi considerado pouco viável devido ao tempo gasto e conseqüente aumento do custo. Outro ponto importante está relacionado com o tempo e a intensidade da reação, que dependem, principalmente, da espessura e da composição do material. Isto pode ser visto nos gráficos das figuras B5, B6, B7 e B8, onde o XGY1109/100 - HY943/30 apresenta uma reação menos intensa, com temperatura mais baixa do que o CY205/100 - HY951/20, apesar do primeiro atingir a temperatura máxima à aproximadamente um terço do tempo do segundo. Em conseqüência, o XGY1109/100 - HY943/30 pode ser obtido em espessuras maiores, sendo recomendado também para fotoelasticidade bidimensional. O CY205/100 - HY951/20, por apresentar um intervalo de tempo maior na cura, é recomendado para obtenção de modelos irregulares devido ao maior tempo de manuseio.

## 7.2. Propriedades dos Materiais

Um completo conhecimento das propriedades do material plástico desenvolvido é de fundamental importância para a utilização do mesmo na análise de tensões/deformações usando fotoelasticidade. Como foi visto, o material quando obtido à temperatura ambiente e após seu completo endurecimento, tem propriedades bem definidas. Contudo, o tratamento térmico sugerido, a

70°C durante 24 horas, provoca modificações nestas propriedades, melhorando as mesmas. Isto ocorre devido ao fato da temperatura atuar como catalizador da reação, propiciando durante o período proposto uma complementação da cura e homogeneização do material. A Tabela A1 mostra os principais materiais selecionados, com o valor da franja para tensão ( $K_D$ ) e o módulo de elasticidade (E) antes e depois do tratamento térmico. Pode ser observado que o módulo de elasticidade e o valor da franja para tensão diminuem em até 17,3% e 24,6% respectivamente, resultando em um material mais flexível, menos quebradiço e com uma maior resposta ótica.

Os valores dos módulos de elasticidade mostrados na Tabela A1, determinados usando deflexão de barras, diferem entre 15% e 18% dos valores determinados usando extensômetros elétricos, que fornecem valores mais confiáveis. Os valores determinados através do método simples das medidas de deflexão, foram utilizados de forma comparativa para seleção preliminar dos materiais. Os valores da franja, também mostrados na Tabela A1, foram determinados através da média de vários modelos de diferentes geometrias, obtidos de fundições distintas de um mesmo lote de componentes. É recomendado que esta propriedade seja determinada para cada modelo ou placa de material obtido, pois este pode alterar com pequenas modificações na composição e no grau de polimerização. Os valores da constante ótica mostrados na Tabela 5.1 foram determinados usando fotoelasticidade de transmissão. Este método é consideravelmente mais simples, pois evita a colagem do material fotoelástico em modelos de calibração de outro material e conseqüentemente, o cálculo do efeito

de reforço.

No gráfico da figura 5.6, que mostra a variação do valor da franja com a temperatura, está definido o valor da temperatura crítica ( $T_c$ ). Esta propriedade é bastante importante, pois sendo esta a temperatura de congelamento das tensões [21], cuidados especiais devem ser tomados para evitar a elevação da temperatura durante a usinagem, depois da colagem do material fotoelástico. Da mesma forma, a temperatura de teste deve ser sempre inferior à crítica, evitando o aparecimento de tensões residuais, devido a diferença do coeficiente de dilatação térmico dos materiais. Estas tensões, podem ser facilmente eliminadas, mediante um tratamento térmico à temperatura acima da crítica [21], somente quando o material fotoelástico ou modelo ainda não estiver colado na superfície a ser analisada. Como já mencionado, os materiais desenvolvidos apresentam uma geração interna de calor, com uma conseqüente elevação de temperatura durante a cura (Fig. B5, B6, B7 e B8). A obtenção de materiais sem manchas óticas internas é conseguida, quando o calor gerado, não eleva a temperatura acima da crítica. Desta forma, para materiais fundidos em espessuras diferentes, foram determinadas as espessuras máximas de fundição, para os dois materiais desenvolvidos. Assim, o CY205/100 - HY951/20 e o XGY1109/100 - HY943/30 podem ser fundidos, sem maiores cuidados, em espessuras de 3mm e 5mm, respectivamente. A figura 6.1 mostra a variação da temperatura em função do tempo, para uma placa de XGY1109/100 - HY943/30 com 5mm de espessura. Pode ser observado que a máxima temperatura atingida ( $\sim 59^\circ\text{C}$ ) está abaixo da temperatura crítica deste material.

A figura 5.7 mostra a variação da ordem de franja com a tensão e o limite de linearidade definido para os dois materiais. Para o XGY1109/100 - HY943/30 o limite é 3,3 franjas/mm ou  $\sigma = 47$  MPa e para CY205/100 - HY951/20 de 2,7 franjas/mm ou  $\sigma = 32$  MPa.

Na maioria dos materiais fotoelásticos à base de resina e poxi ocorre fluência (Creep), ou seja, aumento da deformação ou resposta ótica em função do tempo, para uma tensão constante. Para estes materiais, este efeito praticamente paraliza a partir de um determinado tempo. A típica variação da resposta ótica com o tempo está mostrada na figura 5.5, para os materiais desenvolvidos. Nota-se que o tempo de estabilização é, para os dois casos, de aproximadamente 1 hora. Assim, recomenda-se na prática, manter a carga aplicada durante este período, antes de realizar medidas ou fotografias para análises.

Como foi analisado no Capítulo 5, o efeito de reforço na estrutura deve ser conhecido, para a determinação das tensões/deformações reais. Desta forma, para os materiais desenvolvidos, os fatores de correção podem ser obtidos nos gráficos das figuras 5.9, 5.11, 5.13 e B9 à B17. Como é sabido, este fator depende da geometria e das propriedades da camada e do espécimen ( $E, \nu$ ). Como os valores destas propriedades são próximos para os dois materiais (Tabela 7.1), os fatores de reforço correspondentes ( $F_{CR}$ ,  $F_{CB}$  e  $F_{CT}$ ) apresentam valores próximos.

### 7.3. Utilização dos Materiais

Os materiais desenvolvidos neste trabalho têm um vasto campo de utilização, pois podem ser aplicados em qualquer tipo de superfície (figura 4.4), visando a obtenção de informações, tanto qualitativas quanto quantitativas, das tensões/deformações na superfície do protótipo. Devido a grande facilidade de preparação e colagem do material, ao custo relativamente baixo e a quantidade de informações obtidas, esta técnica tem sido usada tanto na indústria como em centros de pesquisa [8], para diversos tipos de análise, como:

- *INDÚSTRIAS AEROESPACIAIS* - várias aplicações nesta área foram feitas para o estudo de solicitações em estruturas de janelas e asas de aviões, trem de pouso de aeronaves, estrutura de foguetes espaciais e mísseis, bem como estudos de vibrações em palhetas de turbinas;
- *VASOS DE PRESSÃO* - a técnica foi utilizada neste tipo de estrutura, para fazer análise de tensões/deformações em regiões de descontinuidade, envolvendo problemas de escoamento, trincas, soldas, tensões residuais, erro na tolerância de fabricação e análise de esforços combinados;
- *INDÚSTRIA AUTOMOTIVA* - também neste campo, as aplicações da técnica foram inúmeras, destacando-se o estudo em sistema de potência, otimização de peças e componentes de suspensão, análise em blocos de motores, etc.;
- *ENGENHARIA CIVIL E MINAS* - aplicações em paredes de minas e

em estruturas de pontes e barragens;

- *MATERIAIS NÃO-METÁLICOS* - usando materiais de baixo módulo de elasticidade foram feitas análises em pneus de carro e alças de paraquedas; com materiais de alta sensibilidade pode-se analisar o comportamento de materiais heterogêneos de alto módulo de elasticidade, como o concreto, e estudos em plásticos e madeira;
- *BIOENGENHARIA* - a técnica foi utilizada na análise de tensões em ossos humanos, estudo de aparelhos ortopédicos, diferentes tipos de prótese e outros aparelhos médicos;
- *UTENSÍLIOS DOMÉSTICOS* - foram feitos estudos em várias partes de máquinas de lavar prato, efeito térmico em lavatórios de banheiro, efeitos dinâmicos em bulbos e pás de ventiladores;
- *TESTES NÃO-DESTRUTIVOS* - a aplicação da camada fotoelástica, permite detectar falhas internas do material, através da análise de distribuição de franjas na superfície do material;
- *TRANSDUTORES* - o uso de fotoelasticidade de reflexão na construção de transdutores, apresenta grandes vantagens quando não é possível qualquer contato entre o transdutor e o sistema de aquisição, não é permitido o uso de aparelhos elétricos; estes são de baixo custo e os equipamentos não requerem muita manutenção;

- *ALINHAMENTO DE MÁQUINAS* - pode ser obtido através da simetria das franjas, na camada fotoelástica colada na estrutura da máquina;
- *APLICAÇÕES EM PESQUISA* - a técnica foi aplicada no estudo de propagação de trincas, deformação na fase plástica, propagação de ondas, concentração de tensões na zona elastoplástica e comportamento de materiais heterogêneos.

Desta forma, a aplicação da fotoelasticidade de reflexão com o uso dos materiais desenvolvidos pode ser feita nos mais diversos tipos de problemas, exceto as que exigem materiais de baixo módulo de elasticidade, que não constituiu a meta deste trabalho.

Outro ponto a ser mencionado é sobre o material de fixação ou colagem da camada fotoelástica, que tem merecido pouca atenção dos pesquisadores da área. O item 4.3 deste trabalho, descreve uma metodologia de colagem e ressalta a importância desta nos resultados obtidos. Entretanto, não foi feito, nenhum estudo sobre o tipo de adesivo ideal e nem sobre a influência destes nos resultados. Pesquisas nesta direção devem ser realizadas, com o objetivo de determinar os vários efeitos eventualmente causados pela camada de adesivo, sendo os mais importantes a fluência, a relaxação e o reforço, além do estudo do melhor tipo e composição da cola a ser utilizada.



## 8. CONCLUSÃO

Este trabalho objetivou o desenvolvimento de um material para fotoelasticidade de reflexão usando matéria prima nacional. Para cumprir este propósito, foram feitos estudos detalhados dos fundamentos teóricos, das propriedades e técnicas de obtenção dos materiais e das condições necessárias para aplicação da técnica em toda sua potencialidade. Com base nestes estudos e nas observações feitas no decorrer das experiências realizadas, as principais conclusões, na opinião do autor, estão relacionadas abaixo.

- 1 - Foram desenvolvidos dois materiais, para utilização em fotoelasticidade de reflexão, CY205/100 - HY951/20 e XGY1109/100 - HY943/30, para análise de tensões/deformações em superfícies planas, curvas e/ou irregulares.
- 2 - Este trabalho coloca ao alcance dos pesquisadores da área todas as informações necessárias para obtenção e aplicação dos materiais na solução de problemas usando fotoelasticidade de reflexão.
- 3 - Os materiais são obtidos à temperatura ambiente e melhoram suas propriedades quando submetidos a um tratamento térmico a 70°C, por 24 horas.

- 4 - Os materiais desenvolvidos são de alta sensibilidade e apresentam características comparáveis aos similares importados.
- 5 - O material XGY1109/100 - HY943/30, pode ser obtido em espessuras de até 5,0mm e o CY205/100 - HY951/20 até 3,0mm, com geração de calor que não compromete as propriedades óticas.
- 6 - O material XGY1109/100 - HY943/30, quando obtido em modelos planos e polidos de espessura entre 4 e 5mm, pode ser usado em fotoelasticidade de transmissão bidimensional.
- 7 - Os materiais podem ser obtidos a um custo entre 4 e 7 vezes menor que os similares importados.

Como sugestões para futuros trabalhos o autor ressalta os seguintes pontos:

1. desenvolvimento de materiais com baixo módulo de elasticidade, para futura aplicação em fitomecânica, borracha, etc...
2. estudo da influência do adesivo nos resultados obtidos, relativos a fluência, relaxação e reforço, entre outros.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - ZANDMAN, F., WOOD, M.R., "Photostress, a New Technique for Photoelastic Stress Analysis for Observing and Measuring Surface Strains on Actual Structures and Parts", *Product Engineering*, Sept. 1956, pp. 167-178.
- 2 - D'AGOSTINHO, J., DRUCKER, D.C., LIU, C.K., MYLONAS, C., "An Analysis of Plastic Behavior of Metals with Bonded Birefringent Plastic", *Proc. SESA*, 12(2):115-122, 1955.
- 3 - Photolastic INC, How to Select Photoelastic Coating, *Technical Data Bulletin (T402)*, Malvern, 1978.
- 4 - Photolastic INC, Instruction for Molding and Contouring Photoelastic Sheets, *Bulletin (IB-P-310)*, Malvern, 1962.
- 5 - Photolastic INC, Instruction for Bonding Flat and Contoured Photoelastic Sheets to Test Part Surfaces, *Bulletin (IB-P-320)*, Malvern, 1962.
- 6 - ZANDMAN, F., REDNER, S. RIEGNER, E.I., "Reinforcing Effect of Birefringent Coatings", *Proc. SESA*, 19(1):55-64, 1962.
- 7 - POST, D., ZANDMAN, F., "Accuracy of Birefringent Coating Method For Coatings of Arbitrary Thickness", *Proc. SESA*, 18(1):21-32, 1961.
- 8 - ZANDMAN, F., REDNER, S., DALLY, J.W., Photoelastic Coating, *SESA, Monograph 3*, Iowa State University Press, 1977.
- 9 - O'REGAN, R., "New Method for Determining Strain on the

Surface of a Body with Photoelastic Coatings", Proc. SESA, 22(2):241-246, 1965.

- 10 - HUNG, Y.Y., POTTINGER, M.G., "An Improved Oblique-incidence Technique for Principal-strain Separation in Photoelastic Coatings", Exp. Mech., May 1980, pp.170-173.
- 11 - KOMOROWSKI, J., STUPNICKI, J., "Strain Measurement with Asymmetric Oblique-incidence Polariscope for Birefringent Coatings", Exp. Mech., June 1983, pp. 171-176.
- 12 - DURELLI, A.J., RAJAIAH, K., "Determination of Strains in Photoelastic Coatings", Exp. Mech. Feb. 1980, pp. 57-64.
- 13 - REDNER, A.S., "Photoelastic Coatings", Exp. Mech., November 1980, pp. 403-408.
- 14 - REDNER, A.S., "Separation of Principal Strains in Photoelastic Coatings by the Slitting Method", Exp. Tech., May 1987, pp. 29-32.
- 15 - ZANDMAN, F., MAIER, H.N., "Six New Techniques for Photoelastic Coatings", Product Engineering, June 1961, pp. 42-45.
- 16 - BLUM, A.E., "The Use and Understanding of Photoelastic Coatings", 'Strain', July 1977, pp. 96-101.
- 17 - KOSHIDE, S., "Strain Analysis Along the Curved Boundary of Composites by the Birefringent Coating Method", Exp. Mech., Nov. 1986, pp. 20-23.
- 18 - OLIVEIRA, S.A.G., GOMIDE, H.A., "Fotoelasticidade de Reflexão - Uma Técnica Experimental no Ensino de Engenharia", Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, V.2 , Florianópolis, 1987.

- 19 - DALLY, J.W., RILEY, W.F., Experimental Stress Analysis, 2ª Ed. McGraw-Hill, New York, 1978.
- 20 - CHASTAIN, C.E., Basic Materials for Epoxi Formulation, Encyclopedia of Basic Materials for Plastics, Reinhold Publishing Corp., New York, 1968.
- 21 - GOMIDE, H.A., CERNOSEK, J. "Desenvolvimento de um Material para Fotoelasticidade Tridimensional", III Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, paper A1, pp. 27-45, 1975.

17157

## 10. APÊNDICE

### 10.1. Apêndice A

TAB. A1 - Tabela dos valores comparativos das propriedades dos materiais antes e após a cura final.

MATERIAIS	K (N/mm <sup>2</sup> )			E (MPa)		
	A	D	%	A	D	%
CY205/100-HY951/20	14,1	12,2	13,5	3924	3689	6,0
CY205/100-HY951/30	16,5	14,2	13,9	3129	2766	11,6
CY205/100-HY956/30	17,9	13,5	24,6	3414	2825	17,3
CY205/100-HY956/40	18,4	15,9	13,6	3218	2708	15,8
XGY1109/100-HY956/20	15,6	13,1	16,0	3689	3335	9,6
XGY1109/100-HY956/30	15,4	14,1	8,4	3139	2904	7,5
XGY1109/100-HY943/20	15,5	12,7	18,1	4120	3443	16,4
XGY1109/100-HY943/30	14,4	13,5	6,3	4100	3708	9,6

OBS.: A - antes do tratamento térmico

D - depois do tratamento térmico  
a 70°C, durante 24 horas.

### 10.2. Apêndice B

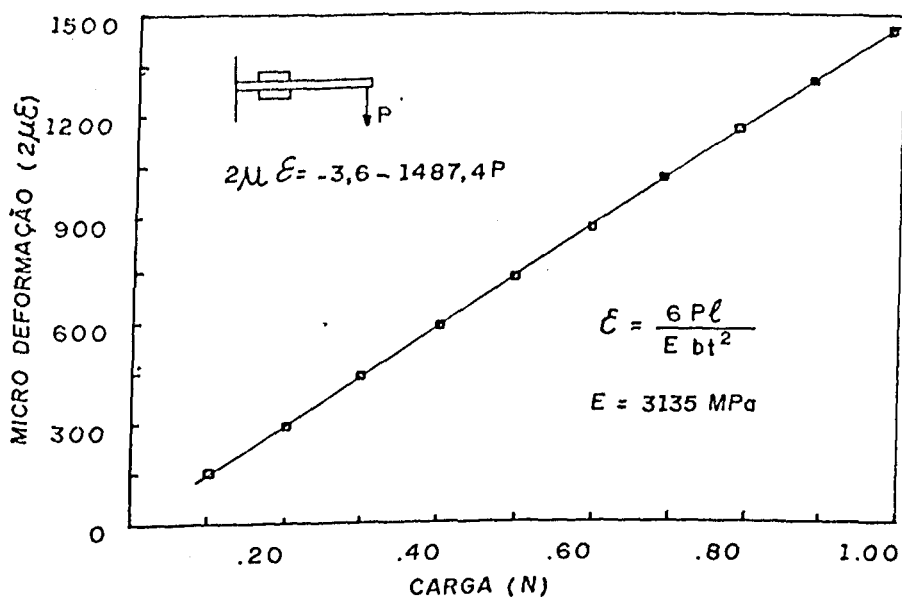


Fig. B1 - Gráfico carga x deformação do CY205/100 - HY951/20 para determinação do módulo de elasticidade.  $\ell=120\text{mm}$ ;  $b=20,3\text{mm}$ ;  $t=3,9\text{mm}$ .

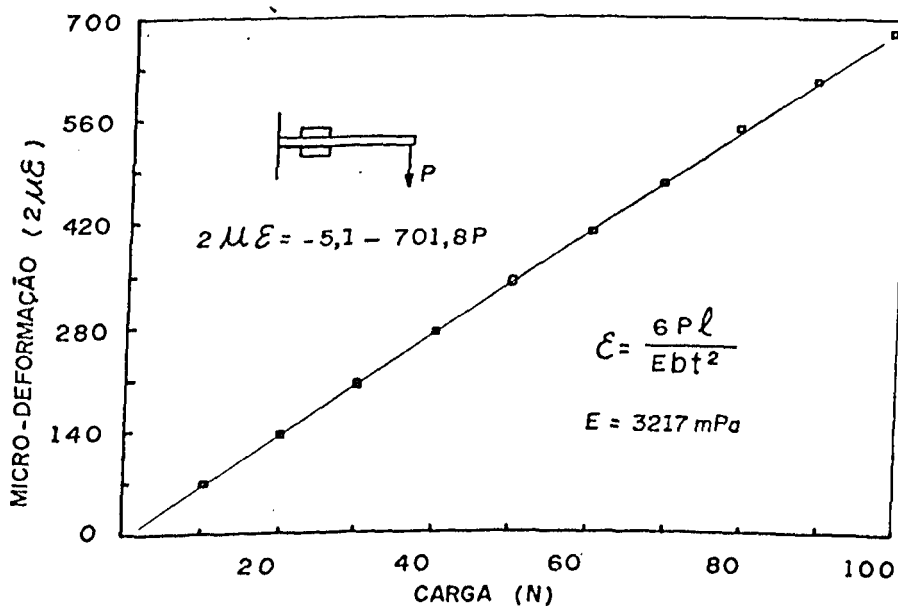


Fig. B2 - Gráfico carga x deformação do XGY1109/100 - HY943/30 para determinação do módulo de elasticidade.  $\ell=95\text{mm}$ ;  $b=20,2\text{mm}$ ;  $t=5\text{mm}$ .

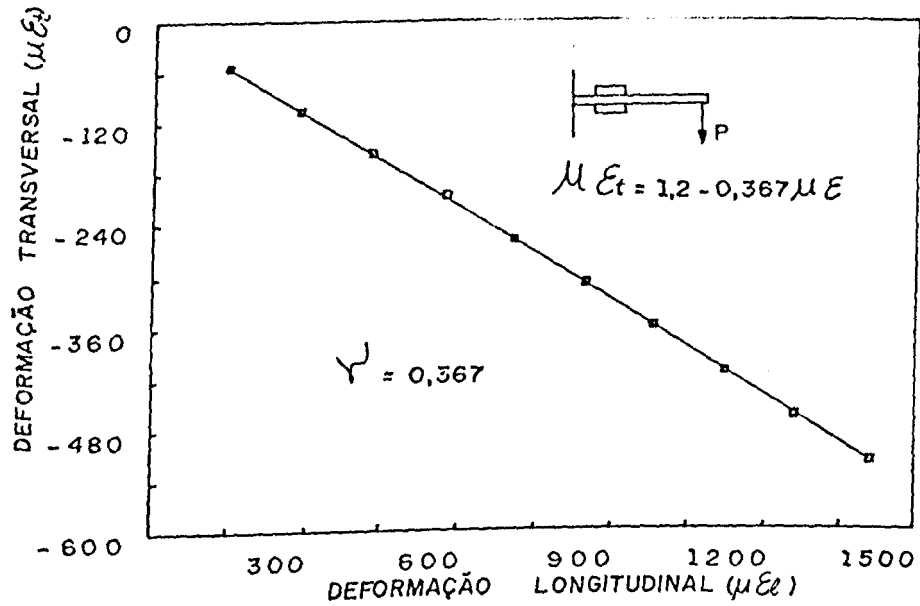


Fig. B3 - Gráfico da deformação transversal x deformação longitudinal do CY205/100 - HY951/20, para determinação da razão de Poisson.

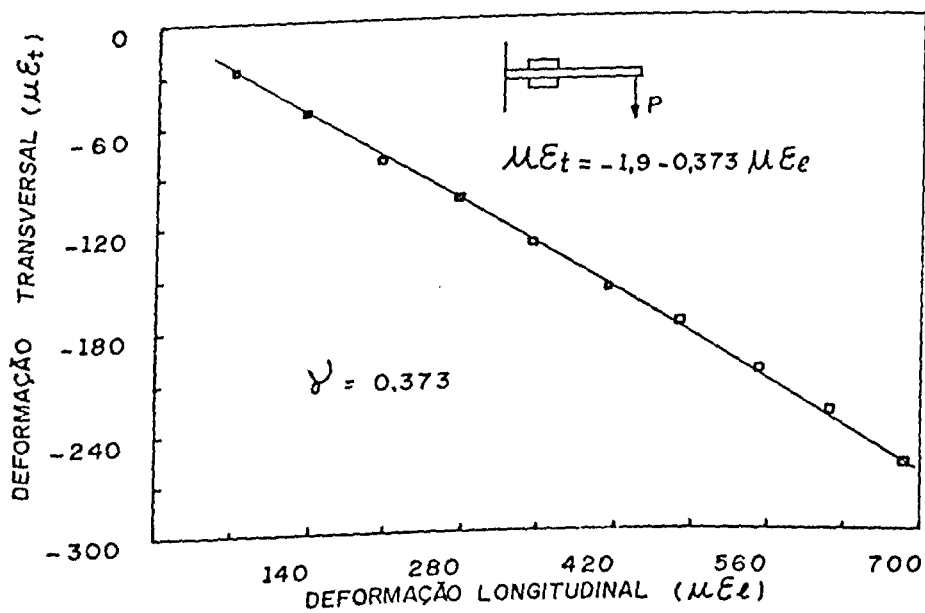


Fig. B4 - Gráfico da deformação transversal x deformação longitudinal do XGY1109/100 - HY943/30, para determinação da razão de Poisson.



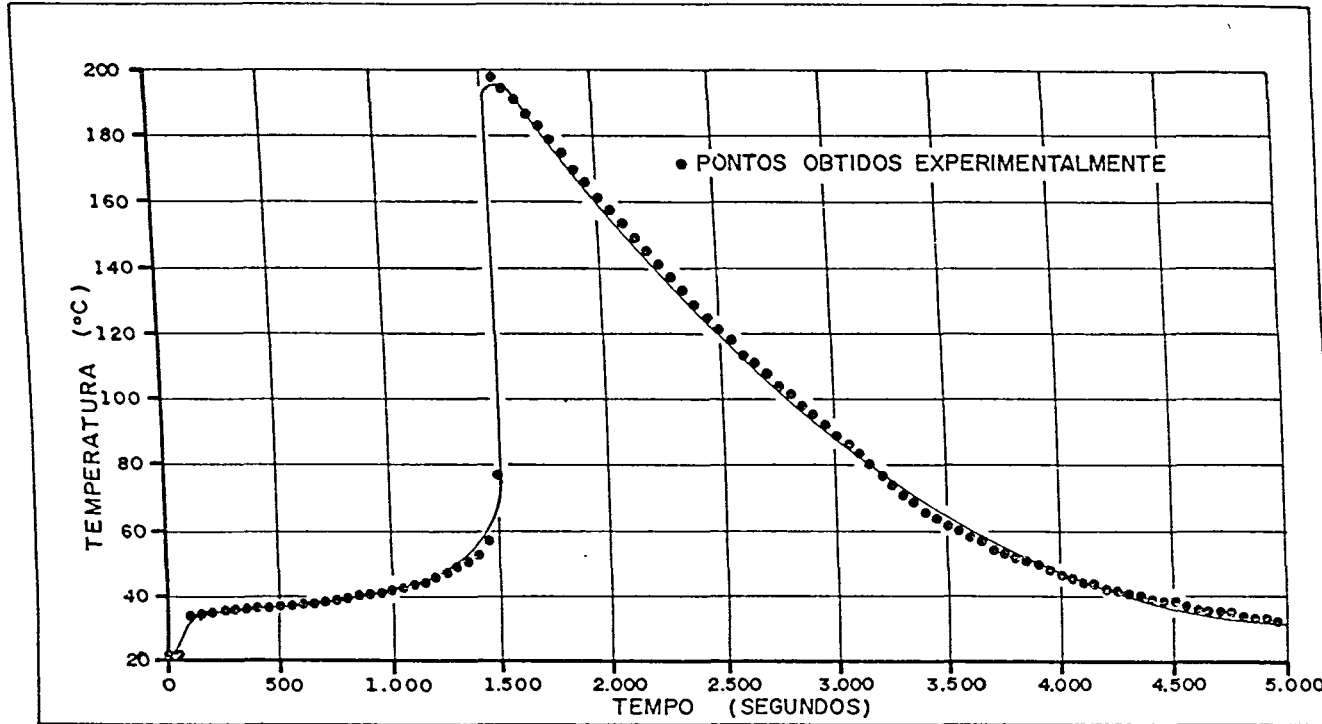


Fig. B5 - Variação da temperatura com o tempo para uma placa de CY205/100 - HY951/20, com espessura de 30mm e diâmetro de 70mm.

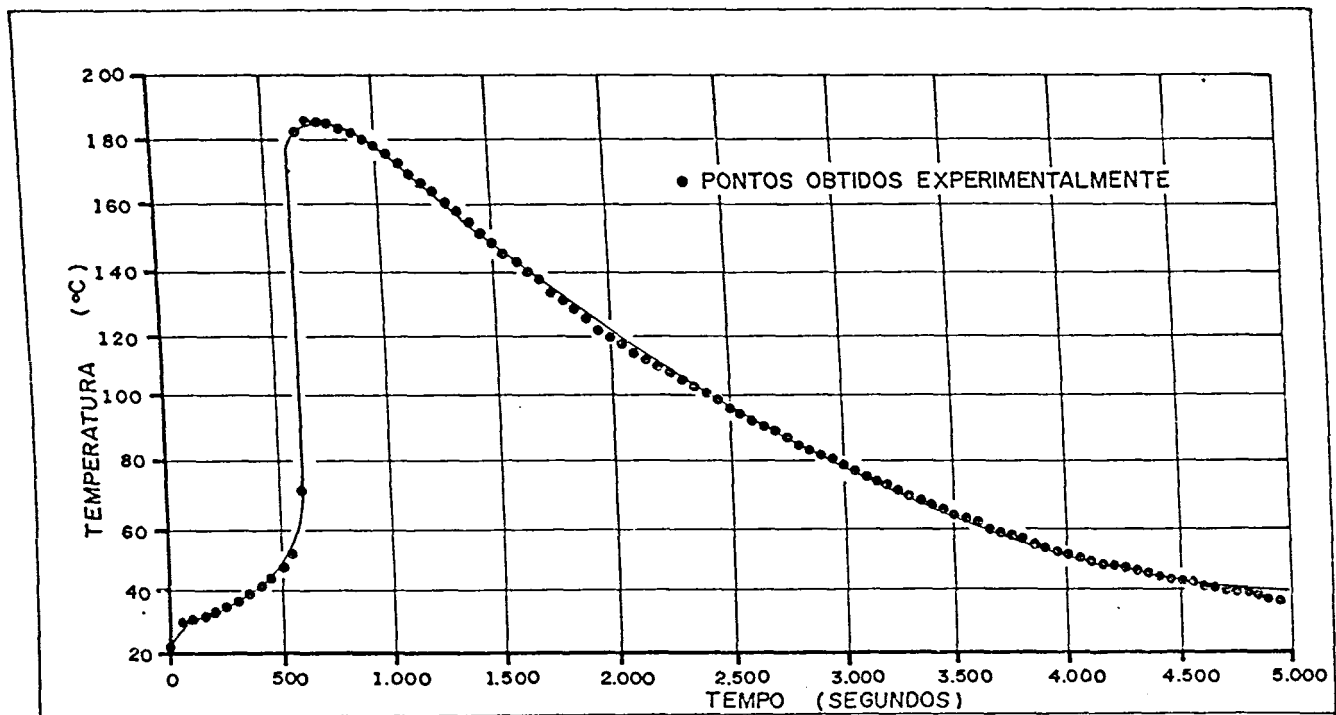


Fig. B6 - Variação da temperatura com o tempo para uma placa de XGY1109/100 - HY943/30, com espessura de 30mm.e diâmetro de 70mm.

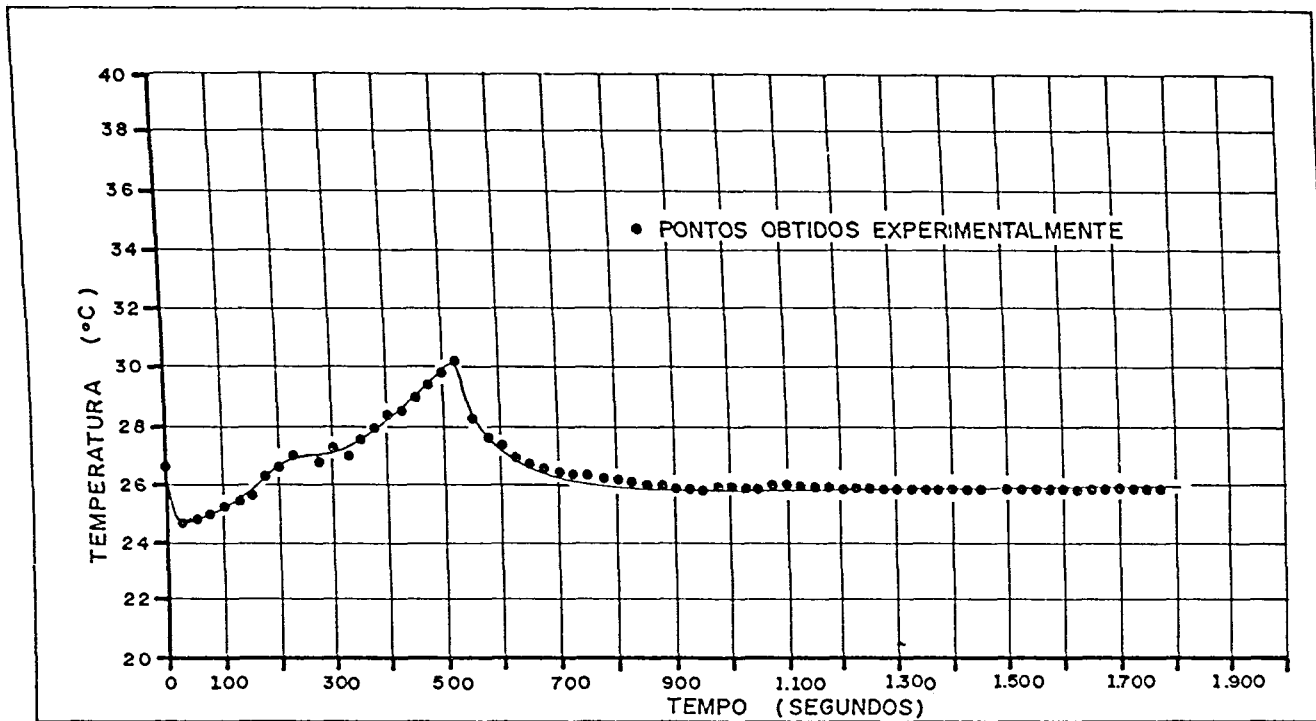


Fig. B7 - Variação da temperatura com o tempo para uma placa de CY205/100 - HY951/20, com espessura de 2mm.e diâmetro de 70mm.

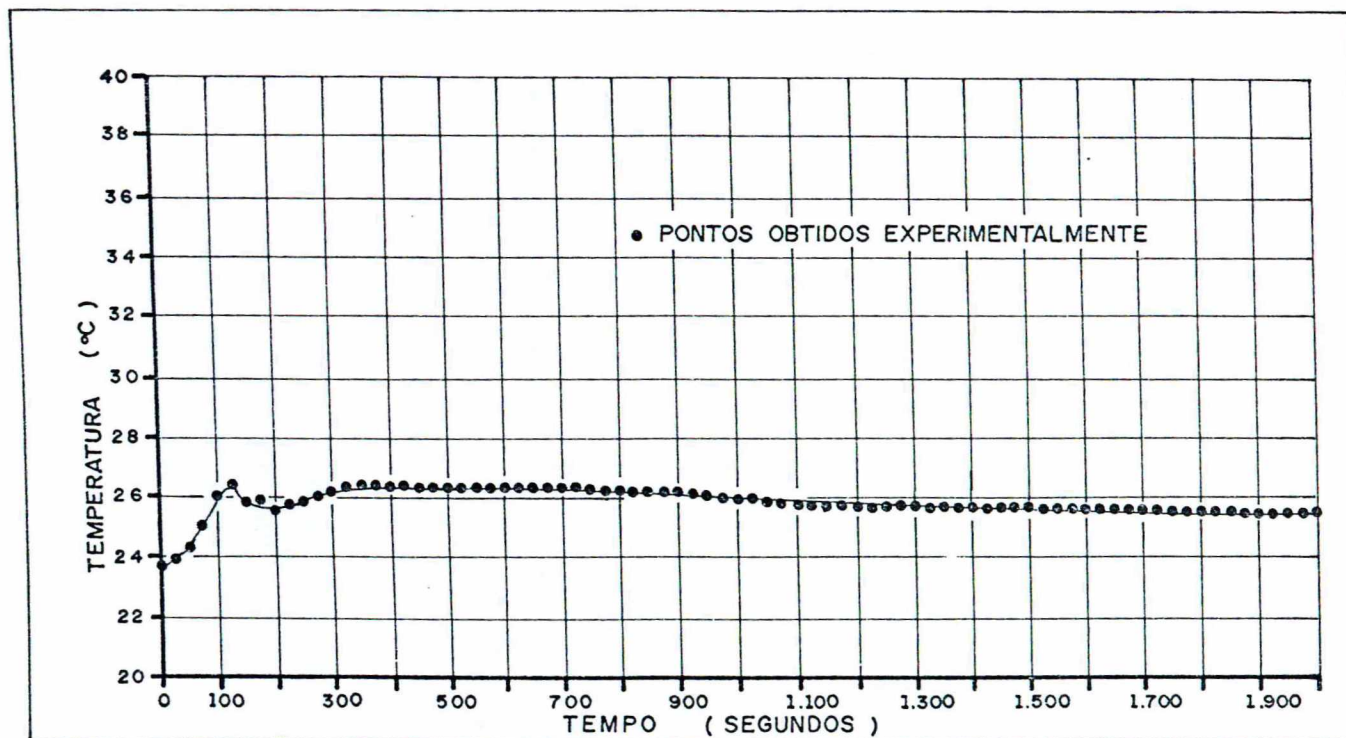


Fig. B8 - Variação da temperatura com o tempo para uma placa de XGY1109/100 - HY943/30, com espessura de 2mm.e diâmetro de 70mm.

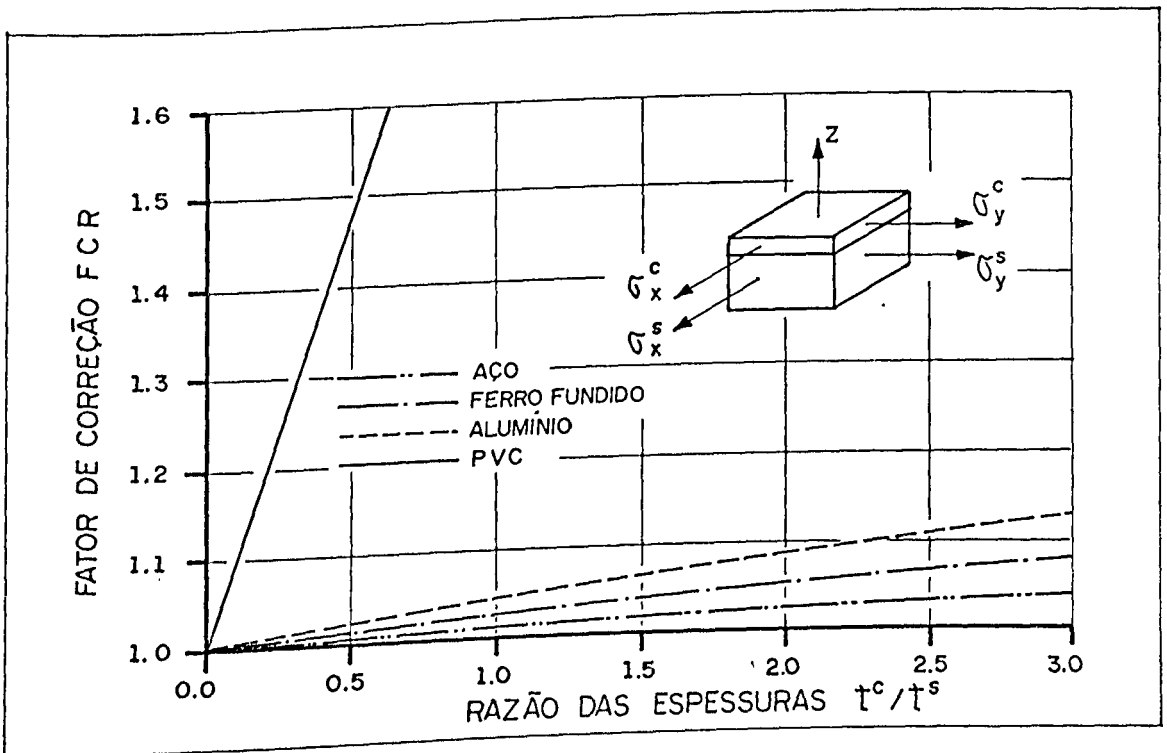


Fig. B9 - Fator de correção  $F_{CR}$  para camada de XGY1109/100 - HY943/30 e espécimen em aço, ferro fundido, alumínio e PVC.

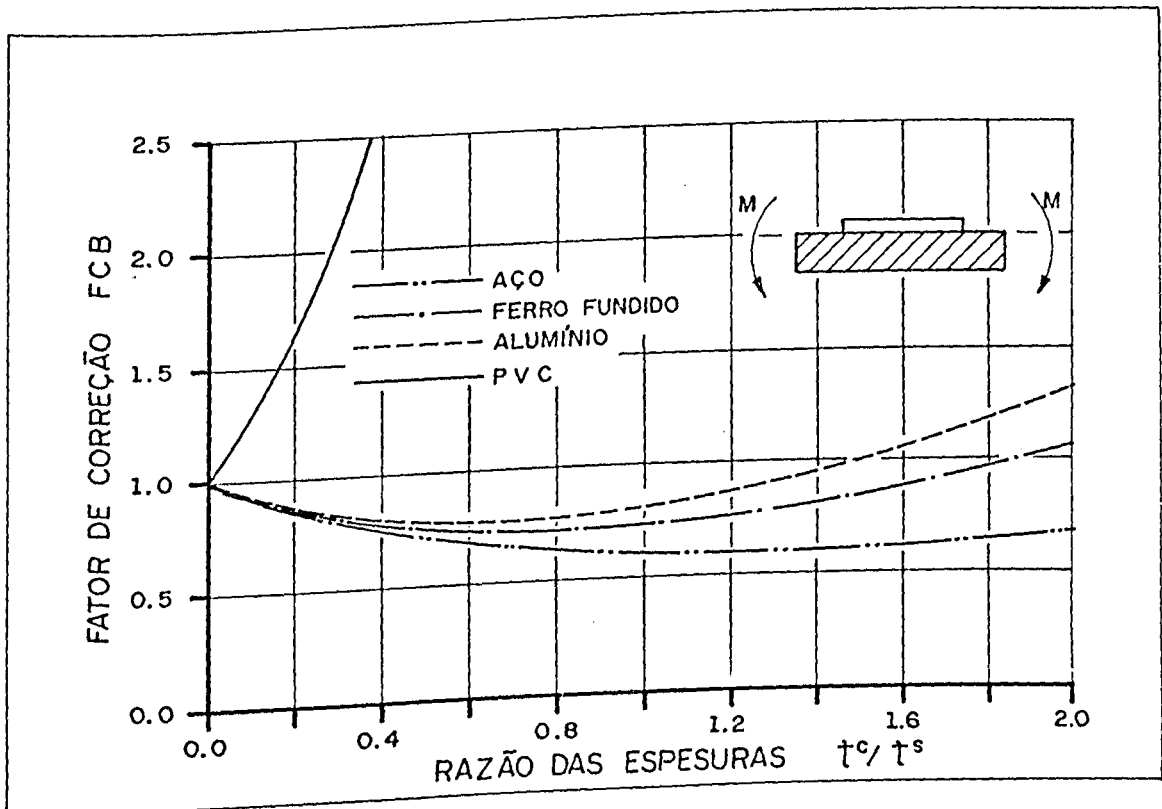


Fig. B10 - Fator de correção  $F_{CB}$  para o aço, ferro fundido, alumínio e PVC, com reforço de CY205/100 - HY951/20.

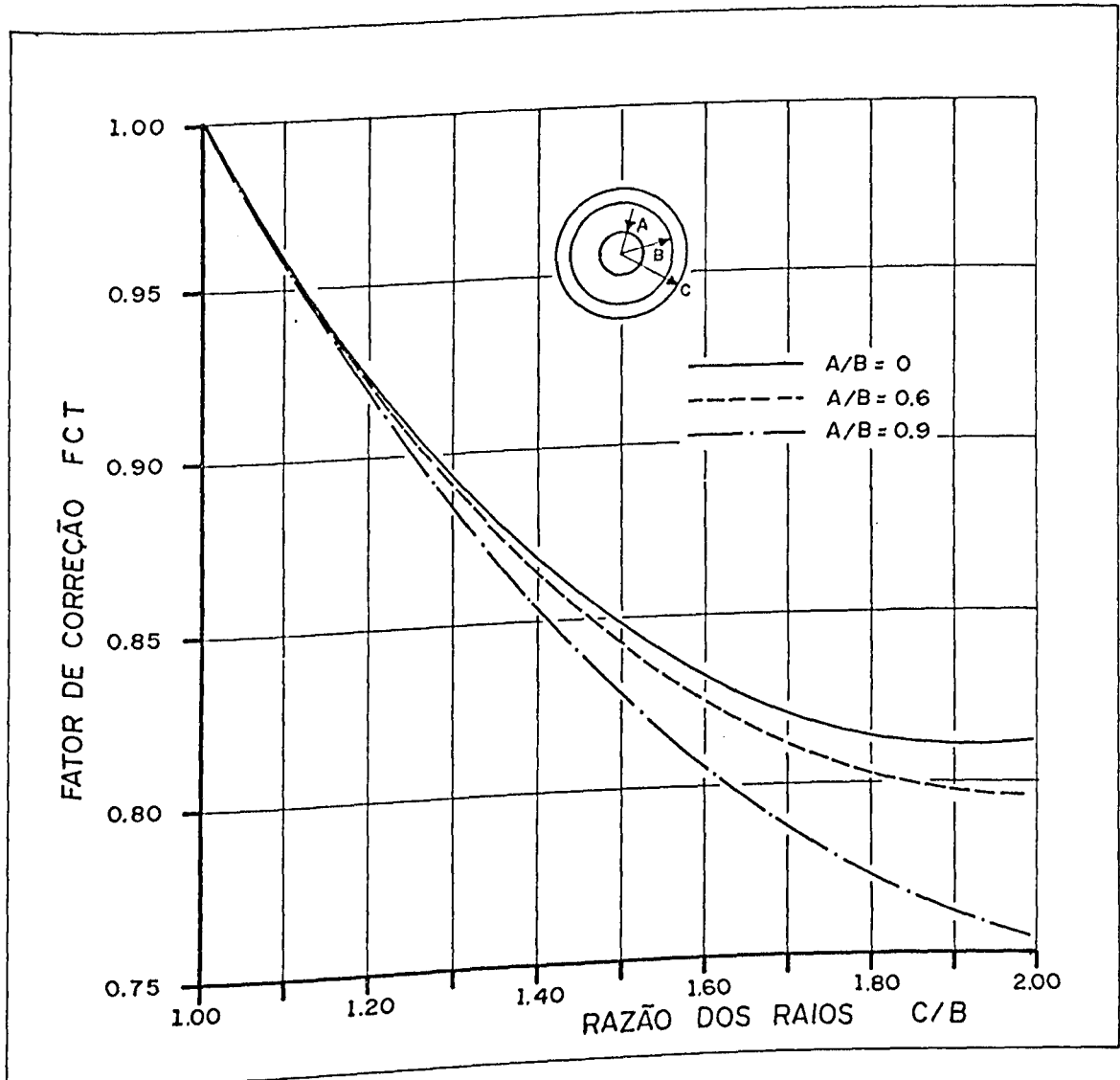


Fig. B11 - Gráfico de reforço para eixos circulares de aço carbono, submetido a torção, com reforço de XGY1109/100 - HY943/30.

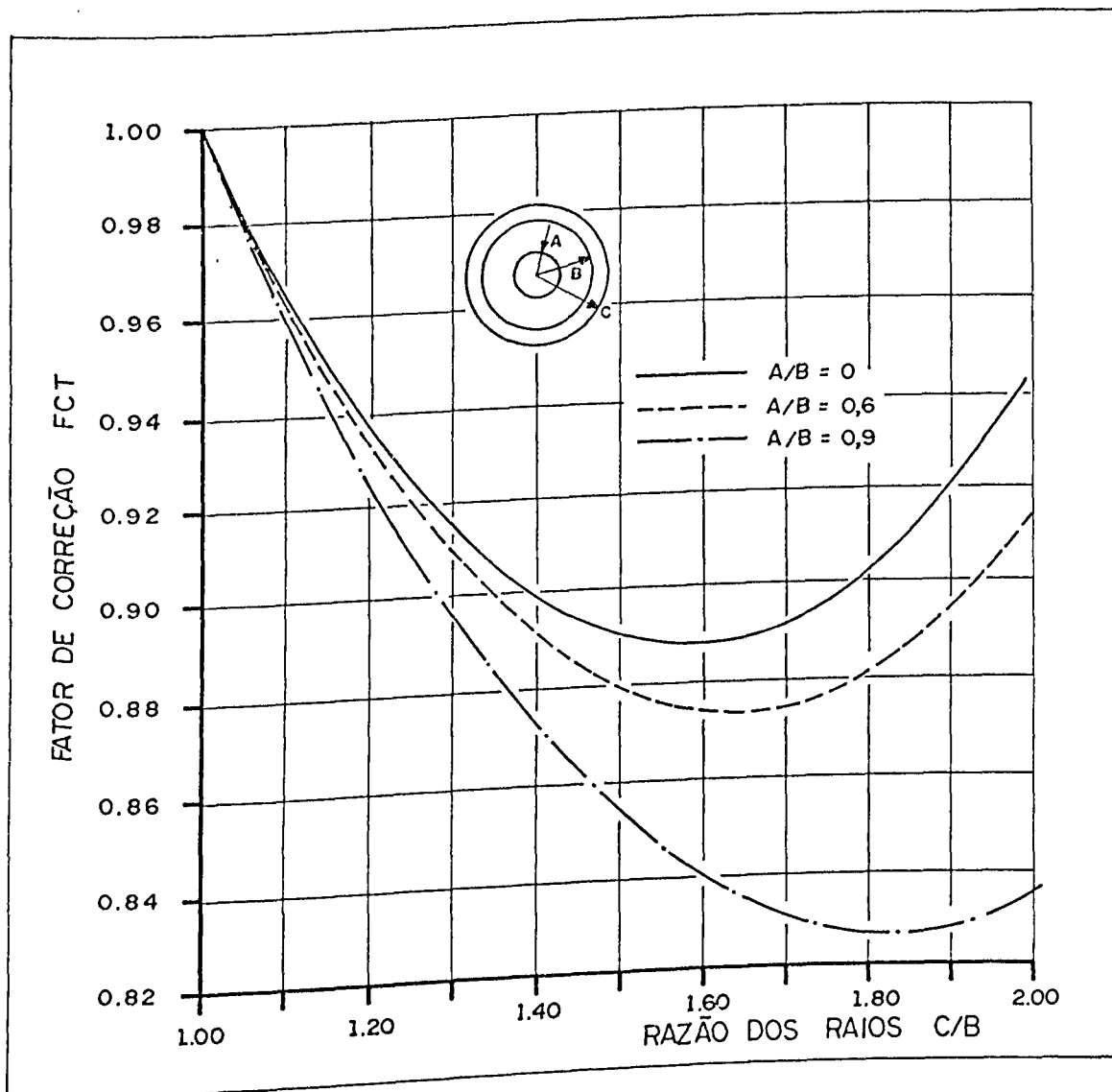


Fig. B12 - Gráfico de reforço para eixos circulares de ferro fundido, submetido à torção, reforço de CY205/100-HY951/20.



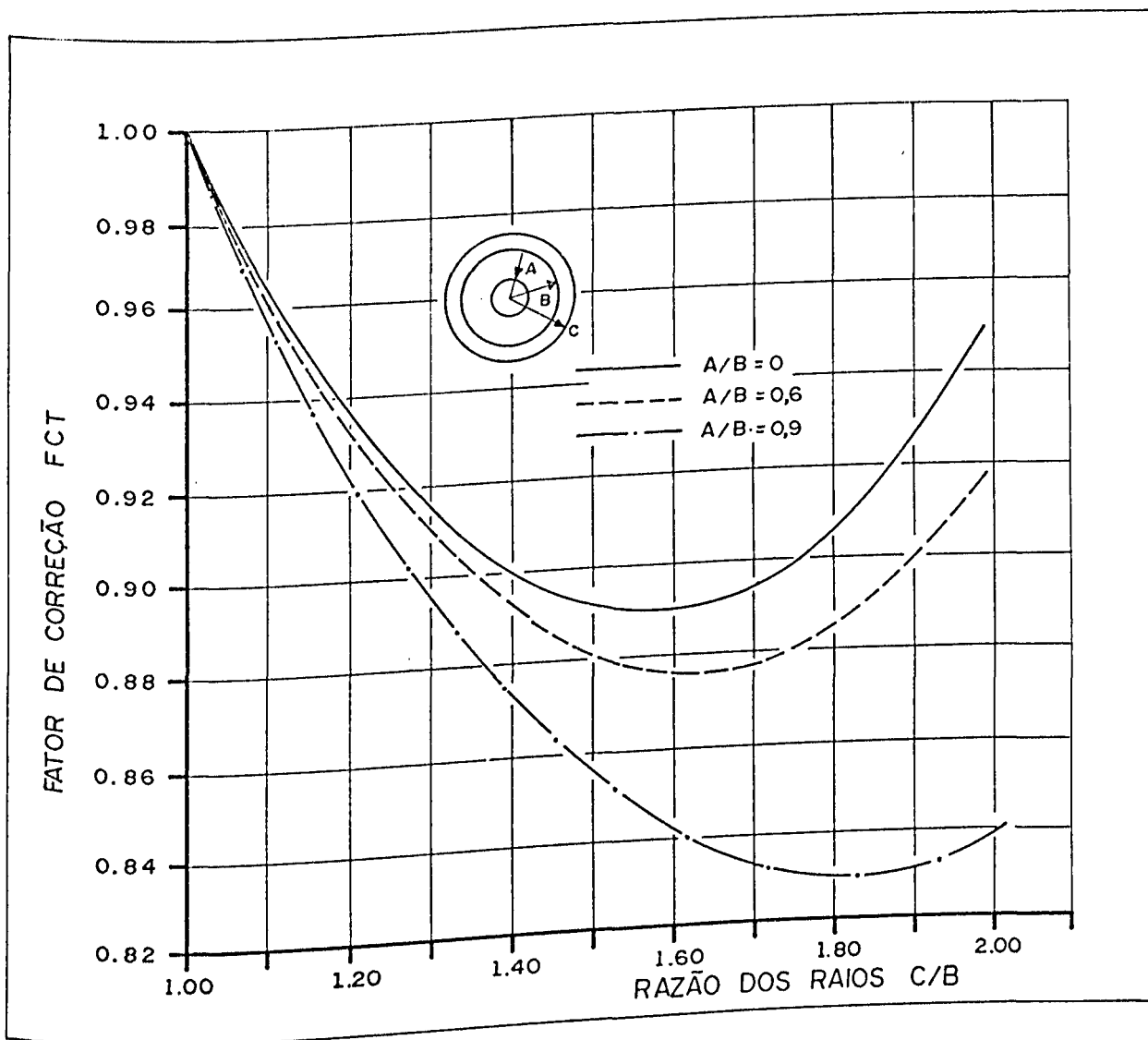


Fig. B13 - Gráfico de reforço para eixos circulares de ferro fundido, submetido à torção, com reforço de XGY1109/100 - HY943/30.

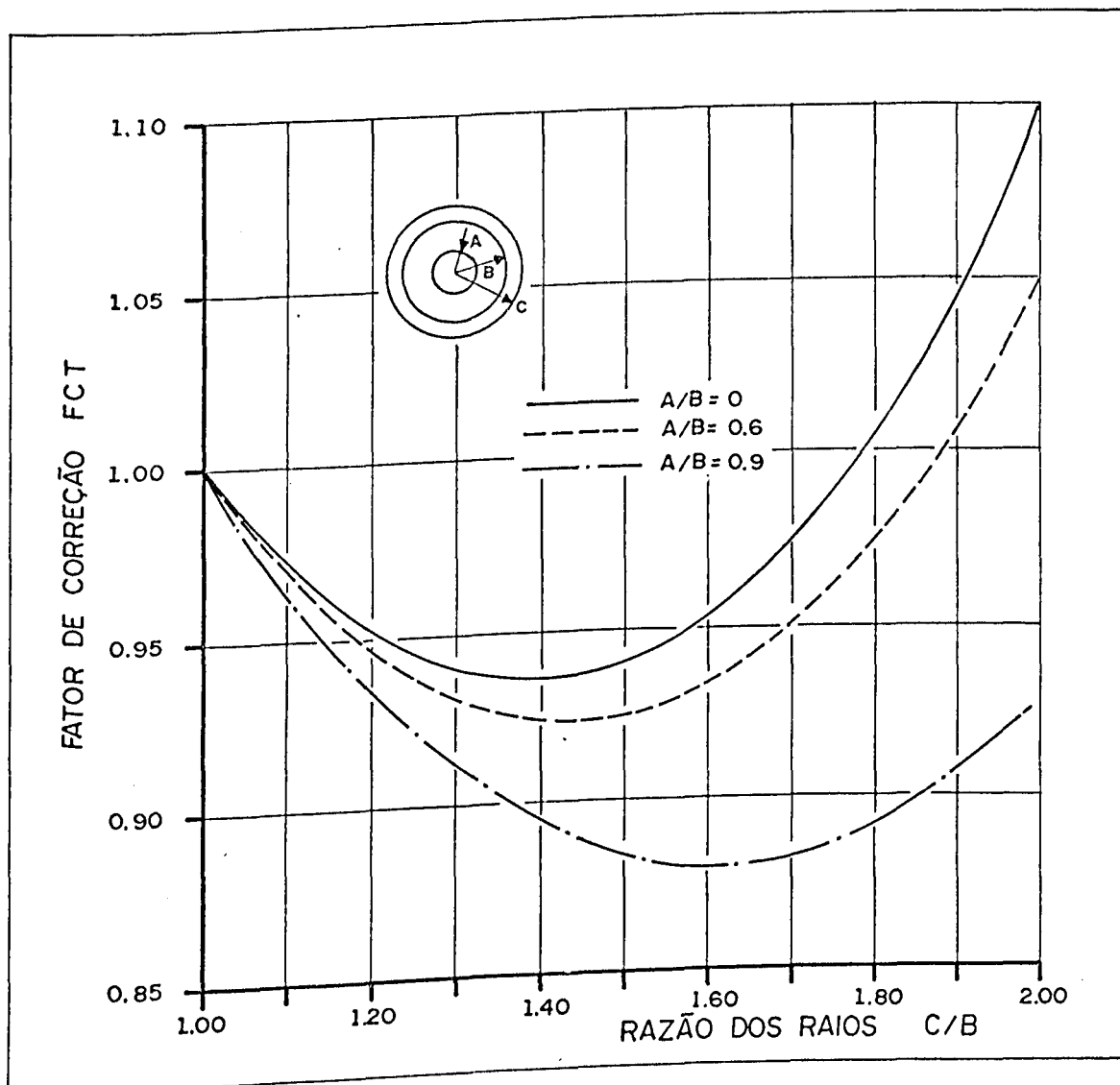


Fig. B14 - Gráfico de reforço para eixos circulares de Alumínio, submetido à torção, com reforço de CY205/100 - HY951/20.

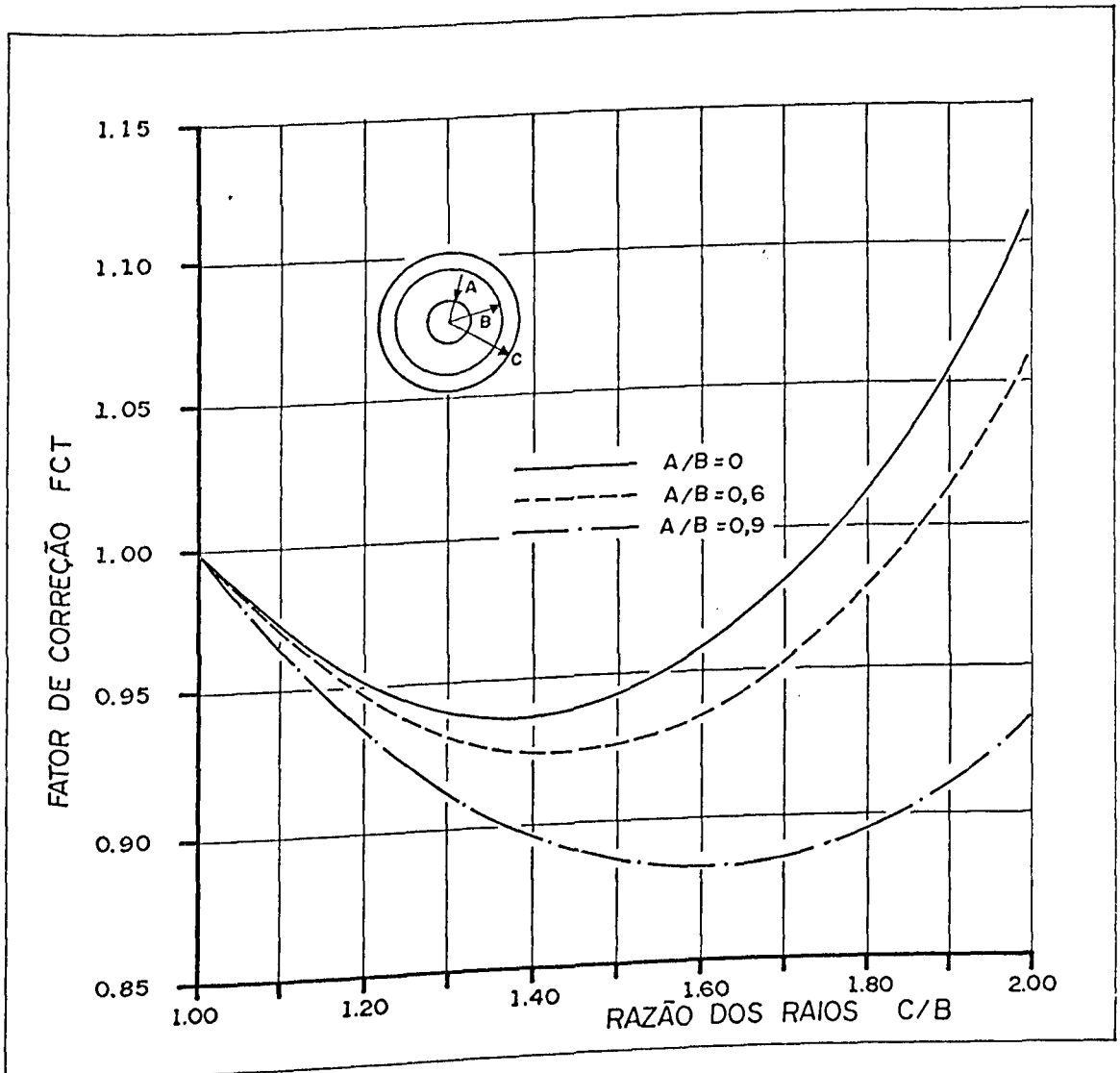


Fig. B15 - Gráfico de reforço para eixos circulares de alumínio, submetido à torção, com reforço de XGY1109/100 - HY943/30.

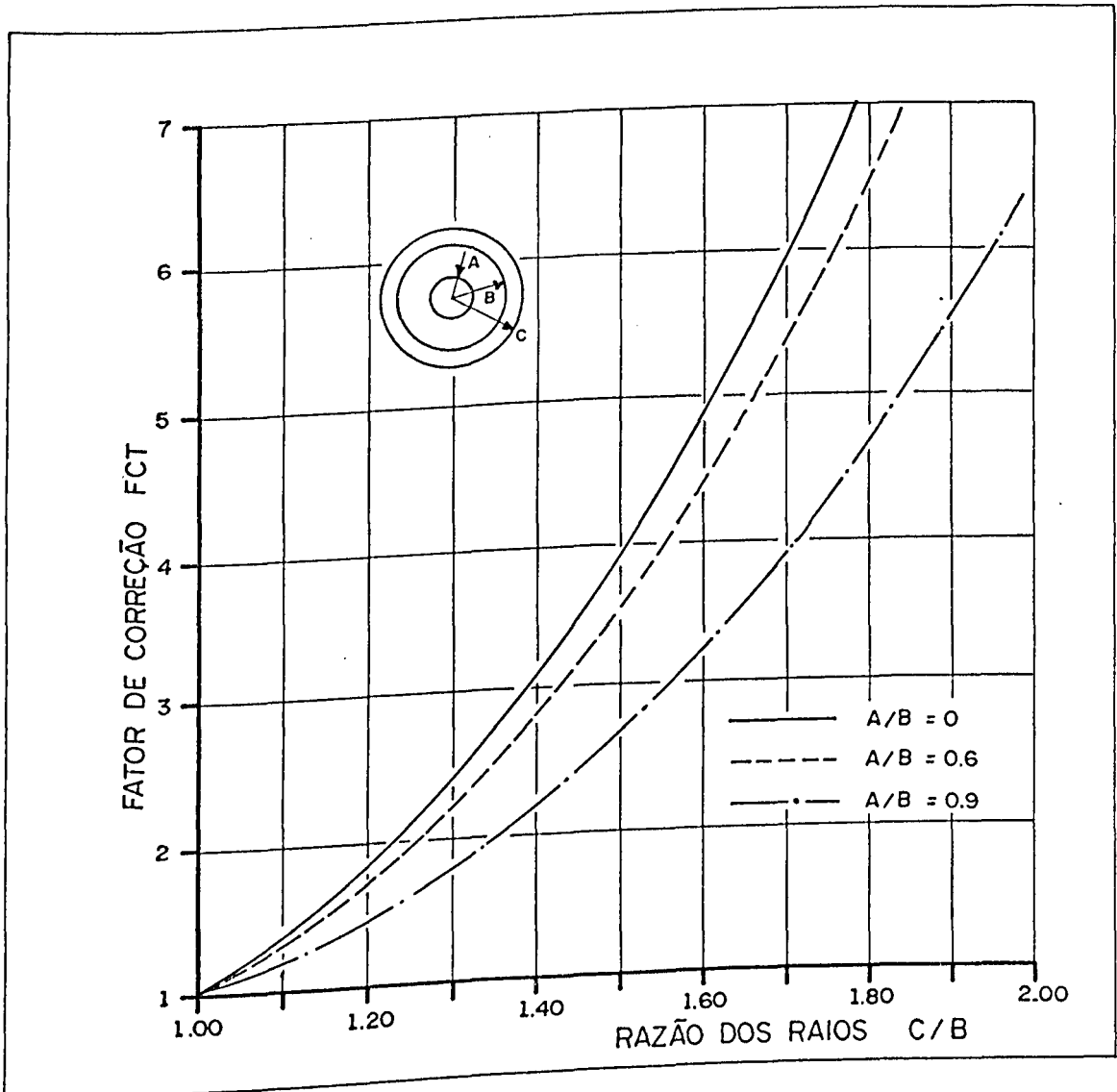


Fig. B16 - Gráfico de reforço para eixos circulares de PVC, submetido à torção, com reforço de CY205/100 - HY951/20.

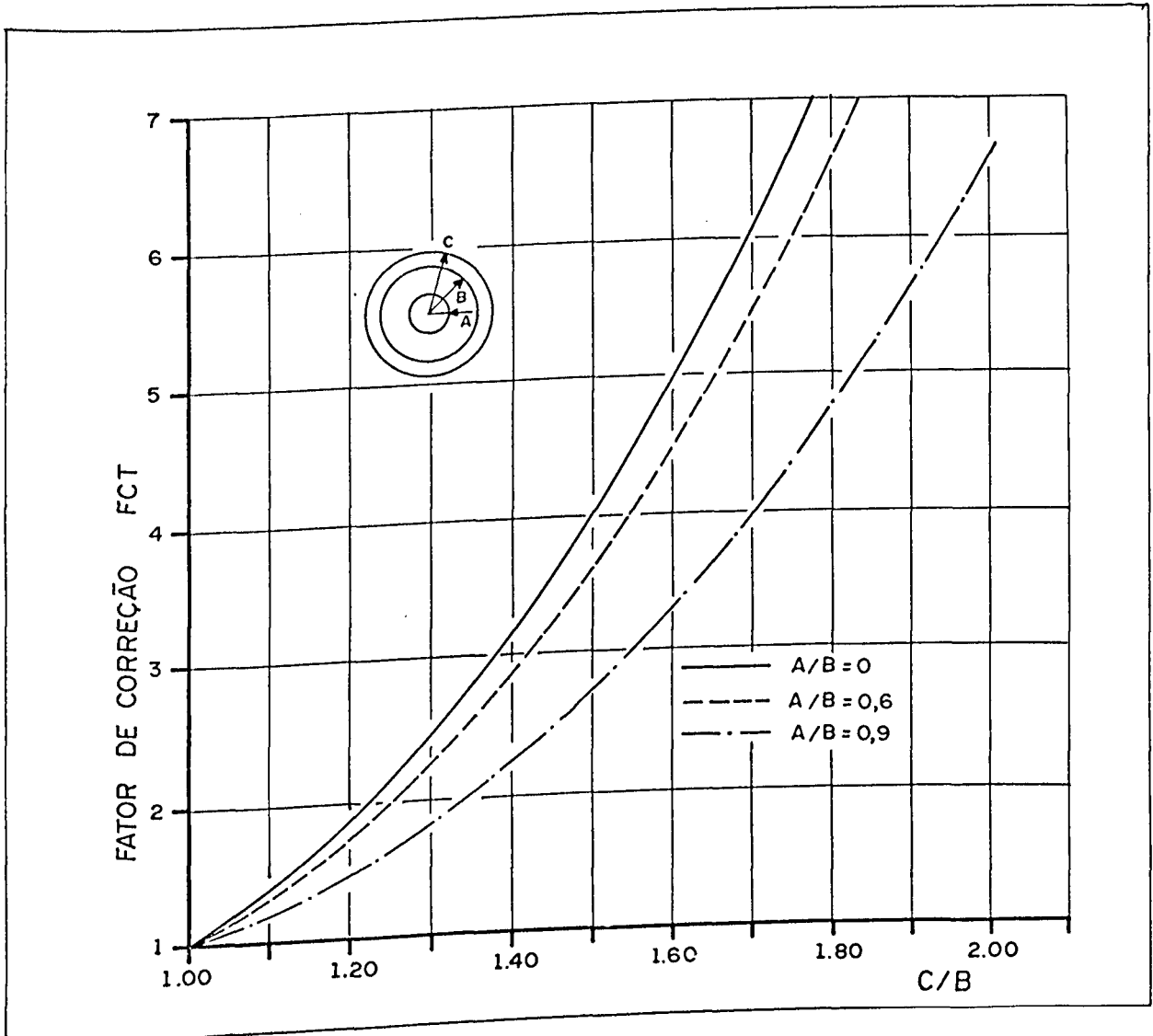


Fig. B17 - Gráfico de reforço para eixos circulares de PVC, submetido à torção com reforço de XGY1109/100 - HY943/30.