

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METROLOGIA CIENTÍFICA E INDUSTRIAL

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE FIBRA ÓPTICA EMBUTIDO PARA
A MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO LENTA À TRAÇÃO EM ARGAMASSA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM METROLOGIA

Luciana Marcondes dos Santos

FLORIANÓPOLIS
SANTA CATARINA - BRASIL
FEVEREIRO DE 1999

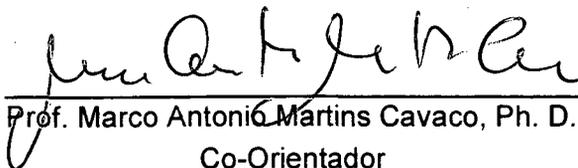
**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE FIBRA ÓPTICA EMBUTIDO PARA A
MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO LENTA À TRAÇÃO EM ARGAMASSA**

LUCIANA MARCONDES DOS SANTOS

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de
“MESTRE EM METROLOGIA”
e aprovada em sua forma final pelo
Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial.



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Orientador



Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.
Co-Orientador



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Banca Examinadora:



Prof. Edison da Rosa, Dr. Eng.



Prof. Frank Hrebabetzky, Dr. Rer. Nat.



Prof. Humberto Ramos Roman, Ph. D. - Co-Orientador

"Um poder superior me impele para um ponto que desconheço. Enquanto não o tiver alcançado, serei invulnerável, irremovível. Quando eu já não seja necessário, basta um só para derribar-me." Napoleão

*Dedico este trabalho aos meus pais, Enio e Elsa, irmãos,
Virgínia, Leonardo, Valéria e Lucas e ao Adalberto.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida dos meus pais.

Aos pais, pela minha vida, por acreditarem em mim e por todas as renúncias em meu favor.

À vida, pelas oportunidades. E a todos que me ensinaram algo para que eu pudesse crescer e estar preparada diante das oportunidades.

Aos meus irmãos, pelo apoio.

Aos amigos, por não esquecerem de mim nos tempos em que estive afastada.

À CAPES, pelo auxílio financeiro, oportunidade essencial à realização do Mestrado.

À UFSC, pela disponibilização de toda sua sede e recursos, em especial os laboratórios de Metrologia e Automatização, da Engenharia Mecânica, e de Materiais de Construção, da Engenharia Civil.

À Fundação CERTI, pela presença marcante, pelos cursos propiciados, pelo tempo de trabalho e convivência.

A todos os funcionários da Fundação CERTI, pelo empenho para que tudo corresse bem. Em especial aos amigos da oficina, Danilo, Detlef e Dionísio, sempre dispostos a ajudar.

Em especial, à Rosana, pela presença, disposição, bom humor e eficiência, ao fazer tudo acontecer. Também ao Daniel, pela grande colaboração, na confecção das figuras e fotos da dissertação e pelos slides de minha apresentação.

Ao senhor Heitor, pela participação, fundamental, na confecção das fôrmas de madeira, com as quais quase totalidade dos corpos de prova ensaiados foram moldados.

Às empresas que participaram deste trabalho, através da doação de material, indispensável para o bom andamento do mesmo: XTAL - Fibras Ópticas; EXCEL - Engenharia de Sensores; Companhia de Cimento ITAMBÉ; IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, CASAN.

Aos professores, pelas lições. Aos Mestres, pelos ensinamentos e por compartilharem conosco suas experiências.

Aos colegas, pelo companheirismo, pelas demonstrações de amizade e pelos momentos juntos.

Aos co-orientadores, Humberto e Marco Antonio, pela participação decisiva em todos os momentos importantes.

Ao meu orientador, professor Armando, por ser meu orientador, por realmente ser um orientador, por acreditar em mim, por compartilhar suas experiências, por sua postura calma e positiva perante todas as situações, principalmente nas dificuldades, por sua disposição e incansável boa vontade em todos os momentos, pelos conselhos, pela força.

Ao meu namorado, Adalberto, por acreditar em mim, pela presença em todos os momentos, por despertar em mim dons que eu desconhecia, pelas lições, pela dedicação, pela participação em todos os momentos do trabalho e de minha vida de mestranda, por vibrar mais do que eu em minhas conquistas, enfim, por ser meu porto seguro.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	iv
AGRADECIMENTOS	v
SUMÁRIO	vi
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xv
RESUMO	xviii
ABSTRACT.....	xix

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Localização no Contexto Científico	1
1.2 Justificativas	1
1.3 Objetivos	2
1.4 Metodologia.....	3
1.5 Limites do Trabalho	3
1.6 Estruturação do Trabalho.....	4

Capítulo 2 - A Argamassa

2.1 Composição	5
2.1.1 Cimento.....	6
2.1.2 Cal.....	6
2.1.3 Areia.....	
2.2 Traços.....	7
2.3 Classificação.....	7
2.4 Propriedades Físicas das Argamassas.....	8
2.5 Deformação das Argamassas.....	9
2.6 Fluência e Retração	9
2.6.1 Fluência.....	9
2.6.2 Retração.....	10

2.6.3	<i>Mecanismo da Fluência e Retração</i>	11
2.6.4	<i>Recuperação da Fluência e Retração</i>	13
2.6.5	<i>Fatores que Contribuem para a Fluência de Argamassas</i>	14
2.6.6	<i>Determinação da Fluência</i>	14
2.6.7	<i>Efeitos da Fluência sobre os Revestimentos</i>	15

Capítulo 3 - Sensores de Fibra Óptica

3.1	<i>Fibras Ópticas - Materiais e Propriedades</i>	16
3.1.1	<i>Fibras Ópticas - Generalidades</i>	16
3.1.2	<i>Princípio de Operação</i>	18
3.2	<i>Sensores de Fibra Óptica</i>	19
3.2.1	<i>Conceituação</i>	19
3.2.2	<i>Classificação</i>	20
3.2.3	<i>Sensores Clássicos</i>	23
3.2.4	<i>Aspectos Positivos e Limitações dos Sensores de Fibra Óptica</i>	27

Capítulo 4 - Medição de Deformação em Argamassa

4.1	<i>Caracterização das Deformações</i>	29
4.1.1	<i>Instrumentação e Técnicas de Medição de Deformação</i>	30
4.2	<i>Requisitos Necessários para Medição de Deformação Lenta (Fluência)</i>	31
4.2.1	<i>Escolha dos Sensores de Fibra Óptica</i>	32
4.3	<i>Caracterização e Princípio de Operação do Sensor Proposto</i>	32
4.3.1	<i>Sensor de Fibra Óptica Mach-Zehnder</i>	32
4.3.2	<i>Modelo Matemático da Deformação Medida com Sensor de Fibra Óptica</i>	33
4.4	<i>Preparação dos Corpos de Prova</i>	36
4.4.1	<i>Forma e Dimensões</i>	36
4.4.2	<i>Materiais Utilizados na Composição das Argamassas</i>	37
4.4.3	<i>Produção dos Corpos de Prova de Argamassa</i>	38
4.5	<i>instalação do Sensor</i>	38

4.5.1	<i>Aderência Argamassa/Fibra</i>	38
4.5.2	<i>Posição da Bobina de Fibra Óptica nos Corpos de Prova</i>	39
4.5.3	Comprimento Equivalente.....	40
4.6	<i>Bancada Experimental</i>	41
4.6.1	<i>Sistema de Tração</i>	44
4.7	<i>Procedimento Experimental</i>	45
4.7.1	<i>Ensaio de Estabilidade</i>	46
4.7.2	<i>Ensaio Típico de Medição de Deformação Elástica com Sensor de Fibra Óptica</i>	46
4.7.3	<i>Ensaio Típico de Medição de Deformação Lenta com Sensor de Fibra Óptica</i>	47

Capítulo 5 - Calibração e Avaliação Metrológica do Sistema de Medição

5.1	<i>Calibração do Comprimento Equivalente da Fibra Óptica</i>	48
5.1.1	<i>Procedimento Experimental para Determinação do Comprimento Equivalente</i>	48
5.2	<i>Fontes de Incerteza</i>	51
5.2.1	<i>Expressão para Estimativa da Incerteza do Comprimento Equivalente</i>	52
5.2.1.1	Fontes de Incerteza na Calibração do Comprimento Equivalente.....	53
I.	Lasers.....	53
II.	Monitoração das Franjas.....	55
III.	Fibra Óptica.....	60
IV.	Medição de Deformação com Extensômetros e Ponte Amplificadora.....	61
5.2.1.2	Balanço de Incertezas.....	62
5.2.2	<i>Expressão para Estimativa da Incerteza de Medição de Deformação com Sensor de Fibra Óptica</i>	65
5.2.2.1	Fontes de Incerteza na Medição de Deformação com Sensor de Fibra Óptica.....	66
I.	Lasers.....	67
II.	Monitoração da Ordem de Franja.....	67
III.	Fibra Óptica.....	69
IV.	Comprimento Equivalente.....	69
5.2.2.2	Balanço de Incertezas.....	69

Capítulo 6 - Experimentos

6.1 Apresentação dos Resultados	73
6.1.1 <i>Ensaio de Linearidade</i>	73
6.1.2 <i>Ensaio de Estabilidade.....</i>	75
6.1.3 <i>Ensaio de Fluência</i>	79
6.2 Considerações Finais	83

Capítulo 7 - Conclusões

CONCLUSÕES.....	84
------------------------	-----------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
--	-----------

ANEXO I

DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO EQUIVALENTE.....	89
---	-----------

ANEXO II

DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DO COMPRIMENTO EQUIVALENTE	93
---	-----------

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1 - Introdução

Figura 2.1 - Relaxação de tensão sob deformação constante de $360 \times 10^{-6} \text{ m/m}$	10
Figura 2.2 - Deformação dependente do tempo em concreto submetido à compressão mantida	12
Figura 2.3 - Reversibilidade da fluência	13

Capítulo 2 - A Argamassa

Figura 3.1 - Elementos de uma fibra óptica	16
Figura 3.2 - Tipos de seção transversal de uma fibra óptica	17
Figura 3.3 - Propagação da luz em uma fibra óptica	18
Figura 3.4 - Detalhe da propagação da luz em uma fibra óptica	18
Figura 3.5 - Tipos e aplicações dos sensores de fibra óptica: (a) extrínsecos, (b) intrínsecos, (c) interferométricos	22
Figura 3.6 - Variação do sinal de intensidade e deformação com o tempo	24
Figura 3.7 - Sensor de fibra óptica Mach-Zehnder	24
Figura 3.8 - Sensor de fibra óptica Michelson	25
Figura 3.9 - Sensor de fibra óptica Fabry-Perot extrínseco	26
Figura 3.10 - Sensor de fibra óptica Fabry-Perot intrínseco	26

Capítulo 3 - Sensores de Fibra Óptica

Figura 4.1 - Extensômetros Carlson para medição de deformação	29
Figura 4.2 - Esquema da medição de deformação usando transdutores indutivos	29
Figura 4.3 - Esquema da medição de deformação com extensômetros	29
Figura 4.4 - Esquema da medição de deformação com comparadores de base fixa	31
Figura 4.5 - Esquema da medição de deformação com extensômetros mecânicos fixos	31
Figura 4.6 - Esquema da medição de deformação com extensômetros mecânicos de base móvel	31
Figura 4.7 - Tela principal do programa Conta Franja	34
Figura 4.8 - Fluxograma explicativo do programa Conta Franja	35
Figura 4.9 - Representação da forma e dimensões adotadas para os corpos de prova	37

Figura 4.10 - Pinos de tração da fibra óptica, fixos à base das fôrmas	39
Figura 4.11 - Posicionamento da fibra no corpo de prova: vista frontal e seção transversal	39
Figura 4.12 - Fôrmas de madeira e nylon, prontas para moldagem	40
Figura 4.13 - Corpos de prova de argamssa	40
Figura 4.14 - Configuração esquemática da bancada experimental	41
Figura 4.15 - Bancada experimental	41
Figura 4.16 - Fonte de luz laser	42
Figura 4.17 - Acoplamento da luz laser nas fibras ópticas	42
Figura 4.18 - Interferômetro simplificado	43
Figura 4.19 - Câmera de televisão adquirindo imagem do sinal de interferência	44
Figura 4.20 - Mesa de tração	44
Figura 4.21 - Sistema de tração: suporte, massas e dispositivo para aplicar a carga aos corpos de prova	45
Figura 4.22 - Ensaio de estabilidade com os corpos de prova dentro d'água	46

Capítulo 5 - Calibração e Avaliação Metrológica do Sistema de Medição

Figura 5.1 - Deformação aparente do sensor de fibra óptica e do sensor de referência como função da carga aplicada no corpo de prova	49
Figura 5.2 - Corpo de prova instrumentado com extensômetros na região de deformação constante	50
Figura 5.3 - Curva de calibração do comprimento equivalente de fibra após ajuste matemático	51
Figura 5.4 - Diagrama para determinação das fontes de incerteza do comprimento equivalente	54
Figura 5.5 - Configuração adotada na calibração do Conta Franja	57
Figura 5.6 - Estimativa da incerteza referente às assimetrias do corpo de prova	58
Figura 5.7 - Contribuição das fontes de incerteza na determinação do comprimento equivalente	64
Figura 5.8 - Balanço de incertezas: influência da ordem de franja	64
Figura 5.9 - Diagrama causa-efeito para determinação da incerteza da deformação medida com sensor de fibra óptica	68
Figura 5.10 - Contribuição das fontes de incerteza na deformação medida com sensor de fibra óptica	70

Capítulo 6 - Experimentos

Figura 6.1 - Ensaio de linearidade do sensor de fibra óptica	72
Figura 6.2 - Ensaio de linearidade do sensor de fibra óptica x extensômetros	73
Figura 6.3 - Ensaio de linearidade do sensor de fibra óptica x extensômetros	74

Figura 6.4 - Ensaio de linearidade do sensor de fibra óptica x extensômetros.....	74
Figura 6.5 - Ensaio de linearidade do sensor de fibra óptica x extensômetros.....	74
Figura 6.6 - Ensaio de estabilidade: fibra óptica sozinha.....	76
Figura 6.7 - Controle de temperatura durante o ensaio de estabilidade.....	76
Figura 6.8 - Controle de umidade durante o ensaio de estabilidade.....	76
Figura 6.9 - Ensaio de estabilidade: corpos de prova sem carga ao ar.....	77
Figura 6.10 - Controle de temperatura durante o ensaio de estabilidade.....	77
Figura 6.11 - Controle de umidade durante o ensaio de estabilidade.....	77
Figura 6.12 - Ensaio de estabilidade: corpos de prova sem carga na água.....	78
Figura 6.13 - Ensaio de estabilidade: corpos de prova sem carga na água.....	78
Figura 6.14 - Ensaio de deformação lenta do corpo de prova de argamassa.....	79
Figura 6.15 - Controle de temperatura durante o ensaio de deformação lenta.....	80
Figura 6.16 - Controle de umidade durante o ensaio de deformação lenta.....	80
Figura 6.17 - Ensaio de deformação lenta do corpo de prova de argamassa.....	81
Figura 6.18 - Ensaio de deformação lenta do corpo de prova de argamassa.....	82
Figura 6.19 - Ensaio de deformação lenta do corpo de prova de argamassa.....	83
Figura 6.20 - Ensaio de deformação lenta do corpo de prova de argamassa.....	83

ANEXO II - Determinação da Incerteza do Comprimento Equivalente

Figura II.1 - Contribuição das fontes de incerteza na deformação medida com extensômetros.....	95
---	----

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2 - A Argamassa

Tabela 2.1 - Classificação das argamassas quanto à função	7
Tabela 2.2 - Classificação das argamassas de revestimento	8
Tabela 2.3 - Propriedades das argamassas	8
Tabela 2.4 - Argamassas: valores de referência para algumas propriedades físicas	8
Tabela 2.5 - Tipos de deformação apresentados pelas argamassas	9
Tabela 2.6 - Fatores que afetam a fluência das argamassas	14

Capítulo 3 - Sensores de Fibra Óptica

Tabela 3.1 - Fibras ópticas: tipos e características	18
Tabela 3.2 - Fibras ópticas: propriedades físicas	18
Tabela 3.3 - Aspectos positivos e limitações no uso de sensores de fibra óptica	27

Capítulo 4 - Medição de Deformação em Argamassa

Tabela 4.1 - Comparação entre os métodos de medição de deformação em argamassa	30
Tabela 4.2 - Características e propriedades da fibra óptica utilizada	33
Tabela 4.3 - Caracterização do cimento utilizado - Ensaio Químico	37
Tabela 4.4 - Caracterização do cimento utilizado - Ensaio Físico	37
Tabela 4.5 - Caracterização da cal utilizada - Ensaio Químico	37

Capítulo 5 - Calibração e Avaliação Metrológica do Sistema de Medição

Tabela 5.1 - Variações no λ do laser devidas às características do laser e das condições ambientais	55
Tabela 5.2 - Fontes de incerteza na medição com extensômetros	61
Tabela 5.3 - Balanço de incertezas: influência do comprimento de onda do laser	62
Tabela 5.4 - Balanço de incertezas: influência da ordem de franja	62
Tabela 5.5 - Balanço de incertezas: influência do índice de refração da fibra óptica	63
Tabela 5.6 - Balanço de incertezas: influência da medição de deformação com extensômetros	63

Tabela 5.7 - Balanço de incertezas: influência do comprimento equivalente da fibra óptica	69
---	----

ANEXO I - Determinação do Comprimento Equivalente

Tabela I.1 - Ensaio 1 - Determinação do Comprimento Equivalente - Traço 1	89
Tabela I.2 - Ensaio 2 - Determinação do Comprimento Equivalente - Traço 1	90
Tabela I.3 - Ensaio 3 - Determinação do Comprimento Equivalente - Traço 2	91
Tabela I.4 - Ensaio 4 - Determinação do Comprimento Equivalente - Traço 2	92
Tabela I.5 - Determinação do Comprimento Equivalente	92

ANEXO II - Determinação da Incerteza do Comprimento Equivalente

Tabela II.1 - Calibração do programa Conta Franja	93
Tabela II.2 - Determinação da incerteza da deformação medida com extensômetros	95

LISTA DE SÍMBOLOS

C-S-H:	silicatos de cálcio hidratados
SFO:	sensor de fibra óptica
ΔL :	variação de comprimento
ΔR :	variação de resistência elétrica
ΔV :	variação de tensão elétrica
$\Delta\phi$:	variação do ângulo de fase
E:	módulo de elasticidade
ν :	coeficiente de <i>Poisson</i>
α :	coeficiente de expansão térmica
CDP:	corpo de prova
ε :	deformação
L_0 :	comprimento inicial
R:	resistência elétrica inicial
r:	resistividade
G:	módulo de elasticidade transversal
S:	área da seção transversal
λ :	comprimento de onda do laser
n :	índice de refração da fibra óptica
l, ℓ :	comprimento ativo do sensor
UTS:	unidade de tratamento de sinais
ΔT :	variação de temperatura
ϕ :	diâmetro
$\Delta \ell$:	variação do comprimento do sensor de fibra óptica
$\Delta\phi$:	variação do ângulo de fase do feixe de luz
I :	intensidade de luz
OF:	ordem de franja
ε_{SFO} :	deformação medida com sensor de fibra óptica
ε_{SG} :	deformação medida com extensômetros de resistência elétrica
\bar{a} :	coeficiente de ajuste matemático dos pontos experimentais
ℓ_{eq}, L_{eq} :	comprimento equivalente de fibra óptica
n :	número de pontos experimentais
a :	coeficiente de ajuste matemático de cada ponto experimental
$u_{\ell_{eq}}, u_{L_{eq}}$:	incerteza do comprimento equivalente de fibra óptica
u_{λ} :	incerteza do comprimento de onda do laser

u_a :	incerteza do coeficiente de ajuste matemático
u_n :	incerteza do índice de refração da fibra óptica
u_a :	incerteza do coeficiente de ajuste matemático para cada ponto experimental
$u_{\varepsilon SG}$:	incerteza da medição da deformação com extensômetro
u_{OF} :	incerteza da medição da ordem de franja com sensor de fibra óptica
T:	temperatura
Ur:	umidade relativa do ar
P:	pressão atmosférica
$\Delta\lambda$:	variação do comprimento de onda do laser
ΔL :	variação do comprimento da cavidade do laser
$\Delta\lambda_T$:	variação do comprimento de onda do laser devida à temperatura
$\Delta\lambda_{Ur}$:	variação do comprimento de onda do laser devida à umidade relativa do ar
$\Delta\lambda_P$:	variação do comprimento de onda do laser devida à pressão atmosférica
$\Delta\lambda_{\Delta\lambda}$:	variação do comprimento de onda do laser devida à faixa de comprimentos de onda
$\Delta\lambda_L$:	variação do comprimento de onda do laser devida ao comprimento da cavidade do laser
$\Delta\varepsilon$:	variação de deformação
Δx :	afastamento da linha neutra
ΔL :	diferença de comprimento da fibra óptica causada pela temperatura
DL:	diferença de comprimento de fibra óptica exposto
α_{FO} :	coeficiente de expansão térmica do material da fibra óptica
ΔT :	diferença de temperatura entre os braços do interferômetro $\Delta T = T_{\text{extrema}} - T_{\text{inicial}} $
$u_{\Delta\lambda_L}$:	incerteza no comprimento de onda devida devida ao comprimento da cavidade do laser
$u_{\Delta\lambda_P}$:	incerteza no comprimento de onda devida à pressão atmosférica
$u_{\Delta\lambda_T}$:	incerteza no comprimento de onda devida à temperatura
$u_{\Delta\lambda_{Ur}}$:	incerteza no comprimento de onda devida à umidade relativa do ar
$u_{\Delta\lambda_{\Delta\lambda}}$:	incerteza no comprimento de onda devida à faixa de comprimentos de onda
u_{OFC} :	incerteza na ordem de franja devida à calibração do Conta Franja
u_{OFinst} :	incerteza na ordem de franja devida às instabilidades
$u_{OFCarreg}$:	incerteza na ordem de franja devida ao carregamento
$u_{OFTFOexp}$:	incerteza na ordem de franja devida à temperatura na fibra óptica exposta
$u_{OFTFOemb}$:	incerteza na ordem de franja devida à temperatura na fibra óptica embutida
$u_{OFTcorp}$:	incerteza na ordem de franja devida à temperatura no corpo de prova
$u_{OFassim}$:	incerteza na ordem de franja devida às assimetrias dos corpos de prova
u_{Tn} :	incerteza no índice de refração devida à temperatura agindo no índice de refração
$u_{Assim.Carreg}$:	incerteza na deformação medida com extensômetros devida às assimetrias no carregamento

- $u_{\varepsilon_{SFO}}$: incerteza da deformação medida com sensor de fibra óptica
- g : aceleração da gravidade
- CDP's: corpos de prova
- R : distribuição de probabilidades retangular
- N : distribuição de probabilidades normal
- u_{EM} : incerteza na deformação medida com extensômetros devida ao erro máximo da ponte amplificadora
- u_{SC} : incerteza deformação medida com extensômetros devida ao sinal de calibração da ponte amplificadora
- u_a : incerteza deformação medida com extensômetros devida à incerteza Tipo A
- u_{DL} : incerteza deformação medida com extensômetros devida ao desvio de linearidade da ponte amplificadora
- u_T : incerteza deformação medida com extensômetros devida à temperatura
- u_{cabos} : incerteza deformação medida com extensômetros devida aos cabos
- u_{Re} : incerteza deformação medida com extensômetros devida ao erro de zero
- u_{Ecal} : incerteza deformação medida com extensômetros devida aos erros na calibração da ponte amplificadora
- u_{Eme} : incerteza deformação medida com extensômetros devida aos erros de leitura da ponte amplificadora
- u_{α_k} : incerteza deformação medida com extensômetros devida ao fator do extensômetro

RESUMO

Este trabalho dedica-se ao desenvolvimento, implementação e avaliação do desempenho metrológico de um sistema de medição de deformação baseado num sensor de fibra óptica interferométrico, embutido em corpos de prova de argamassa, idealizado para medir deformação lenta à tração.

O material de interesse - argamassa - é brevemente localizado no contexto da pesquisa, enquanto a fibra óptica e o sensor de fibra proposto são caracterizados em maiores detalhes.

As propriedades da fibra e do laser utilizado são empregadas na medição de deformação com o sensor de fibra óptica, a partir do ângulo de fase do sinal de luz, que viaja no interior das fibras. Este último, é obtido a partir de um programa implementado para contar franjas de interferência, cuja movimentação é proporcional a sua variação.

O sensor de fibra óptica foi calibrado com um sistema de medição de referência cujas características metrológicas são conhecidas e satisfazem às necessidades práticas determinadas por um experimento para medição de fluência.

Para avaliar metrologicamente o sensor, ensaios de linearidade (deformação elástica), estabilidade (com os corpos de prova ao ar e submersos) e deformação lenta (fluência) à tração foram executados, para duas argamassas, uma mais deformável e outra com maior rigidez.

Os resultados experimentais demonstraram elevada sensibilidade do sistema de medição aos pequenos níveis de deformação apresentados pelo material, estabilidade ao longo do tempo e perante condições ambientais e incertezas compatíveis com as necessidades práticas.

Com base nos trabalhos experimentais, algumas sugestões de otimização do sistema implementado são abordadas, juntamente com observações práticas para facilitar o uso do sensor de fibra óptica.

ABSTRACT

This work deals with to the development, implementation and metrological evaluation of a strain measurement system, based on a fiber optical interferometric sensor, idealized to measure long term deformation (creep), embedded in test mortar bodies, under traction.

The mortar is located in the research context, while the optical fiber and the fiber sensor are characterized in more details.

The fiber and laser properties are used in strain measurements with the optical fiber sensor, starting from the phase of the light sign, that travels inside the fibers. The phase is obtained from a implemented program to count interference fringes in proportional movement.

The optical fiber sensor was calibrated with a reference measurement system, whose metrological parameters are known and satisfy to the practical needs determined by a creep measurement test.

To the metrological sensor's evaluation, linearity (elastic deformation), stability (with the test bodies to the air and submerged) and long term deformation (creep) tests were executed, for two, more and less deformable mortars.

The experimental results demonstrated high sensibility at the small deformation levels presented by the material, long term and environmental stability, and compatible uncertainties with the practical conditions.

After the experimental works, some optimization suggestions about the implemented system are approached, together with practical observations to the use of the optical fiber sensor.

1.1 Localização no Contexto Científico

A argamassa é um material utilizado para os mais diversos fins: (a) assentamento de tijolos e blocos na construção de uma parede; (b) revestimento de paredes e estruturas, em camadas como emboço e reboco; (c) assentamento de peças cerâmicas em pisos e paredes; (d) regularização de superfícies; (e) funções estruturais - argamassa armada, entre outros.

Nas diversas aplicações, o material está sujeito a diferentes esforços, que produzem estados de tensão, responsáveis por fissurações em revestimentos internos, tetos e paredes, e externos, fachadas de edificações. Tais tensões são causadoras, também, de descolamentos de azulejos em cozinhas e áreas de serviço e, o mais preocupante, quedas de revestimentos cerâmicos de fachadas. Essas últimas, em alguns países, originam processos judiciais, envolvendo indenizações a pessoas atingidas por peças cerâmicas em queda livre.

Por motivos dessa natureza e, também, por não ser bem conhecido o comportamento das argamassas perante tais esforços, observa-se a necessidade de viabilizar estudos para caracterizar os diferentes tipos de argamassa, através da medição de suas propriedades.

1.2 Justificativas

É de fundamental importância conhecer as características e propriedades dos materiais empregados no dia-a-dia da construção civil, pois esse conhecimento propicia aproveitamento de potencialidades, cumprimento de requisitos específicos ao uso e intervenções em busca de melhorias.

A medição de deformação em argamassas usadas, por exemplo, para assentar peças cerâmicas, é de grande importância para os casos de revestimentos executados sobre bases deformáveis. Nesses casos, a argamassa tem função de fazer a aderência dos componentes cerâmicos ao substrato. Quando esta endurece e consolida-se a aderência, forma-se um conjunto, que embora assim chamado, é composto de camadas, constituídas de diferentes materiais. Estes estão sujeitos a deformações diferenciadas, originadas de [1]:

dilatação térmica da camada de argamassa;

- # retração por secagem (reversível) da camada de argamassa;
- # deformação da camada suporte (emboço ou contrapiso) e sua base (alvenaria ou concreto armado) devido à ação da umidade e temperatura;
- # deformação lenta da estrutura de concreto armado sob a camada de argamassa;
- # expansão higroscópica das placas cerâmicas de revestimento;
- # dilatação térmica dos painéis cerâmicos.

Tais movimentações causam, no material e em suas interfaces, tensões internas que precisam ser dissipadas para evitar prejuízos mais sérios aos revestimentos. O uso de argamassas com capacidade de movimentação adequada é uma solução. Mas para isso há que se conhecer a situação de emprego, o tipo de revestimento a ser aplicado, o substrato a recebê-lo e as características de cada um.

Sobre as argamassas, sabe-se que se tomam mais deformáveis com a diminuição da quantidade de cimento, que por outro lado pode levar à redução significativa da aderência. A adição de cal à mistura torna maior a capacidade de absorver deformações. Já os polímeros melhoram a capacidade de deformação e também de aderência.

A constatação de que há muito o que experimentar e concluir a respeito desta propriedade, deformação de argamassas, fez surgir a motivação deste trabalho, fundamentada na idéia de implementar um sistema de medição capaz de monitorar o estado de deformações internas em corpos de prova de argamassa, a fim de, posteriormente, poderem ser caracterizadas diferentes argamassas, através do uso da ferramenta disponibilizada.

Em particular, procurou-se desenvolver uma ferramenta que permitisse a caracterização de deformações lentas (fluência) da argamassa sob tração. Pela limitada resistência à tração da argamassa e grandes dificuldades técnicas de medição, existe muito pouca informação na literatura técnica sobre o comportamento de argamassas sobre fluência à tração, embora seja grande o interesse por este tipo de dado.

1.3 Objetivos

Face às justificativas apresentadas, citam-se os objetivos deste trabalho experimental: (a) implementação de um sistema de medição que usa um sensor de fibra óptica para medir deformação lenta à tração em corpos de prova de argamassa; (b) avaliação metrológica do sistema proposto e (c) busca pela garantia de elevada sensibilidade, de estabilidade ao longo do tempo e perante as condições ambientais e de incertezas compatíveis com as necessidades práticas.

1.4 Metodologia

A fim de atingir os objetivos listados, e partindo de um conjunto muito limitado de informações e ausência total de experiência na área, foi adotada uma metodologia de trabalho onde algumas fases e etapas foram planejadas.

Na primeira fase, buscou-se um contato inicial com o sistema de medição, aplicando o sensor de fibra óptica à superfície de uma viga de alumínio, sujeita à flexão. Para verificar a qualidade dos resultados obtidos, utilizou-se outro sistema de medição de deformação, a fim de estabelecer uma comparação. Em se tratando o alumínio, de um material de características bem definidas e facilmente determináveis, foi possível uma avaliação inicial do sensor, com esclarecimento de algumas dúvidas preliminares.

Em fase posterior, partiu-se para os primeiros experimentos em argamassa, objetivando definições sobre forma e dimensões adequadas para os corpos de prova, melhor maneira de instrumentação dos mesmos, esforço a ser aplicado, entre outras.

Após etapas intermediárias, já na terceira fase, com o sensor configurado e operando nos corpos de prova de argamassa, executaram-se ensaios para comprovar a linearidade do sistema perante a medição de deformação. Em seguida foram feitos ensaios de estabilidade no tempo e perante as condições ambientais, características relevantes para os experimentos de deformação lenta.

Na fase seguinte, tiveram início os ensaios de deformação lenta, para os quais o sensor foi idealizado. Com os resultados dos diferentes ensaios, foi possível a caracterização metrológica do sensor implementado, sendo estimados valores das incertezas envolvidas na medição com sensor de fibra óptica.

1.5 Limites do Trabalho

Observando-se os objetivos do trabalho, percebe-se que o mesmo trata da implementação e caracterização do sensor de fibra óptica proposto, ficando para trabalhos futuros o uso deste para caracterização do material, argamassa, no que se refere à propriedade deformação lenta.

Entretanto, para avaliar a sensibilidade do sensor, foram planejados experimentos de deformação lenta em dois traços de argamassa, os quais foram também estudo de caso através do qual foi possível emitir algumas comparações. Mas, respeitando os objetivos do trabalho, conclusões referentes ao comportamento do material não serão abordadas.

1.6 Estruturação do Trabalho

O presente trabalho está dividido em sete capítulos. O Capítulo 2 - A Argamassa - traz uma breve revisão deste tema, descrevendo o que é uma argamassa, qual sua composição básica, classificação e funções principais, propriedades e particularidades no que se refere à medição de deformação e fluência.

O Capítulo 3 - Sensores de Fibra Óptica - conceitua e caracteriza, de maneira geral, os meios do trabalho: a fibra óptica e os sensores com ela configurados. São descritos suas partes componentes e princípio de operação, é feita uma abordagem das diferentes aplicações, da classificação e são apresentados os sensores clássicos.

Alguns dos sistemas de medição de deformação em argamassa são citados e brevemente avaliados no Capítulo 4 - Medição de Deformação em Argamassa - com ênfase nos requisitos para medição de fluência. O sensor proposto é evidenciado, através de caracterização mais específica, abrangendo o tipo de sensor escolhido, seu princípio de operação e modelo matemático.

São caracterizados os materiais utilizados; aborda-se a produção da argamassa e dos corpos de prova, a instalação do sensor e demais atividades preliminares aos ensaios. A bancada experimental é apresentada, e são descritos os procedimentos experimentais adotados nos diferentes ensaios, executados para caracterizar metrologicamente o sensor de fibra óptica.

O Capítulo 5 - Calibração e Avaliação Metrológica do Sistema de Medição - trata da avaliação das fontes de incerteza envolvidas na medição de deformação com sensor de fibra óptica, sendo estimada a contribuição individual de cada uma delas, somadas ao final para dar origem à incerteza do processo de medição de deformação com sensor de fibra óptica.

Os resultados da avaliação experimental do sensor de fibra óptica, em estudo, constam do Capítulo 6 - Experimentos. Gráficos representando os principais ensaios executados para dois tipos de argamassa são demonstrados e analisados. Emitem-se conclusões no que se refere ao comportamento do sensor perante os experimentos.

No Capítulo 7 - Conclusões - como fechamento do trabalho, abordam-se as principais informações geradas, as considerações finais, revendo-se o cumprimento dos objetivos estabelecidos e algumas sugestões de aperfeiçoamento do sistema de medição com fibra óptica, com vistas à origem de novas pesquisas fazendo uso dessa ferramenta.

Material de construção muito antigo, a argamassa tem a composição semelhante à do concreto, embora os dois materiais sejam diferentes desde sua concepção. Enquanto a argamassa foi idealizada para ligar, unir elementos, embora também possa desempenhar funções estruturais, o concreto, que surgiu mais tarde, tem objetivos acima de tudo estruturais.

A norma brasileira NBR 7200/82 [2] define argamassa como a “mistura de aglomerantes e agregados minerais com água, possuindo capacidade de endurecimento e aderência”.

2.1 Composição

Participam da composição da argamassa aglomerantes inorgânicos, agregados miúdos, água e, eventualmente, aditivos e adições, responsáveis pela incorporação de propriedades especiais.

Os aglomerantes mais comumente empregados são o cimento Portland, a cal, o gesso, as pozolanas e os polímeros (plásticos). São agregados as rochas britadas, os fragmentos rolados no leito dos cursos d'água, os materiais encontrados em jazidas, provenientes de alterações de rocha, a areia, o pedregulho, a escória de alto forno, a vermiculita, a argila expandida, as cinzas, os grãos de polímeros e a casca de arroz.

Ao conjunto aglomerante mais água denomina-se pasta; adicionando-se o agregado miúdo à pasta, obtém-se a argamassa. Quando o objetivo é obter o concreto, adiciona-se também agregado graúdo.

Os agregados são usados como material granuloso e inerte na confecção de concretos e argamassas. São funções dos agregados: (a) contribuir com grãos capazes de resistir aos esforços solicitantes, ao desgaste e à ação das intempéries; (b) reduzir as variações de volume; (c) reduzir o custo [3].

A pasta tem como funções: (a) envolver os agregados, enchendo os vazios formados e comunicando possibilidades de manuseio, quando recém misturada; (b) aglutinar os agregados na argamassa endurecida, resultando num conjunto com certa impermeabilidade, resistência aos esforços mecânicos e durabilidade frente aos agentes agressivos [3].

O termo agregado miúdo se refere a partículas de agregado menores que 4,8 mm (abertura da peneira número 4, de malha quadrada) porém maiores que 0,075 mm, enquanto o termo agregado graúdo se refere a maiores que 4,8 mm.

A água entra na mistura em quantidade suficiente para fornecer consistência adequada e trabalhabilidade durante o amassamento, além de participar das reações de hidratação. Durante o endurecimento, a água de amassamento evapora e a água de hidratação vai reagindo, conforme evolui o processo de cura [4].

A designação que expressa a participação da água na mistura, fator água/cimento ou água/aglomerante, é uma característica importante do material.

As argamassas utilizadas em obras são comumente compostas de areia natural lavada e os aglomerantes são em geral o cimento Portland e a cal hidratada. Já em laboratórios é costume utilizar areia normalizada, de granulometria e demais características bem definidas.

2.1.1 Cimento

O cimento hidráulico mais utilizado para fazer argamassa é o cimento Portland, pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água e não se decompõe mais, após o endurecimento, mesmo que novamente em contato com a água [4].

O cimento Portland é composto de clínquer e adições, sendo o primeiro seu principal componente, presente em todos os tipos de cimento. O clínquer tem como matérias primas o calcário e a argila. As adições são matérias-primas misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitindo a fabricação de diversos tipos de cimento Portland. São elas o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos.

2.1.2 Cal

A cal hidratada, como material de construção, tem as funções principais de ligar blocos construtivos e revestir paredes, de forma eficiente e duradoura [5].

A cal se origina da decomposição dos calcários e dolomitos, rochas compostas, principalmente, de carbonatos - de cálcio (CaCO_3) e duplo de cálcio e magnésio ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) - e outros minerais - de alumínio, ferro, sódio, potássio e silício (quartzo) - as impurezas que muito prejudicam sua utilização.

Material ligante-reagente, a cal pode ser de dois tipos: cal virgem, produzida pela calcinação da rocha a temperaturas próximas de 1000°C , ocasião em que perde parte de

seus constituintes (anidrido carbônico - CO₂) resultando composta somente de óxidos; e cal hidratada, originária da extinção da cal virgem, adição de água à mesma, operação que transforma seus óxidos em hidróxidos, Ca(OH)₂ ou Mg(OH)₂.

A cal hidratada confere à argamassa trabalhabilidade, plasticidade, capacidade de retenção de água e maior incorporação de agregados (diminuindo seu custo), resistência maior à penetração de água, maior deformabilidade, mas quando endurecida, fornece resistências pequenas, independentemente do traço. Para a resistência à compressão aos 28 dias de idade, os valores médios oscilam entre 0,5 e 1,5 MPa, podendo-se tomar como valor médio 1,0 MPa [3, 4].

2.1.3 Areia

É o material encontrado em estado natural, passando na peneira número 4 [3]. É um agregado miúdo utilizado nas argamassas.

2.2 Traços

Traço é a proporção relativa entre os constituintes da argamassa, exceto a água. Pode ser indicado pelas proporções em volume ou em massa, tomando-se como unidade o volume ou a massa do aglomerante. Exemplos de traço de cimento, cal e areia estão demonstrados na Tabela 2.4.

O traço em massa oferece maior segurança quanto à qualidade da argamassa, quantidades no consumo e apropriação de custos. Todavia, é impraticável no canteiro de obras, tendo em vista a necessidade de uma balança na obra para efetivá-lo, o que torna a dosagem volumétrica através de latas ou padiolas mais acessível [5].

Freqüentemente adota-se a indicação mista: o aglomerante em massa e os agregados em volume. No caso das argamassas mistas, convencionou-se que a unidade é o cimento, por ser o aglomerante que resulta em maiores resistências [3, 5, 6].

2.3 Classificação

Existem muitas classificações para as argamassas, mas uma forma simples e abrangente de classificá-las é adotada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classificação das argamassas quanto à função.

TIPO DE ARGAMASSA
Argamassa de Revestimento
Argamassa de Assentamento
Argamassa Estrutural (armada)

No que diz respeito às argamassas de revestimento, o Comitê Brasileiro de Construção Civil [7] às classifica segundo a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Classificação das argamassas de revestimento [7].

TIPO	CRITÉRIO DE CLASSIFICAÇÃO
Argamassa de Cimento	Tipo de Aglomerante
Argamassa de Cal	
Argamassa de Cimento e Cal	
Argamassa de Gesso	
Argamassa Aérea	Natureza do Aglomerante
Argamassa Hidráulica	
Argamassa Simples	Quantidade de Aglomerantes
Argamassa Mista	
Argamassa de Chapisco	Função no Revestimento
Argamassa de Emboço	
Argamassa de Reboco	

2.4 Propriedades Físicas das Argamassas de Revestimento

Também as propriedades das argamassas são muitas. Na Tabela 2.3, mostra-se uma síntese de algumas. Citam-se, na Tabela 2.4, alguns valores de referência para as propriedades das argamassas.

Tabela 2.3 - Propriedades das argamassas [7].

ESTADO FRESCO	ESTADO ENDURECIDO
Trabalhabilidade	Resistência Mecânica
Consistência e Plasticidade	Módulo de Elasticidade
Retenção de Água e de Consistência	Aderência
Massa Específica Aparente e Teor de Ar	Permeabilidade
Exsudação de Água	Estabilidade Volumétrica

Tabela 2.4 - Argamassas: valores de referência para algumas propriedades físicas. [3, 6, 8].

Propriedades das Argamassas	
Módulo de Elasticidade [GPa]	
Ricas (1:3)	14
Pobres (1:5)	5
Elásticas (1:1:6, 1:1:8, 1:2:8, 1:3:12)	1, 2, 3, 5
Resistência à Compressão [MPa]	1
Resistência à Tração [MPa]	0,1
Coefficiente de Expansão Térmica [°C]	10-12 x 10 ⁻⁶

2.5 Deformação das Argamassas

Visto que é considerado perfeitamente elástico o material no qual surgem e desaparecem deformações, imediatamente após a aplicação ou retirada de tensões, classifica-se o concreto e assim também as argamassas, como elásticos, dentro de certos limites. Para eles, a relação tensão x deformação é função do tempo [9].

Diversos são os fatores que levam à deformação de materiais cimentícios. Causas endógenas, esforços externos e, além disso, deformações podem aparecer mesmo no material não carregado, devido à expansão ou contração no estado endurecido, provocadas por embebição (molhagem), secagem, variações de umidade e de temperatura ambiente e reações químicas (deformação autógena) que não devem ser confundidas com a contração plástica que ocorre no estado fresco, antes do início da pega [10].

É possível observar então, que muitos tipos de deformação podem ocorrer nesse material. Entre elas, algumas podem ser distinguidas, conforme Tabela 2.5:

Tabela 2.5 - Tipos de deformação apresentados pelas argamassas.

TIPOS DE DEFORMAÇÃO	CAUSAS	OBSERVAÇÕES
AUTÓGENA	Reações de hidratação - fenômenos químicos, sem movimento de umidade	Sua medição requer ausência de impedimento quanto à retração ou expansão e, por isso, ambientes controlados e corpos de prova selados
POR CARREGAMENTO Elástica (Instantânea) Fluência (Subseqüente)	Aplicação lenta ou rápida de carga	<u>Rápida</u> : ensaios para determinação do módulo de elasticidade e capacidade de deformação sob carga <u>Lenta</u> : Ensaios de fluência e de capacidade de deformação sob carregamento lento
POR AGENTES EXTERNOS Retração Expansão	Variações de temperatura - Movimentos de umidade	<u>Retração por secagem</u> : parcialmente reversível <u>Expansão</u> : devida à absorção de água por corpos de prova curados continuamente neste meio

2.6 Fluência e Retração

2.6.1 Fluência

Fluência é um fenômeno viscoelástico que pode ser definido como o aumento progressivo da deformação do material, com o tempo, sob tensão constante. Entretanto, se houver restrição ao aumento desta deformação, criando-se um estado de deformação

constante, a fluência manifestar-se-á como uma diminuição da tensão, com o tempo, configurando-se como uma relaxação de tensão [9].

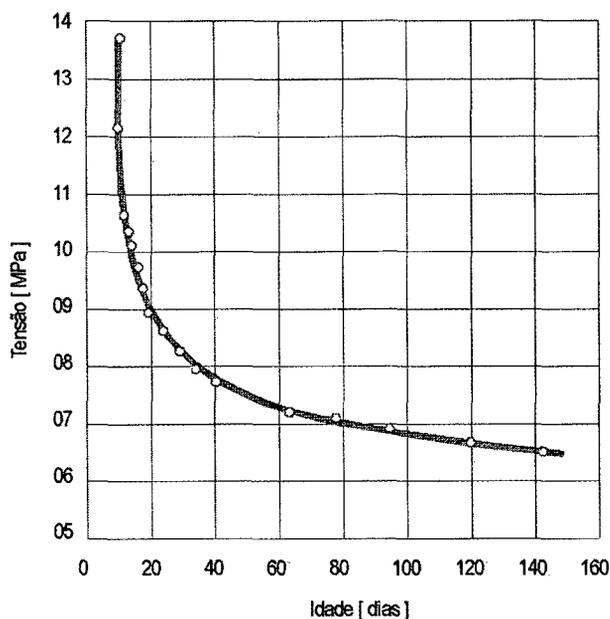


Figura 2.1 - Relaxação de tensão sob deformação constante de 360×10^{-6} m/m [11].

A fluência está diretamente relacionada à retração por secagem. Há que se discutir estes dois fenômenos conjuntamente, por muitas razões, entre elas [11]:

- ambos se originam da mesma fonte;
- na prática, normalmente, acontecem simultaneamente;
- as curvas de deformação x tempo são muito semelhantes;
- os fatores de influência são os mesmos;
- o mecanismo que regula os dois é o mesmo;
- ambos são parcialmente reversíveis.

2.6.2 Retração

Retração é uma diminuição de volume, que ocorre durante o endurecimento das argamassas, quer devido à perda de água evaporável, quer devido às reações de hidratação. Este fenômeno se manifesta de três formas [6, 8]:

- retração química;
- retração de secagem;
- retração por carbonatação.

2.6.3 Mecanismo da Fluência e Retração

Os fenômenos de fluência e retração têm relação com os movimentos internos da água adsorvida ou intracristalina, isto é, com a percolação interna. O mecanismo que regula a retração e a fluência é o mesmo e relaciona-se com **remoção** da água interna do material. A diferença consiste, basicamente, na influência de fatores externos. Na retração, o fator externo determinante é a **umidade relativa diferencial** entre o material e o ambiente e, na fluência, a **tensão aplicada** e o **tempo** [11].

A sede da fluência é a pasta de cimento hidratado. As deformações da argamassa em função do tempo e do carregamento são atribuídas ao movimento interno da água capilar e adsorvida dentro do material; ao movimento de água para o ambiente e ao desenvolvimento e propagação de microfissuras internas.

A água, no cimento, é retida com vários graus de intensidade. Tem-se o vapor de água, nos poros vazios ou parcialmente preenchidos; a água livre, em grandes capilares, fora da ação das forças superficiais da fase sólida; a água retida em pequenos capilares, sob tensão capilar; a combinada quimicamente e a água do gel, adsorvida e interlamelar [11].

Quando o material está sujeito a um ambiente de baixa umidade, começa a perder a água por evaporação. Os poros capilares maiores, devido ao seu tamanho relativamente grande, esvaziam-se primeiro, mas como o somatório das tensões superficiais que resulta da saída dessa água é pequeno, não há variação significativa de volume. Em seguida, a água dos poros capilares menores começa a sair, formando milhares de tubos capilares ligando as partículas sólidas, causando forte tensão trativa e provocando retração, seguida de fissuração. Com a continuação do fenômeno, a água adsorvida na superfície do C-S-H (silicatos de cálcio hidratados) começa a sair, causando uma retração ainda mais forte. A água fortemente ligada entre as lamelas de C-S-H só sai se houver forte secagem, abaixo de 11% de umidade relativa do ar, não sendo influenciada só pelo carregamento.

A Figura 2.2 (a) demonstra que a exposição de uma peça de argamassa, descarregada e não restringida, a condições de baixa umidade causa retração por secagem, que aumenta ao longo do tempo.

Se um elemento seca enquanto carregado, Figura 2.2 (b), é usual admitir que a fluência e a retração sejam aditivas, calculando-se, assim, a fluência como a diferença entre a deformação total, com o tempo, do elemento carregado e a retração de um elemento semelhante, não carregado, conservado nas mesmas condições, durante igual

período de tempo. A intensidade da retração e da fluência é da mesma ordem de grandeza da deformação elástica nas tensões usuais.

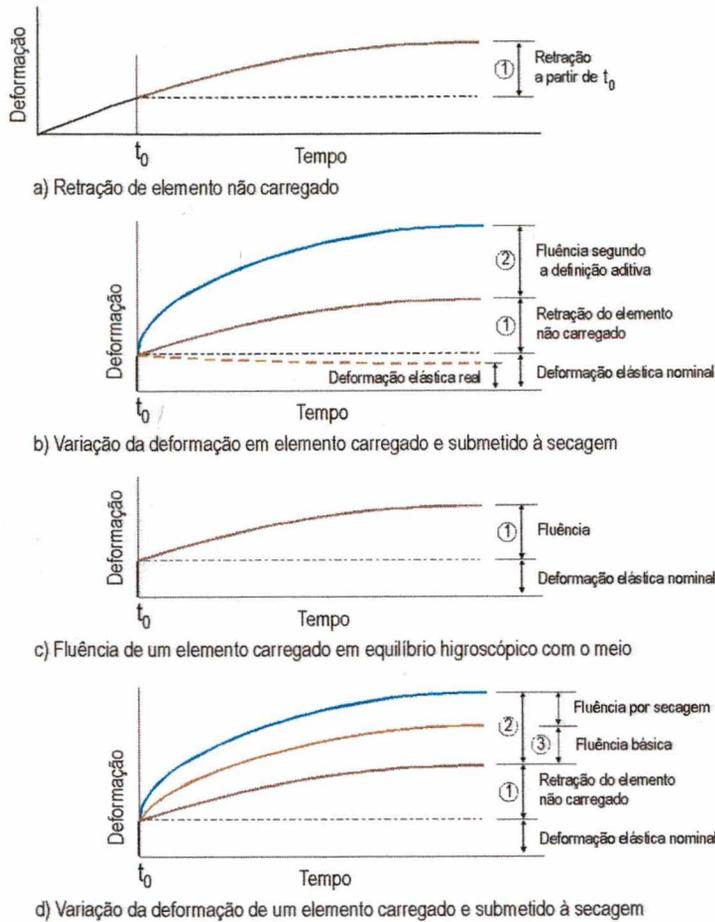


Figura 2.2 - Deformação dependente do tempo em material submetido à compressão mantida [9].

Em abordagens mais detalhadas, pode-se distinguir as parcelas de fluência básica e por secagem, conforme Figura 2.2 (d). A primeira é a deformação devida ao carregamento, que ocorre em condições de equilíbrio entre a umidade do ambiente e do material. Sua amplitude é diretamente relacionada à presença de água livre na microestrutura do material.

A fluência adicional por secagem ocorre quando o material está sob carga e simultaneamente exposto a perda de água para o ambiente, com baixa umidade relativa. Ela está relacionada primariamente a um efeito estrutural: secagens diferenciadas induzem a um estado de fissuração que relaxa parte das tensões diminuindo a deformação causada pela retração por secagem. Um carregamento externo, pela transferência do campo de tensões para o domínio de compressões, teria, então, o efeito de decréscimo ou mesmo cancelamento da fissuração, aumentando a retração por secagem.

A fluência alivia tensões na pasta de cimento, devidas à retração diferencial na secagem lenta, mas esse alívio diminui com a idade. Já secagem rápida não permite que a fluência acomode as tensões de retração, e pode causar fissuração acentuada.

Num diagrama típico de fluência, como o da Figura 2.3, observa-se a deformação instantânea, devida ao carregamento, considerada puramente elástica, seguida de uma parcela de deformação lenta com o tempo. No momento do descarregamento, há uma redução da deformação, proporcionalmente à deformação elástica à idade considerada, que é geralmente menor do que a deformação no momento do carregamento, e denomina-se recuperação instantânea. Segue-se, então, uma redução gradativa da deformação, conhecida como recuperação por fluência, cuja forma da curva se parece com a da fluência, mas chega a um valor limite mais rapidamente. E, finalmente, pelo fato da fluência não se tratar de um fenômeno reversível, observa-se uma deformação residual [9].

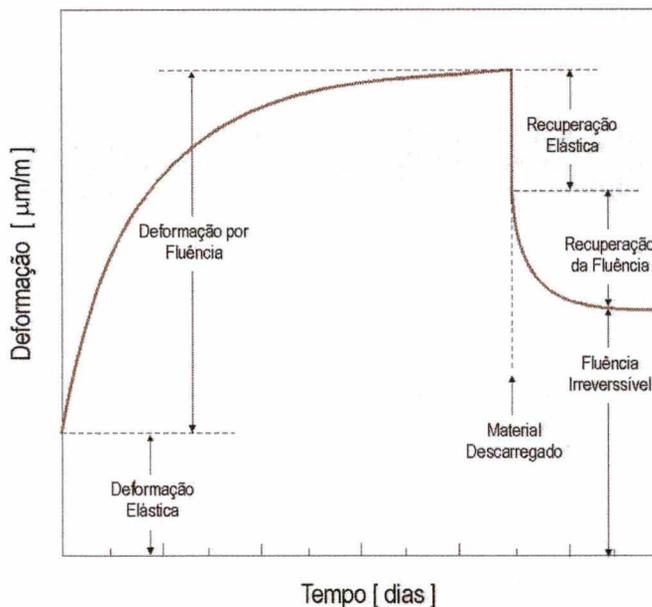


Figura 2.3 - Reversibilidade da fluência [11].

2.6.4 Recuperação da Fluência e Retração

Tanto a retração por secagem quanto a fluência apresentam um certo grau de reversibilidade, que possui uma importância prática.

Tal recuperação é largamente associada com a difusão de água voltando para espaços pequenos da pasta de cimento. As lamelas de C-S-H têm grande afinidade com as moléculas de água. Portanto, o material só perde sua água por grande necessidade, como por estar inserido num ambiente de umidade extremamente baixa, ou mesmo por estar sob tensão externa. Da mesma forma acontece quando o ambiente está com alta

umidade, como quando chove, por exemplo. É mais favorável ao equilíbrio termodinâmico que a água condense no interior do material, restabelecendo ligações insatisfeitas e fazendo novas, ou mesmo retomando para os pequenos poros, por difusão.

O comportamento típico da argamassa, na secagem e na molhagem, é semelhante ao demonstrado na Figura 2.3, para a fluência.

2.6.5 Fatores que Contribuem para a Fluência de Argamassas

A fluência é função de vários fatores, que interagem simultaneamente, entretanto, a interligação destes é complexa e de difícil entendimento. Por isso, serão citados a seguir, individualmente, com o propósito de entendimento de seus significados relativos.

Tabela 2.6 - Fatores que afetam a fluência das argamassas e concretos.

FATORES DE INFLUÊNCIA	EFEITOS SOBRE A FLUÊNCIA
Umidade do ar	Tanto maior quanto menor a umidade do ar. Para corpos de prova que não atingiram equilíbrio higroscópico a influência é menor.
Resistência da argamassa/concreto	Inversamente proporcional à resistência no momento da aplicação da carga.
Idade de carregamento	Tanto menor quanto maior a idade, devido à evolução da resistência e módulo de elasticidade.
Tipo de cimento	Devido à influência da resistência, no momento de aplicação da carga.
Relação água/cimento (a/c)	Tanto maior quanto maior a relação a/c.
Aditivos redutores de água e aceleradores de pega	Maior na presença dos aditivos.
Tipos de agregados	Maior tanto maior o módulo de elasticidade.
Granulometria	Diminui com o aumento da espessura.
Forma do agregado	Aumenta com agregados britados.
Dimensão máxima característica do agregado	Diminui com a dimensão máxima, pois haverá mais pasta.
Dimensões da peça	Diminui com o aumento da espessura.
Carregamento	Aumenta com cargas cíclicas e diminui os valores subsequentes.
Tensão	Maior quanto mais próxima a resistência limite última.
Porcentagem de pasta	Aumenta com o teor de pasta.

2.6.6 Determinação da Fluência

A fluência é normalmente determinada pela medição da variação, com o tempo, da deformação de um corpo de prova submetido a uma tensão constante e conservado em condições apropriadas. A norma brasileira NBR 8224 - Concreto Endurecido -

Determinação da Fluência [12] estabelece método de ensaio para determinação da fluência.

A fluência ocorre em todos os tipos de sollicitação, isto é, no esforço normal, esforço cortante, flexão e torção. Com mais frequência são consideradas as sollicitações de compressão, pois não existem dados suficientes para considerar as demais. Grande parte das afirmações sobre fluência se referem a materiais sob compressão uniaxial. O que se pode colocar sobre a fluência em outras condições de carregamento são apenas afirmativas genéricas.

O concreto-massa, sob tração uniaxial, apresenta fluência de 20% a 30% maior do que sob tensão de compressão de mesmo valor absoluto. Essa diferença depende da idade no carregamento e pode chegar a 100% no caso de ambiente com umidade relativa de 50% e carregamento às primeiras idades [9].

Quanto às curvas fluência x tempo, na tração, são semelhantes às levantadas na compressão, mas observa-se de maneira menos pronunciada o decréscimo da velocidade de fluência, já que o aumento de resistência com o tempo também é menor. Da mesma forma que na compressão, a secagem sob tração acentua a fluência [11].

2.6.7 Efeitos da Fluência sobre os Revestimentos

Nos emboços e revestimentos com argamassas as espessuras são limitadas a valores máximos, pois argamassas ricas e espessas estão sujeitas a fissuras, também devidas à retração [13].

Quando a argamassa é ligada, ainda fresca, a um substrato, como uma base de concreto, à medida que ela vai secando, são criadas tensões que advêm de sua retração; já que sua movimentação não é livre; igualando-se o deslocamento da base ao da argamassa. Assim, cria-se, no concreto, uma força de compressão e, para manter o equilíbrio, na argamassa, uma força de tração. Muitos revestimentos de pisos e paredes já foram destruídos devido à retração da argamassa de assentamento utilizada [6].

Na prática, os valores muito elevados das tensões de compressão no revestimento ou tração na argamassa, possivelmente, não chegarão a ocorrer, pois antes disso as camadas separar-se-ão, havendo flambagem do revestimento ou então ruptura da argamassa por tração, deixando de existir qualquer compressão no revestimento.

3.1 Fibras Ópticas - Materiais e Propriedades

3.1.1 Fibras Ópticas - Generalidades

A fibra óptica é um meio óptico através do qual a luz pode ser transmitida com mínimas perdas por longas distâncias, seguindo trajetões retos ou curvos. Num sistema típico, um sinal elétrico de interesse é convertido em luz por um laser, laser diodo, ou diodo emissor de luz (LED). O sinal óptico é então lançado no interior da fibra e propaga através dela até que seja recebido por um detector, o qual converte o sinal óptico novamente em sinal elétrico.

A propagação da luz na fibra óptica, esquematizada na Figura 3.1, é possível devido à reflexão interna total, que ocorre na interface entre duas regiões no interior da fibra, o núcleo ou “core” e a camada que o envolve, casca ou “cladding”.

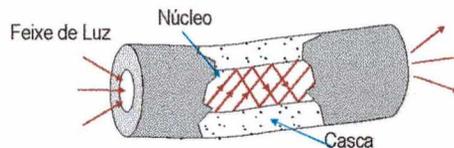


Figura 3.1 - Elementos de uma fibra óptica [14].

A função do núcleo é transmitir o sinal de luz, enquanto a casca, devido à diferença em seu índice de refração, deve manter o sinal viajando no interior do núcleo por reflexão total. Há ainda um terceiro componente, como se pode observar na Figura 3.2, a primeira camada não óptica, constituída de uma ou mais camadas finas de polímero, o “coating”, que faz o revestimento, com objetivos principais de proteção mecânica e reforço da fibra. Algumas fibras têm uma camada protetora (“buffer” ou jaqueta) em adição ou substituição ao revestimento. A jaqueta, feita de um material relativamente leve tal como acrilato, fornece resistência à abrasão e reduz perdas devidas à presença de imperfeições microscópicas na geometria da fibra, resultantes do processo de fabricação (perdas por microflexão).

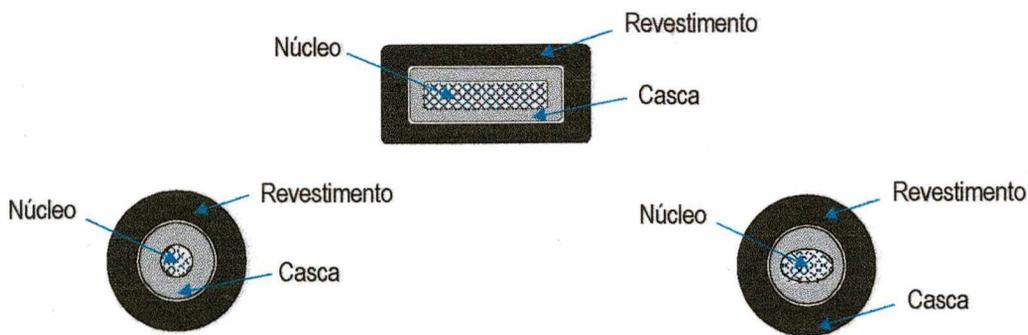


Figura 3.2 - Tipos de seção transversal de uma fibra óptica [14, 15].

Uma das características mais importantes de uma fibra é o fato dela suportar um ou muitos modos de propagação (distribuição espacial) do feixe de luz no seu interior, sendo, por isto, denominada monomodo, bimodal ou multimodo, conforme Tabela 3.1. O número de modos de propagação está relacionado com o diâmetro do núcleo, o comprimento de onda da luz, os índices de refração dos dois meios e a diferença relativa entre eles. Quando existe um único modo de propagação, linearmente polarizado, a fibra é monomodo. Fibras multimodo podem suportar milhares de modos discretos de propagação.

Em fibras multimodo, o modo de acoplamento e a situação aleatória com fases e estados de polarização torna impossível a modulação em fase ou polarização, sendo usada exclusivamente a modulação em amplitude ou intensidade. Já para as fibras monomodo, são possíveis a modulação em fase ou polarização, levando a aplicações de extrema sensibilidade como técnicas interferométricas.

A maioria das fibras ópticas é fabricada de sílica de alta resistência (SiO_2), matéria-prima que constitui o vidro, por isso trata-se de um material frágil que, até o ponto de ruptura sob carga, exibe comportamento elástico. Embora a curva tensão x deformação para o vidro não seja estritamente linear, pode-se afirmar que, quando é aplicado acréscimo linear de tensão, a deformação experimentada é proporcional à tensão aplicada até o ponto de ruptura [14]. Na Tabela 3.2 são demonstrados alguns valores de referência para as propriedades das fibras ópticas.

É a presença de defeitos de superfície que causa a quebra do vidro sob carga. De muitos tipos de fibra de vidro existentes, a sílica fundida é usada em quase todos os projetos porque pode ser produzida com níveis de pureza muito altos, com nível de contaminantes reduzido a partes por bilhão.

Tabela 3.1 - Fibras Ópticas: tipos e características [14].

TIPOS DE FIBRA ÓPTICA	DIÂMETROS TÍPICOS (μm)		
	NÚCLEO	CASCA	REVEST.
Monomodo	5 - 10	> 100	250
Multimodo	50 - 100	> 100	> 250
Composição	Sílica+Germânio	Sílica	Polímeros
Índice de Refração	1,458	1,456	-

Tabela 3.2 - Fibras Ópticas: propriedades físicas [14, 16].

PROPRIEDADES DAS FIBRAS ÓPTICAS	
Módulo de Elasticidade [GPa]	0,34 a 0,48
Coefficiente de Poisson	0,14 a 0,26
Tensão de Ruptura [MPa]	5,0
Coefficiente de Expansão Térmica [$^{\circ}\text{C}$]	10^{-7}

3.1.2 Princípio de Operação

A reflexão interna total, demonstrada nas Figuras 3.3 e 3.4, se dá quando um raio de luz é dirigido de um meio com índice de refração n_1 , para a superfície de um meio com índice de refração n_2 , e incide a um ângulo maior que o ângulo crítico, medido em relação à normal traçada à superfície no ponto de incidência do raio de luz, sendo $n_1 > n_2$.

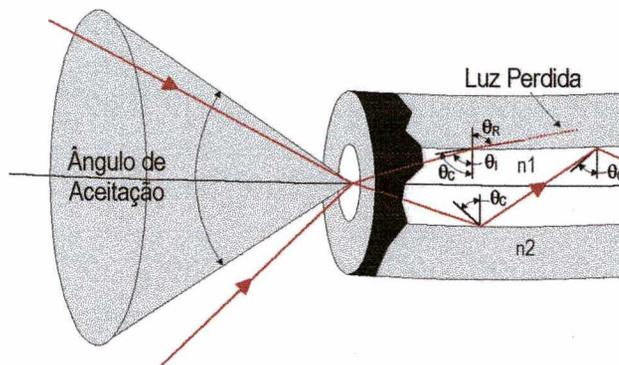


Figura 3.3 - Propagação da luz em uma fibra óptica [14].

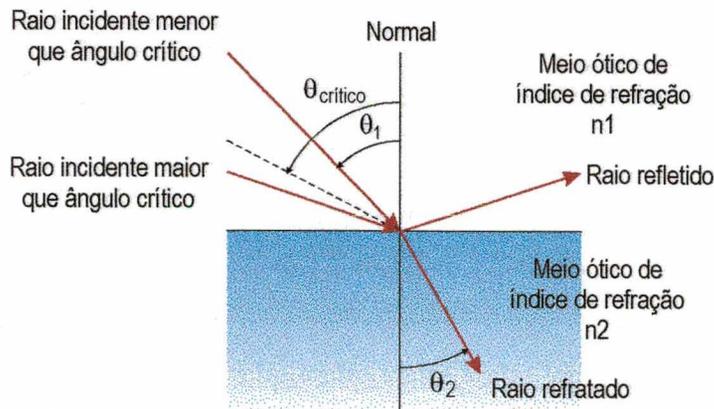


Figura 3.4 - Detalhe da propagação da luz em uma fibra óptica [14].

O índice de refração do núcleo é especificado para ser um pouco maior que o índice da casca, esse parâmetro varia com o comprimento de onda e, nas fibras monomodo, a diferença relativa entre os índices é da ordem de 0,4%. Assim, uma família relativamente grande de raios de luz incidente na interface núcleo/casca é repetidamente refletida de volta para dentro do núcleo da fibra em múltiplas reflexões, que contribuem para a propagação ao longo do comprimento da fibra.

O ângulo crítico é o menor ângulo de incidência do raio de luz para o qual há reflexão total, sendo calculado pela Lei de Snell: $n_1 \cdot \text{sen } \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen } \theta_2$. Para ângulos maiores que o crítico, a luz é totalmente refletida, permanecendo o sinal a viajar pelo núcleo. Para ângulos menores, a luz é refratada e, uma vez fora do núcleo, é absorvida pela casca ou outra camada protetora. Em alguns casos, o sinal pode continuar a propagar-se na casca, em outros, pode não ser mais recuperado.

Já o ângulo de aceitação é o maior ângulo de lançamento de um raio de luz para que se dê a reflexão interna total. O seno deste ângulo é a abertura numérica, $AN = \text{sen } \theta_{ac} = [(n_{co})^2 - (n_{cl})^2]^{1/2}$, parâmetro importante na determinação das características da fibra no que diz respeito à capacidade de capturar luz de uma fonte com sinal não ideal, da qual a luz chega a ângulos relativamente grandes.

3.2 Sensores de Fibra Óptica

3.2.1 Conceituação

Sensor de fibra óptica (SFO) é um transdutor pelo qual as propriedades da luz, que viaja no seu interior, são moduladas em resposta a um estímulo: físico, químico, biológico. Toda ou parte da fibra óptica pode estar em contato com o fator estimulante.

A. Histórico

A tecnologia das fibras ópticas teve suas primeiras aplicações nas telecomunicações, para transporte de dados. Trabalhos iniciais com fibra na configuração de sensores datam de 25 anos, quando resumiam-se a duas categorias: (a) sensores de fibra óptica relativamente simples, logo transformados em produtos comerciais por pequenas empresas, para desempenhar medições em mercados especializados; (b) sensores de fibra óptica mais complexos - giroscópios e hidrofones acústicos - buscados por grandes indústrias para acessar mercados potencialmente grandes: aplicações em materiais para aeronaves, submarinos.

Entre 1980 e 1990, sensores de fibra óptica foram introduzidos no mercado, competindo diretamente com a tecnologia de sensores convencionais. A conquista do mercado foi lenta, devido, em grande parte, ao alto custo de um número limitado de componentes.

Esta situação tem mudado rapidamente. Simultâneas melhoras e redução de custos nos componentes optoeletrônicos, em combinação com produção em massa levaram à emergência de novos produtos. Estes fatores têm sido complementados pela crescente confiança e qualidade dos componentes [17].

B. Aplicações

Existem muitas aplicações da medição com sensores de fibra óptica, envolvendo, em cada uma delas, um sensor diferente. Entre algumas das grandezas que podem ser medidas estão: intensidade da luz, deslocamento, amplitude e fase de vibração, rotação, aceleração, pressão, deformação, pressão sonora, fluxo, nível de líquidos, temperatura, intensidade de campos elétricos e magnéticos e radiação. Sistemas sensores de fibras ópticas têm sido usados nas mais diversas áreas para avaliações não destrutivas de materiais e estruturas, em aplicações biomédicas, aeroespaciais, químicas e na construção civil, entre outras.

3.2.2 Classificação

Fibras ópticas são usadas como sensores de efeitos ambientais de duas formas distintas. Elas podem ser usadas estritamente como meio de transporte do feixe de luz até a região sensora, para que nele seja impressa a informação, e desta até um receptor remoto, tratando-se de um sensor *extrínseco*. Quando as propriedades da própria fibra óptica são usadas para converter uma ação externa em modulação do feixe de luz que viaja através dela, configura-se um sensor *intrínseco*.

A luz que propaga em sensores de fibra *extrínsecos* viaja dentro e fora da fibra para alcançar a região sensora, interagindo com o ambiente a ser analisado e sendo modulada em resposta a um mensurando particular. Sensores de fibra óptica *extrínsecos* se distinguem pela característica que o sensor toma lugar em uma região fora da fibra. Neles, a modulação da luz é feita sem alteração das propriedades ópticas da fibra, cujas funções se limitam à transmissão da radiação.

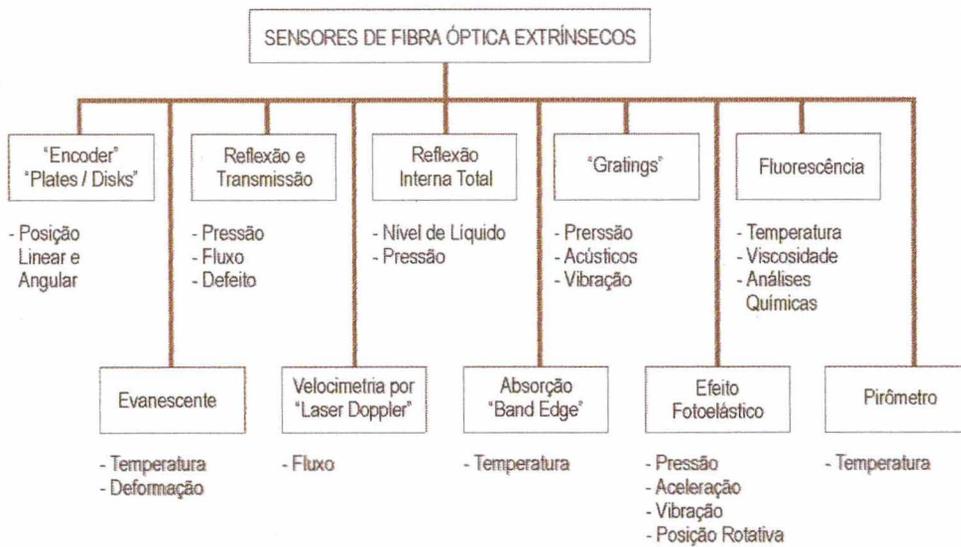
Para os sensores *intrínsecos* ou "*all-fiber*", a mudança das propriedades da fibra tem um importante papel na modulação da luz. Neles, o sensor toma lugar dentro da própria fibra. A modulação é feita pelo mensurando através da interação do feixe de luz

com a fibra óptica perturbada, ou seja, o efeito de interesse é convertido em um sinal de luz dentro da fibra.

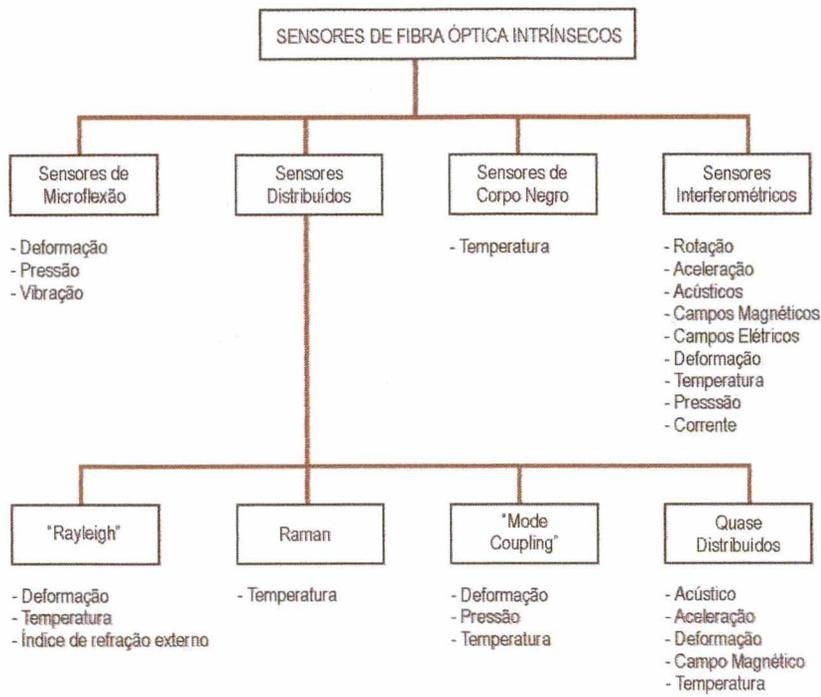
A classe dos sensores de fibra óptica intrínsecos pode ser dividida em subclasses, segundo a consideração do tipo de modulação impressa ao feixe de luz, tais como modulação em intensidade, fase ou polarização, que podem ser medidas com alto grau de precisão usando técnicas interferométricas, dando origem a uma grande e importante subclasse dos sensores de fibra óptica intrínsecos, os sensores interferométricos. Muitos dos sensores de mais alta performance fazem parte desse grupo.

A ação do efeito de interesse sobre este tipo de sensor é geralmente baseada em mudanças no comprimento do caminho óptico efetivo do feixe de luz, como uma consequência de sua ação na fibra óptica.

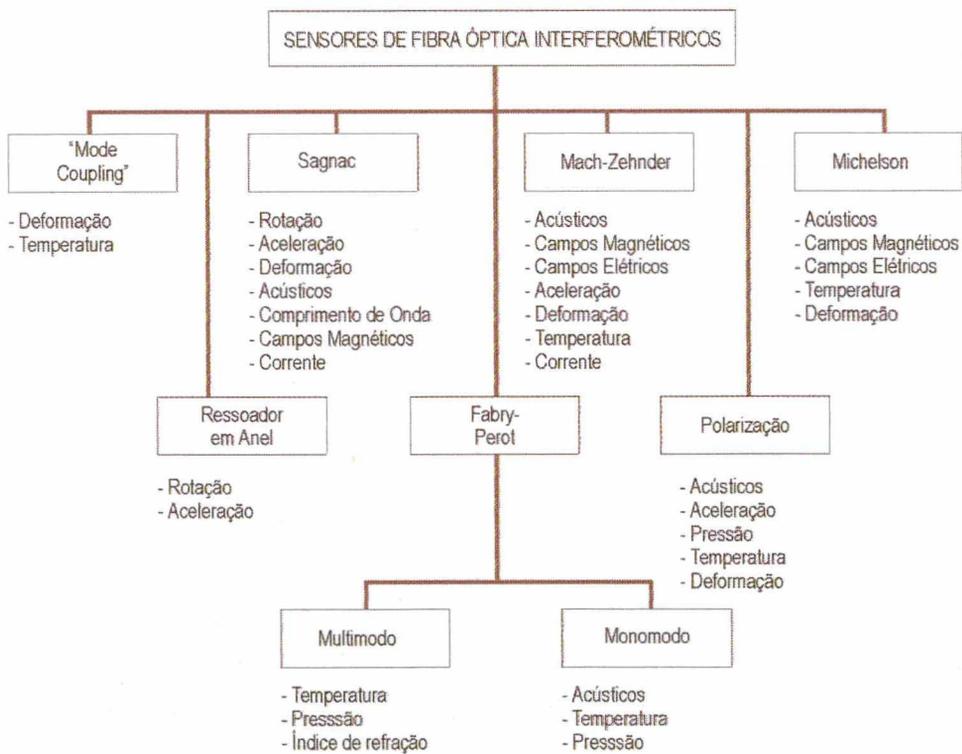
A Figura 3.5 dá uma visão geral dos tipos de sensores de fibra óptica que estão sendo desenvolvidos e as respectivas grandezas medidas. Pode-se observar que qualquer grandeza pode ser convertida em um sinal óptico a ser interpretado.



(a) Sensores de Fibra Óptica Extrínsecos;



(b) Sensores de Fibra Óptica Intrínsecos;



(c) Sensores de Fibra Óptica Interferométricos.

Figura 3.5 - Tipos e aplicações dos sensores de fibra óptica: (a) extrínsecos, (b) intrínsecos, (c) interferométricos [17].

3.2.3 Sensores Clássicos

Conforme visto na Figura 3.5, várias grandezas podem ser medidas por sensores de fibra óptica de configurações de semelhantes. Deve-se então, projetar o sensor para que apenas a grandeza desejada seja monitorada.

Alguns dos sensores mais conhecidos serão brevemente descritos e comparados com relação ao uso e desempenho.

1. Interferômetro de Mach-Zehnder

É o sensor mais conhecido, por ter sido o primeiro a ser desenvolvido. Muitos dos sensores existentes envolvem o interferômetro de Mach-Zehnder, porque seu princípio é muito simples de empregar. Ele é usado, também, para testar outros sensores de fibra óptica. Vários sensores de deformação ("strain gages"), rosetas ("strain rosettes") e sensores de tensão ("stress gages") têm sido desenvolvidos pelo uso de tal interferômetro, simplesmente pelas alterações apropriadas da geometria das fibras sensora e de referência.

A. Princípio de Funcionamento

O sensor de fibra óptica Mach-Zehnder é um sensor interferométrico, no qual a luz que se propaga em uma fibra óptica de referência interfere com a luz que propaga em uma fibra óptica sensora (ativa). A luz de um laser é dividida em dois feixes, cada um é, então, acoplado a uma fibra óptica. Uma das fibras é exposta à grandeza de interesse, enquanto a outra serve como caminho de referência para compensar efeitos indesejáveis. Os dois feixes são recombinados e interferem, dando origem a franjas.

A luz é modulada em intensidade, conforme equação da Figura 3.7, por uma mudança no comprimento do caminho óptico, que resulta em mudança de fase óptica e em correspondente deslocamento das franjas de interferência.

A mudança no caminho óptico se deve à alteração no comprimento da fibra óptica ativa, causada pela grandeza de interesse e pelo efeito birrefringente. Ambas as contribuições para a mudança no comprimento do caminho óptico são integradas sobre o comprimento da fibra ativa. O sinal de intensidade a ser detectado varia como uma senóide, com o acréscimo ou decréscimo da grandeza, conforme Figura 3.6. A mudança de fase desse sinal é medida diretamente contando as franjas movimentadas, que podem ser detectadas por um fotodiodo ou diferentes técnicas.

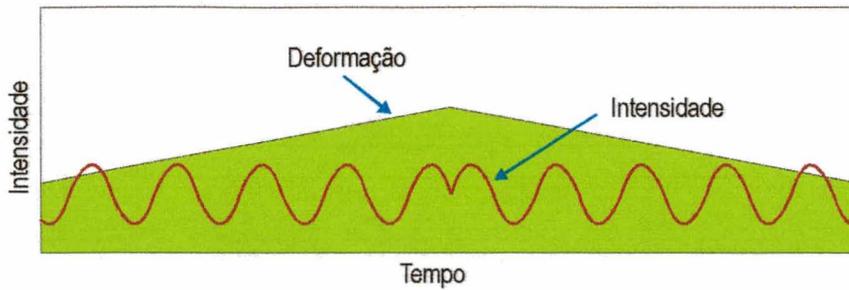


Figura 3.6 - Variação do sinal de intensidade e deformação com o tempo [16].

B. Aspectos Positivos e Limitações

O sensor Mach-Zehnder representado, esquematicamente, na Figura 3.7 é fácil de configurar e apresenta baixo custo.

Estes sensores oferecem extraordinária sensibilidade e têm o potencial de serem multiplexáveis em arranjos de centenas de sensores.

A maior desvantagem deste sensor é a dificuldade de isolar as fibras de campos externos de deformação. Não é adequado para aplicações em campo, pois a fibra é sensível a efeitos do meio, tais como temperatura, tensão, vibração, tornando-se mais recomendável seu uso em laboratórios.

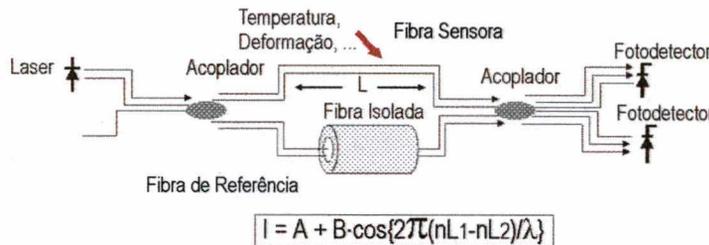


Figura 3.7 - Sensor de fibra óptica Mach-Zehnder [18].

II. Interferômetro de Michelson

Os sensores de fibra óptica que utilizam a configuração do interferômetro de Michelson são sensores que se assemelham aos Mach-Zehnder operando em reflexão.

A. Princípio de Funcionamento

Conforme pode ser observado na Figura 3.8, as fibras são fendidas e espelhos são formados em suas extremidades, pela deposição de alumínio.

Os feixes de luz introduzidos nas duas fibras, de referência e sensora, viajam até os espelhos e retornam para interferir. Quando a fibra ativa (sensora) é exposta à grandeza de interesse, há uma modificação proporcional do seu comprimento, que

provoca mudança de fase do sinal a viajar no seu interior e movimentação das franjas de interferência.

Da mesma forma que para o sensor de Mach-Zehnder, para contar as franjas deslocadas, mede-se a intensidade do sinal de interferência.

B. Aspectos Positivos e Limitações

A sensibilidade do sensor de deformação Michelson é alta, sendo duas vezes maior que a do Mach-Zehnder, por operar em reflexão. Sensores com poucos milímetros de comprimento são suficientes.

Como o sensor de Mach-Zehnder, sensores Michelson com fibras insensíveis ao meio são difíceis de projetar. A solução mais comum é sujeitar as fibras de entrada e saída a campos aproximadamente idênticos, cancelando assim, efeitos diferenciados indesejáveis.

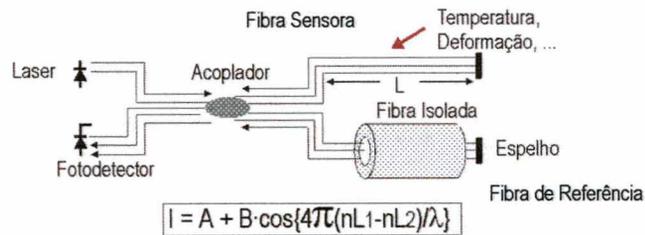


Figura 3.8 - Sensor de fibra óptica Michelson [18].

III. Interferômetro de Fabry-Perot

O sensor de fibra óptica que utiliza a configuração do interferômetro Fabry-Perot foi introduzido como opção de um sistema em que uma única fibra óptica é utilizada.

Existem dois tipos de interferômetros de Fabry-Perot, extrínseco e intrínseco, que podem operar com fibras multimodo e fibras monomodo.

Em geral, sensores multimodo oferecem vantagens sobre os monomodo como: possibilidade de acoplamento eficiente da luz de diodos emissores de luz (LED), que são fontes de luz mais baratas e de longa duração; usam conectores e outros componentes comumente disponíveis; são de fácil divisão da fibra.

No caso dos sensores de Fabry-Perot que usam fibras multimodo, além desses benefícios, existem alguns adicionais: os elementos sensores são mais baratos, além de grande variedade de tipos de sensor usarem a mesma forma de leitura óptica.

Sensores interferométricos multimodo têm menor sensibilidade que os monomodo, mas isso não costuma ser um problema em aplicações industriais.

A. Princípio de Funcionamento

Interferômetros de Fabry-Perot são construídos utilizando dois refletores (espelhos). No caso do sensor extrínseco, Figura 3.9, a fibra é dividida em duas outras, cujas extremidades são colocadas em uma cavidade. Os refletores, localizados nas extremidades de cada fibra, são separados por uma camada de ar.

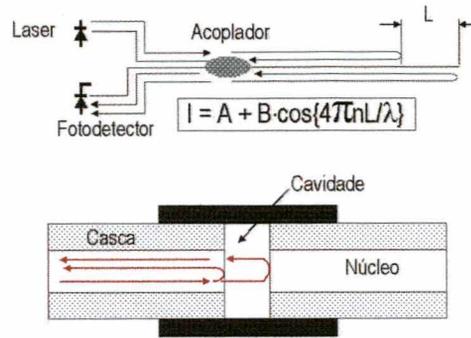


Figura 3.9 - Sensor de fibra óptica Fabry-Perot extrínseco [18].

Nos sensores intrínsecos, forma-se uma cavidade na fibra, removendo-se um pequeno segmento da mesma, por técnicas controladas. Numa das faces fendidas, entre a fibra e a cavidade, é depositado material parcialmente refletor (como TiO₂). Da mesma forma, na outra face da fenda, um revestimento totalmente refletor é depositado. Ao final, o segmento é colocado em sua posição original por uma técnica de emenda por fusão, obtendo-se por resultado o que se pode observar esquematicamente na Figura 3.10.

Neste caso, o meio que separa os espelhos é mesmo, o material da própria fibra, assim o índice de refração utilizado na equação da intensidade, I, abaixo, é o do vidro. Em ambos os casos é conhecido o espaçamento entre as superfícies refletoras.

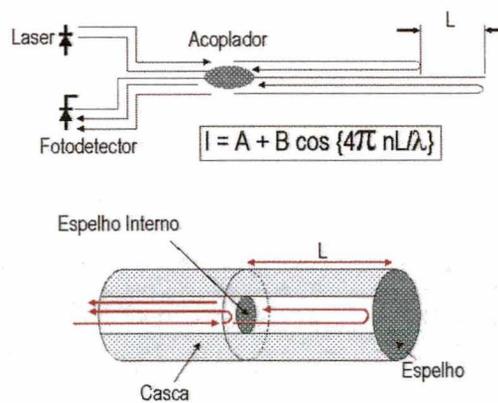


Figura 3.10 - Sensor de fibra óptica Fabry-Perot intrínseco [18].

A luz é injetada na fibra. Parte dela retorna ao atingir o primeiro espelho (parcial: 50%), interno, e parte o atravessa. Ao atingir o segundo espelho (100%), externo, toda a luz restante retorna, interferindo com o primeiro feixe, de referência. Quando o material

em que o sensor está instalado sofre alguma influência externa, a distância entre os espelhos varia, e a interferência é então proporcional a ela.

A intensidade da luz refletida do primeiro e segundo espelhos é medida. Os parâmetros ópticos dos sensores de fibra óptica que afetam a intensidade da luz são a mudança no comprimento entre os dois espelhos e a mudança no índice de refração da substância entre os mesmos. Para o caso intrínseco, a substância entre os dois espelhos é o vidro, e para o extrínseco é o ar.

B. Aspectos Positivos e Limitações

Tal sensor combina as vantagens da alta sensibilidade dos sensores Mach-Zehnder e Michelson com a vantagem de um único condutor óptico (fibra), o que simplifica a produção e leva a resultados livres de efeitos do meio já que o feixe de referência e o feixe sensor se propagam através da mesma fibra.

O comprimento do sensor pode ser melhor controlado durante sua fabricação.

O sensor Fabry-Perot intrínseco não é muito fácil de construir. A presença de uma fina camada de proteção, geralmente de vidro, faz o sensor relativamente frágil, especialmente sob flexão ou pressão direta.

O sensor Fabry-Perot extrínseco tem muitas das qualidades do intrínseco, mas não há necessidade da emenda parcialmente refletora, pois faz uso de uma cavidade. Mas vantagens da remoção dessa emenda são compensadas pela adição de outras dificuldades de implementação.

3.2.4 Aspectos Positivos e Limitações dos Sensores de Fibra Óptica

Tabela 3.3 - Aspectos positivos e limitações no uso de sensores de fibra óptica.

ASPECTOS POSITIVOS
Alta densidade de informações - grande largura de banda
Grande velocidade de transmissão de dados
Capacidade de transmissões por longas distâncias
Possibilidade de multiplexação
Versatilidade de aplicação - vários mensurandos
Estabilidade do material constituinte - vidro
Robustez perante efeitos ambientais
Passividade química - imunidade à corrosão
Passividade elétrica - isolamento e eliminação de caminhos condutivos, não requerem blindagem, o que elevaria o custo, a massa e as dimensões dos sensores, inviabilizando algumas aplicações
Imunidade à interferência eletromagnética
Alta sensibilidade

Dimensões reduzidas - geometria flexível - aplicações especiais

Compatibilidade com uso externo - fixos à superfície, e interno - embutidos

LIMITAÇÕES

Ambigüidade na contagem de franjas: mesma intensidade no tempo para aumento e decréscimo da grandeza

Dificuldade de aderência fibra/matriz - ligação descontínua e irregular - deslizamento

Sensibilidade a muitos parâmetros - dificuldade de fazer um medidor sensível a apenas uma grandeza

Diferenças de linearidade entre o parâmetro detectado e o sinal de saída do interferômetro - processamento leva a menor desempenho e maior ruído no sistema

4.1 Caracterização das Deformações

4.1.1 Instrumentação e Técnicas de Medição de Deformação

Existem diferentes técnicas e instrumentação para caracterizar a deformação de materiais cimentícios como a argamassa. Serão abordadas as técnicas convencionais de medição, juntamente com seu princípio de funcionamento, equacionamento, descrição da instrumentação envolvida e ainda, aspectos positivos e limitações de cada sistema de medição. Podem ser citados sistemas mecânicos, elétricos, eletromagnéticos, eletro-ópticos e pneumáticos. De forma a caracterizar alguns deles, apresentam-se as Figuras 4.1 a 4.6, e a Tabela 4.1.

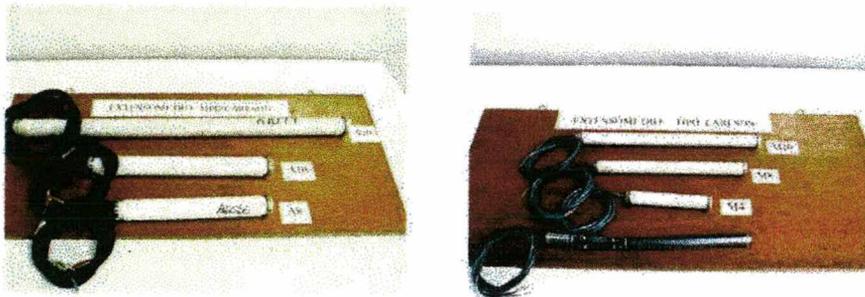


Figura 4.1 - Extensômetros Carlson para medição de deformação [10].



Figura 4.2 - Esquema da medição de deformação usando transdutores indutivos [10].

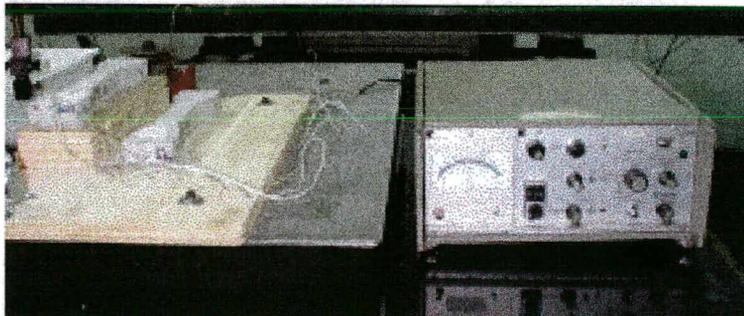


Figura 4.3 - Esquema da medição de deformação com extensômetros [10].

Tabela 4.1 - Comparação entre os métodos de medição de deformação em argamassa [10].

DESCRIÇÃO	EXTENSÔMETROS MECÂNICOS			EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS		TRANSDUTORES INDUTIVOS	SFO
	Fixados CDP	Móveis	Base Fixa	Strain Gage	Tipo Carlson		
Mensurando	ΔL	ΔL	ΔL	ΔR	ΔR	ΔV	$\Delta \phi$
Tensões	Estáticas	Estáticas	Estáticas	Estáticas Dinâmicas	Estáticas Quase Estáticas	Estáticas Dinâmicas	Estáticas Dinâmicas
Esforços	compressivos: longitudinais curta duração	tração compressão	tração compressão	tração compressão flexão - torção	tração compressão	tração compressão flexão	tração compressão flexão
Ensaio	capacidade de deformação E, v	retração, expansão, variações de volume	expansão retração	capacidade de deformação E, α , v [1] E, α , v, retração [2]	capacidade de deformação E, v, retração fluência	capacidade de deformação E, v, retração fluência	E, v, fluência
Geometria CDP	prismáticos cilíndricos	prismáticos cilíndricos	prismáticos cilíndricos	prismáticos cilíndricos	prismáticos cilíndricos	prismáticos cilíndricos	prismáticos cilíndricos
Dimensões CDP [mm]	150x300 250x500 450x900	25x25x250 76x76x381 100x100x762 203x203x1219 76x152 [3] 457x914 914x1829 [4]	25x25x250 50x50x250 100x100x250	Variam com a dimensão do sensor (2, 5, 20, 30, 70, 120, 250)	Variam com a dimensão do sensor (40, 80, 100, 200)	150x300 250x500 450x900	25x25x100 ... 500x500x5000
Fixação	estribos/garras embutidos	colados embutidos puncionados	fixados extremidades CDP	colados embutidos	embutidos	estribos/garras	colados embutidos
Equação	$\epsilon = \Delta L/L_0$	$\epsilon = \Delta L/L_0$	$\epsilon = \Delta L/L_0$	$\epsilon = \Delta R/R \approx \Delta L/L_0$	$R = r E \Delta L/G S$	$\epsilon = \Delta L/L_0$	$\epsilon = \Delta \phi \cdot \lambda / 2\pi \cdot n \cdot l$
Limitações	excentricidade fixação	excentricidade fixação	Medição pontual Tamanho máximo do agregado [19 a 38 mm]	Garantia de aderência Compensação temperatura Não resistem à umidade	Garantir perfeita transmissão deformação entre material e matriz	excentricidade fixação	Ensaio de laboratório Ambiente calmo CDP gêmeos
Aspectos Positivos	Imunes à umidade Fornecem deformação longitudinal e transversal	Não precisam ficar fixos ao CDP durante o ensaio	Facilidade de acoplamento do CDP Facilidade de uso	Fácil fixação, emprego, leitura, versatilidade, sensibilidade	Monitoração simultânea de temperatura e deformação	Não há fricção Resolução infinita Não há histerese Maior vida útil	Sensibilidade Imunidade à água Sensor distribuído (não pontual)
Método Leitura	Direta	Direta	Direta	Direta	Balanceamento Nulo	Direta	Indireta
UTS	relógio comparador	relógio comparador	relógio comparador	ponte amplificadora	ponte de Wheatstone	gerador de frequência, demodulador, amplificador	câmera de tv, laser, computador, programa
Faixa Medição	10 a 100 μm	0,50 a 2 μm	0,50 a 2 μm	até 100000 μm	1,6 a 3900 μm $\Delta T = 0,1 F$	1,2 a 250 mm	0 a 500 $\mu m/m$
Exemplos	compressômetro expansômetro	Tensotast Placa pivotada Multiposições	Horizontal Vertical	Colados Roseta De embutir	Modelo A Modelo M	LVDT [5] DCDT [6] RVDT [7]	Fabry-Perot Michelson Mach-Zehnder

[1] de embutir
[2] de colar
[3] prismáticos

[4] cilíndricos
[5] "Linear Variable Differential Transformer"
[6] "Current Differential Transformer"

[7] "Rotary Variable Differential Transformer"

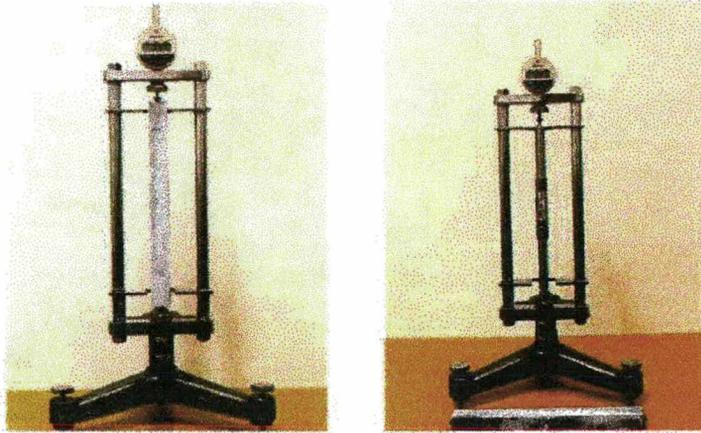


Figura 4.4 - Esquema da medição de deformação com comparadores de base fixa [10].

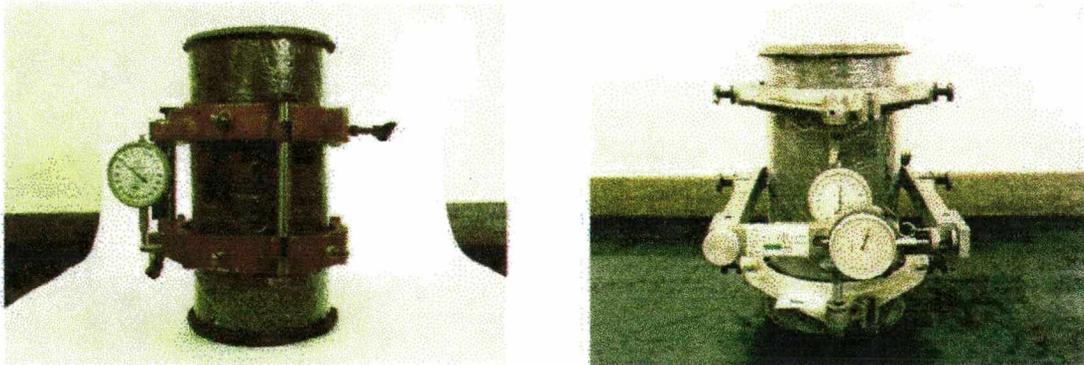


Figura 4.5 - Esquema da medição de deformação com extensômetros mecânicos fixos [10].

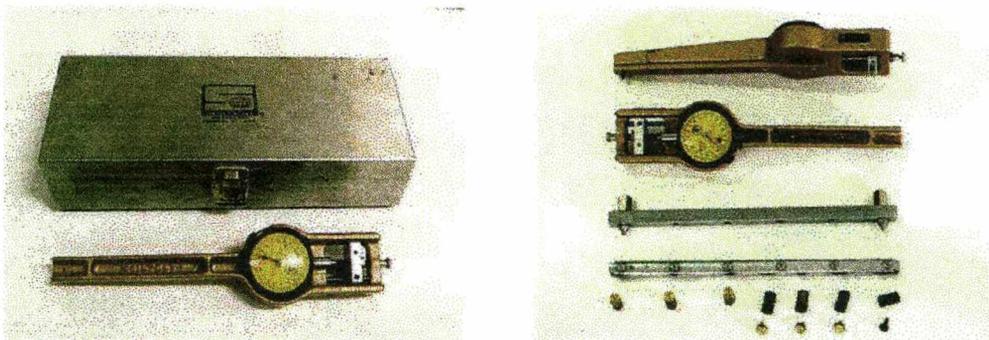


Figura 4.6 - Esquema da medição de deformação com extensômetros mecânicos de base móvel [10].

4.2 Requisitos Necessários para Medição de Deformação Lenta (Fluência)

A caracterização da deformação em argamassas e concretos reveste-se de particularidades. Trata-se de uma grandeza desencadeada por diversos fatores e, por isso existem diferentes tipos de deformação, sendo difícil isolar um tipo dos demais.

Para identificar os tipos de deformação é necessário um sistema de elevada sensibilidade, que consiga separar fluência, retração, deformação elástica, deformação

autógena e contração plástica. Além disso, um sistema de medição de fluência requer elevada estabilidade no decorrer do tempo, já que trata-se de um ensaio de longa duração.

A imunidade aos efeitos da água é, também, um requisito necessário, já que as condições impostas ao ensaio são bastante rígidas, e qualquer variação de temperatura e umidade, fora da faixa estabelecida, poderá provocar variações volumétricas significativas no corpo de prova. Portanto, o ensaio em ambiente saturado (100% de umidade) ou mesmo dentro d'água parece ser uma solução eficaz para eliminar a influência da umidade e minimizar os efeitos da variação de temperatura.

4.2.1 Escolha dos Sensores de Fibra Óptica

O sensor de fibra óptica foi escolhido, fundamentalmente, por seu princípio de operação interferométrico, que oferece a possibilidade de compensar efeitos indesejáveis como retração, transformações químicas, entre outros, através de corpo de prova gêmeo.

A elevada sensibilidade e estabilidade que este sistema possui o tornam capaz de medir os baixos níveis de deformação à tração da argamassa, assim como suas variações lentas.

Além disso, por estar distribuído em uma região mais abrangente do corpo de prova, fornece informações distribuídas (não pontuais), o que proporciona melhor representação do fenômeno.

E não menos importante, o sensor de fibra óptica oferece a possibilidade de medir dentro d'água, minimizando efeitos de retração, e relaxa as necessidades de controle ambiental, característica muito importante para os ensaios realizados em laboratórios de materiais de construção civil, nos quais nem sempre o controle das condições ambientais pode ser tão rigoroso.

4.3 Caracterização e Princípio de Operação do Sensor Proposto

4.3.1 Sensor de Fibra Óptica Mach-Zehnder

Para medição da deformação lenta à tração em argamassa, optou-se por implementar um sensor de fibra óptica interferométrico, de alta sensibilidade, e, para isso, foi adotado o princípio de operação proposto por Mach-Zehnder, detalhado no Capítulo 3 - Sensores de Fibra Óptica.

Na confecção do sensor foi usada fibra óptica monomodo, cujos principais parâmetros ópticos e físicos obtidos encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características e propriedades da fibra óptica utilizada.

FIBRA ÓPTICA MONOMODO	
$\phi_{\text{núcleo}} [\mu\text{m}]$	9,43-9,46
$\phi_{\text{casca}} [\mu\text{m}]$	125-126
$\phi_{\text{revestimento}} [\mu\text{m}]$	245-249
Índice de Refração	1,476
Tensão de Ruptura [GPa]	0,7

4.3.2 Modelo Matemático da Deformação Medida com Sensor de Fibra Óptica

Como trata-se de uma técnica interferométrica, é necessário que existam dois sinais para formar a interferência. Parte-se, então, de dois feixes de luz do mesmo laser, HeNe, que percorrem, no interior de duas fibras, de referência e ativa, caminhos ópticos de aproximadamente mesmo comprimento inicial.

O feixe de referência é afetado apenas por grandezas comuns aos dois corpos de prova: temperatura, umidade e retração, sendo considerado feixe de compensação dos efeitos indesejáveis. Já o feixe ativo é influenciado pelas mesmas grandezas anteriormente citadas e também pela grandeza de interesse: a deformação.

A combinação dos dois feixes resulta em franjas de interferência teoricamente estáveis. Quando tração é aplicada ao corpo de prova ativo, gerando deformação da fibra sensora do interferômetro, a fibra óptica se alonga e um dos caminhos ópticos fica maior em alguns comprimentos de onda, fazendo com que o feixe demore um tempo maior para atravessar a fibra.

O aumento do caminho óptico leva à mudança de fase do feixe de luz ativo, enquanto a fase do outro feixe fica inalterada no que se refere à tensão. Com isso, as franjas de interferência entram em movimento, proporcional à diferença entre a deformação sofrida pelo corpo de prova ativo em relação ao corpo de prova gêmeo de referência.

Portanto, a grandeza a ser medida para obter a deformação do material é a variação do ângulo de fase do sinal de luz, que pode ser expresso pela Equação 4.1 [19]:

$$\Delta\phi = \frac{n \cdot \Delta\ell \cdot 2 \cdot \pi}{\lambda} \quad [4.1]$$

Onde:

$\Delta\phi$: variação do ângulo de fase do feixe de luz [rad]

n : índice de refração do material da fibra óptica

$\Delta\ell$: variação de comprimento do sensor de fibra óptica [m]

λ : comprimento de onda da fonte de laser HeNe utilizada [μm]

Para medir o ângulo de fase utilizou-se o algoritmo de Hariharan [19], conforme a Equação 4.2:

$$\text{tg}\phi = \frac{[I_{-\alpha} - I_{\alpha}]}{I_0 - I_{-2\alpha} - I_{2\alpha}} \quad [4.2]$$

Onde:

ϕ : ângulo de fase [rad]

I_{α} : intensidade de luz correspondente à posição de cada detector virtual,

$$\alpha = \pi/2$$

A partir desse algoritmo e com mais algumas ferramentas, foi elaborado um programa para, em combinação com uma câmera de televisão, adquirir a imagem do sinal de interferência, digitalizá-la e calcular o ângulo de fase associado às franjas de interferência. Monitora-se a intensidade da luz em cada um de 5 detectores virtuais distribuídos na região correspondente a uma franja (360°). Uma foto da tela do Conta Franja e um fluxograma das principais rotinas do programa são apresentados nas Figuras 4.7 e 4.8, a seguir.

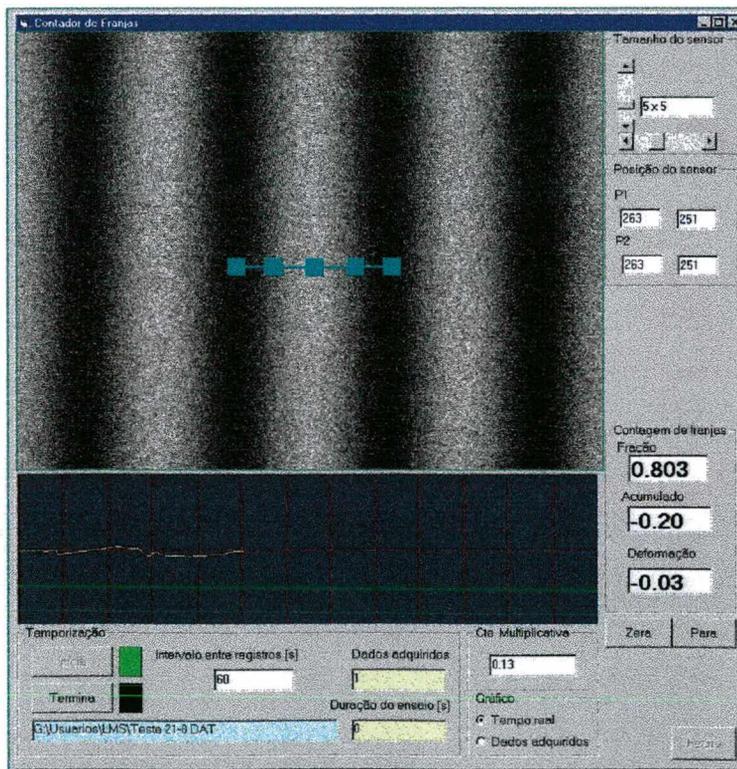


Figura 4.7 - Tela principal do programa Conta Franja.

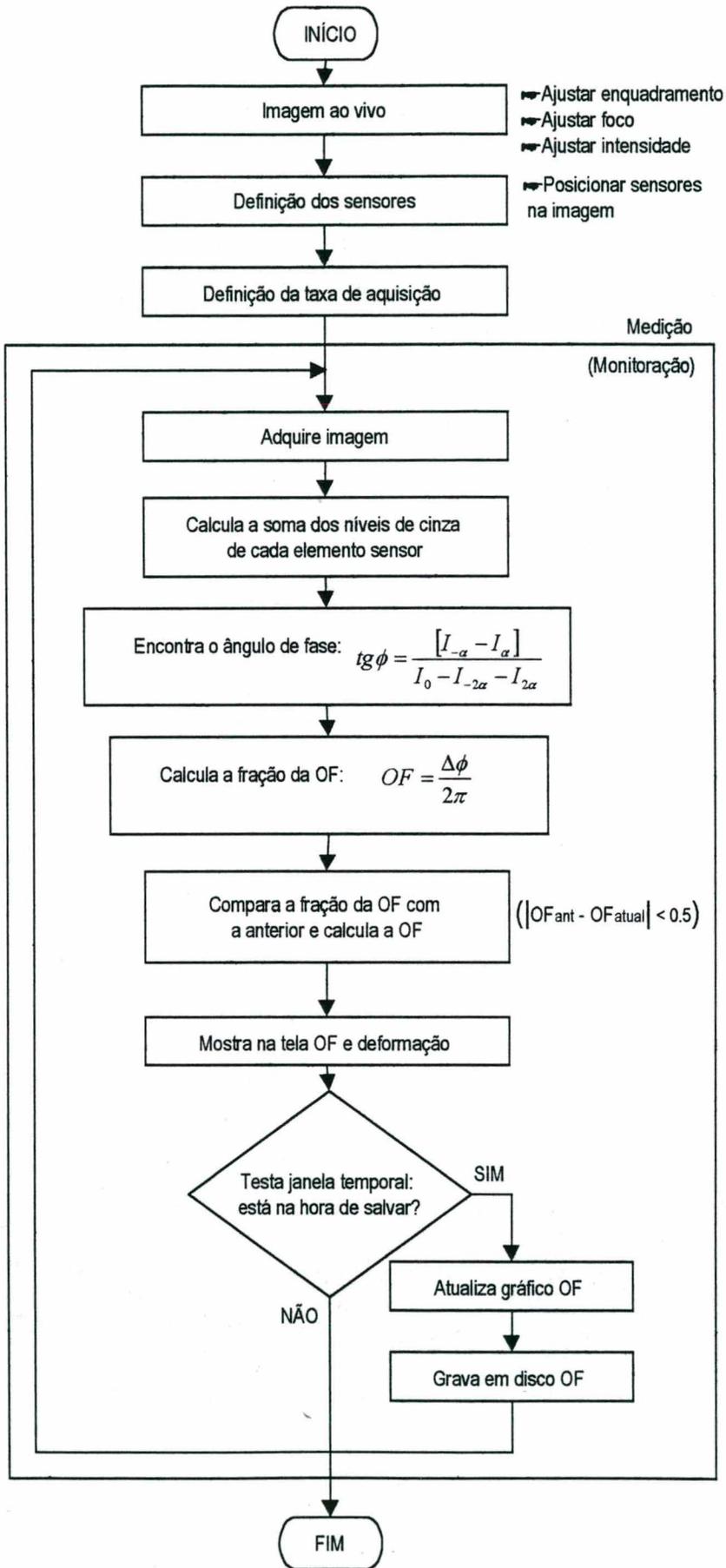


Figura 4.8 - Fluxograma explicativo do programa Conta Franja.

A relação entre o ângulo de fase do sinal de luz e a deformação obtida com o sensor de fibra óptica se dá pela expressão fornecida pela óptica, mostrada na Equação 4.3 [19]:

$$\varepsilon_{SFO} = \frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{\Delta \phi \cdot \lambda}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot \ell} \quad [4.3]$$

Onde:

ε_{SFO} : deformação obtida com o sensor de fibra óptica [$\mu\text{m}/\text{m}$]

ℓ : comprimento inicial do sensor de fibra óptica [m]

A deformação medida com sensor de fibra óptica pode ser expressa, em termos de ordem de franja, pela Equação 4.4 [14]:

$$\varepsilon_{SFO} = \frac{\lambda \cdot OF}{n \cdot \ell} \quad [4.4]$$

Onde:

$OF = \frac{\Delta \phi}{2\pi}$: ordem de franja, ou número de franjas movimentadas no ensaio.

4.4 Preparação dos Corpos de Prova

4.4.1 Forma e Dimensões

Devido ao fato de não existir norma brasileira para ensaio de tração direta em corpos de prova de argamassa foi necessário pesquisar formas e dimensões para os corpos de prova, que se adequassem à presença dos sensores de fibra óptica.

De início houveram tentativas de se utilizar corpos de prova retangulares, mas não houve sucesso devido à necessidade de pinos internos para tracionar a fibra, que acabavam por reduzir sua seção transversal, levando à uma menor resistência e ruptura nessa região durante os ensaios.

Em uma pesquisa [8] foi referenciada a norma ASTM C 190 - "*Standard Test Method for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars*" [20] para ensaio de tração direta em argamassas, a qual propõe forma e dimensões para os corpos de prova usados em tais ensaios. Contudo, a adoção de tal proposta levaria à necessidade de serem confeccionadas garras especiais para acoplar em máquinas de tração, e isso se afastaria dos objetivos deste trabalho, portanto, foi dada continuidade à busca por algo mais simples.

Foi proposta, então, a forma de halteres ou 'osso de cachorro' e depois de alguns testes, foram adotadas as dimensões detalhadas na Figura 4.9, já utilizadas por um pesquisador [21] para caracterizar argamassas reforçadas com fibras vegetais e de aço, quanto à resistência à tração direta.

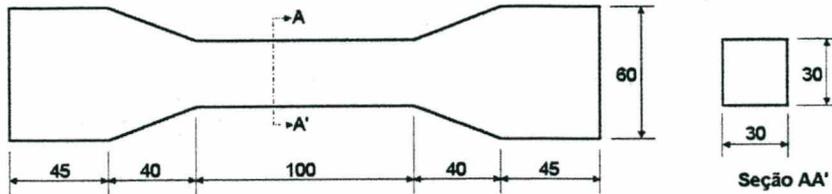


Figura 4.9 - Representação da forma e dimensões adotadas para os corpos de prova.

Como a forma e as dimensões definidas para os corpos de prova são bastante especiais, foi necessário confeccionar fôrmas para moldá-los. Dos trabalhos nesse sentido, resultaram três pares de fôrmas, dois de madeira e um de nylon.

4.4.2 Materiais Utilizados na Composição das Argamassas

Para confeccionar os corpos de prova foi utilizada Areia Normal Brasileira, com granulometria controlada, frações grossa, média grossa, média fina e fina, de grãos de tamanho máximo passante nas peneiras de malhas 16, 30, 50 e 100 µm, especialmente utilizada para ensaios de laboratório, o que torna possível diminuir o número de variáveis presentes na determinação das características do material.

O cimento usado é do tipo Portland CP I S 32, que contém um nível muito baixo de impurezas, próprio para trabalhos de laboratório. E a cal é do tipo hidratada. A caracterização de tais materiais, fornecida pelos fabricantes, encontra-se nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5.

Tabela 4.3 - Caracterização do cimento utilizado - Ensaios Químicos.

Ensaios Químicos									
Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P.Fogo	CaOL	R. Ins.	Eq. Alc.
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
4,32	19,76	2,63	62,25	4,36	2,51	3,49	1,29	0,36	0,76

Tabela 4.4 - Caracterização do cimento utilizado - Ensaios Físicos.

Ensaios Físicos									
Exp. Quente	Tempo de Peqa (min)		Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão (MPa)			
	mm	Início				Final	m ² /kg	%	%
0,5	180	260	349	0,7	4,3	15,1	30,8	36,3	44,7

Tabela 4.5 - Caracterização da cal utilizada - Ensaios Químicos.

Ensaios Químicos								
CO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	SO ₃	P.Fogo	CaOL	R. Ins.
%	%	%	%	%	%	%	%	%
1,2	74,1	0,1	0,5	1	0,1	24,5	71	0,3

A composição das argamassas baseou-se, de início, no traço 1:1:6 em volume, de cimento, cal e areia, originando um material mais deformável. Posteriormente, para testar a sensibilidade do sensor, os corpos de prova foram moldados com argamassa de traço 1:3, que gerou um material menos deformável.

As propriedades mecânicas esperadas para o material foram tabeladas no Capítulo 2 - A Argamassa.

4.4.3 Produção dos Corpos de Prova de Argamassa

A mistura mecânica dos materiais, para produzir a argamassa, foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção da Engenharia Civil. Foram utilizados equipamentos como balança, para constituir os traços em massa, misturador (argamassadeira) com capacidade para 5 litros, para misturar os materiais, e peneirador de areia, para fazer o adensamento (vibração) do material ao ser colocado nas fôrmas.

O processo de mistura seguiu a norma brasileira NBR 7215 - Ensaio de Cimento Portland [22]. Já para a moldagem e o adensamento foram criados procedimentos especiais, devido ao fato de se tratar de um tipo de corpo de prova para o qual não existem normas específicas.

A cura adotada para os corpos de prova foi ao ar, por facilidade de armazenar e utilizar os corpos de prova e também pela presença de cal na constituição da argamassa. O período inicial, dentro das fôrmas, foi de 48 horas e, como o objetivo principal não era caracterizar o material, não foi estabelecida idade fixa para os ensaios, esses aconteciam respeitando as etapas necessárias à caracterização do sensor implementado. Enquanto isso, os corpos de prova permaneciam ao ar, num ambiente com temperatura de $(22,5 \pm 2)^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar $(42 \pm 5)\%$.

4.5 Instalação do Sensor

4.5.1 Aderência Argamassa/Fibra

A disposição inicialmente adotada para o sensor de fibra óptica, no interior dos corpos de prova, foi passando a fibra uma única vez, de extremidade à extremidade do corpo de prova. Ensaios preliminares demonstraram que a aderência entre a matriz de argamassa e a fibra óptica não é boa, conclusão já citada por alguns autores [23]. Isso foi observado em uma amostra que rompeu durante o ensaio, não apresentando rompimento da fibra, e sim escorregamento.

Conhecida a pobre aderência fibra/matriz, partiu-se em busca de uma maneira adequada e prática de ancorar os dois materiais. Adotou-se um par de pinos roscados, fixos por parafusos internos à base da fôrma, nos quais a fibra é enrolada em forma de bobina, em um número determinado de voltas, de acordo com a sensibilidade desejada, como se observa na Figura 4.10.

Depois de enrolada, a fibra é colada aos pinos, de forma que não se solte no momento da moldagem. Desta forma, os pinos servem para ancorar, pré-tensionar, alinhar e evitar flexão das fibras durante a moldagem.



Figura 4.10 - Pinos de tração da fibra óptica, fixos à base das fôrmas.

4.5.2 Posição da Bobina de Fibra Óptica nos Corpos de Prova

Os pinos de ancoragem e pré-tensão da fibra ficam localizados na região central dos corpos de prova, de maneira que a bobina formada pelas fibras fique paralela às faces do corpo de prova, alinhada com a força a ser aplicada ao mesmo e simétrica em relação a sua linha neutra, conforme esquema da Figura 4.11.

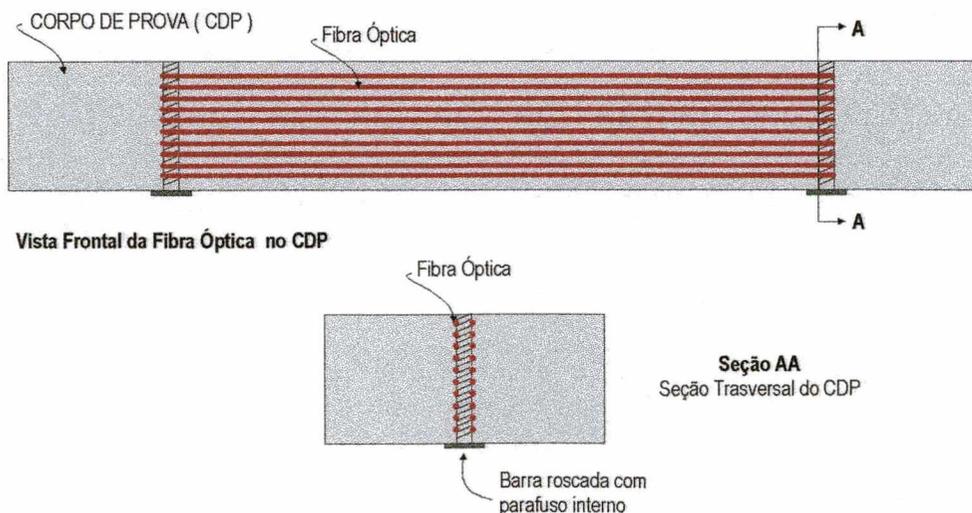


Figura 4.11 - Posicionamento da fibra no corpo de prova: vista frontal e seção transversal.

Instalado o sensor, posicionam-se as fôrmas, montando-as sobre a base, como na Figura 4.12. Os corpos de prova originados estão apresentados na Figura 4.13.

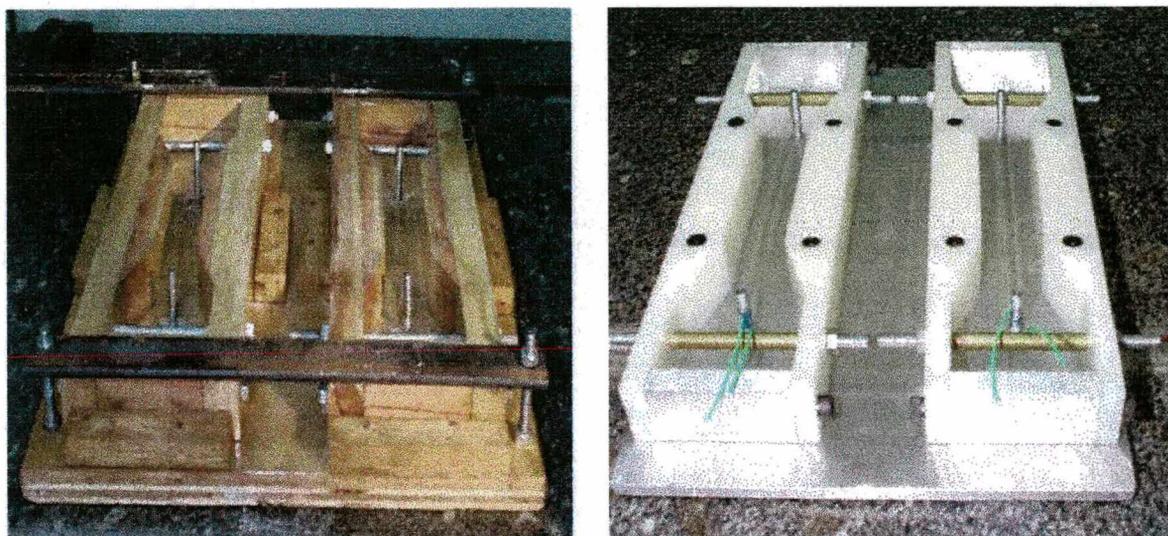


Figura 4.12 - Fôrmas de madeira e nylon, prontas para moldagem.



Figura 4.13 - Corpos de prova de argamassa.

4.5.2.1 Comprimento Equivalente

Como é possível observar através das figuras anteriores, a fibra óptica está distribuída no interior do corpo de prova em regiões de diferentes seções transversais e, por isso, encontra-se exposta a diferentes valores de deformação quando o corpo de prova é tracionado. A maior deformação ocorre na região central, de menor área e seção transversal constante, enquanto a menor ocorre nas extremidades, com seção transversal variável e crescente.

Entretanto, existe um comprimento equivalente de fibra que, se exposto à deformação constante da seção central do corpo de prova, resultaria num número de franjas correspondente ao observado com a fibra exposta às diferentes deformações do corpo de prova real (em forma de halteres). Espera-se que esse comprimento seja maior do que o comprimento disposto na região central, e menor que o comprimento total da fibra embutida na argamassa.

O comprimento equivalente será determinado experimentalmente, através de uma calibração, na qual será medida a deformação na região central do corpo de prova com extensômetros de resistência elétrica, numa configuração conforme a Figura 4.3. A ordem de franja correspondente a essa deformação será medida com a fibra óptica. Com os dois dados obter-se-á uma constante utilizada nos demais ensaios, sempre que se repetirem as mesmas condições: de corpo de prova, distância entre pinos de tração da fibra, número de voltas para formar a bobina e comprimento total da fibra.

4.6 Bancada Experimental

Fazem parte do sistema de medição de deformação com fibras ópticas os elementos da bancada experimental representada nas Figuras 4.14 e 4.15:

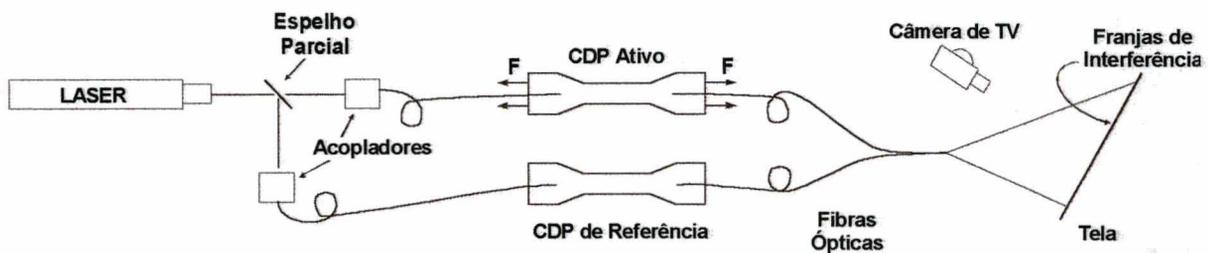


Figura 4.14 - Configuração esquemática da bancada experimental.

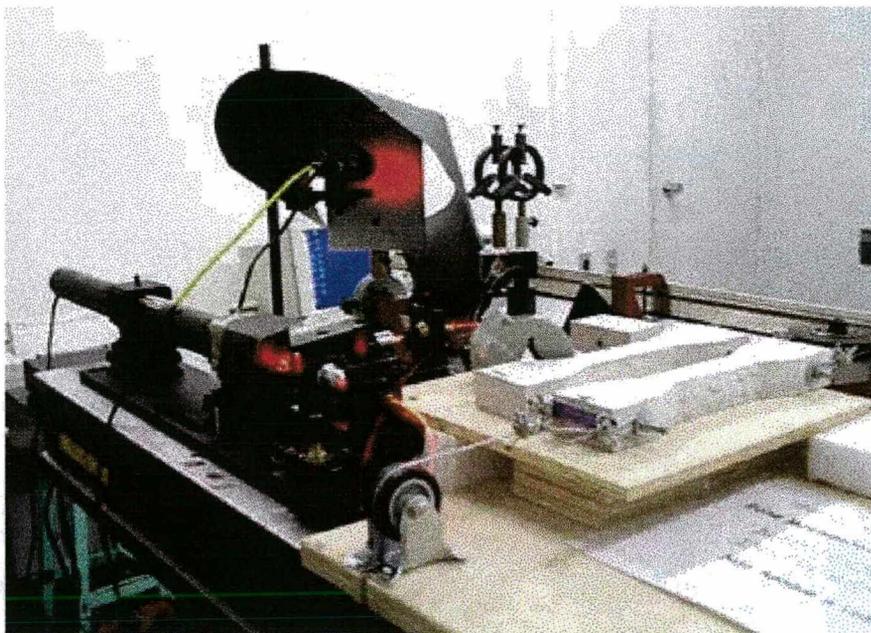


Figura 4.15 - Bancada experimental.

- (a) Fonte de luz: Adotou-se a fonte de luz laser por se tratar de uma luz de grande coerência, com um único comprimento de onda, que para o laser HeNe utilizado, Figura 4.16, é $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$, com potência de 30 mW.

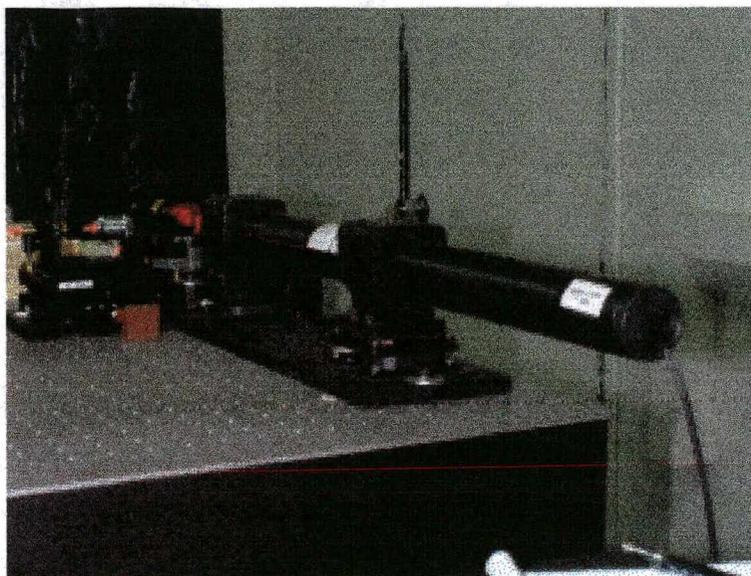


Figura 4.16 - Fonte de luz laser.

(b) Divisor do feixe e acopladores: Para dividir o feixe de luz laser em dois outros, a fim de inseri-los nas fibras ópticas dos dois corpos de prova, utilizou-se um espelho parcial (50%) e dois acopladores ópticos, conforme Figura 4.17.

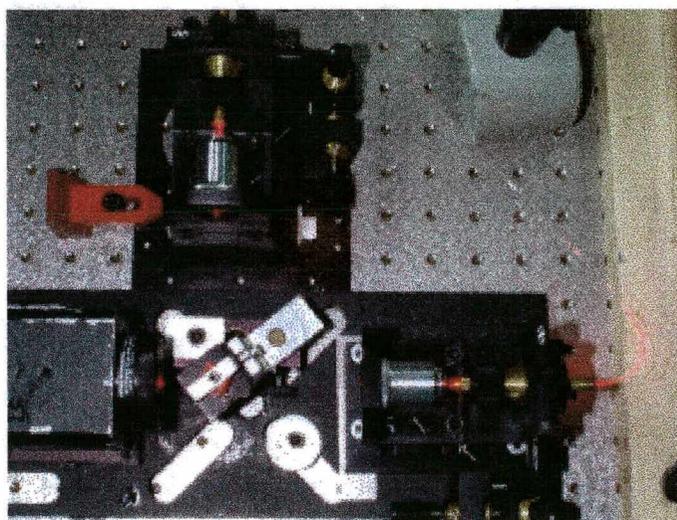


Figura 4.17 - Acoplamento da luz laser nas fibras ópticas.

Inicialmente, o interferômetro montado era semelhante ao da Figura 4.17, formando 90° com as duas fibras, na saída dos corpos de prova, mas a cada ensaio, quando os corpos de prova deveriam ser substituídos, tornava-se muito difícil encontrar as franjas de interferência, devido à necessidade de uma alinhamento bastante rigoroso, tornando muito demorada a preparação para o experimento.

Posteriormente, adotou-se um esquema mais simples, no qual a interferência é obtida unindo as extremidades das fibras ópticas, na saída dos corpos de prova, conforme foto da Figura 4.18.

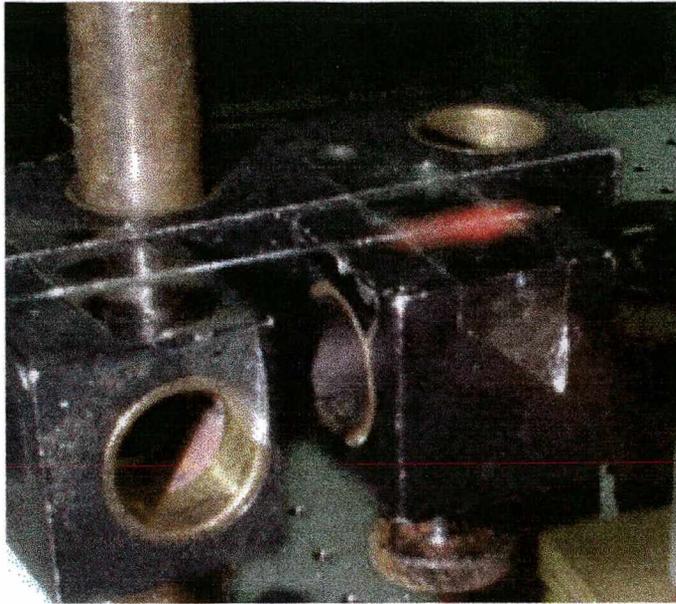


Figura 4.18 - Interferômetro simplificado: duas fibras ópticas, lado a lado, na saída dos corpos de prova.

- (c) Câmera digitalizadora de imagens: Para captação da imagem do sinal de interferência foi utilizada uma câmera de televisão, Figura 4.19, ligada ao computador por uma placa de aquisição de imagens.

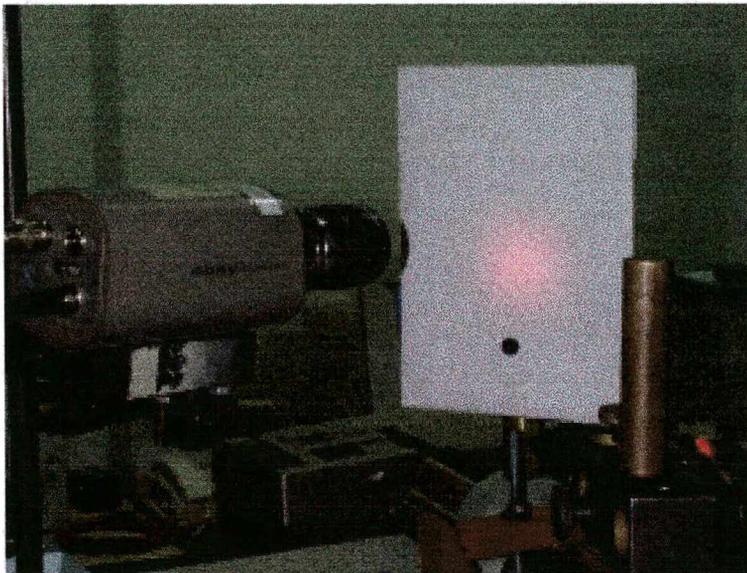


Figura 4.19 - Câmera de televisão adquirindo imagem do sinal de interferência.

- (d) Computador e programa Conta Franjas: Para armazenamento e processamento da imagem (demodulação do sinal - contagem das franjas) foram utilizados um microcomputador e o programa Conta Franja, desenvolvido para obter o ângulo de fase, usado no cálculo da deformação.

4.6.1 Sistema de Tração

Foi escolhido o ensaio de tração direta para testar o sensor de fibra óptica implementado. Para isso, tornou-se necessário um sistema de tração compatível com a necessidade de realização dos ensaios nas dependências do Laboratório de Óptica do LABMETRO.

Em vista disso, foi construído um dispositivo de tração, Figura 4.20, que utiliza uma mesa de tração com plataforma, para nivelar a altura dos corpos de prova em relação às roldanas, utilizadas para distribuir a carga, nas extremidades do corpo de prova ativo.

Um suporte e massas de valor conhecido foram usados para aplicar e manter a carga durante os ensaios de deformação lenta. Devido a limitações do sistema de aquisição de dados, foi necessário adotar uma forma lenta de aplicação da carga, de maneira que as franjas não passassem mais rápido que o sistema é capaz de perceber, sendo ignoradas, e assim prejudicando a medição.

Para isso, fez-se uso de uma câmara de ar, Figura 4.21, disposta sob o suporte das massas, a qual é esvaziada lentamente, carregando o corpo de prova à medida que o ar sai do seu interior.



Figura 4.20 - Mesa de tração.



Figura 4.21 - Sistema de Tração: suporte, massas e dispositivo para aplicar a carga aos corpos de prova.

4.7 Procedimento Experimental

Basicamente, três tipos de ensaio foram realizados para avaliação das características do sensor implementado: ensaio de deformação elástica - linearidade, estabilidade e fluência - deformação lenta à tração.

Para a execução de cada ensaio, escolhe-se um par de corpos de prova gêmeos, instrumentados com sensores de fibra óptica idênticos, provenientes da mesma mistura, moldados no mesmo dia, sob as mesmas condições e curados da mesma forma.

Com exceção do ensaio de estabilidade, no qual ambos os corpos de prova permanecem em repouso, para os demais ensaios, um dos corpos de prova é colocado no dispositivo de tração e carregado, enquanto o outro permanece ao lado, exposto à mesmas condições ambientais e sem carga.

Monta-se o interferômetro: (a) dividindo o feixe do laser em dois outros e (b) inserindo os novos feixes nas extremidades das fibras ópticas dos dois corpos de prova. Então, (c) junta-se as extremidades opostas das fibras para que a luz que delas emana seja combinada formando um sinal de interferência, cujas franjas são projetadas em um anteparo.

Estabelecido o sinal de interferência, com os corpos de prova descarregados, aciona-se o programa para monitorar o ensaio. Adquire-se a imagem das franjas de

interferência com a câmera de televisão, congela-se a mesma e distribui-se na região correspondente a uma franja (360°), os 5 sensores virtuais, equidistantes de 90°.

Define-se o tempo entre aquisições de dados, 60 segundos, e inicia-se o ensaio.

4.7.1 Ensaio de Estabilidade

Durante todo o ensaio de estabilidade, os corpos de prova permanecem nas mesmas condições iniciais, portanto, teoricamente, espera-se que não haja variação do sinal de interferência, visto que os dois estão sob as mesmas influências: de temperatura, umidade, tempo e condições de cura e repouso.

Esse ensaio foi executado ao ar e dentro d'água, conforme Figura 4.22, a fim de isolar efeitos de umidade e minimizar efeitos de temperatura.

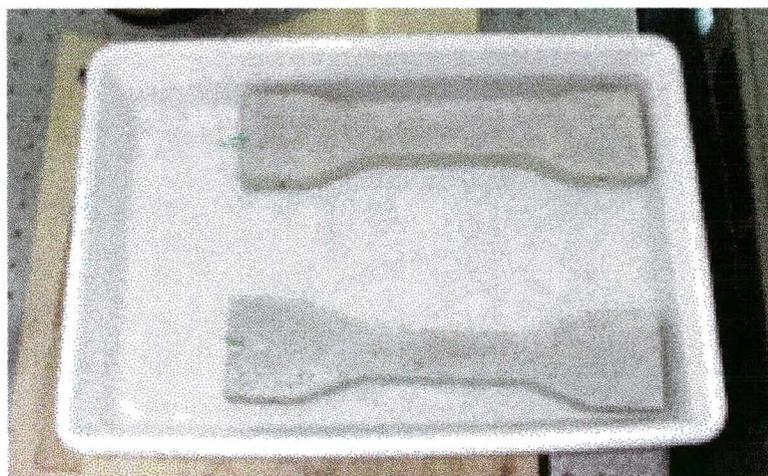


Figura 4.22 - Ensaio de estabilidade com os corpos de prova dentro d'água.

Visando avaliar a contribuição da fibra óptica para a instabilidade do sistema de medição, foram executados ensaios com a fibra sozinha, representando os dois braços do interferômetro. As curvas resultantes são apresentadas no Capítulo 6 - Experimentos.

Para os demais ensaios, a partir da inicialização do programa, executa-se o carregamento lento do corpo de prova ativo, através do esvaziamento da câmara de pneu, a fim de que as franjas se desloquem lentamente e o programa consiga captar seu movimento.

4.7.2 Ensaio Típico de Medição de Deformação Elástica com Sensor de Fibra Óptica

Nos ensaios de linearidade, submete-se o corpo de prova ativo a cargas conhecidas e mede-se a deformação elástica correspondente a cada força aplicada, fazendo uso do programa Conta Franja.

Para avaliar a confiabilidade dos resultados fornecidos pelo sensor de fibra óptica, monitora-se, também, a deformação, para cada ponto experimental, com um sistema de medição padrão, formado por 4 extensômetros de resistência elétrica (“*strain gages*”) e uma ponte amplificadora, conforme Figura 4.3. Ao final dos ensaios traçam-se curvas comparativas entre os dois sistemas de medição, apresentadas no Capítulo 6 - Experimentos.

4.7.3 Ensaio Típico de Medição de Deformação Lenta com Sensor de Fibra Óptica

O ensaio de deformação lenta (fluência) é mais longo. Ao fim da fase de carregamento, momento em que se pode observar a parcela de deformação elástica desenvolvida devida à carga aplicada, o programa continua a monitorar. A partir de então, a carga permanece constante e passa a manifestar-se a fluência do material, também devida ao carregamento.

De 60 em 60 segundos, dados de deformação são registrados. Terminado o tempo de deformação lenta previsto para o material, descarrega-se, também lentamente, o corpo de prova ativo, de maneira que se recupere parcialmente a deformação elástica e, no decorrer de mais algumas horas, a parte recuperável da deformação lenta.

Quando se completa o período de ensaio, o programa é desligado e traça-se a curva de deformação x tempo, a partir dos dados fornecidos pelo contador de franjas.

Cada ensaio foi realizado para dois pares de corpos de prova, o primeiro de traço mais deformável e o segundo de traço menos deformável. Os gráficos que representam cada ensaio constam do Capítulo 6 - Experimentos.

5.1 Calibração do Comprimento Equivalente da Fibra Óptica

5.1.1 Procedimento Experimental para Determinação do Comprimento Equivalente

A óptica fornece a Equação 5.1 [14] para determinação da deformação da fibra, que pode ser considerada igual à deformação integral do corpo de prova no qual a mesma está embutida.

$$\varepsilon_{SFO} = \frac{\lambda \cdot OF}{n \cdot \ell} \quad [5.1]$$

Onde:

ε_{SFO} : deformação medida com sensor de fibra óptica [$\mu\text{m}/\text{m}$]

λ : comprimento de onda do laser [μm]

OF : ordem de franja

n : índice de refração da fibra óptica

ℓ : comprimento ativo do sensor [m]

Esta equação apenas pode ser utilizada no caso do sensor de fibra estar exposto a um campo de deformações constante. Entretanto, a geometria escolhida para os corpos de prova, com seção transversal variável, e o posicionamento adotado para o sensor, distribuído em regiões de diferentes seções transversais, fazem com que as fibras estejam expostas a campos de deformação diferenciados ao longo do sensor, o que torna inviável a aplicação direta da equação da óptica.

Para que a deformação medida com o sensor de fibra óptica possa ser comparada com a deformação medida com outro sistema de medição de deformação, procedimento indispensável para sua avaliação metrológica, torna-se necessário um ajuste matemático, pois do contrário, seriam obtidos diagramas semelhantes ao demonstrado na Figura 5.1.

A diferença entre as curvas dos dois sistemas de medição deve-se à diferença de área entre as seções transversais onde a fibra óptica está embutida. Pode dever-se, também, ao pouco conhecimento das propriedades da fibra utilizada, e até a outros fatores não identificados. Entretanto, como o objetivo do trabalho não é estudar o fenômeno, e sim obter uma informação confiável da deformação que age na seção central do corpo de prova, trabalhou-se com a primeira hipótese.

Em função da configuração do corpo de prova, as deformações que agem ao longo da fibra óptica não são uniformes. Há uma boa parte da fibra exposta às deformações de interesse, que agem na seção central, mas há regiões da fibra expostas a níveis muito mais baixos de deformações. Por este motivo, as deformações calculadas pela equação 5.1 resultam em valores mais reduzidos.

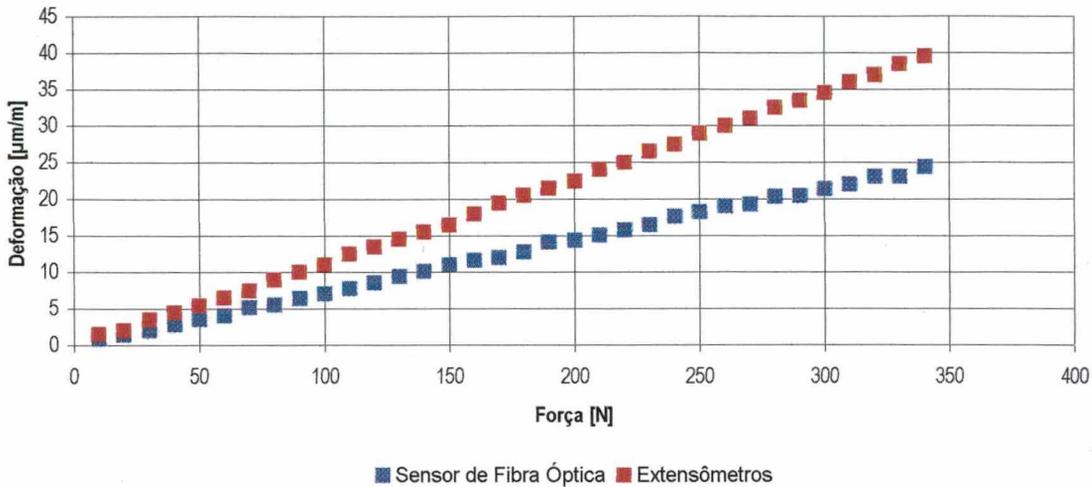


Figura 5.1 - Deformação aparente do sensor de fibra óptica e do sensor de referência (extensômetro) como função da carga aplicada no corpo de prova.

Em lugar de determinar uma simples constante multiplicativa, desprovida de significado físico, a deformação indicada pelo sensor de fibra óptica é corrigida através do “comprimento equivalente” da fibra óptica.

O “comprimento equivalente” é experimentalmente determinado de tal forma que o valor calculado pela Equação 5.1 melhor se aproxime do valor dado pelo sensor de referência. Fisicamente, corresponde ao comprimento de fibra óptica que, ao estar uniformemente exposto ao mesmo nível de deformação da seção central, levaria ao cálculo correto da deformação pela Equação 5.1. O valor do “comprimento equivalente” é inferior ao comprimento físico da fibra embutido dentro do corpo de prova e depende fundamentalmente da geometria e forma construtiva do corpo de prova, sendo independente do material ensaiado, das propriedades da fibra e do comprimento de onda do laser utilizado.

Para se conhecer a deformação na região central, optou-se por utilizar um sistema de medição formado por uma ponte amplificadora e extensômetros de resistência elétrica, colados aos pares, em lados opostos da região de seção constante dos corpos de prova, ativo e de referência, conforme Figura 5.2. A medição é feita com 4 extensômetros, em meia ponte ativa. Os extensômetros ativos são posicionados em braços opostos da ponte de Wheatstone formada. Assim, a deformação resultante é a

braços opostos da ponte de Wheatstone formada. Assim, a deformação resultante é a soma das deformações dos dois lados do corpo de prova tracionado, a partir da qual se obtém a deformação integral daquela região.



Figura 5.2 - Corpo de prova instrumentado com extensômetros na região de deformação constante.

Diversos pontos experimentais foram encontrados, cuja ordenada corresponde à deformação medida com extensômetros e a abscissa à ordem de franja medida com sensor de fibra óptica. A partir destes, foi possível determinar o coeficiente de ajuste matemático entre os dados do sensor de fibra óptica e dos extensômetros de resistência elétrica, conforme Equação 5.2:

$$\varepsilon_{SG} = \bar{a} \cdot OF \quad [5.2]$$

Onde:

ε_{SG} : deformação medida com extensômetros de resistência elétrica [$\mu\text{m}/\text{m}$]

$\bar{a} = \frac{1}{l_{eq}} \cdot \frac{\lambda}{n}$: coeficiente de ajuste matemático dos pontos experimentais [$\mu\text{m}/\text{m}$]

l_{eq} : comprimento equivalente de fibra óptica [m]

O coeficiente angular \bar{a} , valor de ajuste para os pontos experimentais, é encontrado através da Equação 5.3:

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad [5.3]$$

Onde:

$a = \frac{\varepsilon_{SG}}{OF}$: coeficiente de ajuste matemático de cada ponto experimental [$\mu\text{m}/\text{m}$]

Conhecidos \bar{a} , λ e n determina-se l_{eq} , segundo a Equação 5.4, que será a partir de então, o comprimento equivalente, usado cada vez que o ensaio for repetido, para as mesmas condições construtivas dos corpos de prova e dos sensores.

$$\ell_{eq} = \frac{1}{\bar{a}} \cdot \frac{\lambda}{n} \quad [5.4]$$

Na determinação do comprimento equivalente foram realizados dois experimentos para cada um dos traços de argamassa adotados. Os resultados de tais ensaios estão no Anexo I. A substituição do comprimento equivalente determinado nos experimentos na Equação 5.1 gera diagramas comparativos como o da Figura 5.3.

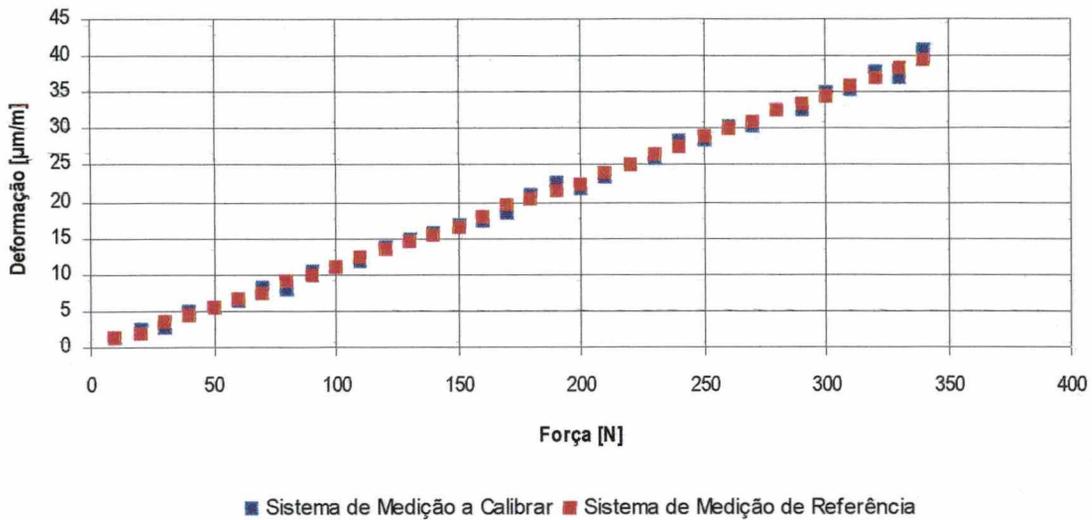


Figura 5.3 - Curva de calibração do comprimento equivalente da fibra óptica após ajuste matemático.

5.2 Fontes de Incerteza

A determinação do ℓ_{eq} faz parte do processo de calibração do sensor de fibra óptica e só pode ser realizada com o auxílio de um sistema de medição de deformação de referência, com características metrológicas conhecidas e compatíveis com as necessidades do sistema de medição a calibrar.

O processo de calibração de um sistema de medição sempre envolve incertezas. Não apenas as incertezas do padrão utilizado devem ser consideradas mas, para avaliar metrologicamente o sistema de medição com fibra óptica, há que se conhecer e avaliar as influências de todas as demais fontes de incertezas.

Para avaliar metrologicamente o sensor desenvolvido, a análise de incertezas foi dividida em duas etapas: avaliação das incertezas na determinação do comprimento equivalente e avaliação das incertezas na medição de deformações.

5.2.1 Expressão para Estimativa da Incerteza do Comprimento Equivalente

Inicialmente, cabe observar que as incertezas estimadas tratam-se de incertezas padrão. Ao final, estimar-se-á a correspondente incerteza expandida para a probabilidade de 95%. Partindo-se da Equação 5.4, para determinação do l_{eq} , e substituindo nela a expressão para encontrar \bar{a} , obtém-se a Equação 5.5:

$$l_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_{SG}}{OF}} \cdot \frac{\lambda}{n} \quad [5.5]$$

A partir da equação acima, encontra-se a expressão para estimar a incerteza do comprimento equivalente, através da Equação 5.6:

$$\left(\frac{u_{l_{eq}}}{l_{eq}} \right)^2 = \left(\frac{u_{\lambda}}{\lambda} \right)^2 + \left(\frac{u_{\bar{a}}}{\bar{a}} \right)^2 + \left(\frac{u_n}{n} \right)^2 \quad [5.6]$$

Onde:

$u_{l_{eq}}$: incerteza do comprimento equivalente de fibra óptica [mm]

u_{λ} : incerteza do comprimento de onda do laser [μm]

u_n : incerteza do índice de refração da fibra óptica

O coeficiente \bar{a} é obtido através do equacionamento citado no início do capítulo, item 5.1.1, Equação 5.3. Sua incerteza é estimada a partir da Equação 5.7:

$$u_{\bar{a}} = \frac{u_a}{\sqrt{n}} \quad [5.7]$$

Onde:

$u_{\bar{a}}$: incerteza do coeficiente de ajuste matemático [$\mu\text{m}/\text{m}$]

u_a : incerteza do coeficiente angular da reta que passa por cada ponto experimental [$\mu\text{m}/\text{m}$]

n : número de pontos experimentais

Observa-se a dependência direta de \bar{a} da incerteza de a , determinada através da Equação 5.8:

$$\left(\frac{u_a}{a} \right)^2 = \left(\frac{u_{\varepsilon_{SG}}}{\varepsilon_{SG}} \right)^2 + \left(\frac{u_{OF}}{OF} \right)^2 \quad [5.8]$$

Onde:

$u_{\varepsilon_{SG}}$: incerteza na medição da deformação com extensômetro, Anexo II.

u_{OF} : incerteza na medição da ordem de franja com sensor de fibra óptica, Anexo II.

Fazendo as substituições de $u_{\bar{a}}$ e u_a na Equação 5.6, obtém-se a expressão final para determinação da incerteza da calibração do sensor de fibra óptica, Equação 5.9:

$$\left(\frac{u_{\ell_{eq}}}{\ell_{eq}}\right)^2 = \frac{1}{n} \cdot \left[\left(\frac{u_{\varepsilon_{SG}}}{\varepsilon_{SG}}\right)^2 + \left(\frac{u_{OF}}{OF}\right)^2 \right] + \left(\frac{u_{\lambda}}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{u_n}{n}\right)^2 \quad [5.9]$$

Conhecidas as fontes de incerteza, pode-se estimar suas contribuições individuais para a incerteza do comprimento equivalente.

5.2.1.1 Fontes de Incerteza na Calibração do Comprimento Equivalente

O diagrama de Ishikawa, Figura 5.4, ilustra as diversas fontes de incerteza enumeradas na determinação comprimento equivalente de fibra óptica, as quais serão comentadas e avaliadas em seguida. Os valores correspondentes serão apresentados posteriormente, no balanço de incertezas.

1. Laser

Influência do comprimento de onda do laser

Embora um laser seja projetado para fornecer luz a um único comprimento de onda, na prática, ele emite uma faixa maior destes. Isto significa que a fonte de luz não é perfeitamente monocromática, estando presentes no mesmo modo, dentro da fibra, uma faixa de comprimentos de onda [13].

Portanto, é necessário estimar a incerteza no comprimento equivalente da fibra óptica devida a essa faixa de comprimentos de onda presente na luz do laser, que para o laser HeNe empregado, é de aproximadamente 2,5 nm em torno do seu comprimento de onda, $\lambda = 632,8$ nm.

Um valor, da ordem de 0,2 pm, foi estimado [24] para a incerteza a cerca do comprimento de onda do laser HeNe utilizado. A estimativa foi feita a partir da largura da banda espectral do laser, que relaciona-se com o comprimento de sua cavidade e com a velocidade da luz.

As condições ambientais também implicam variações no comprimento de onda do laser. Apesar do laboratório contar com um controle de pressão, temperatura e umidade, seus efeitos devem ser considerados.

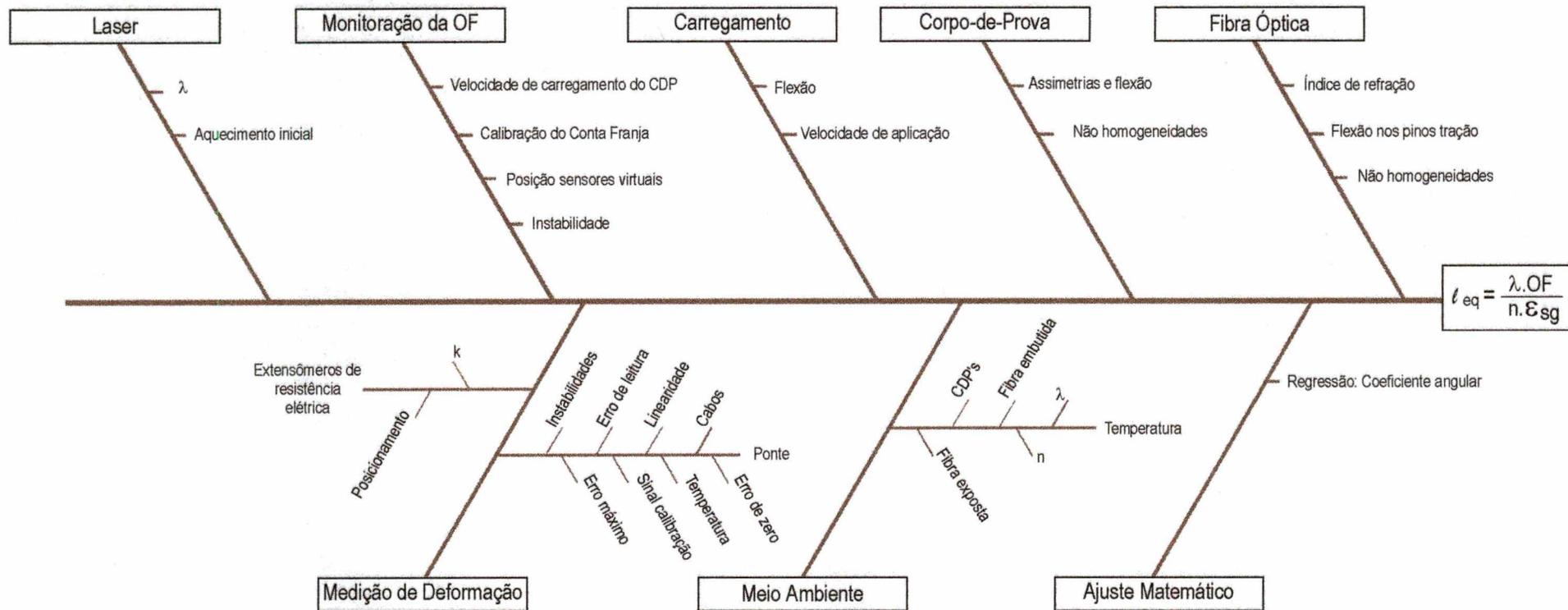


Figura 5.4 - Diagrama para determinação das fontes de incerteza do comprimento equivalente.

Mudanças de 2°C na temperatura, 20% na umidade relativa do ar e 1000 Pa na pressão atmosférica durante os experimentos contribuem com variações do comprimento de onda do laser e conseqüentemente do comprimento equivalente de fibra óptica, estimados conforme [24] e apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Variações no λ do laser devidas às características do laser e das condições ambientais.

	$T = (23 \pm 2)^\circ\text{C}$	$U_r = (60 \pm 20) \%$	$P = (102 \pm 1) \text{ kPa}$	$\Delta\lambda = 2,5 \text{ nm}$	ΔL
$\Delta\lambda \text{ [pm]}$	$\Delta\lambda_T = 1,2$	$\Delta\lambda_{U_r} = 0,14$	$\Delta\lambda_P = 1,68$	$\Delta\lambda_{\Delta\lambda} = 0,0025$	$\Delta\lambda_L = 0,2$

Observa-se que, em relação ao valor do comprimento de onda do laser adotado, $\lambda = 632,8 \text{ nm}$, a variação introduzida por qualquer dessas fontes de incerteza é desprezível, da mesma forma que o é em relação ao ℓ_{eq} , conforme apresentado a seguir, no Balanço de Incertezas.

Influência do aquecimento inicial do laser

Quando o laser é ligado, passa por um período de aquecimento inicial, que dura até sua estabilização, cerca de 10 a 15 minutos. Se o ensaio for iniciado no momento em que o laser for ligado, é possível que haja uma pequena variação do seu comprimento de onda, a qual afetará os primeiros instantes do ensaio. Entretanto, se for respeitado este tempo antes de iniciarem-se os experimentos, tal efeito pode ser desprezado.

II. *Monitoração das Franjas*

Influência do espelho divisor de feixe

Para dividir o feixe do laser em dois outros feixes, a serem acoplados nas duas fibras ópticas dos corpos de prova gêmeos, foi usado um espelho parcial, posicionado a 45° em relação ao feixe principal. Qualquer movimentação desse espelho pode levar à criação de dois feixes diferentes, o que alteraria a ordem de franja.

Esse efeito será quantificado indiretamente no ensaio de estabilidade do sensor de fibra óptica.

Influência da posição dos sensores virtuais

Para monitorar as franjas de interferência movimentadas durante os ensaios, utiliza-se o programa Conta Franja, que requer a distribuição de 5 sensores virtuais, eqüidistantes de 90°, no espaço correspondente a uma franja, 360°.

Para o algoritmo de Hariharan [19], utilizado na obtenção do ângulo de fase do sinal de interferência, quanto mais próximo de 360° for o espaço selecionado para

posicionar os sensores virtuais, menor é a incerteza do ângulo de fase e proporcionalmente da ordem de franja e comprimento equivalente da fibra óptica. Considerando as piores condições presentes nas medições, estima-se que a incerteza padrão introduzida apenas pelo algoritmo não seja superior a 0,02 ordens de franja, o que pode ser desprezado.

Influência de instabilidade na ordem de franja

Já que a medição com o sensor de fibra óptica proposto é relativa, escolhe-se uma posição para iniciar a aquisição de dados, que corresponde à ordem de franja zero, referência para as demais medições. Entretanto, geralmente acontece uma oscilação em torno do zero, devida a instabilidades mecânicas e ruídos em geral, que afeta diretamente a ordem de franja medida com o sensor de fibra óptica, e por isso precisa ter seus efeitos estimados.

Com base na experiência adquirida durante os ensaios realizados, estima-se uma instabilidade da ordem de 3 franjas.

Influência da velocidade de aplicação da carga

Na medição de deformação com sensor de fibra óptica existe uma limitação que se refere à velocidade de aquisição de informações, por isso, se o carregamento for aplicado de maneira muito rápida, algumas franjas poderão ser ignoradas pelo contador do programa.

Para amenizar esse efeito, algumas providências foram tomadas, como aplicar lentamente a carga, através do esvaziamento de uma câmara de ar. Entretanto é necessário fazer uma quantificação dos erros que possam estar envolvidos na aplicação da carga. Uma estimativa do número de franjas perdidas, baseada na experiência adquirida durante a realização dos ensaios, fica por volta de 2.5 franjas.

Influência de não homogeneidades do corpo de prova

Devido à ausência de agregado graúdo (brita), a argamassa é um material mais homogêneo que o concreto. Na sua composição utiliza-se apenas o agregado miúdo (areia), com granulometria controlada, de maneira que não hajam zonas mais compactas. Cuidados na mistura dos materiais e no adensamento, durante a moldagem dos corpos de prova, asseguram que a falta de homogeneidade não é um fator relevante a ser considerado como fonte de incerteza na medição de deformação com sensor de fibra óptica.

Influência do programa Conta Franja

Propõe-se uma calibração do Conta Franja, a fim de que seja estimado um valor para quantificar a incerteza na ordem de franja introduzida pelo programa.

Calibração do Conta Franja

Procedimento Experimental

Na calibração do programa Conta Franja foram reproduzidas as condições normais de ensaio. Imagens das franjas de interferência, adquiridas pela câmera de televisão e salvas em computador, foram impressas. Configurou-se o ensaio, com a diferença de a imagem não estar mais ao vivo, pois fora substituída pela figura impressa das franjas. Dessa maneira tornou-se possível aplicar um deslocamento conhecido às mesmas e obter, com o programa, o valor correspondente em ordens de franja.



Figura 5.5 - Configuração adotada na calibração do Conta Franja.

Procedimentos normais de ensaio:

- 1º. Liga-se o Conta Franja;
- 2º. Com a câmera de televisão, adquire-se uma imagem das franjas (impressas);
- 3º. Ajusta-se o contraste das franjas;
- 4º. Posicionam-se os 5 sensores virtuais num espaço próximo de uma franja, 360º;
- 5º. Ajustam-se as dimensões dos sensores virtuais;
- 6º. Ajusta-se a constante multiplicativa para transformar ordem de franja em deformação;
- 7º. Configura-se o traçador gráfico;
- 8º. Abre-se um arquivo para armazenar os dados;

9º. Inicializa-se o programa;

Procedimentos de calibração:

- 10º. Em lugar de aplicar carga ao corpo de prova, simula-se a deformação, deslocando a imagem, com uma mesa micrométrica, na quantidade de uma franja;
- 11º. Observa-se, no micrômetro, o deslocamento correspondente;
- 12º. A partir de então, aplicam-se deslocamentos conhecidos, correspondentes a frações de franja (10%, 20%, 30%), e assim por diante, até atingir, 2 franjas;
- 13º. Registram-se os valores, de forma ascendente e descendente, a fim de obter o erro devido à histerese do sistema de medição;
- 14º. Repete-se o procedimento 5 vezes, para estimar a incerteza do tipo A;
- 15º. Encerra-se o programa;
- 16º. Parte-se para a análise dos dados de calibração, apresentados em anexo.

Pode-se concluir que os erros do programa Conta Franja, determinados na calibração, da ordem de 0,041 de uma franja, têm pequena influência no resultado da determinação do comprimento equivalente.

Influência de assimetrias e flexão do corpo de prova

Teoricamente, a deformação indicada pela fibra óptica não seria afetada pela presença de flexão no carregamento se esta estivesse simetricamente disposta em relação à linha neutra do corpo de prova. Para estimar os efeitos de assimetrias e flexão do corpo de prova, assume-se um posicionamento imperfeito da bobina de fibra, de alguns milímetros da posição esperada para a linha neutra, na vertical e na horizontal. Medem-se, separadamente, as deformações em lados opostos do corpo de prova, com extensômetros de resistência elétrica, em $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone. As deformações medidas nas laterais do corpo de prova correspondem a 2 canais da ponte amplificadora, e a diferença entre elas serve para estimar a incerteza, conforme Figura 5.6.

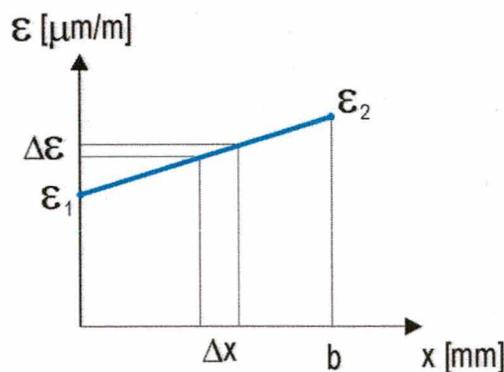


Figura 5.6 - Estimativa da incerteza na ordem de franja referente às assimetrias do corpo de prova.

Destes ensaios, estimaram-se valores da ordem de 0,3 $\mu\text{m/m}$ para a incerteza da deformação devida a assimetrias e flexão, para $\Delta x = 1 \text{ mm}$.

Influência das condições ambientais

Na determinação do comprimento equivalente da fibra óptica, a influência das condições ambientais resume-se, basicamente, aos efeitos da temperatura. A variação diferenciada da temperatura pode ser gerada por uma fonte de calor mais próxima de um dos corpos de prova, como por exemplo, o laser, no período de aquecimento inicial. Seus efeitos podem se manifestar de diferentes formas:

Influência da temperatura sobre a fibra óptica exposta

Se a temperatura agir de maneira diferente em um dos braços do interferômetro, um efeito devido a ela se confundirá ao efeito da grandeza de interesse. Havendo ainda, diferença de comprimento exposto (não embutido) entre a fibra sensora e de referência, poderá ser gerada uma fonte de erros na medição de deformação.

O efeito da temperatura agindo sobre a diferença de comprimento exposto entre as duas fibras pode ser estimado a partir das características da fibra óptica, Equação 5.10:

$$\Delta L = DL \cdot \alpha_{FO} \cdot \Delta T \quad [5.10]$$

Onde:

ΔL : diferença de comprimento causada pela temperatura [m]

DL : diferença de comprimento exposto [m]

α_{FO} : coeficiente de expansão térmica do material da fibra óptica [$^{\circ}\text{C}$]

ΔT : diferença de temperatura entre os dois braços do interferômetro

$$\Delta T = |T_{\text{extrema}} - T_{\text{inicial}}| \text{ [}^{\circ}\text{C]}]$$

O valor estimado para essa fonte de incertezas no comprimento equivalente é desprezível, conforme observado no balanço de incertezas, Tabela 5.4.

Influência da temperatura sobre os corpos de prova

Quando houver diferença de temperatura entre os dois corpos de prova, um deles vai expandir mais, originando um ΔL proporcional à temperatura. Conseqüentemente haverá um aumento no comprimento da fibra disposta no seu interior, que não ocorrerá na fibra do corpo de prova gêmeo. Assim, o sensor medirá uma deformação proporcional à diferença de temperatura, somada à grandeza de interesse, mascarando seu real valor.

A estimativa deste erro é feita também a partir da equação 5.10, que considera as características da argamassa no que se refere à variação da temperatura. A dimensão utilizada para fins de cálculo é o comprimento ativo da fibra óptica, 3,655 m e o coeficiente de expansão térmica é o da argamassa, $\alpha_{FO}=10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

O valor estimado para essa fonte de incertezas perante o comprimento equivalente é desprezível, conforme pode ser observado na Tabela 5.4.

Influência da temperatura sobre a fibra óptica embutida

Somada ao efeito da diferença temperatura entre os braços do interferômetro pode haver uma diferença de comprimento ativo entre as fibras dos dois corpos de prova. Portanto, há que ser estimado um erro devido à temperatura agindo sobre a diferença de comprimento embutido.

O efeito da temperatura agindo sobre a diferença de comprimento ativo entre as duas fibras pode ser estimado a partir das características da fibra óptica, através da equação 5.10. Utiliza-se, para isso, o coeficiente de expansão térmica da fibra óptica, $\alpha_{FO}=10^{-7}/^{\circ}\text{C}$, e a diferença de comprimento embutido entre os dois braços do interferômetro, estimada em 20 mm.

O valor estimado para essa fonte de incertezas é desprezível, conforme Tabela 5.4.

III. *Fibra Óptica*

Influência de não homogeneidades da fibra óptica

A falta de homogeneidade da fibra óptica pode se referir a diferentes situações:

- (a) *Nas dimensões da fibra óptica:* no caso de se usar sempre a mesma fibra, esse efeito pode ser desprezado, à medida que, no rolo de 2665 m de fibra óptica utilizada, supõe-se que, de 4 em 4 metros, usados em cada corpo de prova, não hajam diferenças significativas nas dimensões da fibra.
- (b) *No material da fibra óptica:* defeitos superficiais causam microflexões que levam à defasagem entre os feixes de luz que viajam no interior de fibras ópticas multimodo. Como a fibra óptica em uso nos experimentos é do tipo monomodo, não há problemas com sinais defasados, se anulando ou se somando, no decorrer do caminho óptico percorrido. Portanto, essa fonte de incertezas pode ser desprezada.

Cabe lembrar que a zeragem do sistema é efetuada antes de iniciar as medições, tornando sem efeito as diferenças de caminho óptico iniciais.

Influência da flexão causada na fibra quando enrolada aos pinos de tração

Esse efeito pode ser desprezado no caso de fibras ópticas monomodo, pela mesma razão anteriormente citada.

Influência da temperatura sobre o índice de refração da fibra óptica

Para o vidro, material comum à fibra óptica utilizada, composta basicamente de sílica (SiO_2), o coeficiente de temperatura do índice de refração é muito pequeno, da ordem de $10^{-6}/^\circ\text{C}$. Desta forma, se houver uma variação de 2°C , o índice de refração poderá variar em 2×10^{-6} , valor desprezível em relação ao índice de refração, e igualmente desprezível no que se refere ao comprimento equivalente.

Influência das variações do índice de refração

Estima-se uma incerteza da ordem de 0,02 para o valor do índice de refração da fibra óptica, o que leva a uma incerteza de 0,012 para o $n=1,476$ adotado. Entretanto, supõe-se que o mesmo não varie substancialmente de 4 em 4 metros, dimensão da fibra usada em cada corpo de prova.

IV. Medição da Deformação com Extensômetros e Ponte Amplificadora

A medição de deformação na seção central do corpo de prova, utilizada para determinação do comprimento equivalente, é feita com extensômetros de resistência elétrica. Existem algumas fontes de incerteza devidas a três grupos de componentes, dos quais dois são apresentados na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 - Fontes de incerteza na medição com extensômetros.

Ponte Amplificadora
Erros de zero e de leitura
Incerteza da ponte
Sinal de calibração
Características da ponte
Instabilidade - Temperatura - Cabos
Extensômetro de Resistência Elétrica
Fator do extensômetro
Posicionamento do extensômetro

A influência de cada uma das fontes de incerteza acima citadas foi estimada a partir de dados de ensaio e do catálogo do fabricante, os valores correspondentes estão discriminados no Anexo II.

Influência de assimetrias e flexão no carregamento

Assumindo que o corpo de prova seja simétrico, assim como a disposição dos extensômetros nas suas faces laterais, em relação à linha neutra, qualquer esforço, além da tração axial, introduzido pelo carregamento deverá ser automaticamente compensado. Mas como não foi possível instrumentar os corpos de prova em todas as faces, devido à extrema irregularidade da superfície superior dos mesmos, há que se considerar uma contribuição no que se refere à presença de flexão além da tração pura assumida, no outro eixo do corpo de prova.

A estimativa de erros devidos à flexão, introduzida pelo carregamento, é feita da mesma forma que no item III. Os valores de incerteza correspondentes são da ordem de 0,3 µm/m.

5.2.1.1 Balanço de Incertezas

As diversas fontes de incerteza acima analisadas devem ser consolidadas para determinar a incerteza padrão combinada e expandida da determinação do comprimento equivalente da fibra óptica, como mostram as Tabelas 5.3 a 5.6, considerando um valor típico para o comprimento equivalente de 2,31 m.

Tabela 5.3 - Balanço de incertezas: influência do comprimento de onda do laser.

Símbolo	Descrição	Valor Bruto	Distribuição	Divisor	u_a [mm]
$u_{\Delta\lambda}$	Comprimento Cavidade	2,0E-07	R	1,73	0,000000115
$u_{\Delta\lambda_P}$	Pressão	1,7E-06	R	1,73	0,000000970
$u_{\Delta\lambda_T}$	Temperatura	1,2E-06	R	1,73	0,000000693
$u_{\Delta\lambda_{Ur}}$	Umidade Relativa	3,5E-08	R	1,73	0,000000202
$u_{\Delta\lambda_{\Delta\lambda}}$	Varição λ	2,5E-03	R	1,73	0,00144
			u_{λ}	µm	0,00144

Tabela 5.4 - Balanço de incertezas: influência da ordem de franja.

Símbolo	Descrição	Valor Bruto	Distribuição	Divisor	u_a [mm]
u_{OF_c}	Calibração Conta Franja	0,041	N	1,00	0,041
$u_{OF_{inst}}$	Instabilidade	3	R	1,73	1,73
$u_{OF_{carreg}}$	Carregamento	2,5	R	1,73	1,44
$u_{OFT_{FOexp}}$	Temperatura FO Exposta	0	R	1,73	0
$u_{OFT_{FOemb}}$	Temperatura FO Embutida	0,000149	R	1,73	0,0000860
$u_{OFT_{CDP}}$	Temperatura CDP's	0,00149	R	1,73	0,000860
$u_{OF_{Assim}}$	Assimetrias CDP's	1,616	R	1,73	0,933
			u_{OF}		2,44

Tabela 5.5 - Balanço de incertezas: influência do índice de refração da fibra

Símbolo	Descrição	Valor Bruto	Distribuição	Divisor	ua [mm]
u_{T_n}	Temperatura Índice Refração	0,000002	R	1,73	0,00000115
u_n	Índice de Refração	0,02	R	1,73	0,012
u_n					0,0115

Tabela 5.6 - Balanço de incertezas: influência da medição de deformação com extensômetros.

Símbolo	Descrição	Valor Bruto	Distribuição	Divisor	ua [mm]
$u_{\varepsilon_{SG}}$	Medição com Extensômetros	0,75	N	1,00	0,750
$u_{Assim.Carreg.}$	Assimetrias Carregamento	0,30	R	1,73	0,173
$u_{\varepsilon_{SG}}$				$\mu\text{m/m}$	0,77

O valor para a incerteza de ℓ_{eq} é estimado substituindo os valores das tabelas 5.3 a 5.6 no numerador da equação 5.6, e os valores de λ , ε_{SG} , OF e n , no denominador.

$$\left(\frac{u_{\ell_{eq}}}{\ell_{eq}}\right)^2 = \frac{1}{1,476} \cdot \left[\left(\frac{0,77}{35}\right)^2 + \left(\frac{2,44}{180}\right)^2 \right] + \left(\frac{0,00144}{0,6328}\right)^2 + \left(\frac{0,0115}{1,476}\right)^2$$

$$\left(\frac{u_{\ell_{eq}}}{\ell_{eq}}\right)^2 = \frac{1}{1,476} \cdot \left[(0,0220)^2 + (0,0135)^2 \right] + (0,00228)^2 + (0,00779)^2$$

Assim, pode-se observar as contribuições individuais relativas ao comprimento equivalente, das quatro fontes de incertezas estudadas, $u_{\lambda}=0,23\%$, $u_{OF}=1,36\%$, $u_n=0,78\%$ e $u_{\varepsilon_{SG}}=2,20\%$.

As principais fontes de incerteza estão graficamente representadas na Figura 5.7. Nota-se que a principal fonte de incertezas da calibração, para determinação do comprimento equivalente, é a medição de deformação com os extensômetros. Somente após reduzir a influência desta fonte de incertezas para, pelo menos, 50% do seu valor original faz sentido agir sobre as demais fontes de incerteza visando otimizar este processo.

Comentários a respeito da incerteza de medição de deformação com extensômetros, primeira linha da Tabela 5.6, são tecidos no Anexo II. As assimetrias introduzidas pelo carregamento, segunda linha da tabela, são uma fonte de incerteza, com possibilidades potenciais de redução, já que o sistema de tração dos corpos de prova pode ser melhorado.

Trata-se de um sistema confeccionado, em sua maior parte, de componentes de madeira colada, aos quais foram acrescentadas peças como roldanas e cabos, para aplicação da carga. O sistema resultante não apresenta a rigidez mais indicada a um

sistema de tração, podendo apresentar deformações em sua estrutura, transmitidas aos corpos de prova.

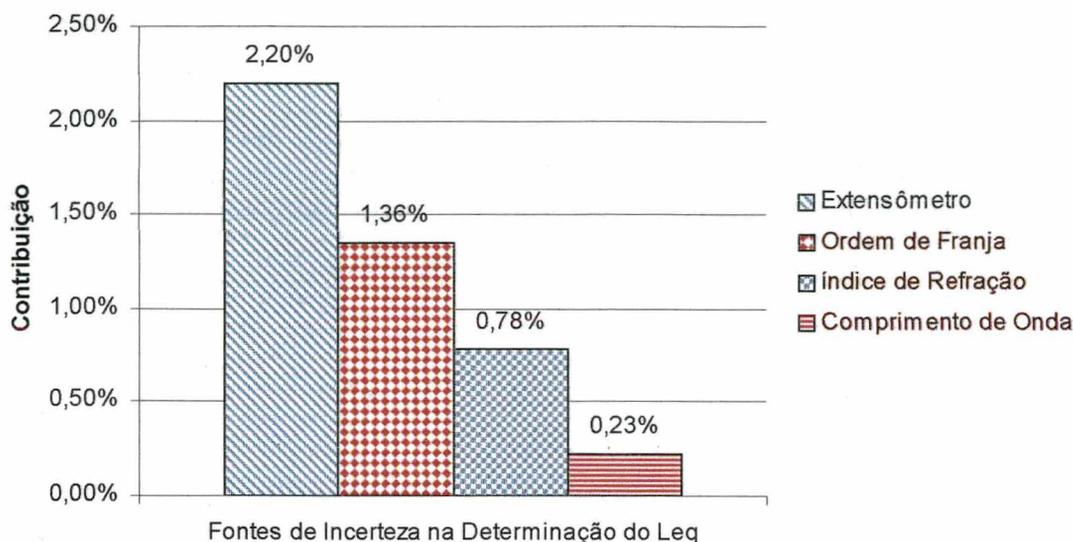


Figura 5.7 - Contribuição das fontes de incerteza na determinação do comprimento equivalente.

A segunda fonte mais significativa é a determinação da ordem de franja. Para melhor detalhá-la, configurou-se o gráfico da Figura 5.8.

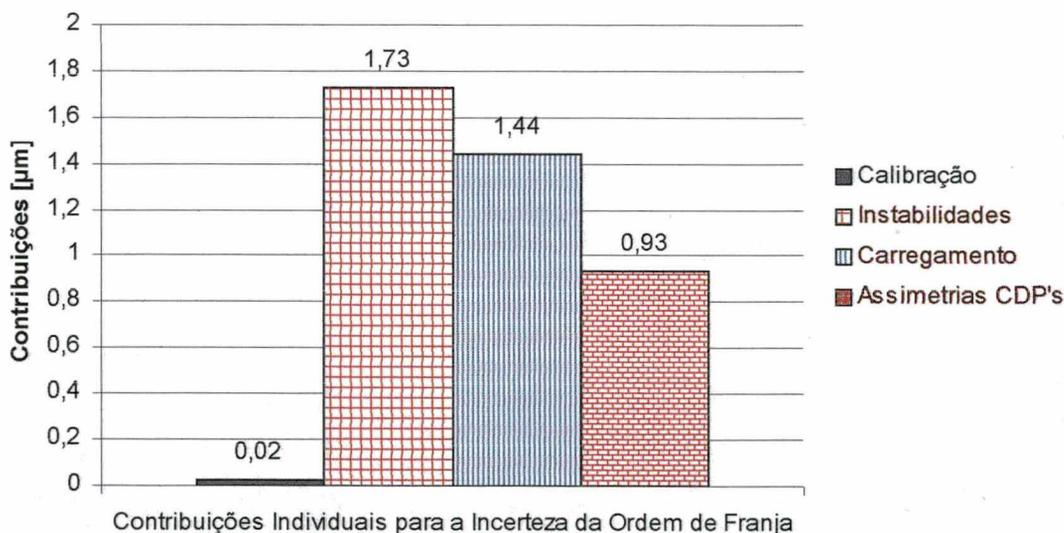


Figura 5.8 - Balanço de incertezas: influência da ordem de franja.

A calibração do Conta Franja contribui para a incerteza da ordem de franja de maneira desprezível. Já as assimetrias presentes na distribuição do sensor no interior dos corpos de prova têm participação mais significativa. Os valores de incerteza correspondentes têm essa dimensão pois foram consideradas assimetrias na horizontal e vertical, a situação mais desfavorável.

A fim de reduzir sua parcela de influência na incerteza da ordem de franja, foram feitas melhorias nas fôrmas, substituindo a madeira por “nylon” ou metal, materiais que facilitam a perfuração para fixar os pinos de tração à base, não sofrem dilatações devidas à umidade, além de permitir maior controle das dimensões dos corpos de prova.

A incerteza introduzida durante a deformação do corpo de prova, atribuída à possibilidade de franjas serem ignoradas, pela rapidez no carregamento e descarregamento do corpo de prova, tem valores significativos. Aperfeiçoar este sistema de carga e descarregamento, que utiliza o esvaziamento de uma câmara de ar na aplicação da carga, significaria menores incertezas.

A instabilidade do sinal de saída do sensor surge como a incerteza de maior ênfase. Sua participação na incerteza foi estimada dos ensaios de estabilidade, demonstrados nos gráficos do Capítulo 6 - Experimentos e deve-se a ruídos ópticos, instabilidades mecânicas e vibrações. Para reduzi-la, caberia um maior isolamento do interferômetro e até dos corpos de prova do ambiente externo, para que ficassem melhor protegidos de tais influências.

Voltando à análise do gráfico da figura 5.7, segue-se a contribuição da incerteza do índice de refração da fibra, quase independente das condições ambientais e que, perante as demais contribuições, pode ser desprezada, embora ainda possa ser reduzida, se a incerteza na determinação do seu valor, $n = 1,476$, for igualmente menor.

O comprimento de onda do laser é influenciado pelas condições ambientais, pelas características físicas do laser e pela faixa de comprimentos emitidos. Por ser a incerteza de menor influência, dispensa maiores esforços para sua redução.

Pela facilidade de interpretação dos dados das Tabelas 5.5 e 5.6, as duas últimas fontes de incerteza, n e ε_{SFO} , não requerem representação gráfica.

Para o sensor de fibra óptica desenvolvido, nas condições explicitadas e para os ensaios realizados, o comprimento equivalente determinado e sua respectiva incerteza são $\ell_{eq} = (2,31 \pm 0,06)$ m.

5.2.2 Expressão para Estimativa da Incerteza da Medição de Deformação com Sensor de Fibra Óptica

$$\left(\frac{u_{\varepsilon_{SFO}}}{\varepsilon_{SFO}} \right)^2 = \left(\frac{u_{\ell_{eq}}}{\ell_{eq}} \right)^2 + \left(\frac{u_{\lambda}}{\lambda} \right)^2 + \left(\frac{u_n}{n} \right)^2 + \left(\frac{u_{OF}}{OF} \right)^2 \quad [5.11]$$

Onde:

u_{SFO} : incerteza da deformação medida com sensor de fibra óptica

Configuram-se duas situações na determinação da incerteza da deformação medida com sensor de fibra óptica:

I. *Fibra Óptica Usada na Medição Diferente da Usada na Calibração do l_{eq}*

Quando as características da fibra óptica usada na medição são diferentes das características da fibra usada na calibração, há que se considerar sua influência duas vezes, na calibração e na medição de deformação com sensor de fibra óptica. Neste caso, a incerteza do comprimento equivalente é determinada como na Equação 5.9.

II. *Mesma Fibra Óptica Usada na Medição e na Calibração do l_{eq}*

Caso sejam utilizados o mesmo laser e fibra óptica na calibração do comprimento equivalente e na medição da deformação do corpo de prova, as incertezas do comprimento de onda e do índice de refração não precisam ser consideradas repetidamente. Neste caso, a Equação 5.12 é utilizada para determinar a incerteza do l_{eq} , e estima-se a incerteza do coeficiente $\bar{\alpha}$ conforme Equações 5.7 e 5.8.

$$\left(\frac{u_{l_{eq}}}{l_{eq}} \right)^2 = \left(\frac{u_{\bar{\alpha}}}{\bar{\alpha}} \right)^2 \quad [5.12]$$

Ou então, desconsideram-se os termos referentes às incertezas do comprimento de onda e do índice de refração na Equação 5.11, pois já foram consideradas na ocasião da determinação da incerteza do l_{eq} .

5.2.2.1 Fontes de Incerteza Medição de Deformação com Sensor de Fibra Óptica

O diagrama de Ishikawa, Figura 5.9, ilustra as diversas fontes de incerteza enumeradas na medição de deformação com o sensor de fibra óptica. Observa-se que a maioria das fontes de incerteza mencionadas na determinação do comprimento equivalente se repetem, portanto, apenas as demais fontes serão aqui comentadas.

Como as incertezas estão sendo consideradas na forma relativa, podem ser usados os mesmos valores anteriormente calculados, Tabelas 5.3 a 5.6, observando-se pequenas alterações devidas às contribuições adicionais presentes no ensaio de deformação lenta, citadas a seguir.

I. Laser

Continuam as mesmas fontes de incerteza da, Tabela 5.3, observando que não se repetam em se tratando da situação II - Mesma Fibra Óptica Usada na Medição e na Calibração.

II. Monitoração da Ordem de Franja

Influência da flutuação da aceleração da gravidade

Em se tratando de um ensaio de longa duração, é necessário estimar possíveis efeitos da variação da aceleração da gravidade no resultado da deformação medida com o sensor de fibra óptica.

A gravidade age diretamente sobre a força aplicada aos corpos de prova, de maneira que faz variar a deformação medida. Segundo laudo de medições efetuadas pelo INMETRO, no LABMETRO/CERTI, o valor local da aceleração da gravidade foi estabelecida com incerteza em torno de $0,00000005 \text{ m/s}^2$. Sendo esta uma informação confiável, variações desta ordem levam a uma variação desprezível da deformação medida com o sensor de fibra óptica.

Influência da umidade

Durante os ensaios de longa duração foram monitoradas as variações da umidade relativa do ar. Observou-se que não existem efeitos perceptíveis sobre o comportamento do sensor, podendo ser desprezadas como fonte de incerteza na medição de deformação.

Inclusive, um dos motivos pelos quais se optou por usar fibra óptica para construir o sensor é a sua resistência à presença da água. Inclusive foi proposto um ensaio com os corpos de prova imersos, a fim de reduzir os efeitos da temperatura e eliminar a retração da argamassa. Os diagramas resultantes constam do Capítulo 6 - Experimentos.

Influência de vibrações

O experimento está montado sobre uma bancada cujo sistema de amortecimento o isola de vibrações externas. Este sistema de molas faz com que todo o ensaio esteja sob os mesmos efeitos no que se refere à vibração, isto é, tudo o que acontecer no corpo de prova ativo ocorrerá também no corpo de prova gêmeo, no laser, na câmera, no interferômetro. Portanto, despreza-se essa possível fonte de incertezas, especialmente em ensaios de longa duração.

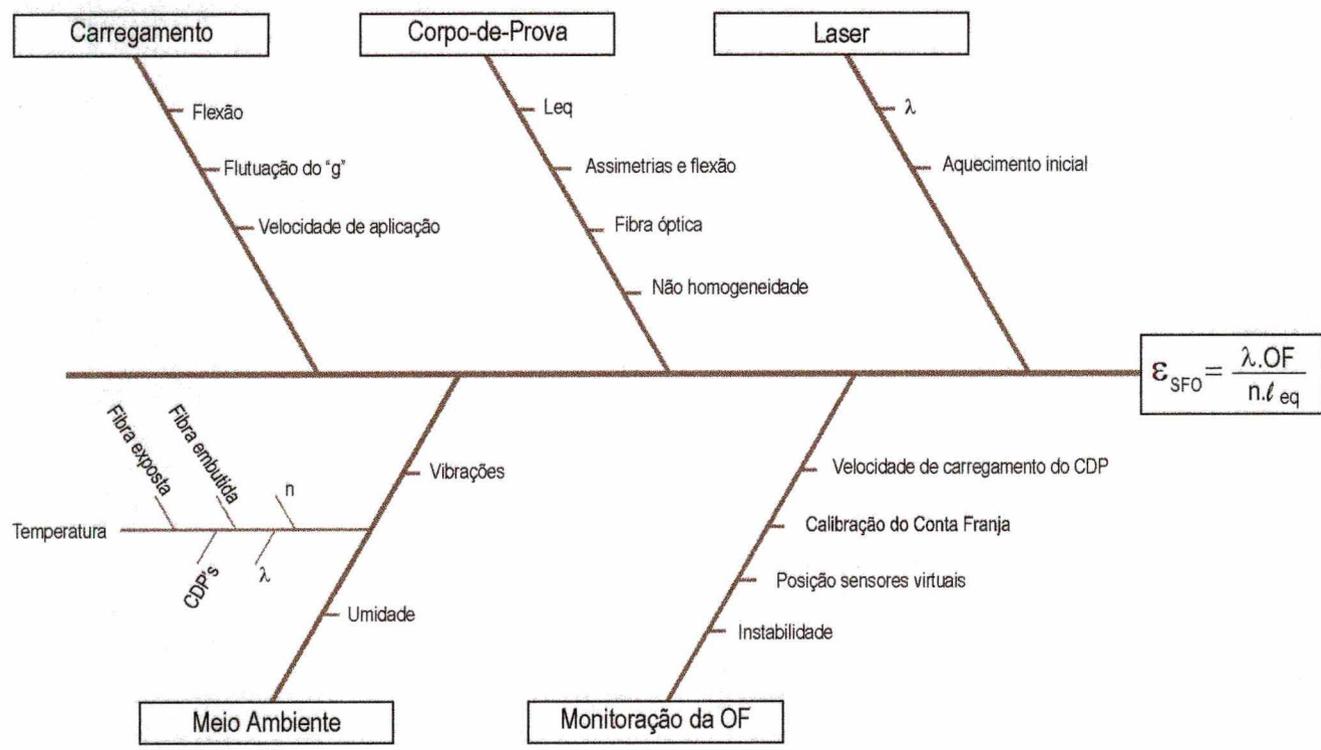


Figura 5.9 - Diagrama causa-efeito para determinação da incerteza da deformação medida com sensor de fibra óptica.

Por outro lado, pode-se atribuir às vibrações do conjunto, uma pequena oscilação na ordem de franja, já considerada anteriormente.

As demais fontes de incertezas da tabela 5.4 se repetem.

III. Fibra Óptica

As fontes de incerteza da tabela 5.5 repetem-se.

IV. Comprimento Equivalente

A expressão da deformação medida com sensor de fibra óptica leva em consideração o comprimento equivalente de fibra, obtido experimentalmente. Portanto sua determinação gera uma fonte de incerteza a ser considerada toda vez que o sensor for usado.

O valor estimado para a incerteza de l_{eq} , de 52,7 mm, determinado anteriormente, leva a uma incerteza expandida relativa da ordem de 4,5 % do l_{eq} .

5.2.2.2 Balanço de Incertezas

As diversas fontes de incerteza acima analisadas são relacionadas para determinar a incerteza padrão combinada e expandida para uma medição de deformações típica da ordem de 35 $\mu\text{m}/\text{m}$. Como as demais fontes se repetem, somente a tabela 5.7, com as contribuições do comprimento equivalente será demonstrada.

Tabela 5.7 - Balanço de incertezas: influência do comprimento equivalente da fibra óptica.

Símbolo	Descrição	Valor Bruto	Distribuição	Divisor	u_a [mm]
u_{Leq}	Comprimento Equivalente	52,69	N	1	52,69
			u_{Leq}	mm	52,7

O valor para a incerteza da medição é estimado substituindo os valores das tabelas 5.3 a 5.7 no numerador da Equação 5.6, e os valores de λ , ε_{SG} , OF e n , no denominador.

$$\left(\frac{u_{\varepsilon_{SFO}}}{\varepsilon_{SFO}}\right)^2 = \left(\frac{0,0527}{2,31}\right)^2 + \left(\frac{0,00144}{0,6328}\right)^2 + \left(\frac{0,0115}{1,476}\right)^2 + \left(\frac{2,44}{180}\right)^2$$

$$\left(\frac{u_{\varepsilon_{SFO}}}{\varepsilon_{SFO}}\right)^2 = (0,0228)^2 + (0,00228)^2 + (0,0079)^2 + (0,0136)^2$$

Assim, podem ser observadas as contribuições individuais, relativas à medição de deformação com sensor de fibra óptica, das quatro fontes de incertezas estudadas, $u_{\lambda}=0,23\%$, $u_{OF}=1,36\%$, $u_n=0,78\%$ e $u_{l_{eq}}=2,28\%$.

Já o diagrama da Figura 5.10 esclarece quem são os maiores responsáveis pela incerteza típica calculada para o processo de medição.

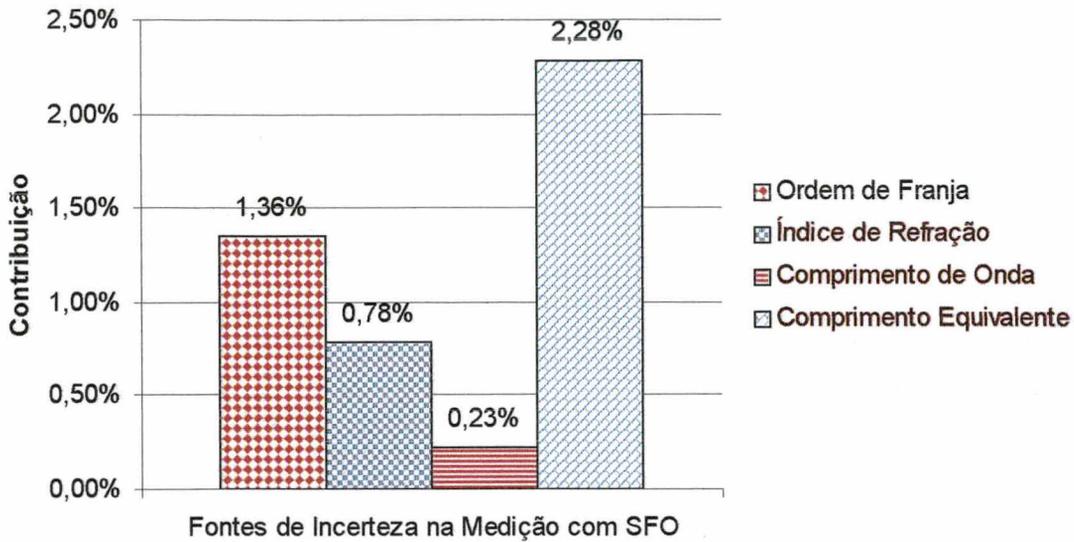


Figura 5.10 - Contribuição das fontes de incerteza na deformação medida com sensor de fibra óptica.

Analisando-se o gráfico acima, na aplicação do sensor de fibra óptica para medir deformação a maior contribuição provém da calibração do sensor, na qual foi determinado o comprimento equivalente.

Sobre a contribuição individual das fontes de incerteza para a determinação da incerteza do comprimento equivalente: (a) medição com extensômetro; (b) ordem de franja; (c) índice de refração da fibra e (d) comprimento de onda do laser, afirma-se que são as mesmas abordadas nas considerações anteriores.

Novamente, a segunda fonte de maior contribuição é a da ordem de franja, que passa a considerar a influência da aceleração da gravidade. Mas, ao final, esta acabou por ser desprezada, por seus valores reduzidos.

Os comentários para as demais fontes, índice de refração da fibra e comprimento de onda do laser se repetem.

Finalmente, para encontrar a incerteza do processo de medição, substituem-se os valores encontrados nas Tabelas 5.3 a 5.7, na Equação 5.11. Os resultados encontrados

são da ordem de $1,86 \mu\text{m/m}$, o qual leva a uma incerteza expandida relativa da ordem de 5,3% da deformação típica de $35 \mu\text{m/m}$ medida nos ensaios.

Uma abordagem final sobre as características metrológicas do sensor proposto requer observações sobre o sistema de medição padrão, adotado para calibrá-lo. Desconsiderando as fontes de incerteza externas ao sistema, como as assimetrias, que podem ser reduzidas com as providências citadas, trata-se o extensômetro da maior fonte de incertezas para o processo de medição de deformação com sensor de fibra óptica. Quanto a isso, duas observações podem ser feitas:

- # A primeira trata-se de um aspecto positivo a ser considerado. O sistema de medição proposto tem características metrológicas satisfatórias para o fim a que foi idealizado: medir fluência à tração em argamassa com incertezas compatíveis com as necessidades práticas, podendo estas chegarem a valores menores que os obtidos com o próprio extensômetro, visto que boa parte da incerteza típica do processo de medição é herdada do sistema de medição de referência.
- # Se o objetivo é a redução de incertezas, a providência a ser tomada é calibrar o sensor de fibra óptica com um sistema de medição padrão com incertezas menores, como por exemplo, extensômetros de deformação total, que gerariam uma incerteza da calibração da ordem de $0,1 \mu\text{m/m}$.

Quanto a melhorias no sistema de medição de referência utilizado nesse trabalho, as explicações encontram-se no Anexo 2.

6.1 Apresentação dos Resultados

6.1.1 Ensaio de Linearidade

O equacionamento matemático proposto para a medição de deformação, no Capítulo 5 - Calibração e Avaliação Metrológica do Sistema de Medição, Equação 5.1, demonstra que se trata de uma grandeza linear, apesar disso, há que se comprovar experimentalmente sua linearidade. Para tanto, foram planejados ensaios de deformação elástica dos corpos de prova de argamassa, com cargas de 25% a 45% da carga de ruptura à tração.

Os ensaios de deformação elástica são aqueles em que se aplica carga conhecida e mede-se a deformação do material. Um exemplo de ensaio de linearidade são os ensaios realizados para determinação do comprimento equivalente, onde se aplica uma carga ao corpo de prova e se mede a ordem de franja, proporcional à deformação do mesmo.

Nos diagramas das figuras a seguir, representando ensaios executados em corpos de prova gêmeos, pode-se observar o comportamento linear dos dados para as faixas de medição estudadas.

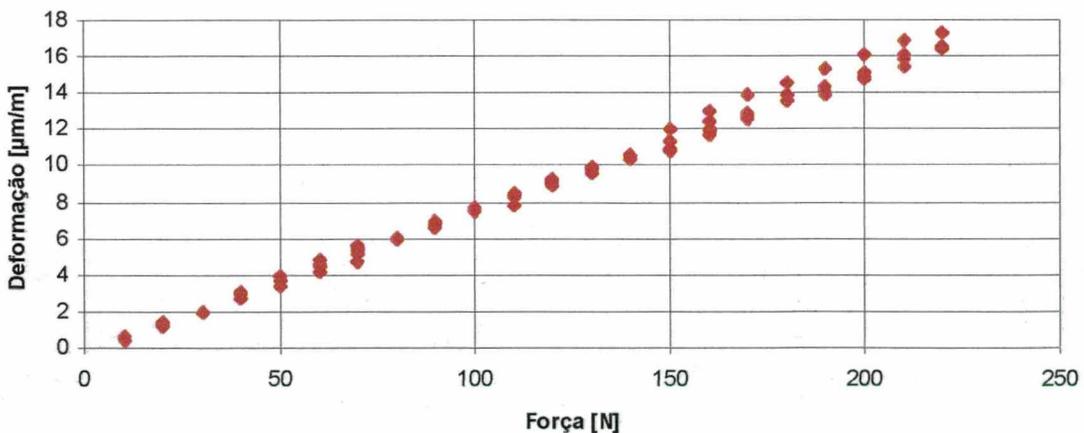


Figura 6.1 - Ensaio de linearidade do sensor de fibra óptica.

No ensaio da Figura 6.1, analisa-se o comportamento do sensor de fibra óptica perante carregamentos e descarregamentos sucessivos do corpo de prova ativo com até

25% da carga de ruptura à tração, estimada como sendo 10% da resistência à compressão de amostras cilíndricas.

Houve uma dispersão dos dados da situação de linearidade esperada, atribuída principalmente às fontes de instabilidade já citadas no Capítulo 5 - Calibração e Avaliação Metrológica do Sistema de Medição.

Em seguida foram feitas medições comparativas do sensor de fibra óptica com um sistema de medição de deformação bastante conhecido e utilizado na Engenharia Civil, tendo como sensores, extensômetros de resistência elétrica. Estas medições produziram diagramas como o da Figura 5.1, no Capítulo 5 - Calibração e Avaliação Metrológica do Sistema de Medição, nos quais a resposta do sensor de fibra é bastante linear, mas com uma inclinação diferente da curva apresentada pelo sistema de medição extensométrico.

Nesse momento, deparou-se com a necessidade de uma calibração do sensor estudado, a fim de que seus dados pudessem ser comparados com os dados de saída de outro sistema de medição. Na calibração determinou-se o comprimento equivalente e , a partir de então, os resultados obtidos para os ensaios de linearidade foram tipicamente como os representados nas Figuras 6.2 e 6.3, com curvas lineares e muito semelhantes para os dois sistemas de medição comparados, mesmo quando se trata de argamassas diferentes, como é o caso dos gráficos das Figuras 6.4 e 6.5.

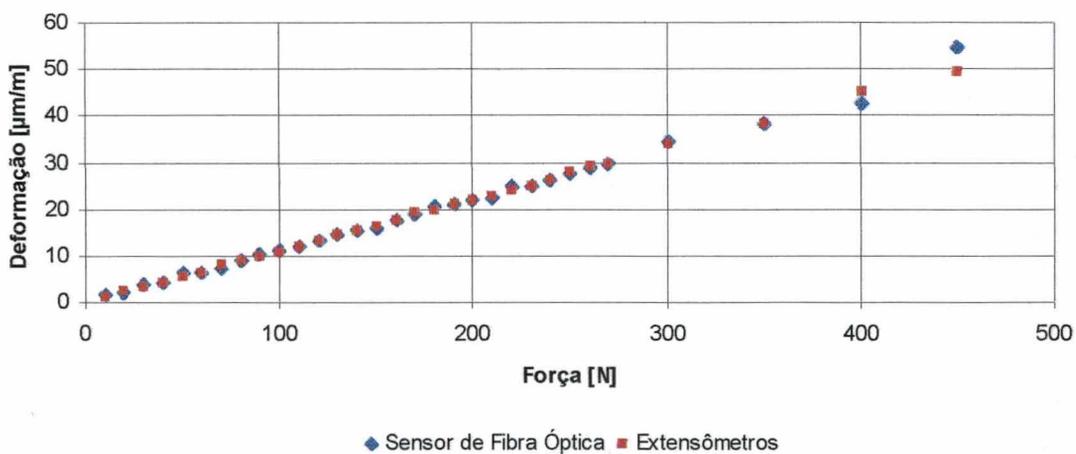


Figura 6.2 - Ensaio de linearidade do sensor de fibra óptica x extensômetros.

A linearidade é uma característica comum a todos os ensaios, entretanto cabe ressaltar que em alguns experimentos, como o da Figura 6.2, não foi coberta toda a faixa de medição proposta, devido a dificuldades em se trabalhar com uma quantidade de massas padrão dessas dimensões. Deve-se, também, a tal motivo, a pequena dispersão dos dados ao final da curva, o que já não ocorre para os demais experimentos, nos quais

adotou-se uma faixa de estudo menor, de aproximadamente 35% da carga de ruptura do material.

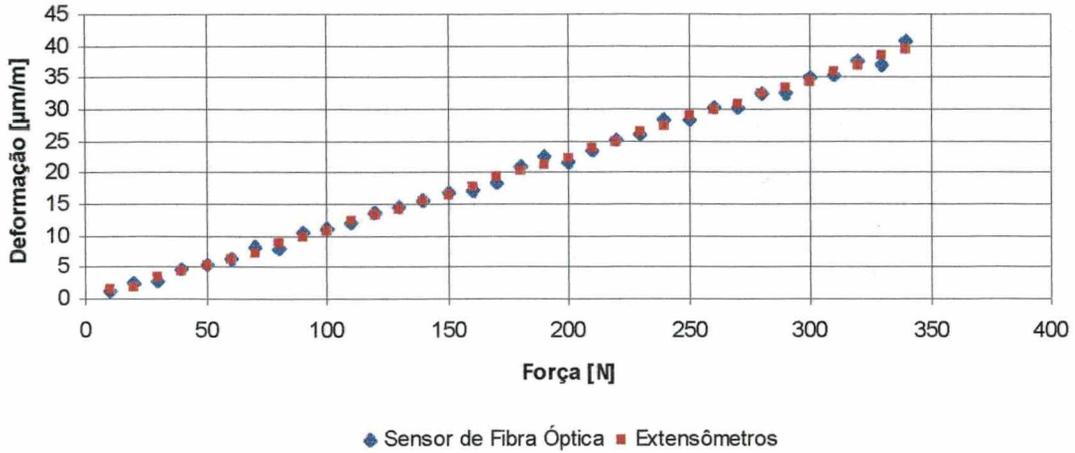


Figura 6.3 - Ensaio de linearidade do sensor de fibra óptica x extensômetros.

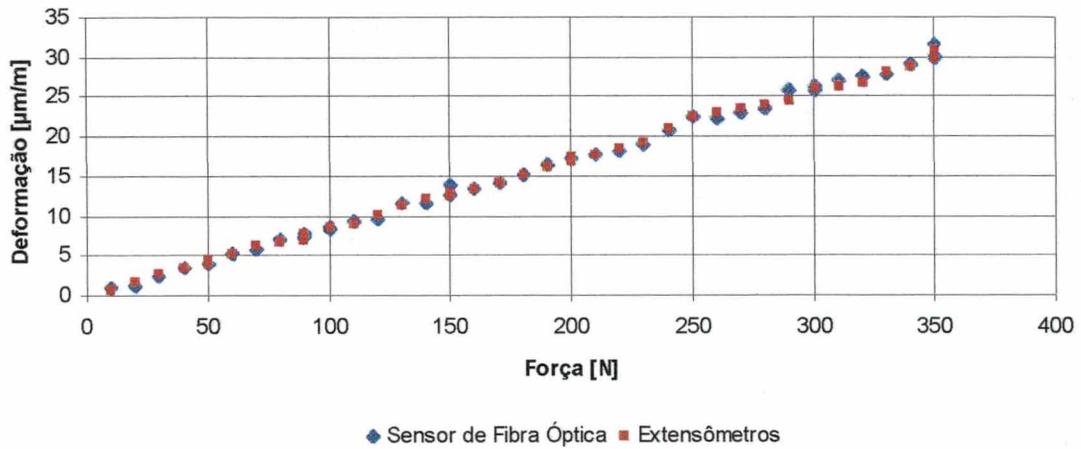


Figura 6.4 - Ensaio de linearidade do sensor de fibra óptica x extensômetros.

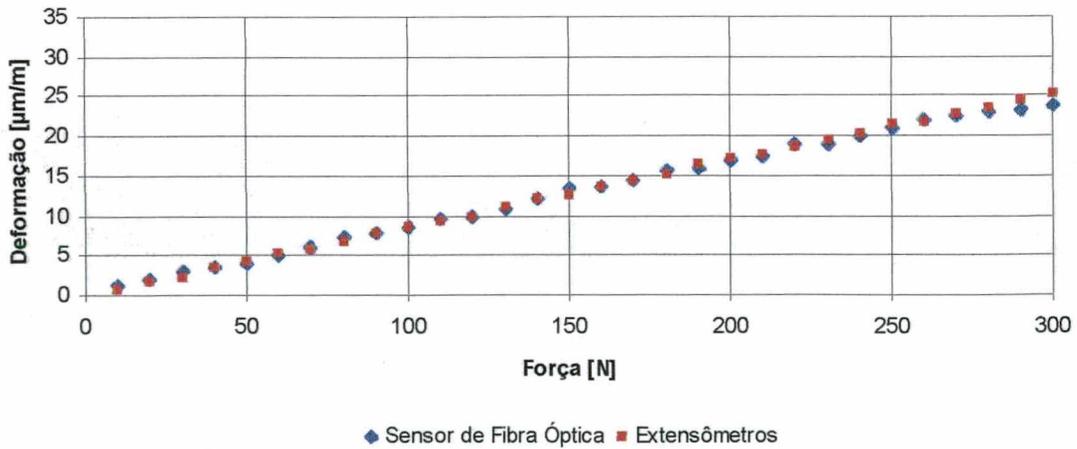


Figura 6.5 - Ensaio de linearidade do sensor de fibra óptica x extensômetros.

6.1.2 Ensaio de Estabilidade

O experimento representado na Figura 6.6 faz parte da primeira série de ensaios de estabilidade, nos quais a fibra óptica permanece sozinha, ocupando os dois braços do interferômetro, a fim de que seja avaliada a sua contribuição para a estabilidade do sensor.

Durante as 15 horas de ensaio, observa-se um comportamento bem definido do sinal de saída do interferômetro, embora se tratem de valores de deformação elevados, da ordem de $5 \mu\text{m}/\text{m}$ (pico a pico), que corresponderiam a uma força de aproximadamente 50 N num ensaio de linearidade. Uma explicação para tal oscilação é o fato de as fibras estarem completamente expostas ao ambiente, além de permanecerem livres sobre a bancada, podendo estar dispostas de maneira diferente uma da outra.

Conhecida a extrema sensibilidade da fibra óptica à temperatura, que chega algumas vezes a se comportar como um sensor de efeitos ambientais, adotou-se o procedimento de monitorar temperatura e umidade durante os ensaios de estabilidade.

Os gráficos de temperatura e umidade correspondentes a esse ensaio estão representados nas Figuras 6.7 e 6.8. Não se pode afirmar dependência entre o sinal de saída do sensor de fibra óptica e as variações das condições ambientais, as quais permaneceram da ordem de 2% para a umidade (entre 48% e 50,5%) e $0,2^\circ\text{C}$ para a temperatura (entre $19,7^\circ\text{C}$ e $19,9^\circ\text{C}$). Essa independência era esperada, já que se trata de um interferômetro em cujos braços estão duas fibras ópticas idênticas.

Nota-se que durante o experimento, temperatura e umidade estiveram em patamares distintos dos demais ensaios, provavelmente por problemas no sistema de controle das condições ambientais, entretanto sem prejuízos ao ensaio.

No ensaio da Figura 6.9, com duração de 17 horas, a curva de estabilidade é semelhante àquela do ensaio com a fibra sozinha, mas com uma oscilação bastante reduzida da deformação, da ordem de $1 \mu\text{m}/\text{m}$. Isso se explica pelo fato de as fibras estarem embutidas nos corpos de prova gêmeos, e portanto isoladas do meio ambiente, condição normal de ensaio. Além de estarem dispostas de maneira muito semelhante no seu interior, diferente do que pode ter acontecido no ensaio anterior.

Cabe ressaltar, então, que as fibras devem estar sob as mesmas condições, inclusive no que se refere a tensões, causadas por flexão diferenciada de alguns pontos na parte exposta da fibra, enrolados de maneira diferente em um dos braços do interferômetro. Esse fato pode mascarar a resposta do sensor, que nesses casos pouco ou nada representa a grandeza de interesse.

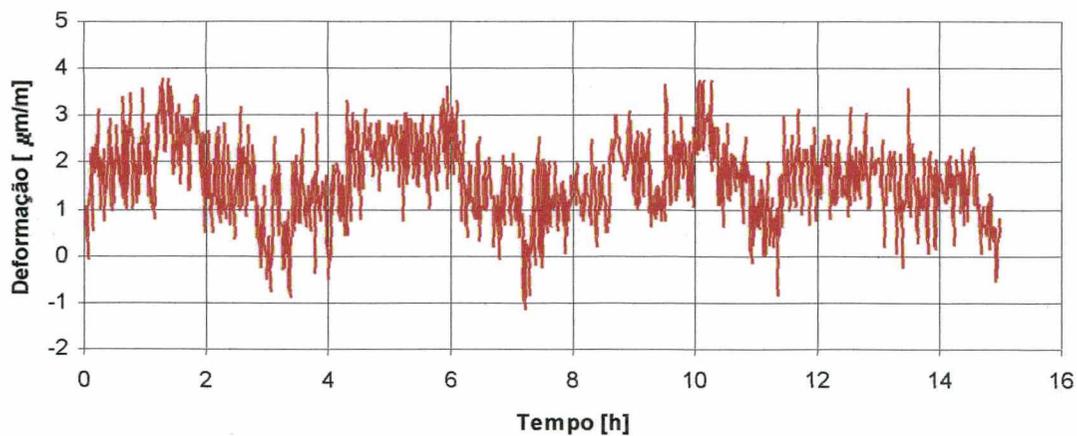


Figura 6.6 - Ensaio de estabilidade: fibra óptica sozinha.

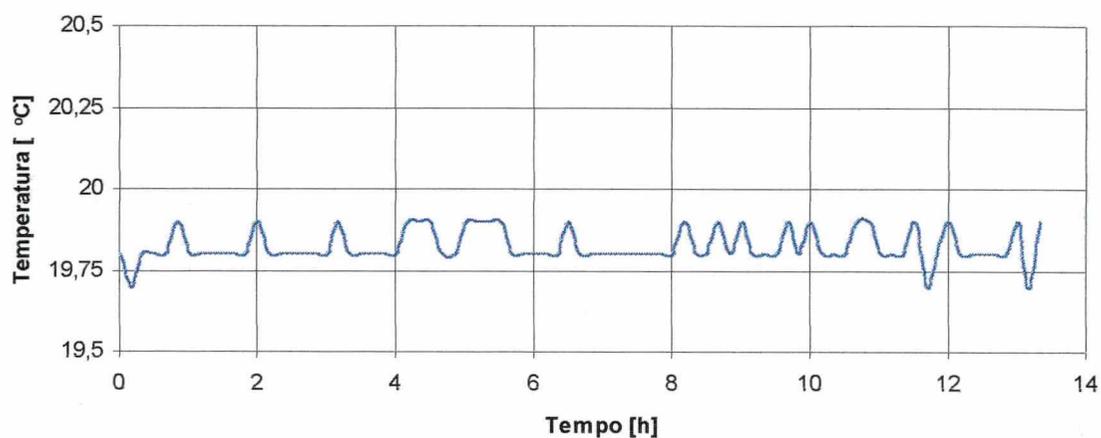


Figura 6.7 - Controle de temperatura durante o ensaio de estabilidade.

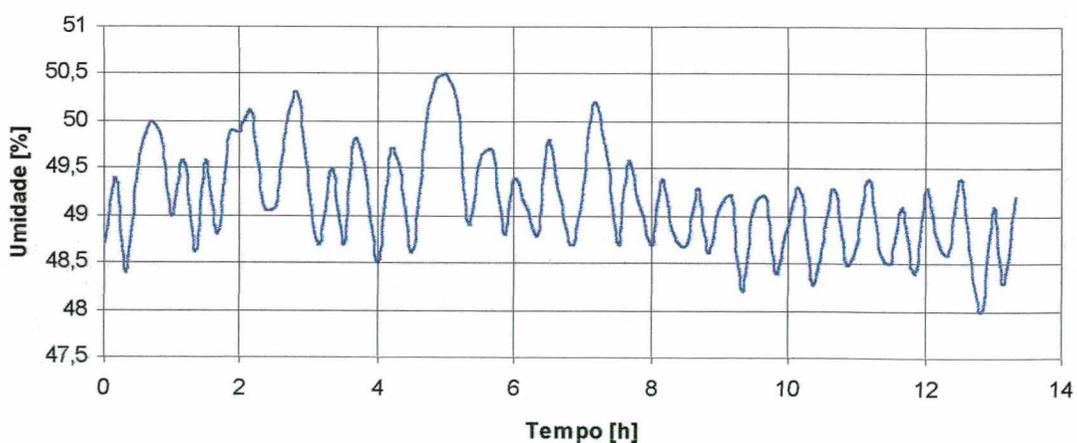


Figura 6.8 - Controle de umidade durante o ensaio de estabilidade.

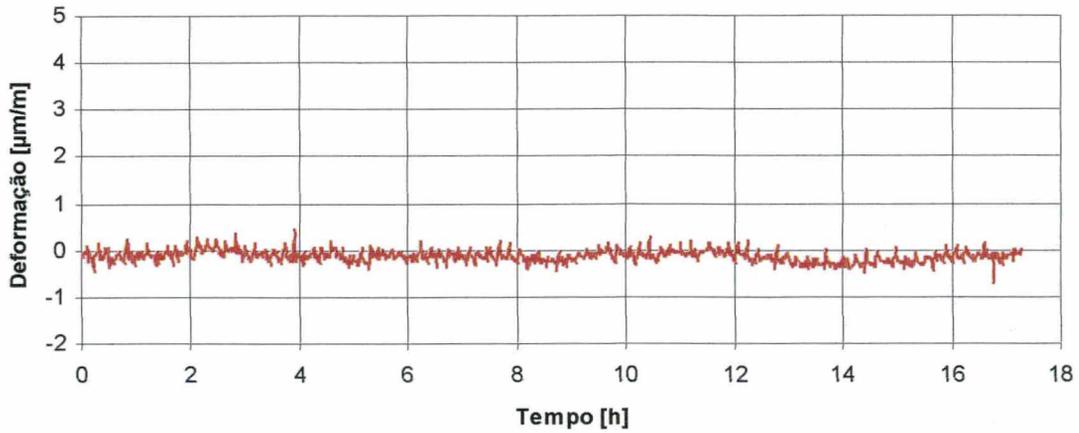


Figura 6.9 - Ensaio de estabilidade: corpos de prova sem carga ao ar.

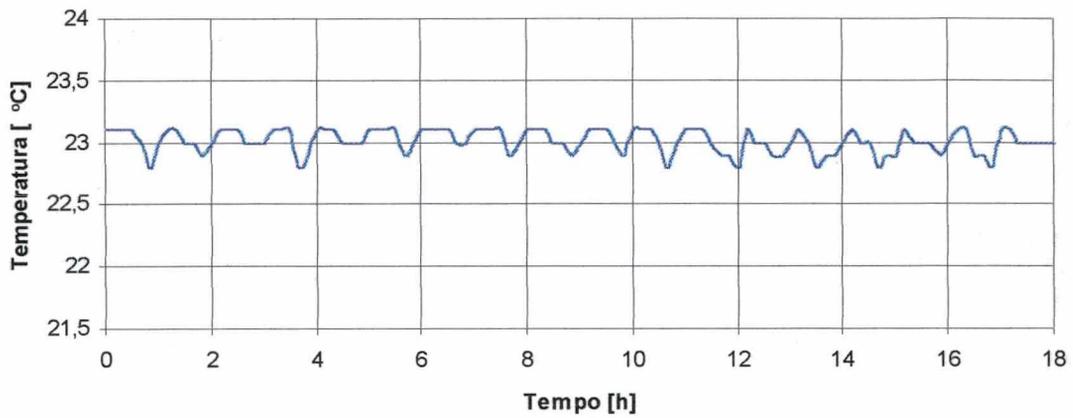


Figura 6.10 - Controle de temperatura durante o ensaio de estabilidade.

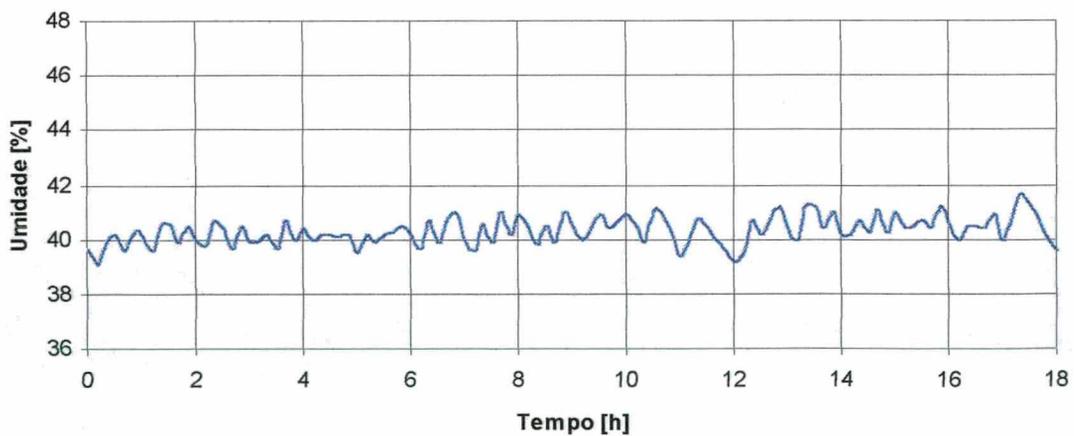


Figura 6.11 - Controle de umidade durante o ensaio de estabilidade.

Observando os diagramas de monitoração das condições ambientais para os ensaios acima analisados, Figuras 6.10 e 6.11, o que se pode concluir novamente, é a

ausência de qualquer influência da umidade ou temperatura na estabilidade do sensor. As variações desses parâmetros permaneceram da ordem de 2% para a umidade (entre 39% e 41%) e 0,5°C para a temperatura (entre 22,75°C e 23,25°C).

A Figura 6.12 representa a terceira modalidade de ensaio de estabilidade, com os corpos de prova imersos em água. O objetivo desse experimento é reduzir o efeito de variações de temperatura e eliminar os efeitos de retração do material, que neste caso, não perderia umidade para o ambiente. As oscilações iniciais, até 30 minutos de ensaio, correspondem ao período em que os corpos de prova estão absorvendo água, que tende a preencher a porosidade (vazios) do material, até um momento em que há estabilidade desse efeito inicial. Então, observa-se comportamento semelhante ao dos demais ensaios de estabilidade.

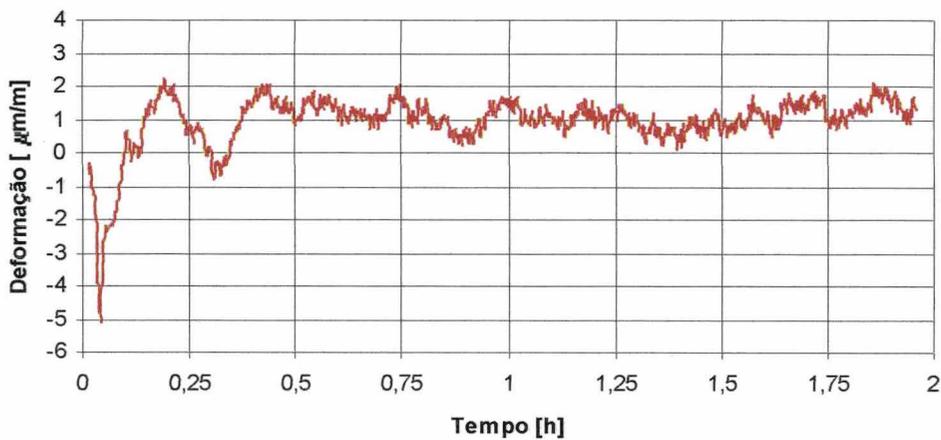


Figura 6.12 - Ensaio de estabilidade: corpos de prova sem carga na água.

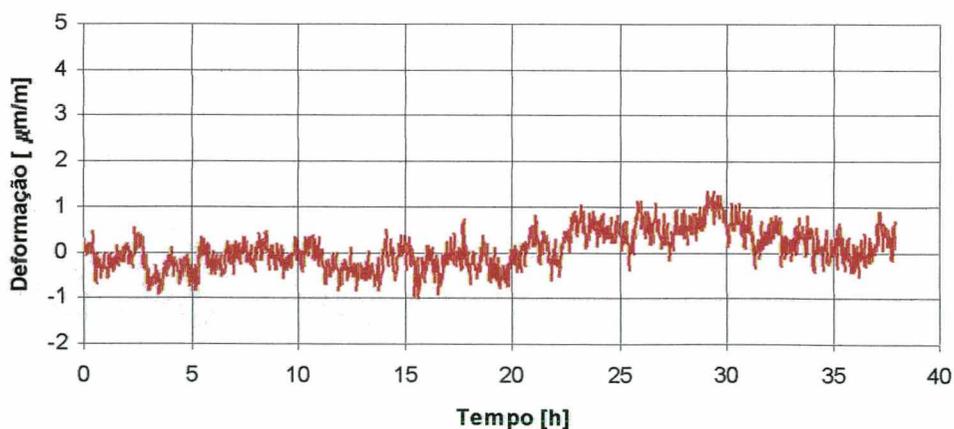


Figura 6.13 - Ensaio de estabilidade: corpos de prova sem carga na água.

Já o ensaio da Figura 6.13, mais longo, demonstrou semelhança aos demais ensaios de estabilidade, com oscilações da ordem de $2 \mu\text{m}/\text{m}$ para variações de temperatura semelhantes, durante 40 horas.

O número de ensaios realizados com corpos de prova imersos foi reduzido, não sendo possíveis conclusões muito aprofundadas a respeito. Entretanto, pode-se afirmar que, em um ambiente de laboratório de construção civil, onde a temperatura e a umidade relativa do ar não têm um controle rigoroso, a alternativa de ensaios submersos é interessante. Fundamentalmente, porque as variações de temperatura dentro d'água são extremamente pequenas e a umidade é constante, fatos que para um ensaio de fluência, medida com o sensor de fibra óptica proposto são de grande contribuição.

6.1.3 Ensaio de Fluência

Nos ensaios de deformação lenta, aplicaram-se forças abrangendo 35% a 40% da carga de ruptura à tração da argamassa.

A Figura 6.14 representa um ensaio de fluência, de duração aproximada de 5 dias, no qual o corpo de prova ativo foi submetido à força de 350 N, à qual corresponde a deformação inicial, e permaneceu sob tensão constante durante o tempo, período em que se manifestou a deformação lenta.

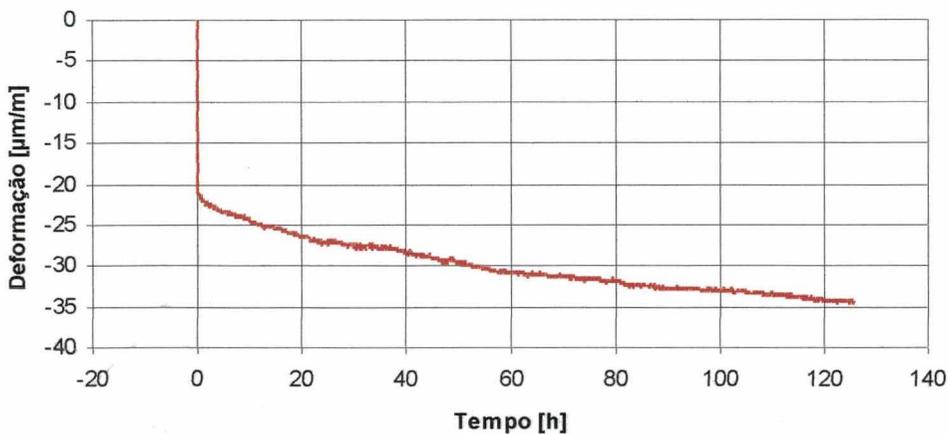


Figura 6.14 - Ensaio de deformação lenta do corpo de prova de argamassa.

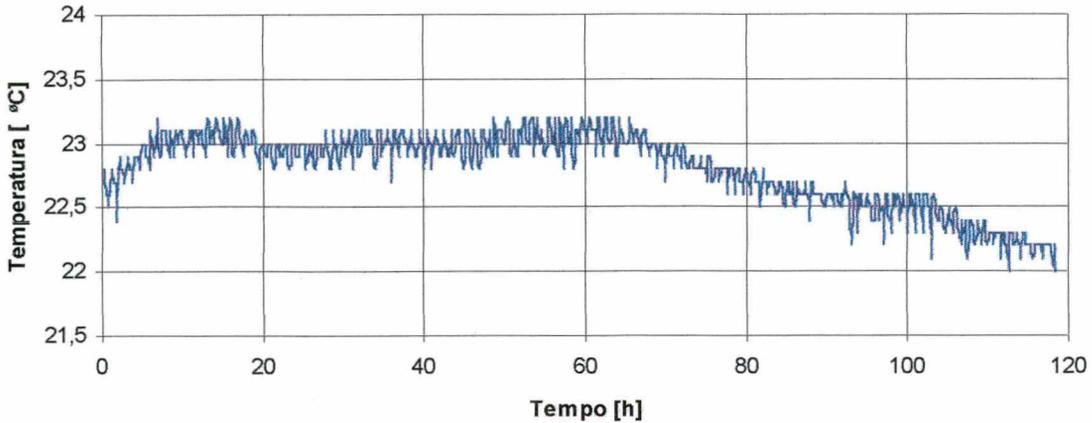


Figura 6.15 - Controle de temperatura durante o ensaio de deformação lenta.

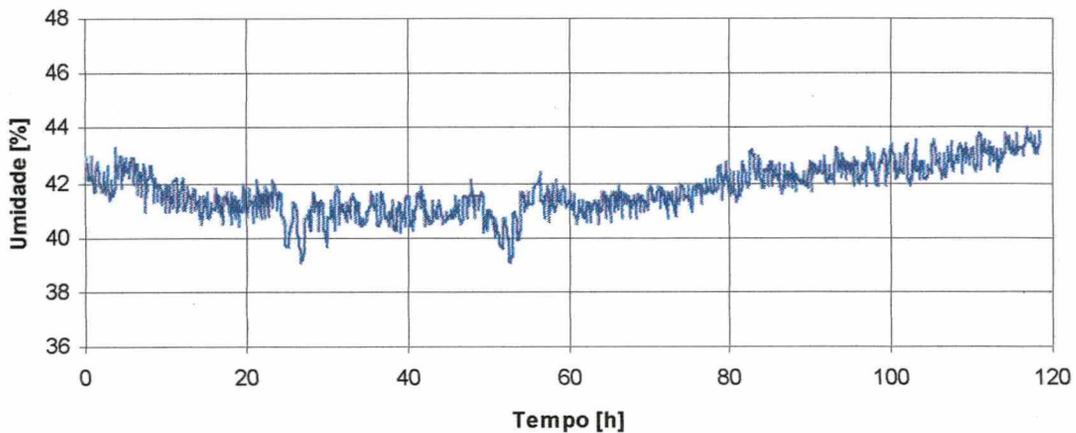


Figura 6.16 - Controle de umidade durante o ensaio de deformação lenta.

Trata-se de um ensaio para o primeiro traço testado, mistura que origina uma argamassa mais deformável. No período decorrido, observa-se um acréscimo da deformação de, aproximadamente $12 \mu\text{m}/\text{m}$, atribuído somente à fluência.

Essa afirmação pode ser feita pois os demais fenômenos simultâneos, a serem considerados num ensaio de fluência, como retração, deformação devida a reações químicas, entre outros, são compensados pela presença de um corpo de prova de referência, gêmeo, requerido pela medição interferométrica. Logo, atribui-se somente ao carregamento a variação de deformação medida com o sensor de fibra óptica.

Quanto às variações de temperatura, da ordem de 1°C , e da umidade, 5%, observados nas Figuras 6.15 e 6.16, afirma-se que são valores maiores do que os encontrados para os ensaios de estabilidade devido ao fato de se tratar de um ensaio de mais longa duração, mas que também não manifestaram influência sobre os experimentos de deformação lenta. Esta constatação foi confirmada na ocasião em que

estimaram-se as fontes de incerteza relativas aos efeitos da temperatura sobre as fibras e os corpos de prova.

A partir do ensaio da Figura 6.17, adotou-se o procedimento de descarregar o corpo de prova ativo ao final do tempo de deformação lenta, para avaliar a resposta do sensor, por meio de um dispositivo manual, Figura 4.21, Capítulo 4 - Medição de Deformação em Argamassas. O corpo de prova, inicialmente carregado com 400 N, teve uma deformação lenta de 8 $\mu\text{m}/\text{m}$, em 2,5 dias, ao final dos quais durante o descarregamento lento, recuperou a parcela de deformação elástica, e a parte reversível da fluência, restando uma deformação residual.

Com esse diagrama constata-se que a resposta do sensor é adequada também para o descarregamento, que “corresponde” a uma tensão de compressão na amostra.

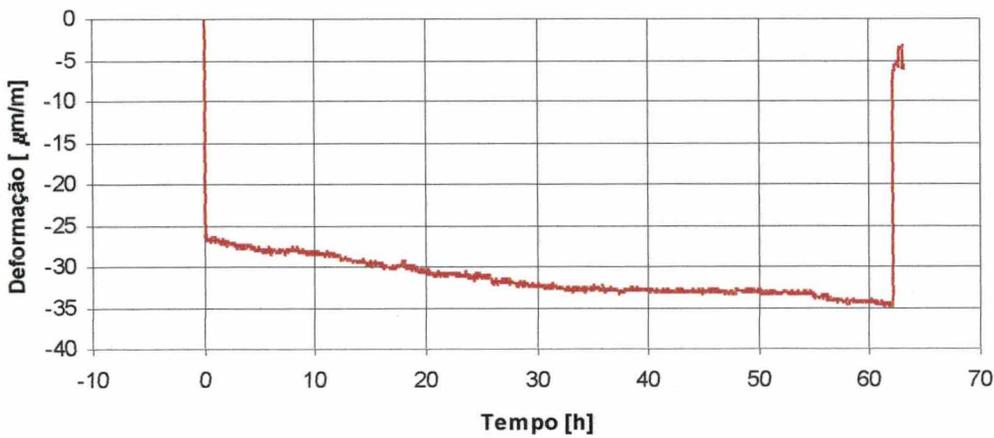


Figura 6.17 - Ensaio de deformação lenta do corpo de prova de argamassa.

A temperatura e a umidade tiveram variações de 1°C e 4,5% para o ensaio da Figura 6.17, e de 1°C e 6% para o ensaio da Figura 6.18. Em ambos os casos tais oscilações não influenciaram os resultados.

O ensaio apresentado na Figura 6.18, abaixo, é o mais longo experimento realizado durante o trabalho, com duração total de 8,5 dias, interrompidos por uma falta de luz involuntária. Durante os primeiros 6 dias, o corpo de prova ativo esteve sob tensão constante, carregado com uma força de 350 N, nos 2,5 dias seguintes, permaneceu em repouso.

A partir desse ensaio, constatou-se que o sensor acompanha a resposta do material ao fenômeno de reversibilidade, mais especificamente denominado recuperação por fluência. Observa-se também, que a deformação elástica não foi toda recuperada. Explica-se isso com a possibilidade de ter ocorrido um descarregamento rápido, a ponto de franjas terem sido ignoradas pelo contador do programa Conta Franja.

A Figura 6.19 representa mais um ensaio de fluência, com duração de 6,5 dias, sendo 5,5 sob tensão e 1 dia sem carga. Como nos ensaios anteriores, a deformação elástica não retornou como esperado, pelo mesmo motivo citado, mas é importante afirmar que o comportamento esperado para um diagrama de fluência está claramente delineado, com deformação lenta de $5 \mu\text{m/m}$ e $2,5 \mu\text{m/m}$ de recuperação da fluência.

Temperatura e umidade oscilaram na ordem de 1°C e 5% , respectivamente.

O último diagrama apresentado, Figura 6.20, corresponde a um ensaio de deformação lenta em corpos de prova de argamassa do Traço 2, (1:3). O objetivo principal desse experimento é testar a sensibilidade do sensor a materiais de diferentes propriedades.

Delineou-se, mais uma vez o comportamento típico apresentado pelos demais ensaios. O fato curioso de o gráfico aparecer invertido se deve à escolha, também invertida, dos braços do interferômetro, na hora de acoplar a luz do laser na fibra, o que em nada afeta os valores de deformação registrados.

Nota-se que, para a mesma força aplicada, de 350 N , a deformação apresentada pelo material do Traço 2 é muito inferior, fato explicado por se tratar de material menos deformável, com maior rigidez, que o material do Traço 1.

A ausência de efeitos da temperatura e umidade sobre os dados de saída do sensor e a recuperação parcial da deformação elástica inicial manifestaram-se novamente.

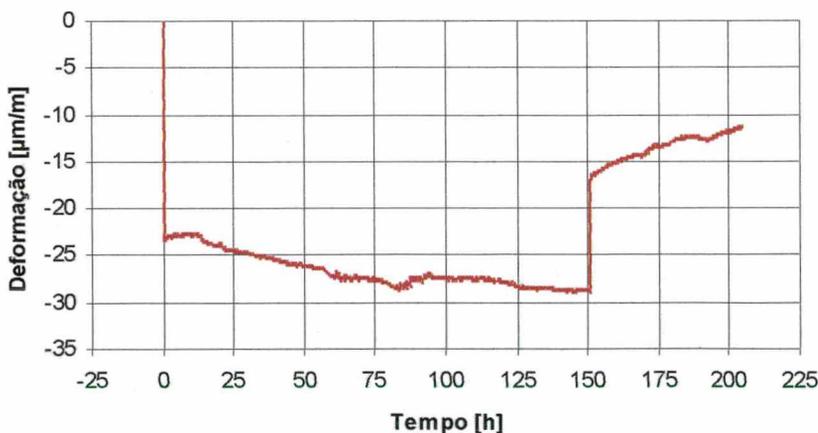


Figura 6.18 - Ensaio de deformação lenta do corpo de prova de argamassa.

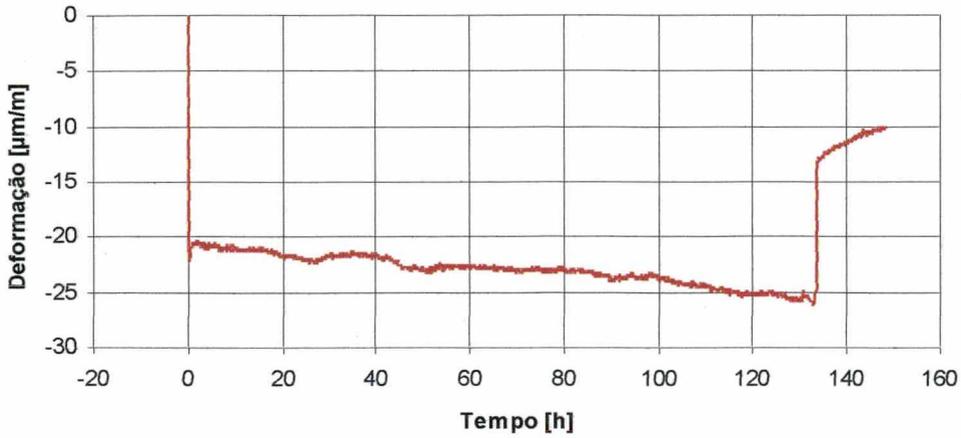


Figura 6.19 - Ensaio de deformação lenta do corpo de prova de argamassa.

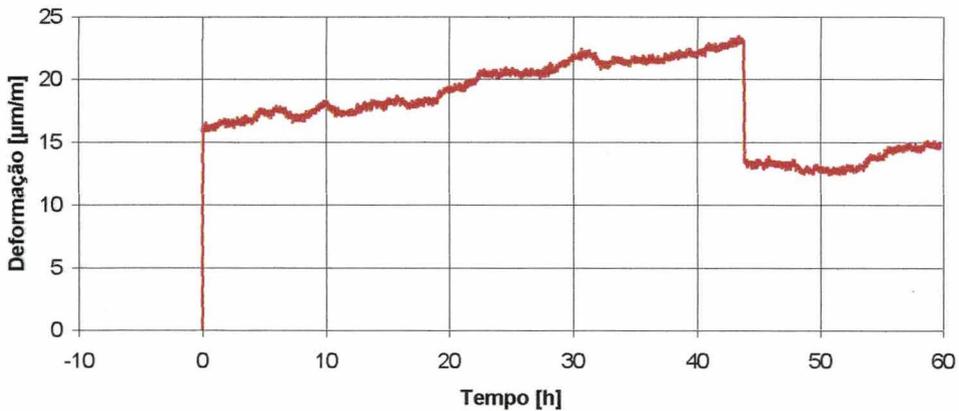


Figura 6.20 - Ensaio de deformação lenta do corpo de prova de argamassa.

6.2 Considerações Finais

Entre os corpos de prova utilizados nos ensaios, houveram diferentes traços, processos de cura e também comprimento e posicionamento do sensor, correspondentes às etapas evolutivas do trabalho. Entretanto, é importante lembrar, que os mesmos foram usados aos pares, ou seja, o sensor exige amostras gêmeas, como condição indispensável para confiabilidade das medições.

Quando foram usados corpos de prova de idades distintas, misturas ou processos de cura incomuns, respostas inesperadas do sensor foram obtidas. Um aspecto positivo a esse respeito é a elevada sensibilidade do sensor a grandezas que agem de forma diferenciada nos braços ativo e de referência do interferômetro.

No que diz respeito aos ensaios realizados para caracterizar o sensor desenvolvido, cujos resultados estão apresentados no Capítulo 6 - Experimentos, algumas observações podem ser feitas. A linearidade do sensor foi comprovada através dos ensaios de deformação elástica do material, com até 40% de sua carga de ruptura.

Os ensaios de estabilidade, tanto submersa quanto ao ar, comprovaram a adequabilidade do sensor para a determinação de fluência, cujos experimentos requerem um sistema estável por longos períodos de tempo. Os níveis de instabilidade encontrados estão dentro do previsto na análise de incertezas e são tipicamente superiores aos que se encontra com extensômetros de resistência.

Esses ensaios demonstraram, também, que o posicionamento do sensor no interior dos corpos de prova mantém a oscilação do sinal de saída do sensor em patamares menores do que quando a fibra esteve sozinha, ocupando os dois braços do interferômetro. Outro aspecto positivo da disposição do sensor é a obtenção de um valor de deformação médio, mais representativo do que aqueles obtidos por sensores pontuais.

Os ensaios de deformação lenta explicitaram a elevada sensibilidade do sensor a pequenos níveis de deformação, comuns a ensaios de deformação lenta. Esse fato pode levar à possibilidade de redução no tempo de um ensaio de fluência, devido à elevada resolução alcançada, com a qual registra-se pequenas variações na deformação em pouco tempo.

A incerteza típica do processo de medição de deformação em argamassa com fibra óptica é da ordem de $1,86 \mu\text{m}/\text{m}$, correspondendo a uma deformação medida de $35 \mu\text{m}/\text{m}$, valor inicial aproximado para um ensaio de fluência.

No que se refere às características metrológicas do sensor de fibra óptica, estimadas no Capítulo 5 - Calibração e Avaliação Metrológica do Sistema de Medição, observou-se que a fonte de incertezas que mais contribuiu para a incerteza da deformação medida é o comprimento equivalente de fibra óptica, determinado experimentalmente durante a calibração do sensor. Esta tem valor relativo da ordem de 2,2% da deformação medida.

Da observação das fontes de incertezas da calibração, pode-se afirmar que por sua vez, a que mais contribui é a fonte relativa à medição de deformação com extensômetros, ou

seja, a incerteza herdada do sistema de medição adotado como referência. Trata-se de um aspecto positivo do sistema de medição proposto, visto que a maior parte da incerteza do sistema de medição com sensor de fibra óptica é externa ao próprio sensor, não depende dele. Assim, o mesmo tem potenciais condições de ter sua incerteza reduzida, simplesmente pela adoção de um sistema de medição de referência com características de incerteza muito mais favoráveis, como os extensômetros de deformação total. Em relação a melhoramentos passíveis de serem feitos no sistema de medição de referência, observações já foram feitas no Anexo II, referentes ao tipo de extensômetro utilizado e à influência dos cabos.

A segunda fonte de maior influência é a monitoração da ordem de franja, fundamentalmente no que se relaciona com as instabilidades em geral e com as possíveis assimetrias no posicionamento do sensor em relação à linha neutra do corpo de prova, mas que mesmo assim, tem valor da ordem de 1,36%, metade da contribuição do comprimento equivalente.

Constata-se nesse ponto, uma limitação do sistema, referente à taxa de aquisição de dados, que em carregamentos ou descarregamentos rápidos pode levar à perda de franjas, aumentando a incerteza do resultado. Sugere-se um sistema de contagem de franjas baseado em fotodiodos, a fim de que as franjas sejam contadas de maneira mais rápida, minimizando essa limitação relativa à velocidade de aplicação de carga.

Sugere-se, então, para trabalhos futuros, o desenvolvimento de um sensor compacto, com fotodiodos, capaz de produzir e contar as franjas de interferência com grande velocidade e a um baixo custo.

Outra limitação do sensor é o fato de ser adequado especificamente para trabalhos de laboratório. Entretanto, sabe-se da importância fundamental desses trabalhos para o desenvolvimento de qualquer sistema mais robusto, além do fato que os objetivos do trabalho não ultrapassarem os ensaios em laboratório.

Para adequar o sistema às caracterizações de argamassas, para as quais ele foi desenvolvido, é necessário melhoramentos do sistema atual, como aperfeiçoar o sistema de tração, tornando-o mais rígido e portanto mais adequados à aplicação de cargas de tração. A forma de carregar e descarregar os corpos de prova demonstrou ter alguns pequenos problemas, que se resolveriam se fosse possível aplicá-la de maneira mais lenta.

Quanto aos efeitos das condições ambientais, seria uma boa prática isolar o sistema de variações da temperatura, umidade, vibrações e da própria luminosidade do ambiente,

inserindo o interferômetro de saída, em um local isolado, como uma caixa fechada. Ensaiai os corpos de prova dentro d'água é outra sugestão que não foi implementada com maior profundidade, mas acredita-se ser uma solução ideal para os ensaios realizados em ambientes sem controle rigoroso das condições de temperatura e umidade, o que não foi o caso dos experimentos desse trabalho.

A fibra óptica merece especial atenção, evitando-se curvaturas acentuadas nas partes não embutidas dos braços do interferômetro, a fim de não introduzir tensões diferentes das que se deseja medir. Também, seria importante encontrar uma forma mais adequada e acima de tudo prática para configurar o interferômetro de saída, de forma que fique fácil encontrar as franjas de interferência a cada troca de corpos de prova a ensaiar e evitar o efeito de movimentação das franjas por outros motivos externos à grandeza de interesse.

Fazer uma clivagem adequada na extremidade da fibra, antes de instalar o sensor nas fôrmas, para não precisar fazê-lo depois, podendo originar diferentes comprimentos nos braços ativo e de referência do sensor.

Verificar, antes da divisão do feixe e acoplamento, o estado de limpeza do espelho e das pontas da fibra, para que o sinal de interferência seja visível o suficiente.

Os corpos de prova têm que ser gêmeos, provenientes da mesma mistura, moldagem, cura, e de mesma idade no momento do ensaio. Além disso, na hora da instalação do sensor, deve-se utilizar para cada corpo de prova, fibras ópticas de mesmas características, preferencialmente retiradas de forma contígua de um mesmo rolo.

Quanto à operacionalização do sensor por outra pessoa, afirma-se basta um pouco de prática e a razoável experiência em fundamentos de ótica que o uso do sensor requer. Tomando todos os cuidados citados nesse trabalho e com uma noção do comportamento esperado para o material a caracterizar, pode-se fazer bom uso do sensor disponibilizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AKIAMA, Solange Y., MEDEIROS, Jonas S., SABBATINI, Fernando H. **Flexibilidade das Argamassas**. II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Salvador, 1997. Anais p. 233-245.
- [2] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 7200 - Revestimento de paredes e tetos com argamassas - Materiais, preparo, aplicação e manutenção - Procedimento**. Rio de Janeiro, ABNT, 1982.
- [3] PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland** - São Paulo: Editora Globo, 12ª. Ed., 1993.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 2ª. Ed. Rev. Atual. São Paulo, 1994.
- [5] FILOMENO, Orlando L., **Caracterização das argamassas de assentamento empregadas na região de Florianópolis e estudo comparativo entre argamassas de assentamento de cimento e cal e cimento e saibro**. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 1993.
- [6] FIORITO, A. J. S. I., **Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução**. São Paulo: Pini, 1994.
- [7] TRISTÃO, Fernando A., **Influência da Composição Granulométrica da Areia nas Propriedades das Argamassas de Revestimento**. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 1995.
- [8] HOLMER, S. J., DANTAS, F. A. S., AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras: correlação entre a zona de transição fibra-matriz e as propriedades mecânicas**. [Boletim 67] São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: Pini, 1994.
- [9] NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto** - São Paulo: Pini, 1994.
- [10] EQUIPE DE FURNAS, LABORATÓRIO DE CONCRETO, **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado a rolo: ensaios e propriedades**. Editor Walton Pacelli de Andrade, São Paulo: Pini, 1997.
- [11] MEHTA, P.K. & MONTEIRO, P.J.M. **Concreto - Estrutura, Propriedades e Materiais** - São Paulo: Pini, 1994.

- [12] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 8224 - Concreto Endurecido - Determinação da Fluência - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, ABNT, 1983.
- [13] THOMAZ, E. **Trincas em Edifícios: causas, prevenção e recuperação**. São Paulo: Pini, 1989.
- [14] SCHNEIDER, Samuel J. **Engineered materials Handbook - V.4 - Ceramics and glasses**. USA, 1987, 409-417.
- [15] KHAZAN, Alexander D., **Transducers and their elements: design and applicatios**. Ed. PTR Prentce Hall, 1993, 446-463.
- [16] KOBAYASHI, A., **Handbook on Experimental Mechanics**, Ed., 2nd rev. ed., SEM, New York, 1993, 67-77.
- [17] UDD, Eric et al., **Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists**. USA: Edited by Eric Udd, 1990.
- [18] SIRKIS, James. S., **Using Fiber Optic Strain Sensors**. Apostilas do Curso preparado para o 9º Simpósio Brasileiro de Vasos de Pressão e (tubos) Piping. Rio de Janeiro, 1996.
- [19] MALACARA, Daniel. **Optical Shop Testing**. 2nd edition, John Wiley and Sons. 1992.
- [20] ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM C 190 - 85 - "Standard Test Method for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars"**, 1985.
- [21] FU, Xuli and Chung, D.D.L. **Effect of methylcellulose admixture on the mechanical properties of cement**. *Cement and Concrete Research*, 1996.
- [22] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 7215 - Ensaio de Cimento Portland - Método de Ensaio**, Rio de Janeiro, ABNT, Fevereiro, 1982.
- [23] MÉNDEZ A., MORSE T. F., REINHART L. J. **Experimental Results on Embedded Optical Fiber Sensors in Concrete**. *Smart Sensing, Processing, and instrumentation*, 1993.
- [24] KAPP, Walter Antônio, **Otimização do Desempenho Metrológico do Sistema de Medição Estação Holográfica**. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 1997.

DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO EQUIVALENTE

PARTE 1 - Estimativa da Incerteza na Monitoração da Ordem de Franja

Tabela I.1 - Ensaio 1 - Determinação do comprimento equivalente - Traço 1.

Força [N]	OF	ϵ_{SG} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	a [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_{SFO} [$\mu\text{m}/\text{m}$]
10	8,5	1,49	0,1757	1,59
20	12,04	2,49	0,2067	2,26
30	17,94	3,48	0,1942	3,36
40	21,21	4,48	0,2112	3,97
50	30,17	5,47	0,1815	5,65
60	35,63	6,47	0,1816	6,68
70	39,95	7,96	0,1993	7,48
80	45,99	8,96	0,1948	8,62
90	54	9,95	0,1843	10,12
100	59,9	10,95	0,1828	11,22
110	65,51	11,94	0,1823	12,27
120	72,56	13,44	0,1852	13,59
130	79,32	14,43	0,1820	14,86
140	84,24	15,43	0,1831	15,78
150	87,83	16,42	0,1870	16,45
160	93,99	17,42	0,1853	17,61
170	102,02	19,41	0,1903	19,11
180	107,34	19,91	0,1855	20,11
190	112,77	20,90	0,1854	21,13
200	119,35	21,90	0,1835	22,36
210	122,17	22,89	0,1874	22,89
220	132,61	23,89	0,1801	24,84
230	137,61	24,88	0,1808	25,78
240	144	26,38	0,1832	26,98
250	150,65	27,87	0,1850	28,22
260	156,5	29,36	0,1876	29,32
270	157,77	29,86	0,1893	29,56
300	181,65	33,84	0,1863	34,03
350	205,02	38,32	0,1869	38,41
400	227,02	45,29	0,1995	42,53
450	273,5	49,27	0,1801	51,24
	a_{barra}	$\mu\text{m}/\text{m}$	0,1873	
	L_{eq}	m	2,29	

Tabela I.2 - Ensaio 2 - Determinação do comprimento equivalente - Traço 1.

Força [N]	OF	ϵ_{se} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	a [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_{sFO} [$\mu\text{m}/\text{m}$]
10	7,62	1,49	0,1959	1,41
20	12,23	1,99	0,1628	2,26
30	17,36	3,48	0,2007	3,21
40	24,35	4,48	0,1839	4,51
50	29,69	5,47	0,1844	5,49
60	34,4	6,47	0,1881	6,37
70	44,01	7,47	0,1696	8,14
80	47,39	8,96	0,1890	8,77
90	54,76	9,95	0,1818	10,13
100	60,43	10,95	0,1812	11,18
110	65,96	12,44	0,1886	12,21
120	73,19	13,44	0,1836	13,54
130	80,2	14,43	0,1800	14,84
140	86,29	15,43	0,1788	15,97
150	93,95	16,42	0,1748	17,38
160	98,92	17,92	0,1811	18,30
170	101,76	19,41	0,1907	18,83
180	109,17	20,41	0,1869	20,20
190	120,39	21,40	0,1778	22,28
200	122,32	22,40	0,1831	22,63
210	128,23	23,89	0,1863	23,73
220	134,47	24,88	0,1851	24,88
230	140,19	26,38	0,1882	25,94
240	150,02	27,37	0,1825	27,76
250	155,49	28,87	0,1856	28,77
260	162,2	29,86	0,1841	30,01
270	164,33	30,86	0,1878	30,41
280	173,15	32,35	0,1868	32,04
290	174,02	33,34	0,1916	32,20
300	182,28	34,34	0,1884	33,73
310	187,38	35,83	0,1912	34,67
320	196,44	36,83	0,1875	36,35
330	196,84	38,32	0,1947	36,42
340	208,23	39,32	0,1888	38,53
	a barra	$\mu\text{m}/\text{m}$	0,1850	
	L_{eq}	m	2,32	

Tabela I.3 - Ensaio 3 - Determinação do comprimento equivalente - Traço 2.

Força [N]	OF	ϵ_{so} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	a [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_{sfo} [$\mu\text{m}/\text{m}$]
10	5,55	0,75	0,1345	1,03
20	9,62	1,74	0,1811	1,79
30	14,61	2,74	0,1874	2,71
40	18,5	3,48	0,1883	3,43
50	21,66	3,98	0,1838	4,02
50	22,49	4,48	0,1992	4,17
60	29,08	5,23	0,1797	5,40
70	31,74	6,22	0,1960	5,89
80	35,96	6,72	0,1868	6,68
90	42,55	7,71	0,1813	7,90
90	38,71	6,97	0,1800	7,19
100	46,93	8,46	0,1803	8,71
100	48,06	8,46	0,1760	8,92
110	52,38	9,21	0,1758	9,72
120	54,19	10,20	0,1883	10,06
130	61,44	11,45	0,1863	11,41
140	62,75	12,19	0,1943	11,65
150	71,35	12,94	0,1814	13,24
150	70,12	12,69	0,1810	13,02
160	73,55	13,44	0,1827	13,65
170	77,14	14,18	0,1839	14,32
180	82,17	15,18	0,1847	15,25
190	88,87	16,17	0,1820	16,50
200	94,58	17,42	0,1842	17,56
200	93,76	16,92	0,1805	17,40
210	96,34	17,67	0,1834	17,88
220	99,01	18,41	0,1860	18,38
230	102,19	19,16	0,1875	18,97
240	110,93	20,90	0,1884	20,59
250	118,59	22,40	0,1889	22,01
260	117,06	22,89	0,1956	21,73
270	118,05	23,39	0,1981	21,91
280	118,09	23,89	0,2023	21,92
290	127,83	24,39	0,1908	23,73
300	135	25,88	0,1917	25,06
300	136,78	25,88	0,1892	25,39
300	136,41	25,98	0,1904	25,32
310	140,96	26,38	0,1871	26,17
320	144,54	26,88	0,1859	26,83
330	148,41	28,12	0,1895	27,55
340	153,33	28,87	0,1883	28,46
350	159,3	29,86	0,1875	29,57
350	159,1	30,36	0,1908	29,53
350	165,02	30,86	0,1870	30,63
	a_{barra}	$\mu\text{m}/\text{m}$	0,1856	
	L_{eq}	m	2,31	

Tabela I.4 - Ensaio 4 - Determinação do comprimento equivalente - Traço 2.

Força [N]	OF	ϵ_{se} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	α [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_{sfo} [$\mu\text{m}/\text{m}$]
10	6,6	0,75	0,1131	1,20
20	11,42	1,74	0,1525	2,07
30	16,78	2,24	0,1335	3,04
40	18,55	3,48	0,1878	3,36
50	22,05	4,23	0,1919	4,00
60	27,74	5,23	0,1884	5,03
70	33	5,72	0,1734	5,98
80	39,07	6,72	0,1720	7,08
90	42,86	7,71	0,1800	7,77
100	46,43	8,46	0,1822	8,41
110	52,09	9,46	0,1815	9,44
120	53,32	9,95	0,1867	9,66
130	58,14	11,20	0,1926	10,54
140	65,77	12,19	0,1854	11,92
150	71,91	12,69	0,1765	13,03
160	73,69	13,69	0,1857	13,36
170	78,11	14,43	0,1848	14,16
180	85,22	15,18	0,1781	15,44
190	86,54	16,42	0,1898	15,68
200	90,97	17,17	0,1887	16,49
210	94,77	17,67	0,1864	17,18
220	102,02	18,66	0,1829	18,49
230	102,34	19,41	0,1897	18,55
240	107,96	20,16	0,1867	19,57
250	113,26	21,40	0,1889	20,53
260	119,09	21,65	0,1818	21,58
270	122,3	22,64	0,1852	22,17
280	124,38	23,39	0,1881	22,54
290	126,34	24,39	0,1930	22,90
300	127,91	25,13	0,1965	23,18
310	136,96	26,13	0,1908	24,82
320	143,08	26,63	0,1861	25,93
330	148,28	27,87	0,1880	26,87
340	150,79	28,12	0,1865	27,33
350	152,1	28,62	0,1881	27,57
α barra		$\mu\text{m}/\text{m}$	0,1812	
L_{eq}		m	2,37	

Tabela I.5 - Determinação do comprimento equivalente.

TRAÇOS ADOTADOS	$\bar{\alpha}$		\bar{l}_{eq}	
	(μm/m)		(m)	
T1 - 1:1:6	0,1873	0,1850	2,29	2,32
T2 - 1:3	0,1856	0,1812	2,31	2,37
$\bar{\alpha} - \bar{l}_{eq}$	0,1862	0,1834	2,31	2,34
	$\bar{\alpha}$	0,1848	\bar{l}_{eq}	2,32

DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DO COMPRIMENTO EQUIVALENTE

PARTE 1 - Estimativa da Incerteza na Monitoração da Ordem de Franja

Tabela II.1 - Calibração do programa Conta Franja.

d [mm]	OFe	OFi média	$C = -Td$	u_A	u_C	$U_{95\%OF}$
0	0	0,014	0,014	0,007	0,007	0,020
1,2	0,1	0,094	-0,006	0,013	0,013	0,038
2,4	0,2	0,196	-0,004	0,010	0,010	0,028
3,6	0,3	0,312	0,012	0,009	0,009	0,025
4,8	0,4	0,382	-0,018	0,004	0,004	0,011
6	0,5	0,49	-0,01	0,009	0,009	0,027
7,2	0,6	0,584	-0,016	0,009	0,009	0,025
8,4	0,7	0,684	-0,016	0,010	0,010	0,030
9,6	0,8	0,806	0,006	0,013	0,013	0,038
10,8	0,9	0,872	-0,028	0,011	0,011	0,031
12	1	1	0	0,017	0,017	0,049
13,2	1,1	1,096	-0,004	0,015	0,015	0,042
14,4	1,2	1,19	-0,01	0,014	0,014	0,042
15,6	1,3	1,308	0,008	0,008	0,008	0,023
16,8	1,4	1,386	-0,014	0,009	0,009	0,025
18	1,5	1,492	-0,008	0,007	0,007	0,021
19,2	1,6	1,608	0,008	0,014	0,014	0,041
20,4	1,7	1,688	-0,012	0,011	0,011	0,032
21,6	1,8	1,812	0,012	0,011	0,011	0,032
22,8	1,9	1,922	0,022	0,011	0,011	0,032
24	2	2,008	0,008	0,018	0,018	0,052
25,2	2,1	2,122	0,022	0,014	0,014	0,039
25,2	2,1	2,122	0,022	0,014	0,014	0,039
24	2	2,01	0,01	0,019	0,019	0,054
22,8	1,9	1,922	0,022	0,011	0,011	0,032
21,6	1,8	1,812	0,012	0,011	0,011	0,032
20,4	1,7	1,69	-0,01	0,011	0,011	0,031
19,2	1,6	1,61	0,01	0,014	0,014	0,041
18	1,5	1,49	-0,01	0,008	0,008	0,022
16,8	1,4	1,388	-0,012	0,009	0,009	0,025
15,6	1,3	1,306	0,006	0,007	0,007	0,020
14,4	1,2	1,188	-0,012	0,013	0,013	0,038
13,2	1,1	1,094	-0,006	0,015	0,015	0,042
12	1	0,992	-0,008	0,012	0,012	0,036
10,8	0,9	0,87	-0,03	0,011	0,011	0,033
9,6	0,8	0,802	0,002	0,014	0,014	0,041
8,4	0,7	0,68	-0,02	0,011	0,011	0,033
7,2	0,6	0,584	-0,016	0,009	0,009	0,025
6	0,5	0,486	-0,014	0,007	0,007	0,022
4,8	0,4	0,38	-0,02	0,003	0,003	0,009
3,6	0,3	0,312	0,012	0,009	0,009	0,025
2,4	0,2	0,192	-0,008	0,011	0,011	0,031
1,2	0,1	0,088	-0,012	0,015	0,015	0,043
0	0	0,01	0,01	0,008	0,008	0,022

$$U_{max} = |C_{max}| + |U_{95\%OFmax}| = 0,082$$

Onde:

d : deslocamento aplicado às franjas

OF_e : ordem de franja esperada

OF_i : ordem de franja indicada pelo programa Conta Franja

C : correção dos valores de ordem de franja indicados, $C = OF_e - OF_i$

Td : tendência dos valores de ordem de franja indicados, $Td = -C$

u_a : incerteza Tipo A das medições de ordem de franja

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

s : desvio padrão das medições de ordem de franja

n : número de ciclos de medição realizados

u_C : incerteza combinada para cada ponto experimental

$$u_C = \sqrt{(u_A^2 + u_{Re}^2)}$$

u_{Re} : incerteza devida aos erros de leitura

$$u_{Re} = \frac{Re}{2} = \frac{0,01}{2} = 0,005 \mu m$$

$U_{95\%OF}$: incerteza expandida da ordem de franja medida com o Conta Franja

$$U_{95\%OF} = k \times u_C$$

$k=2.87$: fator de abrangência correspondente a $v = 4$

v : número de graus de liberdade efetivos

U_{max} : incerteza máxima da ordem de franja medida com o Conta Franja

C_{max} : correção máxima da ordem de franja medida com o Conta Franja

$U_{95\%OFmax}$: maior incerteza dos pontos experimentais

PARTE 2 - Estimativa da Incerteza Devida à Medição de Deformação com Extensômetro

Tabela II.2 - Determinação da incerteza da deformação medida com extensômetros.

Símbolo	Descrição	Valor Bruto	Distribuição	Divisor	u_a [$\mu\text{m}/\text{m}$]	
u_{EM}	Erro Máximo	0,100	R	1,73	0,0577	
u_{SC}	Sinal de Calibração	0,200	R	1,73	0,115	
u_A	Tipo A	1,046	N	2,05	0,511	
u_{DL}	Desvio de Linearidade	0,020	R	1,73	0,012	
u_T	Temperatura	0,150	R	1,73	0,0866	
u_{cabos}	Cabos	0,330	R	1,73	0,191	
u_{Re}	Erro de Zero	0,250	R	2,45	0,102	
u_{Ecal}	Erro na Calibração	0,250	R	2,45	0,102	
u_{EMe}	Erro de Leitura	0,250	R	1,73	0,144	
u_{ck}	Fator do Extensômetro	0,756	R	1,73	0,436	
					$u_{\varepsilon SG}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	0,74
					$U_{95\% \varepsilon SG}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	1,49

Para melhor visualização dos dados da Tabela II.2, apresenta-se um gráfico de barras na Figura II.1. Quanto à incerteza da medição com extensômetros, a fonte que mais contribuiu foi a dispersão dos dados experimentais, determinada como incerteza Tipo A. Esta foi obtida por regressão linear dos dados dos experimentos, considerados ponto a ponto e não como repetições das medições para cada ponto, já que foram feitos apenas dois ensaios para cada traço, na determinação do comprimento equivalente.

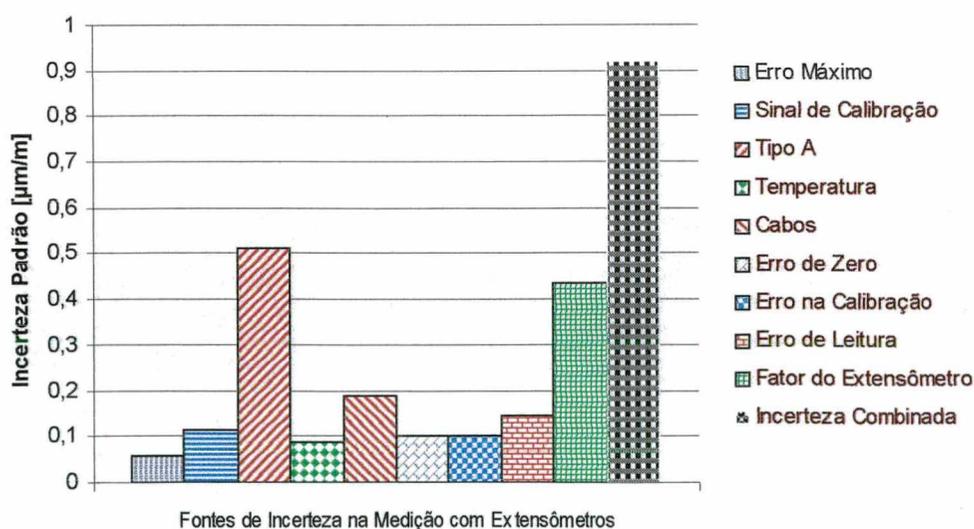


Figura II.1 - Contribuição das fontes de incerteza na deformação medida com extensômetros.

A grande faixa de medição adotada para os experimentos, desde deformações correspondentes a pequenas cargas até cargas usadas em ensaios de fluência, pode ter levado a valores de incerteza Tipo A muito elevados para pequenas deformações. Entretanto, para os níveis de deformação dos ensaios de fluência, esse problema pode ser desprezado, pois a incerteza é razoável. E, a partir do final do carregamento dos corpos de prova, quando a carga já está constante, a sensibilidade do sensor a pequenas deformações é elevada.

A próxima contribuição significativa é a correspondente à incerteza do fator do extensômetro utilizado, a qual pode ser reduzida com o uso de um extensômetro de características definidas com um maior controle. A substituição por um sensor cuja incerteza de k é da ordem de 0,1% melhoraria a incerteza do processo de medição em cerca de 20%.

A influência dos cabos pode ser compensada usando re-alimentação do sistema. E as demais fontes são referentes a características da ponte amplificadora utilizada, no que diz respeito à resolução do instrumento e efeitos da temperatura, mas que têm influência pouco significativa perante as demais fontes de incerteza.