



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS

Washington Luiz Rodrigues de Queiroz

**PROJETO DE UM EQUIPAMENTO DE FADIGA PARA CARACTERIZAÇÃO DO
DANO EM TELHAS DE AÇO DEVIDO À AÇÃO DO VENTO APLICANDO
CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS E MODELAGEM COMPUTACIONAL**

**FORTALEZA-CE
SETEMBRO/2013**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS

**PROJETO DE UM EQUIPAMENTO DE FADIGA PARA CARACTERIZAÇÃO DO
DANO EM TELHAS DE AÇO DEVIDO À AÇÃO DO VENTO APLICANDO
CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS E MODELAGEM COMPUTACIONAL**

Washington Luiz Rodrigues de Queiroz

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais como parte dos requisitos para à obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pontes de Deus.

Co-Orientador: Prof. Dr. Ahmed Benallal.

**FORTALEZA-CE
SETEMBRO/2013**



Universidade Federal do Ceará
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais

PARECER DA COMISSÃO DE TESE DE DOUTORADO

WASHINGTON LUIZ RODRIGUES DE QUEIROZ

Projeto de um equipamento de fadiga para caracterização do dano em telhas de aço devido à ação do vento aplicando correlação digital de imagens e modelagem computacional

A Comissão de Tese composta pelos professores Enio Pontes de Deus, Presidente e Orientador, da Universidade Federal do Ceará; Igor Frota de Vasconcelos, da Universidade Federal do Ceará; Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira, da Universidade Federal do Ceará; Rodrigo Nogueira de Codes, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido; Cassius Olívio Figueiredo Terra Ruchert, da Universidade de São Paulo, considera o candidato:

APROVADO

NÃO APROVADO

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, em 27 de setembro de 2013.

Prof. Enio Pontes de Deus
Presidente e Orientador

Prof. Igor Frota de Vasconcelos
Membro

Prof. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira
Membro

Prof. Rodrigo Nogueira de Codes
Membro

Prof. Cassius Olívio Figueiredo Terra Ruchert
Membro

À Deus.
Aos meus pais Luiz e Goretti.
Aos meus irmãos Alexandra e Rafael.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por toda força dada durante essa longa jornada.

Ao orientador Prof. Dr. Enio Pontes de Deus, pela amizade, confiança, orientação e incentivo.

Ao co-orientador Prof. Dr. Ahmed Benallal, pelo conhecimento passado e pelas palavras de incentivo;

Ao Prof. Dr. Rodrigo Codes, pela ajuda com novos conhecimentos.

À professora Selma, pela ajuda e colaboração com a patente do trabalho.

À Melissa de Lima Matias, por todo apoio incentivo e paciência durante a reta final dessa caminhada.

Ao Laboratório de Mecânica e Tecnologia (LMT – Cachan), pela ajuda tecnológica.

Aos amigos do Laboratório de Mecânica da Fadiga e Fratura (LAMEFF), pela ajuda com a montagem dos equipamentos e os conselhos durante a pesquisa.

Agradecimento para Luiz Pennafort, Francisco Antônio, Jorge Sousa e Jackson.

Aos colegas do curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais.

RESUMO

As coberturas constituem um elemento essencial para a sobrevivência humana. As transformações mais importantes das cobertas relacionaram-se, por um lado, com a pré-fabricação do material a ser utilizado, que veio permitir maiores garantias de êxito em qualquer aplicação, e por outro lado, com o aparecimento de novos materiais na construção, como o vidro laminado, peças de madeira, os materiais plásticos e principalmente o alumínio e o aço. Neste contexto os telhados de metal são bem avaliados por vários motivos, são resistentes, duráveis, vencem grandes vãos, resistem à corrosão e são mais leves em relação às cerâmicas, gerando economia nos custos da estrutura e facilidade no manuseio, transporte e montagem. A problemática dos ventos de alta velocidade, como furacões e tempestades, muitas vezes causam danos graves às telhas metálicas. Os danos causados pelo vento mostraram que a fadiga promove uma trinca no telhado em torno dos furos do prendedor ocasionando um desprendimento das telhas em sequência. Nesse trabalho desenvolve-se uma máquina para estudos de simulação de carregamento cíclico em telhas metálicas simulando a força do vento. Utilizando a técnica da Correlação Digital de Imagem (CDI) desenvolveu-se uma metodologia que auxiliou em termos quantitativos e qualitativos a avaliação da integridade da telha.

Palavras Chaves: Mecânica do Dano, Mecânica da Fratura, Correlação Digital de Imagens.

ABSTRACT

Shelter is an essential element for human survival. The most important changes in shelter have been in regard, on the one hand, of pre-fabrication of the material to be used, which better guarantees success at any application, and, on the other hand, of the rise of new building materials, such as laminated glass, wooden parts, plastic materials, and mainly aluminum and steel. In this context, metal roofs are praised for several reasons. They are sturdy and durable, span across wide areas, stand corrosion, and are lighter compared to ceramic tiles, which leads to savings in structure costs and ease of handling, transport, and assembly. The issue of high-speed winds, such as hurricanes and storms, often causes great damage to metal tiling. Wind damages show that the low-cycle wear fissures the roofing around the fastening holes, causing the tiles to become loose. This research developed a machine to study the simulation of cyclic loads in metal tiles by simulating wind force. By using the Digital Image Correlation (DIC) technique, a methodology was developed that will aid in assessing tile integrity both quantitatively and qualitatively.

Keywords: Damage mechanics, fracture mechanics, Digital Image Correlation.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	6
1.2 OBJETIVOS.....	7
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....	9
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	10
2.1. INTRODUÇÃO	10
2.2. Breve Histórico da Mecânica do Dano.....	10
2.3. Introdução à Metrologia ótica.....	12
2.4 Telhas Metálicas de Aço.....	14
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	18
3.1 Mecânica da Danificação.....	18
3.1.1 Aspectos Fenomenológicos do Dano.....	20
3.1.1.1 Natureza Física do Dano.....	21
3.1.1.1.1 Elasticidade e Dano.....	21
3.1.1.1.2 Plasticidade e Dano.....	22
3.1.1.1.3 Tipos de Dano.....	23
3.1.2 Variável Dano em Elemento de Volume Representativo.....	25
3.1.3 Parâmetro Escalar do Dano.....	26
3.1.4 Definição de Tensão Efetiva.....	27
3.1.5 Definição de Deformação Efetiva.....	29
3.1.6 Equivalência de Energia.....	32
3.1.7 Equivalência – Deformação.....	33
3.1.8 Variação do Módulo de Elasticidade.....	34
3.1.9 Critério de Ruptura.....	36
3.2 Correlação Digital de Imagens.....	38
3.2.1 Introdução.....	38
3.2.2 Conceitos básicos sobre processamento de imagem.....	39
3.2.3 O programa CORRELI.....	42
3.3 Método dos Elementos Finitos.....	43
3.3.1 Generalidades.....	43
3.3.2 Princípios Básicos do MEF.....	46

3.3.3 Abordagem sobre o programa ABAQUS.....	49
3.4 Força dos Ventos.....	51
3.4.1 Cálculo da Força do Vento.....	52
3.4.1.1 Pressão Dinâmica.....	52
3.4.1.2 Coeficiente de Pressão.....	53
3.4.1.3 Velocidade Característica.....	54
4. MATERIAIS, MÉTODOS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	58
4.1 Materiais.....	58
4.1.1 Telhas Trapezoidais.....	58
4.2 Procedimento para Criação do Aparato Metálico.....	61
4.2.1 Parafusos.....	66
4.2.2 Equipamento de Fixação.....	66
4.2.3 Instrumentação das Telhas.....	67
4.2.4 Equipamentos Eletrônicos.....	69
4.2.4.1 Controlador Lógico Programável(CLP).....	69
4.2.4.2 Sensor Fotoelétrico.....	70
4.2.4.3 Aquisição de Dados.....	71
4.2.4.4 Técnica de Correlação Digital de Imagens.....	72
4.3 Desenvolvimento Experimental.....	73
5. ANÁLISE COMPUTACIONAL.....	76
5.1 Material.....	76
5.2 Elemento Finito Adotado.....	76
5.3 Modelagem das Telhas.....	78
5.4 Análise de Convergência da Malha.....	80
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	81
6.1 Resultado da Degradação Física das Telhas.....	81
6.2 Resultado com Correlação Digital de Imagens.....	83
6.2.1 Resultado da Parte Lateral da Telha.....	84
6.2.2 Resultado da Parte Central da Telha.....	95
6.3 Resultados do Modelo Usando ABAQUS.....	98
6.3.1 Diagramas do Modelo.....	99
6.4 Métodos de Medição.....	103
7. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	105
7.1 Objetivos Alcançados e Conclusões.....	105

7.2 Propostas para Trabalhos Futuros.....	x
7.2 Propostas para Trabalhos Futuros.....	107
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 – Esquema da ligação telha-terça.....	3
Figura 1.2 – Ligação telha-terça em cobertas metálicas.....	3
Figura 1.3 – Ventos fortes que arrancaram a cobertura metálica em Guaíba, RS.....	4
Figura 1.4 – Posto de serviço em Santa Maria, RS.....	5
Figura 1.5 – Rompimento da junção telha-parafuso.	5

CAPITULO 3

Figura 3.1 - Ilustração esquemática da iniciação de uma trinca macroscópica.	19
Figura 3.2 - Tensão plástica elementar devido ao movimento da discordância.....	21
Figura 3.3 - Dano por nucleação de micro-trinca devido ao acúmulo de discordâncias....	22
Figura 3.4 - Elemento de volume representativo.....	26
Figura 3.5 - Elemento com danificação unidimensional.....	28
Figura 3.6 - Hipótese de deformação equivalente.....	30
Figura 3.7 - Acréscimo de comprimento devido à abertura de defeitos.....	31
Figura 3.8 - Variação da rigidez secante do meio contínuo equivalente.....	33
Figura 3.9 - Gráfico Dano x Deformação: material compósito polimérico reforçado por fibra de vidro.....	34
Figura 3.10 - Medida de dano dúctil em cobre 99.9% a temperatura ambiente.....	35
Figura 3.11 - Imagem monocromática com resolução de 25 pixels e sua respectiva matriz de luminosidade.....	40
Figura 3.12 - Exemplo de processamento de imagem.....	40
Figura 3.13 - Correlação entre as imagens.....	41
Figura 3.14 - Menu do programa CORRELI.....	42
Figura 3.15 - Tela de resultados e análise do Programa Correli.....	43
Figura 3.16 - Sequência das etapas de uma programa MEF.....	46
Figura 3.17 - Gráfico das isopletas das velocidades básicas do vento(m/s).....	55

CAPITULO 4

Figura 4.1 - (a) Folhas das telhas utilizadas; (b) bobinas que originam as telhas.....	59
Figura 4.2 - Dimensão em corte da telha; (b)Imagem da telha já cortada;(c) folha inteira da telha para ensaio.....	59
Figura 4.3 - Local de retirada do corpo de prova da telha – (a) desenho esquemático, (b) corpos de prova para ensaio; (c) dimensões do corpo de prova.....	60
Figura 4.4 - Aparato montado no LAMEFF-UFC.....	61
Figura 4.5 - Terças metálicas – perfil U enrijecido.....	62
Figura 4.6 - Máquina oscilatória de carregamento utilizada no experimento.....	62
Figura 4.7 - (a) Barra para transmitir o carregamento oscilatório. (b) Detalhe da fixação com a máquina tico-tico	63
Figura 4.8 - Célula de carga utilizada no experimento. (a) Detalhe da ligação com as barras de aplicação de carregamento; (b) detalhe barra-célula.....	63
Figura 4.9 - Célula de carga sendo ligada na parte inferior à telha.....	64
Figura 4.10 - Dimensões do aparato montado no LAMEFF.....	64
Figura 4.11 - Desenho do aparato experimental.....	65

Figura 4.12 - Parafuso auto perfurante do experimento e (b) dimensões do parafuso.....	66
Figura 4.13 - Parafusadeira para fixação dos PAA's.....	67
Figura 4.14 - Extensômetros na posição longitudinal e transversal.....	67
Figura 4.15 - Superfície da telha para receber os extensômetros.....	68
Figura 4.16 - Foto de um CLP, (b) esquema de funcionamento do CLP.....	69
Figura 4.17 - Esquema do fotosensor; (b) fotosensor do experimento.....	70
Figura 4.18 –Programa de aquisição de dados.....	71
Figura 4.19 - Aparelho de aquisição de dados.....	71
Figura 4.20 - Spray para pintura da telha; (b)telha pintada com contraste.....	72
Figura 4.21 - Câmera usada no ensaio.....	73
Figura 4.22 - Passagem da barra rosqueada pela telha.....	73
Figura 4.23 - Circuito de alimentação do sensor;(b) ligação do CLP.....	74
Figura 4.24 - Central de comandos do experimento.....	75

CAPITULO 5

Figura 5.1 - Representação do Elemento de casca S4R. Mostrando as faces do elemento (a), locais de integração (b) e os pontos de integração ao longo da espessura (c).....	77
Figura 5.2 - Discretização em malha da telha com 5600 elementos.....	78
Figura 5.3 - Engaste da telha.....	79
Figura 5.4 - Representação da malha da telha analisada.....	80

CAPITULO 6

Figura 6.1 - Gráfico força do carregamento (N) x tempo (s).....	81
Figura 6.2-Rasgo na ligação telha-terça em (a) vista superior do furo e em (b) a inferior.....	82
Figura 6.3 - Rasgo no centro da telha.....	83
Figura 6.4 - Regiões de análise da CDI.....	84
Figura 6.5 - Histograma da textura da telha.....	85
Figura 6.6 - Critério de Flutuação.....	86
Figura 6.7 - Critério do raio de correlação.....	86
Figura 6.8-Média e desvio padrão dos erros dos deslocamentos.	87
Figura 6.9 - Média e desvio padrão dos erros dos deslocamentos em função do tamanho do elemento.....	87
Figura 6.10 - Gráfico de aplicação de carga x tempo.....	89
Figura 6.11 - Gráfico de aplicação de carga x número de imagens.....	90
Figura 6.12 - Gráfico deformação x número de imagens.....	90
Figura 6.13 - Gráfico deformação longitudinal x número de imagens.....	91
Figura 6.14 - Imagens do programa Correli da parte lateral da telha. Imagem de referência, deformação no sentido X(e_{xx}) e sentido Y(e_{yy}).....	94
Figura 6.15 - Imagens do programa Correli da parte central da telha. Imagem de referência, deformação no sentido X(e_{xx}) e sentido Y(e_{yy}).....	98
Figura 6.16 - Deslocamentos no sentido y da telha (mm) – ABAQUS.....	100
Figura 6.17 - Deslocamentos no sentido X da telha(mm) – ABAQUS.....	101
Figura 6.18 –Degradação da rigidez - ABAQUS.....	101
Figura 6.19 - Degradação da rigidez – Vista lateral- ABAQUS.	102
Figura 6.20 - Início do dano por Cisalhamento- ABAQUS.....	102

LISTA DE TABELAS

Capítulo 3

Tabela 3.1 - Dimensao do EVR.....	25
Tabela 3.2 - Parametros meteorologicos(NBR 6123-1988).....	57
Tabela 3.3 - Valores minimos para os valores estatístico S3(NBR 6123-1988)	57

Capítulo 4

Tabela 4.1 - Composicao quimica das telhas de aco.....	60
--------------------------------------------------------	----

Capítulo 6

Tabela 6.1 - Deformações entre os método de medição.....	103
----------------------------------------------------------	-----

LISTA DE SÍMBOLOS

Gregas

δS_D	área total fissurada
δS	área total da superfície
$\delta_{(T)}^A$	autotensão de tração
ε	deformação obtida no ensaio de tração
ε_e	módulo de elasticidade
ε_{ij}	Deformações normais na direção i
γ_{ij}	Deformações angulares no primeiro plano ij;
ρ	Densidade
$\tilde{\rho}$	Densidade modificada.
σ	Tensão
σ_R	Tensão de ruptura.
σ_{ij}	Tensões normais na direção i;
σ_f	resistência à tração na ruptura da fibra
ν	Coefficiente de Poisson
$\lambda(d)$	é uma função de valor escalar envolvendo a variável de dano
τ_{ij}	Tensões de cisalhamento no plano ij;
τ_f	menor resistência ao cisalhamento da matriz ou da interface
ν_{ij}	Coefficiente de Poisson
ν_2	coeficiente de Poisson no plano de isotropia transversa

Latinas

A_e	Tensão plástica limite no ponto de rendimento inferior.
A_g	Porcentagem de deformação até a fratura.
a_i	trinca de tamanho aparente “”
a, b	Constantes características do material;
D	Dano
d	diâmetro da fibra
E	Módulo de Elasticidade Longitudinal
E_i	Módulo de elasticidade na direção i;

\tilde{E}	Módulo de Elasticidade Longitudinal danificado
F_m	Carga Máxima.
G_{ij}	Módulo de cisalhamento no plano ij.
K	é a matriz de rigidez global,
K	número de modos Kelvin
l	Comprimento
l_c	comprimento crítico da fibra
P	vetor forças externas global
R_m	Resistência à tração do material.
ReH	Ponto de rendimento superior.
ReL	Ponto de rendimento inferior.
R_p	Tensão limite na região plástica.
r	Resistividade
S	Área
S_{12}	tensão de cisalhamento no plano (1,2)
T	matriz de transformação
U	é o vetor dos graus de liberdade de todo sistema
U	vetor de deslocamento nodal
u_o, v_o, w_o	são os deslocamentos transversais da superfície neutra
V	diferença de potencial
$X_{\epsilon c}$ e $X_{\epsilon t}$	deformações máximas na direção longitudinal em compressão e em tração
$Y_{\epsilon c}$ e $Y_{\epsilon t}$	deformações máximas na direção transversal em compressão e em tração

1. INTRODUÇÃO

Desde as épocas remotas, uma das principais preocupações do homem relativa à criação de um *habitat* foi proteger-se do sol, do frio e das precipitações. Neste contexto, as coberturas constituem um elemento essencial para a sobrevivência humana. No início dos tempos, os materiais empregados na construção das coberturas eram vegetais, peles, pedra e terra argilosa.

As transformações mais importantes no campo das cobertas relacionaram-se, por um lado, com a pré-fabricação do material a ser utilizado, que veio permitir maiores garantias de êxito em qualquer aplicação, e por outro lado, com o aparecimento de novos materiais na construção, como o vidro laminado, peças de madeira, cerâmica pré-fabricada, os materiais plásticos e principalmente o alumínio e o aço.

A história das telhas metálicas remonta a 970 a.C., quando o templo em Jerusalém foi construído com um telhado de cobre. Este estilo particular de telhado muito tempo depois se tornou popular nas Ilhas Virgens.

Os telhados de metal são bem avaliados por vários motivos. Eles são suficientemente fortes para resistir a terremotos e os fortes ventos dos ciclones tropicais, além de apresentar um aspecto visual agradável. Quando uniam o telhado pontudo em estilo holandês e um sistema de captação de água, esta poderia ser armazenada em um recipiente para uso doméstico. O metal ainda tinha a vantagem de ser resistente ao fogo.

Robert L. Merwin & Co., uma empresa com sede na Ilha Virgem de St. Croix, foi fundada em 1892 para a exportação de telhas onduladas para os edifícios. Eles fizeram o produto mais barato e com maior disponibilidade no mercado, que serviu para aumentar a sua utilização e estabelecer este tipo de cobertura como uma alternativa muito mais prática e versátil que as telhas de barro. A popularidade do metal como material de cobertura continua aumentando rapidamente.

Em meados de 1900, as telhas onduladas galvanizadas foram produzidas em larga escala e se tornaram uma alternativa muito popular e econômica para coberturas industriais, agrícolas e comerciais.

No lugar das dobras que eram feitas antigamente, as telhas onduladas passaram a ser sobrepostas e fixadas com parafusos. Em seguida, eram perfuradas através das folhas sobrepostas sendo ancoradas sobre a armação do telhado.

As telhas produzidas a partir de bobinas de aço, nas últimas décadas revolucionaram de maneira fundamental a construção civil no Brasil, representando, para os profissionais de arquitetura e engenharia, excelente solução para coberturas e fechamentos laterais das mais variadas edificações. Nota-se que a tendência marcante do uso do aço, atualmente considerado como a “quinta fachada” de uma edificação, é a diminuição do peso específico e da inclinação do telhado. Pode-se concluir daí que o uso das telhas de aço em quaisquer edificações representa uma solução perfeitamente adequada à moderna tendência de mercado.

Nos últimos anos, a crescente necessidade de edificações com grandes áreas ocasionou a mudança do método de construções maciças para construções leves, com estruturas apresentando grandes vãos entre apoios. A solução baseada em telhas metálicas de aço tem ocupado cada vez mais espaço no mercado de coberturas leves para obras industriais.

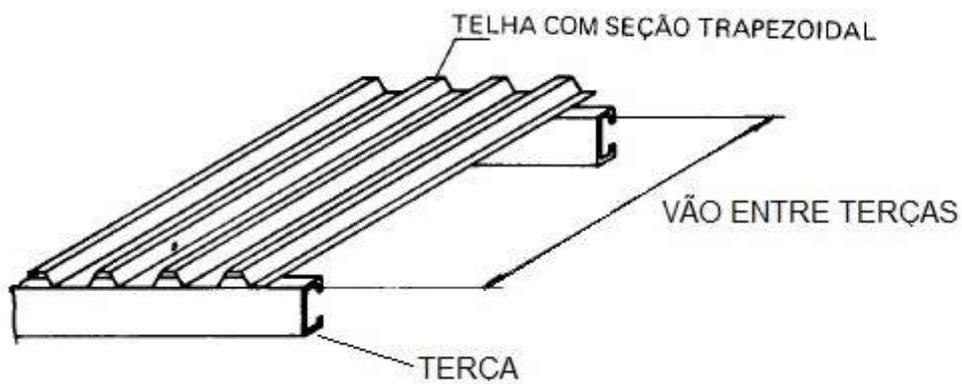
As telhas metálicas são resistentes, duráveis, vencem grandes vãos, resistem à corrosão e são mais leves em relação às cerâmicas, gerando economia nos custos da estrutura e facilidade no manuseio, transporte e montagem. Em função da leveza, os projetos requerem como parâmetro fundamental de cálculo o efeito do vento na cobertura. Esse aspecto deve ser considerado tanto no dimensionamento do telhado quanto da estrutura de cobertura.

Os principais tipos de telhas de aço produzidos e utilizadas no mercado são as telhas trapezoidais e onduladas. Elas são aplicadas em telhados nas formas de arcos, uma água, duas águas, quatro águas, *shed*, estrutura espacial, pórticos com lanternim e revestimentos laterais.

Com o avanço tecnológico dos materiais e das inovações nos projetos estruturais, as coberturas hoje são mais leves, flexíveis e com vãos cada vez maiores. Isto as torna mais sensíveis à ação do vento, e, conseqüentemente, é de fundamental importância um conhecimento mais preciso do carregamento do vento e suas conseqüências neste tipo de estrutura, principalmente nas ligações das telhas com o restante da estrutura metálica.

As estruturas metálicas usuais como galpões e cobertas metálicas para diversos fins, são geralmente constituídas por telhas, fixadas em terças que por sua vez tem como apoio duas tesouras (Figura 1.1). As terças são elementos estruturais que servem de elo entre as telhas de cobertura e as tesouras, assim sendo, transmitem as ações aplicadas nas telhas às tesouras.

Figura 1.1 – Esquema de ligação telha-terça.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A ligação entre as telhas (Figura 1.2) e as terças é o elo mais fraco do sistema estrutural de uma cobertura metálica. Ela sofre com o carregamento local de pulso do vento, causando falhas.

Figura 1.2 – Ligação telha-terça em cobertas metálicas.



Fonte: Próprio autor.

Não obstante do progresso tecnológico, o efeito do vento sobre as estruturas vem sendo uma preocupação para os construtores. Com as constantes mudanças dos fatores climáticos, que têm sido observados no mundo inteiro, é normal o aumento do número de situações adversas.

Os ventos de alta velocidade, como furacões e tempestades, muitas vezes causam danos graves às telhas metálicas. Várias pesquisas sobre os danos causados pelo vento mostraram que a fadiga de baixo ciclo fissura o telhado em torno dos furos do prendedor. Esse tem sido o motivo para o arrancamento de telhados em função da força do vento (Figura 1.3). Esta ação é exercida diretamente sobre as faces superior e inferior das cobertas das estruturas.

Figura 1.3 – Ventos fortes que arrancaram a cobertura metálica em Guaíba, RS



. Fonte:BLESSMANN, 2001.

A maioria dos acidentes causados pela ação dos ventos ocorre em construções leves, com grandes vãos livres, tais como hangares, pavilhões industriais, depósitos de cereais, armazéns portuários, pavilhões para fins agrícolas e pecuários, entre outros.

Alguns acidentes também são causados por parte de projéteis lançados após a perda de parte da estrutura de cobertura como pedaços de telhas e parafusos, danificando edificações e veículos e atingindo pessoas e animais (Figura 1.4).

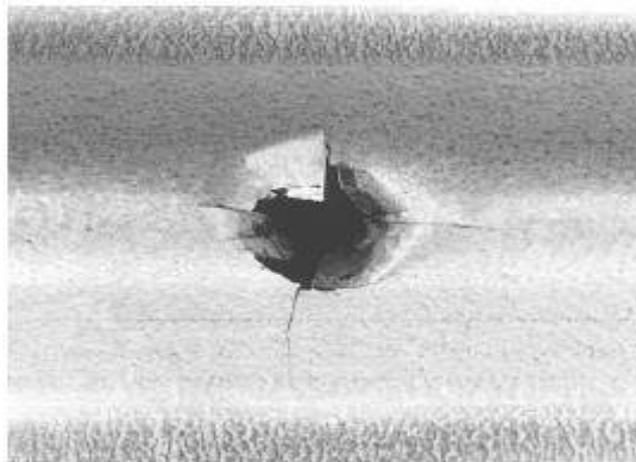
Figura 1.4 – Posto de serviço em Santa Maria, RS



Fonte: BLESSMANN, 2001.

A presença de grandes concentrações de tensões na chapa da telha, em torno do furo do fixador causa fadiga de baixo ciclo. Quando as telhas são submetidas à fortes oscilações, pode ocorrer dano na região de fixação, perdendo a telha sua rigidez ao longo do tempo podendo ocorrer falha da ligação telha-terça (Figura 1.5).

Figura 1.5 – Rompimento da junção telha-parafuso.



Fonte: MAHAARACHCHI, 2003.

O dano sofrido pelas telhas metálicas, após esta ter sido submetida a um carregamento cíclico pode ser quantificado de forma empírica-experimental. A aplicação da Correlação Digital de Imagens (CDI), uma das técnicas de medição da metrologia ótica, no campo da Mecânica do Dano, vem sendo amplamente sendo utilizados em trabalhos recentes que utilizaram a CDI, como em Périé et al (2002), Roux e Hild (2008) e Périé et al (2009) como método de identificação e caracterização do dano.

A técnica CDI se destaca sobre outras técnicas da metrologia ótica devido à grande quantidade de dados digitais armazenadas que esta técnica utiliza, ocasionando na aceleração e precisão dos resultados na medição dos campos de deformação.

Uma outra forma de se caracterizar o dano é com o auxílio do Método dos Elementos Finitos (MEF). A análise de simulação computacional por meio de programas de elementos finitos como *ABAQUS* e *ANSYS*, reproduz o comportamento não-linear de muitas estruturas. Desta forma, com a utilização do programa *ABAQUS 6.10*, é possível determinar o dano nas telhas metálicas de aço, com a simulação do carregamento oscilatório do vento, para um estudo paramétrico.

1.1 MOTIVAÇÃO

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho alicerça-se nos seguintes fatos:

- Necessidade de um estudo do dano causado nas telhas metálicas de aço submetidas a carregamentos cíclicos de ventos;
- A possibilidade de utilizar a técnica da correlação digital de imagens para verificar a integridade de uma estrutura, sendo um ensaio não destrutivo e passível de simulação com modelos computacionais;
- Na construção de um aparato para realização de testes cíclicos de fadiga, que será utilizado em outros experimentos no LAMEFF-UFC.
- Construção de um modelo representativo em escala real de uma estrutura da construção civil (um galpão metálico, cobertura metálica) que permita desenvolver estudos sobre o modelo em si, sobre a rigidez de suas ligações,

passível de sofrer uma danificação, a fim de se mensurar a modificação de seus parâmetros estáticos e dinâmicos frente a estas alterações. Estes princípios visam possibilitar, principalmente, a realização de simulações experimentais em diferentes condições estruturais.

1.2 OBJETIVOS

Com a utilização dos conceitos da Mecânica do Dano Contínuo pretende-se neste trabalho desenvolver uma nova metodologia experimental para quantificar o dano causado em telhas metálicas de aço, por um dispositivo montado no laboratório de mecânica da fratura e fadiga (LAMEFF-UFC) que simula a ação do vento, assim prevendo a vida útil à fadiga da mesma. Os resultados obtidos de forma experimental servirão de comparativos com os resultados oriundos de uma modelagem numérica baseada no método dos elementos finitos.

As respostas obtidas pelos métodos descritos anteriormente foram confrontados com uma das técnicas de metrologia óptica mais utilizadas por Hild (2002), que é a Correlação Digital de Imagens (CDI).

O trabalho consiste no desenvolvimento de uma nova metodologia a partir de uma técnica fotomecânica experimental de medição para detectar, localizar e avaliar a severidade do dano em coberturas metálicas de aço.

Pretende-se criar uma ferramenta de utilização geral que permita avaliar a integridade de estruturas e componentes. A opção do material pelas telhas metálicas galvanizadas e zincoalum justifica-se pela sua ampla difusão e utilização no mercado nacional, suas propriedades intrínsecas, suscetíveis ao dano ocasionado pela oscilação dos ventos.

A constante utilização em estruturas com alturas cada vez maiores, eleva a necessidade de monitorar e estabelecer critérios sobre sua integridade estrutural. Apesar do grande número de trabalhos em relação a integridade das telhas metálicas e o vento, como os de Baskaran e Dutt (1997), Mahendran (1990) e Baskaran e Savage (2003), o Brasil ainda não possui uma norma que padronize e proponha um ensaio com produtos certificados.

O objetivo principal desta pesquisa consiste em quantificar o dano causado por um dispositivo montado em laboratório em telhas metálicas de modo a investigar o comportamento estrutural da fixação dos sistema telha-terça, sujeitos a oscilações com carregamento do vento utilizando a Correlação Digital de Imagens (CDI).

Desta forma, pode-se definir como objetivos específicos desta pesquisa os seguintes itens:

- Investigar o dano causado pelo carregamento aplicado pelo mecanismo desenvolvido em laboratório que simula as oscilações causadas pelo vento;
- Análise do Sistema 3D por meio de simulação computacional utilizando o programa ABAQUS;
- Investigar o dano causado pelo carregamento cíclico na ligação entre a telha metálica e o parafuso fixado por meio de estudos experimentais e analíticos;
- Utilizar um modelo de elementos finitos das telhas metálicas onde serão incluídos os fatores de geometria, tipo de aço e o tipo da ligação telha-terça;
- Validar o modelo de elementos finitos utilizando os resultados experimentais;
- Usar a modelagem numérica para estudar o comportamento da estrutura das telhas trapezoidais sujeitas a carregamentos cíclicos.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

O conteúdo do trabalho está organizado como se segue:

No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica sobre alguns assuntos de interesse da pesquisa. Este capítulo enfatiza as principais pesquisas no meio acadêmico da Mecânica do Dano em Meio Contínuo, como da Correlação Digital de Imagens, do programa de elementos finitos utilizado na tese – ABAQUS e um resumo dos principais trabalhos na literatura do estudo em telhas metálicas.

No capítulo 3 é feita uma explicação dos fundamentos teóricos da Mecânica do Dano em Meio Contínuo, descrevendo o processo do dano na sua generalidade, a Correlação Digital de Imagens, do programa de elementos finitos utilizado na tese – ABAQUS e um resumo sobre os principais trabalhos sobre o estudo em telhas metálicas.

No capítulo 4 serão apresentados os materiais envolvidos na pesquisa, além da metodologia aplicada no trabalho de tese.

No capítulo 5 apresenta-se o modelo computacional da telha desenvolvido no programa ABAQUS.

No capítulo 6 são mostrados os resultados obtidos da metodologia aplicada para o comportamento da telha.

No capítulo 7 são descritas as conclusões obtidas na realização desse trabalho e as sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 INTRODUÇÃO

Os casos de falhas nas estruturas devido ao carregamento cíclico dos ventos, como apresentadas no Capítulo 1, mostram que os projetos contra tais falhas, não são suficientes para garantir a integridade dos componentes estruturais.

Estudos numéricos e experimentais utilizando a Mecânica do Dano têm se destacado como uma ferramenta de grande potencial para a simulação de respostas numéricas de diversos componentes estruturais, possibilitando a consideração de diferentes efeitos decorrentes da microfissuração difusa sobre a degradação das propriedades mecânicas dos materiais estruturais.

Em particular, destacam-se alguns trabalhos que tratam tanto da formulação da Mecânica do Dano em meio contínuo quanto de sua aplicação a diversos materiais e que são de maior interesse para este trabalho: Lemaitre e Chaboche (2009), La Borderie (1991), Lemaitre (1996), e Mazars et al. (2000).

2.2 BREVE HISTÓRICO DA MECÂNICA DO DANO

A Mecânica do Dano Contínuo (MDC), obteve desenvolvimentos significativos desde os trabalhos iniciais propostos por Kachanov (1958) e se constitui, atualmente, numa importante ferramenta para quantificação do dano macroscópico em materiais e estruturas.

Para a consideração dos defeitos numa abordagem de meio contínuo, defini-se uma variável escalar ν , denominada continuidade, onde este apresenta localmente um valor unitário para um material completamente livre de defeitos, enquanto que $\nu=0$ caracteriza um material sem qualquer capacidade de carga. A quantidade complementar $D = (1 - \nu)$ é, por conseguinte, uma medida do estado local de deterioração ou dano. Para um material completamente livre de defeitos

tem-se $D = 0$, enquanto $D = 1$ corresponde a um estado de completa perda de integridade da estrutura interna do material.

Enquanto Kachanov (1958) assumiu D como uma variável de natureza escalar, estudos posteriores levaram à proposição de quantidades tensoriais para descrever o dano.

Um outro trabalho importante é o de Rabotnov (1969), que propôs a utilização da variável de dano como um redutor da rigidez inicial do material.

Mais recentemente a mecânica do Dano em Meios Contínuos (*Continuum Damage Mechanics*) foi formalizada por Lemaitre et al (2009) com base em uma metodologia fundamentada na termodinâmica dos processos irreversíveis.

Outros pesquisadores, Chaboche (1988a, 1988b), Lemaitre (1984, 1985, 1986), Sidoroff (1981), Lee et al., (1985), Murakami (1988), Voyiadjis e Kattan (1990, 1993a), aplicaram a teoria para vários tipos de mecanismos de dano.

Foram mais de 50 anos desde o primeiro estudo de Kachanov (1958) sobre a Mecânica do Dano, seguido de vinte anos de intensas pesquisas que serviram de base para responder algumas questões.

Nos anos 70 a propagação do dano foi primeiramente estudada na interação das falhas a fadiga e nos danos com plasticidade. Fadiga em baixo ciclo, danos em compósitos e em concreto foram o alvo destes estudos nos anos 80. Já nos anos 90, associou-se o dano em cerâmicas por meio de análise micromecânica. No início do século XX, estes trabalhos foram fisicamente melhor compreendidos e rapidamente usados em análises estruturais.

A Mecânica do Dano foi primeiramente introduzida para fenômenos de ruptura por fluência e fratura dúctil, logo em seguida para fadiga de baixo ciclo e, apenas recentemente, para fratura de materiais quase-frágil.

Um breve histórico dos artigos e trabalhos da Mecânica do Dano, Allix e Hild (2002), podem ser vistos abaixo:

- 1958 – primeiros conceitos de variável de campo, chamados continuidade, modelaram a perda de resistência durante a fluência (Kachanov);
- 1968 – Conceitos de tensão efetiva (Rabotnov);
- 1971 – Princípios da deformação equivalente para se escrever o acoplamento entre dano e deformação (Lemaitre);

Na década de 80, com o avanço das pesquisas realizadas, vários artigos que estudavam e descreviam a aplicação dos conceitos de dano em estruturas de falha dúctil, fadiga de baixo ciclo, compostos e problemas de localização do dano foram publicados em Lemaitre (1985), Chaboche (1988) e Kachanov (1986).

Já na década de 90, trabalhos como o de Biddah, et al (1995) descreviam as aplicações dos conceitos de dano a estruturas de falha frágil, fadiga de alto ciclo, concreto, cerâmicas e micro mecanismos de dano.

Atualmente, a dificuldade em relacionar dano à deformação plástica está se tornando cada vez menor. Comprovando isso, Bonora, et al. (2005) escreveu sobre a evolução do dano dúctil sob condições de estado de tensão triaxial, levando-se em conta a deformação plástica.

2.3 INTRODUÇÃO À METROLOGIA ÓTICA

Diversas técnicas podem ser usadas para medições de campos de deslocamento e deformações, tanto locais quanto globais, dentre as quais se destacam os métodos óticos, que adquirem cada vez mais importância pela sua flexibilidade e adaptabilidade às mais diversas situações de medição.

As técnicas interferométricas, comumente empregadas em mecânica experimental, têm como principais virtudes o fato de serem não destrutivas e remotas (não envolvendo contato entre o componente e o sistema de medição), permitindo a visualização de campos completos de deslocamentos e de deformações em superfícies, independentes do material, e com uma medição de precisão apenas limitada pela resolução da câmera e da qualidade dos componentes óticos.

Os primeiros experimentos com a utilização de técnicas de correlação na fotogrametria têm suas raízes por volta dos anos 1950, mas foi somente na década de 1980, devido aos avanços eletrônicos e computacionais, que os processos fotogramétricos iniciaram sua evolução para os meios digitais, permitindo a automação de algumas tarefas como, por exemplo, a busca de pontos homólogos entre imagens (Schenk, 1999).

Após o seu surgimento no meio científico, a técnica de Correlação Digital de Imagens foi constantemente melhorada e diversificada em vários campos de estudo. Dentre os aperfeiçoamentos que podem ser citados, estão a mudança no coeficiente de correlação utilizado (Peters et al., 1983; Sutton et al., 1986; Vendroux e Knauss, 1998; Hwang et al., 2008), tipo de interpolação empregado para obter informações de sub-pixel (Bruck et al., 1989) e mudanças no pós-processamento dos resultados, sobretudo no que diz respeito aos métodos utilizados para realizar a suavização (buscando a eliminação de ruídos provenientes da própria abordagem numérica) do campo de deslocamentos obtidos diretamente pela técnica (Sun et al., 1997; Cheng et al., 2002; Pan et al., 2007).

Na literatura, Peters e Ranson (1982) foram os primeiros a empregá-la para medição de pequenos deslocamentos em superfícies de materiais e cálculo de tensões, e tem sido bem desenvolvida e aperfeiçoada nas três últimas décadas (Sutton et al., 1988; Godara & Raabe (2007). Esta técnica baseada em áreas da imagem utiliza uma superfície granulada, isto é, a utilização de algum padrão tipo *speckle*, como portadora de informação, e a aplicação de um *software* de correlação sobre duas imagens durante a transformação mecânica de um material, obtidas com ajuda de câmeras CCD de alta resolução.

O princípio de funcionamento consiste em comparar uma imagem digital da superfície deslocada ou deformada com a imagem original usando uma função matematicamente bem definida de correlação com base em um subconjunto de *pixels*, o que permite determinar o deslocamento ocorrido entre os dois estados, antes e após a deformação (Sánchez-Arévalo e G. Pulos, 2008; Po-Chih Hung et al., 2003).

Também é possível encontrar na literatura diversos trabalhos que abordam o estudo na mecânica estrutural com resultados satisfatórios (Vanlanduit et al., 2009; Ozelo et al., 2009, Kirugulige et al., 2008) .

Dentre as várias áreas em que a Correlação Digital de Imagens (CDI) tem sido aplicada com sucesso, pode-se relacionar a aplicação da técnica onde se necessita monitorar áreas relativamente grandes (nesses casos, a utilização de strain-gauges, extensometria, clip-gauges, etc, não é suficiente) como no caso de localização de deformações (Tarigopula et al., 2008), início e propagação de trincas (Dawicke & Sutton, 1994); além disso, o fato de ser uma técnica sem contato, faz

com que a CDI seja capaz de oferecer soluções para problemas envolvendo meios agressivos, quentes, corrosivos (Lyons et al., 1996; Sutton & McFadden, 2000) ou mesmo para sólidos muito leves onde os *gauges* não são adaptados (Considine et al., 2005; Sutton & Chao, 1988); para identificar propriedades de um determinado material, bem como validar modelos constitutivos (Shi et al., 2004).

Recentemente, Bing et al. (2009) aplicaram esta técnica para a medição do coeficiente de expansão térmica de um filme compósito por meio de sua deformação devido às mudanças de temperatura. A CDI também tem sido aplicada em micro e nano-escalas por Berfield et al. (2007) e Kang et al. (2007) com sucesso. Em estudos recentes, a técnica foi aplicada para a caracterização dos campos de deslocamentos e deformações, bem como o estudo das orientações das fibras de estruturas anisotrópicas de compósitos por Barthelat & Espinosa (2007) e Godara & Raabe (2007), respectivamente.

2.4 TELHAS METÁLICAS DE AÇO

Nos últimos 30 anos, inúmeras investigações teórico-experimentais têm sido realizadas para conhecer o comportamento do sistema telha-terça. O sistema utilizado para coberturas ou fechamentos laterais, é normalmente constituído de terças com seção transversal na forma de 'U' enrijecido, conectado à telha metálica de aço do tipo trapezoidal por parafusos autoperfurantes.

As telhas conectadas nas terças apresentam dois efeitos principais de restrição: um é a rigidez ao cisalhamento e outro é a rigidez rotacional. A rigidez rotacional surge a partir da rigidez rotacional da própria telha e da rigidez rotacional da conexão entre a telha e a terça. Em particular, essa rigidez, varia com o tipo de telha, com o tipo e dimensões da terça, espaçamento de fixação da telha na terça, e do tipo de conexão. Tanto a rigidez ao cisalhamento, como a rigidez rotacional, causam aumento significativo na resistência das terças quando conectadas às telhas.

Em situações de tempestades ou de ventos muito fortes, com velocidades de ventos acima dos previstos em norma, as rupturas em coberturas metálicas ou sistemas de vedação, ocorrem nas ligações, devido à excessiva carga de vento,

tanto de pressão, como de sucção. A concentração de tensão ao redor da ligação geralmente ocasiona, o modo de falha de puncionamento da chapa. (MAHENDRAN 2001).

Uma variação contínua de carga de subpressão causa fadiga da chapa. Por esse motivo a seguir são descritos os ensaios referentes aos possíveis modos-de-falha, tanto sob solicitações estáticas quanto cíclicas.

Vários trabalhos simulando os possíveis modos de falha em telhas metálicas foram realizados por Mahendran e Mahaarachchi (2004), dentre eles o ensaio de arrancamento (pull-out), que foi executado de duas formas: dinâmica e estática.

Dos ensaios realizados por Mahendran (2001), é dado maior destaque ao ensaio dinâmico, pois aplica um carregamento cíclico na restrição da telha-terça, simulando a ação do vento.

Em função da ação de restrição da telha, as terças tendem a um estado limite último, não pela flambagem global de flexo-torção, mas pelo colapso plástico, escoamento ou flambagem local (Lucas et al, 1997a). Diferentes abordagens têm sido consideradas na modelagem do sistema telha-terça.

Essas abordagens têm variadas considerações com relação à natureza da restrição da telha na terça e à natureza da deformação da terça e sua falha. Apesar de cada modelo ser único, cada um pode ser agrupado de acordo com três principais critérios:

- Em primeiro lugar, têm-se os modelos que levam em consideração o efeito da restrição da telha na terça, impedindo o seu movimento lateral, isto é, rigidez ao cisalhamento puro (Pincus,1963; Ings e Trahair, 1984; Trahair, 1996). Outros modelos, mais complexos, incluem as restrições do movimento lateral e da rotação da terça sobre o seu eixo longitudinal (Hancock et al, 1992; Rousch e Hancock, 1994).
- Posteriormente, o modelo pode assumir que a seção transversal da terça permanece indeformada durante o carregamento (Hancock et al, 1990; Sokol, 1996), enquanto que outros incluem o efeito significativo da distorção da seção transversal na análise (Rousch e Hancock, 1994; Rousch e Hancock, 1995).
- Finalmente, muitos dos modelos anteriores foram baseados na suposição do estado limite último de flambagem por flexo-torção,

(Chung e Lawson, 1999), enquanto um número mais recente identifica o modo do estado limite último como sendo uma combinação da flambagem local, distorcional e ao escoamento (Rousch e Hancock, 1995; Lucas et al, 1997a).

As ligações com os parafusos apresentam os modos de falha referenciados acima, os quais variam conforme o tipo de solicitação. É importante salientar que o modo de falha apresentado neste trabalho diz respeito apenas às ligações nas quais a fixação entre a telha e a terço é realizada na região mais próxima da telha da terço, chamada de onda baixa.

Mahendran (1994) reporta trabalhos que verificaram critérios de dimensionamento para ligações telha-terço, onde o parafuso autobrocante é fixado na onda alta da telha.

A maioria dos trabalhos que abordam perfis de aço formados a frio limita-se ao estudo de perfis convencionais, como os dos tipo U. Apresentam-se, a seguir, as principais características de alguns dos trabalhos encontrados na área que investigam o comportamento teórico e experimental de perfis de chapa dobrada, dando destaque aos estudos de telhas de aço.

Entre os trabalhos experimentais, pode-se citar Kwon e Hancock (1992), que determinaram curvas de resistência para perfis do tipo U sob compressão axial que sofrem flambagem local e distorcional com cargas críticas muito próximas.

Também, citam-se os trabalhos de Bernard et al. (1993) e Bernard et al. (1995), que realizaram ensaios de flexão em telhas de aço com enrijecedores nos flanges.

Jorgenson e Chern (1973), e Jorgenson e Chowdhury (1982), realizaram ensaios de flexão de telhas metálicas retas e curvas de perfil autoportante, comparando as capacidades de carga desses dois tipos. Avaliou-se a influência da espessura na capacidade de carga e foi feita uma verificação dos resultados por meio de procedimento de Norma AISI. Também se verificou a aplicabilidade da Norma ao cálculo de telhas cujas dimensões não estejam dentro dos limites especificados.

Bergfelt et al. (1975), avaliaram experimentalmente o comportamento de telhas de aço de perfil trapezoidal sob flexão, focando a influência da flambagem

local dos flanges e das almas na capacidade de carga. Foram destacados procedimentos experimentais para determinação da carga crítica.

Fonseca (2000), também estudou o comportamento de telhas autoportantes sob flexão, buscando avaliar diferentes tipos de ligação entre as telhas. Foi feita uma comparação dos resultados com os valores teóricos obtidos pela especificação da AISI, 2001, e por um modelo de elementos finitos baseado no comportamento linear elástico.

Leece e Rasmussen (2005a), investigaram experimentalmente o comportamento de telhas de aço inoxidável de perfil trapezoidal sob flexão, de maneira semelhante à dos trabalhos de Bernard et al. (1993) e Bernard et al. (1995). Foram observados os fenômenos de flambagem local e distorcional interagindo.

Os trabalhos de avaliação teórica e experimental de telhas de aço sob flexão até agora citados, em geral, advertem sobre o colapso que pode ser ocasionado pela interação entre o momento fletor e uma carga concentrada, embora não estudem especificamente o efeito dessa interação.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 MECÂNICA DA DANIFICAÇÃO

O dano nos materiais é o processo físico progressivo que os leva a romper. A mecânica do dano é o estudo, que utiliza variáveis mecânicas, dos mecanismos envolvidos na deterioração do material sujeitos ao carregamento. O próprio material é danificado devido à presença de micro defeitos, tais como microfissuras e micro vazios. Os micro defeitos contribuem para a resposta não-linear pós-pico, sendo evidenciado macroscopicamente pela redução de rigidez e resistência do material. (LEMAITRE, 2001).

Segundo Proença (2000), a resposta não-linear dos sólidos, sob o ponto de vista macroscópico, é uma manifestação de processos irreversíveis que ocorrem em sua microestrutura, tais como: escorregamento relativo entre cristais, perdas de coesão em planos de clivagem ou contornos de grãos entre outros. Desses, alguns tem origem em micro defeitos constituídos por inclusões ou mesmo vazios, os quais, pelas suas características, favorecem a concentração de pequenas tensões. Esses micro defeitos constituem o que se entende por dano inicial do material. Esse dano inicial pode evoluir em consequência do rompimento das ligações entre os átomos ou por rupturas na interface entre componentes distintos. Essa evolução, macroscopicamente, acaba tendo uma influência direta sobre as propriedades elásticas, conforme evidenciam as reduções de resistência e de rigidez. Num estágio mais avançado de solicitação, o dano leva à formação e ao crescimento de microfissuras.

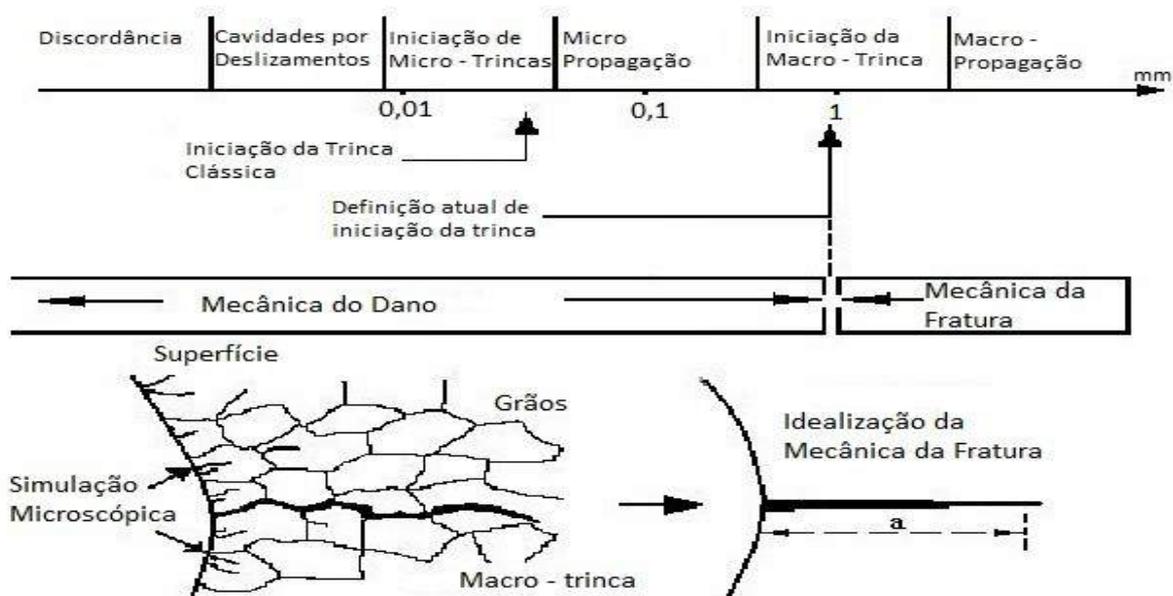
Nos processos de plastificação dos metais, o dano não tem influência direta sobre o mecanismo em si, no sentido de que cada um dos fenômenos pode ser analisado de forma independente. Todavia, há uma dependência indireta entre eles, uma vez que a redução da área resistente devida à danificação pode alterar a velocidade de movimentação das discordâncias. Assim, associando-se a cada um dos fenômenos uma variável representativa, a relação de dependência entre plasticidade e dano pode se estabelecer nas relações que exprimem a evolução

daquelas variáveis, numa forma de acoplamento dita cinética (PROENÇA, 2000).

É importante observar a diferença da mecânica do dano em relação à da fratura. Enquanto a mecânica da fratura faz referência sobre as condições de propagação de uma fissura macroscopicamente imersa num meio contínuo íntegro, a mecânica do dano se ocupa do efeito, sobre a resposta, de um processo de microfissuração distribuída que se desenvolve numa etapa anterior à formação da fissura discreta (Figura 3.1). Em síntese, a diferença entre mecânica do dano e mecânica da fratura pode ser colocada, segundo Janson e Hult (1977), da seguinte forma:

- na Mecânica do Dano, a resistência de uma estrutura carregada é determinada em função da evolução de um campo de defeitos (micro-fissuras ou poros) considerado continuamente distribuído;
- na Mecânica da Fratura, a resistência de uma estrutura carregada é determinada em função da evolução de um único defeito, como uma fissura pontiaguda pré-definida, num meio mecanicamente intacto.

Figura 3.1: Ilustração esquemática da iniciação de uma trinca macroscópica.



Será mostrado posteriormente que é possível quantificar o dano de forma indireta medindo-se a redução progressiva de uma propriedade mecânica global, como por exemplo, o módulo de elasticidade. No que se refere à transição de um estado de dano distribuído para uma fratura discreta, esta pode ser considerada como o resultado de um processo de localização do dano numa certa região de pequena largura do meio, seguido de sua evolução numa faixa progressivamente mais estreita até a formação da descontinuidade.

3.1.1 ASPECTOS FENOMENOLÓGICOS DO DANO

Do ponto de vista fenomenológico, Lemaitre (1986) classifica e define o comportamento dos materiais em três níveis ou escalas diferentes: microescala, mesoescala e macroescala.

O dano em microescala (escala atômica ou microscópica) é caracterizado pelo acúmulo de microtensões na vizinhança de defeitos e interfaces e pela perda de coesão atômica.

Na mesoescala há utilização de elemento de volume representativo, escala intermediária, células unitárias, cristais ou aglomerados atômicos em que o crescimento e coalescência de microfissuras ou microvazios unidos formam uma fissura.

Já na escala macroscópica, componentes e estruturas ou macroescalas, o dano é caracterizado pela propagação de trincas. A mecânica do dano trata dos fenômenos em mesoescala e microescala por meio da inclusão de variáveis de dano nas formulações da Mecânica do Contínuo. A propagação das trincas, macroescala, é normalmente estudada pela Mecânica da Fratura.

Apesar da diferença física entre as estruturas de materiais em engenharia como metais, polímeros, compósitos, cerâmicas, concreto e madeira, a semelhança qualitativa nos seus comportamentos mecânicos em meso e macroescala (elasticidade, escoamento, plasticidade, etc.) permite que as propriedades sejam formuladas com base em princípios energéticos comuns a todos esses materiais.

3.1.1.1 Natureza Física do Dano

3.1.1.1.1 Elasticidade e Dano

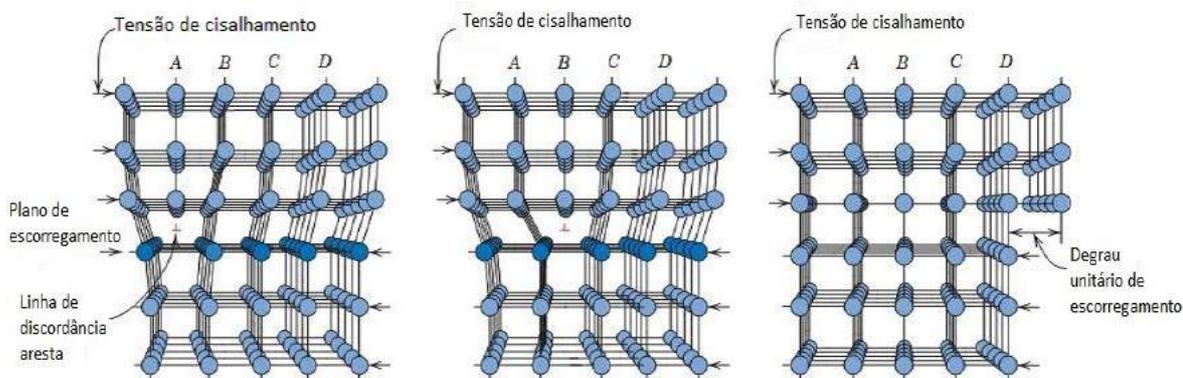
Os materiais são constituídos por átomos, ligados através de interações de componentes eletromagnéticos. Os fenômenos elásticos estão relacionados ao movimento relativo de átomos do material, associado a uma perceptível variação no volume, com a redução da distância interatômica. (LEMAITRE, 1996)

Apesar de sua natureza microscópica, é possível tratar a teoria da elasticidade através de modelos constitutivos matemáticos em mesoescala, usando a reversibilidade das deformações elásticas e incorporar conceitos como linearidade e isotropia.

O dano se inicia quando se dá a perda de coesão interatômica (*debonding*). Em metais submetidos a um carregamento, há o deslizamento dos planos cristalinos e o movimento de discordâncias e imperfeições.

Por exemplo, os metais são organizados em cristais ou grãos, onde existe uma ordem regular de átomos exceto em algumas linhas de discordâncias onde faltam átomos. Se uma tensão de cisalhamento é aplicada, a discordância pode mover-se devido á mudança da natureza da ligação, assim criando uma tensão plástica por escorregamento (Figura 3.2).

Figura 3.2: Tensão plástica elementar devido ao movimento da discordância.

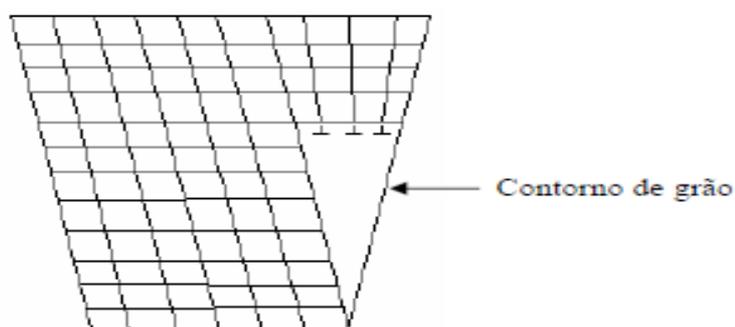


Fonte: (CALLISTER, 2007).

Caso os valores de tensão ultrapassem um determinado limite, o processo se torna irreversível, devido ao acúmulo de discordâncias em pontos específicos do material, causando perda de coesão e formando microtrincas. Este mecanismo é caracterizado pela introdução de deformações plásticas e microscópicas no material.

Se a discordância é parada por um microdefeito ou uma concentração de microtensão, é criada uma zona de contenção na qual outra discordância pode ser parada. Este segundo processo não pode ocorrer sem o dano por descolamento como mostrado na Figura 3.3. onde em suas faces são nucleadas discordâncias que geram as microtrincas (LEMAITRE, 1986).

Figura 3.3: Dano por nucleação de micro-trinca devido ao acúmulo de discordâncias.



Fonte: KRAJCINOVIC, 1989.

Dessa forma, conclui-se que a elasticidade é diretamente influenciada pelo dano, pois o aumento do acúmulo de discordâncias se reflete na redução da elasticidade do material.

Ocorre do ponto de vista do estado do material, um acoplamento, que nesse caso definido pela deformação elástica e pelo dano, é denominado acoplamento de estado.

3.1.1.1.2 Plasticidade e Dano

A plasticidade em metais está relacionada ao deslizamento dos planos cristalinos, ao contrario da elasticidade, a qual está relacionada ao movimento relativo de átomos. No caso de polímeros, o fenômeno esta associado à reorganização de moléculas. Em materiais cerâmicos, compósitos, concreto e

madeira, a plasticidade depende de formação de microtrincas e da perda de coesão das interfaces do material.

Sendo um processo irreversível, a plasticidade introduz deformações permanentes no material. Apesar de ocorrer variação volumétrica, esta só é considerável em valores muito elevados de tensão, teoricamente acima do limite de resistência à tração para os materiais convencionais; deste modo pode ser desprezada.

A plasticidade, em todos os casos, é influenciada pelo dano devido à redução da área efetiva de resistência do material, com a perda de coesão interatômica. O dano não influencia o mecanismo de deslizamento. Por outro lado, leva a um aumento na tensão efetiva atuante no material, podendo ser visualizado apenas através de equações cinéticas (evolução das variáveis de estado), sendo denominado acoplamento cinético (LEMAITRE, 1986).

Os fenômenos de elasticidade, plasticidade e dano podem ser resumidos da seguinte maneira: a elasticidade acontece ao nível de átomos. Por sua vez, a plasticidade é governada por escorregamento ao nível de cristais e moléculas. Finalmente, o dano está relacionado à perda de coesão atômica em microescala e à iniciação de trincas em mesoescala.

3.1.1.1.3 Tipos de Dano

Segundo Lemaitre (1986), podemos definir em mesoescala diferentes manifestações de dano.

Dano Frágil

O dano é considerado frágil quando uma trinca é iniciada em mesoescala com um acúmulo mínimo, mas muito localizado, de deformação plástica. Uma medida qualitativa para o dano frágil pode ser dada através da relação unidimensional entre as deformações elásticas e plásticas:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_e} < 1$$

Dano Dúctil

O dano é considerado dúctil quando ocorre simultaneamente a deformações plásticas maiores que um certo limiar p_D . Nesse caso, o grau de distribuição do dano ao longo do volume de material é comparável àquele das deformações plásticas.

Dano por Fluência

Quando um material é carregado até altas temperaturas (acima da temperatura de recristalização), a deformação plástica envolve a viscosidade, ou seja, o material se deforma mesmo sob tensão constante, havendo então dano por fluência. Como no caso do dano dúctil, a graus de distribuição da danificação é comparável as da deformações visco-plásticas.

Dano por Fadiga de Baixo Ciclo

Quando um material é sujeito a um carregamento cíclico a elevados valores de tensão ou deformação. O grau de distribuição do dano chega a ser superior aos casos de dano dúctil e por fluência. O dano se desenvolve juntamente com ciclo de deformação plástica depois um período, precedendo a fase de nucleação e propagação de microtrincas. O grau de localização do dano chega a ser superior aos casos de dano dúctil ou dano por fluência. Por causa dos altos valores para tensão, o baixo ciclo de fadiga é caracterizado por valores abaixo do número de ciclos para ruptura, N_R :

$$N_R < 10.000 \text{ ciclos}$$

Dano por Fadiga de Alto Ciclo

Nesse caso um material é carregado com baixos valores de tensão, a deformação plástica é frequentemente desprezível. A tensão é altamente localizada, geralmente em entalhes, furos ou cantos-vivos. Como consequência, a localização dos danos é elevada. O número de ciclos para falhar pode ser muito grande:

$$N_R > 10.000 \text{ ciclos}$$

3.1.2 VARIÁVEL DANO EM ELEMENTO DE VOLUME REPRESENTATIVO

Segundo Lemaitre e Chaboche (2009), elemento de volume representativo é um elemento com dimensões suficientemente grandes para que se possa admitir homogeneidade para a distribuição dos defeitos nele contidos, mas ao mesmo tempo suficientemente pequeno para admitir continuidade para as funções representativas dos fenômenos que ocorrem nele, para ser considerado um ponto material do contínuo.

Segundo Lemaitre (1996), considera-se um corpo com dano e um Elemento de Volume Representativo (EVR) em um ponto M, sendo este orientado por um plano pelo seu vetor normal \vec{n} e sua abscissa x ao longo da direção \vec{n} , como na Figura 3.4.

Segundo Lemaitre e Dufailly (1987), um elemento de volume representativo em mecânica é o menor volume no qual uma densidade pode representar um campo de propriedades descontínuas. O elemento a ser considerado deve ser suficientemente pequeno para evitar alto gradiente, mas grande o suficiente para representar a média dos micro-processos.

Para objetivo experimental e análise numérica, segundo Lemaitre (1996), é útil considerar a seguinte ordem magnitude para o elemento de volume representativo (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Dimensão do EVR.

Material	Aresta (mm)
Metais e Cerâmicas	0,1
Polímeros e compostos	1
Madeiras	10
Concreto	100

Fonte: LEMAITRE,2002.

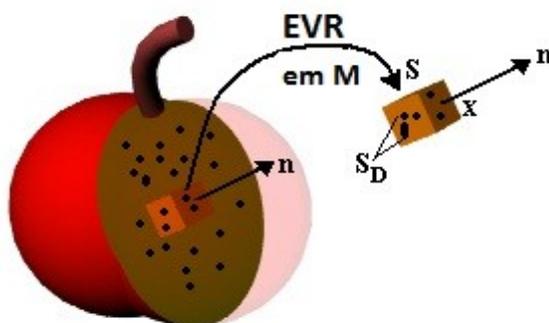
Os valores considerados na Tabela 3.1, são muito maiores do que os considerados nos problemas convencionais de elasticidade (da ordem de μm) e

devem ser respeitados para que os modelos constitutivos sejam válidos. Além disso, nas discretizações dos domínios para soluções numéricas, como em elementos finitos, os sub-domínios considerados devem ser compatíveis com as definições para o EVR, de forma a reduzir a dependência da solução do refinamento da malha.

Uma importante propriedade a considerar é o caráter localizado do dano. Em geral, o dano é um fenômeno muito mais localizado do que a deformação. Lembrando que o dano é caracterizado pela perda de coesão atômica, restringindo-se a algumas superfícies. Já a deformação é dada pelo movimento de átomos e planos cristalinos, ocorrendo ao longo de volumes.

Seja S , a área de uma das faces do elemento orientado por um vetor normal de direção n (Figura 3.4). O dano será dado pela razão da área danificada sobre a área total. Desta forma representa-se microdefeitos na mesoescala. Isto é feito de forma semelhante à plasticidade, quando a deformação plástica é representada como a média de muitos escorregamentos.

Figura 3.4 - Elemento de volume representativo.



Fonte:LEMAITRE, 1985.

3.1.3 PARÂMETRO ESCALAR DO DANO

O processo de deterioração ou danificação é relativo à fissuração, ao nível da média escala, que causa crescimento e união das microfissuras e outros tipos de cavidades com distribuição e orientação não uniformes.

Os principais efeitos do dano no comportamento mecânico macroscópico dos materiais são: a redução das propriedades elásticas, como o módulo de Young, e da

resistência.

Admitindo-se que o conjunto de defeitos seja totalmente incapaz de transferir tensões, pode-se definir uma tensão dita efetiva levando-se em conta somente à parte íntegra da seção do elemento representativo.

Considere \tilde{S} como sendo a área íntegra (área que efetivamente resiste aos esforços) da seção S considerada. Então a área dos defeitos (S_0) é :

$$S_0 = S - \tilde{S} \quad (3.2)$$

Por definição, o dano D_n , no caso associado a um plano de normal n , é definido como :

$$D_n = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{S_0}{S} \quad (3.3)$$

A variável de dano assume valores contínuos no intervalo $0 \leq D_n \leq 1$, sendo que $D_n = 0$ corresponde à situação do material íntegro e $D_n = 1$ indica um estado de total deterioração.

O Dano é isotrópico quando a variável de dano é uniforme em qualquer direção n , isto é, o dano no material é representado por apenas uma variável escalar, $D = D_n$.

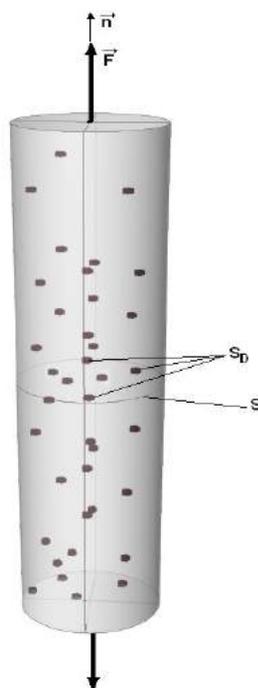
3.1.4 DEFINIÇÃO DE TENSÃO EFETIVA

Segundo Rabotnov (1969), a definição de um parâmetro de dano, representando uma densidade superficial de defeitos e descontinuidades no material, permite definir o conceito de tensão efetiva.

A tensão efetiva de dano representa o valor corrigido para as tensões distribuídas de uma determinada seção, que efetivamente resistem ao carregamento externo na presença de dano. Considere um carregamento F atuando

perpendicularmente sobre uma seção de um EVR (Figura 3.5).

Figura 3.5 – Elemento com danificação unidimensional.



Fonte:CODES, 2006

Admitindo-se que o conjunto de defeitos seja totalmente incapaz de transferir tensões, pode-se definir uma tensão dita efetiva levando-se em conta somente a parte íntegra da seção. Define-se tensão efetiva para um caso unidimensional, como:

$$\tilde{\sigma} = \frac{F}{\tilde{S}} \quad (3.4)$$

Onde F é a força aplicada na seção do elemento representativo e \tilde{S} é a área efetiva. Assim, a área efetiva resistente pode ser expressa em função da variável de dano como :

$$\tilde{S} = S - S_0 = S(1 - D) \quad (3.5)$$

Levando-se em conta a relação segue que :

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{(1-D)} \quad (3.6)$$

Portanto, tem-se sempre que: $\tilde{\sigma} \geq \sigma$

Em particular, nota-se que :

$\tilde{\sigma} = \sigma$ para material livre de imperfeições;

$\tilde{\sigma} \rightarrow \infty$ para material totalmente danificado localmente.

3.1.5 DEFINIÇÃO DA DEFORMAÇÃO EFETIVA

Segundo Lemaitre (1996), uma maneira de se evitar a análise em microescala, para cada tipo de defeito e cada tipo de mecanismo de dano, é postular um princípio de deformação ou de tensão equivalente para todos os casos em mesoescala.

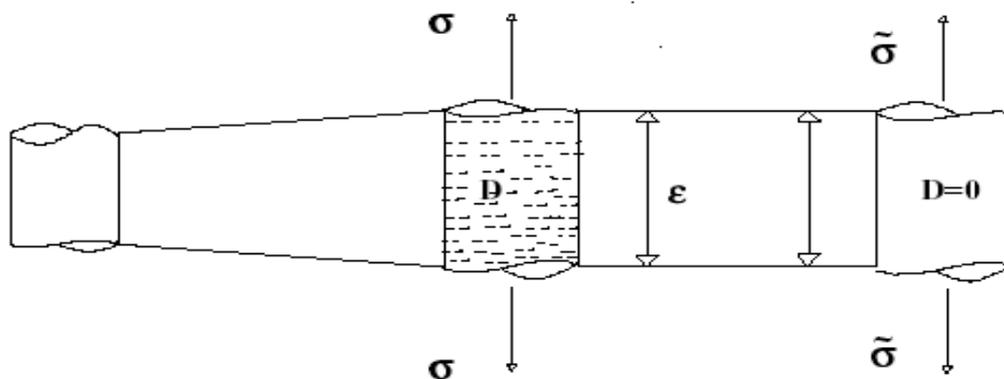
Com base na termodinâmica, o método do estado local (LEMAITRE, 1996) assume que o estado termomecânico em um ponto material é completamente definido pelos valores instantâneos de um conjunto de variáveis de estado, dependendo apenas do ponto considerado.

Este postulado, aplicado em microescala, impõe que as equações constitutivas para a deformação de um microvolume elementar não sofrem influências dos elementos em sua vizinhança.

Lemaitre estabeleceu em 1971 o princípio da equivalência de deformações, no qual assume-se que o comportamento do material é afetado pelo dano apenas na forma de tensão efetiva (Figura 3.6). O princípio de equivalência de deformações diz que (Lemaitre e Chaboche, 2002):

" Qualquer resposta em termos de deformações para o comportamento do material danificado, tanto no caso uniaxial quanto no multiaxial, é representada pelos mesmos modelos constitutivos para o material idealmente perfeito, substituindo-se a tensão nominal pela tensão efetiva de dano"

Figura 3.6 - Hipótese de deformação equivalente.



Fonte: Lemaitre e Chaboche, 2002

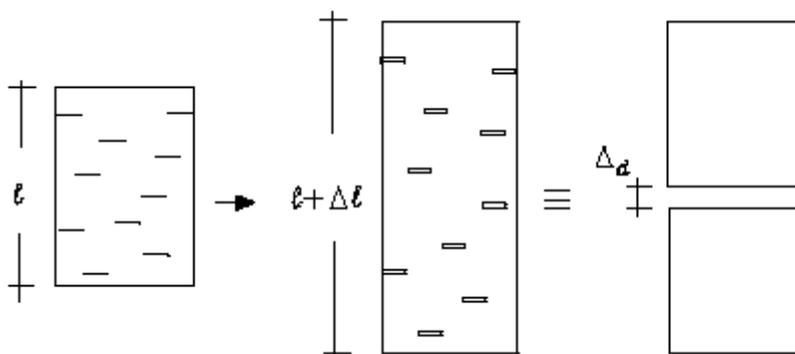
Um conceito dual ao de tensão efetiva é o de deformação efetiva e também decorre da análise de uma situação de deformação uniaxial imposta ao elemento de volume orientado segundo uma certa direção definida pelo versor n . Seja, então, $\Delta \ell$ a variação do comprimento inicial ℓ_0 por efeito da deformação imposta.

A medida de deformação linear nominal é definida pela relação:

$$\epsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell_0} \quad (3.7)$$

Entretanto, se o elemento de volume possui inicialmente defeitos ou descontinuidades internas, elas se abrem de uma certa quantidade, que em conjunto pode ser representada por Δ_d . Assim sendo, no processo de deformação (Figura 3.7), somente a parcela $\Delta \ell - \Delta_d$ é que efetivamente deve ser considerada numa medida da deformação.

Figura 3.7 – Acréscimo de comprimento devido à abertura de defeitos.



Fonte:PROENÇA, 2000.

Segue daí que a medida efetiva da deformação linear pode ser definida como:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\Delta \ell - \Delta_d}{\ell_0} \quad (3.8)$$

Uma segunda definição para uma variável de dano pode então ser proposta:

$$D_n^* = \frac{\Delta_d}{\Delta \ell} \quad (3.9)$$

Nota-se que essa definição é também associada a uma certa direção n . Levando-se em conta a nova variável de dano, segue que as medidas nominal e efetiva da deformação linear se relacionam por:

$$\tilde{\varepsilon} = (1 - D_n^*) \varepsilon \quad (3.10)$$

As duas variáveis escalares de dano introduzidas pelas equações (3.3) e (3.9) podem ser unificadas se for considerado que o volume correspondente à parte danificada é o mesmo nos dois casos. Esta consideração é bastante lógica pois se trata de uma situação de solitação uniaxial sobre um mesmo volume, onde ora se analisa o equilíbrio das tensões ora a compatibilidade das deformações.

Assim sendo, o volume danificado pode ser representado de duas formas:

$$V_d = S_0 \Delta \ell = S \Delta_d \quad (3.11)$$

Levando-se em conta as relações (3.3) e (3.9), segue que:

$$D_n = D_n^* \quad \forall n \quad (3.12)$$

3.1.6 EQUIVALÊNCIA DE ENERGIA

Seguindo a formulação de Lemaitre (1996), restringindo-se a análise ainda ao caso uniaxial, e sendo o meio íntegro supostamente elástico linear, o princípio enunciado leva à seguinte relação:

$$\tilde{\sigma} = E \tilde{\varepsilon} \quad (3.13)$$

Substituindo-se na relação (3.13) as relações que definem $\tilde{\sigma}$ e $\tilde{\varepsilon}$, (3.6) e (3.10) respectivamente, e já levando-se em conta a relação (3.10), segue que:

$$\sigma = (1 - D)^2 E \varepsilon \quad (3.14)$$

Essa última relação vale então para o meio contínuo equivalente e envolve quantidades nominais. Nota-se, por outro lado, que:

$$\tilde{\sigma} \tilde{\varepsilon} = \sigma \varepsilon \quad (3.15)$$

Portanto, pode-se afirmar que o meio contínuo equivalente reproduz a mesma quantidade de energia do meio danificado.

Observando-se a relação (3.14), pode-se definir o módulo secante de rigidez elástica (\tilde{E}) do meio danificado como:

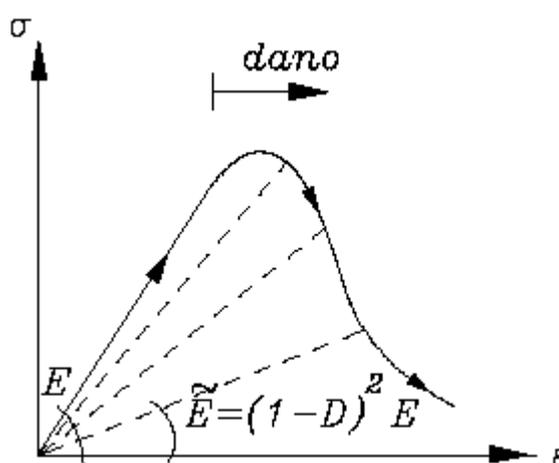
$$\tilde{E} = (1 - D)^2 E \quad (3.16)$$

A relação anterior coloca em evidência a degradação do módulo de rigidez elástico inicial do material causada pela danificação. Isolando-se a variável de dano, obtém-se:

$$D = 1 - \left(\frac{\tilde{E}}{E} \right)^{1/2} \quad (3.17)$$

Essa relação indica que é possível identificar os valores de dano com base em medidas experimentais do módulo secante de rigidez elástica em ensaios uniaxiais com deformação controlada (Figura 3.8).

Figura 3.8 - Variação da rigidez secante do meio contínuo equivalente.



Fonte: PROENÇA, 2000

3.1.7 EQUIVALÊNCIA-DEFORMAÇÃO

Considerando um material elástico linear, pode-se escrever a seguinte relação para a tensão-deformação efetiva:

$$\tilde{\sigma} = E \tilde{\epsilon} \quad (3.18)$$

Da definição de tensão efetiva (equação 3.6), da substituição desta na equação anterior, temos:

$$\tilde{\epsilon} = \frac{\sigma}{(1-D)E} \quad (3.19)$$

Da relação anterior, o módulo de rigidez elástica (\tilde{E}) para um meio contínuo de resposta equivalente ao meio deteriorado resulta:

$$\tilde{E} = (1 - D)E \quad (3.20)$$

A variável de dano pode ser identificada por :

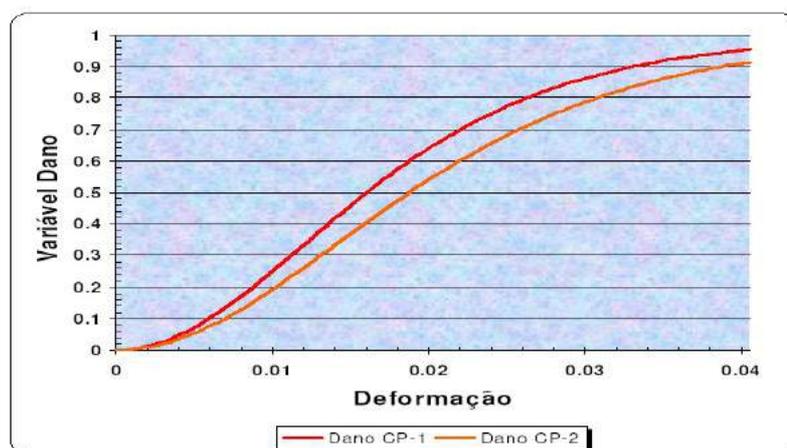
$$D = 1 - \left(\frac{\tilde{E}}{E} \right) \quad (3.21)$$

3.1.8 VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Segundo Lemaitre (1996), a variável dano pode ser mensurável por meio de vários procedimentos tais como: observação microscópica, variação de densidade, variação do módulo de elasticidade, propagação de ondas ultra-sônicas, variação da micro-dureza e variação da resistência elétrica.

A variação do módulo de elasticidade, dentre as várias formas de mensuração do dano, tem sido uma das mais utilizadas. Um exemplo de aplicação desse método é apresentado por MARCELO Jr. (2004). A Figura 3.9 mostra o gráfico Dano em função da deformação desse material.

Figura 3.9 – Gráfico Dano x Deformação: material compósito polimérico reforçado por fibra de vidro.



Fonte: MARCELO JR, 2004.

Esse é um método de medida indireta baseada na influência do dano na elasticidade do material, descrita anteriormente na equação 3.21. Esse método destrutivo requer fabricação de corpos de prova a fim de se executar testes mecânicos.

Supondo-se uniformes os danos homogêneos na medida da seção do corpo de prova.

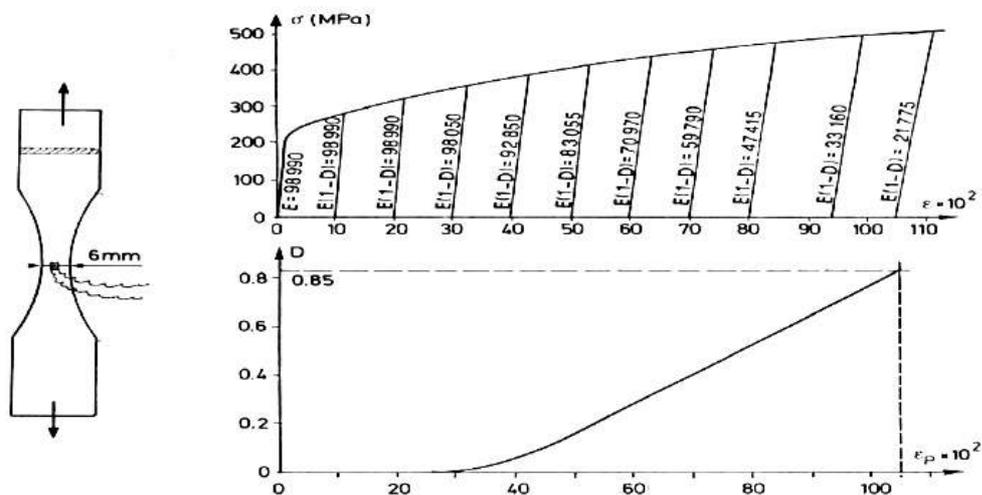
Se $\tilde{E} = E(1-D)$, é considerado como o módulo de elasticidade efetivo do material danificado, o valor do dano pode ser obtido através de medidas de \tilde{E} , uma vez que o módulo de Young E é conhecido e:

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E}$$

A utilização desse método requer medidas exatas de deformação. Strain-gauges são comumente usados, e \tilde{E} é medido mais exatamente durante os descarregamentos. Um exemplo é mostrado na Figura 3.10 para um dano dúctil, em cobre, induzido por grandes deformações, onde σ_v é a tensão verdadeira:

$$\sigma_v = \sigma (1 + \varepsilon) \quad (3.22)$$

Figura 3.10 - Medida de dano dúctil em cobre 99.9% a temperatura ambiente.



Fonte:LEMAITRE, 1996.

Essa técnica pode ser usada para muitas formas de dano, desde que o dano seja uniformemente distribuído no volume no qual a deformação é medida, essa é a limitação principal do método. Se o dano é extremamente localizado, como para fadiga de alto ciclo de metais, por exemplo, outro método deve ser usado.

Algumas outras precauções relacionadas à não linearidades, segundo Lemaitre (1996), devem ser consideradas. No início e no fim do trajeto do descarregamento no plano (σ, ε) existem pequenas não linearidades, devido a efeitos viscosos ou de endurecimento e também devido aos dispositivos experimentais. É melhor ignorar essas regiões e identificar \tilde{E} na escala:

$$0.15 \frac{F_{\max}}{S} < \frac{F}{S} < 0.85 \frac{F_{\max}}{S}$$

É muito importante sempre usar o mesmo procedimento para avaliar E e a evolução de \tilde{E} .

Para danos dúcteis ou por fadiga de baixo ciclo em metais, o procedimento deve ser perturbado um tanto por um decréscimo precoce de \tilde{E} em níveis baixos de deformação ou durante os primeiros ciclos. Isso é devido à micro-plasticidade relacionada aos movimentos reversíveis das discordâncias, e ao desenvolvimento de textura, mas não do dano. Como esse fenômeno é rapidamente saturado, é fácil de considerar:

$D = 0$ para $\varepsilon < \varepsilon_D$ (deformação de início da danificação)

$D = 0$ para $N < N^*$ (o numero de ciclos para a estabilização)

3.1.9 CRITÉRIO DE RUPTURA

Segundo Lemaitre (1996), a ruptura em média escala é a iniciação de trinca a qual ocupa a superfície inteira do EVR, isto é, $D = 1$. Em muitos casos isto causa um processo de instabilidade que repentinamente induz a perda de coesão de átomos restringindo a área restante. Isto corresponde ao valor crítico de dano (D_c), que depende do material e das condições do carregamento. A perda de coesão final dos

átomos é caracterizado pelo valor crítico da tensão efetiva que atua sobre a área resistente. Vamos chamar esta tensão de σ_{∞} , por que esta é a máxima tensão que pode ser aplicada ao material.

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D_c} = \sigma_{\infty} \quad (3.23)$$

Particularmente, σ_{∞} pode ser aproximadamente a tensão última σ_u que é fácil de ser identificada e é sempre menor.

Então a equação:

$$D_c \approx 1 - \frac{\sigma}{\sigma_u} \quad (3.24)$$

Dá o valor crítico do dano para iniciação de uma trinca média para um estado unidimensional de tensão σ .

A tensão última σ_u pode ser identificada como uma característica do material, D_c pode variar de aproximadamente zero para fratura frágil até aproximadamente um, para fratura puramente dúctil. Mas usualmente D_c assume valores entre 0,2 a 0,5.

Esta relação aplicada em ensaio com tração monotônico puro, define-se o dano crítico correspondente D_{1c} considerado para um material característico:

$$D_{1c} = 1 - \frac{\sigma_R}{\sigma_u} \quad (3.25)$$

Onde σ_R é a tensão de ruptura.

3.2 CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS

3.2.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento científico e tecnológico mundial tem se tornado mais evidente a cada dia no meio científico e, até mesmo, para as pessoas em seu cotidiano. Mais especificamente, no que diz respeito às técnicas de medições de deslocamentos e deformações, sendo as mais antigas, não foram desenvolvidas para serem utilizadas com o auxílio dos computadores.

Pensando no problema das técnicas de medições, pesquisadores da Universidade da Carolina do Sul desenvolveram uma técnica não-destrutiva e muito robusta, capaz de extrair informações do campo de deslocamentos e deformações por meio de imagens digitalizadas das áreas a serem analisadas. Assim que surgiu a técnica de Correlação Digital de Imagens (CDI) aplicada para a determinação de campos de deslocamentos e deformações (Sutton et al., 1983).

O fato de ser capaz de obter campos de deslocamento e deformações já é uma grande vantagem sobre os *gauges*, que são capazes de medir deformações pontuais apenas.

No contexto dos temas ligados ao presente trabalho, a CDI tem sido bem empregada. No que diz respeito à Mecânica do Dano, a CDI tem se tornado uma técnica muito conveniente, pois devido à grande precisão do campo de deslocamentos resultante de sua análise, é possível obter os Fatores de Intensidade de Tensão em modo misto, tal como realizado por Réthoré et al. (2005) e Yoneyama et al. (2007).

Já no contexto da Fadiga de Materiais, existem trabalhos empregando esta técnica em regimes de baixo ciclo (Bartali et al., 2008), bem como em alto ciclo (Vanlanduit et al., 2009) para diferentes materiais.

As técnicas ópticas de medição de campo sem contato estão bem adaptadas para a medição do comportamento global da estrutura. Os dados experimentais são utilizados na determinação das propriedades mecânicas e na validação das simulações numéricas. A natural ligação entre os métodos ópticos e o

processamento de imagem permite processar grandes quantidades de dados com rapidez e precisão.

3.2.2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE PROCESSAMENTO DE IMAGEM.

Segundo as definições de Scuri (2002), pode-se definir o processamento de imagem como a área que abrange as operações realizadas sobre imagens que resultam em informações destas imagens.

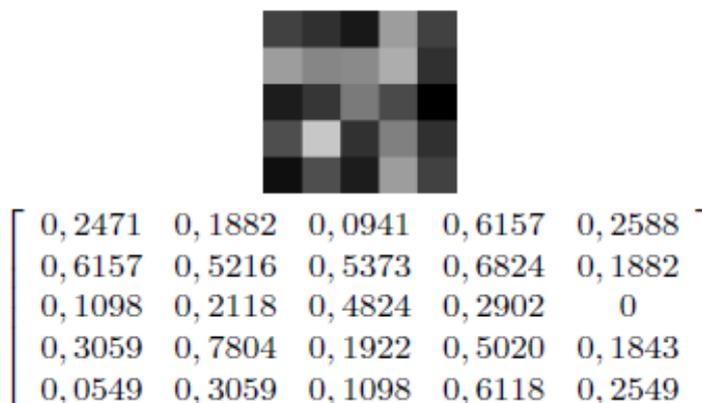
No processo de digitalização de uma imagem ocorre uma operação chamada de discretização da imagem, ou seja, ela passa de uma imagem contínua representada por uma função real, onde $f(x_1, x_2): R^+ \rightarrow R^+$, para uma imagem discreta, ou seja, x_1 e x_2 passam a assumir valores inteiros, dessa maneira $f(x_1, x_2): Z^+ \rightarrow R^+$. As operações realizadas sobre este tipo de imagem são conhecidas como processamentos digitais de imagem (PDI).

No PDI, trabalha-se basicamente com dois tipos de informações: visual e descritiva. A informação visual corresponde a imagem como ela é vista, enquanto que a informação descritiva refere-se ao modelo matemático que representa a imagem (Scuri, 2002).

Qualquer imagem digital pode ser representada por sua matriz de luminosidade. Esta pode ser considerada a informação descritiva desta imagem. A matriz de luminosidade pode ser representada por meio de uma função bidimensional discreta $f(x_1, x_2)$, sendo que cada combinação das variáveis x_1 e x_2 determina a posição de um pixel específico e o valor da função $f(x_1, x_2)$ da intensidade luminosa deste pixel. A Figura 3.11 mostra o exemplo de uma matriz de luminosidade de imagem monocromática com resolução de 25 pixels.

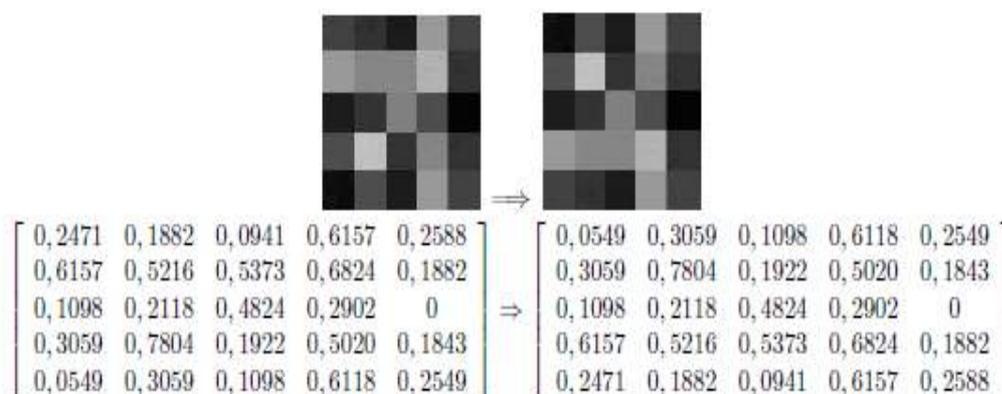
As operações que caracterizam um PDI são realizadas sobre a informação descritiva da imagem, ou seja, são realizadas sobre a matriz de luminosidade desta imagem. Por exemplo, a simples inversão vertical dos termos da matriz de luminosidade mostrada na Figura 3.11 corresponde a um PDI e resulta na inversão vertical da imagem (Figura 3.12).

Figura 3.11 – Imagem monocromática com resolução de 25 pixels e sua respectiva matriz de luminosidade.



Fonte: SCURI, 2002.

.Figura 3.12 – Exemplo de processamento de imagem.

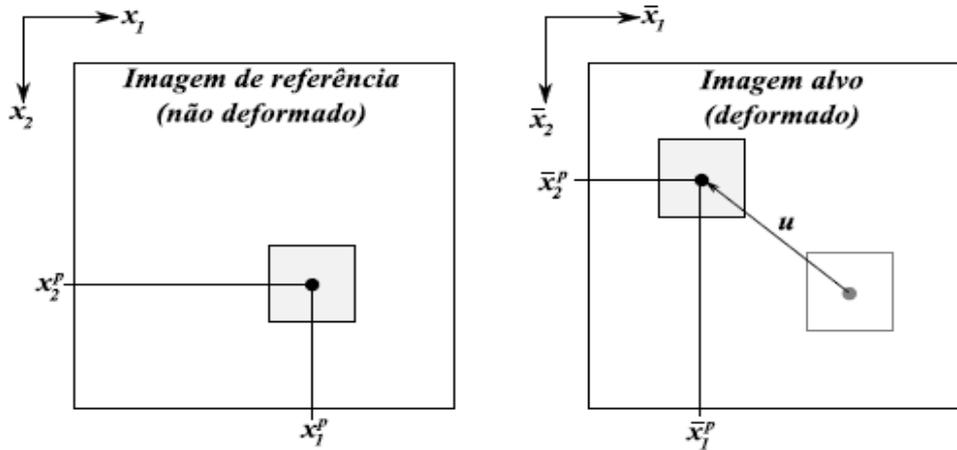


Fonte:SCURI, 2002.

A determinação do campo de deslocamentos é realizada por meio da correlação entre duas imagens da mesma região: a imagem de referência, que corresponde à imagem do corpo não deformado, e a imagem alvo, que corresponde à imagem do corpo deformado.

A correlação é feita em uma área específica ao redor de cada ponto de controle, como mostrado na Figura 3.13. Os pontos de controles são definidos a partir de uma grade gerada na superfície do corpo onde os deslocamentos serão determinados. Cada área ao redor dos pontos de controles serão definidas como funções bidimensionais que serão utilizadas na correlação.

Figura 3.13 – Correlação entre as imagens



. Fonte: SCURI, 2002.

A função que corresponde à área de correlação em um ponto de controle na imagem de referência pode ser representada por $I_0(x_1, x_2)$, enquanto que $I_n(\bar{x}_1, \bar{x}_2)$ corresponde à função da área de correlação em um ponto de controle na imagem alvo. Assume então a seguinte relação entre as imagens:

$$I_0(x_1, x_2) = I_n(x_1 + u_1, x_2 + u_2) \quad (3.26)$$

Os deslocamentos u_1 e u_2 são então determinados a partir do coeficiente de correlação cruzada normalizado C , que pode ser determinado pela seguinte equação:

$$C = \frac{\sum_{u_1, u_2} [I_0(x_1, x_2) \cdot I_n(x_1 + u_1, x_2 + u_2)]}{\left[\sum_{u_1, u_2} I_0(x_1, x_2)^2 \cdot \sum_{u_1, u_2} I_n(x_1 + u_1, x_2 + u_2)^2 \right]^{1/2}} \quad (3.27)$$

Considerando a equação acima, os deslocamentos u_1 e u_2 são obtidos pela posição na qual o coeficiente de correlação apresenta seu valor máximo, ou seja:

$$C(u_1, u_2) = \max[C] \quad (3.28)$$

3.2.3 O PROGRAMA CORRELI®

O algoritmo para correlação digital de imagens utilizado neste trabalho é proveniente do Laboratório de Mecânica e Tecnologia (LMT) - Cachan na França, elaborado pelo professor François Hild(2002).

O programa CORRELI foi escrito em Matlab®, apresentando uma interface simples e funcional. O programa é amplamente utilizado no meio acadêmico na Europa e divulgado em diversos trabalhos. A Figura 3.14 mostra a tela inicial do programa e o menu principal, onde se encontram as funções que podem ser utilizadas pelo usuário.

Figura 3.14 – Menu do programa CORRELI.

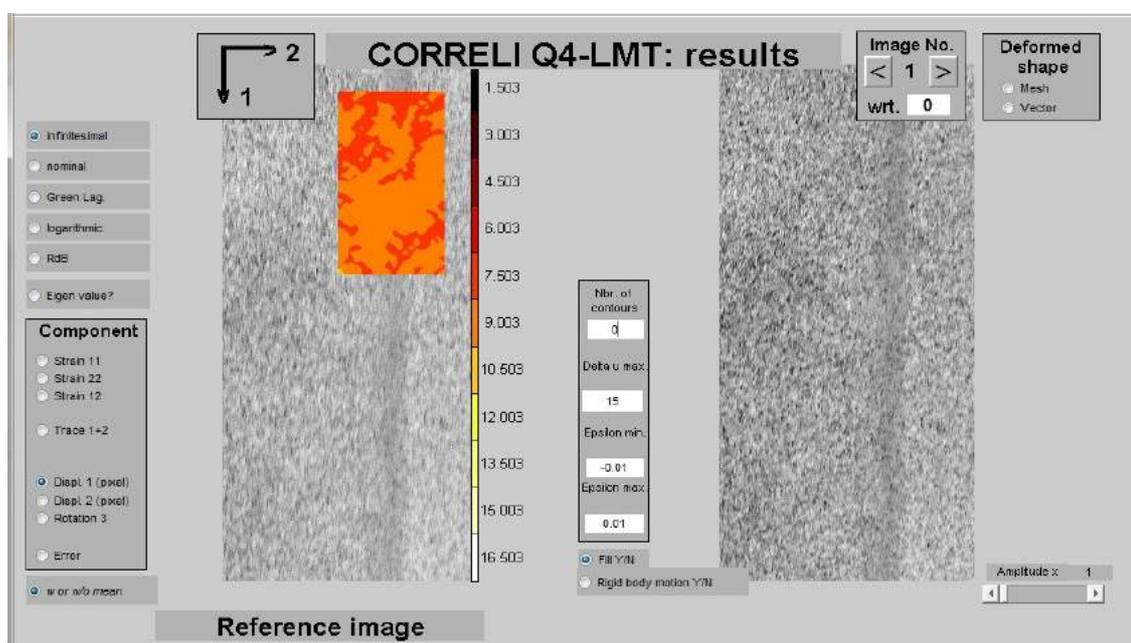


.Fonte: HILD, 2008

O programa de análise de imagens é encarregado de fornecer o campo de deslocamentos aparentes em 2-D, mapeando a chamada “imagem de referência” para a uma “imagem deformada” a partir de um conjunto discreto de posições, detectando pontos homólogos a partir de medidas de similaridade entre as potenciais áreas homólogas entre as imagens.

Correlli é aplicado em ambiente Matlab. Depois de realizar as análises, fornece em uma janela interativa (Figura 3.15) uma série de opções para serem melhores observados os campos de deformação.

Figura 3.15 – Tela de resultados e análise do Programa Correli



Fonte:HILD, 2008.

3.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

3.3.1 GENERALIDADES

A cada dia que passa são crescentes os problemas de engenharia estrutural. Sempre nos encontramos em busca de uma solução para os deslocamentos, deformações, tensões, forças, momentos e etc. A solução exata para esses problemas requer que o equilíbrio, tanto das forças quanto dos momentos, seja mantido durante todo o tempo de solicitação em qualquer ponto da estrutura.

Este é um desafio nem sempre muito fácil, pois normalmente são considerados diversos parâmetros e a solução se torna muito complicada para ser obtida analiticamente. É necessário então recorrer a métodos aproximados, porém, capazes de fornecer respostas com qualquer nível de precisão desejada, uma vez que essa precisão depende fundamentalmente do número de simplificações adotadas e das ferramentas computacionais disponíveis.

Segundo Allen e Bulson (1980), duas possíveis abordagens sobre métodos de

análise de estruturas, são:

- 1) A análise é feita pela consideração de que a deformação da estrutura real pode ser aproximada pela superposição de um conjunto de curvas de forma definida, mas de amplitude não especificada. Essas amplitudes das curvas é que irão representar as coordenadas generalizadas do sistema simples. Dois métodos importantes podem ser citados, ambos descritos em Zienkiewicz e Morgan (1983), nos quais as aproximações usam funções contínuas de deslocamento:
 - Método de Rayleigh-Ritz: a escolha da função para o deslocamento é feita de forma a compatibilizar as condições de contorno e em seguida, é feita a sua substituição na equação da energia potencial do sistema e a aplicação do princípio da estacionariedade;
 - Método de Galerkin: a escolha da função para o deslocamento também é feita de forma a compatibilizar as condições de contorno, porém sua substituição é feita na equação diferencial do sistema;
- 2) A análise é feita pela simplificação da estrutura real através da sua subdivisão em pequenos pedaços ou elementos. O método mais importante de aproximações pela subdivisão da estrutura é o Método dos Elementos Finitos (MEF), no qual a estrutura é subdividida em elementos, ligados entre si por nós. O comportamento da estrutura pode ser descrito em termos dos deslocamentos dos nós, os quais são considerados como as coordenadas generalizadas do sistema. Esse é o modelo mais simples e mais utilizado de elementos finitos, conhecido como Modelo de Deslocamentos, podendo ser formulado a partir do princípio da estacionariedade da energia potencial (Kleiber e Hien, 1992).

Segundo Allen *et al.* (1985), atualmente há disponível uma grande quantidade de método aproximados com auxílios computacionais que utilizam a substituição da estrutura original contínua. Assim pode-se oferecer uma infinidade de graus de liberdade, por uma estrutura mais simples que tenha apenas um número finito de

graus de liberdade. Para ser realizada uma simulação pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) são necessários dados de entrada, que são conhecidos fisicamente na engenharia como condições de contorno.

O MEF é definido simplesmente como um método numérico que tem a capacidade de resolver equações diferenciais por meio de aproximações. Resolvendo equações que representam um comportamento físico contínuo, sua representação geométrica é construída a partir de um modelo de elementos ou nós. Os vários tipos de elementos podem ser aplicados conforme a complexidade do modelo a ser simulado (CAMARÃO, 1994).

Ainda Zienkiewicz *et al.* (2000), citam um tipo de análise via método dos elementos finitos onde pode ser executada considerando que a deformação da estrutura real pode ser aproximada pela superposição de um conjunto de curvas de forma definida, porém a amplitude não é especificada.

Kleiber *et al.* (1992), exemplifica que no método de Rayleigh-Ritz, para a resolução por meio do método dos elementos finitos, a escolha de uma função para um deslocamento é realizada de forma que considere fielmente as condições de contorno de um modelo físico. Em seguida é feita a sua substituição na equação da energia potencial do modelo estudado.

Segundo Uddanwadiker *et al.* (2007), os passos básicos para uma simulação por meio do método dos elementos finitos são o pré-processamento, processamento e pós-processamento. Onde o pré-processamento ocorre no desenvolvimento geométrico, normalmente feito em CAD 2d ou CAD 3d. Quanto melhor o modelo, melhor será a confiabilidade dos resultados, porém a complexidade de um modelo necessitará de uma maior quantidade de elementos.

Durante o pré-processamento, são dados de entrada as propriedades físicas e mecânicas do material a ser simulado. Para a conclusão do modelo a ser simulado são aplicadas as condições de contorno físicas, podendo ser forças, pressões, acelerações, massas, temperaturas e ainda as restrições de deslocamento.

Durante o processamento, o programa resolverá um conjunto de equações de forma simultânea podendo apresentar um grande número de variáveis para alcançar a resposta desejada. O pós-processamento determina a apresentação gráfica dos resultados da simulação dos elementos finitos. Os resultados normalmente são representados por gradiente de cores ou gráficos, que mostram o comportamento da

geometria simulada.

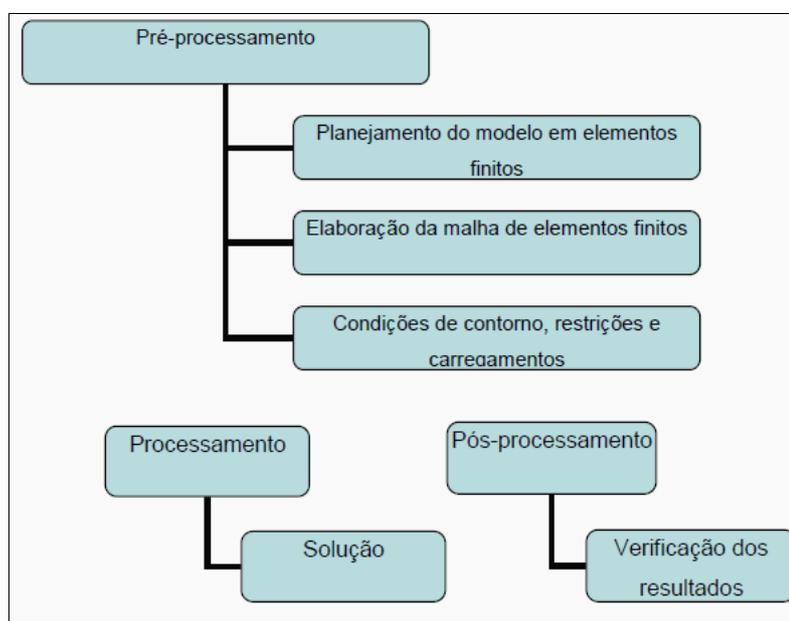
Segundo Ugural (1981) e Conte e Boor (1980), os métodos diretos são mais confiáveis, pois geram a solução exata, ou seja, com menos erros de arredondamento em um número finito de operações aritméticas. É importante destacar que na maior parte das aplicações em problemas lineares de engenharia são utilizadas as técnicas diretas.

Conte e Boor (1980), ressaltam que os métodos iterativos fornecem sequência de soluções aproximadas que normalmente acabam convergindo para a solução exata. Quando um número de iterações tende para infinito, essa metodologia é muito utilizada em problemas de engenharia de grande complexidade, problemas que podem ser lineares ou não-lineares.

3.3.2 PRINCÍPIOS BÁSICOS DO METODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Os recursos computacionais de aplicação do Método dos Elementos Finitos disponíveis nos softwares CAE poderão auxiliar, a partir de definições físicas, na formulação e resolução de problemas cotidianos de forma objetiva. Assim, deve ser estabelecida uma sequência básica de etapas para aplicação do MEF, como indica o fluxograma da Figura 3.16.

Figura 3.16 – Sequência das etapas de uma programa MEF.



Fonte: Próprio autor.

No pré-processamento é efetuada a montagem do modelo discretizado da estrutura. Nesse passo são aplicadas as condições de contorno e o carregamento.

No processamento são realizados os cálculos matriciais, para determinação de deslocamentos, reações de apoio e forças internas nos elementos.

No passo seguinte, de pós-processamento, são interpretados os resultados numéricos dos cálculos efetuados, e a sua coerência com o problema físico estudado.

A evolução da utilização do computador no auxílio da engenharia tem sido cada vez mais eficiente. O uso de programas e de ferramentas gráficas se destacam no sentido de facilitar o trabalho de execução da malha em elementos finitos, que até então era um processo muito dispendioso.

Atualmente os programas disponibilizam muitos recursos gráficos que permitem diminuir a complexidade da geração do modelo, onde aproveita-se a geometria preparada por meio de outros programas de desenhos, podendo ser usada como referência para a construção da malha em elementos finitos.

Hipóteses mal formuladas pelo analista ao gerar uma malha podem gerar erros de grandes amplitudes, portanto, o recurso gráfico reduziu enormemente o trabalho do engenheiro, porém exige um maior embasamento conceitual no qual devem se apoiar os trabalhos com a ferramenta de simulação (ALVES, 2006).

Será apresentada de forma sucinta a teoria básica envolvida no MEF com a aplicação do modelo do deslocamento, bastante conhecida e facilmente encontrada na literatura, segundo Zienkiewicz e Taylor (1989).

A equação algébrica fundamental que descreve o problema estático linear pelo modelo de compatibilização dos deslocamentos é:

$$[K] \{D\} = \{R\} \quad (3.29)$$

onde:

$[K]$ é a matriz de rigidez da estrutura, quadrada, simétrica e positiva definida;

$\{D\}$ é o vetor de deslocamentos globais da estrutura;

$\{R\}$ é o vetor de forças atuantes na direção dos deslocamentos globais da estrutura.

Após a imposição das condições de contorno, o sistema formado é resolvido para as equações correspondentes aos deslocamentos desconhecidos. Para a resolução têm-se, de forma geral, dois tipos de métodos numéricos, direto ou iterativo.

Segundo Ugural (1981) e Conte e Boor (1980), os métodos diretos dão a solução exata em um número finito de operações aritméticas. Em sua grande maioria são variações da eliminação Gaussiana, sendo as versões conhecidas como métodos de Cholesky as mais utilizadas em análise estrutural. Na maior parte das aplicações em problemas lineares são utilizadas as técnicas diretas.

Os métodos iterativos dão a sequência de soluções aproximadas que geralmente convergem para a solução exata quando o número de iterações tende para infinito. Essas técnicas são utilizadas em problemas de grande porte, lineares ou não-lineares.

Para o tratamento numérico de problemas não-lineares, é necessário que se use formulação incremental. Nesse tipo de processo, são obtidas as soluções do sistema ao longo do tempo, com a atualização dos parâmetros e variáveis a cada etapa.

A última configuração conhecida é adotada como referência e assumindo que o processo em cada intervalo de tempo é infinitesimal, o problema pode ser pensado como um problema linear de domínio submetido a condições iniciais existentes no início de um dado intervalo. Normalmente são utilizados o método de Newton e suas variações (CONTE e BOOR, 1980).

3.3.3 ABORDAGEM SOBRE O PROGRAMA ABAQUS

O ABAQUS (Hibbitt, Karlsson e Sorensen, 2010) é um programa comercial desenvolvido com a utilização do MEF e de grande potencialidade e aplicação nos problemas de análise estrutural. Sua utilização nos problemas de instabilidade estrutural requer um conhecimento dos métodos de resolução adotados, de modo que seja possível garantir um controle de todos os parâmetros envolvidos e, portanto, uma confiabilidade nos resultados obtidos.

Pode-se afirmar que todas as estruturas reais apresentam comportamento não-linear (Hinton et al., 1992). Nas análises de mecânica estrutural, são consideradas três fontes de não-linearidades:

- (i) de material, quando as leis constitutivas do material são não lineares;
- (ii) de contorno, nas situações em que as condições de contorno mudam durante a análise;
- (iii) geométricas, quando se leva em conta mudanças na geometria do modelo durante a análise.

O programa tem grande versatilidade para aplicações na área da engenharia onde consiste de vários módulos, dentre eles, o gráfico CAE (pré-processador), *Viewer* (pós-processador) e os módulos principais *STANDARD* e *EXPLICIT*.

O ABAQUS/Standard é um produto geral de análise quasi-estática que recorre a um esquema de integração implícito e que permite resolver uma variada gama de problemas.

O ABAQUS/Explicit é um produto específico que utiliza uma formulação dinâmica explícita dos elementos finitos. Este é principalmente usado em simulações de impacto e em problemas em que a componente inercial não pode ser desprezada.

O pré-processador ABAQUS/CAE é formado de uma interface gráfica que permite ao usuário uma rápida e eficiente definição da geometria do objeto de estudo, atribuição das propriedades dos diferentes materiais, aplicação dos carregamentos e das condições de contorno, seleção do número de etapas

pretendidas na análise e, finalmente, geração da malha de elementos finitos correspondente ao corpo analisado.

Um monitoramento da consistência e adequação do modelo pode ser feita por meio de ferramentas especiais do ABAQUS/CAE que permitem verificar vários aspectos relacionados com as partições definidas para a geometria do modelo (módulo PART), propriedades mecânicas dos materiais envolvidos (módulo PROPERTY), agrupamento destas partições (módulo ASSEMBLY) e imposição da sequência de passos de análise (módulo STEP) e de sua natureza – linear ou não linear, definição das condições de contorno e dos carregamentos (módulo LOAD), geração da malha de elementos finitos (módulo MESH) e finalmente obtenção do arquivo de entrada (módulo JOB) (ABAQUS v.6.10).

Após a geração do arquivo de entrada pelo pré-processador, o mesmo pode ser ainda manipulado pelo usuário para situações não convenientemente tratadas pelo ABAQUS/CAE, portanto assim é possível executar-se a simulação computacional pelo método dos elementos finitos, utilizando-se os modelos ABAQUS/STANDARD e ABAQUS/EXPLICIT (ABAQUS v.6.10)

Segundo Chen e Han (1987), o ABAQUS oferece ainda diversos modelos de análises, que consideram respostas elásticas e inelásticas. Sendo que os resultados inelásticos são modelados por meio da teoria da plasticidade. Para os aços de uma forma geral, o modelo de plasticidade mais utilizado na engenharia é o modelo com encruamento isotrópico e superfície de escoamento de Von Mises.

As diversas potencialidades do ABAQUS permitem que problemas de engenharia complexos, envolvendo geometrias complicadas, relações constitutivas não lineares, ocorrência de grandes deformações, carregamentos transientes e interações entre materiais, possam ser modelados numericamente.

O processo de construção de um modelo adequado não é uma tarefa simples para um usuário iniciante, justamente por envolver uma quantidade muito grande de parâmetros e de opções, a elevada gama de possíveis soluções de problemas que podem ser simulados, exigem do usuário um maior conhecimento teórico do problema físico (ABAQUS v.6.10).

3.4 FORÇA DOS VENTOS

As propriedades do vento são instáveis e variam aleatoriamente. Os constantes estudos têm resultado em novas técnicas computacionais que vem tornando possível a geração de históricos e dados de vento com características estatísticas bastante semelhantes às do vento real. O estudo dos ventos que atuam em estruturas são cada vez mais significativos devido a considerável mudança climática em nosso planeta.

Para a consideração dos efeitos de vento em estruturas, é razoável supor que a velocidade do vento pode ser considerada como a combinação de uma velocidade média e flutuações em torno desta média. A velocidade média é determinada para intervalos de tempo e as flutuações são determinadas como médias para intervalos de tempo pequenos, sendo denominadas rajadas.

As flutuações são causadas pela agitação do vento médio (turbulência), provocada pela rugosidade da superfície terrestre e, por processos de troca de calor entre as camadas da atmosfera. Segundo Blessmann (2005), para ventos fortes, ocasionados por tormentas de origem ciclônica de longa duração, as flutuações são causadas, primordialmente, pelo atrito do fluxo de ar com a rugosidade do solo.

A característica intrinsecamente aleatória da formação de turbilhões impede o tratamento determinístico das velocidades do vento, exigindo um estudo estatístico. Os registros históricos de um processo estocástico diferem entre si, no entanto, algumas propriedades podem ser observadas.

A norma NBR6123 - Forças devidas ao vento em edificações, fornece diretrizes gerais para o cálculo da carga do vento, porém este carregamento é determinado por expressões matemáticas, deduzidas por Blessmann (1991), obtidas de estudos em edificações altas que levam em consideração o perfil vertical de velocidades médias apresentado pela referida norma.

A intensidade da força dos ventos é calculada a partir da velocidade característica do vento de uma determinada região e dos fatores: topográfico, de rugosidade e estatístico da edificação para determinação dos valores médios dos coeficientes de pressão.

Segundo a NBR6123, nem sempre a velocidade mais desfavorável é a velocidade máxima prevista para o vento. Para baixas velocidades, o regime de escoamento é laminar e os efeitos resultantes são praticamente, de natureza estática, onde é levado em consideração o coeficiente de arrasto e a pressão de obstrução.

3.4.1 CÁLCULO DA FORÇA DO VENTO

São definidos aqui alguns parâmetros comumente usados para verificação ou cálculo da influência do vento em edificações. Esses parâmetros são a pressão dinâmica, o coeficiente de pressão e a velocidade característica, os quais serão espanados a seguir:

3.4.1.1 PRESSÃO DINÂMICA

A pressão dinâmica é importante uma vez que é usada para o cálculo das forças do vento atuando em determinada estrutura. Segue abaixo a dedução para a equação da pressão dinâmica q , onde considera-se inicialmente a equação de Bernoulli,

$$P_K + \frac{1}{2} \rho V_K^2 = P_e + \frac{1}{2} \rho V_e^2 \quad (3.30)$$

Onde:

P_K : pressão em um ponto a barlavento não afetado pelo objeto, N/m²,

ρ : densidade do ar, kg/m³,

V_K : velocidade em um ponto a barlavento não afetado pelo objeto, m/s,

P_e : pressão em um ponto do objeto analisado, N/m²,

V_e : velocidade em um ponto do objeto analisado, m/s,

Considerando que o ponto e é um ponto de estagnação, ou seja, ponto onde a velocidade é nula, tem-se:

$$P_K + \frac{1}{2} \rho V_K^2 = P_e \quad (3.31)$$

A pressão dinâmica é justamente a diferença entre a pressão em um ponto de estagnação P_e e um ponto a barlavento com fluxo não afetado pelo objeto, ou seja:

$$P_e - P_K = \frac{1}{2} \rho V_K^2 = q \quad (3.32)$$

Considerando condições normais de temperatura e pressão (15°C e 1 atm) tem-se a densidade do ar $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ e com isso tem-se:

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (3.33)$$

A equação (3.33) é justamente a equação utilizada pela ABNT NBR 6123, 1988, para a pressão dinâmica q , dada em N/m².

3.4.1.2 COEFICIENTE DE PRESSÃO

Normalmente a ação do vento em uma dada estrutura é representada por meio dos coeficientes de pressão, onde de acordo com Scruton, 1981, para um ponto na superfície é dado por:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V_k^2} \quad (3.34)$$

Sendo P a diferença entre a pressão em um ponto na superfície e um ponto a barlavento em que o fluxo do vento não é influenciado pelo objeto tem-se:

$$C_p = \frac{P_e - P_k}{\frac{1}{2} \rho V_k^2} \quad (3.35)$$

O termo P pode ser positivo ou negativo. Quando é positivo significa que tem-se sobrepressão e negativo significa que se tem sucção. O maior valor assumido por C_p positivo é 1. Isso ocorre em um ponto de estagnação onde a velocidade é nula, já a sucção pode exceder a 1, não tendo um limite especificado.

3.4.1.3 VELOCIDADE CARACTERÍSTICA

A velocidade característica é usada para o cálculo da pressão dinâmica q, logo de acordo com a ABNT NBR 6123, 1988, a velocidade característica do vento pode ser calculada pela equação (3.36).

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (3.36)$$

Onde,

V_0 : velocidade básica do vento, m/s,

S_1 : fator topográfico, adimensional,

S_2 : fator que considera rugosidade do terreno, variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e dimensões da edificação, adimensional,

S_3 : fator estatístico, adimensional,

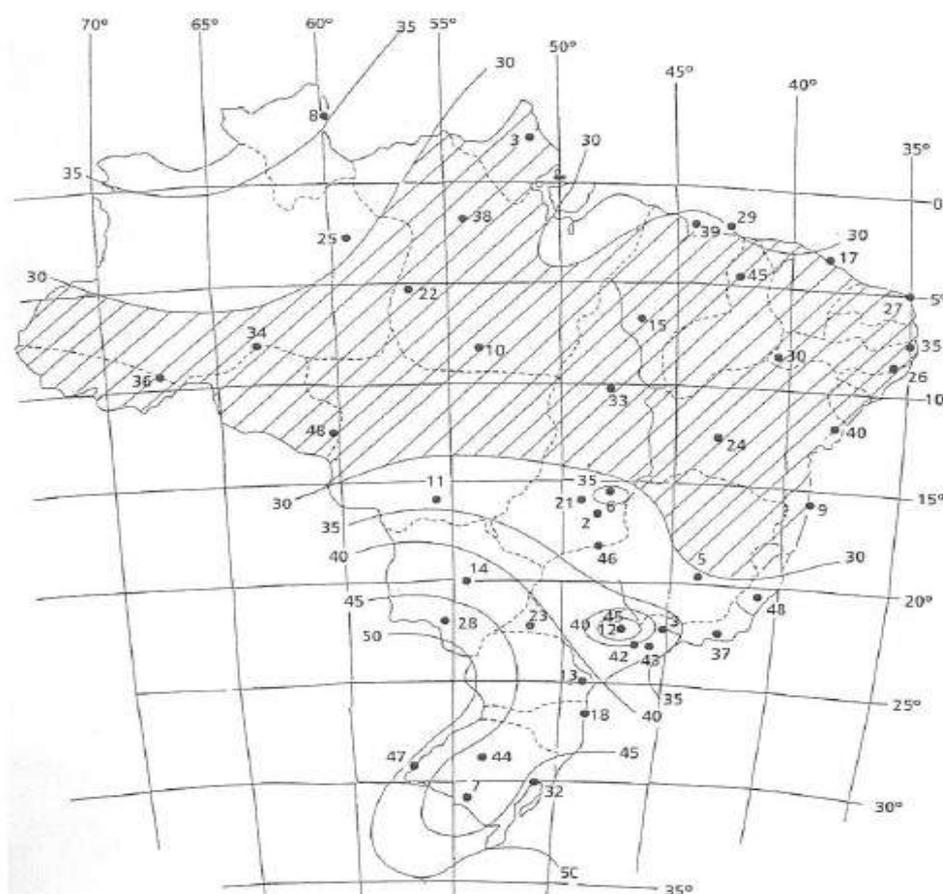
A velocidade básica do vento é a velocidade de uma rajada de 3 s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano.

É considerado também que o vento básico pode soprar de qualquer direção horizontal (ABNT NBR 6123, 1988). A velocidade básica do vento no Brasil é obtido do gráfico das isopletas conforme Figura 3.17.

O fator S_1 pode ser assim definido:

- Terreno plano ou fracamente acidentado – $S_1= 1,0$;
- Taludes e morros – Para esse caso existe uma série de considerações que não serão aqui abordadas;
- Vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção: $S_1=0,9$.

Figura 3.17 – Gráfico das isopletas das velocidades básicas do vento(m/s)



O fator S_2 é obtido por meio da equação (3.37).

$$S_2 = bF_r(z/10)^p \quad (3.37)$$

Onde:

b : parâmetro meteorológico,

F_r : fator de rajada,

z : altura da estrutura sobre o terreno, m,

p : expoente da lei potencial de variação de S_2 .

Esses fatores podem ser obtidos na Tabela 3.2. Nessa tabela alguns parâmetros devem ser definidos. O primeiro deles se refere a rugosidade, a qual, de acordo com a ABNT NBR 6123, 1988, está dividida em 5 categorias:

- Categoria I – Superfícies lisas de grandes dimensões;
- Categoria II - A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1 m;
- Categoria III – A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3m.
- Categoria IV – A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10m. Esta categoria inclui zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser considerados na categoria V.
- Categoria V – A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25 m.

Outro parâmetro a ser definido se refere às dimensões da edificação. Neste caso a divisão se faz através de três classes:

- Classe A - Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m.
- Classe B - Toda a edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m.
- Classe C – Toda edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

O fator de rajada é sempre o correspondente à categoria II.

Tabela 3.2 – Parâmetros meteorológicos(NBR 6123-1988)

Categoria	Zg (m)	Parâmetros	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		Fr	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,940	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

O fator estatístico S_3 é baseado em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança requerido para a vida útil da edificação. A definição da velocidade básica consideram período de recorrência médio de 50 anos e a probabilidade de que a velocidade V_0 seja excedida neste período é de 63%. Estes valores são considerados adequados para o grupo 2 (edificações normais destinadas a moradias, hotéis, escritórios, etc.). Os valores mínimos de S_3 estão indicados na Tabela 3.3:

Tabela 3.3 – Valores mínimos para os valores estatístico S_3 (NBR 6123-1988)

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a	0,83

4 MATERIAL E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta todos os equipamentos projetados e utilizados para a execução dos ensaios nas telhas, sob condição bi-engastada, assim como a descrição completa da montagem e da instrumentação utilizada.

Para a realização dos ensaios de carregamentos cíclicos nas telhas metálicas foi projetada uma máquina de aplicação de cargas cíclicas com controle automatizado e assistida por computador. O equipamento foi instalado no Laboratório da Mecânica da Fratura e Fadiga (LAMEFF-UFC).

4.1 MATERIAL

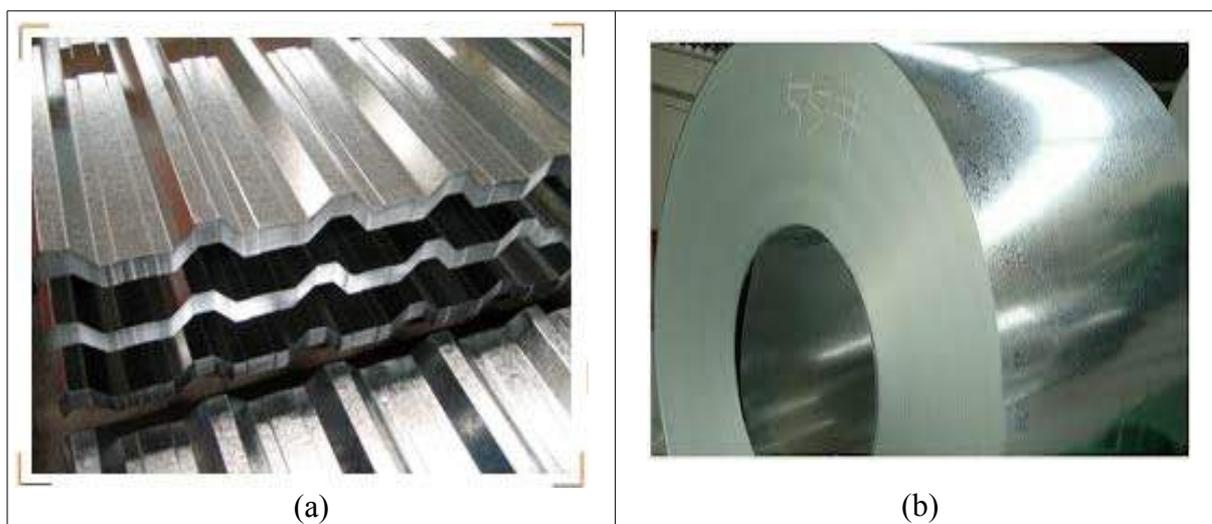
4.1.1 TELHAS METÁLICAS TRAPEZOIDAIS

As telhas metálicas trapezoidais utilizadas no experimento são as mais utilizadas na indústria da construção civil por terem melhor resistência a grandes vãos. Em Fortaleza, devido à alta incidência da maresia, as mais usadas são de dois tipos: telha de aço galvanizada e telha de aço cincalum.

As telhas metálicas galvanizadas são feitas de aço e possuem um revestimento de zinco. Esse revestimento de uma dupla camada de zinco é realizado por um processo de imersão a quente que é conhecido como galvanização. As telhas Cincalum possuem o mesmo material base utilizado na telha galvanizada, porém são revestidas em processo contínuo por imersão a quente com liga de 55% alumínio, 43,4% de zinco e 1,6% de silício, ou seja, além da proteção do revestimento de zinco, possui alumínio em sua composição o que ajuda a combater mais ainda a corrosão. Este revestimento capacita ao aço resistir à corrosão por meio da ação conjunta de proteção catódica do zinco e o efeito de oxidação superficial do alumínio.

O material de ensaio foi doado para o laboratório em folhas de 2,0m de comprimento por 1,04m de largura (Figura 4.1a). As chapas de aço, que deram origem às telhas, são importadas da China enroladas em forma de bobinas (Figura 4.1b)

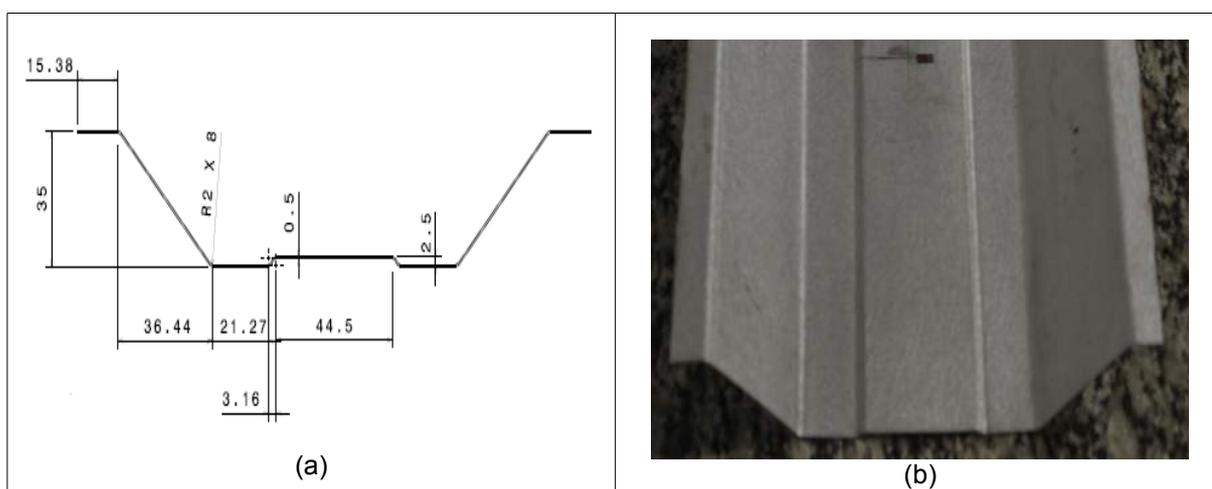
Figura 4.1 – (a) Folhas das telhas utilizadas; (b) bobinas que originam as telhas.



Fonte: Próprio autor.

Os experimentos de aplicação de carregamento cíclico foram realizados numa faixa da telha, retirada com a utilização de um disco de corte realizado na folha total (Figura 4.2-c). A faixa da telha ensaiada apresentou as dimensões da Figura 4.2 -a.

Figura 4.2 – (a) Dimensão em corte da telha; (b) Imagem da telha já cortada; (c) folha inteira da telha para ensaio.



(c)

Fonte: Próprio autor.

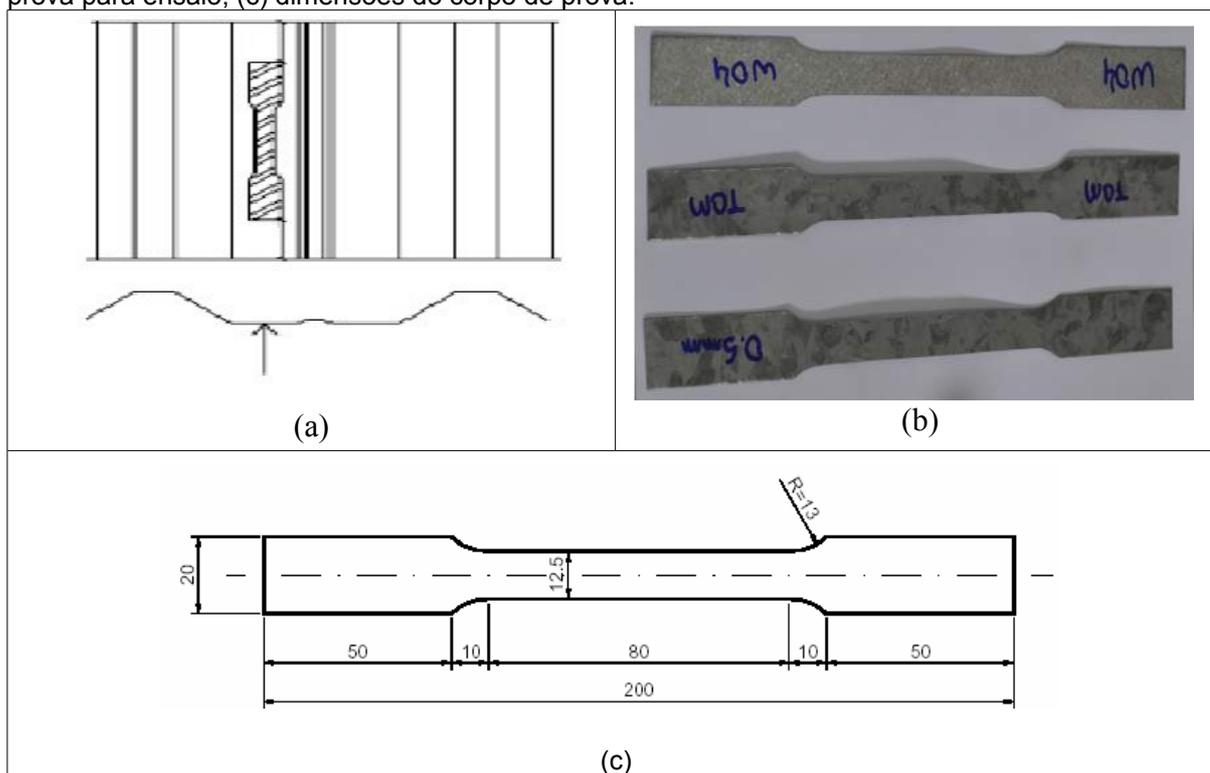
A composição química das telhas foi verificada por meio de ensaio no LACAM (Laboratório de Caracterização de Materiais), por meio de um espectrômetro de emissão ótica, onde seguiu as normas ASTM 792 e 653. A tabela 4.1 apresenta a composição química das telhas.

Tabela 4.1 – Composição química das telhas de aço.

ESPECIFICAÇÃO		COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em massa)						
Tipo de telha de aço	Tipo de Aço	C	Mn	S	P	Si	Al	Zn
Cinalum (0.5mm)	ASTM 792	0,04	0,19	0,003	0,017	0,02	0,03	0,09
Galvanizada (0.47mm)	ASTM 653	0,039	0,257	0,0047	0,001	0,008	-	0,07

Ensaio de tração foram realizados em corpos-de-prova retirados das telhas, como mostra a figura 4.3, por meio da metodologia prescrita pela NBR-6152, a fim de caracterizar os aços utilizados nos experimentos. Os elementos foram retirados do canal da telha, região da telha onde é realizada a fixação com a terça.

Figura 4.3 – Local de retirada do corpo de prova da telha – (a) desenho esquemático, (b) corpos de prova para ensaio; (c) dimensões do corpo de prova.



Fonte: Próprio autor.

4.2 PROCEDIMENTO DE CRIAÇÃO DO APARATO METÁLICO

Inicialmente, foi projetada uma estrutura metálica rígida em pórtico que resistisse a vibração ocasionada pela variação de carregamentos cíclicos. O aparato foi projetado no intuito de simular em tamanho real, a fixação de uma telha metálica trapezoidal entre as terças de um galpão de uso geral. Foi montada no LAMEFF - UFC (Laboratório de Mecânica da Fratura e Fadiga), uma máquina com perfis metálicos de chapa dobrada tipo U enrijecido de dimensões 150mm x 60mm x 20mm, com chapa de 3mm de espessura (Figura 4.4). Esses tipos de perfis são os mais utilizados na construção de estruturas metálicas.

Figura 4.4 – Aparato montado no LAMEFF-UFC.



Fonte: Próprio autor

As terças (Figura 4.5) também foram dimensionadas com os mesmos perfis. Geralmente as cobertas metálicas possuem um distanciamento entre terças variando entre 1,5m e 2,5m, no presente trabalho, esse distanciamento ficou definido em 1,8m, mas a estrutura permite uma variação nessa medida, por que a terça projetada encontra-se parafusada, podendo ser mudada de posição alterando-se o distanciamento.

Figura 4.5 – Terças metálicas – perfil U enrijecido.



Fonte: Próprio autor.

A força foi aplicada no centro da telha com a utilização de uma serra tico-tico (Figura 4.6), pois a mesma realiza movimento de vaivém, simulando uma ação oscilatória na telha. Esse tipo de máquina foi escolhida devido a sua fácil aquisição e também por ser capaz de imprimir uma determinada força na telha, superando à sua inercia.

Figura 4.6 – Máquina oscilatória de carregamento utilizada no experimento.



Fonte: Próprio autor.

Para transmitir o movimento oscilatório para a telha, foi utilizada uma barra de aço rosqueada de 12mm (Figura 4.7) devido a facilidade de conexão desta com a célula de carga. A barra foi ligada à Tico-tico substituindo a serra de corte original.

A barra de aço foi adaptada, com a ponta raspada para que pudesse ser fixada à máquina.

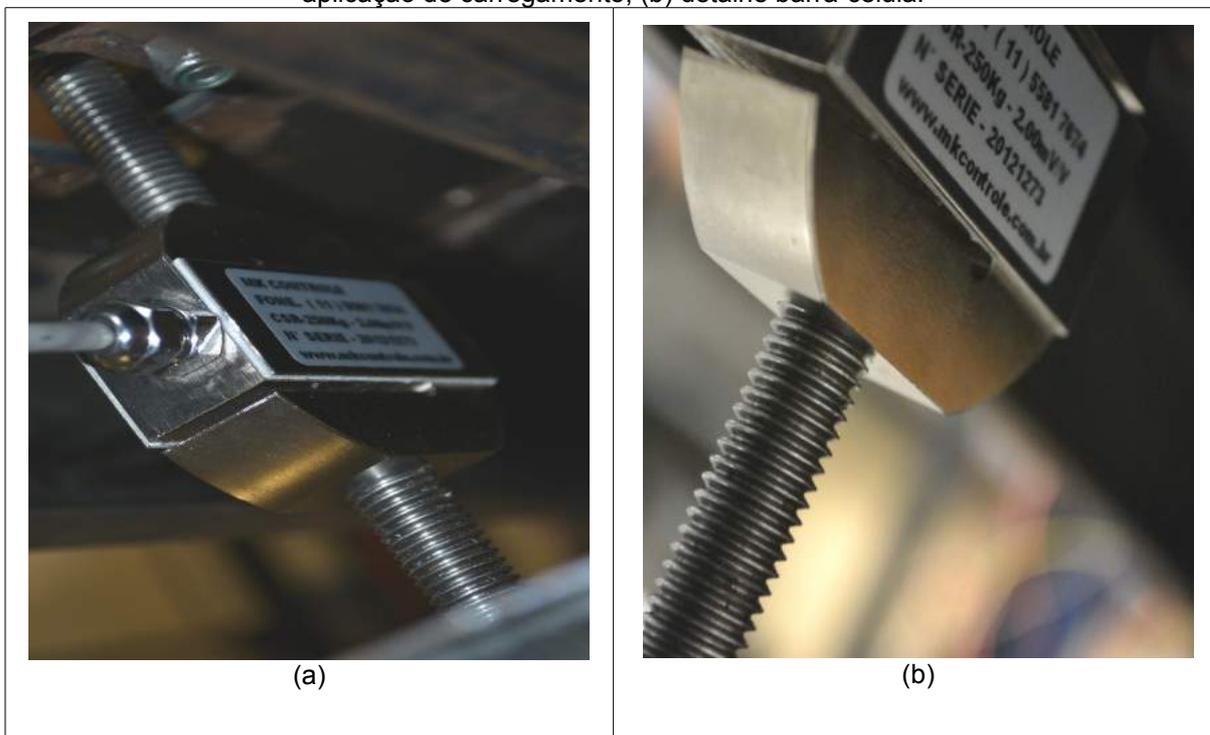
Figura 4.7 – (a) Barra para transmitir o carregamento oscilatório. (b) Detalhe da fixação com a máquina tico-tico .



Fonte: Próprio autor.

A célula de carga (Figura 4.8), com capacidade nominal de 2500N, foi utilizada para monitorar a força aplicada na telha.

Figura 4.8 – Célula de carga utilizada no experimento. (a) Detalhe da ligação com as barras de aplicação de carregamento; (b) detalhe barra-célula.



. Fonte: Próprio autor.

Depois de rosqueada na parte superior, a célula de carga recebeu na sua parte inferior, outra parte da barra rosqueada (Figura 4.9). A parte inferior da barra foi

ligada à telha utilizando porcas e arruelas, de modo que pudesse empurrar e puxar a mesma.

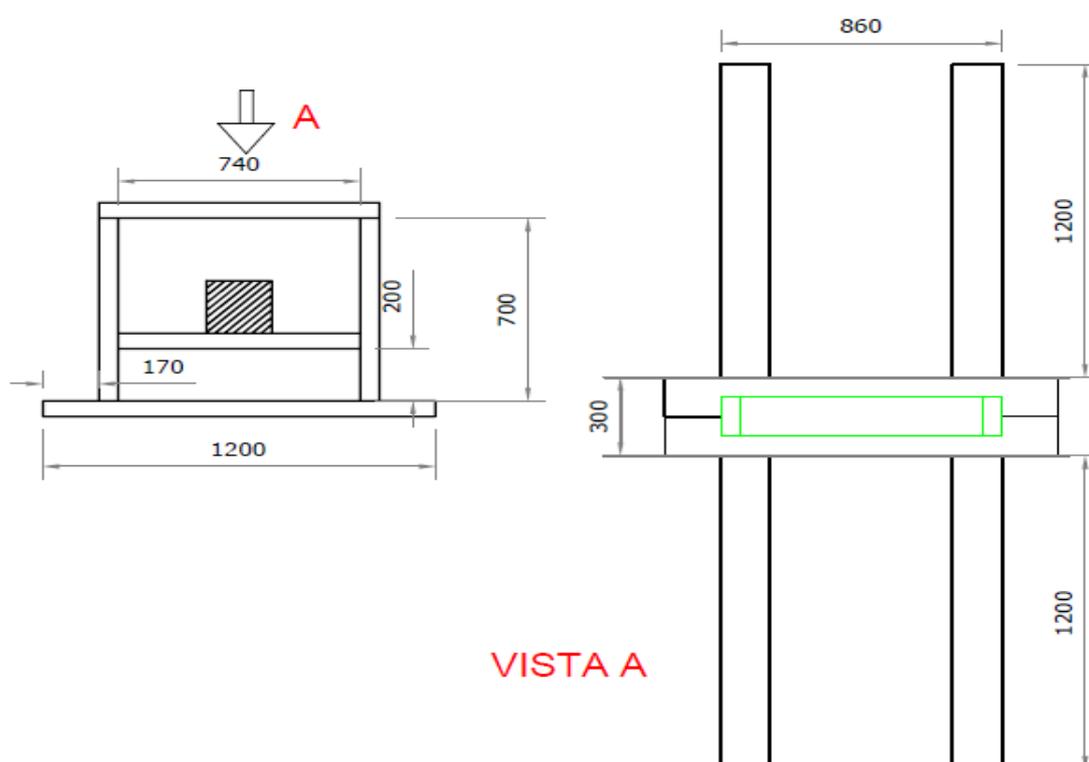
Figura 4.9 – Célula de carga sendo ligada na parte inferior à telha.



Fonte: Próprio autor.

A concepção do aparato estrutural tem como objetivo principal tornar a fixação da telha metálica na terça a mais real possível, obedecendo tanto as distâncias entre terças, como o material empregado na fixação. Assim, idealizou-se a confecção do pórtico metálico que possui as seguintes dimensões básicas (Figuras 4.10 e 4.11):

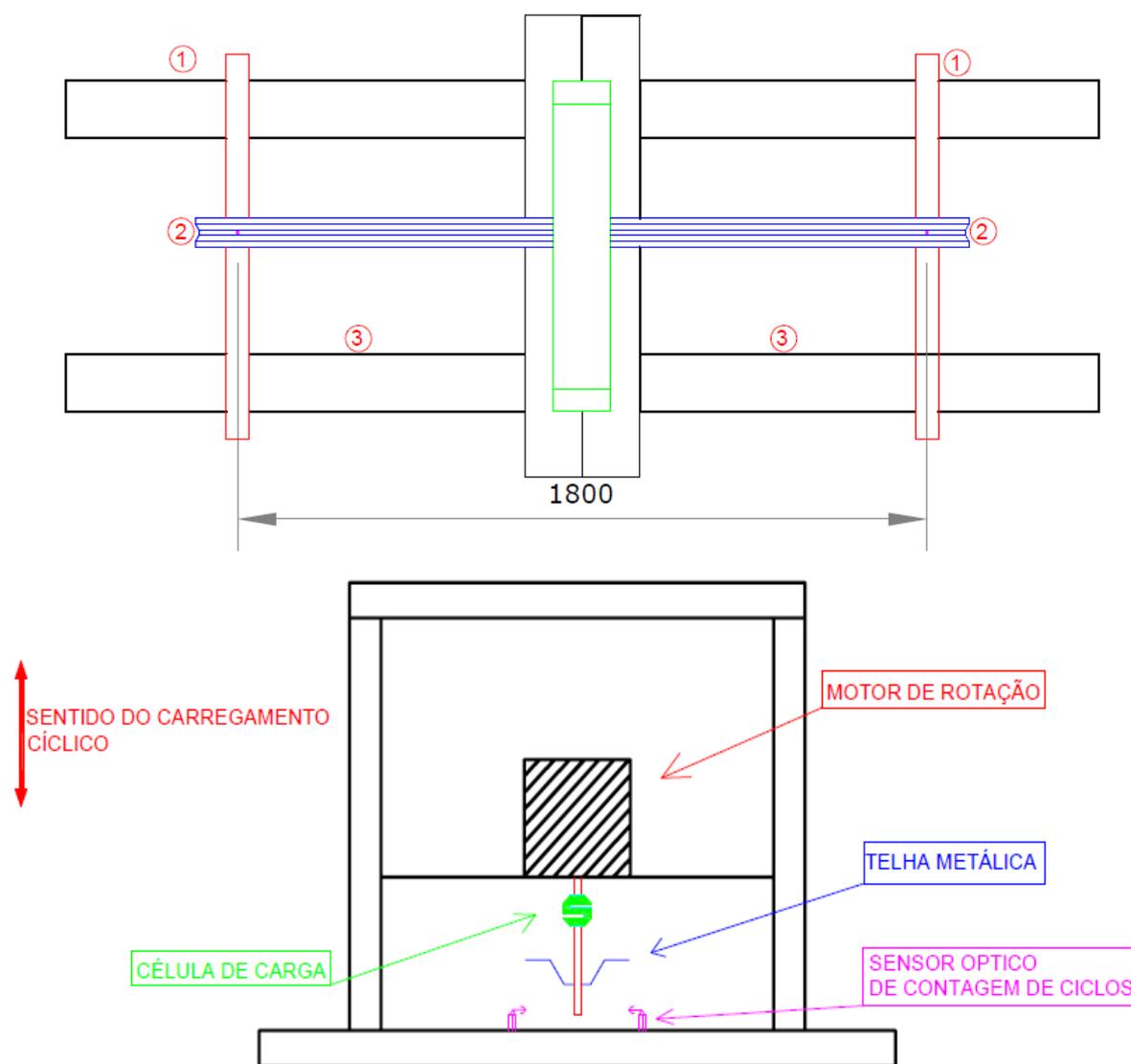
Figura 4.10 – Dimensões do aparato montado no LAMEFF



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.11 – Desenho do aparato experimental.

- ① TERÇAS
- ② FIXAÇÃO DA TELHA
- ③ APOIO DE TERÇA - COMPRIMENTO VARIÁVEL

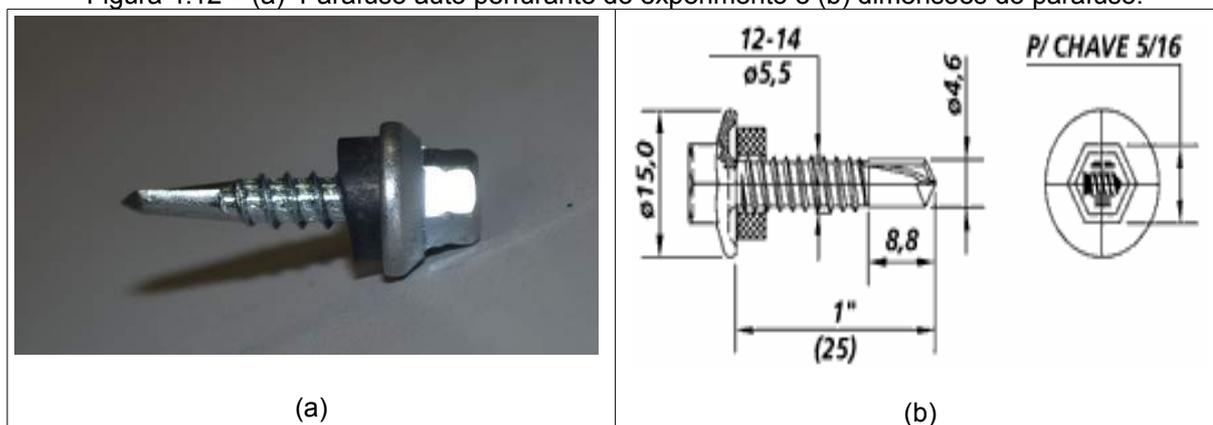


Fonte: Próprio autor.

4.2.1 PARAFUSOS

Foram escolhidos os parafusos auto-atarraxantes (PAA's) dentre os mais utilizados na construção civil brasileira na ligação terça-telha em coberturas metálicas. Os parafusos auto-atarraxantes apresentam as seguintes características: não necessitam pré-furo (auto perfurante), formador de rosca, com ponta tipo broca (auto brocante), arruela fixa à cabeça, combinada com borracha de neoprene que serve de elemento de vedação (Figura 4.12-a). O diâmetro nominal do PAA utilizado no experimento foi $d = 5,5\text{mm}$; as suas outras dimensões estão descritas na Figura 4.12b.

Figura 4.12 – (a) Parafuso auto perfurante do experimento e (b) dimensões do parafuso.



Fonte: Próprio autor.

4.2.2 EQUIPAMENTO DE FIXAÇÃO

No intuito de realizar a ligação da telha e terça para constituir o corpo-de-prova, foi utilizada uma parafusadeira (Figura 4.13). Sua principal característica é o controle de torque, pelo qual por meio de um sistema de engrenagens, a parafusadeira elimina a transferência de rotação para o operador após a fixação do PAA.

A capacidade de rotação reversa propicia a reutilização dos materiais e reparos de eventuais falhas de fixação.

Figura 4.13 – Parafusadeira para fixação dos PAA's.



Fonte: Próprio autor.

4.2.3 INSTRUMENTAÇÃO DAS TELHAS

Na região de ligação das telhas com os perfis metálicos U, ao lado do parafuso auto-atarraxante, foram montados dois extensômetros axiais elétricos de deformação, um na posição longitudinal e outro na transversal (Figura 4.14).

Figura 4.14 – Extensômetros na posição longitudinal e transversal.



Fonte: Próprio autor.

Atualmente, este é o instrumento de medição mais utilizado na maioria dos casos, pela grande precisão e sensibilidade nas medições, por ter tamanho reduzido e possibilitar leituras à distância, podendo ser aplicado em medições estáticas e dinâmicas.

Para medição de deformações na superfície da maioria dos materiais estruturais, normalmente, são utilizados extensômetros elétricos de resistência com as seguintes características:

- Resistência elétrica: extensômetros de 120Ω ;
- Constante do extensômetro (K) – neste caso utiliza-se um valor em torno de 2;

Na medição das deformações da telha, foram utilizados extensômetros elétricos de resistência uniaxial da marca Kyowa, modelo KGF-3-120-C1-11, com resistência de $120\Omega \pm 0.2\Omega$, com fator gage de $2,09 \pm 1,0\%$.

A superfície da telha foi preparada, marcada e limpa cuidadosamente para a fixação do extensômetro. Devido a telha ser uma superfície metálica, usou-se uma lixa, a fim de proporcionar uma superfície uniforme e plana, isenta de saliências e reentrâncias, como mostrado na Figura 4.15.

Figura 4.15 – Superfície da telha para receber os extensômetros.



Fonte: Próprio autor.

Para a remoção dos resíduos de preparação da superfície e suor deixado pelo contato das mãos foi feita uma limpeza na superfície, utilizando-se algodão embebido de álcool isopropílico. A sinalização ou marcação da superfície para orientar o posicionamento correto do extensômetro, foi feita com riscos ortogonais que indicam a direção e a posição correta do extensômetro.

A fixação dos extensômetros na posição correta foi feita com ajuda de fita adesiva, pois durante a aplicação não se pode tocar com as mãos nuas no mesmo. Após a marcação com a fita adesiva, aplicou-se cola adesiva, a base de cianoacrilatos (LOCTITE 496), na parte inferior de extensômetro colando-o à telha, em seguida foi colado o terminal elétrico também da Kyowa (TF-7).

Após a etapa de colagem, foram feitas as soldas dos terminais de ligação aos fios do *strain gage* e aos fios de ligação com a aquisição de dados. A solda dos fios

foi realizada com solda de estanho sem o uso de pastas comum ou ácido para facilitar a soldagem.

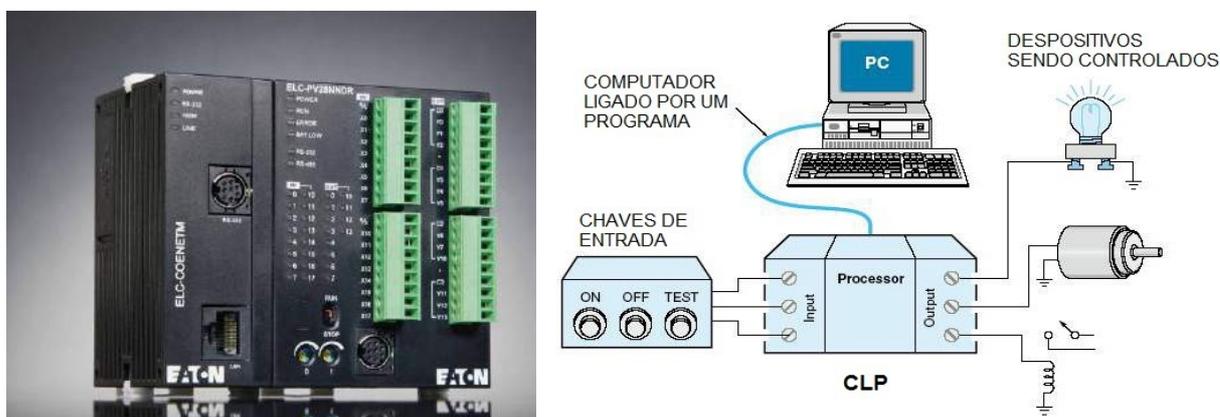
Usualmente são utilizados fios de estanho de Ø7,0 ou Ø8,0mm, e que possuam em sua composição química mais estanho em relação a chumbo. Após a soldagem dos terminais, deu-se por fim o processo de ligação do extensômetro ao equipamento de leitura.

4.2.4 EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS

4.2.4.1 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL - CLP

Um controlador lógico programável (CLP) ou controlador programável (CP), conhecido também pela sigla de expressão inglesa PLC (*Programmable logic controller*), é um computador especializado, baseado em um microprocessador (Figura 4.16a). Este equipamento é ligado ao computador, desempenha funções de controle por meio de um programa fornecido pelo fabricante, e programado pelo usuário para executar várias tarefas com diversos tipos e níveis de complexidade (Figura 4.16b). Geralmente, as famílias de CLPs são definidas pela capacidade de processamento de um determinado número de pontos de Entradas e/ou Saídas (E/S). O CLP utilizado foi o ELC -PH12NNDT da EATON.

Figura 4.16 – (a) Foto de um CLP, (b) esquema de funcionamento do CLP.



Fonte: Próprio autor.

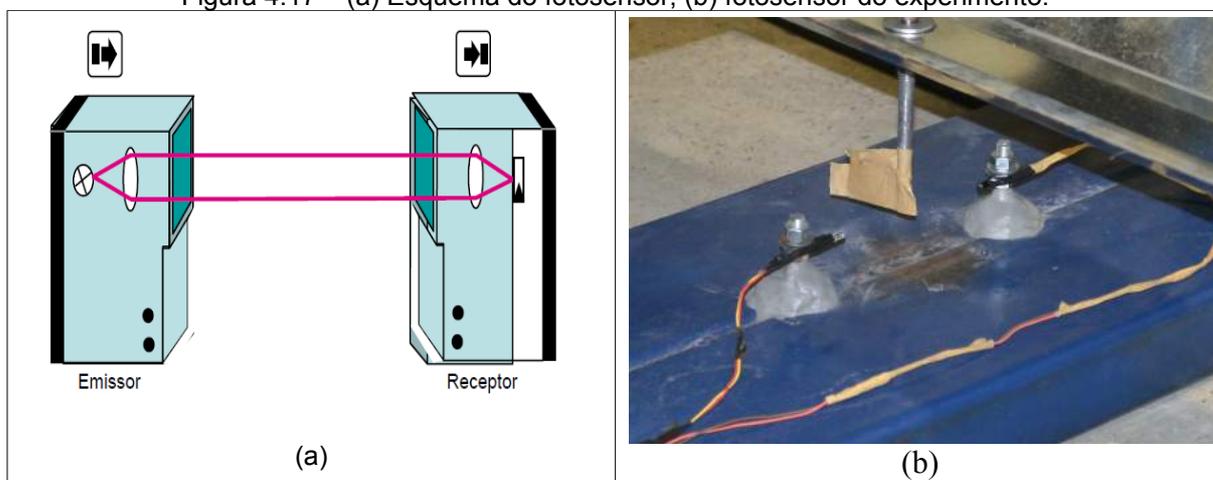
4.2.4.2 SENSOR FOTOELÉTRICO

Os sensores fotoelétricos emitem e recebem a irradiação de luz infravermelha modulada com a função de alterar seu estado de saída inicial na interrupção ou presença de acionador (Figura 4.17a).

São compostos de dois sistemas básicos: um diodo emissor de luz infravermelha e um foto transistor, receptor de luz infravermelha, que operam com frequência de emissão e recepção modulada, sem que haja interferência externa de outros tipos de fontes de luz (Figura 4.17b).

Com a movimentação da barra de transmissão de força em movimentos oscilatórios, há uma interrupção no feixe de luz, fazendo que seja contado um ciclo de carga. O movimento se repete durante o experimento, sendo computado o número de ciclos total ao final.

Figura 4.17 – (a) Esquema do fotosensor; (b) fotosensor do experimento.

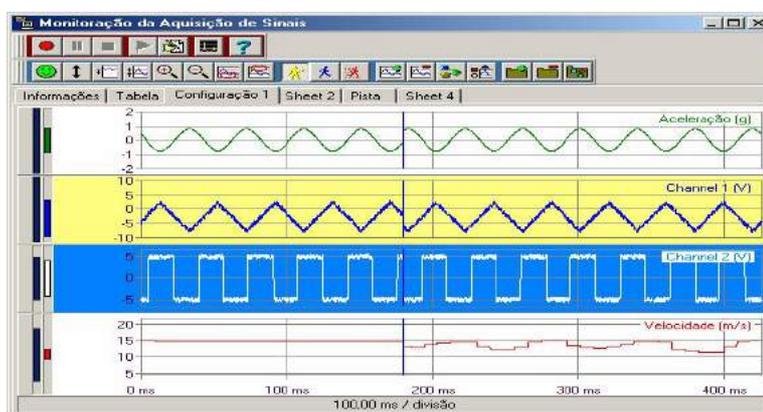


Fonte: Próprio autor.

4.2.4.3 AQUISIÇÃO DE DADOS

Os sistemas de aquisição de dados são ferramentas poderosas na realização de ensaios de propriedades físicas de materiais, pois permitem realizar leituras automaticamente e arquivá-los, isso proporciona maior confiabilidade dos dados, uma vez que a leitura manual é propícia a erros. Permite também um acompanhamento do ensaio através de gráficos à medida que as leituras são realizadas. As leituras são realizadas por meio de um programa específico de aquisição (Figura 4.18).

Figura 4.18 – Programa de aquisição de dados.



Fonte: Lynx

Foi utilizado um Sistema de Aquisição de Dados (SAD) ADS 2000, da marca Lynx, com 16 canais independentes, ligado a um computador. O sistema é composto por uma placa condicionadora A1-2161 e uma placa controladora AC2122 (Figura 4.19).

Figura 4.19 – Aparelho de aquisição de dados.



Fonte: Próprio autor.

4.2.5 TÉCNICA DE CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS

A utilização da técnica de correlação de imagens necessita de uma preparação da superfície do corpo de prova, pois há a necessidade de existir um padrão bem estabelecido e não totalmente uniforme.

A maneira mais comum para criar estes padrões é adotando-se a aplicação de uma tinta por spray (Figura 4.20a) na superfície a ser analisada (Figura 4.20b), de modo a gerar uma textura, ou seja, um campo onde existirá uma espécie de malha.

Figura 4.20 – (a) Spray para pintura da telha; (b) telha pintada com contraste.



Fonte: Próprio autor

Existem certos cuidados que devem ser tomados para a aplicação de tal jato de tinta, pois o controle do tamanho das gotas de tinta é um parâmetro importante para a qualidade dos resultados obtidos pela análise utilizando a técnica de correlação de imagens. É recomendado que se pinte a superfície de cor branca e somente após a secagem total dessa primeira pintura seja lançada a pintura de cor preta. O spray preto deve ser aplicado aos poucos, de forma descontínua, para que se obtenha uma área pintada de forma não uniforme.

A câmera digital utilizada foi tipo semi-profissional (NIKON-D3100) com uma grande resolução para permitir um melhor aproveitamento da técnica CDI (Figura 4.21). Ela foi fixada a um tripé que permitiu o posicionamento perpendicular à superfície que foi analisada.

Foi utilizado um programa no computador ligado à câmera, que controlava os intervalos de tempo de captura das fotos, pré-definidos pelo usuário no programa.

Figura 4.21 – Câmera usada no ensaio.



Fonte: Próprio autor.

4.3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

O ponto inicial do experimento foi o tratamento da superfície das telhas. Elas foram pintadas com duas cores de spray, para assim apresentarem uma região de pontos distribuídos de forma aleatória na superfície e logo em seguida os fios de ligação dos extensômetros foram soldados na telha. Esta foi furada no seu centro, com uma broca de 13mm, para que fosse possível a passagem da barra rosqueada que iria realizar os movimentos oscilatórios na telha (Figura 4.22).

Figura 4.22 – Passagem da barra rosqueada pela telha.



Fonte: Próprio autor.

Depois dessa sequência, a telha foi fixada com dois parafusos auto perfurantes, sendo montado um parafuso em cada extremidade. Após a fixação da telha foi feita a ligação dos sensores de captação de deformação, de força e de contagem do número de ciclos.

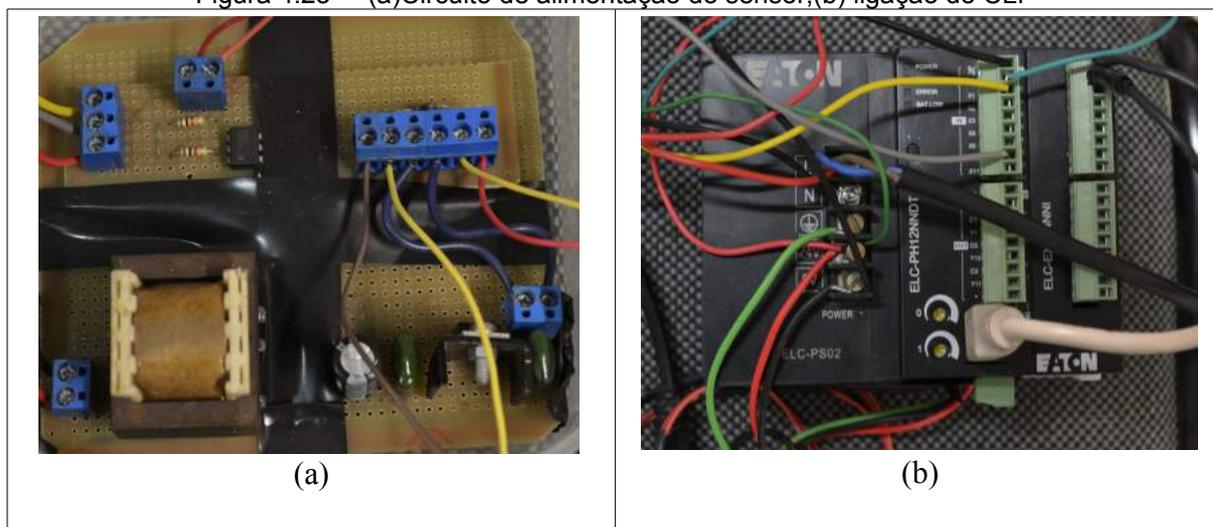
A máquina oscilatória foi ligada ao CLP com o intuito de se estabelecer uma corrente elétrica de pico com tempo pré-definido, para vencer a rigidez da telha, que muitas vezes não reagia devido ao fraco carregamento aplicado.

Um *dimer*, que é um dispositivo utilizado para variar a intensidade de corrente elétrica, foi usado para que se pudesse estabelecer uma força padrão para os ensaios.

O dispositivo também foi ligado ao CLP. Ao ser ligada, a máquina tico-tico era alimentada pela corrente elétrica local durante 0,5s, tempo programado no programa do CLP. Após esse tempo passava a ser a corrente proveniente do *dimer*.

O sensor fotoelétrico foi instalado na região abaixo da telha, e é alimentado por um circuito elétrico de 5 volts (Figura 4.23a), onde teve como função transmitir para o CLP (Figura 4.23b), quantas vezes o feixe óptico foi interrompido, realizando com isso a contagem do número de ciclos do experimento. A interrupção do sensor ocorreu pela descida da barra rosqueada que em sua extremidade era fixada uma fita adesiva (Figura 4.22).

Figura 4.23 – (a)Circuito de alimentação do sensor;(b) ligação do CLP



Fonte: Próprio autor.

Portanto, o CLP usado no experimento tem as seguintes funções:

- Receber informações de pulso do fotosensor e mostrar em seu programa o número de ciclos de carregamento que estavam sendo aplicados na telha e a frequência do carregamento;
- Permitir a passagem de toda a corrente elétrica para a máquina oscilatória durante 0,5s, fazendo com que a máquina tenha um pico de tensão capaz de vencer a resistência da telha e posteriormente usar a corrente do *dimer*.

O CLP e o circuito de alimentação do fotosensor foram colocados em uma central de comandos (Figura 4.24), com um botão de *reset* da contagem de ciclos e uma chave de liga/desliga do equipamento oscilatório.

Figura 4.24 – Central de comandos do experimento.



Fonte: Próprio autor.

Os extensômetros foram ligados em $\frac{1}{4}$ de ponte e a célula de carga em ponte completa, ambos ligados no sistema de aquisição de dados ADS2000, onde o SAD possui um software (AQDADOS) de controle dos dados captados.

5 ANÁLISE COMPUTACIONAL

Neste capítulo apresenta-se de forma sucinta a aplicação do programa de elementos finitos *ABAQUS* versão 6.10.1(2010). Para o desenvolvimento prático do tema proposto foi necessário desenvolver um modelo geométrico 3D no programa de CAD Solid Works e exportar em arquivo com extensão *iges* para leitura do *ABAQUS*.

No *ABAQUS* foi possível aplicar as condições de contorno desejadas, bem como as mesmas propriedades do material ensaiado em laboratório. A seguir é apresentada a modelagem da telha metálica trapezoidal estudada.

5.1 MATERIAL

O aço estrutural de resistência ao escoamento de 250 MPa e resistência à ruptura de 400 MPa foi escolhido para este estudo por ser, ainda, muito usado no Brasil. Foram consideradas suas características elasto-plásticas com: Módulo de elasticidade do material, $E = 205000$ Mpa e coeficiente de Poisson, $\nu = 0,3$ levantados experimentalmente.

5.2 ELEMENTO FINITO ADOTADO

A geometria do modelo foi feita baseada na telha do experimento. A discretização do modelo físico da telha metálica realizada com elementos finitos considerando uma malha de elementos tipo S4R.

Segundo Budianky and Sanders, 1963, dentre os elementos disponíveis, o S4R é conhecido por sua robustez em análises não lineares, associado a um baixo custo computacional. É um elemento quadrilateral de casca com 4 nós, com 6 graus de liberdade por nó (3 translações e 3 rotações) e dupla curvatura. Emprega interpolação bilinear para as variáveis de campo e integração reduzida com um único ponto.

Pode ser aplicado a problemas com grandes deformações de membrana e grandes rotações onde se considera a variação de espessura com a deformação e a

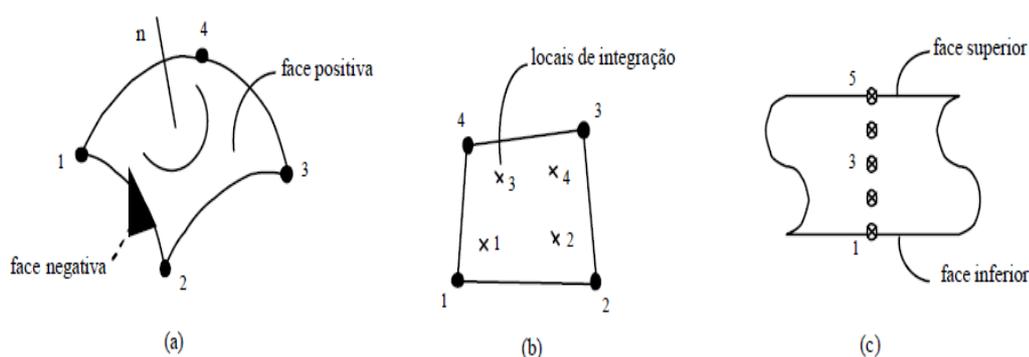
deformação de cisalhamento transversal. As deformações de flexão derivam-se da teoria de cascas de Koiter-Sanders.

Logo, verifica-se que o elemento S4 é bastante adequado para a análise não-linear, material e geometricamente, de placas e seções de aço, uma vez que ele permite obter soluções com grande precisão para problemas onde são esperadas flexões no plano.

É um elemento de casca de curvatura dupla, de quatro nós com interpolação linear, de integração completa e de aplicação geral, com deformação finita de membrana e que pode ser usado tanto para cascas espessas como para cascas finas.

Na figura 5.1, tem-se uma representação esquemática do elemento onde pode ser observada sua geometria, com a convenção de numeração dos nós para a definição da normal positiva do elemento (figura 5.1-a), os locais de integração no elemento (figura 5.1-b) e os pontos da seção ao longo de sua espessura em cada um dos locais de integração (figura 5.1-c).

Figura 5.1 – Representação do Elemento de casca S4R. Mostrando as faces do elemento (a), locais de integração (b) e os pontos de integração ao longo da espessura (c).



Fonte: Abaqus, 2010

O comportamento de membrana é descrito com a formulação apropriada das deformações, com a consideração do cisalhamento transversal constante no elemento não sendo sensível à distorção do elemento e consegue evitar o problema da retenção, (situação em que o elemento se torna muito rígido quando sua espessura fica muito fina).

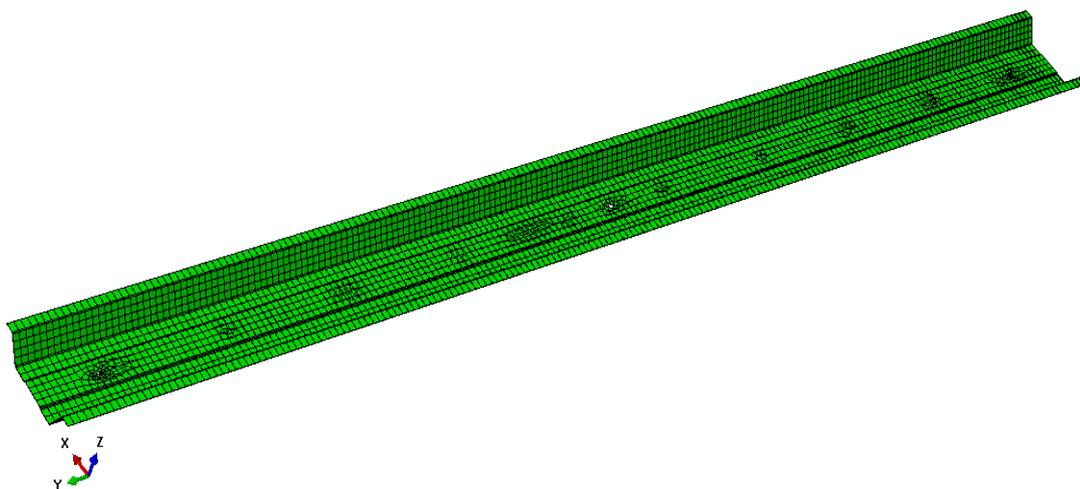
Adicionalmente, não necessita de nenhum controle de *hourglass*, uma vez que não apresenta nenhum modo de energia zero ou espúrio, nem na resposta de membrana nem de flexão do elemento. Por ser um elemento com 6 graus de liberdade é feito o controle do grau de liberdade de rotação em relação à normal (*drill*), da forma explicada acima.

5.3 MODELAGEM DAS TELHAS

O problema a ser estudado se trata de uma telha trapezoidal com um desnível em sua região central. Considera-se um modelo simplificado de grande escala, pois é representada através de uma faixa de toda uma folha de telha, mas foi modelada considerando os mesmos padrões das construções pelo país.

A região de fixação foi considerada na parte central, o que é constantemente observado nas obras metálicas, que muitas vezes não seguem um padrão de norma. As dimensões foram as mesmas de uma folha desse tipo de telha. Na figura 5.2 podemos observar a telha modelada.

Figura 5.2 – Discretização em malha da telha com 5600 elementos.



Fonte: Abaqus,2010.

A aplicação das cargas foi efetuada com a utilização do gráfico dos carregamentos aplicados no ensaio experimental. O ABAQUS possui uma

ferramenta de tabulação de arquivos do excel, onde lê os dados armazenados em ordem de colunas.

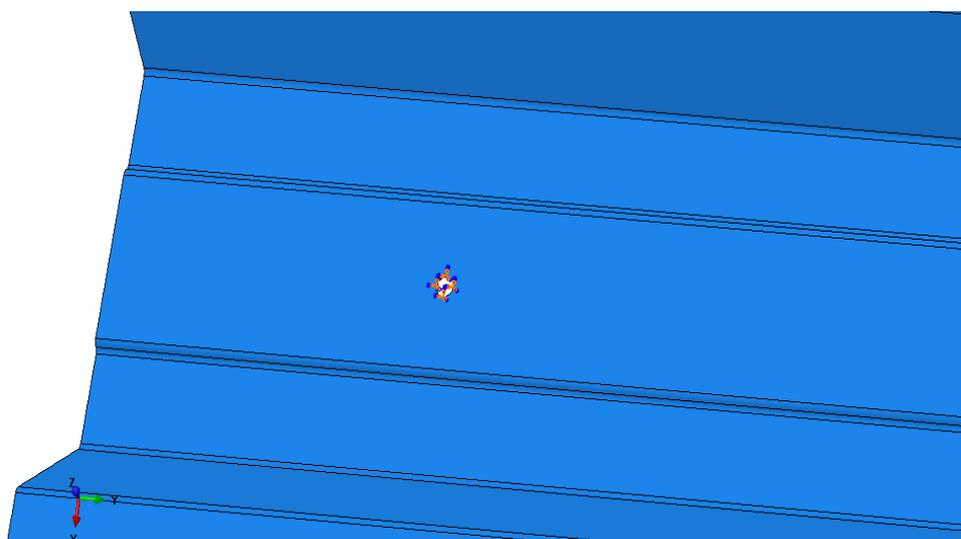
Assim, para uma tabela do tipo tempo x carregamento em duas colunas de um arquivo do excel, salvo na pasta *temp*, pode ser lido como o carregamento ao longo daquele tempo estipulado no arquivo, facilitando bastante a inclusão de dados externos no programa.

O carregamento aplicado na telha no modelo experimental foi salvo e inserido no modelo computacional, respeitando apenas a ordem das colunas tempo-carga e das unidades de tempo (s) e força (N). A magnitude desse carregamento foi baseada na norma NBR6123-1988, que forneceu parâmetros necessários para ser calculada uma força média por unidade de área que fosse possível aplicar tanto na telha do ensaio experimental, como no modelo computacional.

Uma outra condição de contorno foi a fixação dos parafusos. O ABAQUS possui uma ferramenta que aplica em determinados pontos que fazem fronteira entre duas superfícies, conectores de vários tipos, entre eles os parafusos.

Como o modelo da telha é simplificado, não utilizamos a terço como superfície de contato e de transferência de momento. A telha foi fixada na geometria do orifício do parafuso nas três direções (x,y,z), inclusive as rotações (Figura 5.3).

Figura 5.3 – Engaste da telha.



Fonte: Próprio autor.

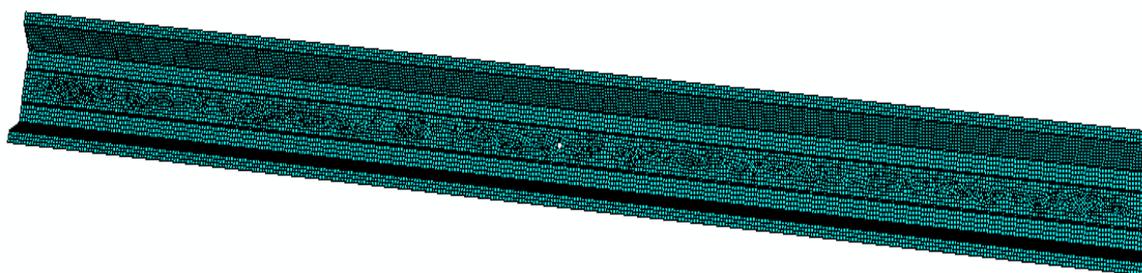
5.4 ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DA MALHA

O primeiro passo ao se trabalhar com um novo modelo é determinar a malha a ser usada. Essa escolha deve levar em conta uma relação de custo-benefício entre o tempo computacional e os erros obtidos. O ABAQUS possui dois tipos de elementos, os lineares e os quadráticos. Este segundo tipo fornece, em vários casos, soluções mais precisas com uma quantidade menor de elementos, sua desvantagem consiste no consumo mais elevado de memória RAM quando comparado aos elementos do tipo linear.

Baseando-se nas vantagens e desvantagens de cada tipo de elemento foram estipuladas malhas com 5500, 10000 e 20000 elementos em toda a telha, conforme ilustrado na Figura 5.4.

Esses elementos foram modelados tanto do tipo quadráticos quanto do tipo lineares, a fim de determinar qual ofereceria a melhor relação entre precisão e custo computacional. Como foi dito antes, a malha mais eficiente para o modelo é a quadrática com 20000 elementos, porque ela apresenta uma precisão superior à malha linear, mas com um custo computacional muito superior.

Figura 5.4 – Representação da malha da telha analisada.



Fonte: Próprio autor.

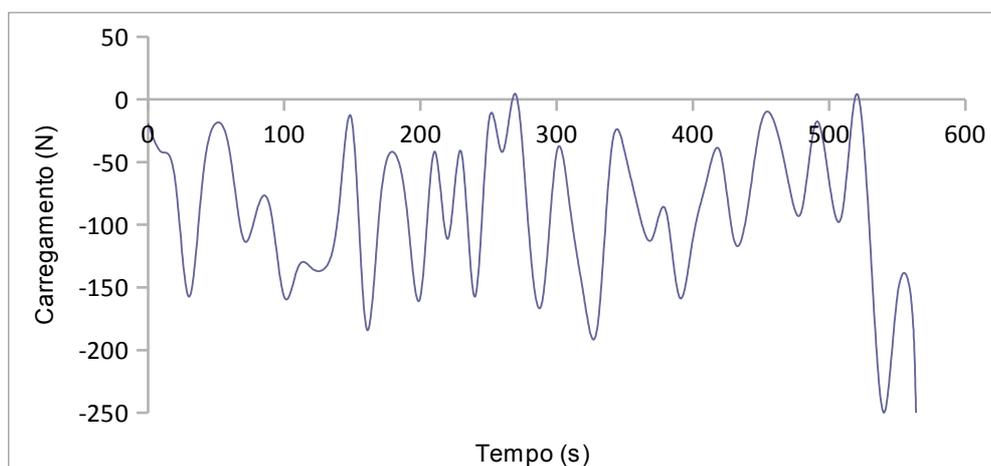
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No capítulo 4 foram apresentados os ensaios experimentais realizados no LAMEFF com as telhas metálicas. No capítulo 5 foram mostradas as metodologias empregadas para a utilização do modelo numérico usando o programa ABAQUS. Neste capítulo, serão apresentados os resultados mais importantes obtidos nesta pesquisa das análises das telhas submetidas aos carregamentos cíclicos.

6.1 RESULTADOS DA DEGRADAÇÃO FÍSICA DAS TELHAS

As telhas foram submetidas a carregamentos cíclicos realizados pelo equipamento oscilatório projetada neste estudo. A amplitude da força do carregamento foi variada mas com sua magnitude regulada através do *dimer* que estava ligado ao CLP. Devido à perda de potência da máquina, o carregamento não se manteve constante, alcançando a amplitude máxima esperada, mas depois de um determinado tempo sofria oscilação. Essa oscilação já era esperada em decorrência da perda térmica do equipamento, fazendo que no decorrer do ensaio o valor do carregamento sofresse diminuição e aumento de amplitude. Avaliando o gráfico (Figura 6.1), observou-se que o valor do carregamento ao longo do tempo ficou bastante variado, representando a força do vento.

Figura 6.1 - Gráfico força do carregamento (N) x tempo (s).



Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos para os dois tipos de telhas, mesmo sendo de materiais e espessuras diferentes, foram bem próximos, sendo esperado devido o revestimento apresentar apenas característica de proteção corrosiva, não interferindo nas características mecânicas das telhas.

Apresentam-se, dessa forma a média dos resultados obtidos da telha tipo galvanizada. A Tabela 6.1 mostra um resumo das características dos ensaios para os tipos de telhas.

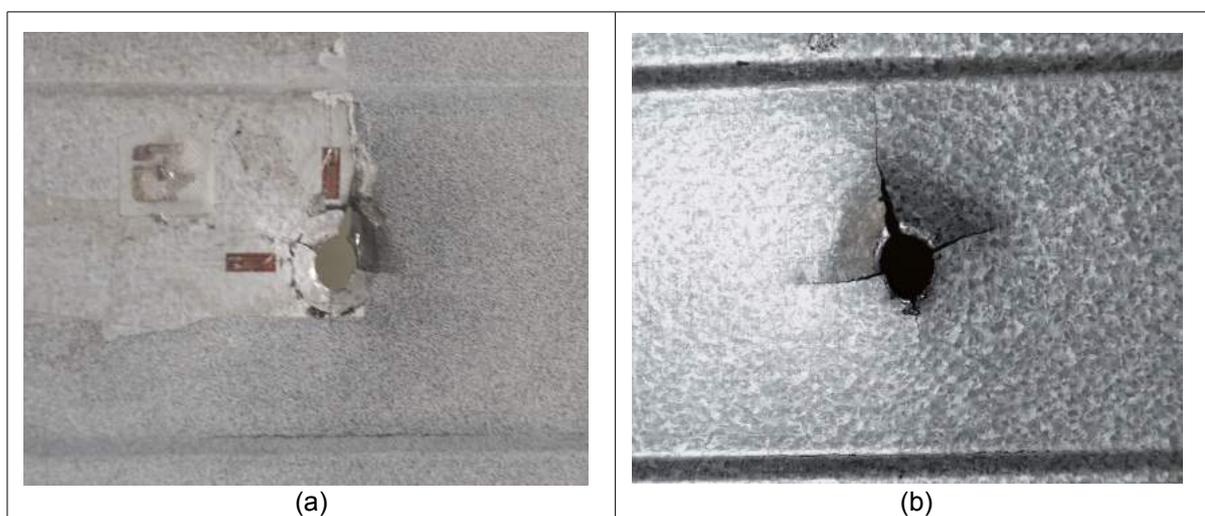
Tabela 6.1 – Características dos ensaios das telhas

Tipo	Espessura (mm)	Ciclos	Tempo (min)	Frequência (Hz)	Força Média(N)
Galvanizadas	0.5	12934	9,4	22,9	92
Cincaalum	0.5	10322	10,9	15,8	109

O número de ciclos apresentado na tabela acima, tem como referência, o momento em que era visível algum tipo de falha (trinca) na telha, sendo observados sempre os locais tidos como críticos, como a parte central da telha e a região ao redor do parafuso de fixação telha-terça.

Lembrando que a pesquisa teve como objetivo o estudo do dano na telha, que se caracteriza pela iminência de aparecimento de trincas. Em geral, as telhas apresentavam sempre as mesmas falhas, nos mesmos locais (Figura 6.2).

Figura 6.2 – Rasgo na ligação telha-terça em (a) vista superior do furo e em (b) a inferior.

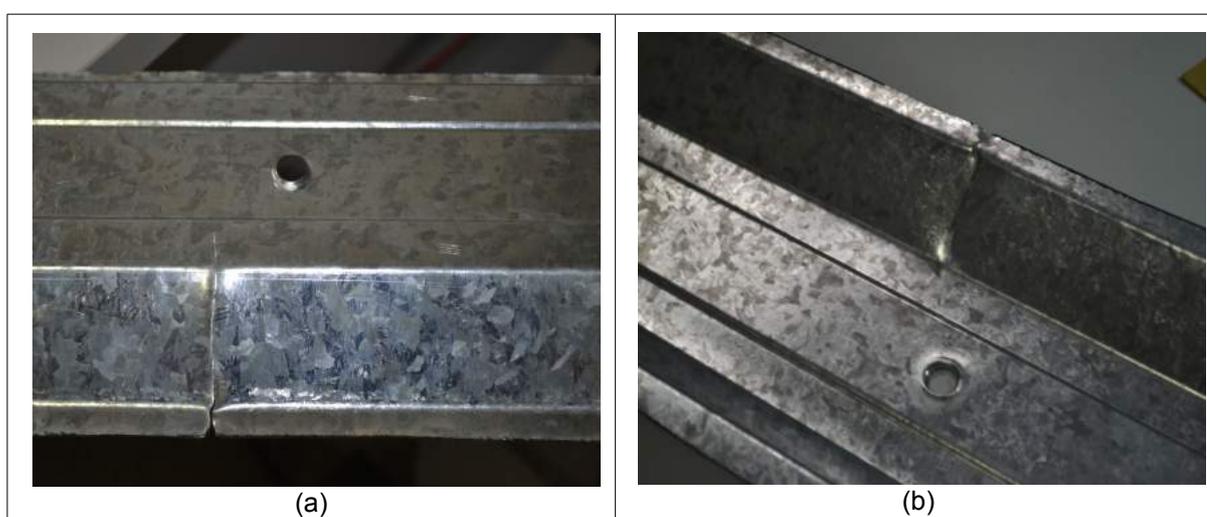


Fonte: Próprio autor

Com o aparecimento das primeiras trincas, momento em que foi observado o número máximo de ciclos do experimento, a telha ainda apresentou resistência suficiente para não se soltar dos parafusos na ligação das terças.

Após a aplicação do mesmo carregamento, por mais um período, foi observada uma perda considerada de rigidez, ocasionando assim o rasgo da telha na proximidade do ponto de aplicação de carga ou na ligação do parafuso (Figura 6.3).

Figura 6.3 – Rasgo no centro da telha.



Fonte: Próprio autor.

6.2 RESULTADOS COM CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS

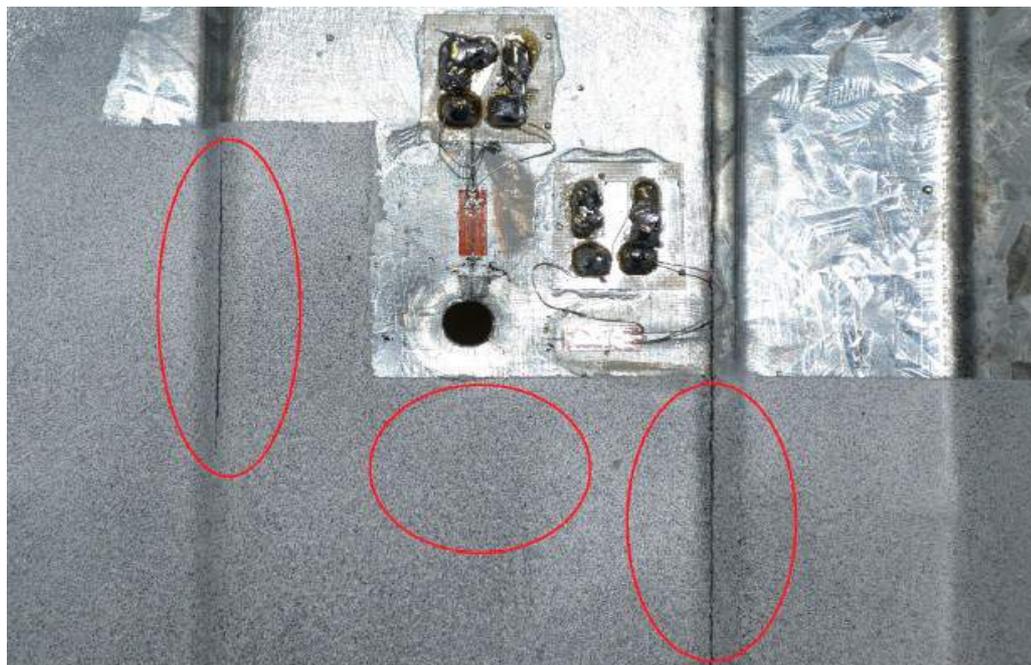
Com a utilização do programa CorreliQ4^{LMT} (Hild e Roux,2006), foram avaliados os deslocamentos nos sentidos x e y. A captura de imagens das telhas foi feita na região de ligação telha-terça. Nos experimentos ficaram visíveis, como apresentado no item anterior, que as trincas localizaram-se na ligação do parafuso e na região próxima à ligação, que é chamada de canal da telha.

A região de fixação do parafuso que sofreu fissuração, como mostrada na Figura 6.2, não pode ser analisada pela técnica CDI visto que o início das fissuras encontrava-se abaixo da camada de neoprene, não podendo ser feita a captura de imagens.

Logo o estudo da técnica foi realizada em duas regiões próximas ao parafuso. Uma na região central da telha e outra nas laterais próximas ao parafuso (Figura

6.4). Essa última, é a região onde apareceram mais fissuras. Essas duas regiões serviram de padrão para análise de tensões e deformações e para critério de falha e integridade da ligação telha-terça.

Figura 6.4 – Regiões de análise da CDI.



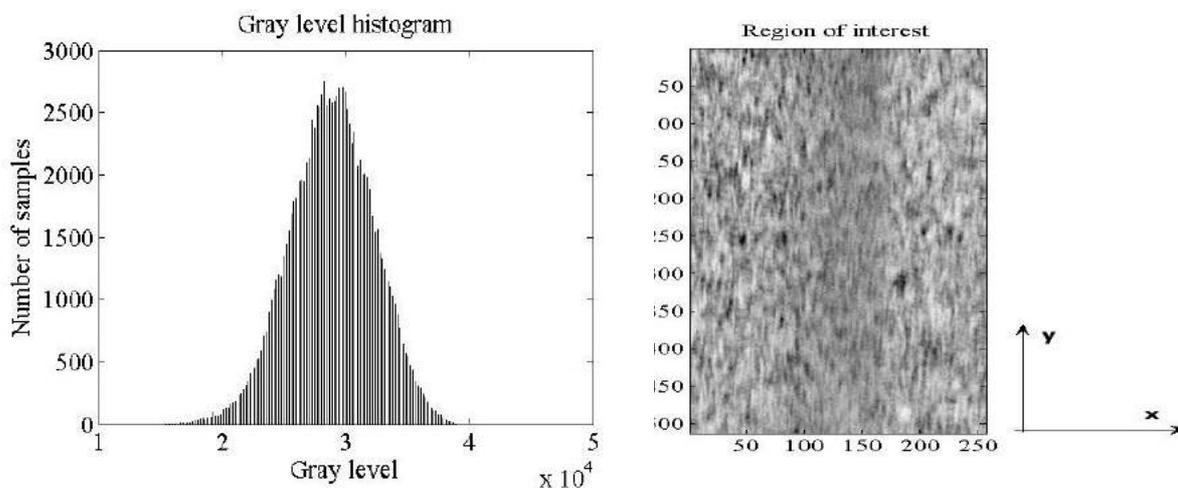
Fonte: Próprio autor

6.2.1 RESULTADO DA PARTE LATERAL DA TELHA.

Inicialmente foi realizada a captura de imagens das regiões laterais sendo estas analisadas a nível de qualidade de imagem, pois um dos principais parâmetros para uma boa análise e qualidade da medição do campo de deslocamento pela técnica da correlação de imagem baseia-se principalmente na qualidade da textura das imagens em análise.

Portanto, antes da apresentação dos resultados obtidos com a correlação de imagens, foi realizada uma análise das características das texturas obtidas nos ensaios deste trabalho é apresentada. O primeiro item a ser apresentado usando a CDI foi o histograma (Figura 6.5).

Figura 6.5 – Histograma da textura da telha.



Fonte: Próprio autor.

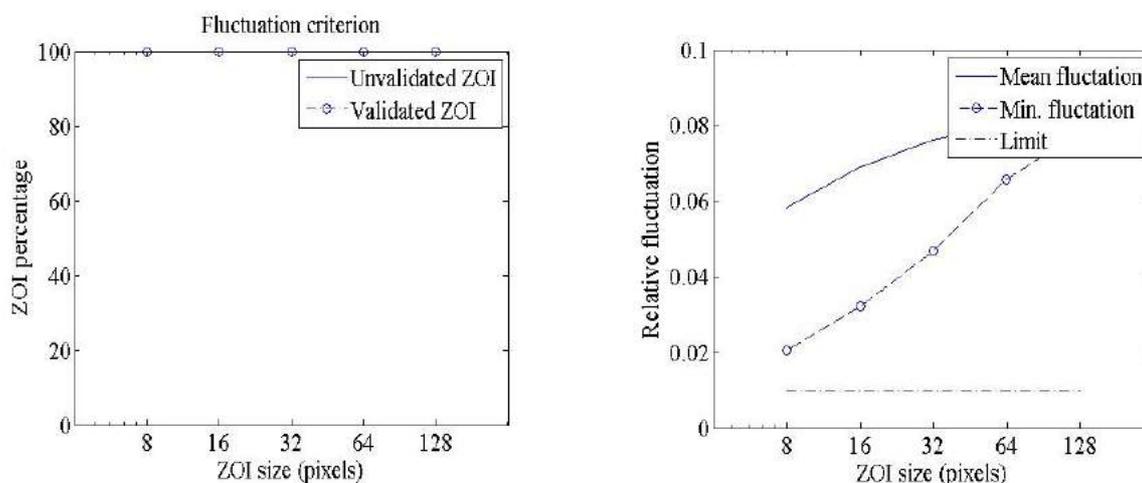
O histograma mostra a qualidade da imagem, revelando se há problemas de saturação, no entanto, tal caracterização global da imagem apresenta interesse limitado, sendo muito útil na fase de aquisição de imagens para definir o tempo de exposição e/ou abertura do sensor da câmera.

No código fonte do Correli, as imagens analisadas são divididas em elementos, em uma malha, e estes são caracterizados pelo desvio padrão do nível de cinza. A média desses valores de todos os elementos de um dado tamanho, normalizados pelo nível de cinza máximo presente na imagem, define a variação do nível de cinza da textura, sendo esta uma propriedade que apresenta maior importância na caracterização dos padrões de uma textura do que na caracterização da qualidade de aquisição das imagens. A importância da análise dessa propriedade é avaliar se as sub-imagens apresentam a informação suficiente que permitam a utilização adequada do algoritmo de correlação.

Para escolha do tamanho do elemento, um limite prático para o valor da variação (flutuação) foi de no mínimo 1% da gama dinâmica da câmera, isto é, para valores inferiores a este limite, não existem gradientes suficientes para obter os deslocamentos.

Na figura 6.6 é apresentada a porcentagem de elementos (para cada tamanho) que atendem esse limite. Observa-se até para a escolha de elementos com tamanho de 8 pixels, que é uma imagem de qualidade inferior, a imagem não apresentaria elementos que não atenderiam a este critério.

Figura 6.6 – Critério de Flutuação.

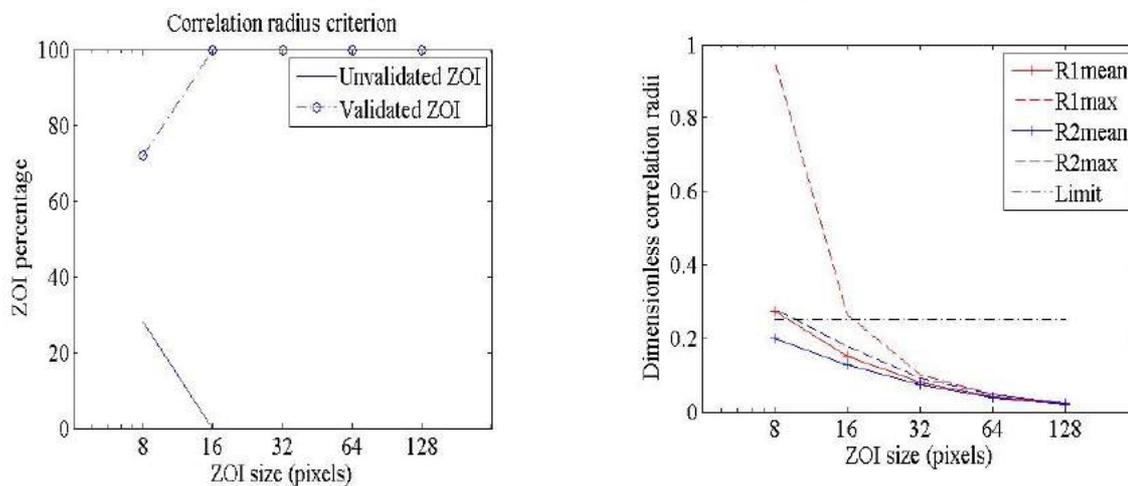


Fonte: Próprio autor.

O raio de correlação da textura da imagem é outro critério importante, que é calculado a partir de uma interpolação parabólica da função de auto-correlação na origem. O inverso dos dois autovalores da curvatura fornece uma estimativa dos dois raios de correlação (Figura 6.7), quando tomada a média de todos os elementos de um dado tamanho.

Neste critério, um limite prático para o valor do raio de correlação na escolha do tamanho do elemento é de no máximo 25% do tamanho do elemento. Acima deste valor, acredita-se que as medições não são seguras. Observa-se que apenas para a escolha de elementos com tamanho de 8 pixels, a imagem apresentaria cerca de 30% dos elementos que não atendem a este critério.

Figura 6.7 – Critério do raio de correlação.

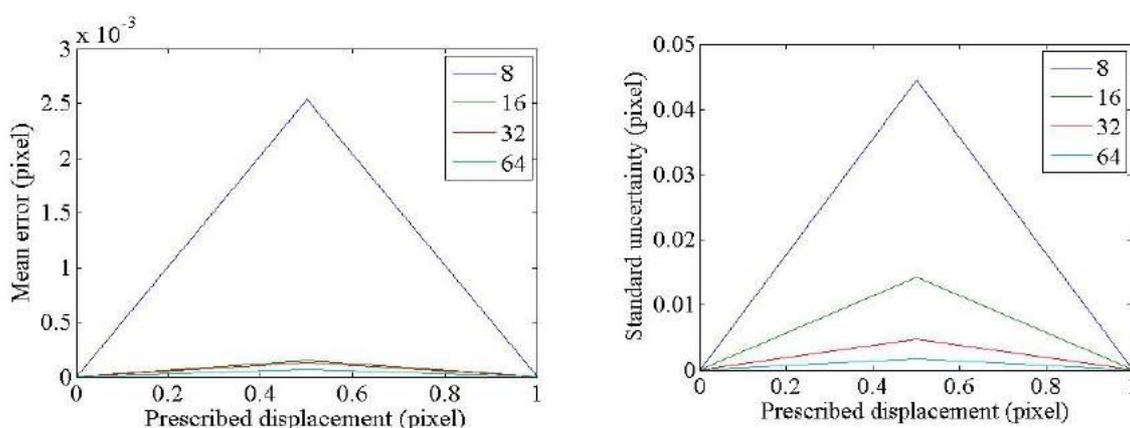


Fonte: Próprio autor.

No presente trabalho foram utilizados os campos de deslocamento obtidos pela CDI para avaliações qualitativas, empregando o programa Correli, essa avaliação foi feita utilizando a imagem de referência, aplicando o carregamento cíclico, gerando imagens derivadas através dos campos de deslocamentos e avaliando a magnitude das deformações.

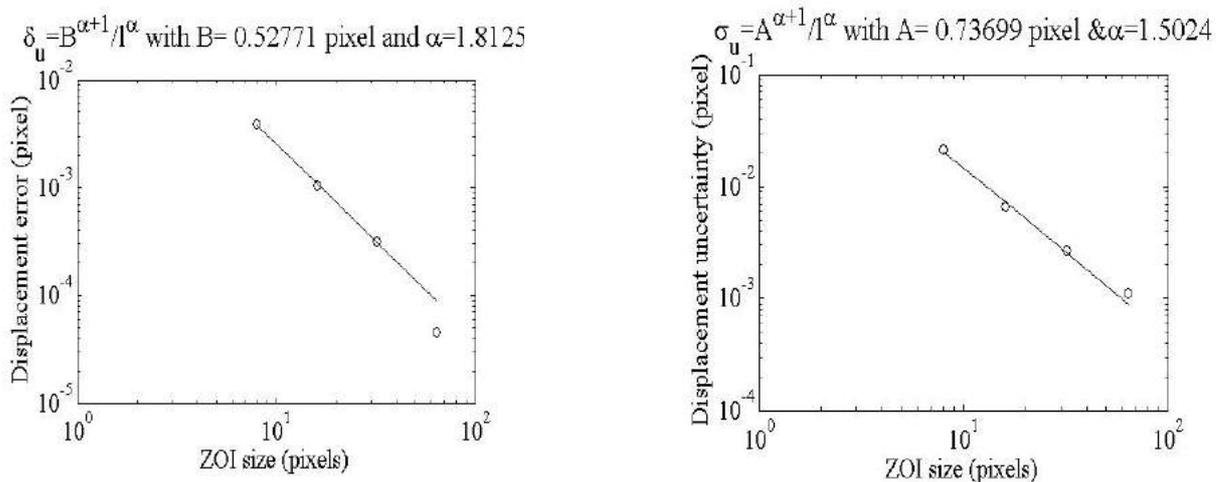
Aplicou-se o algoritmo de correlação sobre essas imagens, obtendo-se os campos de deslocamentos estimados. Conhecidos os campos de deslocamentos, estimados e prescritos, quatro diferentes gráficos são apresentados (Figura 6.8 e Figura 6.9): média e desvio padrão dos erros dos deslocamentos estimados e a média e desvio padrão dos erros dos deslocamentos em função do tamanho do elemento. O tamanho do elemento adotado foi de 16 pixels, já que este é o valor mínimo necessário para atender a todos os critérios de qualidade anteriormente mencionados.

Figura 6.8 – Média e desvio padrão dos erros dos deslocamentos.



Fonte: Próprio autor.

Figura 6.9 – Média e desvio padrão dos erros dos deslocamentos em função do tamanho do elemento



Fonte: Próprio autor.

A análise da parte lateral da telha, que trincou no final do ensaio, será mostrada em seguida em uma sequência de imagens. Em consequência do ensaio ser dinâmico de alta frequência, e a parte lateral da telha se encontrar sem apoios, obteve carregamento de tração e compressão sendo aplicados sistematicamente, dependendo apenas da posição do motor de rotação.

Devido a presença de um desnível entre a parte central e lateral, esta última muito solicitada, ocasionando um acúmulo demasiado de tensão. Vale ressaltar que essa irregularidade tem o objetivo de aumentar a resistência da telha.

Uma das grandes dificuldades na aplicação da técnica CDI foi na aquisição das fotos para o ensaio dinâmico. Neste caso, seria necessário a utilização de duas câmeras para aquisição de imagens dos deslocamentos nas três dimensões (BESNARD, 2010). A técnica utilizada em ensaios quase-estáticos, ensaios de tração ou compressão onde a velocidade de aplicação da carga era muito pequena, assim, a aquisição das imagens era sempre facilitada, mesmo com câmeras não profissionais.

Durante o experimento, nem todas as imagens capturadas ficaram nítidas para uma boa análise, devido a grande dificuldade de focalizar os mesmos pontos, por causa da alta frequência do ensaio. As imagens foram capturadas em intervalos efetivos de 5,37 segundos, mesmo sendo programadas para uma velocidade maior, mas não houve resposta efetiva do programa de captura, pois a velocidade de gravação das imagens na câmera ocasiona um pequeno atraso na sincronização.

A análise não seguiu a sequência de captura de todas as fotos, sendo escolhidas as mais nítidas do ensaio, por esse motivo as bandas de deformação apresentadas em seguida, não seguirão uma forma contínua, pois em determinados momentos, a imagem posterior na sequência cronológica poderia ficar desfocada, impossibilitando a análise.

Ao iniciar a análise com o auxílio do programa Correli, foi demarcada uma região de interesse (ROI) fixa, posicionada na imagem de referência. Durante o ensaio dinâmico há uma grande vibração dessa região, onde grandes deslocamentos podem ocorrer, logo muitos pontos que antes estavam dentro dessa região, não estarão mais no decorrer do ensaio, dificultando a análise.

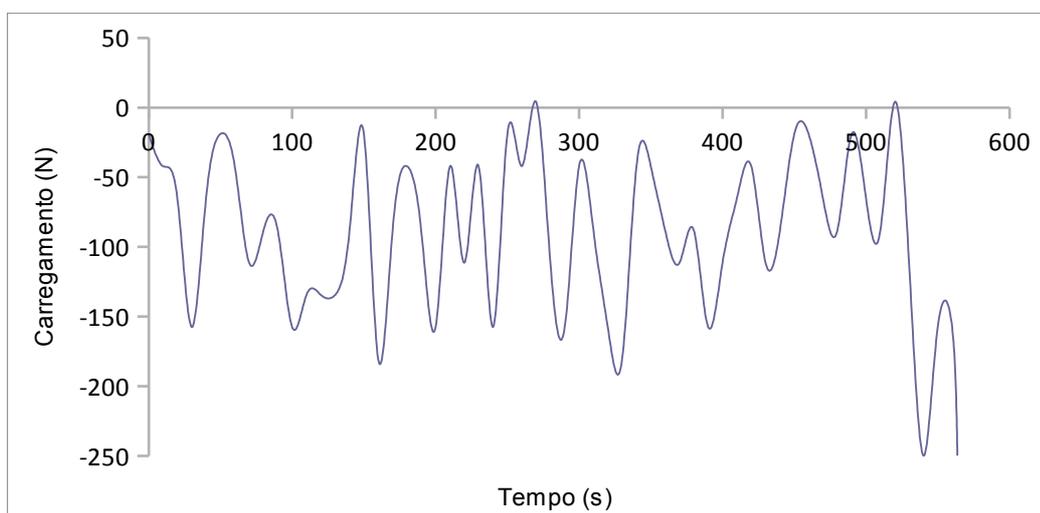
Essa exclusão dos pontos, principalmente na região próxima ao contorno da ROI, ocasionou diversos problemas de convergência do programa fazendo que

fosse necessário selecionar imagens que não tivessem grandes deformações entre elas, diminuindo a precisão das medidas.

O ensaio apresentado a seguir, teve a duração de aproximadamente 9 minutos e meio. O início da trinca deu-se por volta de 5 minutos de ensaio, na imagem número 59 de toda a sequência das 105 fotos.

Na figura 6.10, vemos a aplicação do carregamento ao longo do tempo de ensaio e observamos que o gráfico vem seguindo uma sequência em seu carregamento e a partir do instante de 310 segundos, o gráfico sofre uma perturbação, início da trinca das partes laterais.

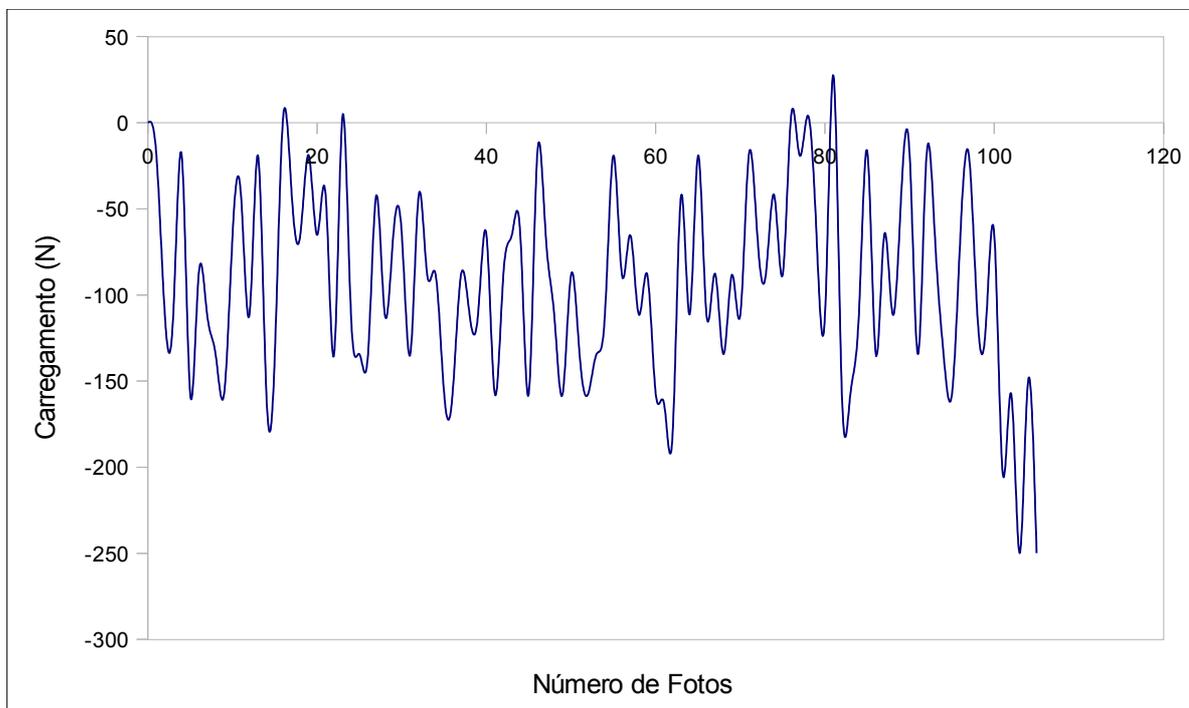
Figura 6.10 – Gráfico de aplicação de carga x tempo



Fonte: Próprio autor.

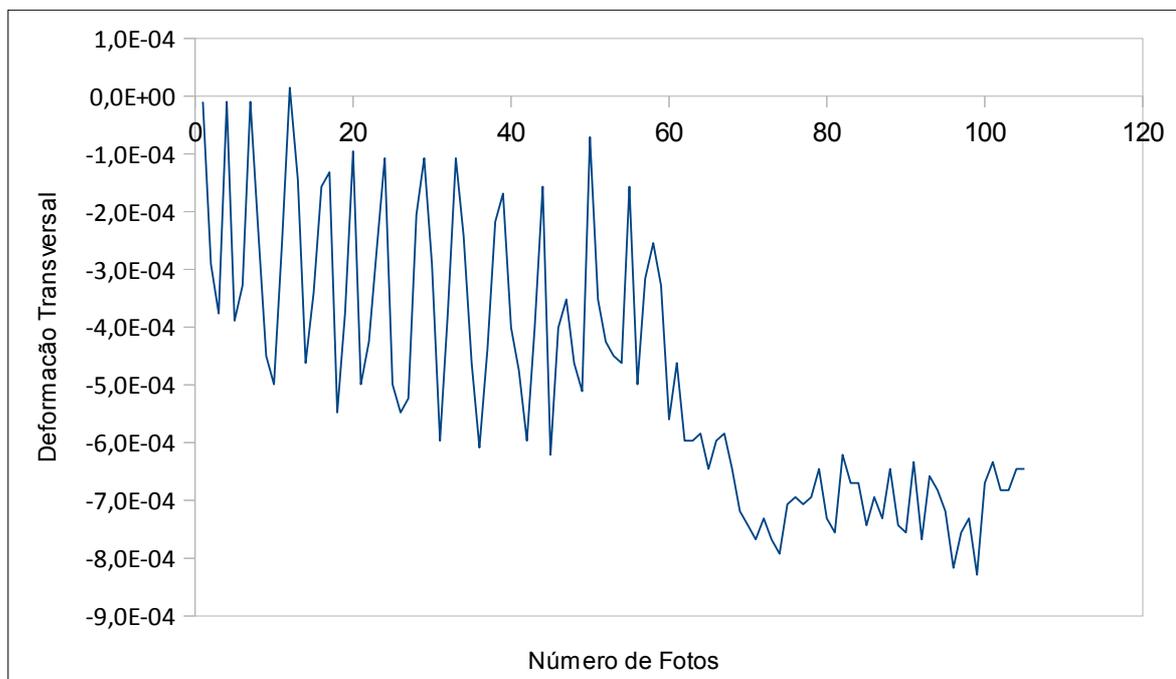
A figura 6.11 mostra o mesmo carregamento em função do número de fotos. Mais uma vez, observou-se que o gráfico é igual ao da figura 6.10, estando apenas em uma outra escala. Os gráficos das deformações longitudinal e transversal obtidos pelos extensômetros acompanham a ideia de mudança de comportamento da telha após a imagem 59, mostrado na figura 6.12 e figura 6.13, onde vemos para o mesmo instante de tempo da fissuração, o início de uma mudança nos valores de deformação, que vinha apresentando uma singularidade.

Figura 6.11 – Gráfico de aplicação de carga x número de imagens.



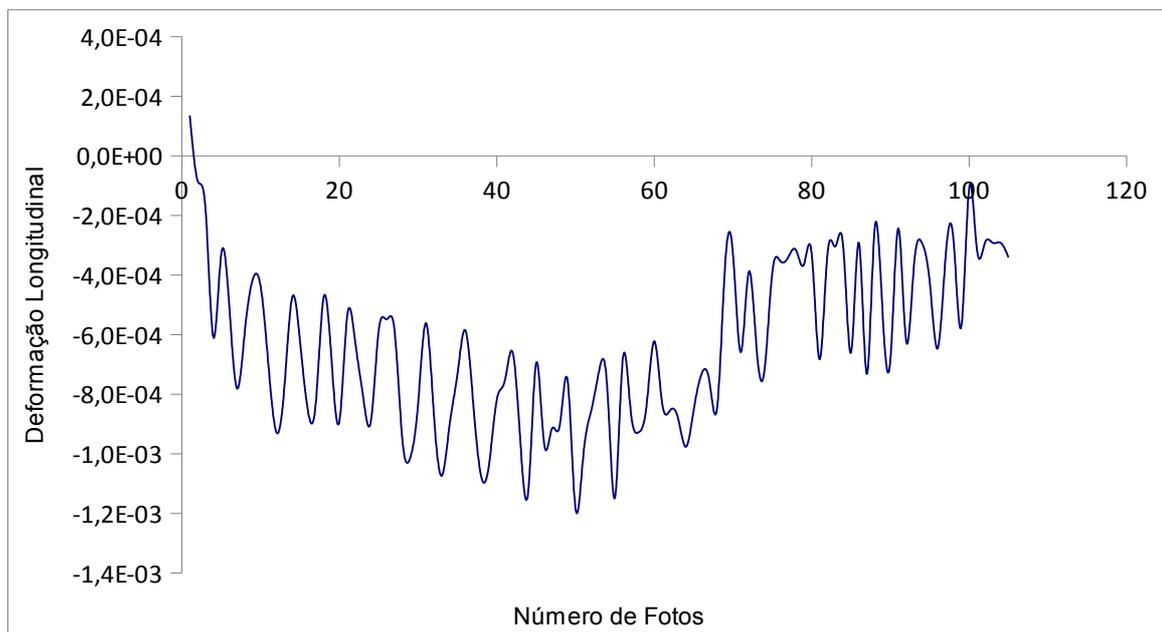
Fonte: Próprio autor.

Figura 6.12 – Gráfico deformação x número de imagens.



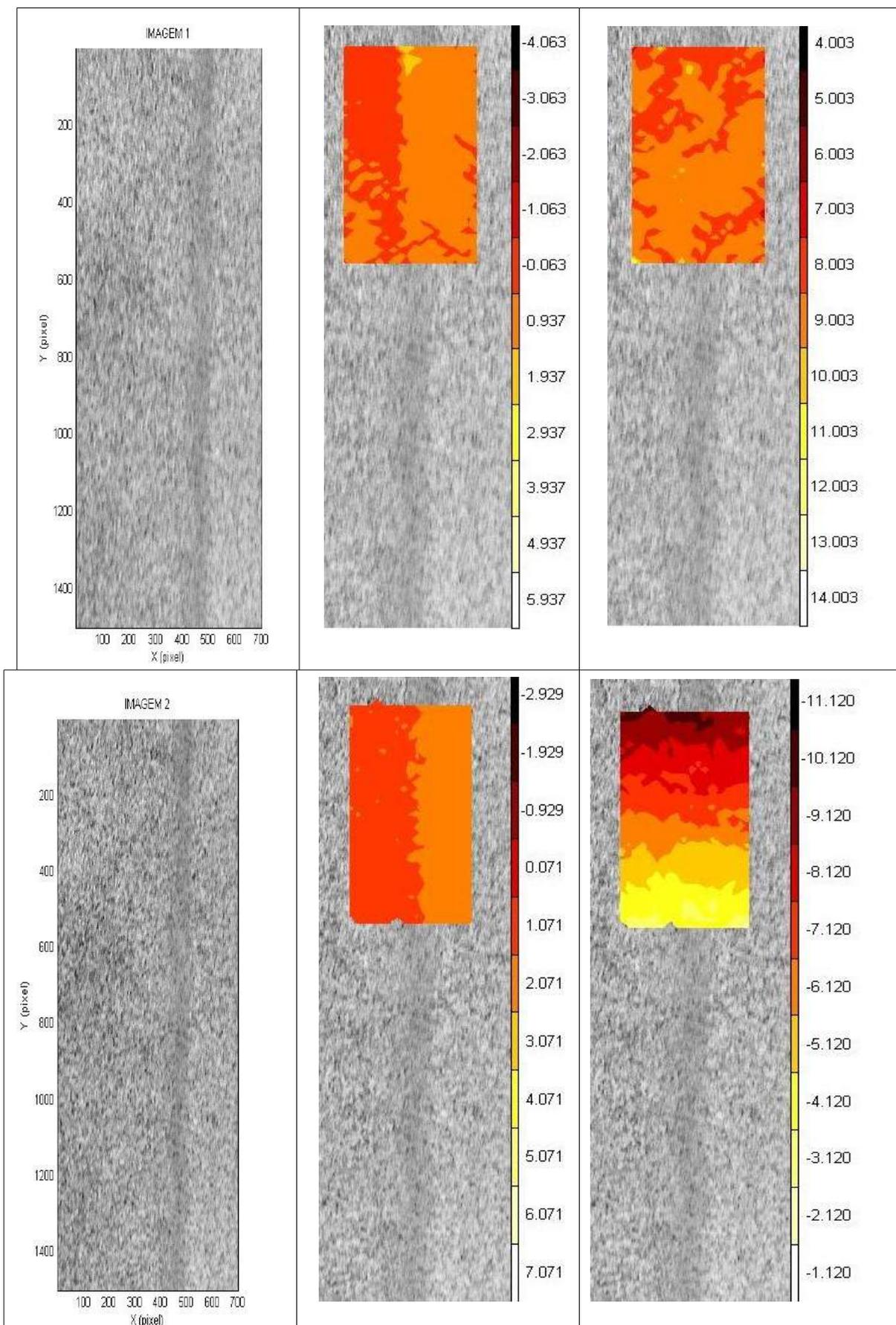
Fonte: Próprio autor.

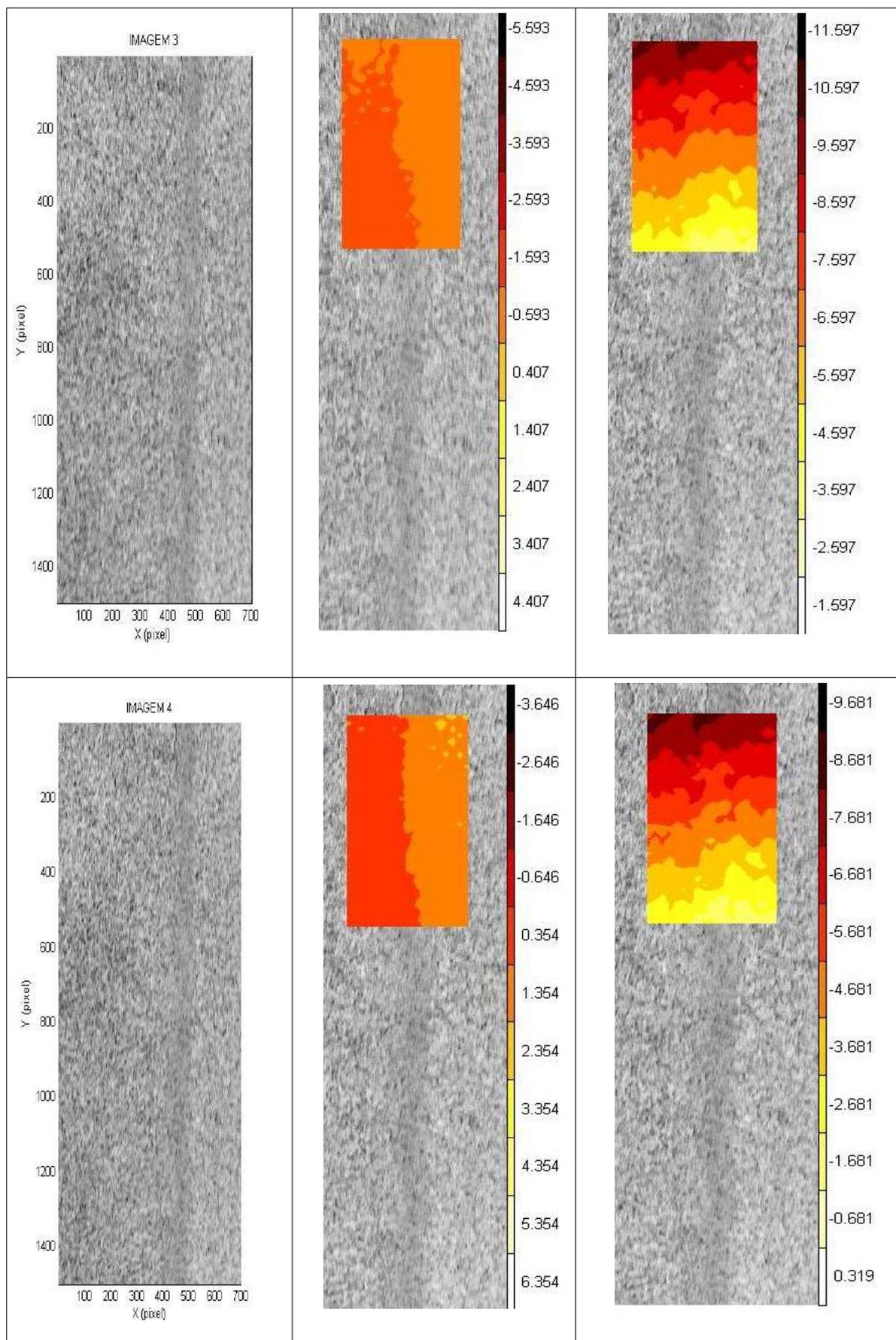
Figura 6.13 – Gráfico deformação longitudinal x número de imagens.



Fonte: Próprio autor.

A sequência de imagens seguinte (Figura 6.14), mostra o comportamento das bandas de deformação, da imagem de referência, sem fissura, até o momento em que aparece a primeira fissura e sua propagação. A sequência de imagens foi escolhida tendo como referência o limite entre o dano e a fratura, que tem início no momento de aparecimento de fissuras, pelo menos a olho nu.





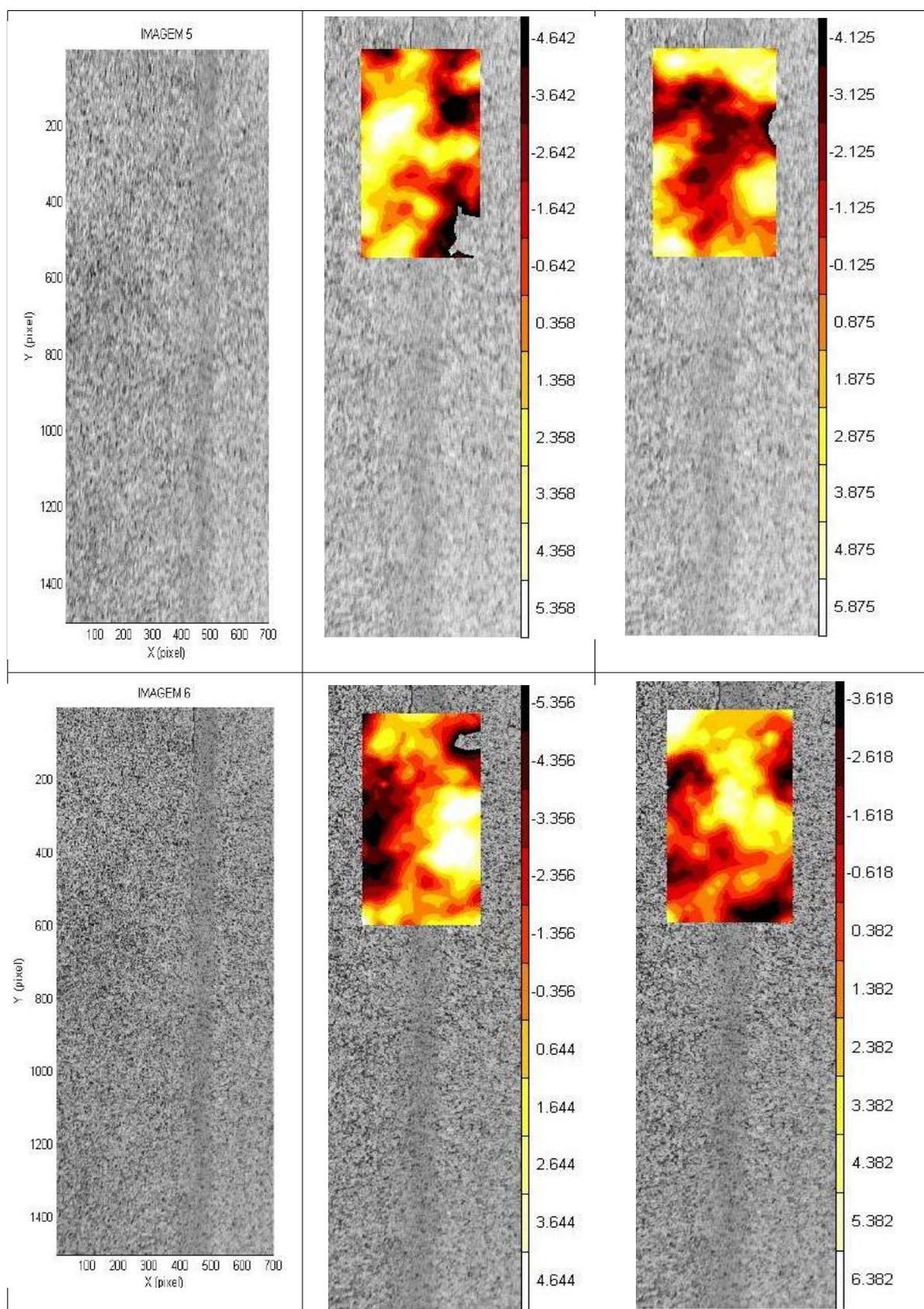


Figura 6.14 – Imagens do programa Correli da parte lateral da telha. – Imagem de referência, Deformação no sentido X(ε_{xx}) e sentido Y(ε_{yy}). Fonte: Próprio autor.

Após a análise das imagens obtidas, é possível observar que quando foi capturada uma sequência com nitidez ótima, observou-se bandas de deformações apresentando um comportamento esperado, “caminhando” de uma forma linear, acompanhando a linha de trincamento. Devido a velocidade de aplicação do carregamento, e “saltos” na escolha das imagens seguintes, as deformações não seguiam esse formato linear. A figura 6.14 mostra uma série de seis imagens, onde cada imagem em análise é representada por um grupo de três figuras, sendo primeira a imagem selecionada que foi analisada, a segunda evidencia as bandas de deformação no sentido $X(\epsilon_{xx})$ e a terceira no sentido $Y(\epsilon_{yy})$.

O programa Correli possui como uma de suas características, além de indicar o campo dos deslocamentos entre imagens, nos fornecer as deformações de uma região dentro da ROI selecionada como um extensômetro.

Foi feita a captação de um ponto, por meio da rotina *gauge* do programa, que indicou entre as imagens analisadas, as deformações nominais desse ponto. As imagens analisadas possuem a indicação da deformação em pixels, onde nessa análise cada pixel equivale a 0,032mm.

6.2.2 RESULTADOS DA PARTE CENTRAL DA TELHA.

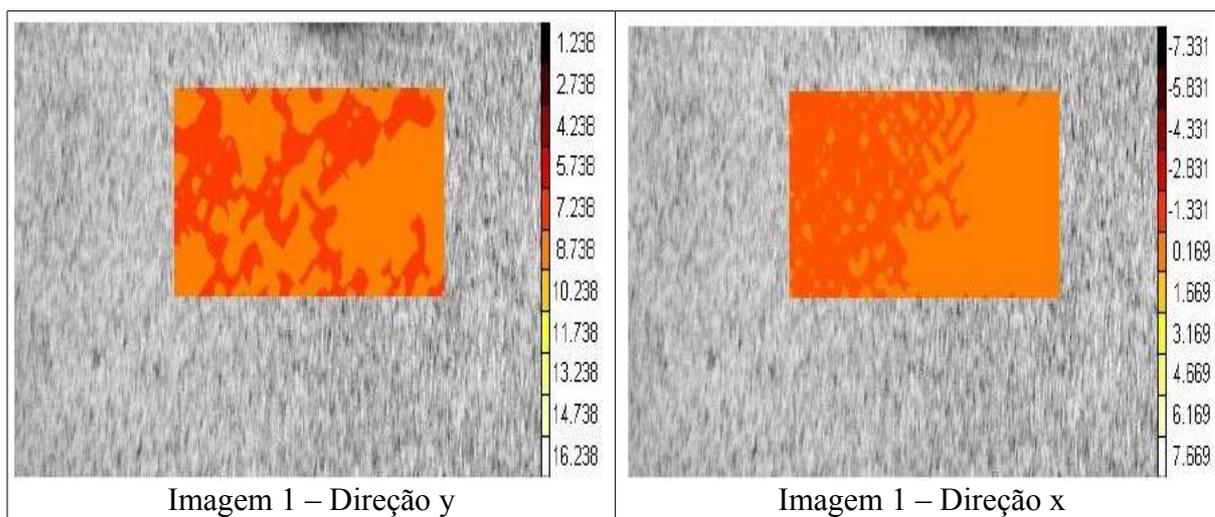
Em seguida foi realizada uma análise da parte central da telha, região logo abaixo da ligação do parafuso com a terça, no sentido longitudinal, sendo utilizadas as mesmas imagens da análise lateral, mudando apenas a região de interesse. Observamos na sequência (Figura 6.15) a análise dessa região que, assim como na região lateral, observou-se as deformações bem acentuadas.

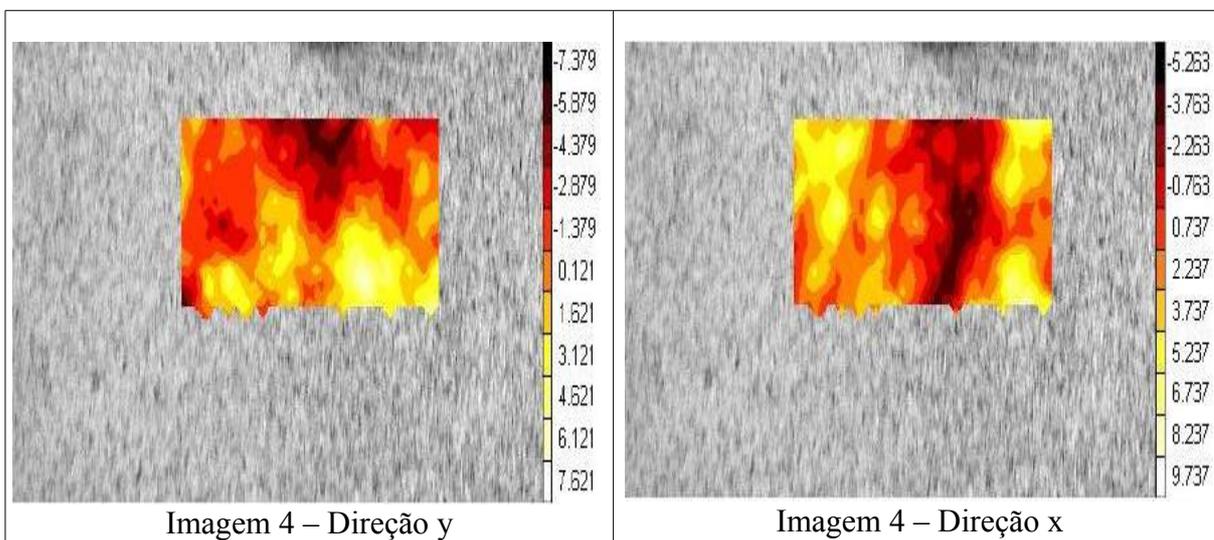
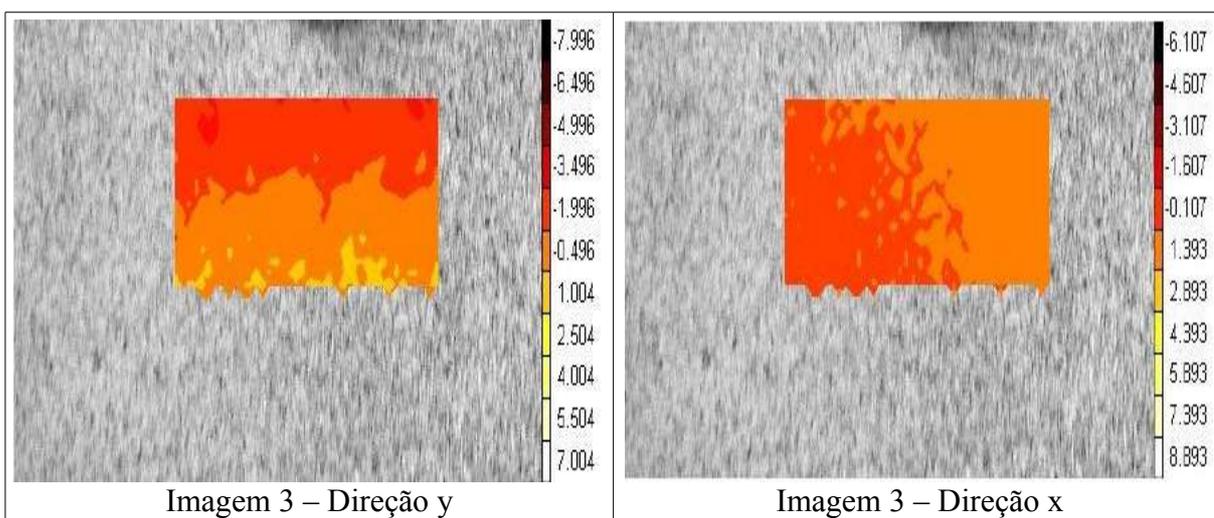
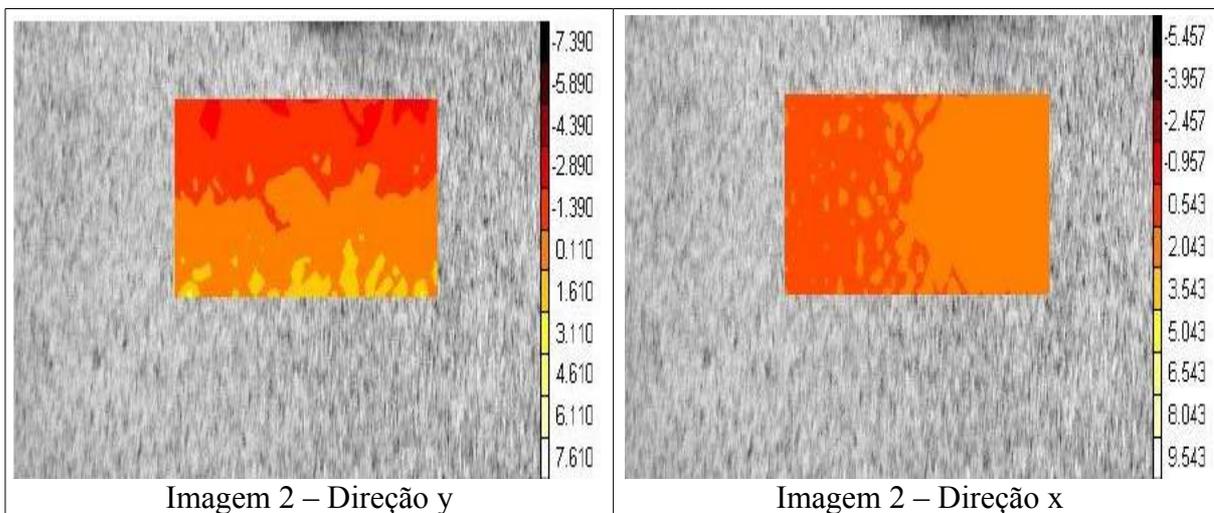
Pelo fato dessa região encontrar-se no centro, foi bem visível a diferença de deformação no sentido $X(\epsilon_{xx})$ e no sentido $Y(\epsilon_{yy})$. A região central da telha, onde fixou-se o parafuso, encontra-se em alto-relevo, ou seja, a região em estudo é a transição da face mais alta (Figura 6.10), onde o parafuso está conectado com a telha, e a parte lateral. Esse desnível faz com que a aplicação do parafuso auto brocante provoque uma flexão na parte central da telha.

Comparando os níveis de deformação da segunda sequência (Figura 6.15) com a primeira (Figura 6.14) observa-se que os níveis de deslocamento não se assemelham, os campos de deformação gerados na direção longitudinal e transversal variam bastante, pois a região lateral é livre para rotacionar, trazendo grandes oscilações para a telha, o que já era esperado. Essa diferença de deformações e a vibração no limite entre essas regiões facilitou bastante a plastificação e o início da falha.

Na sequência de imagens da Figura 6.15 confirma-se o surgimento aleatório das frentes de plastificação. Após analisadas as demais fotografias, observou-se que o comportamento das bandas de deformações foi instável devido a variação de aplicação de carga (compressão – tração) e a intensidade da mesma.

Ainda assim, devido as grandes dimensões no plano da telha, uma região mais flexível, fazendo com que a frente de plastificação evolua a partir de suas extremidades e se desfaça de maneira suave evitando o encontro das frentes de plastificação. Nessa região lateral, se deslocando para o centro observados que mesmo sob grandes deslocamentos ainda há regiões em regime elástico de deformação.





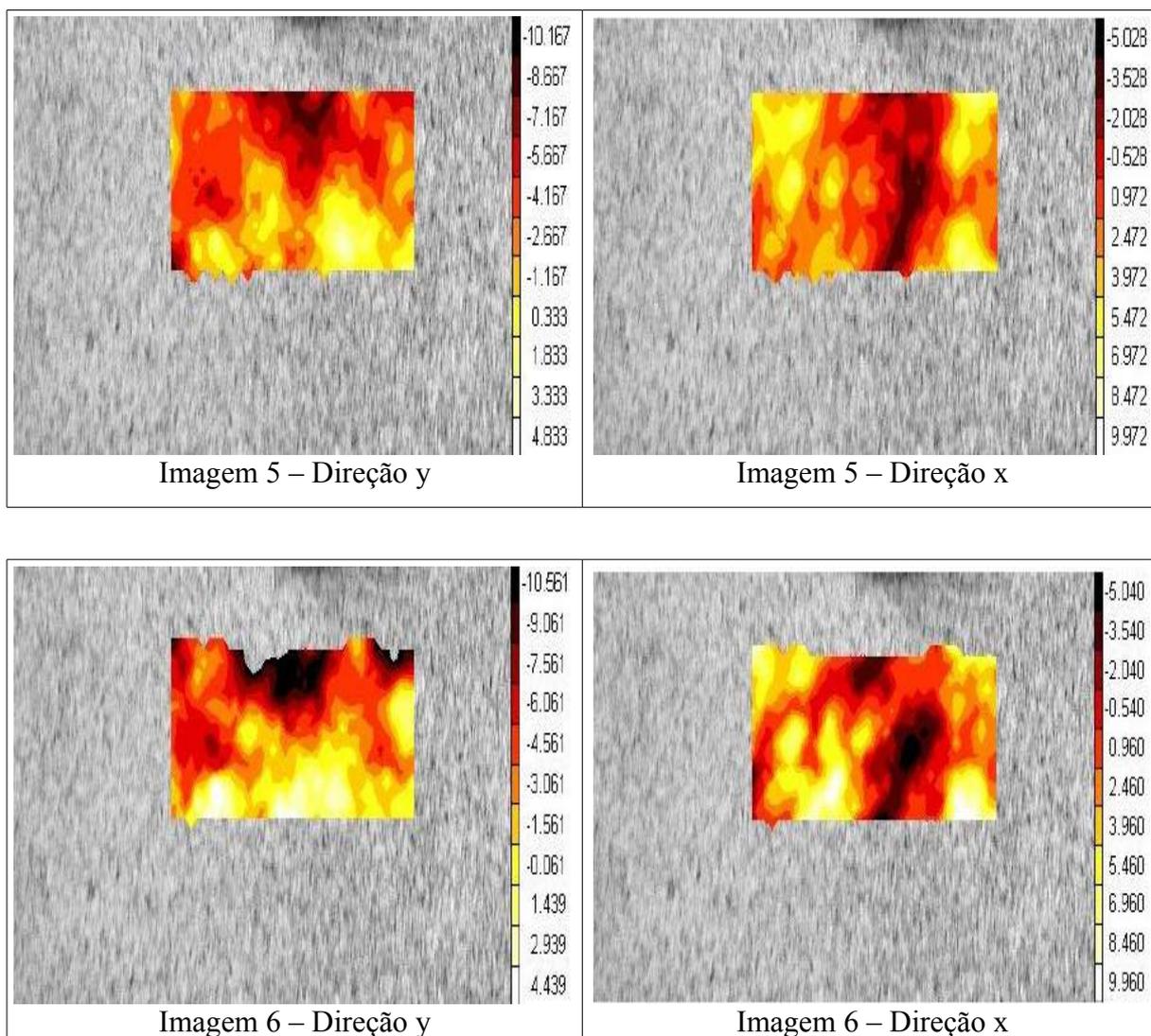


Figura 6.15 – Imagens do programa Correli da parte central da telha. – Imagem de referência, Deformação no sentido X(ε_{xx}) e sentido Y(ε_{yy}). Fonte: Próprio autor.

6.3 RESULTADOS DO MODELO USANDO ABAQUS

Os resultados do modelo analisados no programa ABAQUS foram confrontados com os dados obtidos pela uso da técnica CDI e com os dados obtidos pelos extensômetros por meio do sistema de aquisição. Pode-se observar o quanto os modelos computacionais se aproximam dos resultados experimentais.

O modelo computacional de início não obteve grande precisão quando comparado aos demais ensaios devido a simplicidade de sua geometria, ou seja, não possui a fixação com o elemento de terça. A inclusão desta variável faria com que a análise tivesse um número de variáveis bem maior que aquelas já

consideradas no modelo simplificado. O que sempre observou-se foi a magnitude dos resultados, servindo de padrão de referência.

Neste trabalho foi apresentado um modelo de material com caracterização das partes elástica, plástica, plástica com dano e falha. Para o dano foi utilizado o critério de dano dúctil para realizar as simulações dos ensaios dinâmicos.

No Abaqus, os parâmetros que determinam o critério de início de dano por falha dúctil são: deformação na fratura, triaxialidade e taxa de deformação. Em um dos exemplos fornecidos pelo programa, possui uma tabela com os parâmetros para o aço, então esses valores foram modificados para que a curva de carga X tempo do ensaio numérico ficasse próxima da experimental.

6.3.1 DIAGRAMAS DO MODELO

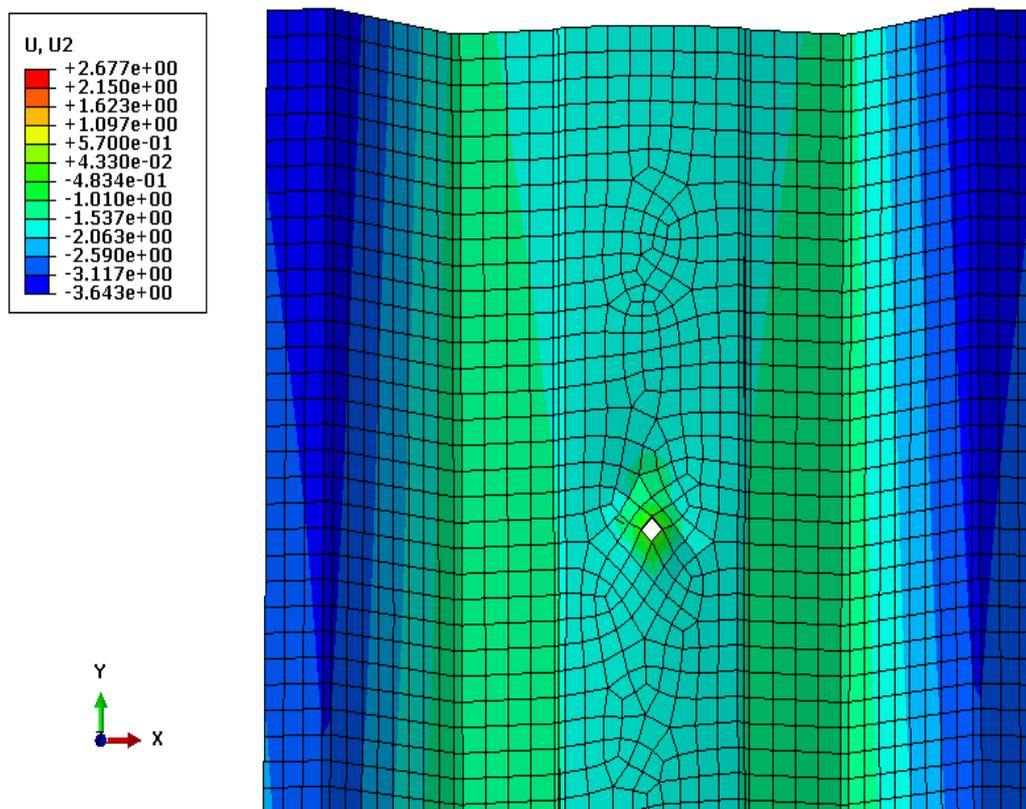
Os modelos analisados com o programa Abaqus/Explicit não apresentaram as mesmas falhas como nos ensaios realizados. A ausência da terça na modelagem fez com que as tensões de contato que seriam produzidas não fossem transmitidas para a telha.

A energia aplicada no sistema seria aplicada no contato com a terça e no parafuso, mas vale lembrar que a região de aplicação do carregamento também absorve parte dessa energia.

A simulação utilizou a formulação de ruptura dinâmica para o modelo de plasticidade aqui empregado. Esse modelo é apropriado a altas taxas de deformação de metais, igualmente o modelo do dano progressivo de Johnson-Cook foi utilizado para simular a perda gradual da rigidez do material.

Observou-se na figura 6.16 as taxas médias de deformação da telha na direção y. Vê-se que na região lateral, no sentido y as deformações são mínimas, sendo mais solicitada a medida que segue para o centro da telha. Na região em torno do parafuso, há um acúmulo de tensões e maior deslocamento. Na figura foi indicada apenas a região do parafuso por analogia com a técnica CDI, mas como dito anteriormente, a energia se dissipou ao longo de toda a telha, sendo mais mais intenso no centro da telha.

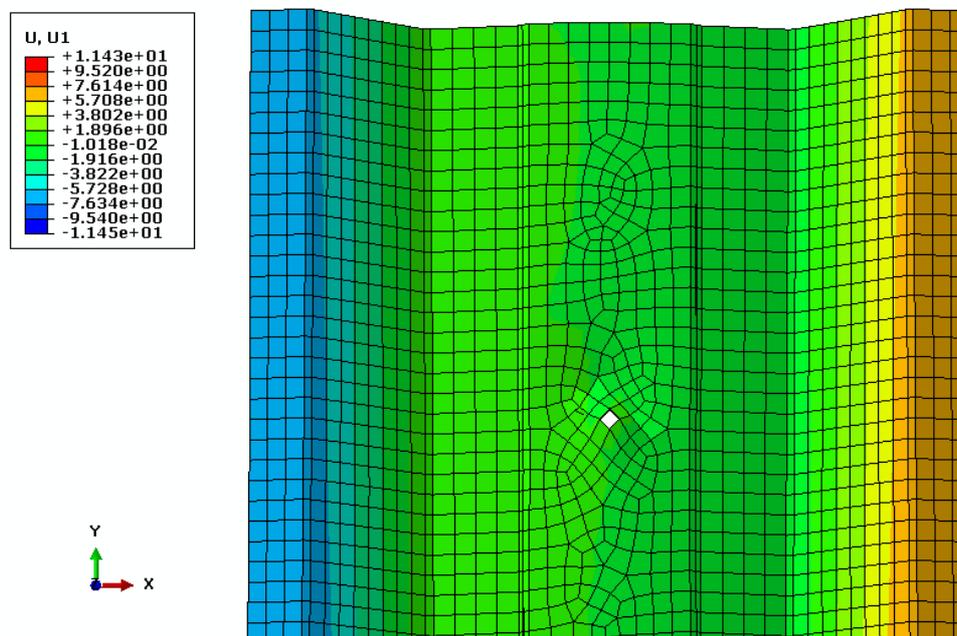
Figura 6.16 – Deslocamentos no sentido y da telha (mm) - ABAQUS.



Fonte: Próprio autor.

Na região próxima ao parafuso observou-se que os deslocamentos seguiram um certo padrão, apresentando uma pequena variação de deslocamento e tendo uma escala de valor próximo ao do ensaio experimental. Uma variação maior na região do parafuso, apresentou no sentido dos deslocamentos em relação ao eixo x (Figura 6.17). Durante a aplicação do carregamento, viu-se grandes deslocamentos no sentido x, pelo fato de termos as bordas da telha livres.

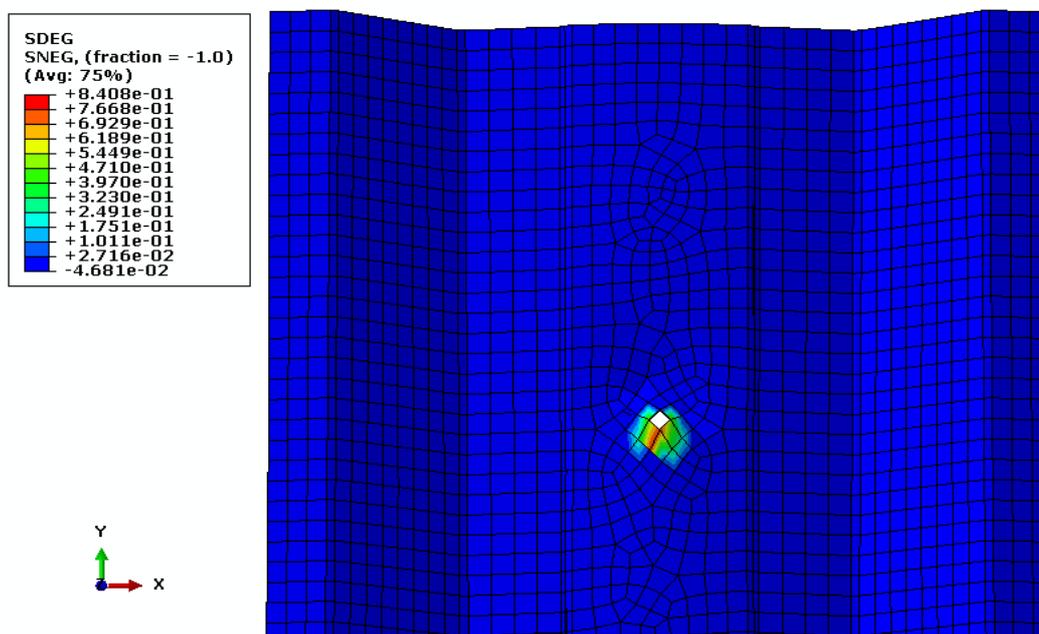
Figura 6.17 – Deslocamentos no sentido X da telha(mm) – ABAQUS.



Fonte: Próprio autor.

Na simulação foi utilizado o modelo de falha dúctil, que é descrito pela taxa de degradação da rigidez do elemento. Na figura 6.18 vemos a degradação da rigidez na região ao redor do parafuso. Observamos que a região do parafuso localizada mais próxima à aplicação da carga a rigidez torna-se bem mais degradada.

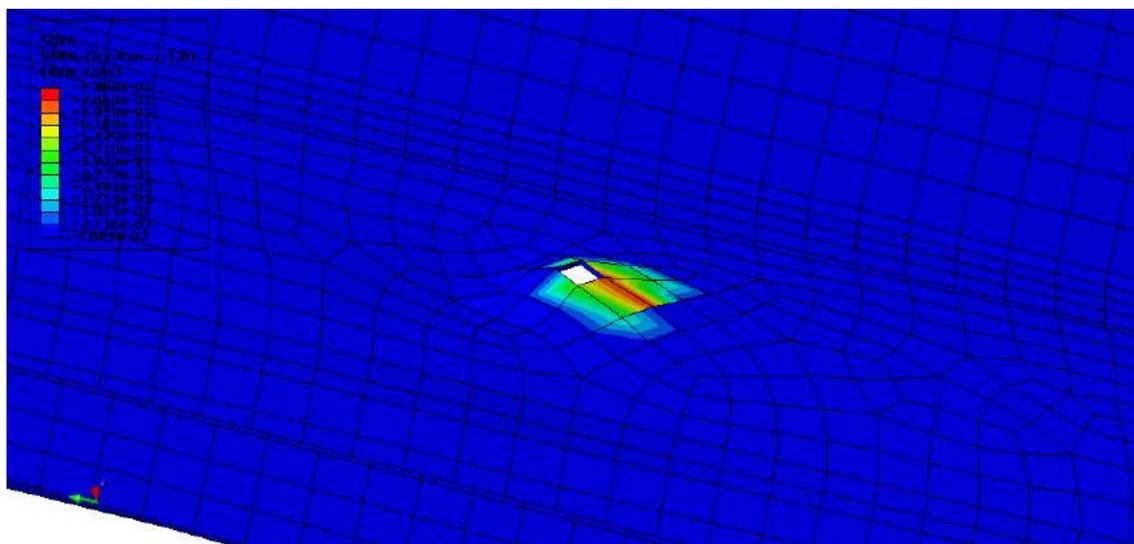
Figura 6.18 – Degradação da rigidez - ABAQUS.



Fonte: Próprio autor.

Em uma outra perspectiva, é possível verificar a mesma degradação, onde observamos a região do parafuso bastante deformada (Figura 6.19).

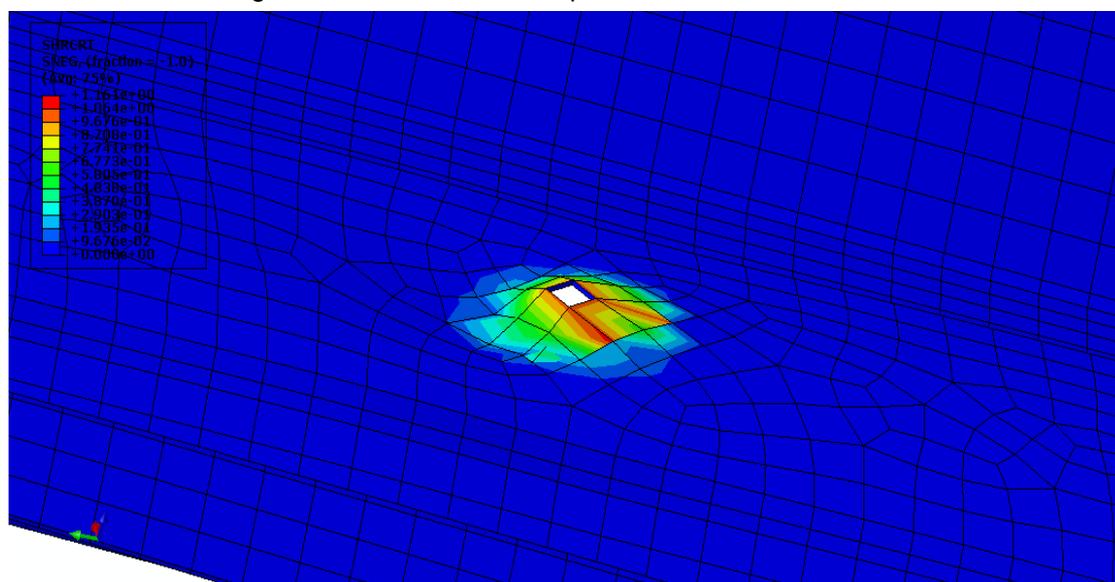
Figura 6.19 – Degradação da rigidez – Vista lateral- ABAQUS.



Fonte: Próprio autor.

No Abaqus, os parâmetros que determinam o critério de início de dano por cisalhamento são: deformação na fratura, taxa de tensão de cisalhamento e taxa de deformação. É possível visualizar o início do dano por cisalhamento a partir da análise da Figura 6.20. Esse critério de cisalhamento também é um modelo fenomenológico para prever o início do dano, sendo uma função da taxa de tensão de cisalhamento e da taxa de deformação.

Figura 6.20 – Início do dano por Cisalhamento- ABAQUS



Fonte: Próprio autor.

6.4 MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Os métodos aplicados para a análise dos danos sofridos pelas telhas diferem em suas técnicas de medição e apresentaram resultados próximos em sua magnitude. Observamos a partir da análise da tabela 6.1 um resumo das áreas analisadas e das principais medições de deslocamentos realizados neste trabalho, CDI, ABAQUS e através dos extensômetros.

Tabela 6.1 – Deformações entre os método de medição.

Método de Medição	Região da telha			
	Lateral		Central	
	X	Y	X	Y
CDI	$1,72 \times 10^{-2}$	$6,82 \times 10^{-3}$	$2,43 \times 10^{-3}$	$1,17 \times 10^{-2}$
ABAQUS	$1,02 \times 10^{-2}$	$2,68 \times 10^{-2}$	$1,02 \times 10^{-2}$	$4,33 \times 10^{-2}$
Extensômetros	-	-	$5,02 \times 10^{-4}$	$1,26 \times 10^{-3}$

Fonte: Próprio autor.

O cálculo das deformações da telha foi obtido por extensometria a partir do deslocamento do aplicador cíclico de carga e utilizando a técnica de correlação.

Pode-se associar uma força aplicada na telha a sua respectiva deformação e instante, pois através do sistema de aquisição de dados foram gravados a força aplicada na telha e a deformação da mesma ao longo do ensaio. Concomitantemente foi feita uma sincronia do SAD com o instante de aquisição de cada imagem.

Os valores de deslocamentos observados foram diferentes nos métodos de medições, um erro já esperado, pois como mencionado anteriormente, a dinâmica do ensaio prejudicou a captação das imagens de uma forma total e sincronizada, portanto, nem todas as imagens ficaram nítidas, tanto pela alta velocidade do ensaio, proporcionando um deslocamento acentuado da ROI e dificultando a escolha das fotos, como pela pequena capacidade de captura da máquina fotográfica.

Como esperado, há uma diferença para os valores de deformações calculados pelas metodologias, resultando assim em valores de rigidez e/ou resistência diferentes. Para os modelos do programa Abaqus, a simulação da perda gradual da rigidez do material, o que pode levar a uma simulação mais real, foi um

importante critério de início do dano, empregado na simulação pelo modelo de plasticidade de Johnson-Cook. A aplicação no carregamento na telha, na simulação com o programa ainda precisa sofrer modificações no que se refere ao comportamento plástico. A forma como o carregamento é aplicado difere na simulação, que atua de forma pontual, ocasionando um acúmulo de tensão e fixando muita energia naquela região, em alguns modelos deformando de forma excessiva, sendo este mais um dos motivos de erro entre as técnicas de medições.

7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Este capítulo apresentou uma série de conclusões que puderam ser observadas no transcorrer do desenvolvimento deste trabalho com a análise dos resultados obtidos da nova metodologia de estudo de telhas metálicas e as técnicas de pesquisa. Elas serão apresentadas a seguir mostrando um paralelo com os objetivos almejados para este trabalho no CAPÍTULO 1.

7.1 OBJETIVOS ALCANÇADOS E CONCLUSÕES

Ratificou-se a potencialidade da abordagem fenomenológica no presente trabalho. A partir da construção do aparato de ensaios de fadiga em telhas montada, uma série de estudos podem ser desenvolvidos, gerou o ponto inicial para uma série de estudos em telhas, não só usando aço ou alumínio, mas podendo dar suporte a outros materiais como policarbonato e fibras.

O aparato forneceu suporte para que ensaios com controle de carga e contagem de ciclos fossem executados de forma fácil.

Este trabalho propôs primeiramente a criação de um instrumento que pudesse facilitar a pesquisa em uma área muito importante ao nosso país que é a integridade de estruturas sob o carregamento dos ventos.

A investigação do comportamento estrutural foi realizada por meio da metodologia de estudo de falhas em telhas metálicas. A quantificação do dano pela técnica da Correlação Digital de Imagens apresentou-se como esperado, pois até então, a técnica era usada para ensaios quase-estáticos, sendo realizados em experimentos com baixo incremento de carga. Para a utilização da técnica de forma dinâmica, deve-se mudar o código fonte de Correli Q4, fazendo com que se tenha uma ROI dinâmica, verificando os pontos não contidos na ROI e que poderiam ter seus valores de deslocamentos interpolados. Com isso, os pontos periféricos não dificultariam a convergência do programa. A utilização de câmeras digitais semi-profissionais para a realização da técnica empregada fez com tivéssemos que avaliar mais detalhadamente as análises, pois quanto menor a

qualidade das imagens, maiores as chances de erros nas análises. Para ensaios dinâmicos, devem-se usar câmeras de captura de imagem avançada (8 a 10 imagens/s), pois geralmente esses ensaios possuem alta frequência e podem gerar imagens desfocadas. Quanto mais se aumenta a velocidade de captura de imagens, é importante se verificar a taxa de transferência da imagem para a memória da câmera e o tipo de foco que está sendo utilizado, pois podem ocasionar a perda de sincronia do ensaio e uma queda na resolução das imagens, dificultando as análises.

Devido à não sincronização de uma série de imagens, não foi possível estabelecer, por meio da técnica do Correli Q4 um parâmetro para a variável do dano, ficando o dano qualificado pelo estado físico da telha ao final do experimento.

Para as análises computacionais, foram utilizados diversos modelos tentando corroborar com os dados experimentais encontrados. Os resultados foram satisfatórios de acordo com as hipóteses apresentadas. É importante salientar que a não inclusão do elemento terça alterou de forma significativa o confronto direto das deformações. O modelo apresentado foi simplificado, visando estudar o comportamento de flexão da telha e de ruptura nos parafusos ou de cisalhamento no centro da telha.

O modelo de iniciação do dano foi baseado na teoria de plasticidade de Johnson-Cook, levando em consideração uma série de parâmetros que dependem de ensaios específicos do material analisado. A falta de uma norma sobre telhas implica a necessidade de um aprofundamento sobre os mais diversos tipos de materiais empregados na confecção dessas telhas, além de novos métodos de estudo sobre as mesmas. O aparato de ensaios de fadiga em telhas surge como uma ferramenta adicional para esse tipo de estudo.

7.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Apresentam-se aqui algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros utilizando o dispositivo de ensaio de fadiga.

- a) Realizar o experimento de integridade para telhas de policarbonato;
- b) Inserir no aparato uma máquina de aplicação de carga trifásica, para ser ligada em um inversor de potência fazendo que o motor de rotação não perca potência em decorrência das perdas de energia térmica;
- c) Utilizar a técnica CDI modificada para ensaios dinâmicos nas telhas com equipamento de captação de imagem de alta resolução.
- d) Realizar um estudo sobre arrancamento do parafuso da ligação telha-terça usando o novo aparato.

8 REFERÊNCIAS

ALLEN, H.G. e BULSON, P.S., (1980). Background to buckling. McGraw-Hill.

ALLEN, D. H., HAISLER, W. E.(1985), Introduction to aerospace Structural Analysis, New York: John Wiley & Sons, Inc.

ALLIX, O., HILD, F. (2002). Continuum Damage Mechanics of Materials and Structures. Elsevier.

ALVES F., A.(2006); Elementos Finitos, A Base da Tecnologia CAE, 4. ed. São Paulo: Editora Érica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2001). NBR 6152: Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2001). NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1988). NBR 6123:Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro.110p.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard test method for density and specific gravity (relative density) of plastics, ASTM 792, 2000.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Specification for Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized) or Zinc-Iron Alloy-Coated (Galvannealed) by the Hot-Dip Process, ASTM 653, 2005.

BARTALI, A. E., AUBIN, V., & DEGALLAIX, S. (2008). Fatigue damage analysis in a duplex stainless steel by digital image correlation technique. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 31, 137–151.

BARTHELAT, F. & ESPINOSA, H. (2007). An experimental investigation of deformation and fracture of nacre-mother of pearl. Experimental Mechanics, 47, 311–324.

BASKARAN, A., DUTT, O. (1997), Performance of roof fasteners under simulated loading conditions, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. v.72, 389-400.

BASKARAN, A., and SAVAGE, M.G., (2003), Wind Pressure Measurements on full scale flat roofs. In: 10th International Wind Engineering Conference. Montreal. Canada.

BENALLAL, Ahmed (2002). Continuous Damage and Fracture, Elsevier.

BENALLAL, A., PROENÇA, S. P. B. (2003). Recent developments in the modelling of rupture in solids.

BERFIELD, T., PATEL, J., SHIMMIN, R., BRAUN, P., LAMBROS, J., & SOTTOS, N. (2007). Micro and nanoscale deformation measurement of surface and internal planes via digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 47, 51–62.

BERGFELT, A., EDLUND, B. AND LARSSON, H., (1975). “Experiments on trapezoidal steel sheets in bending”, Proceedings of the Third International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, Missouri, November.

BERNARD, E. S., BRIDGE, R. Q. AND HANCOCK, G. J., (1993). “Tests of profiled steel decks with V-stiffeners”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, v.119, n.8, p.2277-2293.

BERNARD, E. S., BRIDGE, R. Q. AND HANCOCK, G. J., (1995). “Tests of profiled steel decks with flat-hat stiffeners”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, v.121, n.8, p. 1175-1182.

BERTOLINO, JR. R. et al, (2000). Análise e dimensionamento estrutural de torres circulares de aço. In: JORNADAS SUL AMERICANAS, XXIX, Punta Del Este.

BING, P., HUI-MIN, X., TAO, H., & ASUNDI, A. (2009). Measurement of coefficient of thermal expansion of films using digital image correlation method. *Polymer Testing*, 28(1), 75–83.

BIDDAH, A., HEIDEBRECHT, A.C. and NAUMOSKI, N. (1995). Use of Push-over Test to Evaluate Damage of Reinforced Concrete Frame Structures Subjected to Strong Seismic Ground Motions, In: 7th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Montreal.

BLESSMANN, J., (2005), *Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento*. 2ª ed. Porto Alegre (RS): Universidade/UFRS.

BLESSMANN, J., (2001). *Acidentes Causados pelo Vento*, 4ª ed. , Porto Alegre, Ed. Universidades / UFRS.

BLESSMANN, J., (1991). *Ação do Vento em Telhados*, 1ª ed. , Porto Alegre, Ed. SAGRA.

BONORA, N., *et al*, (2005). Ductile damage evolution under triaxial state of stress: theory and experiments. *International Journal of Plasticity* v.21, 981–1007.

BRUCK, H., McNEILL, S., SUTTON, M., & PETERS, W. (1989). Digital image correlation using newton-raphson method of partial differential correction. *Experimental Mechanics*, 29(3), 261–267.

CAMARÃO, A. F.(1994); *Elementos Finitos: o uso do ANSYS 5.0 na Indústria Automotiva, Maquinas e Metais n°342*, Aranda Editora Técnica.

CALLISTER, W. D. (2007). *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. 7ª ed. , Rio de Janeiro, LTC.

CHABOCHE, J.L. (1987). Continuum Damage Mechanics: Present State end Future Trends. *Nuclear E. D.*, vol.105, p.19 – 33.

CHABOCHE, J.L. (1988a). Continuum Damage Mechanics. Part I : General concepts. *J. Appl. Mech.*,v.55, p.59-64.

CHABOCHE, J. L.(1988b). Continuum Damage Mechanics. Part II: Damage Growth, Crack Initiation and Crack Growth. *J. Appl. Mech.*, v.55, p.65-72.

CHEN, W. F. & HAN, D. J. (1987): “Plasticity for Structural Engineers.” Springer-Verlag, Berlin, Germany, 606 pp.

CHENG, P., SUTTON, M., SCHREIER, H. W., & McNEILL, S. R. (2002). Full-field speckle pattern image correlation with b-spline deformation function. *Experimental Mechanics*, 42(3), 344– 352.

CHOUSAL J.A.G., MOURA, M.F.S.F., (2007), *Validação da Medição de Deformações por Correlação Digital de Imagem em Compósitos Laminados de Matriz Polimérica*,*Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*. Vol. 11, N.º 2, pp. 23-34.

CHU, T., RANSON, W., SUTTON, M., PETERS, W.,(1985). Application of Digital Image Correlation Techniques to Experimental Mechanics, *Experimental Mechanics*, nº 3, Vol. 25, pág. 232- 244.

CHUNG, K. F. E LAWSON, R. M.(1999). Structural Performance of shear resisting connections between cold-formed steel sections using web cleats of cold-formed steel strip. *Engineering Structures*, v. 22, p. 1350-1366.

CLAIRE, D., HILD, F., ROUX, S., (2002). Identification of damage fields using kinematic measurements. *Comptes rendus Mecanique*. 330 – 729-734.

CLAIRE, D., HILD, F., ROUX, S., (2004). A finite element formulation to identify damage fields: The equilibrium gap method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 61 (2) 189-208.

CODES, R. N. (2006). Estudo da Mecânica da Danificação Aplicada ao Concreto com Efeitos de Corrosão. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza, Ceará, Orientador: Enio Pontes de Deus.

CONTE, S. D. e BOOR, C., (1980). *Elementary numerical analysis – An algorithmic approach*, 3a ed., McGraw-Hill.

CONSIDINE, J., SCOTT, C., GLEISNER, R., & ZHU, J. (2005). Use of digital image correlation to study the local deformation field of paper and paperboard. In 13th Fundamental Research Symposium: Cambridge.

DAWICKE, D. & SUTTON, M. (1994). Ctoa and crack-tunneling measurements in thin sheet 2024-t3 aluminum alloy. *Experimental Mechanics*, 34(4), 357–368.

FONSECA, N. D. R. da, (2000). “Avaliação do comportamento teórico e experimental em espécimes de telhas metálicas autoportantes submetidas à flexão”, Dissertação de Mestrado. E.E./UFRGS, Porto Alegre.

FRANÇA, M. C. (2005). Uma Simulação Numérica de Evolução do Dano. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

GODARA, A. & RAABE, D. (2007). Influence of fiber orientation on global mechanical behaviour and mesoscale strain localisation in a short glass-fiber-reinforced epoxy polymer composite during tensile deformation investigated using digital image correlation. *Composites Science and Technology*, 67, 2417–2427.

HANCOCK, G.J., CELEBAN, M., HEALY, C., GEORGIU, P.N. AND INGS, N.L. (1990). Tests of purlins with screw fastened sheeting under wind uplift. Proc. Tenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. University of Missouri - Rolla, St. Louis, MO, pp. 393-419.

HANCOCK, G.J., CELEBAN, M., HEALY, C. (1992). Tests of continuous under downwards loading. Proc. Eleventh International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. University of Missouri - Rolla, St. Louis, MO, pp. 157-179.

HIBBITT, KARLSSON e SORENSEN, 2010. –“*ABAQUS/Standard – User’s manual*”- Volumes I, II e III, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc, EUA.

HILD, F., PÉRIÉ, J.-N. and CORET, M., (1999), Mesure de champs de déplacements 2D par intercorrélacion d’images : CORRELI2D, report 230, LMT-Cachan.

HILD, F. B. RAKA, M. BAUDEQUIN, S. ROUX and F. CANTELAUBE,(2002), “Multi-Scale Displacement Field Measurements of Compressed Mineral Wool Samples by Digital Image Correlation,” Appl. Optics IP 41, pp. 6815-6828 .

HINTON, E., WOOD, R., BICANIC, N., WHITE, P. e HELLEN, T., (1992). Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis. NAFEMS. Nonlinear Working Group, Swansea. Reino Unido.

HUNG, PO-CHIH; VOLOSHIN, A.S. (2003). In-plane strain measurement by digital image correlation, J Braz Soc Mech Sci Eng 25 pp. 215–221.

HWANG, S., HORN, J., & WANG, H. (2008). Strain measurement of nickel thin film by a digital image correlation method. Strain, (44), 215–222.

INGS, N.L. AND TRAHAIR, N.S. (1984). Lateral buckling of restrained roof purlins. Thin - Walled Structures, 2, 285-306.

JANSON, J.; HULT, J. (1977). Fracture mechanics and damage mechanics a combined approach. Journal de Mécanique Appliquée, v. 1, n. 1, pp. 69-84.

JORGENSON, J. L. AND CHERN, C., (1973). Bending strength of deep corrugated steel panels, Proceedings of the Second International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, Missouri, October.

JORGENSON, J. L. AND CHOWDURY, A. H., (1982). Buckling strength of cold-formed steel curved panels, Proceedings of the Sixth International Specialty Conference on Cold- Formed Steel Structures, St. Louis, Missouri, November.

KRAJCINOVIC, D. (1989). Damage mechanics. Mechanics of Materials, vol.8, p.117-197

KACHANOV, L.M.,(1958). Rupture Time Under Creep Conditions, Izv. Acad. Nauk USSR, OTN, 8, 26-31.

KANG, J., OSOSKOV, Y., EMBURY, J. D., & WILKINSON, D. S. (2007). Digital image correlation studies for microscopic strain distribution and damage in dual phase steels. Scripta Materialia, 56, 999–1002. KLEIBER, M. e HIEN, T.D., (1992). The stochastic finite element method. John Wiley & Sons.

KIRUGULIGE, MADHU S.; TIPPUR, HAREESH V. and DENNEY, THOMAS S. (2008). Measurement of transient deformations using digital image correlation method and high-speed photography: application to dynamic fracture, Strain 45, pp. 108–122.

KLEIBER, M. e HIEN, T.D., (1992).The stochastic finite element method. John Wiley & Sons.

KWON, Y. B. AND HANCOCK, G. J., (1992). Tests of Cold-Formed Channels with Local And Distortional Buckling, Journal of Structural Engineering, ASCE, v.117, n.7, p.1786-1803.

LECOMPTE, D., SMITS, A., BOSSUYT, S., Sol, H., VANTOMME, J., HEMELRIJCK, D., & HABRAKEN, A. (2006). Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. Optics and Lasers in Engineering, 44, 1132–1145.

LEE, HAO et al.(1985). An Anisotropic Damage Criterion For Deformation Instability And Its Application To Forming Limit Analysis Of Metal Plates. Engineering Fracture Mechanics, v. 21, n. 5, p. 1031-1054.

LEECE, M. AND RASMUSSEN, K., (2005a). “Experimental Investigation of Stainless Steel Roof Sections in Bending”, Research Report n.847, Department of Civil Engineering, University of Sydney, Sydney.

LEECE, M. AND RASMUSSEN, K., (2005b). “Design of stainless steel roof sections”, Research Report n.851, Department of Civil Engineering, University of Sydney, Sydney.

LEMAITRE, J. (1984). How to use damage mechanics. Nuclear Engineering and Design, Amsterdam, v. 80. p. 233-245.

LEMAITRE, J. (1985). A Continuous Damage Mechanics Model for Ductile Fracture. J. Engng Mater. Technol., v.107, p. 83-89.

LEMAITRE, J. (1986). Local Approach of Fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 25, n. 5/6, p. 523-537.

LEMAITRE, J. e CHABOCHE, J. L. (2009). *Mécanique des matériaux solides*. Dunod, *Mechanics of Solid Materials*, Springer-Verlag.

LEMAITRE, J. (1996). *A course on Damage Mechanics*. 2 ed. Cachan: Springer, 225 p.

LEMAITRE, J. (2001). *Handbook of Materials Behavior Models*, Academic Press

LEMAITRE, J. (2002) *Introduction to continuum damage mechanics*. *Continuum Damage Mechanics of material and Structures*, Cachan, p. 235-258.

LEMAITRE, J., CHABOCHE, J. (2002). *Mechanics of solid materials*.

LEMAITRE, J. & DUFAILLY, J. (1987). *Damage Measurements*. *Engineering Fracture Mechanics*. Vol. 28, p. 643 – 661.

LEMAITRE, J. & DESMORAT, R. (2005). *Engineering Damage Mechanics*. Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures;

LUCAS, R. M.; AL-BERMANI, F. G. A. e KITIPORNCHAI S. 1997a. *Modelling of Cold-Formed Purlins-Sheeting Systems Part 1. Full Model*. *Thin-Walled Structures*, n. 3, v. 27, p. 223-243.

LUCAS, R. M.; AL-BERMANI, F. G. A. E KITIPORNCHAI S. (1997b). *Modelling of Cold- formed Purlins-Sheeting Systems Part 2. Simplified Model*. *Thin-Walled Structures*, n. 4, v. 27, p. 263-286.

LYONS, J., LIU, J., & SUTTON, M. (1996). *High-temperature deformation measurements using digital image correlation*. *Experimental Mechanics*, 36(1), 64–70.

MAHENDRAN, M., (1990). *Fatigue behavior of corrugated roofing under cyclic wind loading*, *Trans, Inst. Eng. Aust., Civil Eng. CE-32 (4)*

MAHENDRAN, M., (1994). *Behaviour and design of crest-fixed profiled steel roof claddings under wind uplift*, *Engineering Structures*, v. 16, n.5, p. 368-376.21

MAHAARACHCHI, D. and MAHENDRAN, M. (2000). Pull-through Failures of Crest-fixed Steel Claddings Initiated by Transverse Splitting, Proc. of the 15th International Specialty Conference on Cold-formed Steel Structures, University of Missouri-Rolla, St. Louis, Missouri, USA, pp.635-646.

MAHENDRAN, M., and MAHAARACHCHI, D. P. (2004) Splitting Failures in Trapezoidal Steel Roof Cladding . Journal of Performance of Constructed Facilities. 18(1):pp. 4-11.

MAHENDRAN, M. (2001). Design of steel roof and wall cladding systems for pull-out failures. Steel Construction, v.35, n.1, p.14-27.

MARCELO JR, A. O. (2004). Aplicação da Mecânica da Danificação em Materiais Compósitos Poliméricos Reforçados por Fibras de Vidro. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza, Ceará, Orientador: Enio Pontes de Deus.

MURAKAMI, S.(1988). Mechanical modelling of material damage. J. Appl. Mec., v. 55, p. 280- 286.

OLIVEIRA, V.; Análise dinâmica de torres e estruturas elevadas lateralmente carregadas, Tese de Mestrado, UFRJ, 1974, Rio de Janeiro.

OZELO R R M; SOLLERO P; SATO M and BARROS R S V, (2009). Monitoring Crack Propagation Using Digital Image Correlation And Cod Techniques, 20th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM).

PAN, B., XIE, H., GUO, Z., & HUA, T. (2007). Full-field strain measurement using a twodimensional savitzky-golay digital differentiator in digital image correlation. Optical Engineering, 46(3).

PAVAN, R. C. (2008). Aplicação da Teoria de Dano na análise do comportamento de materiais compósitos. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PÉRIÉ, J.-N., CALLOCH, S., CLUZEL, C., HILD, F., (2002). Analysis of a Multiaxial Test on a C/C Composite by Using Digital Image Correlation and a Damage Model. Experimental Mechanics 42 (3) 318-328.

PÉRIÉ, J.N., LECLERC, H., CALLOCH, S., ROUX, S., HILD, F., (2009). Digital Image Correlation and biaxial test on composite material for anisotropic damage law identification. "International Journal of Solids and Structures 46 - 2388-2396.

PETERS, W.H., RANSON, W.F. (1982). Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis, *Optical Engineering*, 21, p. 427.

PETERS, W. H., RANSON, W. F., SUTTON, M. A., CHU, T. C., & ANDERSON, J. (1983). Application of digital correlation methods to rigid body mechanics. *Optical Engineering*, 22(6), 738–742.

PINCUS, G. (1963). The performance of columns and beams continuously braced with diaphragms. Ph.D. thesis, Cornell University.

PROENÇA, S. P. B. (2000). Introdução à Mecânica do Dano e Fraturamento -. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PROENÇA, S.P.B & VENTURINI, W.S. (2000). Applications of damage mechanics to reinforced concrete structures. *Continuous Damage and Fracture*, Cachan, p. 233-241.

RABOTNOV, Y. N.(1969). Creep problems in structural members. Amsterdam.

RETHORE, J., GRAVOUIL, A., MORESTIN, F., & COMBESCURE, A. (2005). Estimation of mixedmode stress intensity factors using digital image correlation and an interaction integral. *International Journal of Fracture*, 132, 65–79.

ROUSCH, C. J.; HANCOCK, G J. (1994). A non-linear analysis model for simply-supported and continuous purlins. Research Report R688. School of Civil and Mining Engineering. The University of Sydney.

ROUSCH, C. J.; HANCOCK, G J. (1995). Tests of channel and Z-section purlins undergoing non-linear twisting. Research Report R708, School of Civil and Mining Engineering. The University of Sydney.

SÁNCHEZ-ARÉVALO, F.M. and PULOS, G. (2008). Use of digital image correlation to determine the mechanical behavior of materials, *Mater Charact* 56, pp. 1572–1579.

SAVIC, V., HECTOR, L.G. Jr, FEKETE, J.R., (2010) Digital Image Correlation Study of Plastic Deformation and Fracture in Fully Martensitic Steels, *Experimental Mechanics* 50:99–110.

SCURI, A.E., (2002). Fundamentos da Imagem Digital. Disponível em: <<http://www.tecgraf.puc-rio.br/~scuri/>>. Acesso em 12 dezembro 2010.

SCHENK, T. (1999). *Digital Photogrammetry – Volume I*. Laurelville:TerraScience, 428 p.

SHI, X., PANG, H., ZHANG, X., LIU, Q., & YING, M. (2004). In-situ micro-digital image speckle correlation technique for characterization of materials' properties and verification of numerical models. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 27(4), 659–667.

SIDOROFF, F. (1981). Description of Anisotropic Damage Application to Elasticity. In *IUTAM Colloquium on Physical Nonlinearities in Structural Analysis*, p.237-244, Springer-Verlag, Berlin.

SOKOL, L. (1996). Lateral stabilization by Steel Sheeting of Structural Members. *Thin- Walled Structures*, n. 3, v. 25, p. 207-217.

SUN, Z., LYONS, J. S., & McNEILL, S. R. (1997). Measuring microscope deformations with digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 27, 409–428.

SUTTON, M. & CHAO, Y. (1988). Measurement of strains in a paper tensile specimen using computer vision digital image correlation. *TAPPI Journal*, 70(4), 153–156.

SUTTON, M., M.CHENG, PETERS, W., CHAO, Y., & McNEILL, S. (1986). Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis. *Image and Vision Computing*, 4(3), 143–150.

SUTTON, M. & McFADDEN, C. (2000). Development of a methodology for non-contacting strain measurements in fluid environments using computer vision. *Optics and Lasers in Engineering*, 32, 367–377.

SUTTON, M.A.; MCNEILL, S.R.; JANG, J. and BABAI, M. (1988). Effects of subpixel image restoration on digital correlation error estimates, *Opt. Eng.*27, 870–877 .

SUTTON, M., WOLTERS, W., PETERS, W., RANSON, W., & McNEILL, S. (1983). Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and Vision Computing*, 1(3), 133–139.

TARIGOPULA, V., HOPPERSTAD, O., LANGSETH, M., CLAUSEN, A., & HILD, F. (2008). A study of localization in dual-phase high-strength steels under dynamic loading using digital image correlation and fe analysis. *Internation Journal of Solids and Structures*, 45(2), 601–619.

TRAHAIR, N. S. (1996). Laterally unsupported beams. *Engineering Structures*, n.10, v. 18, p. 759-768.

UDDANWADIKER, R. V.; PADOLE, P. M.; ARYA, H.; Effect of Variation of Root Post in Different Layers of Tooth: Linear vs Nonlinear Finite Element Stress Analysis, *Journal Biosci Bioeng*; 104: 363-70, 2007.

UGURAL, A.C., (1981). *Stresses in plates and shells*. McGraw-Hill.

VANLANDUIT, S., VANHERZEELE, J., LONGO, R., e GUILLAUME, P. (2009). A digital image correlation method for fatigue test experiments. *Opt. Laser Eng.*, 47, 371–378.

VENDROUX, G. & KNAUSS, W. G. (1998). Submicron deformation field measurements: Part 2. improved digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 38(2), 86–92.

VOYIADJIS, G. Z. e KATTAN, P.I.(1990). A coupled theory of damage mechanics and finite strain elasto-plasticity, Part II : Damage and finite strain plasticity. *Znt. J. Engng Sci.*, v.28, p.505-524.

VOYIADJIS, G. Z. e KATTAN, P.I.(1993a) Damage of fiber-reinforced composite materials with micromechanical characterization. *Znt. J. Solids Structures*, v.30, p.2757-2778.

ZHANG JUE , XIONG CHUNYANG, LI HONGJU, LI Ming, WANG JIANXIANG, FANG JING (2004), Damage and Fracture Evaluation of Granular Composite Materials by Digital Image Correlation Method, *Mechanica Sinica*, Vol.20, No.4.

ZIENKIEWICZ, O. C. E MORGAN, K., 1983 –“*Finite elements and approximation*”- John Wiley & Sons.

YONEYAMA, S., OGAWA, T., & KOBAYASHI, Y. (2007). Evaluating mixed-mode stress intensity factors from full-field displacement fields obtained by optical methods. *Engineering Fracture Mechanics*, 74, 1399–1412.