UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA PROJETO DE GRADUAÇÃO

KLAUS DAIAN HELMER MOULIM

ESTUDO EXPERIMENTAL DE AMOSTRAS DE PRFC COM TRILHA CONDUTORA IMPRESSA ATRAVÉS DE ENSAIO DE FLEXÃO A TRÊS PONTOS

> VITÓRIA 2017

KLAUS DAIAN HELMER MOULIM

ESTUDO EXPERIMENTAL DE AMOSTRAS DE PRFC COM TRILHA CONDUTORA IMPRESSA ATRAVÉS DE ENSAIO DE FLEXÃO A TRÊS PONTOS

Parte manuscrita do projeto de graduação do aluno **Klaus Daian Helmer Moulim**, apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. MSc. Osmar Ferreira Gomes Filho Coordenador: Prof. Dr. Guilherme Fabiano Mendonça dos Santos

KLAUS DAIAN HELMER MOULIM

ESTUDO EXPERIMENTAL DE AMOSTRAS DE PRFC COM TRILHA CONDUTORA IMPRESSA ATRAVÉS DE ENSAIO DE FLEXÃO A TRÊS PONTOS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Klaus Daian Helmer Moulim**, apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 20, de julho de 2017.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. MSc. Osmar Ferreira Gomes Filho. Universidade Federal do Espírito Santo Orientador

Prof. Dr. Fernando César Meira Menandro Universidade Federal do Espírito Santo Examinador

Prof. Dr. Lucas Silveira Campos Universidade Federal do Espírito Santo Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas oportunidades e conquistas que surgiram durante minha vida.

A meus pais, família, namorada e amigos que foram de grande importância nesta trajetória.

Ao Prof. Dr.-Ing. Rolf Lammering pela confiança e oportunidade concedida de desenvolver tal trabalho.

Ao Msc. Felix Heinrich e ao Msc. Osmar Ferreira Gomes Filho por todo auxílio e acompanhamento neste trabalho.

Aos Sr. Sergej Föll e Sra. Tatjana Fedorkova, por darem suporte nas práticas laboratoriais.

Aos Tenentes Leßmann, Lauer e Leiseder pelas correções gramaticais.

RESUMO

O Structural Health Monitoring (SHM) é uma técnica empregada no monitoramento de estruturas mecânicas para verificar suas condições de funcionamento. Sensores são componentes fundamentais no SHM, pois são eles que captam os dados de deformação que a estrutura monitorada sofre. Uma nova forma de se aplicar esses sensores é por meio de impressão, utilizando uma tinta com partículas de prata dissolvida que é aplicada a estruturas mecânicas leves e é fixada por meio de sinterização. O comportamento mecânico desta trilha condutora impressa sobre estruturas leves ainda não é conhecido suficientemente. Por esta razão o objetivo deste estudo é a investigação experimental destas trilhas condutoras de prata, que no futuro receberão características piezoeléctricas para atuarem como sensores. Para este estudo as trilhas condutoras serão impressas sobre um corpo de prova de fibra de carbono. Durante a execução do experimento um sistema de correlação de imagens e uma máquina de ensaios universal foram utilizados. Os corpos de prova foram carregados em um ensaio de flexão a três pontos. Em sequência receberam a trilha condutora de prata e passaram por um processo de sinterização para sua fixação. Os corpos de prova foram ensaiados novamente. O resultado dos experimentos mostra que a sinterização obteve sucesso na fixação da trilha condutor sobre a fibra de carbono. No entanto, o modulo de flexão sofreu grande alteração. Suspeita-se que isso aconteça devido à alta temperatura de sinterização.

Palavras chave: SHM, Sensor piezoeléctrico, Sensor impresso, Sensor sinterizado, Sensor de prata, Trilha condutora de prata.

ABSTRACT

Structural Health Monitoring (SHM) is a technique used in the monitoring of mechanical structures to verify their operating conditions. Sensors are a fundamental component of structural health monitoring. A new way to apply these sensors is by printing and using silver particles solution ink into a light-weight structure, while the adhesion is made by sinterization. The mechanical behavior of these printed tracks on light-weight structures is not yet sufficiently known. For this reason, this work is aimed at the experimental investigation of conductor tracks made of silver, which will have piezoelectric sensor characteristics in the future. For the investigation, the conductor tracks are printed on a carbon fiber reinforced plastic (CFRP). During the development of the experiment, an image correlation system and a universal testing machine were used. The samples were loaded in a three-point bending test. Subsequently, the samples tested were printed with a thin silver layer which was fixed by a sintering process on the respective sample. The samples were then loaded again. The results of the experiment show that the sintering process allows the silver layer to be successfully fixed on the CFRP. However, it is suspected that due to the high temperature within the sintering process. The modulus of elasticity of the samples would appear to be adversely affected.

Key words: SHM, Piezoelectric Sensor, Printed Sensor, Sintered Sensor, Silver Sensor, Silver conductive track.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Equipamento utilizado para ensaio de flexão a três pontos	19
Figura 2 - Calibrador padrão 80mm	20
Figura 3 - Calibragem do sistema	20
Figura 4 - Dimensões do corpo de prova	21
Figura 5 - Célula de carga 1kN	22
Figura 6 - Sistema de correlação de imagens	23
Figura 7 - Correlação	24
Figura 8 - Calibragem I	24
Figura 9 - Calibragem II	25
Figura 10 - Teste do Sistema Q400	25
Figura 11 - Resultados Q400	26
Figura 12 - Funcionamento de um straingauge	27
Figura 13 - Colagem do Straingauge	27
Figura 14 - Ponte de Wheatstone	28
Figura 15 - Amplificador de sinal	28
Figura 16 - Ensaio de flexão medindo a deformação com straingauge	29
Figura 17 - Ensaio sem trilha condutora	32
Figura 18 - Corpos de prova com trilha condutora	33
Figura 19 - CDP1 ST sensor de posição	36
Figura 20 - CDP1 CT sensor de posição	36
Figura 21 - CDP1 ST correlação	37
Figura 22 - CDP1 CT correlação	37
Figura 23 - Sensor de posição aumento de rigidez	38
Figura 24 - Correlação aumento de rigidez	39
Figura 25 - Comparação	40
Figura 26 - Seção transversal no microscópio	41
Figura 27 - CDP2 ST sensor de posição	44
Figura 28 - CDP2 CT sensor de posição	44
Figura 29 - CDP2 ST correlação	45
Figura 30 - CDP2 CT correlação	45
Figura 31 - CDP3 ST sensor de posição	46

Figura 32 - CDP3 CT sensor de posição	47
Figura 33 - CDP3 ST correlação	47
Figura 34 - CDP3 CT correlação	47
Figura 35 - CDP4 ST sensor de posição	48
Figura 36 - CDP4 CT sensor de posição	49
Figura 37 - CDP4 ST correlação	49
Figura 38 - CDP1 CT correlação	49
Figura 39 - CDP5 ST sensor de posição	50
Figura 40 - CDP5 CT sensor de posição	51
Figura 41 - CDP5 ST correlação	51
Figura 42 - CDP5 CT correlação	51
Figura 43 - CDP6 ST sensor de posição	52
Figura 44 - CDP6 CT sensor de posição	53
Figura 45 - CDP6 ST correlação	53
Figura 46 - CDP6 CT correlação	53
Figura 47 - CDP7 ST sensor de posição	54
Figura 48 - CDP7 CT sensor de posição	55
Figura 49 - CDP7 ST correlação	55
Figura 50 - CDP7 CT correlação	55
Figura 51 - CDP8 ST sensor de posição	56
Figura 52 - CDP8 CT sensor de posição	57
Figura 53 - CDP8 ST correlação	57
Figura 54 - CDP8 CT correlação	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações técnicas Tira Test 2810	18
Tabela 2 - Dimensões do equipamento	19
Tabela 3 - Dimensões dos corpos de prova	21
Tabela 4 - Ensaio de ruptura	30
Tabela 5 - Cálculo da amostra	31
Tabela 6 - Recálculo do nível de confiança	34
Tabela 7 - Dados CDP1	35
Tabela 8 - Sensor de posição aumento de rigidez	38
Tabela 9 - Correlação aumento de rigidez	39
Tabela 10 - Comparação	40
Tabela 11 - Dados CDP2	44
Tabela 12 - Dados CDP3	46
Tabela 13 - Dados CDP4	48
Tabela 14 - Dados CDP5	50
Tabela 15 - Dados CDP6	52
Tabela 16 - Dados CDP7	54
Tabela 17 - Dados CDP8	56

Lista de símbolos

Símbolos gregos

Σ	Desvio padrão da deflexão	mm
Símbolos latinos	5	
n	Número de corpos de prova	-
Z	Nível de confiança	-
E	Erro da deflexão	mm
E _f	Módulo de flexão	$kg * m^{-1} * s^{-2}$
L	Distância entre os apoios	mm
b	Largura	mm
h	Espessura	mm
F	Força	$kg * m * s^{-2}$
S	Deflexão	mm
Abuariaturaa		

Abreviaturas

SHM	Structural Health Monitoring
PRFC	Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
	1.1 Motivação	14
	1.2 Objetivos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
	2.1 SHM	16
	2.2 Piezeletricidade	16
	2.3 Correlação de imagens	16
	2.4 Módulo de elasticidade	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS	18
	3.1 Máquina de ensaios universal Tira Test 2810	18
	3.2 Ensaio de flexão a três pontos	18
	3.3 Medição da força	21
	3.4 Medição da deformação elástica	22
	3.4.1 Sensor de posição	22
	3.4.2 Sistema de correlação de imagens (Q400)	22
	3.4.2.1 Funcionamento básico da correlação por imagem	23
	3.4.2.2 Calibragem do sistema	24
	3.4.2.3 Teste	25
	3.4.3 Extensômetro	26
	3.5 Carga de ruptura	29
	3.6 Quantidade de corpos de prova a serem testados	30
	3.6.1 Amostra	31
4	DESENVOLVIMENTO	31
	4.1 Ensaio sem trilha condutora	31
	4.2 Ensaio com trilha condutora	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
	5.1 Resultados	35
	5.2 Análise	37
6	CONCLUSÃO	42
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
8	APÊNDICE	44

1 INTRODUÇÃO

Structural health monitoring (SHM) é uma técnica empregada no monitoramento de estruturas mecânicas com o intuito de conhecer as condições da estrutura em tempo real, como por exemplo verificar se a estrutura sofreu algum dano, uma deformação elevada ou mesmo para monitorar a vibração. Para que essa técnica seja empregada é necessário o uso de vários sensores em partes críticas da estrutura a fim de se obter informações sobre a condição em que a ela se encontra. Essa técnica permite não só o reconhecimento da falha de uma estrutura como também observar seu envelhecimento. [R. Farrar]

1.1 Motivação

Sensores são a base do SHM. Eles são utilizados não só para se verificar se as estruturas possuem danos, mas também para se averiguar se a mesma continua a trabalhar de maneira coerente com aquela para a qual foi projetada.

Hoje em dia um dos sensores que cumprem esse papel são os extensômetros. Estes são resistores que variam sua resistência em função da deformação que sofrem. Outros são sensores piezoelétricos. Que são feitos de materiais com uma característica especial, que mediante deformação sofrida por uma força conseguem gerar uma diferença de potencial, o inverso também é valido. [R. Farrar]

Os sensores piezoeléctricos em comparação com os extensômetros possuem algumas vantagens, como por exemplo: Maior precisão, sinal forte, ou seja, não precisam de amplificador de sinal e também não precisam de ponte de wheatstone. Sensores piezoeléctricos possibilitam uma captação de sinal com menos ruídos o que faz deles ideais para aplicações dinâmicas. [Vijaya, M.S.]

A estrutura de um avião é um exemplo de estrutura mecânica carregada dinamicamente, que pode ser monitorada pelo uso de SHM. A manutenção de um avião implica em dois tipos de custos: O planejamento da manutenção e implementação da mesma, assim como perda de voos pela impossibilidade de uso do avião durante a manutenção. Uma forma de se reduzir os custos de manutenção é prever as falhas. Utilizando o SHM. [W.J. Staszewski, C. Boller and G.R. Tomlinson]

Este trabalho se dedica ao estudo de trilhas condutoras de prata, que no futuro receberão propriedades piezoelétricas para atuar como sensores. Essa trilha condutora de prata pode ser fixada diretamente em cima da estrutura mecânica, no entanto sua influência sobre a estrutura mecânica no que diz respeito ao acréscimo de rigidez é desconhecida.

1.2 Objetivos

Tendo em vista que para muitos projetos um dos requisitos é a rigidez, é de grande importância se ter pleno conhecimento sobre esta característica do material com que se vai trabalhar, assim como dos sensores, principalmente em se tratando de uma estrutura leve e com grande densidade de sensores. O objetivo deste trabalho é a análise da influência mecânica que uma trilha condutora de prata pode exercer sobre uma estrutura leve de fibra de carbono, ou seja, verificar o acréscimo ou perda de rigidez que essa camada de prata confere à estrutura mecânica. Para atingir tal objetivo foram utilizadas placas de fibra de carbono que serviram como corpos de prova, representando uma estrutura mecânica leve. Para verificar o acréscimo de rigidez os corpos de prova tiveram sua rigidez medida sem a trilha condutora e com a trilha condutora, através de um ensaio de flexão a três pontos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SHM

Structural Health Monitoring é uma técnica empregada na detecção de danos a estruturas mecânicas. SHM consiste na observação de respostas de sensores que são distribuídos por uma estrutura mecânica a fim de se mensurar as deformações que a mesma sofre. Através dessa técnica é possível observar o envelhecimento de uma estrutura mecânica assim como uma rápida averiguação de sua integridade após eventos severos como por exemplo terremotos.

A escolha dos tipos de sensores para a aquisição de dados vai depender da aplicação que se deseja, viabilidade econômica e frequência com que se deseja coletar estes dados. Por exemplo se a preocupação é com a fadiga as aquisições de dados são feitas em curtíssimos espaços de tempo. [Czarnecki, Hoon Sohn Charles R. Farrar Francois M. Hemez Devin D. Shunk Daniel W. Stinemates Brett R. Nadler Jerry J.]

2.2 Piezeletricidade

A piezeletricidade é um fenômeno, que é reproduzido por alguns materiais, onde a energia mecânica é convertida diretamente em energia elétrica, o contrário também acontece, ou seja, um material com características piezoeléctricas irá gerar uma diferença de potencial quando sobe pressão e quando for submetido a uma tensão elétrica irá apresentar alterações geométricas. Isso faz dos materiais piezoeléctricos ideais para o uso em SHM uma vez que podem converter tensões advindas de forças diretamente em um sinal elétrico. [Giurgiutiu, Victor]

2.3 Correlação de imagens

É um método para se medir deslocamentos em uma superfície. A superfície que se deseja estudar deve ser preparada a fim de se trabalhar com uma quantidade discreta de dados. A superfície recebe então uma camada de tinta branca seguida de pontos pretos. Estes pontos serão nossas variáveis discretas. A superfície é fotografada várias vezes sendo que a primeira foto é a referência e as fotos

seguintes são feitas quando esta superfície está sofr8endo algum esforço. Os softwares de correlação de imagens analisam a posição dos pontos e baseado em sua imagem de referência seu deslocamento é calculado. Tendo posse deste resultado para diversos pontos é possível se obter um campo de deformação desta superfície. [Bing Pan, Kemao Qian, Huimin Xie and Anand Asundi]

2.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade de uma matéria é a constante de proporcionalidade entre uma tensão e uma deformação elástica. O módulo de elasticidade é a propriedade de um material que caracteriza sua rigidez. Muitas vezes é usual o cálculo do módulo de flexão dependendo da geometria com que se está trabalhando.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho o módulo de elasticidade será medido deformando o corpo de prova em regime elástico com uma força conhecida e medindo sua deformação. Para que esse estudo tivesse uma certeza estatística também era necessário descobrir quantos corpos de prova deveriam ser testados. Todos estes tópicos serão tratados adiante detalhadamente.

3.1 Máquina de ensaios universal Tira Test 2810

A principal máquina utilizada durante este estudo foi a máquina de ensaios universal Tira Test 2810, com a qual é possível realizar testes de tração, compressão e flexão. As informações técnicas desta máquina são mostradas na Tabela 1, a seguir.

Carga máxima (kN)	10
Peso (kg)	200
Resolução da travessa (mm)	0,001
Velocidade máxima (mm/min)	500
Alimentação (VA)	400

Tabela 1 - Informações técnicas Tira Test 2810

Fonte: Manual da Tira Test 2810

3.2 Ensaio de flexão a três pontos

A proposta do estudo é fazer a medição do módulo de flexão. Para isso foi utilizado o ensaio de flexão a três pontos, regido pela norma DIN EN ISO 14125, específica para PRFC. O ensaio foi realizado na máquina de ensaios universal TIRA Test 2810, que foi munida de equipamentos próprios para este fim, como pode ser visto na Figura 1.



Figura 1 - Equipamento utilizado para ensaio de flexão a três pontos

Fonte: Catálogo do fornecedor

Tabela 2 - Dimensões do equipamento

Equipamento	Valor em mm
Punção de dobra (Raio)	5 ± 0,2
Apoio (Raio)	2 ± 0,2

Fonte: Catálogo do fornecedor

A velocidade do ensaio foi escolhida de acordo com a norma para se manter a condição de semi estaticidade,1 mm/min. A norma determina que deve ser mantida uma distância de 80 milímetros entre os suportes do corpo de prova e isso é garantido pelo calibrador de dimensões padronizadas mostrado na Figura 2

Figura 2 - Calibrador padrão 80mm



Fonte: Autor

Na Figura 3 é possível ver a calibragem do conjunto, garantindo que a distância de 80 milímetros seja respeitada assim como o paralelismo entre a punção de dobra e os apoios.



Figura 3 - Calibragem do sistema

Fonte: Autor

As dimensões dos corpos de prova também são determinadas pela norma assim como pode ser visto na Figura 4 e Tabela 3.

Figura 4 - Dimensões do corpo de prova



Fonte: Norma DIN EN ISO 14125

Tabela 3 -	Dimensões	dos	corpos	de	prova

Dimensões dos CDP	
Comprimento em mm [l]	100
Distância entre os apoios em mm [L]	80
Largura em mm [b]	
Espessura em mm [h]	1,6

Fonte: Autor

3.3 Medição da força

Com a máquina de ensaios universal é possível carregar o corpo de prova semi estaticamente. Para medir a força foi utilizada uma célula de carga (de acordo com a última calibração comete um erro de 0,10% de seu range de medição) com range de medição de 1kN.

Figura 5 - Célula de carga 1kN



Fonte: Autor

3.4 Medição da deformação elástica

De posse da força e da geometria do corpo de prova ainda era necessário o conhecimento sobre a deformação para que se calculasse o modulo de elasticidade do CDP. A princípio três técnicas foram selecionadas para este fim.

3.4.1 Sensor de posição

A primeira e mais simples de todas seria a medição da flecha do corpo de prova através do sensor de posição embutido na máquina de ensaios universal, que nos diz o quanto a travessa da máquina se moveu.

3.4.2 Sistema de correlação de imagens (Q400)

Essa técnica necessita de um sistema de correlação de imagens composto de câmeras, iluminação especial e um software responsável pela correlação. Então, basicamente, os corpos de prova seriam preparados com uma pintura especial e seriam fotografados durante o ensaio, antes e depois de serem carregados. E o sistema de correlação iria calcular a flecha do corpo de prova.



Figura 6 - Sistema de correlação de imagens

Fonte: Autor

3.4.2.1 Funcionamento básico da correlação por imagem

A correlação de imagens foi feita utilizando o software do sistema de correlação de imagens Q400 da empresa LIMESS. Para que a correlação fosse feita com sucesso o corpo de prova teve sua superfície preparada através de uma pintura branca com pontos pretos, para que o sistema de correlação por imagem pudesse reconhecer estes pontos e segui-los antes e depois da deformação, reconhecendo assim o movimento de seu vetor posição e nos fornecendo a flecha do corpo de prova, como podem ser vistos na Figura 7.

Figura 7 - Correlação



Fonte: [Bing Pan, Kemao Qian, Huimin Xie and Anand Asundi]

3.4.2.2 Calibragem do sistema

Para se garantir a precisão é feita a calibragem do sistema, onde o software informa se a câmera está na posição adequada para a captação dos pontos ou se as configurações devem ser alteradas Figura 8 e Figura 9.



Figura 8 - Calibragem I

Fonte: Autor

Figura 9 - Calibragem II



Fonte: Autor

3.4.2.3 Teste

A Figura 10 mostra o ensaio através da câmera do sistema de correlação de imagens. Já a Figura 11 mostra a área selecionada para seguir os pontos e os resultados da deflexão do corpo de prova.



Figura 10 - Teste do Sistema Q400

Fonte: Autor

Figura 11 - Resultados Q400



Fonte: Autor

3.4.3 Extensômetro

Extensômetro é um resistor quem tem sua resistência variando de acordo com a deformação que sofre, como é mostrado na Figura 12. A ideia é que o straingauge seja colado sobre a superfície do corpo de prova (Figura 13) com o intuito de se medir a deformação que acontece no mesmo, usando de um amplificador de sinal e uma ponte de wheatstone (Figura 14 e Figura 15), para que a deformação seja medida através da variação de tensão elétrica.



Figura 12 - Funcionamento de um straingauge

Fonte: https://www.hbm.com/pt/6697/artigo-como-um-sensor-de-forca-realmente-funciona/

Figura 13 - Colagem do Straingauge

Fonte: Autor



Figura 14 - Ponte de Wheatstone

Fonte: Autor

Figura 15 - Amplificador de sinal



Fonte: Autor

Após a colagem um ensaio foi realizado Figura 16.



Figura 16 - Ensaio de flexão medindo a deformação com straingauge

Fonte: Autor

Optou-se pela não utilização de straingauge para a medição, pois ele iria acrescentar ao corpo de prova uma rigidez característica dele próprio. O que atrapalharia a medição do acréscimo de rigidez causado pela trilha condutora de prata, trazendo para o conjunto uma outra variável desconhecida.

3.5 Carga de ruptura

A proposta inicial deste estudo era que os testes fossem feitos com corpos de prova de características bem definidas e conhecidas. No entanto o fornecedor não conseguiu entregar os mesmos em tempo hábil. O ensaio foi realizado então com copos de prova que se tinha a disposição no laboratório, de tamanho como prescrito na norma, no entanto com características desconhecidas. Como a ideia do estudo é testar um corpo de prova sem trilha condutora e depois o mesmo corpo de prova com trilha condutora o desconhecimento da orientação das fibras e camadas não traria grande prejuízo, desde que se trabalhasse dentro dos limites do material sem que haja qualquer tipo de ruptura ou destacamento de fibras.

A carga de ruptura era desconhecida, então foi feito um ensaio com alguns corpos de prova até a ruptura para que se tivesse conhecimento. Os resultados são mostrados na Tabela 4.

CDP	Carga de ruptura em N
A	394,72
В	327,73
С	284,71
D	347,44
Е	409,71
F	355,78

Tabela 4 - Ensaio de ruptura

I Unite. Autor	Fonte:	Autor
----------------	--------	-------

Quanto a decisão sobre a carga que seria utilizada no ensaio havia um problema. Quanto menor a carga, menor a chance de se danificar o corpo de prova, mas também maior o erro relativo da medição da força (0,10% do range de medição). Já utilizando uma carga mais alta minimiza-se o erro relativo, mas pode-se ultrapassar os limites do material. A fim de se encontrar a melhor solução para este problema optou-se por se trabalhar com um coeficiente de segurança utilizando para o ensaio 70% da menor carga de ruptura, ou seja, 199,3N.

3.6 Quantidade de corpos de prova a serem testados

Para responder a esta pergunta foi utilizada esta equação estatística:

$$n \le \left(\frac{z.\,\sigma}{e}\right)^2 \tag{1}$$

Encontrada no artigo: "Wie groß muss meine Stichprobe sein, damit sie repräsentativ ist? 2011" [Von der Lippe, Peter]

Que relaciona as seguintes variáveis:

n - Número de corpos de prova Z - Nível de confiança $\sigma - Desvio padrão da amostra$ <math>e - Erro tolerado

3.6.1 Amostra

Utilizando a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ainda era necessário ter conhecimento sobre o desvio padrão da amostra. Para tal foi realizado um pré ensaio com alguns corpos de prova. Então, de posse do desvio padrão, do nível de confiança e do erro tolerável foi calculado o número mínimo de corpos de prova necessários Tabela 5.

Flecha em mm (199,3N)		α-	-1
Sensor		95	%
Posicao (TIRA)	Imagem (Q400)	Z	2
4,27	4,2615	1,9	96
4,27	4,2706	erro (5% da média) em mm	
4,62	4,6258	0,23	0,2231
4,18	4,1983	Média em mm	
4,33	4,3212	4,45	4,4606
4,42	4,4219	Desvio padrão	o em mm (σ):
4,21	4,2159	0,36	
5,33	5,3164	Quantidade de corpos de prova necessários (n)	
4,16	4,196	10	10
4,75	4,7783	10	10

Tabela 5 -	Cálculo	da	amostra
------------	---------	----	---------

Fonte: Autor

Como 10 corpos de prova iriam abranger ambas as formas de medição (tanto o sensor de posição como correlação de imagens) foi o número escolhido de corpos de prova.

4 DESENVOLVIMENTO

De posse do número de corpos de prova que deveriam ser ensaiados, da carga máxima que poderia ser utilizada, da célula de carga para medir a forca, da norma e das técnicas para se medir a deformação foi possível iniciar o ensaio.

4.1 Ensaio sem trilha condutora

Os corpos de prova foram preparados com tinta branca e pontos pretos para que pudessem ser reconhecidos pelo software do sistema de correlação de imagens. Os corpos de prova foram ensaiados por flexão a três pontos tendo os dados de

deformação coletados, tanto pelo sensor de posição como a correlação de imagens quando se tinha o corpo carregado a 20% da carga máxima, a 40%, 60%, 80% e 100%. Totalizando cinco medições.



Figura 17 - Ensaio sem trilha condutora

Fonte: Autor

4.2 Ensaio com trilha condutora

Os corpos de prova foram enviados a um laboratório que possui uma parceria com a universidade Helmut Schmidt, onde foram limpos e receberam a trilha condutora, sendo depois levados a um forno a 200°C por quatro horas para que a trilha condutora de prata se fixasse por meio de sinterização. Devido ao processo de limpeza três corpos de prova tiveram sua numeração removida, não sendo possível sua identificação e outros dois corpos de prova foram destruídos durante o processo. O ideal seria a preparação de novos corpos de prova, mas como o processo era

caro o estudo seguiu utilizando os resultados dos corpos de prova que se tinha. A Figura 18 mostra corpos de prova de posse da trilha condutora.



Figura 18 - Corpos de prova com trilha condutora

Fonte: Autor

Como o número de corpos de prova diminuiu não se pode garantir que a certeza estatística se manteve, então a mesma foi recalculada para 5 corpos de prova, como mostra a Tabela 6.

Flecha em mm (199,3N)		α	-1
Sensor		84,7	72%
Posicao (TIRA)	Imagem (Q400)	2	7
4,27	4,2615	1,4	43
4,27	4,2706	erro (5% da média) em mm	
4,62	4,6258	0,23	0,2231
4,18	4,1983	Média em mm	
4,33	4,3212	4,45	4,4606
4,42	4,4219	Desvio padrã	o em mm (σ):
4,21	4,2159	0,36	0,3584
5,33	5,3164	Quantidade de corpos de prova necessários (n)	
4,16	4,196	5	5
4,75	4,7783	3	3

Tabela 6 - Recálculo do nível de confiança

Fonte: Autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados dos ensaios serão exibidos em forma de diagrama (forca x deflexão). Os corpos de prova foram ensaiados sem e com trilha condutora tendo sua deflexão medida a partir de dois sensores (sensor de posição e correlação por imagem). Comparações serão feitas entre os corpos de prova antes e depois para se averiguar o acréscimo de rigidez conferido pela trilha condutora. As duas formas de medição da flecha também serão comparadas. A força se relaciona com a deflexão através da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

$$E_f = \left(\frac{L^3}{4bh^3}\right) \left(\frac{\Delta F}{\Delta s}\right) \tag{2}$$

Que é fornecida pela norma DIN EN ISO14125.

Onde o modulo de elasticidade a flexão é uma função da geometria do corpo de prova (L, b, h), da forca aplicada e da deflexão (s).

5.1 Resultados

Corpo de prova 1:

Dados do experimento

CDP 01						
	Sem trilh	а	Com trilha			
Carga (N)	Deflexão (r	(mm) Deflexão (mm)		nm)		
	Sensor de posição	Correlação	Sensor de posição	Correlação		
39 <i>,</i> 86	0,9	0,8833	0,92	0,9039		
79,72	1,74	1,7282	1,83	1,823		
119,58	2,58	2,5769	2,73	2,7302		
159,44	3,41	3,4209	3,64	3,6409		
199,3	4,25	4,2706	4,57	4,5839		

Tabela 7 - Dados CDP1

Fonte: Autor

Resultados obtidos com o sensor de posição:







Fonte: Autor

Através da equação 2 e dos dados medidos foi calculada uma redução do módulo de flexão de 99,21 GPa para 91,15 GPa, ou seja, uma redução de 8,13%

Resultados obtidos através da correlação de imagens:



Fonte: Autor



Através da equação 2 e dos dados medidos foi calculada uma redução do módulo de flexão de 98,08 GPa para 90,48 GPa, ou seja, uma redução de 7,75% Os resultados referentes aos outros corpos de prova estão no anexo caso seja necessária sua consulta. O capítulo seguinte traz uma análise geral de todos os corpos de prova.

5.2 Análise

O esperado era que todos os corpos de prova tivessem sua rigidez aumentada devido ao acréscimo de material, no entanto é possível observar que este resultado não foi obtido. No entanto os resultados foram semelhantes para as duas formas de medição, diferindo apenas quanto a precisão de cada sistema, como pode ser visto nas tabelas e imagens a seguir.

	Sensor de posição				
	Módulo de flexão em Gpa:		Aumonto do Ef om % (Songor nocioão)		
CDP	Sem trilha condutora:	Com trilha condutora:	Aumento de Ej em 76 (Sensor posição)		
1	99,21	91,15	-8,13%		
2	91,56	79,92	-12,72%		
3	101,65	92,77	-8,73%		
4	79,54	98,04	23,26%		
5	91,65	100,17	9,30%		
6*	99,08	98,96	-0,13%		
7*	97,58	98,75	1,20%		
8*	88,63	94,90	7,08%		

Tabela 8 - Sensor de posição aumento de rigidez



(Observação: * Esses corpos de prova foram provavelmente trocados durante a fase de limpeza pois tiveram sua numeração total ou parcialmente apagada.)

Figura 23 - Sensor de posição aumento de rigidez

Aumento do módulo de flexão (sensor de posição)



Fonte: Autor

	Correlação de imagens				
	Módulo de fl	exão em Gpa:	Aumonto do Ef am % (Sansor posição)		
CDP	Sem trilha condutora:	Com trilha condutora:	Admento de <i>Ej</i> em % (Sensor posição)		
1	98,08	90,48	-7,75%		
2	90,58	79,13	-12,65%		
3	100,35	92,15	-8,18%		
4	78,48	95,96	22,27%		
5	90,65	99,02	9,24%		
<mark>6*</mark>	98,23	98,23	0,00%		
<mark>7*</mark>	96,54	97,73	1,23%		
<mark>8*</mark>	87,58	94,10	7,45%		

Tabela 9 - Correlação aumento de rigidez

Fonte: Autor



Figura 24 - Correlação aumento de rigidez

Aumento do módulo de flexão (Correlação de imagens)

39

Fonte: Autor

4	0
4	υ

CDP	Aumento de <i>Ef</i> em % (Sensor posição)	Aumento de Ef em % (Correlação de imagens)	Diferença
1	-8,13%	-7,75%	0,37%
2	-12,72%	-12,65%	0,07%
3	-8,73%	-8,18%	0,55%
4	23,26%	22,27%	0,99%
5	9,30%	9,24%	0,06%
<mark>6*</mark>	-0,13%	0,00%	0,13%
<mark>7*</mark>	1,20%	1,23%	0,03%
<mark>8*</mark>	7,08%	7,45%	0,37%

Tabela 10 - Comparação

Fonte: Autor



Figura 25 - Comparação

Fonte: Autor

Após o ensaio foi analisada a seção transversal do ponto de maior tensão do corpo de prova Figura 26. Foi possível averiguar que a trilha condutora permaneceu aderida a superfície do corpo de prova após o ensaio.



Figura 26 - Seção transversal no microscópio

Fonte: Autor

6 CONCLUSÃO

O estudo aqui apresentado serve de base para outros trabalhos. O processo de fixação da trilha condutora através de sinterização obteve sucesso, como pode se verificar pela seção transversal do corpo de prova no ponto de maior tensão visto pelo microscópio. O acréscimo de rigidez pela adição da trilha condutora não foi como o esperado, pois houve diminuição para alguns corpos de prova e aumento para outros, tanto nas deflexões medidas pelo sensor de posição como pelo método de correlação por imagem, sendo que o resultado foi o mesmo em ambos. Acreditase que isso possa ter acontecido devido à alta temperatura e o longo tempo de exposição a essa temperatura, alterando assim as propriedades dos corpos de prova. Recomenda-se o uso de outra forma de fixação, que não envolva temperaturas tão altas, ou o uso de outro material para corpo de prova.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **R. Farrar, Charles und Worden, Keith.** *An introduction to structural health monitoring.* 2006. S. 303.

2. **R. Farrar, Charles und Worden, Keith.** *An introduction to structural health monitoring.* 2006. S. 304.

3. **Vijaya, M.S.** *Piezoelectric material and devices application in engineering and medical sciences.* 2013. S. 6.

4. **Giurgiutiu, Victor.** *Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors.* 2008. p. 13.

5. W.J. Staszewski, C. Boller and G.R. Tomlinson. *Health Monitoring of Aerospace Structures*. 2004. S. 1.

6. Czarnecki, Hoon Sohn Charles R. Farrar Francois M. Hemez Devin D. Shunk Daniel W. Stinemates Brett R. Nadler Jerry J. A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996–2001.

7. Fibre-reinforced plastic composites Determination of flexural properties (ISO 14125 : 1998) English version of DIN EN ISO 14125. 1988. p. 19.

8. von der Lippe, Peter. Wie groß muss meine Stichprobe sein, damit sie repräsentativ ist? 2011.

9. GmbH, TIRA. Dokumentation Universalfestigkeitsprüfmaschine TIRAtest 2810 E12 R 48/07. p. 4.

10. Bing Pan, Kemao Qian, Huimin Xie and Anand Asundi. *Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review.* 2009.

11. GmbH, TIRA. Tira Test 2810 site do fornecedor. [Online] http://www.europages.com/gallery-files/840001-850000/1219988.pdf.

12. Roell, Zwick. Site do fornecedor.

8 APÊNDICE

Corpo de prova 2:

Dados do experimento

CDP 02					
	Sem trilha		Com trilha		
Carga (N)	Deflexão (mm)		Deflexão (mm)		
	Sensor de posição	Correlação	Sensor de posição	Correlação	
39,86	0,98	0,956	1,13	1,1121	
79,72	1,88	1,8625	2,17	2,1589	
119,58	2,78	2,7736	3,2	3,1925	
159,44	3,69	3,6901	4,22	4,2305	
199,3	4,61	4,6258	5,3	5,3234	

Tabela 11 - Dados CDP2

Resultados obtidos com o sensor de posição:









Fonte: Autor

Através da equação 2 e dos dados medidos foi calculada uma redução/aumento do módulo de flexão de 91,56 GPa para 79,92 GPa, ou seja uma redução de 12,72%.

Resultados obtidos através da correlação de imagens:



Através da equação 2 e dos dados medidos foi calculada uma redução/aumento do módulo de flexão de 90,58 GPa para 79,13 GPa, ou seja uma redução de 12,56%.

Corpo de prova 3:

Dados do experimento:

CDP 03					
	Sem trilh	a	Com trilha		
Carga (N)	Deflexão (r	nm)	າm) Deflexão (n		
	Sensor de posição	Correlação	Sensor de posição	Correlação	
39,86	0,91	0,8885	0,92	0,9122	
79,72	1,73	1,7186	1,84	1,8265	
119,58	2,55	2,544	2,74	2,7314	
159,44	3,36	3,3733	3,61	3,6198	
199,3	4,18	4,1983	4,51	4,5219	

Tabela 12 - Dados CDP3

Fonte: Autor

Resultados obtidos com o sensor de posição:





Fonte: Autor



Através da equação 2 e dos dados medidos foi calculada uma redução/aumento do módulo de flexão de 101,65 GPa para 92,77 GPa, ou seja uma redução de 8,73%. Resultados obtidos através da correlação de imagens:





Através da equação 2 e dos dados medidos foi calculada uma redução/aumento do módulo de flexão de 100,35 GPa para 92,15 GPa, ou seja, uma redução de 8,18%.

Corpo de prova 4:

Dados do experimento:

CDP 04					
	Sem trilh	а	Com trilha		
Carga (N)	Deflexão (r	nm)	Deflexão (mm)		
	Sensor de posição	Correlação	Sensor de posição	Correlação	
39 <i>,</i> 86	1,11	1,0797	0,91	0,8949	
79,72	2,14	2,118	1,76	1,749	
119,58	3,17	3,1694	2,6	2,5995	
159,44	4,22	4,2248	3,45	3,459	
199,3	5,29	5,3164	4,3	4,3164	

|--|

Fonte: Autor

Resultados obtidos com o sensor de posição:





Fonte: Autor



Através da equação 2 e dos dados medidos foi calculada uma redução/aumento do módulo de flexão de 79,54 GPa para 98,04 GPa, ou seja, um aumento de 23,26%. Resultados obtidos através da correlação de imagens:





Fonte: Autor

Através da equação 2 e dos dados medidos foi calculada uma redução/aumento do módulo de flexão de 78,48 GPa para 95,96 GPa, ou seja, um aumento de 22,27%.

Corpo de prova 5:

Dados do experimento:

CDP 05				
Carga (N)	Sem trilha		Com trilha	
	Deflexão (mm)		Deflexão (mm)	
	Sensor de posição	Correlação	Sensor de posição	Correlação
39,86	0,94	0,9197	0,91	0,889
79,72	1,84	1,8223	1,74	1,7244
119,58	2,73	2,7305	2,56	2,5492
159,44	3,64	3,652	3,39	3,3946
199,3	4,57	4,585	4,23	4,247

Tabela 14 - Dados CDP5

Fonte: Autor

Resultados obtidos com o sensor de posição:



Figura 39 - CDP5 ST sensor de posição

Fonte: Autor



Através da equação 2 e dos dados medidos foi calculada uma redução/aumento do módulo de flexão de 91,65 GPa para 100,17 GPa, ou seja, um aumento de 9,30%. Resultados obtidos através da correlação de imagens:





Fonte: Autor

Através da equação 2 e dos dados medidos foi calculada uma redução/aumento do módulo de flexão de 90,65 GPa para 99,02 GPa, ou seja, um aumento de 9,24%.

Corpo de prova 6:

Dados do experimento:

CDP 06*					
Carga (N)	Sem trilha		Com trilha		
	Deflexão (mm)		Deflexão (mm)		
	Sensor de posição	Correlação	Sensor de posição	Correlação	
39,86	0,9	0,89	0,9	0,8917	
79,72	1,75	1,7375	1,77	1,7494	
119,58	2,58	2,5727	2,61	2,6024	
159,44	3,41	3,4209	3,44	3,4443	
199,3	4,26	4,2755	4,26	4,2705	

Tabela	15 - Da	dos CDP6
rabola	10 04	

Fonte: Autor

Resultados obtidos com o sensor de posição:



Figura 43 - CDP6 ST sensor de posição



53

Através da equação 2 e dos dados medidos foi calculada uma redução/aumento do módulo de flexão de 99,08 GPa para 98,96 GPa, ou seja, uma redução de 0,13%. Resultados obtidos através da correlação de imagens:





Através da equação 2 e dos dados medidos foi calculada uma redução/aumento do módulo de flexão de 98,23 GPa para 98,23 GPa, ou seja, uma redução de 0,00%.

Corpo de prova 7:

Dados do experimento:

CDP 07					
Carga (N)	Sem trilha		Com trilha		
	Deflexão (mm)		Deflexão (mm)		
	Sensor de posição	Correlação	Sensor de posição	Correlação	
39,86	0,89	0,8764	0,93	0,9173	
79,72	1,74	1,728	1,78	1,7651	
119,58	2,57	2,5767	2,62	2,611	
159,44	3,43	3,4402	3,45	3 <i>,</i> 4588	
199,3	4,3	4,3212	4,3	4,3186	

Tabela 16 - Dados CDP7

Fonte: Autor

Resultados obtidos com o sensor de posição:



Figura 47 - CDP7 ST sensor de posição

Fonte: Autor



Através da equação 2 e dos dados medidos foi calculada uma redução/aumento do módulo de flexão de 97,58 GPa para 98,75 GPa, ou seja, um aumento de 1,20%. Resultados obtidos através da correlação de imagens:





Através da equação 2 e dos dados medidos foi calculada uma redução/aumento do módulo de flexão de 96,54 GPa para 97,73 GPa, ou seja, um aumento de 1,23%.

Corpo de prova 8:

Dados do experimento:

CDP 08					
Carga (N)	Sem trilha		Com trilha		
	Deflexão (mm)		Deflexão (mm)		
	Sensor de posição	Correlação	Sensor de posição	Correlação	
39,86	1,01	0,9821	0,88	0,8637	
79,72	1,93	1,9168	1,75	1,74	
119,58	2,86	2,8521	2,62	2,6177	
159 <i>,</i> 44	3,8	3 <i>,</i> 8053	3,5	3,5015	
199 <i>,</i> 3	4,76	4,7785	4,38	4,3951	

Tabela 17 - Dados CDP8

Fonte: Autor

Resultados obtidos com o sensor de posição:



Figura 51 - CDP8 ST sensor de posição



Através da equação 2 e dos dados medidos foi calculada uma redução/aumento do módulo de flexão de 88,63 GPa para 94,90 GPa, ou seja, um aumento de 7,08%. Resultados obtidos através da correlação de imagens:





Através da equação 2 e dos dados medidos foi calculada uma redução/aumento do módulo de flexão de 87,58 GPa para 94,10 GPa, ou seja, um aumento de 7,45%.