



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PATERNAK DE SOUZA BARROS

**ESTUDO DE TENSÕES RESIDUAIS ATRAVÉS DE DESLOCAMENTO DE
PONTOS COORDENADOS BASEADO EM IMAGENS DIGITAIS**

Recife
2020

PATERNAK DE SOUZA BARROS

**ESTUDO DE TENSÕES RESIDUAIS ATRAVÉS DE DESLOCAMENTO DE
PONTOS COORDENADOS BASEADO EM IMAGENS DIGITAIS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Engenharia de
Materiais e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira.

Recife
2020

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

B277e Barros, Paternak de Souza.
Estudo de tensões residuais através de deslocamento de pontos coordenados baseado em imagens digitais / Paternak de Souza Barros - 2020.
78 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2020.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia mecânica. 2. Tensões residuais. 3. Sistema de medição. 4. Imagens digitais. I. Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti (Orientador). II. Título.

UFPE
621 CDD (22. ed.) BCTG/2020-231

PATERNAK DE SOUZA BARROS

**ESTUDO DE TENSÕES RESIDUAIS ATRAVÉS DE DESLOCAMENTO DE
PONTOS COORDENADOS BASEADO EM IMAGENS DIGITAIS**

Tese submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica (PPGEM) da Universidade
Federal de Pernambuco como pré-
requisito para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia Mecânica em
03 / 03 / 2020

Aprovada em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Oscar Olímpio de Araujo Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Yogendra Prasard Yadava (Examinador Intern)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Pablo Batista Guimarães (Examinador Externo)
Instituto Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Tiago de Sousa Antonino (Examinador Externo)
Instituto Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Sanguinetti, por seu apoio, conselhos, paciência e dedicação, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

A querida e amada Ana Martins, cuja presença, força e inspiração foram de fundamental importância nos momentos decisivos para esta pesquisa chegar a sua conclusão, por toda sua compreensão e carinho, O Autor (2020) deixa um especial agradecimento a você.

Ao grande amigo Israel que colaborou em diversos momentos da pesquisa.

Aos técnicos, Janaína, Rubens e Ivaldo, pelo auxílio na parte experimental.

A CAPES pelo apoio financeiro.

A todos aqueles cuja participação, direta ou indireta auxiliam na execução deste trabalho.

RESUMO

As tensões residuais atuam em diversos materiais e processos de fabricação, sendo a sua aferição de fundamental importância para a determinação da real resistência do material. Dentre os diversos processos de medição de tensões residuais destacam-se a Difração de Raios- X e o furo cego. Baseando-se nesses métodos o Laboratório de Termometria e Simulações Termomecânicas da UFPE desenvolveu o Método de Deslocamento de Pontos Coordenados (DPC), mas pesquisas realizadas ao longo dos anos mostraram algumas deficiências neste método. Desta forma surgiu a necessidade de se criar uma metodologia alternativa para aferição das tensões residuais. O método de Deslocamento de Pontos Coordenados Por Imagens Digitais (DPC – ID) destaca-se por sua simplicidade e eficácia na proposta de determinar o campo superficial de tensões residuais, caracterizando-se por ser não destrutivo e realizar as medições fazendo uso apenas de imagens digitais, tornando portátil. A presente pesquisa desenvolve o método em escala laboratorial e fornece os parâmetros para a sua padronização, resultado este patenteado e pronto para ser aplicado em escala industrial. Como principais resultados obtidos destaca-se a determinação dos parâmetros metrológicos e a validação mediante a comparação dos resultados com outras metodologias obtendo-se resultados satisfatórios e condizentes com a literatura.

Palavras-chave: Tensões residuais. Sistema de medição. Imagens digitais.

ABSTRACT

Residual stresses act on various materials and manufacturing processes, and their measurement is of fundamental importance for determining the real strength of the material. Among the various residual stress measurement processes, X-Ray Diffraction and Blind Hole stand out. Based on these methods, the Laboratory of Thermometry and Thermomechanical Simulations at UFPE developed the Coordinate Points Displacement Method (CPD), but research carried out over the years has shown some deficiencies in this method. Thus, the need arose to create an alternative methodology to measure residual stresses. The method of Coordinate Points Displacement by Digital Images (CPD - DI) stands out for its simplicity and effectiveness in the proposal to determine the surface field of residual stresses, characterized by being non-destructive and performing measurements using only images making it portable. This research develops the method on a laboratory scale and provides the parameters for its standardization, a result that is patented and ready to be applied on an industrial scale. The main results obtained include the determination of metrological parameters and validation by comparing the results with other methodologies, obtaining satisfactory and consistent results according with the literature.

Keywords: Residual stress. Measure system. Digital images.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Difração de Raios – X em uma estrutura cristalina.....	21
Figura 2 – Exemplo de um difratograma mostrando a intensidade do feixe em Contagens por Segundo (cps) em função do ângulo de Bragg 2θ	22
Figura 3 – Efeito da aplicação de esforço em um difratograma.	22
Figura 4 – Modelo de tensões no estado plano.....	23
Figura 5 – Disposição dos extensômetros para aferir as deformações na superfície do furo.....	24
Figura 6 – Marcações na chapa para a realização do DPC.....	25
Figura 7 – Representação de uma Imagem Digital como uma função bidimensional na qual cada ponto representa um pixel.....	27
Figura 8 – Formação de diversos tons de cinza através da variação do brilho.....	27
Figura 9 – Mapa de Cores e Seleção de brilho para formar a cor do pixel.	28
Figura 10 – Imagem formada por apenas um pixel com resolução de 1 X 1	28
Figura 11 – Imagem com resolução 2 x 2 formada por 4 pixels	28
Figura 12 – Efeito do Aumento da Resolução para uma mesma imagem	29
Figura 13 – Influência da Resolução na qualidade dos detalhes de uma imagem digital, a esquerda uma imagem com o dobro de resolução da direita.	30
Figura 14 – Comparação entre uma ampliação ótica e digital	30
Figura 15 - Principais elementos de um microscópio otico	32
Figura 16 – Principais etapas para aplicação do método DPID.....	35
Figura 17: Punção Automático usado para marcar as amostras.	36
Figura 18: Superfície ilustrativa a ser mapeada Escala 2:1.....	37
Figura 19: Superfície a ser mapeada (a esquerda). $\frac{1}{4}$ da malha necessária para se mapear a superfície usando a objetiva de 5x (a direita). As áreas hachuradas representam as regiões sobrepostas.	40
Figura 20: Representação do posicionamento da malha sobre a superfície a ser mapeada.....	40
Figura 21: Esquema da formação do sistema de coordenadas para aferição da posição da marcação.	41
Figura 22 – Imagem com ampliação de 50x e Aferição do tamanho dos pixels	43

Figura 23 – Escala com resolução de 0,01 mm fotografada com ampliação de 50X.	44
Figura 24 – Escala com resolução de 0,01 mm fotografada com ampliação de 500X.	45
Figura 25 – Abertura de um micrômetro de 0,05 mm fotografada com ampliação de 50X.	46
Figura 26: Procedimento para a realização da medição de um ponto localizado no centro do pixel.	48
Figura 27: Incerteza máxima do sistema de medição para a marcação localizada a 0,25 da borda do pixel.	48
Figura 28 – (a) Exemplo de erro de montagem com duas imagens a serem sobrepostas. (b) sobreposição do detalhe com erro de montagem. (c) montagem realizada da forma correta.	49
Figura 29 - Efeito da montagem. Detalhe, abaixo mostrando uma escala micrométrica.	50
Figura 30 – Montagens realizadas para avaliar a repetibilidade do sistema de medição	51
Figura 31 – Peça com rebaixo, utilizada para analisar a existência do erro devido ao ajuste da distância focal.	52
Figura 32 – Montagem da Peça com rebaixo utilizando o ajuste focal, na região central.	52
Figura 33: Representação esquemática do processo de laminação.	54
Figura 34: Esquema mostrando o comportamento das tensões residuais em uma chapa laminada.	54
Figura 35 – Amostras de AA1100 usadas para averiguar o efeito do corte nas Tensões Residuais (Escala em mm).	55
Figura 36 – Amostras de Alumínio AA1100 laminadas a frio. Amostra cortada (A Esquerda) Amostra sem corte (A Direita). Escala em (mm).	55
Figura 37: Esquema mostrando o ponto de referência (Origem do sistema de coordenadas) e a deformação sofrida pelas amostras laminadas	56
Figura 38: Procedimento para aferição das coordenadas da marcação	56
Figura 39 – Amostras do Aço ASTM A131 AH36 submetidas a um processo de soldagem prontas para serem cortadas na dimensão de 24,5 mm.	59

Figura 40 – Convenção utilizada para identificação das marcações e aferição da Tensões Residuais.....	60
Figura 41 – Posições das Marcações e suas respectivas tensões para a Amostra 01	63
Figura 42 – Posições das Marcações e suas respectivas tensões para a Amostra 02	64
Figura 43 – Posições das Marcações e suas respectivas tensões para a Amostra 03	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tamanho das imagens em milímetros associado a ampliação da objetiva.	38
Tabela 2 – Número de imagens necessárias para cobrir uma distância de 25 mm para cada objetiva.	38
Tabela 3 – Tamanho corrigido das imagens sobrepostas em milímetros para cada objetiva.	39
Tabela 4 – Número de imagens necessárias para cobrir uma distância de 25 mm para cada objetiva.	39
Tabela 5 – Tamanho dos pixels em milímetros associados a ampliação da objetiva.	43
Tabela 6 – Tamanho dos pixels associados a ampliação da objetiva.....	45
Tabela 7 – Tamanho dos pixels associados a ampliação da objetiva.....	46
Tabela 8 – Tamanho dos pixels associados a ampliação da objetiva.....	47
Tabela 9 – Diversas medições realizadas para um comprimento de 1,00 mm.	50
Tabela 10 – Medições realizadas para avaliar a repetibilidade do sistema.	51
Tabela 11 – Medições realizadas para avaliar a repetibilidade do sistema.	53
Tabela 12 – Comparação dos resultados das Tensões Residuais para as diversas hipóteses de comprimento base.....	57
Tabela 13 – Parâmetros de Soldagem utilizados.	59
Tabela 14 – Posição das marcações (em pixels) para a amostra 01 antes e depois do TTAT.....	60
Tabela 15 – Posição das marcações (em pixels) antes e depois do TTAT para a amostra 02.....	61
Tabela 16 – Posição das marcações (em pixels) antes e depois do TTAT para a amostra 03.....	61
Tabela 17 – Deformações específicas e tensões residuais geradas pela soldagem para a amostra 01.....	61
Tabela 18 – Deformações específicas provocadas e tensões residuais geradas pela soldagem para a amostra 02.....	62
Tabela 19 – Deformações específicas provocadas e tensões residuais geradas pela soldagem para a amostra 03.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CP	Corpo de Prova
CPS	Contagens Por Segundo
DPC	Deslocamento de Pontos Coordenados
dpi	<i>“Dots Per Inch”</i> (Pontos Por Polegada)
DPC – ID	Deslocamento de Pontos Coordenados por Imagens Digitais
DRX	Difração de Raios – X
LTSTM	Laboratório de Termometria e Simulações Termomecânicas
MB	Metal Base
MMC	Máquina de Medição de Coordenadas
MO	Microscópio Ótico
ppi	<i>“Pixels Per Inch”</i> (Pixels Por Polegada)
TR	Tensão Residual
TTAT	Tratamento Térmico de Alívio de Tensões
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado	Unidade
E	Módulo de Elasticidade	[Pa]
i	Indicador de Direção	Adimensional
j	Indicador de Direção	Adimensional
m	Número Natural Representativo de Algum Valor	Adimensional
n	Número Inteiro Representando a Ordem De Difração	Adimensional
n	Número Natural Representativo de Algum Valor	Adimensional
r	Raio	[M]
ε	Deformação	[M]
θ	Ângulo de Incidência	[°]
λ	Comprimento de Onda	[m]
σ	Tensão	[Pa]
ν	Coefficiente de Poisson	Adimensional
d	Distância Interplanar no Cristal	[m]
α	Inclinação do Eixo Principal	[°]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS.....	18
2.1	OBJETIVO GERAL.....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	19
3.1	TENSÕES RESIDUAIS	19
3.2	TÉCNICAS DE AFERIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS	20
3.2.1	Difração de Raios – X.....	20
3.2.2	Método do Furo Cego	23
3.2.3	Método de Deslocamento de Pontos Coordenados (DPC).....	25
3.3	EFEITO DO TTAT NAS TENSÕES RESIDUAIS	26
3.4	IMAGENS DIGITAIS.....	26
3.5	EQUIPAMENTOS PARA OBTENÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS	31
3.6	MICROSCÓPIO OTICO	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	35
4.1.1	Definição do Tamanho das Amostras.....	35
4.1.2	Marcação das Posições	36
4.1.3	Processo Gerador de Tensões Residuais	37
4.2	MAPEAMENTO DA SUPERFÍCIE	37
4.2.1	Aferição Das Distâncias.....	41
4.3	DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA METROLÓGICO	43
5.2	AVALIAÇÃO DAS FONTES DE ERRO NO SISTEMA DE MEDIÇÃO	49
5.2.1	COMPOSIÇÃO DA IMAGEM.....	49
5.2.2	REPETIBILIDADE DAS MEDIÇÕES	51
5.2.3	AJUSTE DA DISTÂNCIA FOCAL.....	52
5.3	APLICAÇÃO DO MÉTODO DPC – ID	53

5.3.1	LAMINAÇÃO	53
5.3.1.1	Efeito do Corte Nas Amostras	54
5.4	APLICAÇÃO DO MÉTODO EM JUNTAS SOLDADAS.....	58
6	CONCLUSÃO	66
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	67
	REFERÊNCIAS	68
	APÊNDICE B – TRABALHOS COMPLETOS PUBLICADOS EM ANAIS DE	
	CONGRESSOS	75
	APÊNDICE C – RESUMOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSOS	77
	APÊNDICE D – PATENTES E REGISTROS.....	78

1 INTRODUÇÃO

As Tensões Residuais (TR) podem ser definidas como um esforço interno no material, remanescente após findados todos os carregamentos externos, sejam eles de origem térmica ou mecânica. (WITHERS e BHADSHIA, 2001b).

As Tensões Residuais podem atuar de maneira prejudicial, geralmente trativas, reduzindo o limite de escoamento, ou benéfica, em geral compressivas, aumentando a resistência a fadiga, do produto fabricado (WITHERS e BHADSHIA, 2001a).

Como principais métodos de aferição das tensões residuais atuantes na superfície de um material podem-se citar os Métodos de difração de raios – X e o método do furo cego, ambos completamente aceitos na atualidade, mas cada qual com suas devidas limitações (KANDIL, *et al.*, 2001).

Frente a este cenário o Laboratório de Termometria e Simulações Termomecânicas (LTSTM) situado na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) desenvolveu uma metodologia alternativa para aferir tensões residuais utilizando uma Máquina de Medição De Coordenadas (MMC) (SIQUEIRA FILHO, *et al.*, 2010).

Tal método tem como base o Furo Cego, e consiste em avaliar o deslocamento de marcações superficiais na peça antes e depois da aplicação de um Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT) usando uma Máquina de Medição de Coordenadas (MMC) (SIQUEIRA FILHO, *et al.*, 2013).

Diversos autores utilizaram e aprimoraram este método de análise de tensões residuais, (SUGAHARA, *et al.*, 2018; MENDES, *et al.*, 2017), entre outros e estas análises mostraram certas dificuldades durante a utilização do método DPC.

Frente a este cenário a presente pesquisa apresenta um novo método alternativo ao DPC para suprir suas deficiências e tornar a metodologia de aferição das tensões residuais mais simples e eficaz.

O método proposto segue os mesmos fundamentos do DPC, diferenciando-se no fato de aferir os deslocamentos dos pontos coordenados mediante a fotografia da superfície previamente marcada. Nesta variação, as Tensões Residuais são aferidas através da análise da variação das coordenadas obtidas a partir de imagens digitais.

Como principais vantagens em relação ao método DPC, a análise através de imagens digitais permite o uso de marcações menores e um maior controle das

fontes de erro do sistema de medição, fornecendo resultados mais confiáveis, além de ser um método de medição portátil.

Como principal resultado desta pesquisa, tem-se o desenvolvimento de um método simples, de fácil aplicação e baixo custo para aferição de tensões residuais nos mais diversos tipos de amostras. Processo patenteado com número de registro BR10201901142 (FERREIRA, *et al.*, 2019).

Durante as pesquisas, a metodologia foi aplicada em escala laboratorial e por este motivo as amostras tiveram suas dimensões limitadas e foi determinado o tamanho padrão das amostras a serem analisadas, o sistema de medição foi calibrado para garantir a confiabilidade do método e seu desempenho analisado em alguns processos geradores de tensões residuais.

2 OBJETIVOS

Nesta seção discrimina-se o principal objetivo da pesquisa bem como as principais etapas executadas para alcançá-lo.

2.1 OBJETIVO GERAL

Elaboração de um processo para medição de tensões residuais a partir de imagens digitais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Padronizar as dimensões das amostras a serem utilizadas;
- b) Determinar o efeito do corte das amostras no campo de tensões residuais;
- c) Determinar as possíveis fontes de erro e seus efeitos no sistema de medição;
- d) Avaliar a eficácia do método em processos geradores de Tensões Residuais.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção encontram-se organizados de forma resumida os principais resultados e pesquisas desenvolvidas no campo de aferição de tensões residuais nos quais o texto baseia-se para fundamentar sua metodologia e resultados.

3.1 TENSÕES RESIDUAIS

Tensões Residuais podem ser definidas como esforços autoequilibrados existentes nos materiais na ausência de carregamento externo, deslocamentos ou gradientes de temperatura (EFRATI, SHARON e KUPFERMAN, 2013).

Quanto a origem as Tensões Residuais possuem três fontes, as quais embora distintas podem coexistir entre si:

- a) De origem mecânica, produzidas por deformações plásticas não uniformes, provocadas por processos de esforço mecânico (TOTTEN, 2002).
- b) De origem térmica, consequência do aquecimento ou resfriamento não homogêneo do material provocado por gradientes de temperatura. (ERICSSON, 1987).
- c) De origem metalúrgica, associadas a reações químicas, precipitações e transformações de fase não uniformes, produzidas por tratamentos térmicos e a exposição a produtos químicos na superfície do material (OSGOOD, 2013).

É possível agrupar as tensões residuais em três tipos principais de acordo com a porção de material na qual elas podem ser observadas onde a classificação mais comum dos tipos de tensões residuais existentes está definida na literatura quanto à área de abrangência (NASIR, *et al.*, 2016).

- a) Tensões Residuais do Tipo I: São Tensões Residuais a níveis Macroscópicos, consideradas quase homogêneas na escala de vários grãos e equilibradas nos limites de todo os materiais. Ocorrem em materiais deformados plasticamente de maneira não uniforme; (ALMEIDA, 2017)
- b) Tensões Residuais do tipo II: São Tensões Residuais a níveis Microscópicos, consideradas quase homogêneas na escala de um grão e equilibrados nos limites dos contornos de alguns grãos do material. Podem ocorrer em interfaces entre fases e partículas precipitadas e a matriz. (ALMEIDA, 2017)

- c) Tensões Residuais do tipo III: São Tensões Residuais a níveis Submicroscópicos, heterogêneas na escala de algumas distâncias interatômicas e equilibradas nos limites de algumas células unitárias. Ocorrem nos materiais metálicos sujeitos a processos que produzam descontinuidades na rede cristalina (ALMEIDA, 2017).

3.2 TÉCNICAS DE AFERIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS

Existem diversas técnicas de aferição das tensões residuais, cada qual adequada para uma dada situação. No entanto, o método de medição desenvolvido na presente pesquisa concorre diretamente com a Difração de Raios – X e o Furo Cego, os quais aferem apenas tensões superficiais (SCHAJER, 2013), ou seja, no estado plano de tensões.

3.2.1 Difração de Raios – X

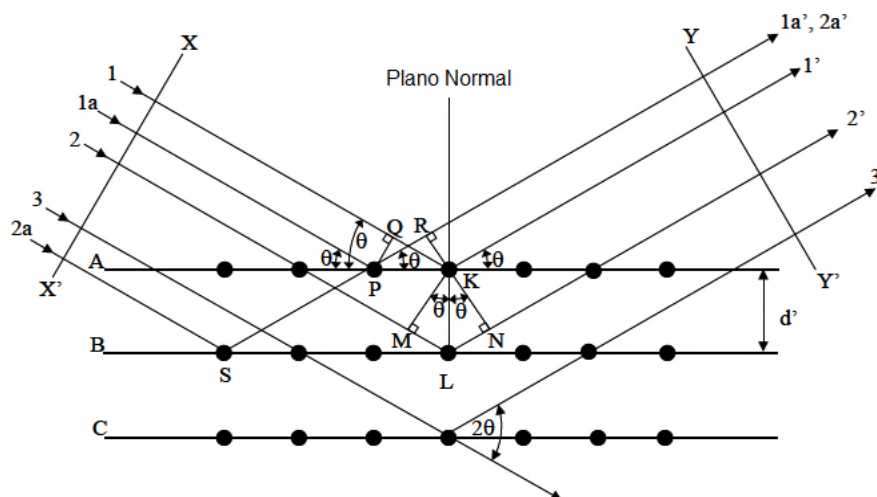
O método de Difração de Raios-X (DR-X) estima as tensões residuais com base na deformação superficial causada pela razão da variação da distância interplanar com e sem deformação, calculando a tensão segundo equações derivadas da teoria da elasticidade (FITZPATRICK, *et al.*, 2005).

A presença de tensões induz a variação de distância no retículo cristalino aferida com base na lei de Bragg, representada na equação 1.

$$n\lambda = 2d.\text{sen}(\theta) \quad (1)$$

Quando um feixe de raios-X é dirigido para superfície de um corpo, uma parte desses raios é absorvida pelos átomos enquanto outra parte é enviada de volta em todas as direções da área irradiada, a Figura 1 esquematiza o princípio da Difração de Raios – X, bem como os parâmetros utilizados na lei de Bragg (FITZPATRICK, *et al.*, 2005).

Figura 1 – Difração de Raios – X em uma estrutura cristalina

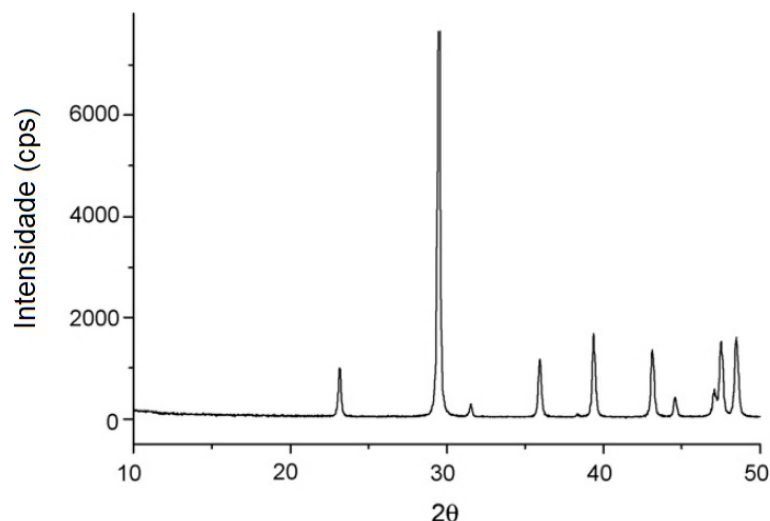


Fonte: Adaptado de Fitzpatrick, *et al.* (2005).

Devido à grande capacidade de absorção de raios – x pela matéria a profundidade de ação desta técnica é limitada às camadas superficiais, na ordem de 10 a 20 micrômetros, caracterizando este procedimento como não destrutivo (MARTINS, *et al.*, 2004).

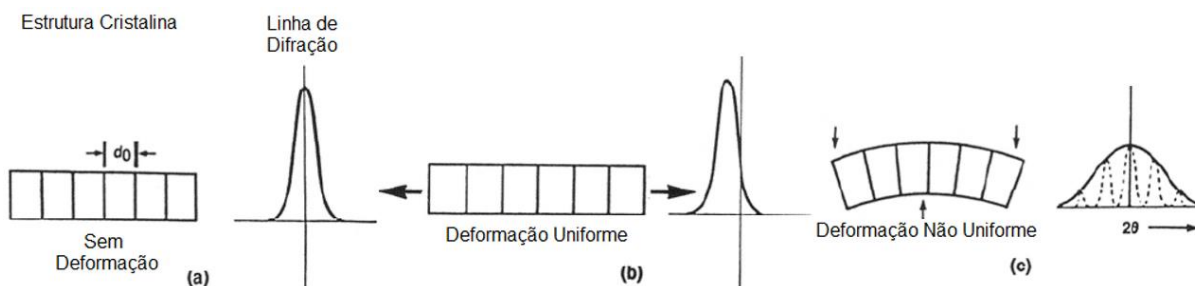
A Difração de Raios – X mede a intensidade máxima de raios difratados para um determinado ângulo de varredura gerando um difratograma conforme a Figura 2 (MA, HHUANG e CHEN, 2002). Assim quando o material sofre a aplicação de algum esforço, ocorre uma distorção nos picos do difratograma (CONNOLLY, 2012). A Figura 3 mostra de forma esquemática estes deslocamentos para três situações distintas, Figura 3.a sem esforço e sem deformação associada, Figura 3.b com esforço uniformemente aplicado e uma deformação uniforme e Figura 3.c um esforço combinado com deformação não uniforme.

Figura 2 – Exemplo de um difratograma mostrando a intensidade do feixe em Contagens por Segundo (cps) em função do ângulo de Bragg 2θ



Fonte: Adaptado de Campos; Ribeir; Cardoso (2007).

Figura 3 – Efeito da aplicação de esforço em um difratograma.



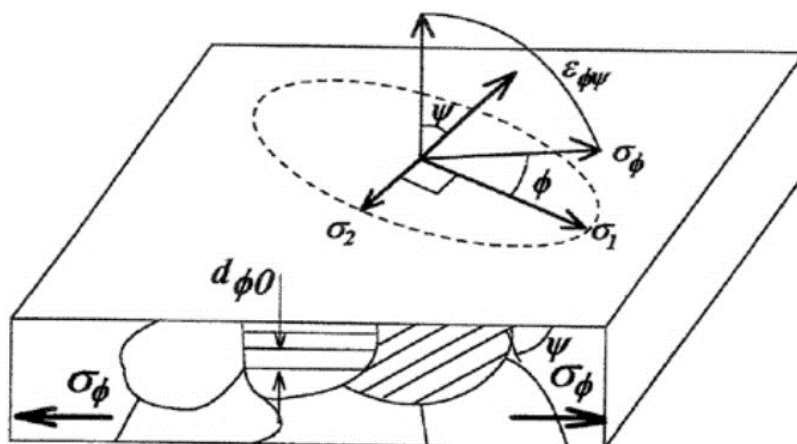
Fonte: Adaptado de Connolly (2012).

(a) Sem esforço (b) esforço uniforme (b) Esforço uniforme (c) Esforço combinado.

Quando ocorre um aumento na distância interplanar há uma redução do ângulo de difração, caracterizando um esforço trativo, analogamente quando há um esforço compressivo as distâncias interplanares se tornam menores aumentando o ângulo de difração. (PREVÉY, 1977).

A técnica de DRX considera para o cálculo das tensões o regime elástico. A Figura 4 apresenta o modelo de tensões no estado plano, ou seja, existem duas tensões principais (σ_1 e σ_3), enquanto a tensão normal σ_2 é nula. No entanto a nulidade do esforço normal não impede a existência de uma deformação normal ($\epsilon_{\Phi\Psi}$), originada devido as contrações do coeficiente do Poisson provocadas pelas tensões principais (PREVÉY, 1986).

Figura 4 – Modelo de tensões no estado plano.



Fonte: PREVÉY (1986).

Baseando-se no esquema da Figura 4, é possível determinar a tensão residual fazendo uso da equação 2 (PREVÉY, 1986).

$$\sigma_{\Phi} = \left(\frac{E}{1 + \nu} \right) \left(\frac{d_{\psi} - d_{\perp}}{d_{\perp}} \right) \left(\frac{1}{\sin^2 \psi} \right) \quad (2)$$

3.2.2 Método do Furo Cego

Esta técnica foi apresentada por Mathar (1934), sendo continuamente desenvolvida por outros pesquisadores nos anos seguintes, levando a criação da norma (ASTM E837) em vigência até a presente data, a qual apresentaria um procedimento para a aplicação do método usando extensômetros (SCHAJER, 2008).

De acordo com Schajer (2008) O método do furo possui uma fácil aplicação e causa um dano localizado de pequenas proporções na peça, podendo ser facilmente reparado ou até mesmo ignorado. Este método consiste em:

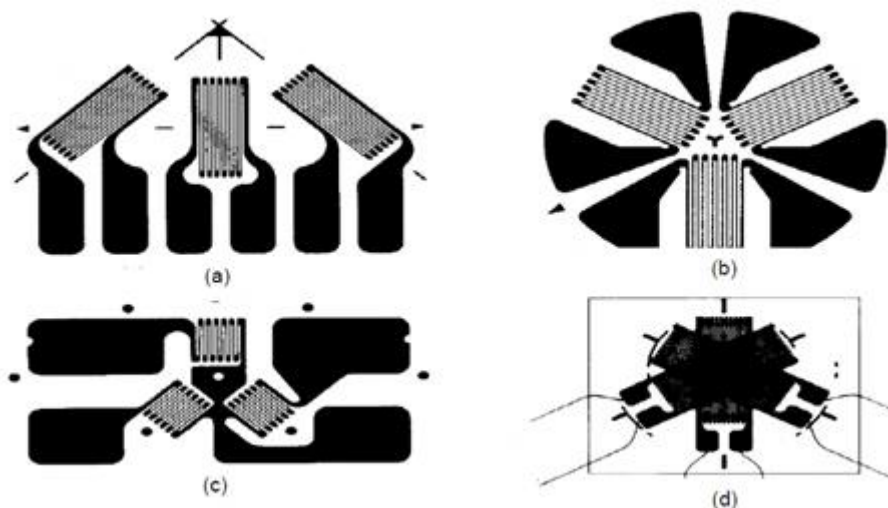
- Usinar um pequeno furo na área de interesse;
- Aferir as deformações resultantes no material em volta do furo;
- Calcular as respectivas tensões residuais.

Neste método, extensômetros são utilizados para medir as deformações causadas pela usinagem de um furo não passante em um componente com tensões residuais (PANG, *et al.*, 2012). O extensômetro consiste em uma fina resistência elétrica dobrada em forma de grade em um suporte plástico. Este dispositivo é ligado a uma

superfície, e a tensão mecânica aplicada produz uma pequena alteração mensurável na resistência do fio (COCHRAN, 1971).

Os extensômetros são colados na superfície de um componente com orientações pré-estabelecidas. Preferencialmente se emprega extensômetros do tipo roseta, apresentado na Figura 5, uma associação de extensômetros, cuja orientação e posições relativas são conhecidas (ROSSINI, *et al.*, 2012).

Figura 5 – Disposição dos extensômetros para aferir as deformações na superfície do furo.



Fonte: Adaptado de CRAIG (2013)

(a) Roseta Retangular (b) e (c) Roseta Delta (d) Roseta Delta Empilhada

Após a colagem da roseta na peça onde serão verificadas as tensões residuais, procede-se com a usinagem do furo no centro da roseta sendo observada uma variação na resistência no extensômetro, permitindo inferir a deformação sofrida (SCHAJER, 2010).

O estado de tensão interna de uma peça ou componente é modificado após a execução do furo, cujo objetivo é o alívio de tensões manifestado através de deslocamentos e deformações na superfície do redor do mesmo (RUZMAN e SCHMITT, 2003).

Uma das principais fontes de erro deste método se encontra na plasticidade do material podendo mascarar a deformação aferida pelos extensômetros (BEGHINI, *et al.*, 2011).

De acordo com Seifi e Majd (2012) a tensão residual por este método pode ser calculada usando a equação 3 para a deformação radial, a equação 4 para as tensões máxima e mínima, a equação 5 para a inclinação do eixo x e a equação 6 para a tensão residual efetiva de Von Mises.

$$\varepsilon_r = -\frac{1+\nu}{2E} \times \frac{1}{r^2} (\sigma_1 + \sigma_2) - \frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{4}{1+\nu} \times \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right) (\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\alpha) \quad (3)$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4 \left(-\frac{1+\nu}{2E} \times \frac{1}{r^2} \right)} \pm \frac{1}{4 \left(-\frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{4}{1+\nu} \times \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right) \right)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (4)$$

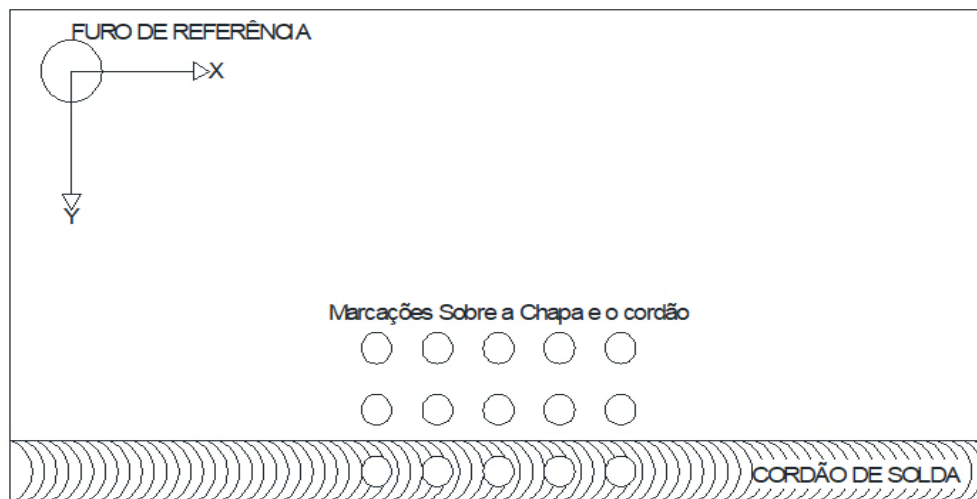
$$\sigma_{1,2} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4 \left(-\frac{1+\nu}{2E} \times \frac{1}{r^2} \right)} \pm \frac{1}{4 \left(-\frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{4}{1+\nu} \times \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right) \right)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (5)$$

$$\sigma_{res, ef} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (6)$$

3.2.3 Método de Deslocamento de Pontos Coordenados (DPC)

O Método de Deslocamento de Pontos Coordenados (DPC) consiste na marcação superficial sobre o cordão e sobre a zona termicamente afetada (ZTA), paralelamente ao cordão conforme exemplificado na Figura 6. As marcas são referenciadas em uma Máquina de Medição por Coordenadas e antes e depois da chapa ser submetida a um Térmico de Alívio de Tensões (TTAT) em temperaturas próximas à recristalização, sendo a tensão residual associada ao deslocamento dos pontos coordenados (SIQUEIRA FILHO, *et al.*, 2013).

Figura 6 – Marcações na chapa para a realização do DPC.



Fonte: O Autor (2020).

Conhecendo-se a distância dos deslocamentos das marcas, as tensões residuais podem ser mensuradas através da equação 7:

$$\sigma_i = -\frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_i + \nu \epsilon_j) \quad (7)$$

3.3 EFEITO DO TTAT NAS TENSÕES RESIDUAIS

Vários tratamentos térmicos ou mecânicos são aplicados para reduzir o efeito da Tensões Residuais ou distorções mantendo ou restaurando as propriedades do Metal Base (MB) (RADAJ, 2012).

O alívio de tensões depende fundamentalmente da temperatura e do tempo de permanência e objetivando a redução da dureza, das distorções e o aumento da tenacidade e da resistência à fadiga e a à corrosão sob tensão (CHANDLER, 1994).

O método mais utilizado atualmente para aliviar as Tensões Residuais é o recozimento, também conhecido como Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT), o qual consiste em aquecer uma parte ou a peça completa a temperaturas próximas à temperatura crítica de transformação do material por um dado período de tempo, seguido de um resfriamento a taxas inferiores 2,5 °C / min contemplando as principais etapas operacionais do alívio de tensões (KWOFIE, 2009).

O alívio de tensões residuais por tratamento térmico ocorre da seguinte maneira: a tensão Limite de Escoamento (LE), assim como a tensão Limite de Resistência (LR), diminuem com o aumento da temperatura, permitindo ao material escoar a deformação residual voltando ao seu estado original (JENKINS, DIGGES e JOHNSON, 1955).

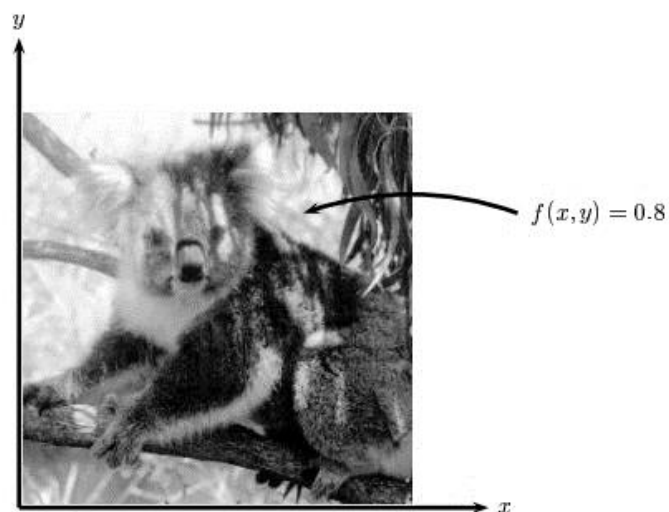
3.4 IMAGENS DIGITAIS

Uma imagem digital, é composta por diversos elementos denominados pixels, os quais podem ser definidos como a menor unidade em uma imagem não podendo ser subdividido em outro menor (SINGH e PG, 2016).

Uma imagem em escala de cinza, ela pode ser tomada como uma função bidimensional, nesta função cada ponto da imagem é um pixel, e seu valor estará

contido no intervalo de 0.0 (preto) ao 1.0 (branco) conforme a Figura 7 (MCANDREW, 2004).

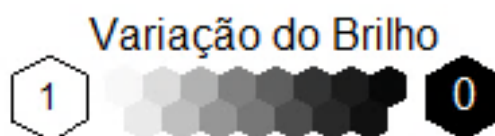
Figura 7 – Representação de uma Imagem Digital como uma função bidimensional na qual cada ponto representa um pixel.



Fonte: MCANDREW (2004)

A variação de tons de cinza na imagem mostrada na Figura 7 se deve a variação do brilho conforme pode ser visto na Figura 8 a qual apresenta um mapa de tons de cinza obtidos acrescentando brilho a cor de valor 0.0 e removendo brilho da cor 1.0.

Figura 8 – Formação de diversos tons de cinza através da variação do brilho.



Fonte: O Autor (2020)

Em uma imagem digital colorida cada pixel possui uma cor cujo valor, em geral, varia de 1 a 256 e brilho variando de 0 a 255, com esse conjunto de valores é possível construir a maioria das imagens digitais (WOEBBECKE, *et al.*, 1995). O mapa da Figura 9 mostra uma combinação possível de cores e brilho.

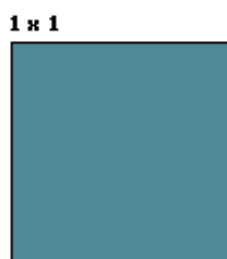
Figura 9 – Mapa de Cores e Seleção de brilho para formar a cor do pixel.



Fonte: O Autor (2020)

O pixel é indivisível em unidades menores, contudo a qualidade dos detalhes visíveis em uma imagem está diretamente ligada a quantidade de pixels existentes, ou seja, sua resolução. A Figura 10 mostra uma imagem formada por apenas um pixel com resolução 1×1 .

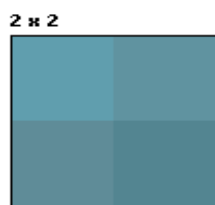
Figura 10 – Imagem formada por apenas um pixel com resolução de 1×1



Fonte: THAKUR (2018)

Para aumentar a qualidade dos detalhes da Figura 10, faz necessário aumentar a quantidade de pixels. Alterando a resolução para 2×2 ter-se-á 4 pixels formando a imagem conforme a Figura 11.

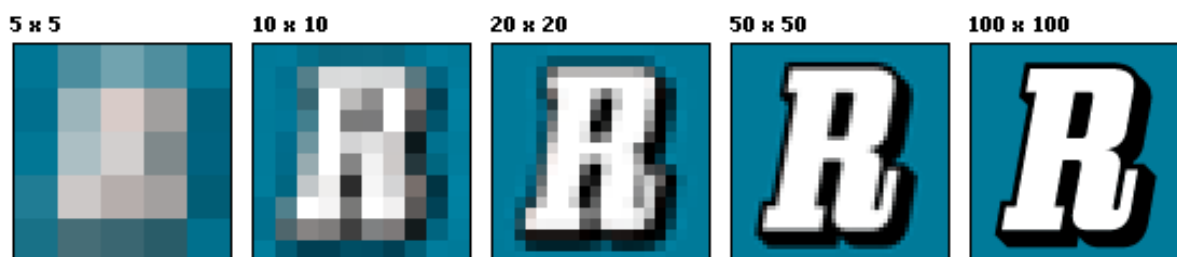
Figura 11 – Imagem com resolução 2×2 formada por 4 pixels



Fonte: THAKUR (2018)

Seguindo este raciocínio pode-se continuar a aumentar a resolução da imagem tornando seus detalhes mais visíveis conforme a Figura 12. Considerando o fato de os pixels serem quadrados, a imagem do referido exemplo será sempre quadrada pois possui o mesmo número de elementos na horizontal e na vertical.

Figura 12 – Efeito do Aumento da Resolução para uma mesma imagem



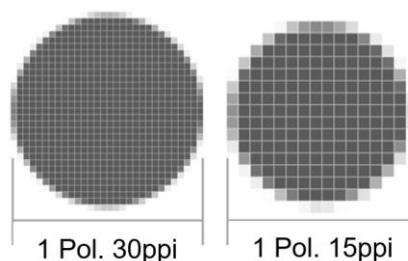
Fonte: THAKUR (2018)

Existem basicamente três formas de se representar a resolução em uma imagem digital, cada qual aplicável a um tipo de situação. A primeira utilizada na Figura 12 mostra a quantidade de pixels na horizontal [i] e na vertical [j], indicando desta forma a proporção da imagem, no caso 1:1. Este sistema é normalmente utilizado para equipamentos de visualização de imagens, e indicam a resolução máxima do equipamento (JAPAN CAMERA INDUSTRY ASSOCIATION, 2001).

A segunda forma utilizada para representar a resolução de uma imagem digital é informar a quantidade total de pixels formando a imagem, no exemplo da Figura 12, da esquerda para a direita, tem-se imagens com $5 \times 5 = 25$; $10 \times 10 = 100$; $20 \times 20 = 400$; $50 \times 50 = 2500$ e $100 \times 100 = 10.000$ pixels. Este sistema é normalmente utilizado para equipamentos fotográficos e apenas indica o limite superior de qualidade a ser alcançada pelo equipamento (JAPAN CAMERA INDUSTRY ASSOCIATION, 2001).

O último sistema de representação da resolução indica a quantidade de pixels em uma determinada área, conforme a Figura 13, normalmente se usa a sigla [ppi], “pixels per inch” (Pixels Por Polegada). Este sistema é utilizado tanto para equipamentos de visualização quanto de impressão, quando se substituem os pixels por pontos “dots” originando a sigla (dpi)[dpi] (JAPAN CAMERA INDUSTRY ASSOCIATION, 2001).

Figura 13 – Influência da Resolução na qualidade dos detalhes de uma imagem digital, a esquerda uma imagem com o dobro de resolução da direita.

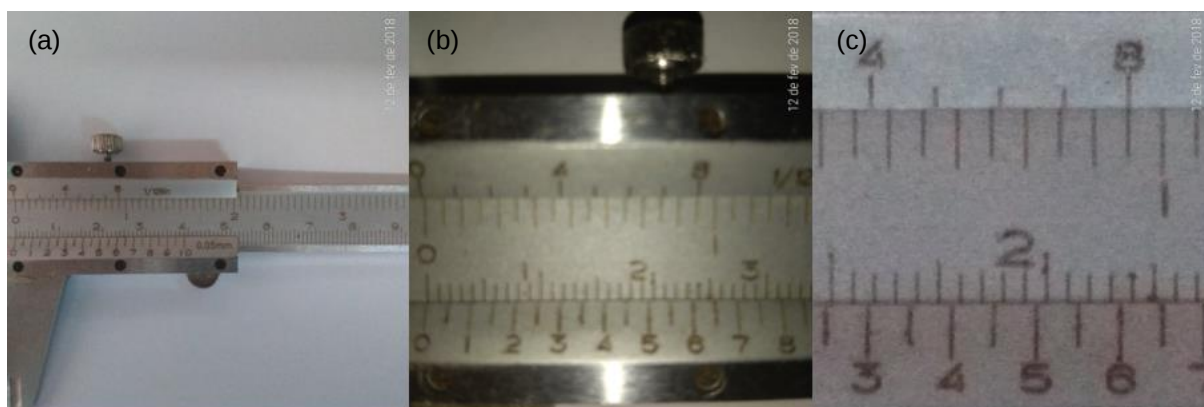


Fonte: Adaptado de STLARSON (2014)

Outro fator de extrema importância quando se trata de imagens digitais é a ampliação. Uma imagem digital ampliada pode ser obtida de duas formas distintas, de maneira ótica, onde um jogo de lentes reduz a área a ser fotografada mantendo a resolução inicial do equipamento e de maneira digital, onde a aproximação se dá ampliando uma dada região da imagem reduzindo a resolução (WICK e MARTINEZ., 2004).

Um exemplo deste efeito encontra-se demonstrado na Figura 14, na qual encontram-se três fotos de um paquímetro, na primeira imagem (Figura 14 a esquerda) tem-se a foto sem nenhuma ampliação enquanto na segunda (Figura 14 centro) foi ampliada de forma ótica para aumentar o nível de detalhes dos números, nesta imagem percebe-se a mesma resolução da primeira, contudo também se torna perceptível um leve abaulamento da imagem, isto se deve ao efeito “olho de peixe” presente nas lentes de aumento, removido quando se usa a ampliação digital (Figura 14 a direita), contudo nesta imagem torna-se evidente a perda de definição dos números devido a redução da resolução.

Figura 14 – Comparação entre uma ampliação ótica e digital



Fonte: O Autor (2020).

(a) foto sem ampliação. (b) ampliação ótica (c) ampliação digital.

3.5 EQUIPAMENTOS PARA OBTENÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS

Atualmente os equipamentos mais populares para obtenção de imagens são as câmeras digitais, cada uma com suas características próprias e aplicações específicas, mas para a presente pesquisa se faz necessário o uso de um equipamento com relativa ampliação e capaz de gerar imagens de alta resolução.

No mercado existem diversas opções capazes de atender estas expectativas como o Microscópio da *LEICA*, capaz de fornecer uma ampliação ótica de 8,5 vezes e digital de 300 vezes, o software encontra-se equipado com um sistema de medição para aferição de distâncias online. (LEICA MICROSISTEMS, 2018)

Assim embora se tenha conhecimento dos equipamentos disponíveis no mercado, existem vários problemas existentes para a seleção adequada de um produto. Por outro lado, o principal objetivo desta pesquisa é criar um método simples usando equipamentos convencionais, de baixo custo e capazes de fornecer um resultado satisfatório.

Das opções disponíveis para realização dos experimentos encontram-se a disposição no Laboratório de Micrografia e Análises Metalográficas da UFPE um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e um Microscópio Ótico (MO), como primeira tentativa, buscando melhores resultados tentou-se obter imagens através do MEV, mas o efeito olho de peixe distorcia uma grande parte da imagem inviabilizando a sua utilização.

Como segunda opção o MO com câmera digital integrada apresentou resultados mais satisfatórios, e embora o efeito olho de peixe também estivesse presente, a área distorcida é muito pequena sendo facilmente removida durante a composição da imagem final.

3.6 MICROSCÓPIO OTICO

Em termos de equipamentos para obtenção de imagens com relativa ampliação tem-se os microscópios os quais podem ser classificados em três grupos (CHEN, BIN e HONG, 2011):

- a) Óticos: Equipamento convencional, cuja formação da imagem se dá através da luz, a qual pode ser incidente ou refletida.

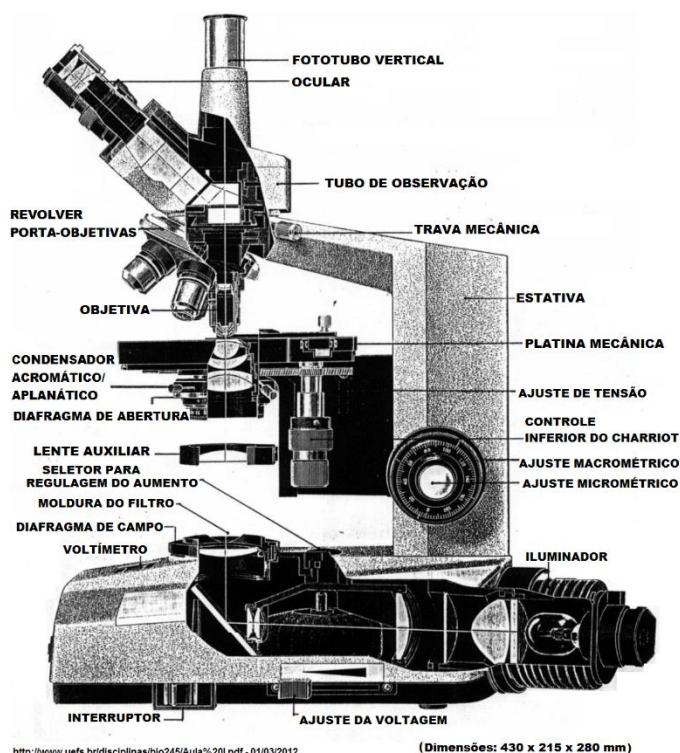
- b) De Escaneamento: Fornecem um escaneamento da superfície analisada
- c) De Elétrons: A formação da imagem se dá através da emissão de elétrons.

Não se sabe ao certo quem inventou o microscópio, mas o primeiro equipamento conhecido foi fabricado por Zacarias Janssen e presenteado ao arquiduque da Áustria em 1590 (KRISS e KRISS, 1988). Sendo a primeira observação relatada fazendo uso de um microscópio foi de Robert Hooke em 1663 (HARRIS, 2006).

No geral os microscópios óticos podem ser divididos em dois sistemas o mecânico, responsável por sustentar e mover o sistema ótico o qual amplia o objeto em análise (VIEIRA, 2008).

O sistema mecânico é constituído pelos seguintes componentes (MOREIRA, 2013) conforme a Figura 15.

Figura 15 - Principais elementos de um microscópio ótico



Fonte: NEVES (2019)

- a) Base – apoio a todos os componentes do microscópio
- b) Braço – fixo à base, serve de suporte às lentes e à platina
- c) Platina – base de suporte e fixação da preparação, tem uma abertura central (sobre a qual é colocada a preparação) que deixa passar a luz.
- d) Pinças ajudam à fixação da preparação.

- e) Revólver – suporte das lentes objetivas
- f) Canhão – suporta a ocular na extremidade superior
- g) Parafuso macrométrico – permite movimentos verticais da grande amplitude da platina
- h) Parafuso micrométrico – permite movimentos verticais lentos de pequena amplitude da platina para focagem precisa da imagem.

O sistema ótico é constituído por: (MOREIRA, 2013):

- a) Condensador – sistema de duas ou mais lentes convergentes para orientar e distribuir a luz emitida de forma igual pelo campo de visão do microscópio;
- b) Diafragma – regula a quantidade de luz incidente sobre o campo de visão do microscópio;
- c) Fonte Luminosa – luz artificial emitida por uma lâmpada no próprio microscópio, algumas vezes um reóstato permite regular a intensidade da luz.
- d) Lente ocular – cilindro com duas ou mais lentes para permitir a ampliação da imagem real fornecida pela objetiva, formando uma imagem virtual mais próxima dos olhos do observador. As oculares podem ser de diferentes ampliações sendo a mais comum de 10x. A imagem criada pela ocular é ampliada, direita e virtual.
- e) Lente Objetiva – conjunto de lentes fixas no revólver o qual gira e permite alterar a objetiva consoante a ampliação necessária. É a lente mais próxima da amostra, projetando uma imagem real, ampliada e invertida do mesmo.

Os microscópios biológicos fazem uso da luz transmitida, ou seja, a luz gerada pela fonte luminosa é colimada por lentes condensadoras passando pelo diafragma, pelos filtros e por fim atravessa a amostra a qual não deve ser opaca (ROSA, 2008).

Para amostras opacas se faz uso do microscópio ótico de luz incidente, neste equipamento a iluminação é feita através da objetiva, atravessa um espelho semitransparente e incide sobre a amostra, a qual reflete os raios de volta para o espelho e este os envia direto para as lentes oculares (WEBB, 1996).

A câmera fotográfica quando acoplada ao microscópio adquire as imagens diretamente através das oculares ou divide o feixe incidente com um espelho semitransparente o qual direciona o feixe para a câmera, este equipamento é denominado de trinocular (GOLDEINSTEIN, 2004).

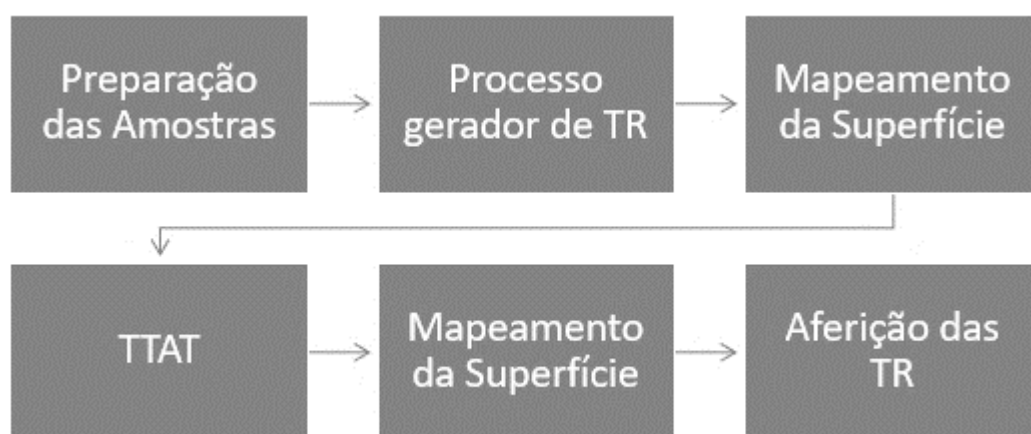
Ambos equipamentos permitem a polarização da luz restringindo a viração da mesma em um pequeno número de planos, ajustando a sua cor e contraste. O polarizador é posicionado entre a fonte de luz e a amostra perpendicular ao analisador responsável por analisar o comportamento dos raios de luz provenientes da amostra (JUNQUEIRA, COSSERMELLI e BRENTA, 1978).

Para a visualização da microestrutura de uma amostra metálica se faz necessário uma prévia preparação da superfície da amostra, mas para a presente pesquisa nenhuma preparação é necessária, pois os pontos de interesse estão na superfície e são facilmente vistos a olho nu, sendo a única função do microscópio gerar uma imagem digital através de sua câmera acoplada para permitir o mapeamento das marcações superficiais.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O método de aferição de Tensões Residuais através do Deslocamento de Pontos Coordenados em Imagens Digitais (DPC – ID) consiste em fotografar uma superfície, previamente marcada e determinar as coordenadas das marcações em relação a um referencial. Feito isso a amostra é submetida a um TTAT e novamente fotografada para se calcular o deslocamento das marcações. A Figura 16 mostra um fluxograma das principais etapas da aplicação do método.

Figura 16 – Principais etapas para aplicação do método DPID



Fonte: O Autor (2020)

Quando for aplicado em campo, fora da escala laboratorial o tratamento térmico para o alívio de tensões, não se faz necessário, e sendo o próprio processo gerador de tensões responsável pelo deslocamento das marcações na superfície da peça.

4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Nesta seção descreve-se o procedimento para preparar as amostras utilizadas nos procedimentos de aferição de tensão residual.

4.1.1 Definição do Tamanho das Amostras

O processo apresentado, foi realizado em um microscópio ótico, cujas dimensões limitam o tamanho da amostra em no máximo 25 mm x 25 mm, sem restrição de espessura. O tamanho das amostras sofre essa limitação pois se faz

necessário deslocá-la sob a objetiva de forma a toda a peça ser fotografada, sem a necessidade de movê-la manualmente. Todas as amostras foram cortadas usando uma serra manual.

Quando aplicado em campo, não se faz necessário a remoção de uma seção da peça para análise, pois a imagem é obtida com um equipamento capaz de realizar a fotografia da peça por inteiro, reduzindo drasticamente o tempo de realização das medições.

4.1.2 Marcação das Posições

Para a realização da marcação dos pontos sobre as amostras foi utilizado um “punção automático”, (nome comercial do equipamento, apresentado na Figura 17). Este dispositivo exerce uma carga de sete quilos para fazer uma pequena gravação no formato circular sobre a peça.

Figura 17: Punção Automático usado para marcar as amostras.



Fonte: Adaptado de SEARS (2020)

A escolha do uso desse equipamento, se deu pelas seguintes razões:

- a) Padronização da carga aplicada;
- b) Baixo valor da carga aplicada;
- c) Marcação superficial, caracterizando-se por ser não destrutiva.

Para a realização da marcação basta pressionar o equipamento até que a carga de sete quilos seja exercida pela mola, pressionando a ponta metálica sobre a peça realizando a marcação.

As marcações não afetam o campo de tensões residuais, por este motivo torna-se indiferente se as marcações são realizadas antes ou depois do processo gerador de tensões residuais (GONÇALVES, 2015).

4.1.3 Processo Gerador de Tensões Residuais

O Método DPC – ID pode ser aplicado a qualquer processo gerador de tensões residuais superficiais, mas para a presente pesquisa os processos escolhidos para validar a metodologia foram a laminação e a soldagem GMAW.

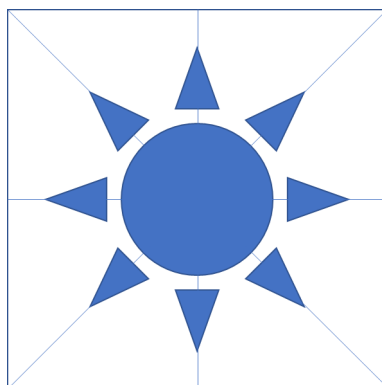
Para aplicar o processo gerador de tensões residuais segue-se o procedimento:

- a) Corte das amostras com largura e comprimento máximo de 25 mm;
- b) TTAT para aliviar as possíveis tensões do processo de fabricação;
- c) Marcação da superfície;
- d) Realização de um processo gerador de Tensões Residuais;

4.2 MAPEAMENTO DA SUPERFÍCIE

O mapeamento da superfície foi realizado através de micrografias as quais posteriormente são agrupadas usando um aplicativo computacional. Este procedimento de montagem foi realizado pelo fato de as imagens terem sido obtidas em um microscópio ótico qual não é capaz de fotografar a superfície por completo em uma única foto. Na Figura 18, tem-se uma imagem ilustrativa, representando uma superfície a ser analisada.

Figura 18: Superfície ilustrativa a ser mapeada Escala 2:1.



Fonte: O Autor (2020)

O mapeamento da superfície é feito utilizando um MO com câmera digital acoplada, a qual fornece imagens digitais com resolução de 2080 x 1544. Assim para cada ampliação tem-se uma área máxima a qual a imagem é capaz de cobrir, conforme a Tabela 1, a qual apresenta a largura e a altura de cada imagem obtida com a sua respectiva objetiva.

Tabela 1 – Tamanho das imagens em milímetros associado a ampliação da objetiva.

Ampliação da Objetiva	Tamanho da Imagem (mm)	
	Horizontal	Vertical
5	2,83920	2,107560
10	1,41960	1,053780
20	0,70980	0,526890
50	0,28392	0,210756
100	0,14196	0,105378

Fonte: O Autor (2020).

Assim tomando como exemplo a superfície da Figura 18, a qual possui 25 x 25 mm de dimensões tem-se na Tabela 2 a quantidade de imagens necessárias para cobrir toda a superfície em função da objetiva utilizada.

Tabela 2 – Número de imagens necessárias para cobrir uma distância de 25 mm para cada objetiva.

Ampliação da Objetiva	Número de Imagens*		
	Horizontal	Vertical	Total
5	9	12	108
10	18	24	432
20	35	47	1645
50	88	119	10472
100	176	237	41712

*Valores arredondados para o próximo inteiro.

Fonte: O Autor (2020)

Os valores apresentados na Tabela 2, evidenciam a quantidade de imagens necessárias para cobrir uma distância de 25 mm para cada objetiva, contudo esses valores só seriam reais caso as imagens fossem justapostas. No entanto, para eliminar a distorção das bordas provocada pelo efeito olho de peixe das lentes, a montagem não pode ser realizada por justaposição, mas por sobreposição.

Quando sobrepostas as imagens perdem uma parte do seu comprimento útil sendo reduzido o tamanho real utilizado e por conseguinte aumenta-se a quantidade de imagens necessárias para se cobrir a superfície, a Tabela 3 apresenta os comprimentos uteis das imagens quando as mesmas são sobrepostas, enquanto a

Tabela 4 apresenta a quantidade de imagens necessárias para se mapear uma superfície com 25 x 25 mm de dimensões.

Tabela 3 – Tamanho corrigido das imagens sobrepostas em milímetros para cada objetiva.

Ampliação da Objetiva	Tamanho da Imagem (mm)	
	Horizontal	Vertical
5	1,50	1,50
10	0,50	0,50
20	0,20	0,02
50	0,0	0,0
100	0,0	0,0

Fonte: O Autor (2020), (2020)

Analisando-se os valores da Tabela 3, percebe-se o fato de ser impraticável o uso das objetivas de 20, 50 e 100 vezes, por este motivo foram utilizadas apenas as objetivas de 5 e 10 vezes para o mapeamento das imagens. A Tabela 4 apresenta a quantidade de micrografias corrigida para se mapear uma amostra com 25 x 25 mm e reitera o motivo da não utilização da objetiva de 20.

Tabela 4 – Número de imagens necessárias para cobrir uma distância de 25 mm para cada objetiva.

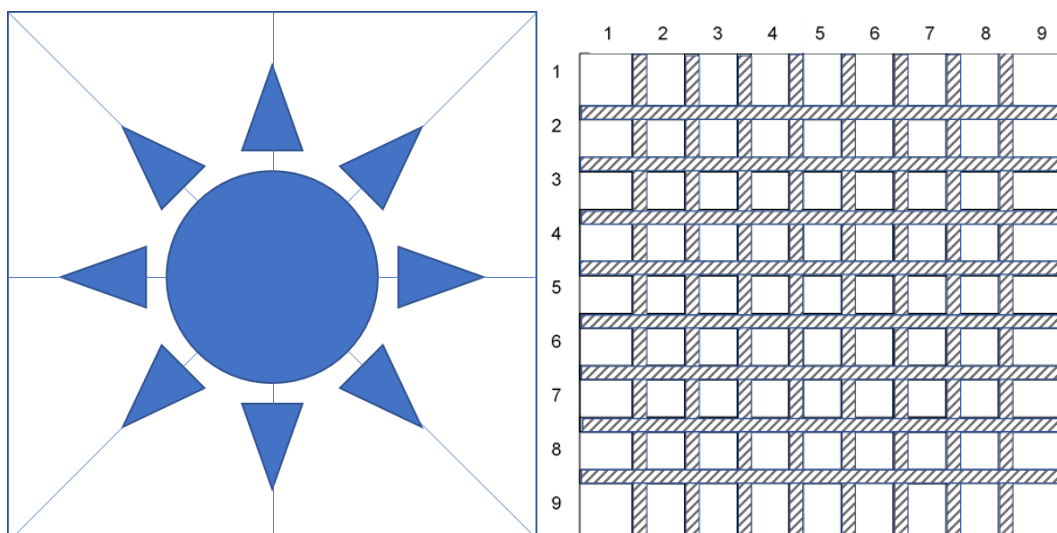
Ampliação da Objetiva	Número de Imagens*		
	Horizontal	Vertical	Total
5	17	17	289
10	50	50	2500
20	125	1250	156250
50	-----	-----	-----
100	-----	-----	-----

*Valores Arredondados Para o Próximo inteiro

Fonte: O Autor (2020), (2020)

A Figura 19 representa a superfície a ser mapeada e a malha de imagens necessária para o completo mapeamento, as áreas hachuradas representam a parte das imagens sobrepostas.

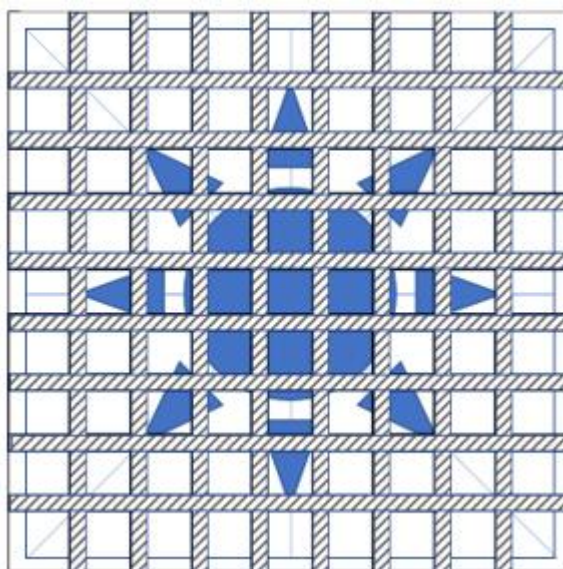
Figura 19: Superfície a ser mapeada (a esquerda). $\frac{1}{4}$ da malha necessária para se mapear a superfície usando a objetiva de 5x (a direita). As áreas hachuradas representam as regiões sobrepostas.



Fonte: O Autor (2020), (2020)

Analisando a malha apresentada na Figura 19, percebe-se o fato de existirem 18 imagens, tanto na vertical quanto na horizontal, isso se deve ao fato de ser necessário fotografar as bordas da superfície, para tanto as imagens iniciam fora da mesma conforme representação da Figura 20.

Figura 20: Representação do posicionamento da malha sobre a superfície a ser mapeada.



Fonte: O Autor (2020)

4.2.1 Aferição Das Distâncias

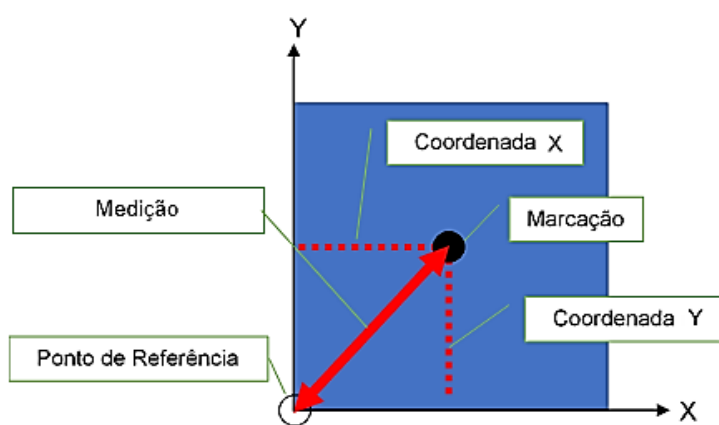
A aferição da distância entre um ponto “A” e um ponto “B” em uma imagem digital é realizada usando um aplicativo computacional, o qual conta o número de pixels entre os dois pontos. Contudo atuando desta forma o resultado da medição é dado em pixel, e não em milímetros. Porém para o método DPC – ID, a unidade de medida das distâncias não afeta no cálculo da tensão residual, pois este é uma função da deformação específica qual é adimensional, calculada usando-se a equação 8.

$$\varepsilon_i = \frac{i_2 - i_1}{i_0} \quad (8)$$

4.3 DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS

O método de Deslocamento de Pontos Coordenados em Imagens Digitais, afere a posição das marcações antes e depois da aplicação de um tratamento de alívio de tensões. Desta maneira o principal resultado obtido são as coordenadas X_i e Y_i da marcação antes e X_f e Y_f após a aplicação do TTAT, em relação a uma referência posicionada fora do campo de deformações gerador das tensões, conforme Figura 21.

Figura 21: Esquema da formação do sistema de coordenadas para aferição da posição da marcação.



Fonte: O Autor (2020)

As posições iniciais e finais destes pontos são tomadas do centro da marcação até uma das bordas da amostra, tomada como ponto de referência, sendo as coordenadas X e Y fornecidas pelo aplicativo computacional conforme a Figura 21, essa medida foi tomada no lugar furo de referência da metodologia DPC, para

prevenir um possível deslocamento deste, fato responsável por mascarar os resultados das posições e por consequência o valor das tensões residuais.

Um fator importante a ser considerado é a utilização do mesmo ponto de referência na amostra para as aferições das coordenadas inicial e final, para evitar leituras errôneas dos deslocamentos e por consequência das tensões residuais.

Determinados os valores de posições (X_0, Y_0) antes e (X_1, Y_1) , após o Tratamento Térmico, a variação da posição da marcação é dada pela equação 9.

$$\Delta i = i_2 - i_1 \quad (9)$$

Conhecendo-se a variação da posição da marca, é possível calcular a deformação específica da peça nas linhas transversais e longitudinais ao centro das marcações usando-se a equação 10, a tensão residual é calculada usando-se a equação 11.

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta i}{i_0} \quad (10)$$

$$\sigma_i = -\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_i + \nu\varepsilon_j) \quad (11)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção apresenta-se os resultados obtidos seguidos de uma explanação acerca dos seus valores comparados com a atual literatura.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA METROLÓGICO

O sistema metrológico utilizado pelo método DPC - ID possui como menor valor de medição o tamanho do pixel, o equipamento utilizado para gerar as imagens digitais possui uma única câmera acoplada com uma quantidade de pixels fixa (2080 x 1544) e o tamanho dos pixels só pode ser alterado através da ampliação ótica provocada pela troca das lentes objetivas conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Tamanho dos pixels em milímetros associados a ampliação da objetiva.

Ampliação da Objetiva	Tamanho dos Pixels (mm)
5	0,00136500
10	0,00068250
20	0,00034125
50	0,00013650
100	0,00006825

Fonte: O Autor (2020)

Os valores presentes na Tabela 5 são obtidos medindo-se a escala presente nas imagens digitais (Figura 22), a qual apresenta uma imagem obtida com a objetiva de 5x e uma escala de 0,5 mm. O aplicativo computacional fornece a quantidade de pixels contida na distância aferida de 0,5 mm, determinando o tamanho dos pixels como 0,001365 mm.

Figura 22 – Imagem com ampliação de 50x e Aferição do tamanho dos pixels



Fonte: O Autor (2020)

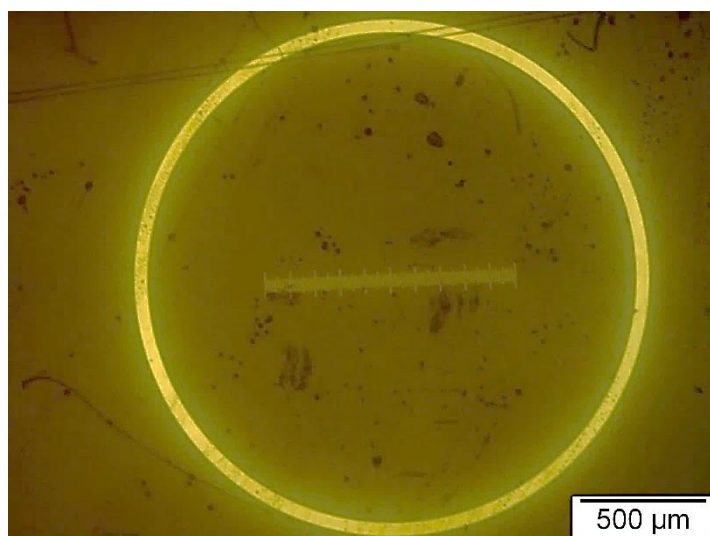
A conversão de pixels para milímetros foi realizada apenas para a calibração do sistema metrológico, pois se faz necessário compara as medidas fornecidas pelo aplicativo e os valores reais, mas quando o método é aplicado esta conversão não se faz necessária pois as medidas podem ser realizadas em pixels, pelo fato de a deformação específica independer das unidades de medida e ser um parâmetro adimensional.

Vale salientar a existência de dois limitantes para o aumento da ampliação e por conseguinte redução da resolução do sistema de medição. O primeiro se refere ao efeito olho de peixe, quanto maior a ampliação maior será a área distorcida. E o segundo se refere a quantidade de imagens necessárias para se cobrir a superfície. Considerando estes fatores, as únicas objetivas possíveis de serem utilizadas são as de 5x e 10x.

Para caracterizar a resolução do sistema de medição foram conduzidos dois tipos de experimentos, um com a objetiva de 5 (utilizada na fase atual da pesquisa) e outro com a objetiva de 10 para comprovar se o aumento da ampliação realmente melhora a resolução do sistema de medição. A

Figura 23 apresenta uma escala com resolução de 10 μm fotografada usando a objetiva de cinco vezes, sobre a qual foram realizadas doze medições cujos valores encontram-se na Tabela 6.

Figura 23 – Escala com resolução de 0,01 mm fotografada com ampliação de 50X.



Fonte: O Autor (2020)

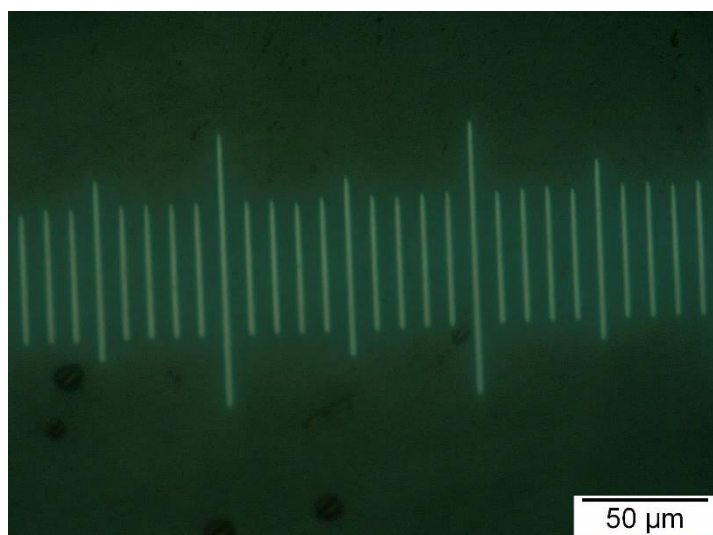
Tabela 6 – Tamanho dos pixels associados a ampliação da objetiva.

Medição	Pixels	mm / pixel	Mm
01	7,0	0,001365	0,009555
02	8,0	0,001365	0,010920
03	7,0	0,001365	0,009555
04	9,0	0,001365	0,012285
05	9,0	0,001365	0,012285
06	6,0	0,001365	0,008190
07	9,0	0,001365	0,012285
08	7,0	0,001365	0,009555
09	9,0	0,001365	0,012285
10	7,0	0,001365	0,009555
Média	7,8	0,001365	0,010647

Fonte: O Autor (2020)

Usando-se a mesma escala com uma ampliação de 100 vezes conforme a Figura 24 a qual apresenta uma escala com resolução de 10 μm fotografada usando a objetiva de 10x, sobre a qual foram realizadas doze medições cujos valores encontram-se na Tabela 7.

Figura 24 – Escala com resolução de 0,01 mm fotografada com ampliação de 500X.



Fonte: O Autor (2020)

Tabela 7 – Tamanho dos pixels associados a ampliação da objetiva.

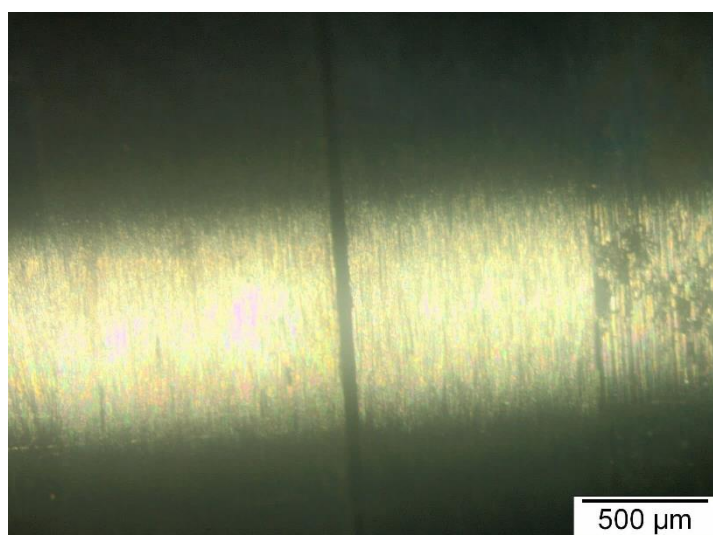
Medição	Pixels	mm / pixel	mm
01	74	0,0001365	0,0101010
02	74	0,0001365	0,0101010
03	75	0,0001365	0,0102375
04	74	0,0001365	0,0101010
05	75	0,0001365	0,0102375
06	75	0,0001365	0,0102375
07	75	0,0001365	0,0102375
08	74	0,0001365	0,0101010
09	75	0,0001365	0,0102375
10	75	0,0001365	0,0102375
Média	74,6	0,0001365	0,0101829

Fonte: O Autor (2020)

Analisando-se os resultados das medições percebe-se o fato de a resolução de 0,001365 mm atender as necessidades de medição, mas não ser tão indicado quanto a resolução de 0,0001365 para aferir valores da ordem de 10 μm , pois ocorre uma perda de nitidez na borda da imagem, quando se utiliza uma ampliação de 100 vezes.

A perda de resolução da objetiva de 5x foi testada para aferir a abertura de um micrômetro medindo o valor de 50 μm conforme mostrado na Figura 25 com resultados apresentados na Tabela 8.

Figura 25 – Abertura de um micrômetro de 0,05 mm fotografada com ampliação de 50X.



Fonte: O Autor (2020)

Tabela 8 – Tamanho dos pixels associados a ampliação da objetiva.

Medição	Pixels	mm / pixel	mm
01	37	0,001365	0,050505
02	37	0,001365	0,050505
03	37	0,001365	0,050505
04	38	0,001365	0,051870
05	38	0,001365	0,051870
06	37	0,001365	0,050505
07	38	0,001365	0,051870
08	37	0,001365	0,050505
09	36	0,001365	0,049140
10	37	0,001365	0,050505
Média	37,2	0,001365	0,0507325

Fonte: O Autor (2020)

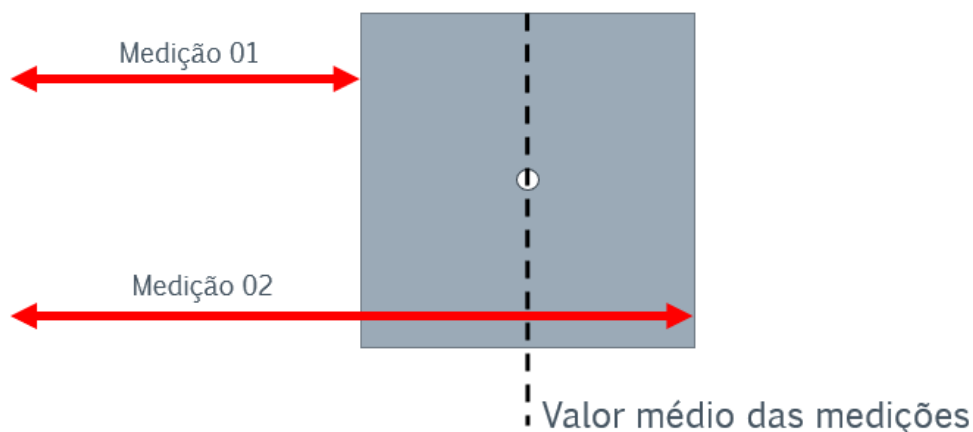
Avaliando os resultados apresentados na Tabela 8 percebe-se uma significativa melhora nos valores aferidos quando comparados aos resultados da Tabela 6, mas a dificuldade de leitura devido a falta de definição da borda da superfície continua a existir.

Usando-se as medições realizadas e a distribuição *T – Student* é possível definir para uma confiabilidade de 99,9% um intervalo de confiança de 0,002174 para as medições de 0,010 mm na escala micrométrica com ampliação de cinquenta vezes. Ou seja, o aplicativo computacional retornou uma distância de $(0,010647 \pm 0,002174)$ mm. Fazendo o mesmo para os valores da abertura do micrômetro de 0,050 mm tem-se uma distância de $(0,0507325 \pm 0,0031434)$ mm.

Fazendo-se os mesmos cálculos para a medição de 0,010 mm na escala micrométrica com ampliação de cem vezes, na qual os pixels são dez vezes menores quando comparado a ampliação de cinquenta vezes, tem-se uma distância de $(0,0101829 \pm 0,00010657)$ mm. Desta forma não é equívoco afirmar o fato da resolução de sistema de medição ser igual ao tamanho do pixel, assim para o aumento de cinquenta vezes será definida uma resolução de $(1,3 \pm 0,3)$ μm .

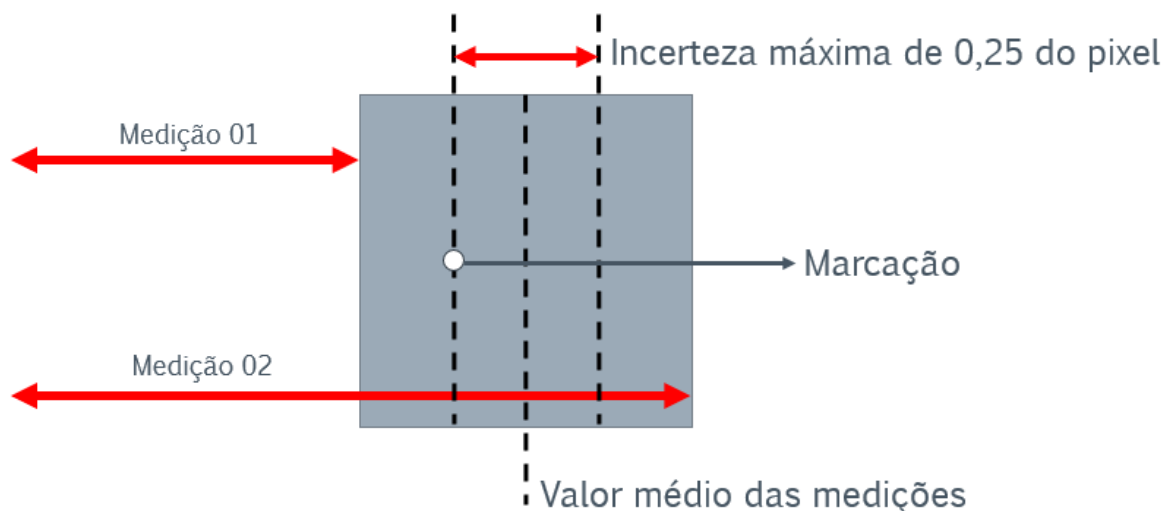
Fazendo o raciocínio inverso pode-se determinar a resolução do sistema em pixels, onde 1,3 (é o tamanho de um pixel) e 0,3 (corresponde a aproximadamente 0,25 pixels). Em termos de pixels o aplicativo computacional é capaz de fornecer medidas com resolução de $(1,00 \pm 0,25)$ pixels, conforme as Figura 26 e a Figura 27.

Figura 26: Procedimento para a realização da medição de um ponto localizado no centro do pixel.



Fonte: O Autor (2020).

Figura 27: Incerteza máxima do sistema de medição para a marcação localizada a 0,25 da borda do pixel.



Fonte: O Autor (2020).

Analisando-se a Figura 26, tem-se o caso ideal no qual o centro da marcação está localizado no centro do pixel, e como o aplicativo computacional só consegue tomar medidas nas bordas internas e externas dos pixels tem-se, para esta situação, o valor médio das medições correspondendo ao valor real da medida, mas a resolução, ou seja, a menor medida realizada pelo software continua sendo a de um pixel.

A Figura 27, por sua vez representa o erro máximo de medição cometido pelo aplicativo computacional. Supondo a localização do pixel a 0,25 de distância de uma das bordas do pixel, tem-se conforme a Figura 26, a média das medições localizada no centro do pixel, assim a incerteza nunca será superior a 0,25. Caso o pixel

estivesse localizado a 0,30 do centro, ou 0,20 da borda, o erro seria de 0,20 pois a medida real estaria localizada na borda do pixel.

5.2 AVALIAÇÃO DAS FONTES DE ERRO NO SISTEMA DE MEDIÇÃO

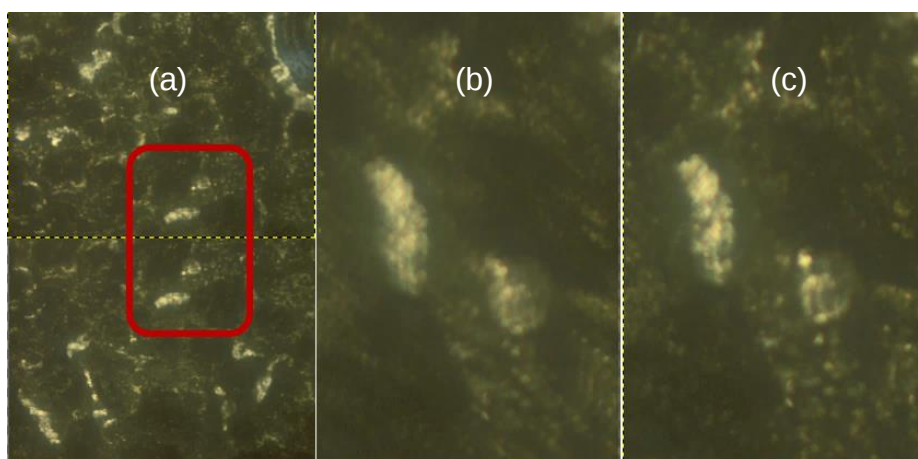
Nesta seção, encontram-se descritas e analisadas as principais fontes de erros do sistema de medição desenvolvido, comprovando sua eficácia para aferição das tensões residuais.

5.2.1 COMPOSIÇÃO DA IMAGEM

Nesta fase da operação encontra-se a primeira fonte de erro do sistema de medição a qual se caracteriza por ser um erro do tipo aleatório com variação mínima de um pixel por foto, pois o aplicativo computacional utilizado para realizar as montagens move as fotos pixel a pixel.

Contudo este erro pode ser facilmente detectado pelo operador durante a montagem (feita manualmente) devido à falta de alinhamento perceptível. A Figura 28 apresenta três imagens, a esquerda tem-se a região a ser sobreposta, destacada, a imagem central apresenta um falta de nitidez devido a presença do erro de montagem e direita a sobreposição realizada corretamente.

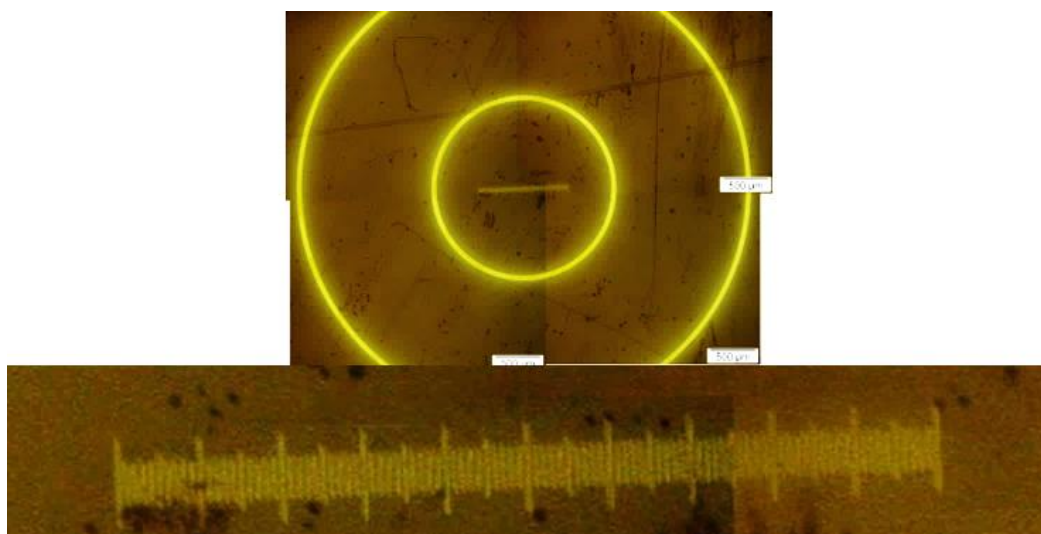
Figura 28 – (a) Exemplo de erro de montagem com duas imagens a serem sobrepostas. (b) sobreposição do detalhe com erro de montagem. (c) montagem realizada da forma correta.



Fonte: O Autor (2020)

Para estimar o erro associado a composição das imagens, foram tomadas quatro imagens de uma escala micrométrica sendo realizada a composição apresentada na Figura 29.

Figura 29 - Efeito da montagem. Detalhe, abaixo mostrando uma escala micrométrica.



Fonte: O Autor (2020)

Para avaliar o erro na montagem das imagens foram tomadas dez medidas da escala como um todo, sendo as mesmas apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Diversas medições realizadas para um comprimento de 1,00 mm.

Medição	Pixels	mm / pixel	mm
01	733	0,001365	1,0005
02	735	0,001365	1,0033
03	734	0,001365	1,0019
04	735	0,001365	1,0033
05	735	0,001365	1,0033
06	734	0,001365	1,0019
07	734	0,001365	1,0019
08	735	0,001365	1,0033
09	734	0,001365	1,0019
10	735	0,001365	1,0033
Média	734,4	0,001365	1,0025

Fonte: O Autor (2020)

Assim considerando a resolução do sistema de medição como sendo $(1,3 \pm 0,3) \mu\text{m}$, ou seja, $(0,0013 \pm 0,0003) \text{ mm}$ e usando esta escala para aferir um comprimento de $(1,00 \pm 0,01) \text{ mm}$ percebe-se claramente o fato da montagem não afetar o sistema metrológico, tendo-se em vista a obtenção de uma distância média de 1,0025 mm.

Considerando o intervalo de confiança de 0,0003 mm, para mais ou para menos tem-se para uma confiabilidade de 99,9%, o comprimento da escala variando entre 1,0022 mm e 1,0028 mm. Desta forma pode-se inferir o fato de a composição da imagem não afetar o sistema metrológico.

5.2.2 REPETIBILIDADE DAS MEDIÇÕES

Outra possível fonte de erro estaria na repetibilidade do processo de medição, ou seja, avaliar a hipótese de se fazer o mesmo procedimento para a mesma peça e obter o mesmo valor das medidas.

Para tal uma moeda com diâmetro de 20 mm foi submetida ao processo de medição duas vezes com imagens mostradas na Figura 30 e o seu diâmetro foi aferido dez vezes para cada montagem com resultados mostrados na Tabela 10.

Figura 30 – Montagens realizadas para avaliar a repetibilidade do sistema de medição



Fonte: O Autor (2020)

Tabela 10 – Medições realizadas para avaliar a repetibilidade do sistema.

Montagem 01				Montagem 02			
Medição	Pixels	mm / pixel	mm	Medição	Pixels	mm / pixel	mm
1	14688	0,001365	20,04912	1	14641	0,001365	19,984965
2	14594	0,001365	19,92081	2	14709	0,001365	20,077785
3	14685	0,001365	20,04503	3	14667	0,001365	20,020455
4	14592	0,001365	19,91808	4	14590	0,001365	19,915350
5	14735	0,001365	20,11328	5	14767	0,001365	20,156955
6	14654	0,001365	20,00271	6	14734	0,001365	20,111910
7	14575	0,001365	19,89488	7	14597	0,001365	19,924905
8	14745	0,001365	20,12693	8	14719	0,001365	20,091435
9	14637	0,001365	19,97951	9	14671	0,001365	20,025915
10	14692	0,001365	20,05458	10	14513	0,001365	19,810245
Média	14659,7	0,001365	20,01049	Média	14660,8	0,001365	20,011992

Fonte: O Autor (2020)

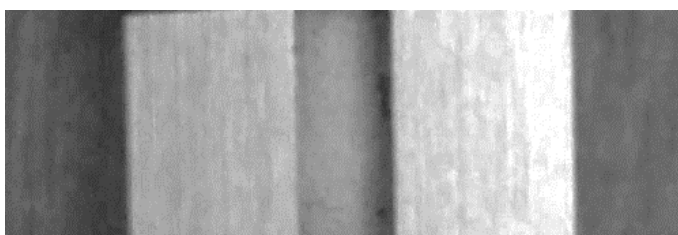
Avaliando-se os resultados das medições da Tabela 10, percebe-se claramente o fato do processo possuir uma boa repetibilidade, estando a variação das medidas entre as duas montagens (0,0015 mm) contida no intervalo de confiança de 0,0003 mm levando em consideração a resolução de 0,0013 mm do sistema metrológico.

5.2.3 AJUSTE DA DISTÂNCIA FOCAL

Outra possível fonte de erro para o sistema de medição utilizado encontra-se no fato da variação da distância focal, pois quanto maiores forem as dimensões das amostras analisadas, mais difícil torna-se manter toda a superfície dentro da distância focal, sendo necessário ajustar esse parâmetro para obtenção de uma imagem nítida com precisão das medições.

Para avaliar se o ajuste focal interfere no sistema metrológico, foi analisada uma peça com um rebaixo, Figura 31, este rebaixo obriga o ajuste focal para a montagem da imagem final, mostrada na Figura 32.

Figura 31 – Peça com rebaixo, utilizada para analisar a existência do erro devido ao ajuste da distância focal.



Fonte: O Autor (2020).

Figura 32 – Montagem da Peça com rebaixo utilizando o ajuste focal, na região central.



Fonte: O Autor (2020)

Foram realizadas dez medições do comprimento da peça da imagem apresenta na Figura 32 (cuja medida é igual a 15,57 mm) os resultados encontram-se na Tabela 11. Este resultado também corrobora para a inexistência do erro de montagem.

Tabela 11 – Medições realizadas para avaliar a repetibilidade do sistema.

Medição	Pixels	mm / pixel	Mm
1	11407	0,001365	15,570555
2	11406	0,001365	15,569190
3	11406	0,001365	15,569190
4	11407	0,001365	15,570555
5	11405	0,001365	15,567825
6	11407	0,001365	15,570555
7	11408	0,001365	15,571920
8	11408	0,001365	15,571920
9	11407	0,001365	15,570555
10	11407	0,001365	15,570555
Média	11406,8	0,001365	15,570282

Fonte: O Autor (2020)

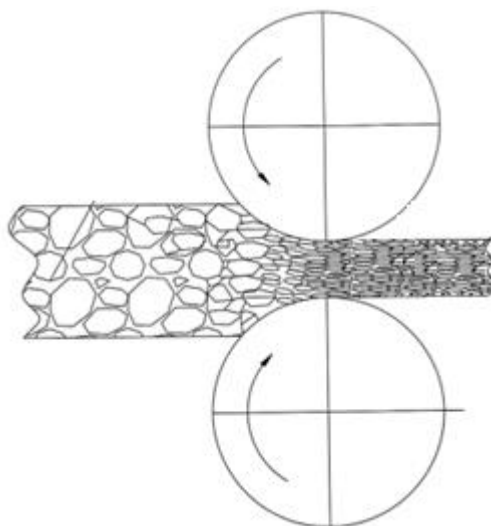
5.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DPC – ID

Caracterizado o método e estabelecido seus parâmetros de medição tem-se alcançado o principal objetivo da pesquisa. Contudo, o método ainda carece de ter sua eficácia testada em seu verdadeiro propósito, a medição de Tensões Residuais, assim este tópico apresenta resultados práticos da aplicação do método a alguns processos geradores de tensões residuais e compara seus valores com a literatura atual, além de avaliar o efeito do corte nas amostras.

5.3.1 LAMINAÇÃO

Neste processo o Corpo de Prova passa por um par de rolos com a finalidade de reduzir a sua espessura mantendo a uniformidade das demais propriedades, o espaçamento entre os rolos deve ser inferior a espessura inicial do material, sendo o atrito entre a peça e o laminador responsável por forçar a passagem do material laminado (SINGLA e KUMAR, 2017), Figura 33.

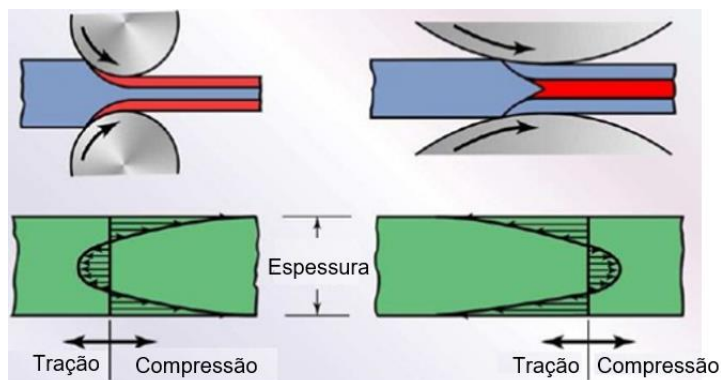
Figura 33: Representação esquemática do processo de laminação.



Fonte: Adaptado de RAY (2016)

No processo de laminação as tensões residuais só existem quando a peça é submetida a deformações não homogêneas, caracterizando-se por um comportamento compressivo na superfície e trativo no centro da amostra (GONÇALVES, 2017), conforme esquema representado na Figura 34.

Figura 34: Esquema mostrando o comportamento das tensões residuais em uma chapa laminada.

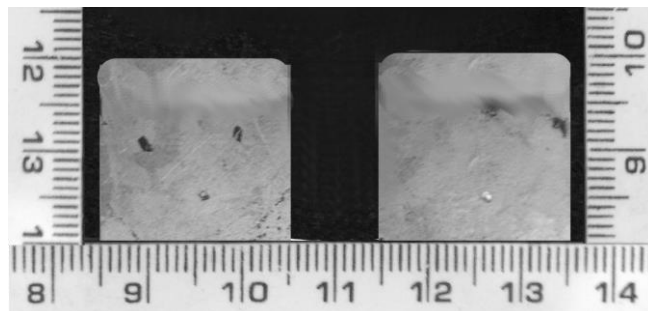


Fonte: Adaptado de LIMA (2019)

5.3.1.1 Efeito do Corte Nas Amostras

Para investigar essa situação, foram produzidas duas amostras com dimensões de 20 × 20 mm de Alumínio AA1100 com espessura de 1,86 mm conforme a Figura 35. As amostras foram marcadas a 5 mm de distância da margem inferior.

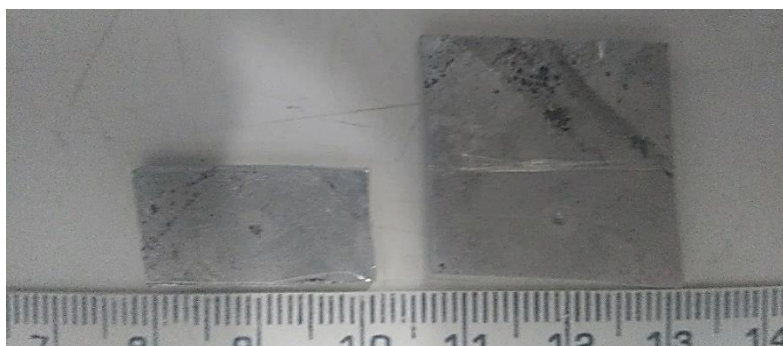
Figura 35 – Amostras de AA1100 usadas para averiguar o efeito do corte nas Tensões Residuais (Escala em mm).



Fonte: O Autor (2020)

Produzidas as amostras da Figura 35, as mesmas foram laminadas a frio no sentido diagonal para uma espessura de 1,36 mm (deformação de 25%), após este processo uma delas foi cortada ao meio usando conforme a Figura 36 uma serra manual.

Figura 36 – Amostras de Alumínio AA1100 laminadas a frio. Amostra cortada (A Esquerda) Amostra sem corte (A Direita). Escala em (mm).

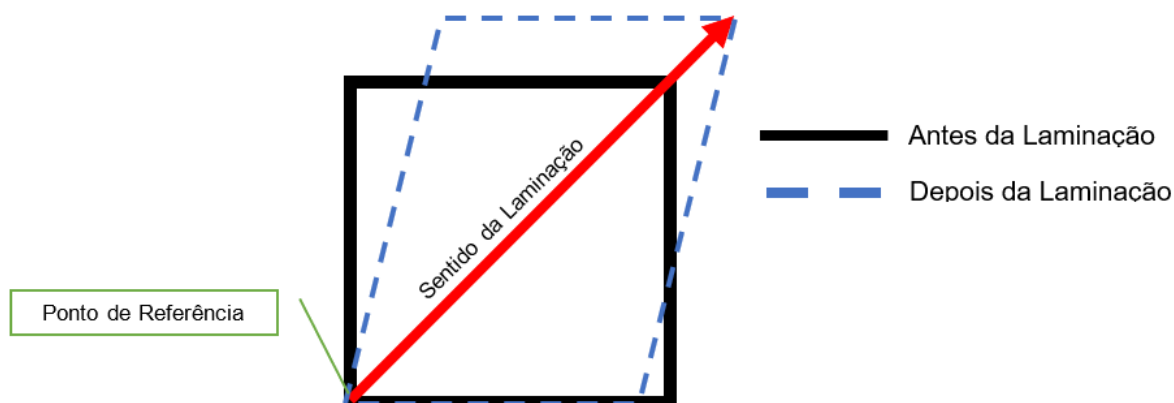


Fonte: O Autor (2020)

A laminação foi realizada no sentido diagonal para propositalmente provocar uma igualdade nas tensões nas direções horizontal e vertical, possibilitando desta maneira determina os parâmetros corretos para o cálculo das tensões residuais bem como o efeito do corte realizado nas amostras, o qual deve ser mínimo para não mascarar os resultados obtidos.

A Figura 37 esquematiza a direção de laminação, o ponto de referência tomado para a medição das coordenadas bem como da deformação sofrida pelas amostras durante o processo de laminação.

Figura 37: Esquema mostrando o ponto de referência (Origem do sistema de coordenadas) e a deformação sofrida pelas amostras laminadas

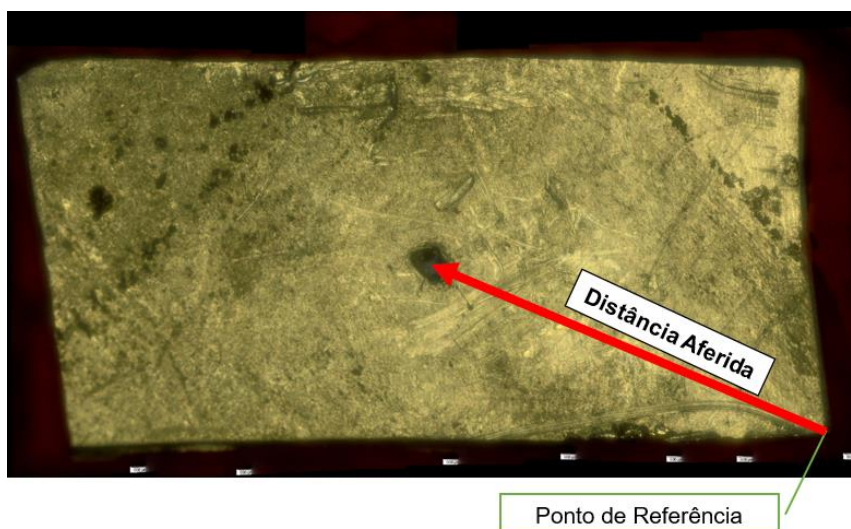


Fonte: O Autor (2020)

Analisando a Figura 37, percebe-se o fato do ponto de referência estar localizado fora o campo de deformação, este cuidado é de fundamental importância para o método, pois caso a origem do sistema de coordenadas esteja localizado dentro do campo de deformações o mesmo pode se deslocar durante a realização do tratamento térmico alterando o valor real das tensões residuais aferidas.

A Figura 37 também evidencia outro fator para a determinação das coordenadas da marcação, caso a medida fosse realizada de forma linear da borda esquerda para o centro, a leitura pós TTAT seria incorreta, por isso é importante tomar as medidas sempre em relação ao ponto de referência conforme a Figura 38.

Figura 38: Procedimento para aferição das coordenadas da marcação



Fonte: O Autor (2020).

Analisando a Figura 38, torna-se evidente as deformações sofridas pelas bordas do Corpo de Prova e o motivo da tomada das coordenadas ser feito em

relação ao ponto de referência, ficando o software responsável por informar o valor em pixels das coordenadas X e Y.

Contudo ao se trabalhar com amostras cortadas, tem-se dois problemas a serem discutidos, o comprimento inicial da peça, ou seja, os valores de X_0 e Y_0 na fórmula da deformação específica conforme a equação 12, bem como o efeito da operação de corte no campo de Tensões Residuais.

$$\varepsilon_i = \frac{l_{\text{final}} - l_{\text{inicial}}}{l_0} \quad (12)$$

Para avaliar o comprimento de referência existem três pontos de vista possíveis:

- Hipótese 1: $l_0 = l_{\text{inicial}}$;
- Hipótese 2: l_0 igual ao comprimento da peça na direção i , após o corte;
- Hipótese 3: l_0 igual ao comprimento da peça na direção i , antes do corte.

As amostras da Figura 36 foram mapeadas e submetidas a um TTAT, sendo aquecidas a 400°C por uma hora e resfriadas dentro do forno, e remapeadas para a aferição das Tensões residuais. Aplicando-se as três hipóteses ao cálculo das TR, tem-se os dados apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Comparação dos resultados das Tensões Residuais para as diversas hipóteses de comprimento base.

Amostra Cortada					
Hipótese 1		Hipótese 2		Hipótese 3	
** $X_0 = 7860$	** $Y_0 = 4388$	** $X_0 = 16000$	** $Y_0 = 8000$	** $X_0 = 16000$	** $Y_0 = 16000$
$\varepsilon_x = -0,00254$	$\varepsilon_y = 0,00456$	$\varepsilon_x = -0,00125$	$\varepsilon_y = 0,0025$	$\varepsilon_x = -0,00125$	$\varepsilon_y = 0,00125$
$\sigma_x^* = 0,089257$	$\sigma_y^* = -0,28772$	$\sigma_x^* = 0,037912$	$\sigma_y^* = -0,16113$	$\sigma_x^* = 0,06635$	$\sigma_y^* = -0,06635$
Amostra sem o Corte					
Hipótese 1		Hipótese 2		Hipótese 3	
** $X_0 = 8900$	** $Y_0 = 4157$	** $X_0 = 16000$	** $Y_0 = 8000$	** $X_0 = 16000$	** $Y_0 = 16000$
$\varepsilon_x = -0,001123$	$\varepsilon_y = -0,002405$	$\varepsilon_x = -0,000625$	$\varepsilon_y = -0,000625$	$\varepsilon_x = -0,000625$	$\varepsilon_y = -0,000625$
$\sigma_x^* = 0,139916$	$\sigma_y^* = 0,207959$	$\sigma_x^* = 0,061607$	$\sigma_y^* = 0,061607$	$\sigma_x^* = 0,061607$	$\sigma_y^* = 0,061607$

$E = 69 \text{ GPa}$ $\nu = 0,3$ (Associação Brasileira de Alumínio)

*Mesma unidade do módulo de elasticidade

**Distâncias em pixels

Fonte: O Autor (2020)

Avaliando-se os resultados da Tabela 12, pode-se inferir:

- a) A Hipótese 1 produz um resultado inconsistente pois houve uma redução nos valores das TR de 36,02% na direção X e de 27,72% na direção Y, a qual foi cortada.
- b) A Hipótese 2 produz um resultado mais plausível ao manter as tensões em X e Y, da amostra sem corte, com o mesmo valor, contudo o aumento de 61,54% no valor de σ_y , e uma redução de 34,46% no valor σ_x , são demasiadas elevadas.
- c) A Hipótese 3, mais consistente, mantém os mesmos valores de tensão para ambas as direções em ambas as amostras. Resultado esperado, pois, a laminação se deu na diagonal das peças.

Como o processo gerador de TR é aplicado antes da operação de corte, espera-se uma manutenção do campo de tensões sendo aceitável uma pequena perturbação devido a operação de redução de comprimento.

A segunda hipótese, apresenta um comportamento aceitável das tensões, no entanto, extrapola em muito os efeitos da operação de corte, assim sendo, para as peças cortadas avaliadas nesta pesquisa será utilizado como comprimento de referência as dimensões originais da peça submetida ao processo gerador de TR conforme a hipótese III.

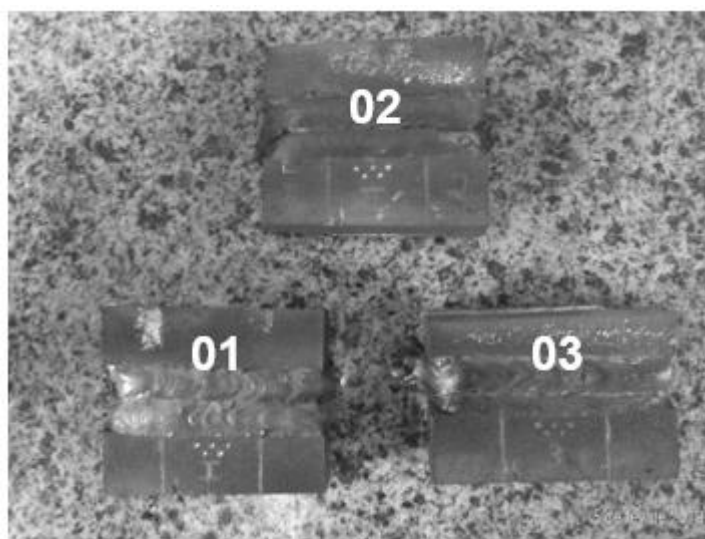
Simulações realizadas em amostras de AA6061 laminadas a frio mostraram um valor de tensões residuais da ordem de 60MPa, atuando na superfície do material. (KUMAR R., 2019). Medições na liga AA5052-H36 retornaram para a superfície das amostras laminadas a frio valores próximos a 60MPa usando a técnica de difração de raios-X (HUYNH, 2019). Esses resultados confirmam a metodologia desenvolvida e a escolha da Hipótese III como a mais assertiva. Coincidindo com o valor de aproximadamente 60 MPa apresentado na Tabela 12.

5.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO EM JUNTAS SOLDADAS

Em juntas soldadas as Tensões Residuais são originadas devido ao aquecimento localizado, acompanhado por um resfriamento com elevado gradiente térmico, com origem a partir da zona fundida. Assim, transformações de fase no metal de adição e na zona termicamente afetada influenciam diretamente a distribuição das tensões residuais em juntas soldadas (MAIA, *et al.*, 2019).

Para avaliar a eficácia do método DPC – ID para aferição de tensões residuais, pequenas chapas do aço ASTM A131 AH36 foram submetidas a um processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) (Figura 39) e as tensões residuais foram aferidas utilizando-se a metodologia desenvolvida.

Figura 39 – Amostras do Aço ASTM A131 AH36 submetidas a um processo de soldagem prontas para serem cortadas na dimensão de 24,5 mm.



Fonte: O Autor.

Para este experimento o parâmetro a sofrer variação de uma amostra para outra foi a corrente de soldagem, simulando o estudo realizado por (MENDES, *et al.*, 2017). A amostra 01, definida como padrão, foi soldada com a corrente menor, enquanto as amostras 02 e 03 foram soldadas com correntes maiores. Os parâmetros de soldagem de cada amostra encontram-se na Tabela 13.

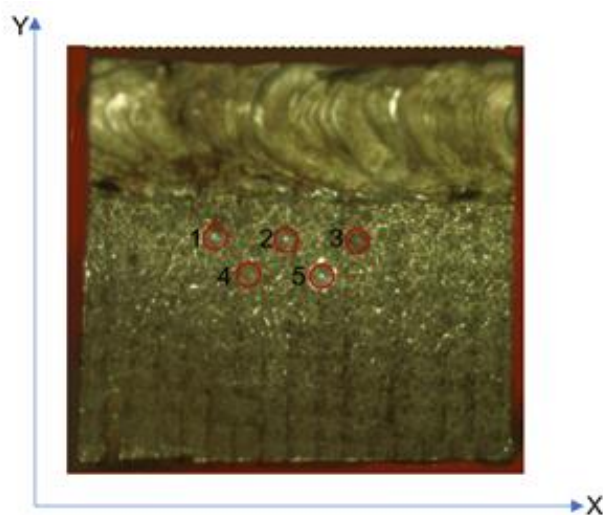
Tabela 13 – Parâmetros de Soldagem utilizados.

Processo: GMAW. Gás: 75% Ar 25% CO ₂ (20 L/min). Velocidade de Soldagem: 5 mm/s. Velocidade do Arame: 6m/min. Arame cobrado 1,2 mm (AWS 5.18). Eficiência de 77% Tensão 23,2 V					
Amostra 01		Amostra 02		Amostra 03	
Corrente	130 A	Corrente	140 A	Corrente	150 A
Aporte	0,4644 kJ/mm	Aporte	0,5002 kJ/mm	Aporte	0,5359 kJ/mm

Fonte: O Autor (2020)

Vale salientar o fato de a presente pesquisa não possuir como objetivo investigar os efeitos da soldagem nas Tensões Residuais, mas avaliar a possibilidade de utilizar o método DPC – ID para aferir tensões residuais em juntas soldadas. As marcações e o sentido dos eixos coordenados encontram-se definidos de acordo com a Figura 40.

Figura 40 – Convenção utilizada para identificação das marcações e aferição da Tensões Residuais.



Fonte: O Autor (2020)

A Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16 apresentam os resultados das medições das posições das marcas antes e depois do Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT), bem como a variação destes valores, aferidos em pixels. Estas medições são a base para o cálculo das Tensões Residuais (TR). Lembrando o fato de as distâncias serem tomadas do centro do furo ao ponto de referência localizado na quina a esquerda e inferior das amostras (origem do sistema de coordenadas da Figura 40).

Tabela 14 – Posição das marcações (em pixels) para a amostra 01 antes e depois do TTAT

Antes do TTAT			Depois do TTAT		Variação	
Marca	Posição em X	Posição em Y	Posição em X	Posição em Y	ΔX	ΔY
01	5170	9040	5180	9030	10	-10
02	8080	8950	8070	8940	-10	-10
03	11000	8850	11000	8860	0	10
04	6630	7520	6620	7530	-10	10
05	9550	7410	9540	7420	-10	10

Fonte: O Autor (2020)

Tabela 15 – Posição das marcações (em pixels) antes e depois do TTAT para a amostra 02.

Antes do TTAT			Depois do TTAT		Variação	
Marca	Posição em X	Posição em Y	Posição em X	Posição em Y	ΔX	ΔY
01	10600	10860	10600	10840	0	-20
02	7690	10733	7666	10723	-24	-10
03	4770	10595	4728	10576	-42	-19
04	9143	9350	9133	9350	-10	0
05	6250	9200	6250	9180	0	-20

Fonte: O Autor (2020)

Tabela 16 – Posição das marcações (em pixels) antes e depois do TTAT para a amostra 03

Antes do TTAT			Depois do TTAT		Variação	
Marca	Posição em X	Posição em Y	Posição em X	Posição em Y	ΔX	ΔY
01	5900	10271	5860	10261	-40	-10
02	8800	10200	8777	10182	-23	-18
03	11728	10160	11700	10141	-28	-19
04	7280	8740	7245	8760	-35	20
05	10215	8790	10160	8804	-55	14

Fonte: O Autor (2020)

Calculado os valores dos deslocamentos de cada ponto em cada uma das amostras é possível calcular a deformação específica (equação 13) e o valor das tensões residuais usando a equação 14. O resultado das medições para as amostras 01, 02 e 03 encontram-se nas Tabelas 17, 18 e 19.

$$\varepsilon_i = \frac{i_d - i_a}{i_0} \quad (13)$$

a → Antes do TTAT d → Depois do TTAT

$$\sigma_i = - \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_i + \nu \varepsilon_j) \quad (14)$$

Tabela 17 – Deformações específicas e tensões residuais geradas pela soldagem para a amostra 01.

Marcação	ε_x	ε_y	σ_x^*	σ_y^*
$X_0 = 8975 \cdot Y_0 = 8315$			$E = 206 \text{ GPa } \nu = 0,3$	
01	0,000181984	-0,000363967	-0,016478517	0,070033697
02	-0,000181984	-0,000363967	0,065914068	0,094751472
03	0	0,000363967	-0,024717775	-0,082392585
04	-0,000181984	0,000363967	0,016478517	-0,070033697
05	-0,000181984	0,000363967	0,016478517	-0,070033697

*Mesma Unidade do Módulo de elasticidade (GPa)

Fonte: O Autor (2020)

Tabela 18 – Deformações específicas provocadas e tensões residuais geradas pela soldagem para a amostra 02.

Marcação	ϵ_x	ϵ_y	σ_x^*	σ_y^*
$X_0 = 54950 \cdot Y_0 = 27475$			$E = 206\text{GPa } \nu = 0,3$	
01	0	-0,000727934	0,049435551	0,164785169
02	-0,000436761	-0,000363967	0,123588877	0,112053915
03	-0,000764331	-0,000691538	0,219988201	0,208453239
04	-0,000181984	0	0,041196292	0,012358888
05	0	-0,000727934	0,049435551	0,164785169

*Mesma Unidade do Módulo de elasticidade (GPa)

Fonte: O Autor (2020)

Tabela 19 – Deformações específicas provocadas e tensões residuais geradas pela soldagem para a amostra 03

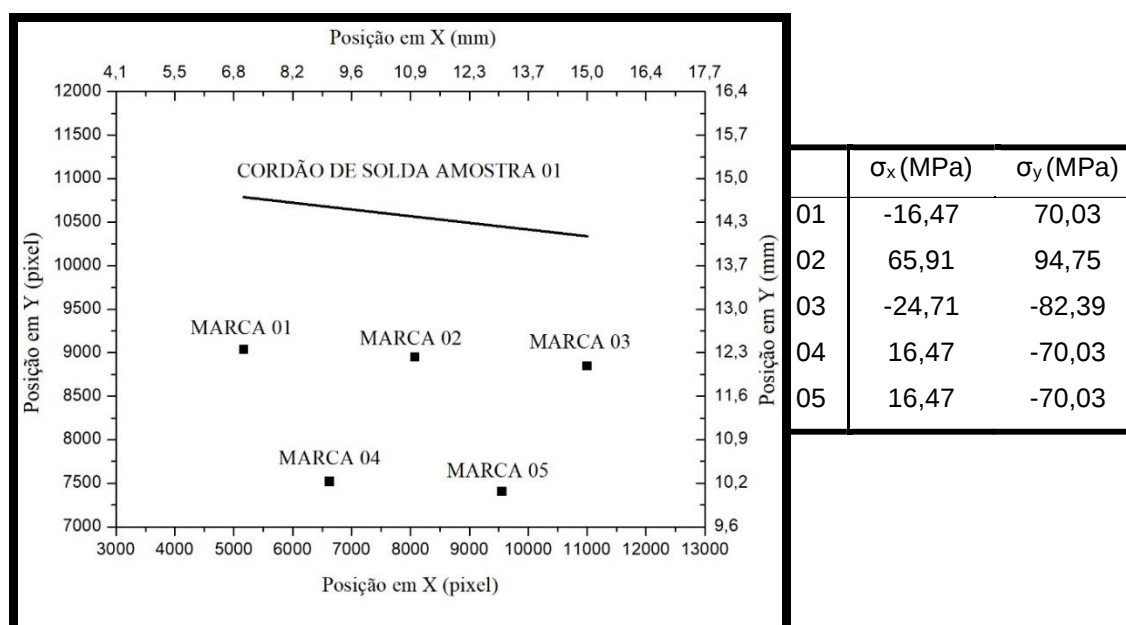
Marcação	ϵ_x	ϵ_y	σ_x^*	σ_y^*
$X_0 = 54950 \cdot Y_0 = 27475$			$E = 206\text{GPa } \nu = 0,3$	
01	-0,000727934	-0,000363967	0,189502945	0,131828135
02	-0,000418562	-0,000655141	0,139243468	0,176732094
03	-0,000509554	-0,000691538	0,162313392	0,191150796
04	-0,000636943	0,000727934	0,094751472	-0,121529062
05	-0,001000910	0,000509554	0,191974722	-0,047375736

*Mesma Unidade do Módulo de elasticidade (GPa)

Fonte: O Autor (2020)

Os gráfico das Figuras a seguir apresentam as posições dos furos em relação ao cordão de solda bem como os valores das tensões residuais para cada marcação da amostra 01 (Figura 41) da amostra 02 (Figura 42) e da amostra 03 (Figura 43). O comportamento das tensões residuais pode ser justificado pelo posicionamento dos furos em relação ao cordão de solda. Quanto mais próximo ao cordão maior o valor da tensão residual. Contudo uma diferença de um milímetro pode remover a marcação de uma zona trativa levando-o para uma zona compressiva.

Figura 41 – Posições das Marcações e suas respectivas tensões para a Amostra 01

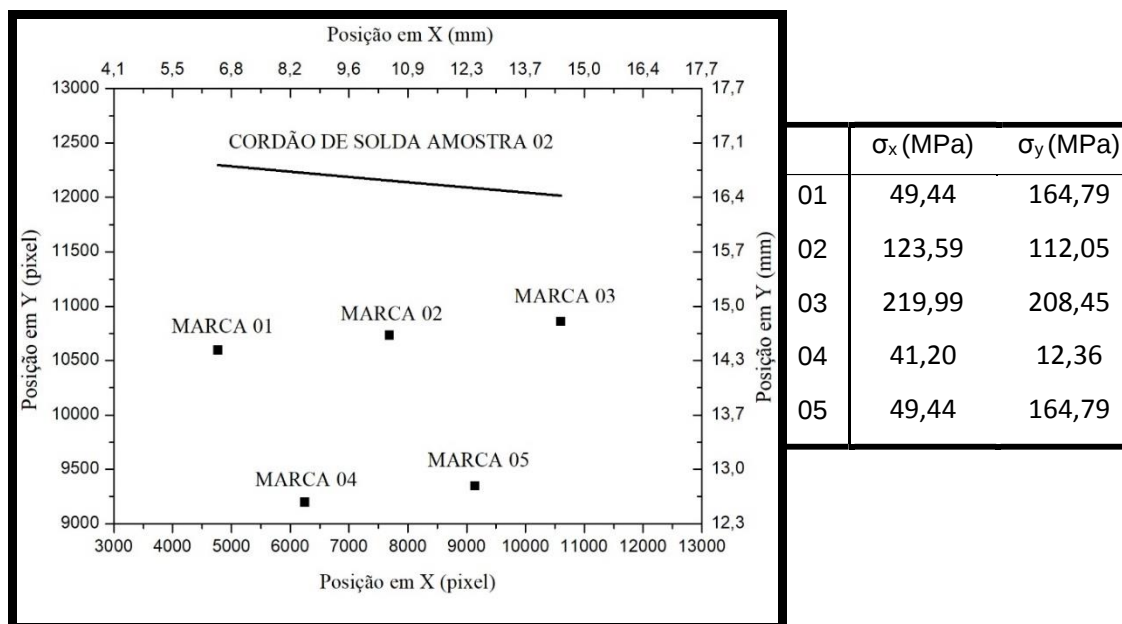


Fonte: O Autor (2020).

Analisando-se o gráfico da amostra 01, Figura 41, percebe-se uma inclinação do cordão de solda em relação as marcas, resultando numa variação do campo de tensões entre as marcações 1, 2 e 3. No entanto as marcas 4 e 5 as quais seguem a inclinação do cordão de solda, mantém a uniformidade dos valores de tensões residuais.

Analisando-se os dados da amostra 02, Figura 42, percebe-se um desalinhamento entre as marcações, com comportamento ascendente, e o cordão de solda, descendente, refletindo o comportamento das tensões residuais posicionando cada marcação em um campo de tensões diferente.

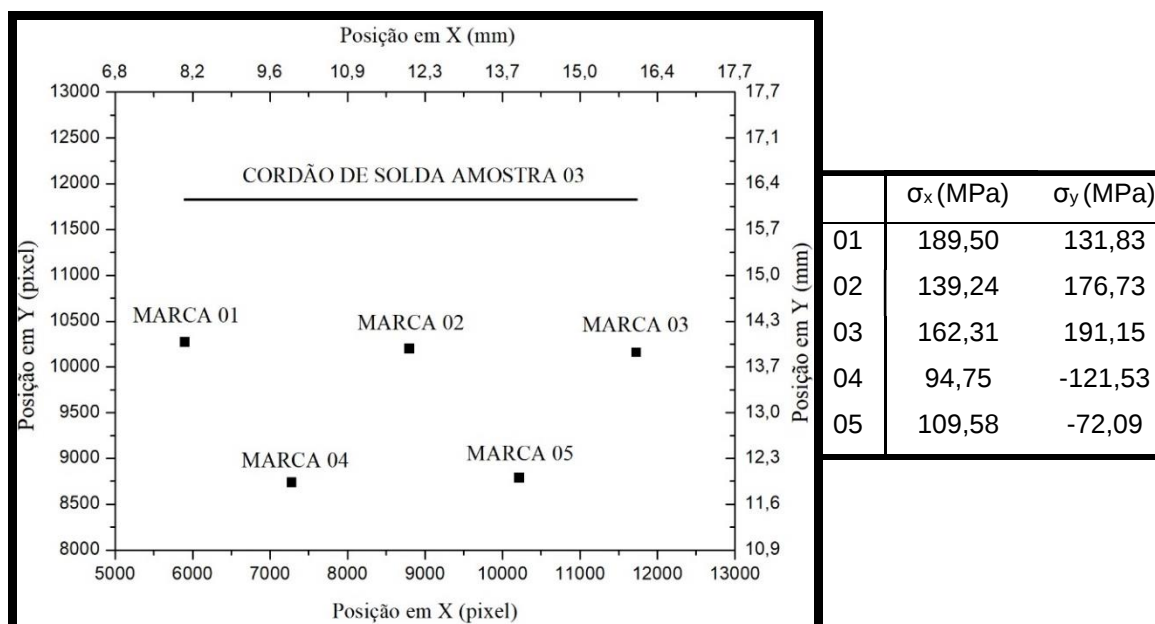
Figura 42 – Posições das Marcações e suas respectivas tensões para a Amostra 02



Fonte: O Autor (2020).

Um comportamento totalmente diferente se tem ao se analisar a amostra 03, Figura 43, nela percebe-se um relativo alinhamento entre as marcações e o cordão de solda provocando uma relativa uniformidade entre os valores das tensões as quais permanecem dentro do mesmo campo.

Figura 43 – Posições das Marcações e suas respectivas tensões para a Amostra 03



Fonte: O Autor (2020).

Devido ao aporte térmico as tensões na amostra 03, deveriam ser superiores a da amostra 02, mas as marcas desta amostra estão mais próximas do cordão.

Resultados estes condizentes com os apresentados por (MENDES, *et al.*, 2017), (SUGAHARA, *et al.*, 2018). Nestas pesquisas também se avaliou a variação do aporte térmico e seus efeitos em juntas soldas usando chapas ASTM AH36, soldadas com o processo GMAW. As tensões residuais nestes trabalhos foram aferidas usando o método DPC, e os resultados se mostraram condizentes quando comparados com os das amostras 1, 2 e 3 aferidos com DPC – ID.

6 CONCLUSÃO

A pesquisa foi concluída com a criação de um método inovador, de baixo custo, portátil e fácil aplicação para a aferição de tensões residuais na superfície das mais diversas amostras e processos.

Como principais resultados da pesquisa tem-se:

- a) Patenteamento do Processo
- b) Calibração do sistema metrológico com resolução de 1 pixel
- c) Incerteza de medição máxima de 0,25 pixel
- d) Procedimento para aplicação do método

O método DPID destaca-se pela sua confiabilidade e repetibilidade, tornando extremamente confiável. E sua versatilidade é garantida pela independência do equipamento usado para a aquisição das imagens, permitindo a sua aplicação em escala industrial, não estando limitado a escala laboratorial.

Com os constantes avanços tecnológicos e a versatilidade deste método, a sua automatização é um passo deixado para os futuros pesquisadores os quais podem adaptá-lo para as mais diversas situações.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Automação do método de medição de tensões residuais por deslocamento de pontos em imagens digitais
- b) Aplicação em campo do método de medição de tensões residuais por deslocamento de pontos em imagens digitais
- c) Avaliação das Tensões Residuais nos processos de conformação plástica utilizando o método de deslocamento de pontos em imagens digitais

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. I. L. **Análise numérica transiente térmica estrutural das tensões residuais em vasos de pressão cilíndricos submetidos a reparo por solda de acordo com a norma ASME PCC-2-2015**. UFPB. João Pessoa, p. 157. 2017. (CDU - 621 (043). TESE).
- ASTM E837. **Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method**. ASTM International. West Conshohocken. 2001.
- BEGHINI, M. et al. Experimental verification of the hole drilling plasticity effect correction. **Materials Science Forum**, v. 681, p. 151 - 158, Março 2011.
- CAMPOS, J. S. D. C.; RIBEIRO, A. A.; CARDOSO, C. X. Preparation and characterization of PVDF/CaCO₃ composites. **Materials Science and Engineering: B**, p. 123 - 128, 2007.
- CHANDLER, H. **Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels**. 2ª. ed. New York: ASM international, 1994.
- CHEN, X.; BIN, Z.; HONG, L. Optical and digital microscopic imaging techniques and applications in pathology. **Analytical Cellular Pathology**, p. 5 - 18, 2011.
- COCHRAN, G. V. B. Implantation of strain gages on bone in vivo. **Journal of biomechanics**, p. 121 - 123, Março 1971. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0021-9290\(72\)90024-3](https://doi.org/10.1016/0021-9290(72)90024-3)>.
- CONNOLLY, J. R. **Diffraction Basics, Part 2**. Universidade do Novo México. Albuquerque, p. 12. 2012.
- CRAIG, J. I. Georgia Tech. **School Aerospace Engineering**, 2013. Disponível em: <<http://soliton.ae.gatech.edu/people/jcraig/classes/ae3145/Lab2/strain-gage-rosette-theory.pdf>>. Acesso em: 01 Julho 2017.
- EFRATI, E.; SHARON, E.; KUPFERMAN, R. The metric description of elasticity in residually stressed soft materials. **Soft Matter**, v. 9, n. 34, p. 8187-8197, Março 2013.
- ERICSSON, T. Residual Stress Caused Thermal and Thermal Mechanics Treatments. **Advances In Surface Treatments**, Linkoping, p. 87 - 113, 1987.
- FERREIRA, R. A. S. et al. **Processo para Medição de Tensões Residuais a Partir de Imagens Digitais (DPC-ID)**. BR10201901142, 03 Junho 2019.
- FITZPATRICK, M. E. et al. Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction – Issue 2. **Measurement Good Practice Guide**, 2005.
- GOLDEINSTEIN, H. qfl2308. **Angelfire**, 2004. Disponível em: <http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_6_Microscopia_otica.pdf>. Acesso em: 01 Janeiro 2018.

GONÇALVES, I. L. **INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO TRATAMENTO DE ALÍVIOS DE**. UFPE. Recife, p. 88. 2015.

GONÇALVES, I. L. et al. Influência da temperatura no tratamento de alívios de tensões em uma junta. **22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Natal, p. 7800 - 7811, Novembro 2016.

GONÇALVES, S. D. P. **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAS DISTORÇÕES E TENSÕES RESIDUAIS EM CHAPAS GROSSAS SUBMETIDAS AO RESFRIAMENTO ACELERADO EM FUNÇÃO DAS CONTRAÇÕES TÉRMICAS**. UFMG. Belo Horizonte, p. 100. 2017. (Dissertação).

HARRIS, P. J. Primary and secondary plant cell walls: a comparative overview. **New Zealand Journal of Forestry Science** , p. 36, 2006.

HUYNH, L. A. T. . P. C. H. . & R. K. J. R. Huynh, L. A. T., Pham, C. H., & Rasmussen, K. J. R. (2019). Mechanical properties and residual stresses in cold-rolled aluminium channel sections. *Engineering Structures*, 199, 109562. doi:10.1016/j.engstruct.2019.109562 . **Engineering Structures**, Sidney, v. Springer, p. 19, Agosto 2019. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109562>.

JAPAN CAMERA INDUSTRY ASSOCIATION. **Guideline for Noting Digital Camera Specifications in Catalogs**. Digital Camera Committee. Tokyo, p. 16. 2001.

JENKINS, W. D.; DIGGES, T. G.; JOHNSON, C. R. Effect of Temperature on the Tensile Properties of a Commercial and a High-Purity 70-Percent-Nickel-30-Percent-Copper Alloy. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, v. 54, n. 1, p. 21 - 36, 1955.

JUNQUEIRA, L. C. U.; COSSERMELLI, W.; BRENTA, R. Differential staining of collagens type I, II and III by Sirius Red and polarization microscopy. **Archivum histologicum japonicum**, p. 267 - 274, 1978.

KANDIL, F. A. et al. A Review of Residual Stress Measurement Methods - A Guide to Technique Selection. **NPL Report Materials Center**, v. 4, 2001. ISSN 1473-273.

KRISS, C.; KRISS, M. History of the operating microscope: from magnifying glass to microneurosurgery. **Neurosurgery**, p. 899 - 907, 1988.
KUMAR R., K. G. . G. V. . K. S. Experimental and Numerical Assessment of Residual Stresses in AA6061 After Surface Treatment by Deep Cold Rolling. **Advances in Computational Methods in Manufacturing. Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering**, Singapura, p. 95 - 108, Outubro 2019. ISSN https://doi.org/10.1007/978-981-32-9072-3_9.

KWOFIE, S. Plasticity model for simulation, description and evaluation of vibratory stress relief. **Materials Science and Engineering A**, v. 516, p. 154 - 161, 2009.

LEICA MICROSYSTEMS. Leica Microsystems: Products Microscopes. **Leica Microsystems**, 2018. Disponível em: <https://www.leica-microsystems.com/fileadmin/downloads/Leica%20DMS1000/Brochures/Leica_DMS1000_Brochure_LSR_EN.pdf>. Acesso em: 01 Janeiro 2018.

LIMA, J. E. S. P/ROCESSOS DE CONFORMAÇÃO. **ETEP Faculdades**, 2019. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/11119473/>>. Acesso em: 01 Janeiro 2020.

MA, C. H.; HHUANG, J. H.; CHEN, H. Residual stress measurement in textured thin film by grazing-incidence. **Thin Solid Films**, p. 73 - 78, Julho 2002.

MAIA, T. D. M. et al. Influência da composição do gás de proteção nas tensões residuais de juntas de aço DP600 soldadas pelo processo GMAW. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 03, p. 9, Novembro 2019. ISSN 10.1590/S1517-707620190003.0763.

MARTINS, C. O. D. et al. Comparação entre Técnicas de Análise de Tensões Residuais em Anéis de Rolamento do Aço ABNT 52100. **Revista Matéria**, p. 20–28., 2004.

MATHAR, J. Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes. **Transactions ASME**, v. 56, n. 4, p. 249 - 254, 1934.

MCANDREW, A. **An introduction to digital image processing with matlab notes for scm2511 image processing**. Victoria University of Technology : School of Computer Science and Mathematics, 2004.

MELO, L. G. T. C. D. et al. Welded Joints' Heat Affected Zone's Extension Prediction by Switching Welding Parameters. **Materials Research**, 2017.

MENDES, C. E. et al. The Back Stress Behavior Study Analyzed in Residual Stress of Welded Naval Plates in Different Lamination Directions and Different Thermal Contributions. **Materials Research**, São Carlos, 2017.

MENDES, E. et al. The Back Stress Behavior Study Analyzed in Residual Stress of Welded Naval Plates in Different Lamination Directions and Different Thermal Contributions. **Materials Research**, São Carlos, v. 20, n. 2, p. 722-728, Novembro 2017. ISSN DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-1021>.

MOREIRA, C. Microscópio ótico. **Revista de Ciência Complementar**, Lisboa, v. 1, p. 1 - 3, Outubro 2013.

NASIR, S. M. N. et al. REVIEW ON WELDING RESIDUAL STRESS. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 11, n. 9, p. 6166 - 6175, Maio 2016. ISSN 1819-6608.

NEVES, S. O Fabuloso Microscópio. **CEMEQ - UFG**, 2019. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/98/o/Microscopio_partes.png>. Acesso em: 01 jan. 2020.

OSGOOD, C. C. **Fatigue Design**: International Series on The Strength and Fracture of Materials and Structures. [S.l.]: Elsevier, 2013.

PANG , C. et al. A flexible and highly sensitive strain-gauge sensor using reversible interlocking of nanofibres. **Nature materials**, v. 11, n. 9, p. 795 - 801, Setembro 2012.

PREVÉY, P. S. A method of determining the elastic properties of alloys in selected crystallographic directions for X-ray diffraction residual stress measurement. **Advances in X-ray Analysis**, p. 345 - 354, 1977.

PREVÉY, P. S. **X-ray diffraction residual stress techniques**. ASM International. New York, p. 380 - 392. 1986.

RADAJ, D. **Heat effects of welding**: temperature field, residual stress, distortion. [S.l.]: pringer Science & Business Media, 2012.

RAY, S. **Principles and Applications of Metal Rolling**. doi:10.1017/CBO9781139879293. ed. [S.l.]: Cambridge, v. Unico, 2016.

ROHDE, R. A. Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais. **Universidade Regional Integrada Santo Ângelo**, 2010. Disponível em: <<http://www.urisan.tcche.br/~lemm/metalografia.pdf>>. Acesso em: 01 Janeiro 2018.

ROSA, M. **Segmentação de Grãos De Hematita em Amostras de Minério De Ferro Por Análise de Imagens de Luz Polarizada**. Universidade Federal De Santa Maria. Santa Maria, p. 60. 2008. (Dissertação).

ROSSINI, N. S. et al. Methods of measuring residual stresses in components. **Materials & Design** **35**, p. 572 - 588, Março 2012.

RUZMAN, I.; SCHMITT, D. R. Three-dimensional stress-relief displacements from blind-hole drilling: a parametric description. **Experimental mechanics**, p. 52 - 60, 2003.

SCHAJER, G. S. Advances in Hole-Drilling Residual Stress Measurements. **Proceedings of the XIth International Congress and Exposition**, Orlando, Junho 2008.

SCHAJER, G. S. Hole-drilling residual stress measurements at 75: origins, advances, opportunities. **Experimental mechanics**, v. 50, n. 2, p. 245 - 253, 2010.

SCHAJER, G. S. **Practical residual stress measurement methods**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.

SEARS. **Transform SR Brands LLC**, 2020. Disponível em: <<https://www.sears.com/qibaok-step-drill-bit-set-with-automatic-center/p-A034338650#>>. Acesso em: 01 Janeiro 2020.

SEIFI, R.; MAJD, S. Effects of Plasticity on Residual Stresses Measurement by Hole Drilling Method. **Mechanics of Materials**, p. 72 - 79, 2012.

SINGH, M.; PG, S. All-Rounder Digital Image Processing: A Review. **International Journal of Engineering Science and Computing**, v. 6, n. 6, p. 6832 - 6836, Junho 2016. ISSN ISSN 2321 3361.

SINGLA, A.; KUMAR, G. G. **Through Thickness Residual Stress Distribution During Cold Rolling of Titanium Alloy (Commercial Pure)**. THAPAR UNIVERSITY. PATIALA, p. 60. 2017. (Tese).

SIQUEIRA FILHO, A. V. D. et al. **Estudo Comparativo Das Tensões Residuais Por Mesa de Coordenadas e DR-X**. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Campos do Jordão: CBECiMat. 2010. p. 6823 - 6830.

SIQUEIRA FILHO, S. U. et al. Development of methodology for measurements of residual stresses in welded joint based on displacement of points in a coordinated table. **Materials Research**, p. 322 - 326, 2013.

STLARSON. Resolução PPI DPI. **Nort Michigan University**, 2014. Disponível em: <http://art.nmu.edu/groups/cognates/wiki/8962d/Resolution_PPIDPI.html>. Acesso em: 01 Janeiro 2018.

SUGAHARA, H. et al. Measurement of Residual Stresses in Welded Joints by DCP Method. **Materials Research**, v. 21, p. 5, Maio 2018. ISSN <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0926>.

THAKUR, D. What is a pixel in Computer Graphics. **UEF - University Of EASTERN FINLAND**, 01 Janeiro 2018. Disponível em: <http://cs.uef.fi/paikka/rezaei/ke_testdata/3.htm>. Acesso em: 01 Janeiro 2018.

TOTTEN, G. E. **Handbook of residual stress and deformation of steel**. Ohio: ASM International, 2002.

VIEIRA, F. S. **Introdução à Microscopia**. Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, p. 18. 2008. (CDU 543.456).

WEBB, R. H. Confocal optical microscopy. **Reports on Progress in Physics**, p. 427, 1996.

WICK, D. V.; MARTINEZ., T. Adaptive optical zoom. **Optical engineering**, v. 41, n. 1, p. 8 - 10, 2004.

WITHERS, P. J.; BHADESHIA, H. K. D. H. Residual stress Part 1 – Measurement Techniques. **Materials Science and Technology**, p. 355 - 365, Abril 2001a. ISSN 0267 – 0836.

WITHERS, P. J.; BHADESHIA, H. K. D. H. Residual stress. Part 2 – Nature and origins. **Materials science and technology**, v. 17, n. 4, p. 366-375, Abril 2001b.

WOEBBECKE, D. M. et al. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions.. **Transactions of the ASAE**, p. 259 - 269, 1995.

APÊNDICE A – ARTIGOS COMPLETOS PUBLICADOS EM PERIÓDICOS

PALHA, RODRIGO NOGUEIRA ; BARROS, PATERNAK SOUZA ; YADAVA, YOGENDRA PRASAD ; DANTAS, CARLOS COSTA ; FERREIRA, RICARDO ARTUR SANGUINETTI . Quantification of Discontinuities in Welded Joints Using Gamma Tomography. MATERIALS RESEARCH, v. 22, p. 1-6, 2019.

SUGAHARA, HENRIQUE JUN ; Barros, Paternak de Souza. ; MELO, L. G. T. C. ; GONÇALVES, ISRAEL LIRA ; ROLIM, TIAGO LEITE ; YADAVA, YOGENDRA PRASAD; FERREIRA, RICARDO ARTUR SANGUINETTI. Measurement of Residual Stresses in Welded Joints by DCP Method. Materials Research-Ibero-american Journal of Materials, v. 21, p. e20170926, 2018.

MENDES, CATARINA ESPOSITO; MELO, LEONARDO GADELHA TUMAJAN COSTA DE; Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti ; BARROS, PATERNAK SOUZA ; ROLIM, TIAGO LEITE ; YADAVA, YOGENDRA PRASAD . The Back Stress Behavior Study Analyzed in Residual Stress of Welded Naval Plates in Different Lamination Directions and Different Thermal Contributions. Materials Research-Ibero-american Journal of Materials, v. 20, p. 722-728, 2017.

MELO, LEONARDO GADELHA TUMAJAN COSTA DE ; CARDOSO, FRANCISCO ILO ; MENDES, CATARINA ESPOSITO ; Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti ; BARROS, PATERNAK SOUZA ; ROLIM, TIAGO LEITE . Welded Joints' Heat Affected Zone's Extension Prediction by Switching Welding Parameters. Materials Research-Ibero-american Journal of Materials, v. 20, p. 651-656, 2017.

APÊNDICE B – TRABALHOS COMPLETOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSOS

MELO, L. G. T. C. ; Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti ; Mendes, C. E. ; Barros, Paternak de Souza. ; Rolim, T. L. ; ARAUJO, O. O. ; YADAVA, Y. P. . INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM NO CÁLCULO DE TENSÕES RESIDUAIS ATRAVÉS DO MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE PONTOS COORDENADOS (DPC) EM CHAPAS NAVAIS SOLDADAS. In: 22 Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016, Rio Grande Do Norte. 22 Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016. v. Único. p. 7403-7413.

MELO, L. G. T. C. ; Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti ; Mendes, C. E. ; Barros, Paternak de Souza. ; Rolim, T. L. ; ARAUJO, O. O. ; YADAVA, Y. P. . INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE BISEL NO CÁLCULO DE TENSÕES RESIDUAIS ATRAVÉS DO MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE PONTOS COORDENADOS (DPC) EM CHAPAS NAVAIS SOLDADAS. In: 22 Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016, Rio Grande do Norte. 22 Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016. v. Único. p. 7414-7424.

MELO, L. G. T. C. ; Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti ; Mendes, C. E. ; Barros, Paternak de Souza. ; Rolim, T. L. ; ARAUJO, O. O. ; YADAVA, Y. P. . INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE SOLDAGEM NO CÁLCULO DE TENSÕES RESIDUAIS ATRAVÉS DO MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE PONTOS COORDENADOS (DPC) EM CHAPAS NAVAIS SOLDADAS. In: 22 Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016, Rio Grande do Norte. 22 Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016. p. 7425-7435.

Mendes, C. E. ; MELO, L. G. T. C. ; Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti ; Barros, Paternak de Souza. ; Rolim, T. L. ; YADAVA, Y. P. . ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM NA TENSÃO RESIDUAL DE JUNTAS SOLDADAS PELO PROCESSO GMAW. In: 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 06 a 10 de Novembro de 2016, Natal, RN, Brasil, 2016, Natal. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais

06 a 10 de Novembro de 2016, Natal, RN, Brasil, 2016. v. Único. p. 7497-7505.

PERREIRA, E. F. ; Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti ; Rolim, T. L. ; YADAVA, Y. P. ; Barros, Paternak de Souza. . ESTUDO DA MICROESTRUTURA DO AÇO NAVAL ASTM A-131 GRAU AH36 AQUECIDO ATÉ AS TEMPERATURAS DE CONFORMAÇÃO. In: 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016, Natal. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016. v. Único. p. 4842-4849.

GONCALVES, I. L. ; Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti ; MELO, L. G. T. C. ; PINA, E. A. C. ; Barros, Paternak de Souza. ; SUGAHARA, H. J. ; YADAVA, Y. P. . INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO TRATAMENTO DE ALÍVIOS DE TENSÕES EM UMA JUNTA SOLDADA BASEADO NO DESLOCAMENTO DE PONTOS COORDENADOS. In: 22 Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016, Rio Grande do Norte. 22 Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016. v. Único. p. 7391-7402.

APÊNDICE C – RESUMOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSOS

Mendes, C. E. ; MELO, L. G. T. C. ; Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti ; Barros, Paternak de Souza. ; Rolim, T. L. ; CARDOSO, F. I. B. . ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA TENSÃO DE RECUO ANALISADA NAS TENSÕES RESIDUAIS DE CHAPAS NAVAIS SOLDADAS EM DIREÇÕES DE LAMINAÇÃO DISTINTAS E APORTES TÉRMICOS DIFERENTES. In: 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016, Rio Grande do Norte. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016. v. Único. p. 7436-7436.

MELO, L. G. T. C. ; CARDOSO, F. I. B. ; Mendes, C. E. ; Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti ; Barros, Paternak de Souza. ; Rolim, T. L. . PREVISÃO DO TAMANHO DA ZONA TERMICAMENTE AFETADA DE JUNTAS SOLDADAS COM VARIAÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM. In: 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016, Rio Grande do Norte. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. v. Único. p. 7492.

PINA, E. A. C.; GONCALVES, I. L.; MELO, L. G. T. C.; Barros, Paternak de Souza; YADAVA, Y. P. ; Rolim, T. L. ; Ferreira, Ricardo Artur Sanguinetti . ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE PONTOS COORDENADOS E RAIOS-X PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS. In: 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016, Natal. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016. v. Único. p. 7507-7507.

APÊNDICE D – PATENTES E REGISTROS

FERREIRA, RICARDO ARTUR SANGUINETTI ; BARROS, PATERNAK SOUZA ; GONÇALVES, ISRAEL LIRA ; ROLIM, TIAGO LEITE ; SUGAHARA, HENRIQUE JUN ; MELO, L. G. T. C. ; MENDES, CATARINA ESPOSITO ; SIQUEIRA FILHO, A. V. . Processo para Medição de Tensões Residuais a Partir de Imagens Digitais (DPC-ID). 2019, Brasil.

Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR10201901142, título: "Processo para Medição de Tensões Residuais a Partir de Imagens Digitais (DPC-ID)", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 03/06/2019