



República Federativa do Brasil  
Ministério da Economia  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102019011428-2 A2



(22) Data do Depósito: 03/06/2019

(43) Data da Publicação Nacional: 15/12/2020

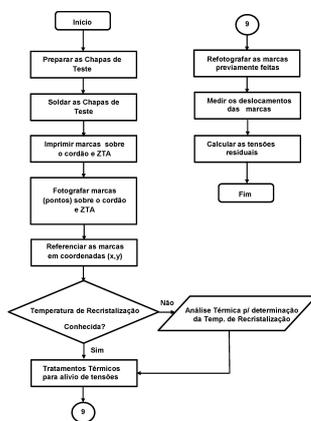
(54) Título: PROCESSO PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS A PARTIR DE IMAGENS DIGITAIS (DPC-ID)

(51) Int. Cl.: G01L 1/00; G01N 19/08; G01N 21/84.

(71) Depositante(es): UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.

(72) Inventor(es): RICARDO ARTUR SANGUINETTI FERREIRA; PATERNAK DE SOUZA BARROS; ISRAEL LIRA GONÇALVES; TIAGO LEITE ROLIM; HENRIQUE JUN SUGAHARA; LEONARDO GADELHA TUMAJAN COSTA DE MELO; CATARINA ESPÓSITO MENDES; ANÍBAL VERAS DE SIQUEIRA FILHO.

(57) Resumo: As tensões residuais (TR) têm sido determinadas em juntas soldadas por diferentes metodologias. Dentre as mais importantes estão a difração de R-X, a difração de nêutrons, método ultrassônico (ondas ultrassônicas), métodos magnéticos (efeito Barkhausen) e o método do furo cego (ASTM-E-837), além dos métodos analíticos (computacionais). Recentemente, as (TR) de uma junta soldada foram medidas simultaneamente por dois métodos: difração de raios-X (DR-X) e Deslocamento de Pontos Coordenados (DPC), por este grupo desenvolvido. Os resultados entre estes dois métodos mostraram-se coerentes, tendo o método DPC uma incerteza menor que a DR-X. Baseado na experiência adquirida, foi desenvolvida esta nova variante do método DPC. Neste novo método, agora denominado (DPC-ID), serão usadas imagens digitais para referenciamento e medição da extensão (em x e y) dos deslocamentos dos pontos após tratamentos térmicos. Conhecendo-se os deslocamentos, as tensões residuais serão calculadas no estado plano de tensões e os resultados serão ratificados por (DR-X). Neste novo método, o referenciamento e o deslocamento dos pontos coordenados (x e y) serão obtidos a partir de imagens digitais, capturadas por uma câmera digital de alta resolução; onde as medições terão como unidade dimensional o pixel, com posterior conversão (...).



## **Processo para Medição de Tensões Residuais a Partir de Imagens Digitais (DPC-ID)**

[01] O “Processo para Medição de Tensões Residuais a Partir de Imagens Digitais (DPC-ID)” é um novo método para aplicação em superfícies soldadas ou trabalhadas a frio. Para as medições serão usadas imagens digitais para referenciamento de pontos de uma superfície (em **x** e **y**) e para medição da extensão dos seus deslocamentos após tratamentos térmicos para alívio de tensões.

[02] As tensões residuais (TR) têm sido determinadas em juntas soldadas por diferentes metodologias. Dentre as mais importantes estão a difração de R-X, a difração de nêutrons, método ultrassônico (ondas ultrassônicas), métodos magnéticos (efeito Barkhausen), pelo método do furo cego (ASTM-E-837), além dos métodos analíticos (computacionais). Recentemente, as tensões residuais de uma junta soldada do aço naval ASTM AH-36 foram medidas simultaneamente por dois métodos: um já consagrado (difração de raios-X) e outro, por nós desenvolvido, o DPC - Deslocamento de Pontos Coordenados. Os resultados entre estes dois métodos mostraram-se coerentes, tendo o método DPC uma incerteza menor que a difração R-X e ainda é sensível aos efeitos da anisotropia. Este método DPC pode ser usado com segurança para previsão das tensões residuais em chapas de quaisquer dimensões, mas não é uma metodologia portátil; pois a medição dos deslocamentos deve ser feita numa máquina de medição por coordenadas. Baseado na experiência adquirida (veja antecedentes no documento CI), estamos desenvolvendo uma nova variante do método DPC. Neste novo método de medição, agora denominado (DPC-ID), serão usadas imagens digitais para referenciamento (em **x** e **y**) e para medição da extensão dos deslocamentos dos pontos após tratamentos térmicos para alívio de tensões. Neste novo método, as imagens digitais poderão ser tratadas “in loco” pelo analisador de imagens instalado num lap top. Desta forma, a portabilidade do novo método pode ser assegurada.

[03] Os métodos mais utilizados para medição de tensões residuais em chapas soldadas ou trabalhadas a frio são a difração de raios-x e o furo cego. A difração é uma técnica não muito simples, requer mão de obra especializada e, portanto não é de uso fácil. O custo do equipamento é alto e inviabiliza sua utilização em pequenas empresas. A incerteza da medição é elevada e não é sensível aos efeitos da anisotropia da chapa. O furo cego é uma técnica muito precisa, mas de elevadíssimo custo e também requer mão de obra especializada. Muitas vezes são necessários três “strain gage” para medição de tensões em um único ponto. Considerando-se um valor de 1.000,00 a R\$ 1.200,00 por “strain gage”, a medição das tensões residuais em um único ponto custará mais de R\$ 3.000,00. Numa chapa soldada onde se tenciona medir uns dez pontos, o custo desta metodologia tornar-se-á proibitivo, mesmo para as grandes indústrias.

[4] Em busca de anterioridades, encontramos outros métodos para medição de tensões residuais em superfície trabalhadas a frio ou usinadas que fazem uso imagens digitais em metodologias diversas que também têm custo elevado:

- CN201510293321.XA espectrometria de imagens das deformações;
- CN102072877A imagens digitais tridimensionais de furação;
- ~~US~~ US4489425A relação teórica entre a forma cônica do campo de visão de imagens;
- CN CN102322992A imagens de superfícies micro-usinadas por feixe de íons;
- ~~CN~~ CN105044104A interferometria das imagens;
- US TW US7636151B2 interferometria das imagens;
- US US7423287B1 moduladores de imagens interferométricos;

- CN104236759A imagens espectrais;

Nesta busca, nada foi encontrado sobre medição de tensões residuais em juntas soldadas, baseada no deslocamento de pontos coordenados a partir de imagens digitais.

[05] A nova metodologia DPC-ID, além de ser sensível aos efeitos da anisotropia das chapas (sentidos da laminação em relação à direção de soldagem) é de baixíssimo custo, embora também requeira mão de obra especializada, porém, bem menos complicada que na difração de raios-x. Levando-se em conta a sensibilidade à anisotropia, deve-se ainda considerar a influência no sentido da soldagem nos valores das tensões residuais. A soldagem de chapas em um único sentido produz valores de tensões residuais diferentes de outra soldagem em dois sentidos (vai-e-vem). Desta forma, a montagem dos painéis navais poderá ser feitas num sequenciamento que leve em conta a direção da laminação (durante a fabricação da chapa) e os sentidos de soldagem (em um ou nos dois sentidos) de maneira a compensar as distorções produzidas durante a união destas peças. Isto é extremamente inovador e o grande diferencial de nossa metodologia.

[06] A medição de tensões residuais pelo método do “Deslocamento de Pontos Coordenados obtidos a partir de Imagens Digitais (DPC-ID)” poderá ser melhor compreendido através das ilustrações descritas abaixo e apresentadas nas figuras em anexo.

[07] Num corpo de prova retirado de uma chapa de teste soldada, é feita uma marcação referenciada em  $(x, y)$ . As posições iniciais  $(x_i, y_i)$  e finais  $(x_f, y_f)$  destes pontos são tomadas em relação a uma marcação nas bordas da amostra. Este método afere a posição destas marcações antes e depois da aplicação de um tratamento de alívio de tensões. Desta maneira, ficam conhecidas as coordenadas da marcação  $(x_f, y_f)$  e  $(x_i, y_i)$ , antes e após a aplicação do TTAT. Todas as medições são feitas em pixel e depois convertida para milímetro.

[08] O primeiro passo para aferir uma distância em uma imagem digital é a calibração do tamanho dos pixels, pois esta medida caracteriza a resolução do sistema de medição. Utilizando um aplicativo computacional o tamanho dos pixels é calibrado a través da marca da escala fornecida nas imagens do Microscópio Ótico conforme a figura à esquerda. O aplicativo fornece a quantidade de pixels contida na distância aferida de 0,5 mm na figura à direita. Para ampliação utilizada no microscópio ótico, a câmera fornece imagens digitais com resolução de 2080 x 1544 gerando para esta ampliação pixels de 0,001365 mm. Conhecido o tamanho de cada pixel é possível iniciar o mapeamento da posição das marcações. O sistema de medição do método DPID leva em consideração a distância horizontal e vertical da marcação a borda da amostra.

[09] Durante a montagem das imagens, alguns cuidados devem ser tomados. 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 devido à falta de alinhamento perceptível. É preciso considerar-se que esta operação será feita em analisadores de imagens nos quais este alinhamento poderá ser feito automaticamente.

[10] Para aferição de Tensões Residuais através deste método, serão soldadas chapas de teste com dimensões de 200 mm x 100 mm, por um processo de soldagem automatizado. A soldagem será realizada considerando-se dois sentidos em relação laminação da chapa (paralelo e transversal). Para facilitar o manuseio junto ao microscópio, serão retirados das chapas de teste (CT), corpos de prova (CP) contendo as marcações previamente realizadas. Cada um destes corpos de prova (figura 1) serão fotografados com uma câmara digital para determinação das coordenadas (x,y) dos pontos marcados em relação a uma referência secundária, feita no próprio corpo de prova. Depois de determinadas todas as coordenadas dos pontos previamente mapeados, os corpos de serão submetidos a um tratamento térmico para alívio de

tensões (TTAT). Após o tratamento térmico, cada CP será novamente fotografado para medição dos deslocamentos dos pontos produzidos pelo tratamento.

[11] Considerando-se a condição de estado plano de tensões, as deformações ( $\varepsilon_x$  e  $\varepsilon_y$ ), em cada ponto, produzidas pelo tratamento térmico para alívio de tensões (TTAT) serão obtidas pela diferença entre as duas condições da junta: antes ( $o$ ) e depois ( $t$ ) do tratamento e serão dadas pelas equações 1 e 2.

$$\varepsilon_x = \frac{x_t - x_o}{x_o} \quad \text{eq. 1}$$

$$\varepsilon_y = \frac{y_t - y_o}{y_o} \quad \text{eq. 2}$$

Onde,

$x_o \rightarrow$  é a coordenada x de um ponto antes do TTAT;

$x_t \rightarrow$  é a coordenada x de um ponto depois do TTAT;

$y_o \rightarrow$  é a coordenada y de um ponto antes do TTAT;

$y_t \rightarrow$  é a coordenada y de um ponto depois do TTAT.

[12] Conhecendo-se a distância dos deslocamentos dos pontos mapeados, dados pelas diferenças nas equações 1 e 2, as tensões residuais podem ser calculadas através das equações 3 e 4.

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \quad \text{eq. 3}$$

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \quad \text{eq. 4}$$

Onde:

$\sigma_y \rightarrow$  Tensão residual longitudinal - direção da solda [Pa];

$\sigma_x \rightarrow$  Tensão residual transversal - direção normal à linha da solda [Pa];

$\varepsilon_x \rightarrow$  Deformação na direção da solda;

$\varepsilon_y$  → Deformação na normal a linha da solda;

$\nu$  → Coeficiente de Poisson;

E → Modulo de Elasticidade [Pa].

[13] O método “Deslocamento de Pontos Coordenados obtidos a partir de Imagens Digitais (DPC-ID)” serve para medir tensões residuais em chapas metálicas, soldadas ou trabalhadas a frio. Neste tipo de material, comum às indústrias metal-mecânicas, o método será de grande utilidade nos estaleiros e nas montadoras (caldeiraria), considerando-se que todos os elementos estruturais nestas indústrias apresentam tensões residuais, inerentes ao processo de fabricação, que podem apresentar altos valores, capazes de comprometer a integridade ou a vida útil destes elementos. Este método DPC pode ser usado com segurança para previsão das tensões residuais em chapas de quaisquer dimensões, mas não é uma metodologia portátil; pois a medição dos deslocamentos deve ser feita numa máquina de medição por coordenadas. Baseado na experiência adquirida (veja antecedentes dos requerentes), está sendo desenvolvida uma nova variante do método DPC. Neste novo método de medição, agora denominado (DPC-ID), serão usadas imagens digitais para referenciamento (em **x** e **y**) e para medição da extensão dos deslocamentos dos pontos após tratamentos térmicos para alívio de tensões. Neste novo método, as imagens digitais poderão ser tratadas “in loco” pelo analisador de imagens instalado num lap top. Desta forma, a portabilidade do novo método pode ser assegurada. Os desafios a superar são relativos à automação da metodologia, ou seja, a sua adaptação ao analisador de imagens. O analisador de imagens medirá os deslocamentos dos pontos e o cálculo das tensões residuais será feito através de uma sub-rotina adaptada ao programa principal. Todas estas dificuldades iniciais já estão praticamente superadas pelos estudos de doutorado (três ao todo) que estão em andamento.

## REIVINDICAÇÃO

- 1) Processo para medição de tensões residuais a partir de imagens digitais (DPC-ID), **caracterizado pelas** seguintes etapas:
  - a) preparar as chapas de teste, duas a duas, chanfradas com ângulo de bisel normatizado;
  - b) soldar as chapas de teste com diferentes parâmetros de soldagem para avaliação destes sobre as tensões residuais;
  - c) imprimir marcas eletrolíticas (pontos) sobre a zona termicamente afetada e sobre a região central do cordão;
  - d) fotografar estas regiões marcadas nas diferentes chapas de teste;
  - e) referenciar os pontos marcados destas regiões com um sistema de coordenadas (x, y), tendo sempre uma referência comum;
  - f) realizar análise térmica diferencial para determinação da temperatura de recristalização, quando esta não for conhecida;
  - g) realizar tratamentos térmicos das chapas de teste soldadas para alívio de tensões em temperaturas inferiores à temperatura de recristalização;
  - h) refotografar as regiões previamente marcadas, preservando-se a referência comum;
  - i) medir os deslocamentos dos pontos previamente referenciados para se calcular a deformação produzida pelo tratamento para alívio de tensão;
  - j) baseado nos deslocamentos, calcular as tensões resíduas nas diferentes chapas de teste soldadas.

## **Reinvidicações**

O Processo para Medição de Tensões Residuais a partir de Imagens Digitais (DPC-ID) é caracterizado pelas seguintes etapas:

1. Preparar as chapas de teste, duas a duas, chanfradas com ângulo de bisel normatizado;
2. Soldar as chapas de teste com diferentes parâmetros de soldagem para avaliação destes sobre as tensões residuais;
3. Imprimir marcas eletrolíticas (pontos) sobre a zona termicamente afetada e sobre a região central do cordão;
4. Fotografar estas regiões marcadas nas diferentes chapas de teste;
5. Referenciar os pontos marcados destas regiões com num sistema de coordenadas (x,y), tendo sempre uma referência comum;
6. Realizar análise térmica diferencial para determinação da temperatura de recristalização, quando esta não for conhecida;
7. Realizar tratamentos térmicos das chapas de teste soldadas para alívio de tensões em temperaturas inferiores à temperatura de recristalização;
8. Refotografar as regiões previamente marcadas, preservando-se a referência comum;
9. Medir os deslocamentos dos pontos previamente referenciados para se calcular a deformação produzida pelo tratamento para alívio de tensão;
10. Baseado nos deslocamentos, calcular as tensões residuais nas diferentes chapas de teste soldadas.

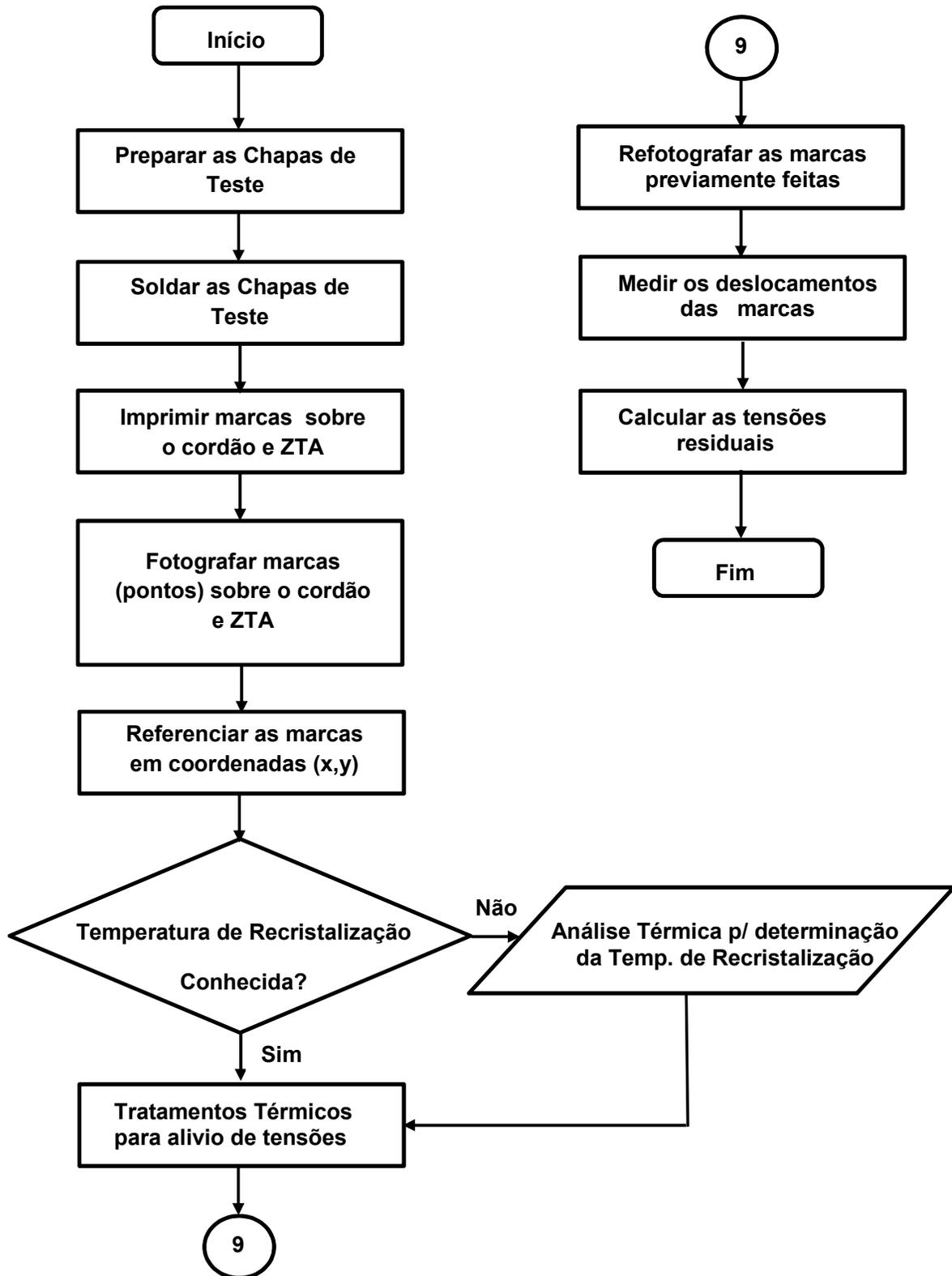


Figura 1

## Resumo

### **Processo para Medição de Tensões Residuais a Partir de Imagens Digitais (DPC-ID)**

As tensões residuais (TR) têm sido determinadas em juntas soldadas por diferentes metodologias. Dentre as mais importantes estão a difração de R-X, a difração de nêutrons, método ultrassônico (ondas ultrassônicas), métodos magnéticos (efeito Barkhausen) e o método do furo cego (ASTM-E-837), além dos métodos analíticos (computacionais). Recentemente, as (TR) de uma junta soldada foram medidas simultaneamente por dois métodos: difração de raios-X (DR-X) e Deslocamento de Pontos Coordenados (DPC), por este grupo desenvolvido. Os resultados entre estes dois métodos mostraram-se coerentes, tendo o método DPC uma incerteza menor que a DR-X. Baseado na experiência adquirida, foi desenvolvida esta nova variante do método DPC. Neste novo método, agora denominado (DPC-ID), serão usadas imagens digitais para referenciamento e medição da extensão (em **x** e **y**) dos deslocamentos dos pontos após tratamentos térmicos. Conhecendo-se os deslocamentos, as tensões residuais serão calculadas no estado plano de tensões e os resultados serão ratificados por (DR-X). Neste novo método, o referenciamento e o deslocamento dos pontos coordenados (**x** e **y**) serão obtidos a partir de imagens digitais, capturadas por uma câmera digital de alta resolução; onde as medições terão como unidade dimensional o pixel, com posterior conversão ao sistema métrico. Desta forma será dada a portabilidade necessária ao método, objetivando-se sua implementação nas indústrias.