



C A P Í T U L O 6

AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM COMPONENTES ESTRUTURAIS

Fábio Junkes Corrêa

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, Pato Branco – PR, Brasil

Wagner Silveira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, Pato Branco – PR, Brasil

Fábio Rodrigo Mandello Rodrigues

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, Pato Branco – PR, Brasil

O estudo de tensões residuais (TR) é relevante no desenvolvimento de projetos estruturais, visto que a sua ocorrência pode alterar significativamente a resistência dos componentes como, por exemplo, diminuir a resistência à tração, tanto em carregamentos estáticos, quanto em carregamentos dinâmicos. As propriedades mecânicas dos materiais utilizados em componentes estruturais, como as resistências à fratura e à fadiga, podem ser consideravelmente influenciadas pelas TR, trazendo, usualmente, custos elevados com reparos e restauração de equipamentos e estruturas. Assim, TR são um dos principais fatores na influência das propriedades dos materiais e deveriam ser levadas em consideração durante o projeto e a manufatura de produtos. Por exemplo, a presença de TR de tração em uma peça é, geralmente, prejudicial, uma vez que pode contribuir para a falha por fadiga. Por outro lado, as TR compressivas induzidas por diferentes meios nas camadas superficiais e subsuperficiais do material são, normalmente, benéficas, pois podem evitar a formação e a propagação de fissuras por fadiga. Exemplos de operações que produzem tensões tratativas prejudiciais são o corte, a usinagem, o esmerilhamento e a extrusão ou trefilação. Sendo assim, as TR podem facilitar a geração de trincas e reduzir a performance de um equipamento (PUYMBROECK *et al.*, 2018; VALIORGUE *et al.*, 2018).

As aplicações de processos de manufatura, térmicos, químicos ou termoquímicos podem gerar TR. Dentre os processos mencionados, há o de conformação, que modifica a forma de um componente devido às deformações plásticas, como os

processos de forjamento, laminação e estampagem, produzindo TR (BEGHINI; BERTINI; MONELLI, 2014). Quando um componente estrutural é carregado além de seu limite de escoamento, ocorre uma deformação permanente e, após o descarregamento, todas as tensões, teoricamente, podem desaparecer. Entretanto, esse fenômeno não acontece na prática, pois as TR permanecem em uma estrutura após o descarregamento (MEYER *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2019). No entanto, elas podem ser definidas como as tensões elásticas que permanecem dentro de um corpo mesmo com a ausência de carregamentos externos (ROSSINI *et al.*, 2012). (ROSSINI *et al.*, 2012). Em relação aos processos térmicos, como soldagem e tratamentos térmicos, as tensões residuais são geradas pelo aquecimento e resfriamento localizados, que causam contrações desiguais nas diferentes regiões da peça (SEIFI; SALIMI-MAJD, 2012).

Na literatura podem ser encontrados diversos métodos de medição de tensões residuais (TR), tais como métodos não destrutivos, destrutivos ou semi-destrutivos. Considerando as aplicações e as particularidades de cada método, dependendo da natureza do componente, tipos de tensões, gradientes térmicos, forma do componente, profundidade pretendida, precisão exigida e outros fatores, seleciona-se o mais apropriado (PAIVA, 2015).

MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS

Os métodos não destrutivos têm por característica principal medir as mudanças nos espaçamentos entre os planos cristalinos do material decorrente da presença de TR. Esses métodos, quanto à abrangência, além de avaliar as TR macroscópicas, possibilitam examinar as TR microscópicas. Entre os métodos não destrutivos utilizados para a medição de TR, existem diversas técnicas, como ultrassom, difração de raios-X, difração de síncrotron e difração de nêutrons.

A técnica de difração de raios-X é a técnica não destrutiva mais usada, principalmente pelas suas praticidade e efetividade, e é especializada na medição de TR superficiais. Essa técnica é baseada no espaçamento interatômico do material (LIN; MA; LEI, 2017; MOUSSAOUI *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2017).

A técnica de difração de síncrotron, conhecida como difração de raio-X de alta energia, utiliza o mesmo princípio da difração de raios-X padrão. Em relação a esta, a técnica de síncrotron tem uma maior capacidade de penetração e um menor tempo de aquisição dados. A incidência de raios-X de alta energia, que são difratados, possibilita medir a mudança na separação dos planos da rede atômica devido às TR (HOLMBERG; STEUWER; STORMVINTER, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2016).

A técnica de difração de nêutrons é uma técnica não destrutiva que mede as TR mais profundas dentro de um material com base na detecção das difrações de um

feixe de nêutrons incidente. O feixe de nêutrons difratado permite a identificação de mudanças no espaçamento da rede atômica devido às TR. As mudanças relativas no espaçamento são comparadas a uma amostra de material sem a presença de TR, permitindo calcular os valores das TR (HEMMESI; FARAJIAN; BOIN, 2017; SEO *et al.*, 2017; STEGEMANN *et al.*, 2017).

A técnica de medição ultrassônica é uma técnica não destrutiva aplicável a diversos materiais. As ondas ultrassônicas são, comumente, usadas para detectar descontinuidades em materiais. Elas também podem ser usadas para a medição de TR. A velocidade das ondas ultrassônicas que se propagam através de um material é afetada pela direção e magnitude das TR presentes. Desta maneira, a magnitude e a direção das TR presentes dentro dos materiais podem ser calculadas, medindo com precisão a mudança no tempo de propagação de uma onda ultrassônica que se propaga pelas regiões tensionadas e não tensionadas dos materiais (MININ; TROFIMOV; TROFIMOV, 2016; ZHAN *et al.*, 2017).

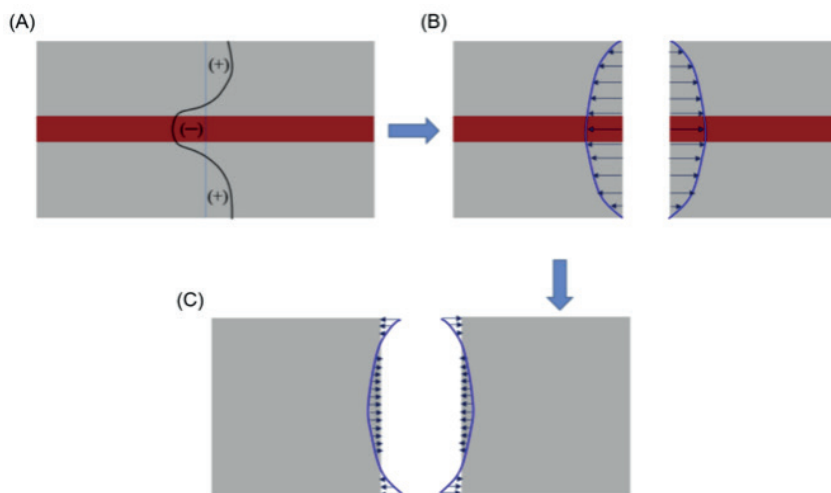
Os métodos não destrutivos, comparados aos métodos semi-destrutivos e destrutivos, são mais rápidos e eficientes, e possibilitam medir tensões em escala microscópica. Porém, os métodos não destrutivos possuem algumas desvantagens tais como: dificuldade de serem utilizados em geometrias complexas como, por exemplo, uma junta soldada; custo mais elevado e necessidade de um treinamento específico aos inspetores, podendo ser aplicados em campo.

MÉTODOS DESTRUTIVOS

Os métodos destrutivos, diferentemente dos métodos não destrutivos, caracterizam-se pela remoção de material do componente durante a aplicação da técnica e do seu descarte funcional. Dentre os diversos métodos destrutivos utilizados para a avaliação das TR, encontram-se o método do contorno, o método de Sanchs-Boring e o método do corte.

O método do contorno é um método destrutivo empregado para investigar a tensão residual normal à seção de corte. Essa técnica é baseada no princípio da variação da superposição elástica de Bueckner, o qual afirma que um corpo fraturado, sujeito a carregamentos externos, apresenta TR nas superfícies de fratura. Essa técnica envolve um corte integral da amostra por eletroerosão (Figura 1), a avaliação das deformações usando um equipamento de medição por coordenadas, com base nas distorções presentes na superfície de corte, resultantes do alívio de deformações e, por fim, as TR são recalculadas usando análises por elementos finitos (MURÁNSKY *et al.*, 2016a, 2016b; WAN *et al.*, 2017).

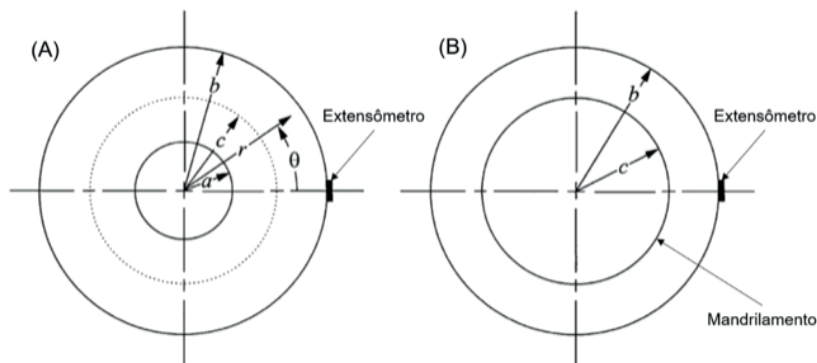
Figura 1 - Etapas do método do contorno: (a) previsão teórica da distribuição de tensões, (b) execução do corte e (c) reprodução das tensões residuais com base nas distorções superficiais.



Fonte: Adaptado de Gadallah et al. (2015)

Uma alternativa ao método do contorno é a utilização do método de Sanchs-Boring. Esse método consiste na medição de TR axissimétricas a partir da análise do alívio de deformações durante a retirada incremental de camadas de material através do processo de mandrilamento (Figura 2). Para realizar a técnica, os extensômetros são instalados na superfície lateral externa do componente antes da remoção de material. O processo de retirada incremental de material é realizado a partir da face interna em direção à superfície externa onde estão fixados os extensômetros. Cada incremento de usinagem remove uma camada axissimétrica do componente até não ser mais possível medir o alívio de deformação (GARCIA-GRANADA; LACARAC; SMITH, 2001).

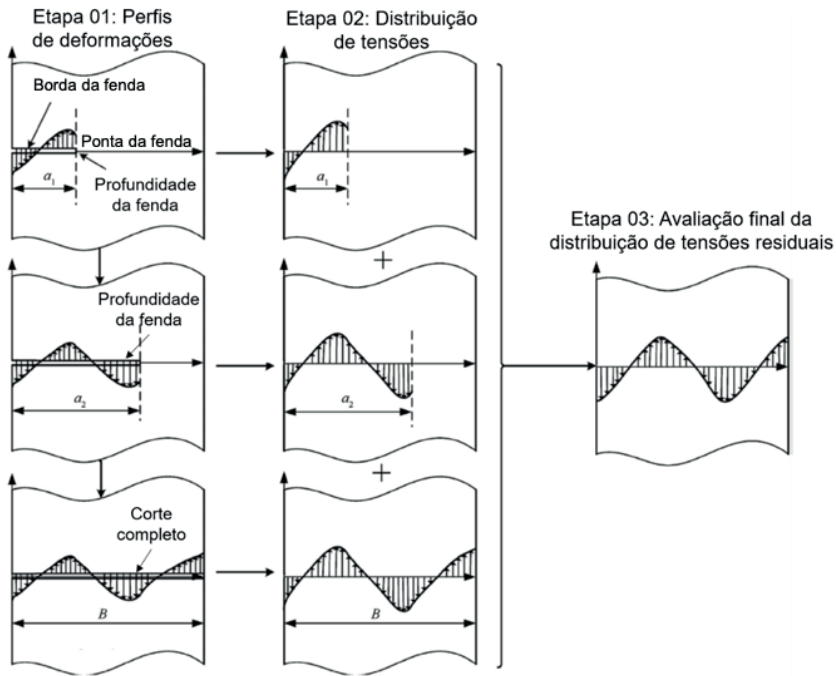
Figura 2 - Método sanchs-boring: (a) antes e (b) depois de mandrilar.



Fonte: Adaptado de Garcia-Granada et al. (2001)

A técnica do corte é uma técnica destrutiva na qual são medidas com precisão as TR próximas à superfície e ao longo da espessura a partir do alívio das deformações. A técnica envolve o corte de uma fenda por eletroerosão em um componente (Figura 3), sendo que a medição das deformações superficiais é realizada por extensômetros localizados ao lado da fenda. Durante o procedimento, a profundidade da fenda é aumentada de forma incremental para profundidades predeterminadas e, em cada incremento de profundidade a deformação é medida. Os alívios das deformações superficiais estão relacionados às tensões ao longo da espessura da amostra usando coeficientes numericamente determinados (JONES; BUSH, 2017; SHOKRIEH; JALILI; KAMANGAR, 2018; XU; BAO, 2017).

Figura 3 - Método do corte.



Fonte: Adaptado de Xu e Bao (2017)

Em relação a outras técnicas de medição de TR, os métodos destrutivos têm a grande vantagem de poder medir tensões em profundidades significativas de um componente e poder analisar o campo tridimensional das TR presentes. Por outro lado, a grande desvantagem é a inutilização da amostra após ser aplicada a técnica.

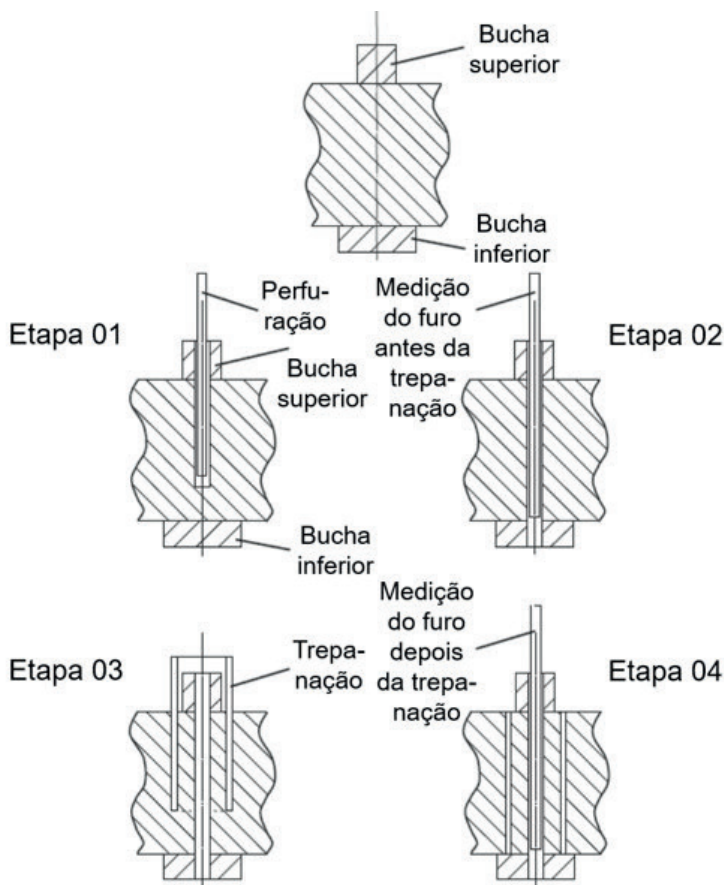
MÉTODOS SEMI-DESTRUTIVOS

Outra forma de medir TR é através das técnicas semi-destrutivas, como o método do furo profundo, a técnica do núcleo toroidal e a técnica do furo cego. Enquanto os métodos não destrutivos não alteram a funcionalidade ou a resistência mecânica do componente analisado, os métodos semi-destrutivos causam algum dano no componente, os quais podem ser significativos ou não, podendo comprometer ou não a sua operação.

O método do furo profundo é um método semi-destrutivo usado para medir as TR em seções espessas (Figura 4). A técnica do furo profundo envolve a perfuração

de um furo guia ao longo do componente (Figura 4 - Etapa 1) e a medição com precisão do seu diâmetro antes (Figura 4 - Etapa 2) e depois (Figura 4 - Etapa 4) do alívio de tensão causado pela execução da trepanação (Figura 4 - Etapa 3) em torno do furo guia. As diferenças entre os diâmetros medidos antes e depois do alívio de tensões permitem que as TR originais sejam calculadas (GARZA; DAS; SHTERENLIKHT, 2018; JAMES; NEWBY; DOUBELL, 2014; SKOURAS *et al.*, 2013).

Figura 4 - Etapas do método do furo profundo.

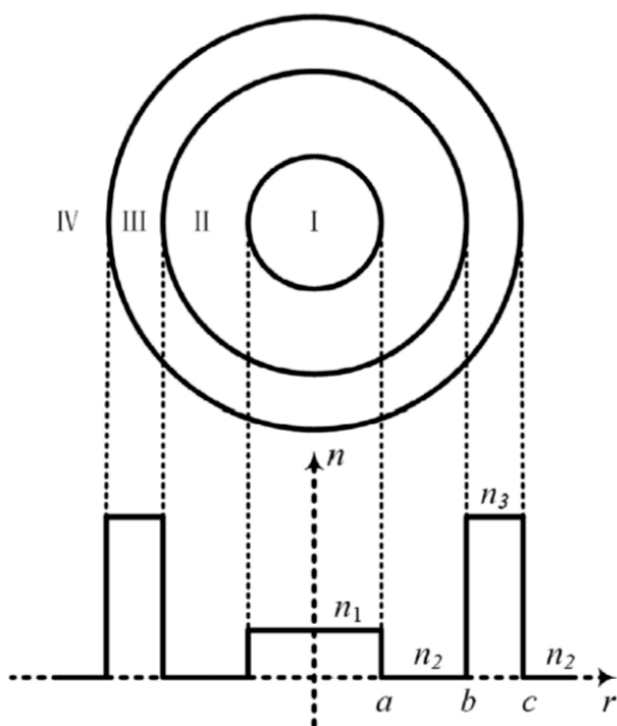


FONTE: Adaptado de Zheng et al. (2017)

A técnica do núcleo toroidal é uma técnica semi-destrutiva baseada no alívio de deformações e é usada para medir TR, uniformes ou não-uniformes, próximas

à superfície. Essa técnica envolve a realização de uma ranhura anular concêntrica (Figura 5 - Região II) em torno dos extensômetros situados na região central do componente (Figura 5 - Região I). Através dos alívios das deformações aferidos pelos extensômetros posicionados na superfície do núcleo central (Figura 5 - Região I), são determinadas as TR para cada incremento de profundidade (BOUFFIOUX; PESCI; BOMAN, 2016; GIRI; MAHAPATRA, 2017).

Figura 5 - Método do núcleo toroidal.

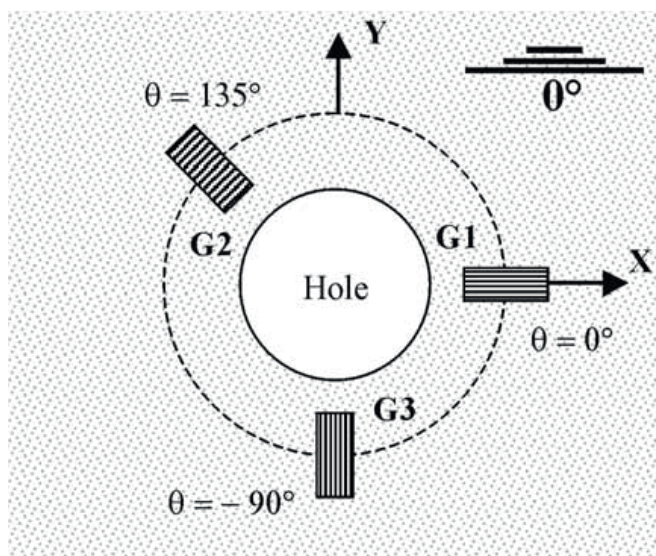


Fonte: Adaptado de Zhu et al. (2015)

A técnica do furo cego consiste em medições das deformações, através de extensômetros, causadas pelo alívio das TR durante perfurações incrementais. Em outras palavras, uma porção do material que está sob TR é removida e, com isso, ocorre um alívio de tensões. A Figura 06 mostra uma roseta em um componente durante a execução da perfuração no seu centro. Essa técnica pode ser usada para calcular as TR uniformes ou não uniformes ao longo da profundidade do material.

Na prática, normalmente, as tensões variam com a profundidade (LOTHHAMMER; VIOTTI; ALBERTAZZI, 2017).

Figura 6 - Roseta utilizada no método do furo cego.



FONTE: Adaptado de Lin et al. (2014)

O método do furo cego permite medir tensões residuais em peças fundidas e em juntas soldadas, desde que haja uma preparação da amostra, a qual é submetida a operações de desbastes e de lixamentos. Esse método apresenta algumas limitações como: sensibilidade dos extensômetros com o aumento da profundidade; erros experimentais; aplicação apenas em materiais linear-elásticos e necessidade de que as TR não ultrapassem 60% da tensão de escoamento do material.

O método do furo cego é uma das técnicas experimentais mais utilizadas para a medição de tensões residuais por conta de sua praticidade, mobilidade do equipamento, possibilidade de aplicação em diversos materiais, facilidade em medir TR com precisão e, principalmente, devido a seu baixo custo de execução. Trata-se de um método semi-invasivo, padronizado pela norma ASTM E837, e é amplamente aplicado na engenharia mecânica, aeroespacial, entre outras áreas. O método baseia-se na ideia de que, ao relaxar as tensões residuais em uma pequena região do material, por meio de um furo, as deformações que ocorrem ao redor desse furo refletem o estado de tensões presente antes da perfuração (HOSSEINI; AKBARI; SHOKRIEH, 2019).

Os métodos propostos para medição de TR têm como base a utilização de uma roseta com três extensômetros para medições em três direções diferentes, combinando as equações de forma a encontrar as TR presentes. Com isso, estabeleceu-se as dimensões a serem usadas pelos extensômetros para medir TR em torno de um furo que impactou na origem das rosetas do Tipo A e Tipo B como consta na norma ASTM E 837-13 (2013).

Para a medição das deformações, existem diversos modelos de rosetas, dentre os quais se destaca a roseta com pares de extensômetros, desenvolvida para alcançar maior precisão nos resultados (SCHAJER; TOOTOONIAN, 1997). Essa configuração é conhecida como roseta do tipo C conforme a norma ASTM E 837-13 (2013). Apesar de apresentar uma melhor precisão, ela é menos utilizada que as rosetas do tipo A e do tipo B devido ao seu elevado custo (SCHAJER, 2007; SCHAJER; PRIME, 2006).

REFERÊNCIAS

ASTM E 837-13. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method. **ASTM E 837-13a**, West Conshohocken, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/E0837-13A.2>

BEGHINI, M.; BERTINI, L.; MONELLI, B. D. Experimental parameter sensitivity analysis of residual stresses induced by deep rolling on 7075-T6 aluminium alloy. **Surface and Coatings Technology**, [S. l.], v. 254, p. 175–186, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.06.008>

BOUFFIOUX, C.; PESCI, R.; BOMAN, R. Comparison of Residual Stresses on Long Rolled Profiles Measured by X-Ray Diffraction, Ring Core and the Sectioning Methods and Simulated by FE Method. **Thin-Walled Structures**, [S. l.], v. 104, p. 126–134, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.03.017>

GADALLAH, R.; TSUTSUMI, S.; HIRAOKA, K. Prediction of Residual Stresses Induced by Low Transformation Temperature Weld Wires and its Validation Using the Contour Method. **Marine Structures**, [S. l.], v. 44, p. 232–253, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2015.10.002>

GARCIA-GRANADA, A. A.; LACARAC, V. D.; SMITH, D. J. A New Procedure Based on Sachs Boring for Measuring Non-Axisymmetric Residual Stresses: Experimental Application. **International Journal of Mechanical Sciences**, [S. l.], v. 43, n. 12, p. 2753–2768, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00071-6](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00071-6)

GARZA, C.; DAS, R.; SHTERENLIKHT, A. Measurement of assembly stress in composite structures using the deep-hole drilling technique. **Composite Structures**, [S. l.], v. 202, n. December, p.

119–126, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.031>

GIRI, A.; MAHAPATRA, M. M. On the Measurement of Sub-Surface Residual Stresses in SS 304L Welds by Dry Ring Core Technique. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, [S. l.], v. 106, p. 152–160, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.04.043>

HEMMESI, K.; FARAJIAN, M.; BOIN, M. Numerical Studies of Welding Residual Stresses in Tubular Joints and Experimental Validations by Means of X-Ray and Neutron Diffraction Analysis. **Materials & Design**, [S. l.], v. 126, p. 339–350, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.088>

HOLMBERG, J.; STEUWER, A.; STORMVINTER, A. Residual Stress State in an Induction Hardened Steel Bar Determined by Synchrotron and Neutron Diffraction Compared to Results from Lab-XRD. **Materials Science and Engineering A**, [S. l.], v. 667, p. 199–207, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.075>

HOSSEINI, S. M.; AKBARI, S.; SHOKRIEH, M. M. Residual stress measurement through the thickness of ball grid array microelectronics packages using incremental hole drilling. **Microelectronics Reliability**, [S. l.], v. 102, n. June, p. 113473, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2019.113473>

JAMES, M. N.; NEWBY, M.; DOUBELL, P. Weld Residual Stresses Near the Bimetallic Interface in Clad RPV Steel: A Comparison Between Deep-Hole Drilling and Neutron Diffraction Data. **Nuclear Engineering and Design**, [S. l.], v. 274, p. 56–65, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.03.042>

JONES, K. W.; BUSH, R. W. Investigation of Residual Stress Relaxation in Cold Expanded Holes by the Slitting Method. **Engineering Fracture Mechanics**, [S. l.], v. 179, p. 213–224, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.05.004>

LIN, B.; HE, K.; SHAN, D. Research on Measurement of Residual Stresses of Hemispherical Lithium Hydride by Blind-Hole Method. **Fusion Engineering and Design**, [S. l.], v. 89, n. 4, p. 365–369, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2014.03.016>

LIN, J.; MA, N.; LEI, Y. Measurement of Residual Stress in Arc Welded Lap Joints by cosa X-Ray Diffraction Method. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 243, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.12.021>

LOTHHAMMER, L. R.; VIOTTI, M. R.; ALBERTAZZI, A. Residual Stress Measurements in Steel

Pipes using DSPI and the Hole-Drilling Technique. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, [S. l.], v. 152, p. 46–55, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.05.008>

MEYER, K. *et al.* Influence of residual stress depth distribution on lifecycle behaviour of AISI 4140. **Procedia CIRP**, [S. l.], v. 87, p. 450–455, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.064>

MININ, S. I.; TROFIMOV, A. I.; TROFIMOV, M. A. Automated Ultrasonic System Residual Stresses in the Welded Joints of the Circulation Pipe NPP. **Nuclear Energy and Technology**, [S. l.], v. 2, n. 4, p. 236–239, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nucet.2016.11.002>

MOUSSAOUI, K. *et al.* Studying the Measurement by X-Ray Diffraction of Residual Stresses in Ti6Al4V Titanium Alloy. **Materials Science and Engineering A**, [S. l.], v. 667, p. 340–348, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.130>

MURÁNSKY, O. *et al.* Evaluation of a Self-Equilibrium Cutting Strategy for the Contour Method of Residual Stress Measurement. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, [S. l.], 2016a Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.04.002>

MURÁNSKY, O. *et al.* Investigating Optimal Cutting Configurations for the Contour Method of Weld Residual Stress Measurement. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, [S. l.], 2016b Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.04.006>

OLIVEIRA, J. P. *et al.* Residual Stress Analysis in Laser Welded NiTi Sheets using Synchrotron X-Ray Diffraction. **Materials & Design**, [S. l.], v. 100, p. 180–187, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.137>

PAIVA, V. E. L. **Simulação de tensões residuais de soldagem e seu alívio por teste hidrostático**. 2015. - PUC-Rio, [S. l.], 2015.

PUYMBROECK, E. Van *et al.* Determination of residual weld stresses with the incremental hole-drilling method in tubular steel bridge joints. **Procedia Engineering**, [S. l.], v. 213, p. 651–661, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.061>

ROSSINI, N. S. *et al.* Methods of Measuring Residual Stresses in Components. **Materials and Design**, [S. l.], v. 35, p. 572–588, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.022>

SCHAJER, G. S. Hole-Drilling Residual Stress Profiling With Automated Smoothing. **Journal of Engineering Materials and Technology**, [S. l.], v. 129, n. 3, p. 440–445, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.2744416>

SCHAJER, G. S.; PRIME, M. B. Use of Inverse Solutions for Residual Stress Measurements. **Journal of Engineering Materials and Technology**, [S. l.], v. 128, n. 3, p. 375–382, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.2204952>

SCHAJER, G. S.; TOOTOONIAN, M. A New Rosette Design for More Reliable Hole-Drilling Residual Stress Measurements. **Experimental Mechanics**, [S. l.], v. 37, n. 3, p. 299–306, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02317422>

SEIFI, R.; SALIMI-MAJD, D. Effects of plasticity on residual stresses measurement by hole drilling method. **Mechanics of Materials**, [S. l.], v. 53, p. 72–79, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2012.05.009>

SEO, S. *et al.* Neutron Diffraction Residual Stress Analysis During Fatigue Crack Growth Retardation of Stainless Steel. **International Journal of Fatigue**, [S. l.], v. 104, p. 408–415, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.08.007>

SHOKRIEH, M. M.; JALILI, S. M.; KAMANGAR, M. A. An eigen-strain approach on the estimation of non-uniform residual stress distribution using incremental hole-drilling and slitting techniques. **International Journal of Mechanical Sciences**, [S. l.], v. 148, p. 383–392, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.08.035>

SKOURAS, A. *et al.* Residual Stress Measurements in a Ferritic Steel/In625 Superalloy Dissimilar Metal Weldment using Neutron Diffraction and Deep-Hole Drilling. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, [S. l.], v. 101, p. 143–153, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2012.11.002>

STEGEMANN, R. *et al.* Residual Stress Characterization of Steel TIG Welds by Neutron Diffraction and by Residual Magnetic Stray Field Mappings. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, [S. l.], v. 426, p. 580–587, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.11.102>

VALIORGUE, F. *et al.* Influence of residual stress profile and surface microstructure on fatigue life of a 15-5PH. **Procedia Engineering**, [S. l.], v. 213, p. 623–629, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.058>

WAN, Y. *et al.* Weld Residual Stresses in a Thick Plate Considering Back Chipping: Neutron Diffraction, Contour Method and Finite Element Simulation Study. **Materials Science and Engineering A**, [S. l.], v. 699, p. 62–70, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.05.079>

WANG, C. *et al.* Surface Mechanical Property and Residual Stress of Peened Nickel-Aluminum Bronze Determined by In-Situ X-ray Diffraction. **Applied Surface Science**, [S. l.], v. 420, p. 28–33, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.05.108>

XU, Y.; BAO, R. Residual Stress Determination in Friction Stir Butt Welded Joints using a Digital Image Correlation-Aided Slitting Technique. **Chinese Journal of Aeronautics**, [S. l.], v. 30, n. 3, p. 1258–1269, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.11.003>

ZHAN, Y. *et al.* Experiment and Numerical Simulation for Laser Ultrasonic Measurement of Residual Stress. **Ultrasonics**, [S. l.], v. 73, p. 271–276, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.08.013>

ZHANG, Z. *et al.* Distribution of residual stress in an asymmetric T-section beam by stretch-bending. **International Journal of Mechanical Sciences**, [S. l.], v. 164, n. September, p. 105184, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105184>

ZHENG, G. *et al.* An Optimisation Study of the Modified Deep-Hole Drilling Technique using Finite Element Analyses Applied to a Stainless Steel Ring Welded Circular Disc. **International Journal of Solids and Structures**, [S. l.], v. 118–119, p. 1339–1351, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.04.008>

ZHU, M. *et al.* A New Designed Dual-Guided Ring-Core Fiber for OAM Mode Transmission. **Optical Fiber Technology**, [S. l.], v. 25, p. 58–63, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2015.07.016>