

CARACTERIZAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM BLANKS DE AÇO ARBL, SOLDADOS A LASER DE CO₂, UTILIZANDO A TÉCNICA DO FURO CEGO *

Rafael de Andrade Peres¹
José Adilson de Castro²

Resumo

TailorWeldedBlanks (TWB) são painéis metálicos formados por chapas de diferentes ligas, espessuras, revestimentos e propriedades mecânicas, unidas geralmente por soldagem a laser ou por costura. Essa técnica tem sido utilizada na indústria automobilística para produção de partes e peças mais leves, sem perda da resistência e da segurança. Nesse âmbito, os aços ARBL ganham cada vez mais destaque devido as suas características e propriedades: elevados limites de escoamento e de resistência, boa soldabilidade e estampabilidade. Neste trabalho procurou-se quantificar os níveis das tensões residuais gerados pelo processo de soldagem laser a gás de CO₂ em blanks de aço ABRL microligados ao Nb. Para isso foi utilizada a técnica do furo cego, associada com extensômetros de resistência elétrica. Foram instaladas rosetas no metal base e na região próxima a junta soldada, permitindo a elaboração de um comparativo das tensões residuais. As tensões residuais se comprovaram maiores na região próxima a solda e apresentaram um perfil como descrito pelas literaturas, ou seja, tração na zona próxima ao cordão de solda e compressão nas áreas mais afastadas. Os valores máximos de tensão encontram-se na faixa de 100MPa.

Palavras-chave: Furo Cego; Aço ARBL; Soldagem a Laser; Tensões Residuais.

RESIDUAL STRESSES CHARACTERISATION IN HSLA BLANKS, WELDED BY CO₂LASER, UTILISING THE HOLE-DRILLING METHOD

Abstract

Tailor Welded Blanks (TWB) are metal panels formed by sheets of different alloys, thicknesses, coatings and mechanical properties, usually joined by laser welding or seam welding. This technique has been used in the automotive industry to produce lighter parts and pieces, without loss of strength and safety. In this context, HSLA steels have gained more prominence due to their characteristics and properties: high yield strength and ultimate tensile strength, good weldability and formability. In this study, we sought to quantify the levels of residual stresses generated by the laser welding process in Nb microalloyed HSLA steel blanks. The Hole-Drilling technique associated with electrical resistance strain gauges were used to analyze those blanks. Rosettes were installed in the base metal and next to the welded joint, allowing the comparison of results. Residual stresses were proven major next to the weld bead region and showed a profile as described by the literature, that is, traction near to the weld and compression away from the weld zone. Maximum stress reached 100MPa.

Keywords: HSLA Steel; Hole-Drilling Method; Laser Welding; Residual Stresses.

¹ Engenheiro Mecânico, Mestrando em Engenharia Mecânica pela UFF, Técnico de Manutenção Mecânica na Petrobras, Volta Redonda, RJ, Brasil.

² *Engenheiro Metalurgista, Mestre em Engenharia Metalúrgica, Ph.D. em Simulação de Processos e Fenômenos, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O processo contínuo de melhoria promovido pela concorrência e pela necessidade constante de redução de custos, redução de impacto ambiental e aumento da produção fez com que as indústrias desenvolvessem novos métodos e novas tecnologias para produção de seus produtos. Nesse contexto, a utilização racional dos recursos gerou uma utilização variada de componentes, fazendo com que seja entregue somente o necessário. Trazendo isso para a indústria automobilística, tivemos nos últimos anos o desenvolvimento do processo conhecido como *tailored blanks*. Esse tipo de tecnologia consiste em soldar chapas metálicas de diferentes espessuras, de forma que as regiões onde são exigidas maiores resistências são mais reforçadas e as regiões de menores esforços são utilizadas chapas de menor espessura e menor resistência. [1]

Combinados com isso vem os chamados aços ARBL (Alta Resistência Baixa Liga). Estes aços qualidade mecânica elevada, muitas vezes resistência a corrosão e excelente soldabilidade e estampagem. Todas essas características fazem com que sejam de grande interesse da indústria automobilística. [2,3]

Tensões Residuais são normalmente definidas como as tensões que permanecem em componentes mecânicos mesmo quando não submetidos a cargas externas. Tensões Residuais ocorrem em praticamente todos os componentes rígidos, quer sejam eles metálicos ou não. Elas podem ser resultantes de processos metalúrgicos, mecânicos ou introduzidos durante a fabricação e vida do material. [4]

As tensões residuais podem ser classificadas como macro tensões ou microtensões. As macrotensões são aquelas que atuam em uma região grande quando comparada com o tamanho do grão do material. As microtensões são consideradas como aqueles que atuam em um grão do material ou em parte de um grão. [4,5]

Estudos realizados vem sendo realizados a algum tempo. [6] Nos últimos anos estudos a esse respeito tem aumentado, que em muitos casos são responsáveis pela falha do material. O estudo nessa área tem avançado principalmente devido aos setores aeroespacial, automotivo e de energia nuclear. [4] No processo de soldagem existe o aquecimento localizada da junta. Quando ocorre um resfriamento não homogêneo, isso causa o aparecimento de tensões internas no material. Para uma junta de topo, o perfil de tensões ao longo da secção transversal é geralmente como apresentado na figura (Figura 1). [4,7]

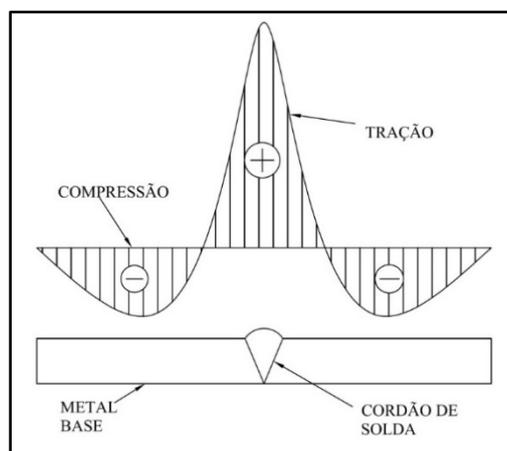


Figura 1. Distribuição das te das tensões residuais em uma junta de topo. [1]

Tensões residuais em juntas soldadas podem apresentar dois efeitos principais: distorções ou falhas prematuras das juntas soldadas, ou mesmo ambos. Distorções são causadas por gradientes não uniformes de temperatura, fazendo com que a junta soldada se solidifique de forma desigual, assim, exercendo forças excêntricas ao longo da seção transversal do cordão de solda.[4] A junta soldada se deforma elasticamente em resposta a essas tensões, dessa forma, distorções perceptíveis acontecem como resultado de deformações não uniformes. A distorção em juntas de topo pode acontecer tanto na direção longitudinal quanto na direção transversal, devido a contração do material. Também pode acontecer uma distorção angular quando a face se solidifica mais rápido que a raiz da solda. [8]

Dentre os processos de soldagem, a solda a laser é um processo altamente tecnológico, capaz de produzir juntas soldadas de altíssima qualidade. Porém para isso depende de uma série de fatores, como calibração do equipamento, garantia de estabilidade da máquina e correta operação. A ZTA produzida é muito menor quando comparado a outros processos, mas não é livre de tensões residuais. [9,10] A técnica do furo cego é uma técnica macroscópica, experimental que avalia tensões residuais em diversos materiais. Podendo ser aplicada tanto a materiais metálicos quanto a polímeros e compósitos. Sua principal vantagem em relação aos demais métodos é que pode rapidamente trazer resultados após o ensaio, não leva em consideração a orientação dos cristais, é não destrutiva e quantitativa. Sua maior desvantagem é a necessidade de utilizar straingauges para realização das medidas, essa é a parte mais lenta do processo, um erro nesse momento pode comprometer todo o ensaio e trazer resultados que não refletem o real estado de tensões do material. [11,12,13]

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

Os blanks de aço de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) micro ligados ao Nióbio (Nb) utilizados para realizar esse trabalho foram recebidos na condição de Bobina Zincada (BDZ). As dimensões dos blanks são 370 x 100 x 2,15 mm (MB1) e 370 x 100 x 1,75 mm (MB2). As tabelas 1 e 2 apresentam as faixas de composição química e propriedades mecânicas dessas chapas.

Tabela 1. Composição química do aço ARBL utilizado

| Chapa | C (%) | Mn (%) | P (%) | S (%) | Si (%) | Ni(%) | Cr (%) | Al(%) | Nb (%) | Ti (%) |
|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|---------|
| MB1 | 0,080 | 0,501 | 0,017 | 0,015 | 0,012 | 0,008 | 0,014 | 0,045 | 0,024 | <0,0006 |
| MB2 | 0,096 | 0,548 | 0,014 | 0,008 | 0,012 | 0,006 | 0,011 | 0,034 | 0,020 | <0,0006 |

Tabela 2. Propriedades Mecânicas

| Material | Sy (MPa) | Su (MPa) | Al (% mín) | E (GPa) | v |
|---------------|----------|----------|------------|---------|------|
| MB1 - 2,15 mm | 389 | 467 | 20,0 | 210 | 0,30 |
| MB2 - 1,75 mm | 427 | 492 | 20,0 | 210 | 0,30 |

Os *blanks* foram recebidos já soldados na empresa GalvaSud, através da máquina de solda constituída por um ressonador LASER a gás de CO₂ de 8kW de potência, fabricado pela empresa alemã Nothelfer, operando no sistema Fluxo Rápido

Transversal (*FastTransverseFlow* – FTF). O diâmetro do feixe incidente (D) na lente ótica do equipamento possui dimensão de 22 mm.

A distância focal (F) foi mantida em 280 mm, a potência em 100% ao nominal do equipamento, e os gases inertes utilizados foram o hélio (He) e o argônio (Ar), ambos na vazão de 14 L/min e pressão absoluta de 5 bar. O hélio foi utilizado para proteger a parte superior da poça de fusão e o argônio foi utilizado para proteger a raiz da solda. [12]

Nenhum tratamento térmico adicional foi realizado após a soldagem ou antes da execução dos ensaios. O material foi recebido como produto semiacabado (posterior a soldagem seria realizada a conformação mecânica dos mesmos para obter sua forma final) e, portanto, suas características não foram alteradas.

A figura 2 mostra uma imagem ampliada da junta soldada. Foi utilizada uma junta de topo, sem chanfro e sem adição de metal. Fica evidente pela figura a diferença de espessura entre as duas chapas.

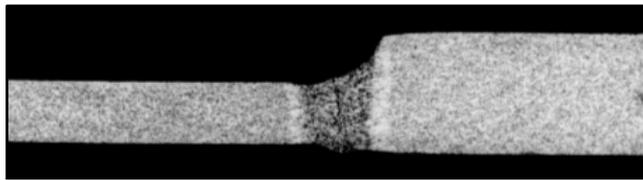


Figura 2. Ampliação da junta soldada do blank [12].

Os ensaios foram realizados utilizando o equipamento disponível na universidade, adquirido especificamente para realizar ensaios de furo cego. O Restan MTS 3000, *Automatic System for Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gauge Method*, fornecido pela SINT Technology.

Para produzir o furo do ensaio são utilizadas fresas de topo do tipo cone invertido. Nos ensaios realizados foram utilizadas rosetas referenciadas na norma como “Tipo B”. Para esse tipo de roseta são utilizadas fresas com diâmetro nominal de 1/16”.

Um equipamento de aquisição de dados é necessário para realizar a leitura das deformações dos extensômetros durante a realização dos ensaios. O dispositivo utilizado foi o Spider 8-30, pois esse é compatível com o equipamento responsável pela execução do furo, dispensando aparatos adicionais.

As rosetas foram instaladas seguindo o método convencional de aplicação. [11,13]

Os dados da roseta descritos na norma são genéricos. Os dados reais da roseta são fornecidos pelo fabricante e se encontram na Tabela 3.

Tabela 3. Dados reais da roseta.

| | |
|------------------------|------------------------|
| Extensômetro: | 1-RY61-1.5/120R |
| Diâmetro do SG: | 5,10 |
| Tipo do SG: | B |
| Gauge Factor 1: | 1,91 |
| Gauge Factor 2: | 1,89 |
| Gauge Factor 3: | 1,91 |

Os blanks são formados de chapas de diferentes espessuras soldadas a laser, possuindo um desnível na zona da solda. Devido a essas condições, a roseta escolhida foi a do tipo B (Figura 4 a). O tipo B possui todos os extensômetros de um mesmo lado. Isso é muito útil quando as medidas precisam ser feitas próximas a um obstáculo, no caso o cordão de solda. [14]

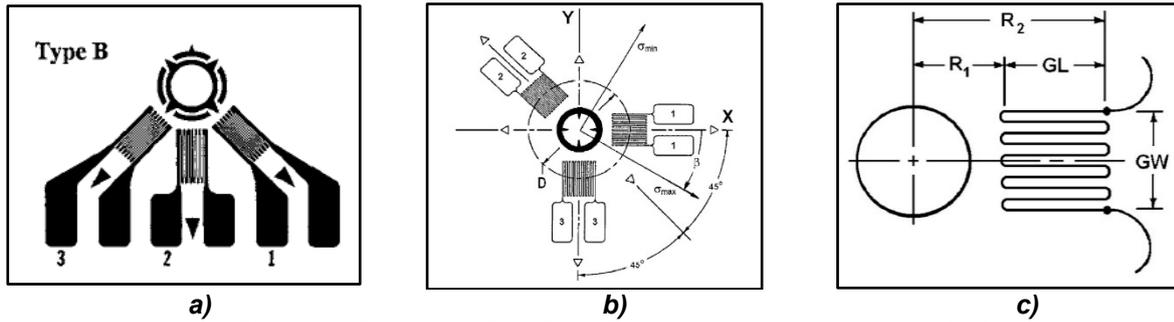


Figura 1. Roseta do Tipo B(a). Dimensões da roseta (b, c). [14]

Tabela 4. Dimensões^A da Roseta Tipo B [14]

| Tipo de Roseta | D | GL | GW | R ₁ | R ₂ |
|----------------|------|--------|--------|----------------|----------------|
| Tipo B | | | | | |
| Conceitual | D | 0,309D | 0,223D | 0,3455D | 0,6545D |
| 1/16" nominal | 5,13 | 1,59 | 1,14 | 1,77 | 3,36 |

^A Dimensões em milímetros

Segundo a norma, um CP considerado “fino” é aquele em a espessura é de até 0,4D, ou 2,06mm. E um CP “espesso” deve possuir espessura maior que 1,2D ou 6,17mm.

A espessura dos Blanks em questão são 1,75 e 2,15 mm. A chapa mais espessa do blank, que deve a analisada, se encontra entre a faixa de valores contidos na norma. A norma trata CPs de espessuras intermediárias da seguinte forma, em tradução livre: “O caso intermediário, onde a espessura dos corpos de prova está na faixa entre as especificadas como ‘fina’ ou ‘espessa’, não se encontra no escopo dessa norma. Para peças com tensões uniformes, um resultado aproximado pode ser obtido para esse tipo de peça usando um furo passante e interpolando as constantes de calibração a e b para furo cego e furo passante. Tensões residuais feitas através desse método devem ser relatadas como ‘fora do padrão’ ou ‘aproximadas’”. [14]

Dessa forma, nesse trabalho foram investigadas as distribuições das tensões ao longo da espessura das chapas do blank utilizando um furo cego. Esse trabalho seguiu todas as indicações contidas na norma ASTM E837-13a porém os resultados obtidos devem ser classificados como “não padronizados”.

As deformações ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 foram medidas utilizando os equipamentos, plotadas em um gráfico e avaliadas quanto a sua tendência. Dessa forma foi possível encontrar discrepâncias óbvias. A partir disso, foi possível calcular, para cada conjunto de deformações medido, as deformações combinadas p , q e t , usando as equações 1, 2 e 3:

$$p = (\epsilon_3 + \epsilon_1)/2 \quad (1)$$

$$q = (\epsilon_3 - \epsilon_1)/2 \quad (2)$$

$$t = (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2)/2 \quad (3)$$

Em seguida foram calculadas as tensões combinadas P, Q e T, usando as equações 4, 5 e 6:

$$P = \frac{E}{1+\nu} \frac{\Sigma(a \cdot p)}{\Sigma(a^2)} \quad (4)$$

$$Q = -E \frac{\Sigma(b \cdot q)}{\Sigma(b^2)} \quad (5)$$

$$T = -E \frac{\Sigma(b \cdot t)}{\Sigma(b^2)} \quad (6)$$

As constantes “a” e “b” foram obtidas através da tabela 3 da norma ASTM E837-13a.[14]

Por fim, foram calculadas as tensões σ_x , σ_y e τ_{xy} e as tensões principais σ_{max} e σ_{min} e o ângulo principal β utilizando as equações 7 a 11:

$$\sigma_x = P - Q \quad (7)$$

$$\sigma_y = P + Q \quad (8)$$

$$\tau_{xy} = T \quad (9)$$

$$\sigma_{max}, \sigma_{min} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{-T}{-Q}\right) \quad (11)$$

As equações 4 a 11 apresentadas são válidas no caso de tensões uniformes, que foram os casos encontrados. As equações para tensões não-uniformes podem ser encontradas na norma ASTM E837-13a.

2.2 Resultados e Discussão

O primeiro ponto importante que deve ficar bem claro é quanto às investigações feitas nesse trabalho. Apesar da norma indicar a utilização de furo passante para CPs finos, nesse trabalho foram realizados furos cegos para avaliar o perfil das tensões ao longo da profundidade, e não simplesmente obter o valor das tensões. Dessa forma, os ensaios realizados seguiram a norma, mas devem ser classificados como não padronizados.

A seguir temos os resultados dos ensaios: as deformações registradas pelos extensômetros e suas respectivas tensões. Ao todo foram feitos oito ensaios. Quatro em cada chapa do blank, dois no Metal Base (MB) e os outros dois nas regiões mais próximas do cordão de solda. Os ensaios foram realizados tão próximos quanto possível ao cordão de solda. A distância de 5 mm foi a máxima alcançada devido às características do ensaio, no caso a colagem da roseta. Essa distância foi suficiente para capturar os valores das tensões próximos a ZTA, zona termicamente afetada (Figura 5a e 5b). Os ensaios no metal base foram necessários para verificar qual o estado inicial das chapas e permitir a comparação com os valores induzidos pelo processo de soldagem.

Uma das características do processo de soldagem a laser é manter o calor em uma região muito pequena e concentrada. Conforme mostrado na figura 5b, os furos executados no ensaio foram na região não afetada diretamente pelo calor do processo de soldagem. Porém, como demonstrado a seguir com os resultados dos ensaios, essa região sofreu influência mecânica das tensões introduzidas pela soldagem.

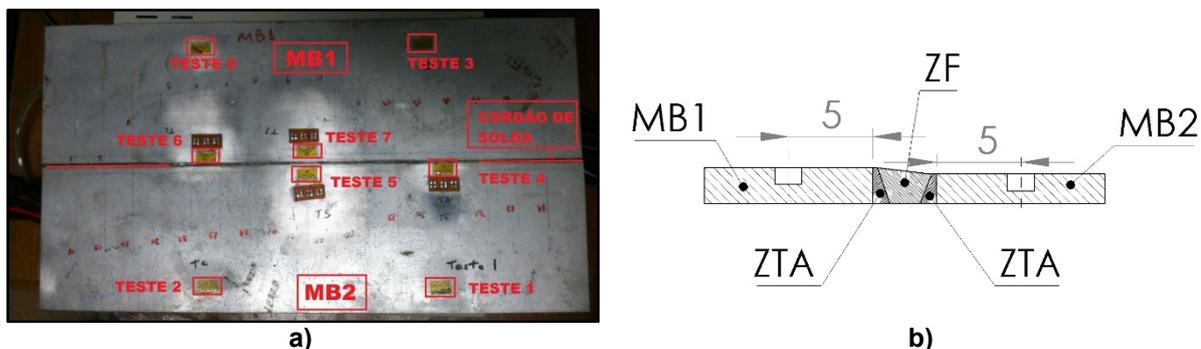


Figura 2. a) Distribuição das rosetas sobre o CP. b) Imagem esquemática da posição dos furos em relação a zona fundida (ZF) e a zona termicamente afetada (ZTA)

Os resultados mais importantes são os que foram obtidos do cordão de solda, por isso eles serão apresentados em sua totalidade, os demais ensaios serão apresentados apenas graficamente ou com seus valores numéricos.

Todos os ensaios apresentaram as dimensões de excentricidade do furo dentro do permitido.

Os valores das tensões foram calculados a partir das deformações registradas utilizando as equações (1) a (11).

2.2.1 Ensaio no MB1 (2,15mm)

Este teste foi realizado para obter os valores das tensões residuais próximas a região afetada pelo calor posicionando-se a roseta pelo MB1. Foi utilizado um passo variável nas leituras. Iniciando com leituras a cada 0,01mm, até a profundidade de 0,3mm. Após essa profundidade o passo foi de 0,25mm, até atingir a profundidade final de 1mm. Isso foi feito para melhorar os dados de amostragem na região mais próxima à superfície, que é onde a roseta consegue captar melhor as deformações. Por consequência, sofre menos efeito da propagação de erro que acontece com o aumento da profundidade.

Nos resultados obtidos, todas as deformações apresentaram leituras tratativas. As maiores leituras foram nas direções dos extensômetros “a” (45°) e “c” (135°), os valores numéricos se mostraram praticamente iguais. Na direção transversal ao cordão de solda (extensômetro “b”, 90°) as deformações foram menores.

A seguir temos os resultados do Teste 7 (figura 6).

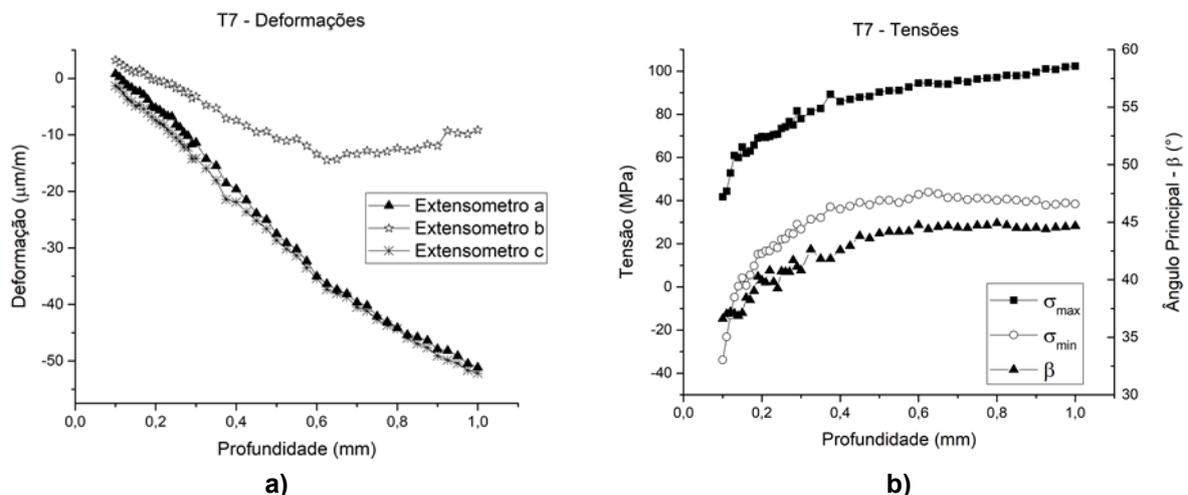


Figura 6. Resultados T7. **a)** Medidas das deformações. **b)** Valores do Ângulo β e das Tensões Máxima e Mínima

Os dados de tensão do ensaio 7 estão compatíveis com o esperado. Na região próxima à superfície aparecem picos de tensões, resultado da preparação da superfície da amostra. Passada a parte transitória inicial (por volta de 0,30mm) os valores de tensão param de sofrer flutuações e tornam-se mais estáveis. Confrontando esses resultados com os do metal base ficou claro a passagem de um estado compressivo para trativo. Esse material foi produzido por laminação, dessa forma o estado compressivo no metal base era o previsto. Comparando os valores obtidos, percebemos um acréscimo de 90MPa, causado pelo processo de soldagem.

O ângulo principal se manteve dentro de um range de 10° , comprovando que a direção das tensões principais tem uma tendência a se manter alinhada com o sentido transversal ao do blank. Uma pequena variação do ângulo é aceitável, já que por limitações físicas não é possível colar a roseta perfeitamente perpendicular ao cordão de solda.

2.2.2 Ensaio no MB2 (1,75mm)

O teste 5 foi realizado na região mais próxima do cordão de solda com a roseta posicionada na região do MB 2. Novamente foi utilizado um passo variável nas leituras. Iniciando com leituras a cada 0,01mm, até a profundidade de 0,3mm. Após essa profundidade o passo foi de 0,25mm, até atingir a profundidade final de 1mm. A seguir na figura 7 temos os resultados do teste 5.

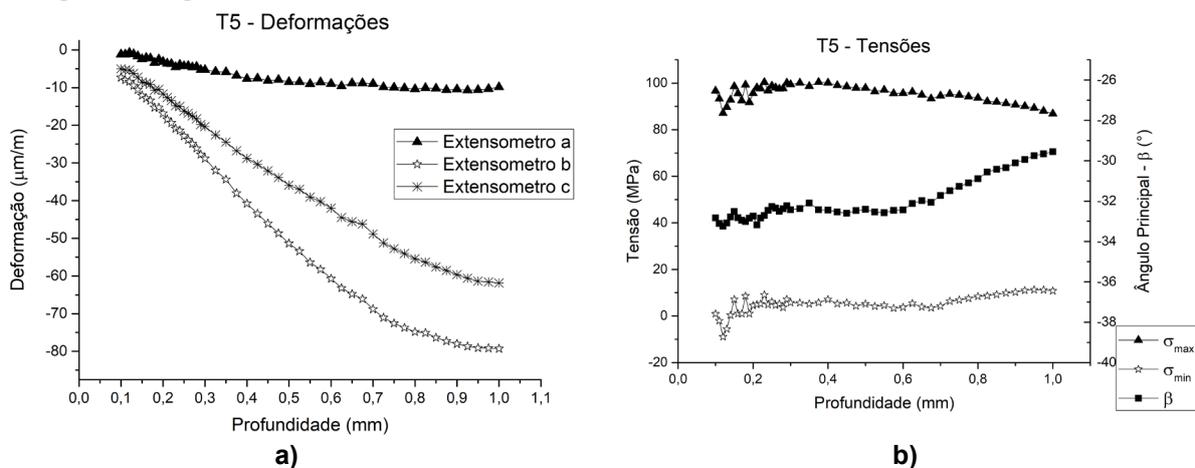


Figura 7. Resultados T5. **a)** Medidas das deformações. **b)** Valores do Ângulo β e das Tensões Máxima e Mínima

O teste apresentou resultados compatíveis com o esperado para a região próxima da solda, todas as deformações apresentaram leituras tratativas. Temos a distribuição bem homogênea com ótimos coeficientes de aproximação. Isso vai de encontro as afirmações contidas na norma, se as tensões são uniformes ao longo da profundidade basta um furo passante com uma leitura. Obtendo, assim, o valor da tensão residual diretamente, naquela região do material.

Ao analisar o gráfico já fica claro que os resultados das tensões apresentam valores compatíveis com o esperado. Temos o aparecimento dos picos de tensão na superfície do material, que novamente desapareceram rapidamente.

As tensões máximas se encontram na faixa dos 100MPa e as tensões mínimas na faixa de 6MPa, mostrando assim um comportamento totalmente tratativo. Quando comparamos com as tensões anteriores percebemos um acréscimo da ordem de 80 MPa, causado pelo processo de soldagem.

2.2.3 Resultados Gerais

Os resultados apresentados até o momento foram calculados ponto a ponto ao longo da profundidade do blank. Com esses dados, calculamos as tensões médias para cada furo, apresentados na tabela 5.

Tabela 5. Tensões Médias dos Ensaios

| | MB1 – 2,15mm | | MB2 – 1,75mm | |
|-----------------------|--------------|---------|--------------|---------|
| | Teste 0 | Teste 7 | Teste 2 | Teste 5 |
| σ_{\min} (MPa) | -80,4 | 9,04 | -46,0 | 2,70 |
| σ_{\max} (MPa) | -16,6 | 79,4 | 20,3 | 98,9 |

Com esses dados podemos plotar o gráfico (Figura 10) que mostra a distribuição das tensões ao longo do sentido transversal do blank. Dessa forma, os quatro pontos plotados no gráfico da figura 8 são os pontos 0, 7, 5 e 2 (nessa ordem).

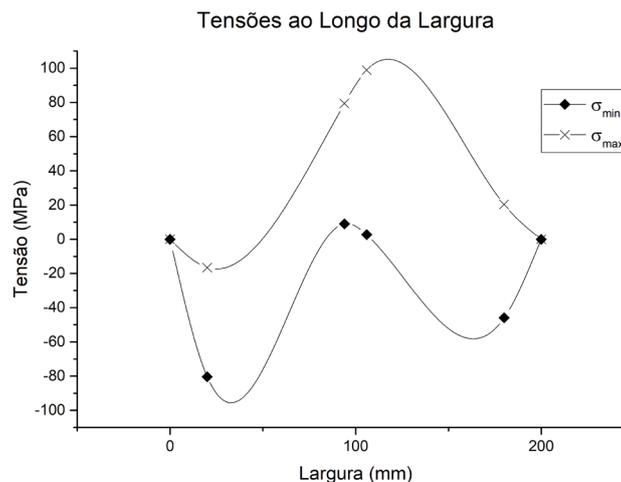


Figura 8. Distribuição das Tensões no Sentido Transversal do Blank.

O gráfico mostra uma distribuição de tensões conforme o esperado e descrito pelas literaturas. Indo de encontro ao perfil esperado, mostrado na figura 1 desse trabalho. O valor de tensões residuais induzidas pelo processo de soldagem foi na ordem de 80 a 100Mpa. Um valor considerável, levando em conta que isso equivale a 25% do limite de escoamento.

3 CONCLUSÃO

Os ensaios revelaram a existência de tensões residuais na ordem de 80 a 100 Mpa (tensões máximas), valor esse que representa cerca de 25% do limite de escoamento do material. Porém, além do valor numérico, o processo de soldagem alterou as características das tensões, mudando seu estado de compressivo (resultante do processo de fabricação das chapas) para trativo. Processo esse compatível com o esperado para o resfriamento específico do cordão de solda.

As tensões residuais podem ser consideradas como homogêneas ao longo de toda espessura do blank. Houve uma pequena variação nas tensões ao longo da profundidade. Porém, essas variações nem sempre são valores reais de tensão residual. Muitas vezes o próprio desgaste da fresa, que acontece ao longo da perfuração, acaba por induzir acréscimos nos valores. Bem como também problemas na preparação da superfície da amostra. Sendo assim, é crítico a sequência de procedimentos na realização desse tipo de ensaio.

O MB1, devido a sua espessura, não se enquadra em nenhum dos casos apresentados na norma, estando portando na faixa intermediária. De posse dos

resultados apresentados, podemos afirmar que a utilização de um furo passante, nesse caso, seria adequado e apresentaria resultados significativos.

Agradecimentos

À CAPES, à FAPERJ e ao CNPq pelo suporte financeiro na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Merklein, M. et al, A review on tailored blanks - Production, applications and evaluation, Journal of Materials Processing Technology 2014, v. 214, p. 151– 164.
- 2 Linnert, G. E., Welding Metallurgy: Carbon and Alloy Steels, v.1, 4ª Ed., GML Publications, Laser Beam Welding (LBW), p. 568 – 581, Hilton Head Island, SC, USA..
- 3 Metals Handbook, 10ª Ed., v.1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys - High-Strength Low-Alloy Steels, p. 388;.
- 4 Totten, G., Howes, M., Inoue, T., Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, ASM International, Ohio, EUA, 2002
- 5 Metals Handbook, 10ª Ed., v.4, Heat Treating - Residual Stresses, p. 1325 – 1343.
- 6 Grant, P. V., Lord, J. D., Whitehead P. S., The Measurement of Residual Stresses by the Incremental Hole Drilling Technique, Measurement Good Practice Guide No. 53, National Physical Laboratory, UK, 2002.
- 7 Sun, J. et al, A comparative study on welding temperature fields, residual stress distributions and deformations induced by laser beam welding and CO2 gas arc welding, Materials and Design 2014, v. 63, p. 519–530.
- 8 Welding Handbook, 8ª Ed., v.1, Welding Technology – Residual Stresses and Distortion, p. 218 – 357.
- 9 Felizardo, I., Bracarense, A. Q., Processo de Soldagem a LASER (LASER Welding – LW), UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- 10 Bracarense, A. Q., Soldagem a Laser, Grupo de Robótica, Soldagem e Simulação, UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- 11 Andolfato, R. P.; Camacho, J. S.; De Brito, G. A., Extensometria Básica, UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Ilha Solteira – SP, 2004.
- 12 Souza, L. H, Caracterização de Blank de Aço ARBL Microligado ao Nb Soldado Pelo Processo a Laser a Gás de CO2, UFF – Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda – RJ, 2013.
- 13 Measurement Of Residual Stresses By The Hole Drilling Strain Gauge Method, Tech Note TN-503-6, Vishay Measurements Group, Raleigh, NC, 1996.
- 14 American Society For Testing And Materials – ASTM. Standart Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method. ASTM E 837-08 (2008). West Conshocken, PA, USA, 2008.