

## INFLUÊNCIA DO SENTIDO DE LAMINAÇÃO NA ESTAMPABILIDADE DE *TAILOR WELDED BLANKS* OBTIDOS POR SOLDAGEM A LASER\*

Tamires Repolês dos Anjos<sup>1</sup>  
Marcos Müller Lobato<sup>2</sup>  
Fábio de Oliveira Braga<sup>3,4</sup>

### Resumo

Na indústria automobilística, para a produção de componentes estampados complexos, tem-se a alternativa de se soldar chapas (*blanks*) com características distintas, como resistência mecânica, espessura ou presença de revestimentos anticorrosivos, montagem conhecida como *Tailor Welded Blanks* (TWB). A soldagem a laser é o principal processo para produção dos TWB, devido à sua alta produtividade e pela minimização da zona termicamente afetada da solda. Em alguns casos, pode ser vantajosa a mudança do sentido de laminação dos *blanks*, a fim de se aproveitar as suas características de textura e anisotropia. Portanto, o objetivo do presente trabalho é investigar a influência da inversão do sentido de laminação na estampabilidade de TWB obtidos por soldagem a laser. Inicialmente, os *blanks* foram caracterizados por sua microestrutura e propriedades mecânicas, sendo então soldados para obtenção dos TWB. As juntas soldadas foram então caracterizadas por meio de macrografia, ensaio Erichsen e microdureza Vickers. Não foi observada diferença no comportamento dos TWB devido à inversão do sentido de laminação, sendo então tecnicamente possível utilizá-la para se obter propriedades especiais nos TWB.

**Palavras-chave:** *Tailor welded blank*, soldagem a laser, estampabilidade, direção de laminação.

### INFLUENCE OF THE ROLLING DIRECTION IN THE DRAWABILITY OF TAILOR WELDED BLANKS OBTAINED BY LASER WELDING

#### Abstract

In the automotive industry, for the production of complex drawn components, there is the alternative of welding sheets (*blanks*) with different characteristics, such as mechanical strength, thickness or presence of anticorrosive layers, known as *Tailor Welded Blanks* (TWB). The laser welding is the main process to produce TWB, due to its high productivity and the ability of minimizing the heat affected zone of the weld. In some cases, it might be advantageous changing the rolling direction of the blanks, in order to use their texture and anisotropy characteristics. Therefore, the objective of this work is to investigate the influence of the rolling direction in the drawability of TWB obtained by laser welding. First, the blanks were characterized by their microstructure and mechanical properties, and then they were welded to obtain the TWB. The welded joints were then characterized by macrography, Erichsen test and Vickers microhardness. No difference in the TWB behavior due to the changing in the rolling direction orientation was observed, and so it is technically possible to use them to obtain special properties in the TWB.

**Keywords:** *Tailor welded blank*, laser welding, drawability, rolling direction.

<sup>1</sup> Engenheira de Soldagem, Especialização em Engenharia de Soldagem, Faculdade SENAI Rio, Rio de Janeiro, RJ e Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, M.Sc., Docente, Faculdade SENAI Rio, Rio de Janeiro, RJ e Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, D.Sc., Docente, Graduação Tecnológica em Processos Metalúrgicos, Faculdade SENAI Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista, D.Sc., Docente, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Na indústria automobilística, para a produção de componentes estampados complexos, tem-se a alternativa de se soldar chapas (*blanks*) dissimilares, com diferenças na resistência mecânica, espessura ou revestimentos utilizados, sendo estas conhecidas como *Tailor Welded Blanks* (TWB). Esta tecnologia permite o uso de materiais mais espessos ou mais resistentes nas regiões críticas do componente, enquanto materiais mais finos e leves são colocados nas outras regiões para diminuir o peso total [1-5].

Processos de soldagem como o TIG ou MIG/MAG foram usados no passado para produção dos TWB. Atualmente, a soldagem a laser é a predominante, sendo os equipamentos mais utilizados baseados em lasers de CO<sub>2</sub> e Nd:YAG. A soldagem a laser ganhou importância devido à sua alta produtividade, além da redução dos problemas metalúrgicos dos componentes, pela sua alta densidade de energia, resultando em soldas mais profundas e estreitas, com zona termicamente afetada de dimensões minimizadas [2].

A anisotropia plástica é uma propriedade de importante influência na formabilidade de produtos planos. Ela é determinada por características como textura cristalográfica, composição química e tamanho de grão do material [6]. Com exceção da composição química, os determinantes da anisotropia plástica podem ser modificados pelo tratamento termo-mecânico prévio do aço, incluindo processos de conformação plástica. Em alguns casos, por exemplo, pode ser vantajosa a mudança do sentido de laminação dos *blanks*, a fim de se aproveitar as suas características de textura e anisotropia [6].

Portanto, o objetivo do presente trabalho é investigar a influência da inversão do sentido de laminação na estampabilidade de TWB obtidos por soldagem a laser.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 *Blanks* para soldagem

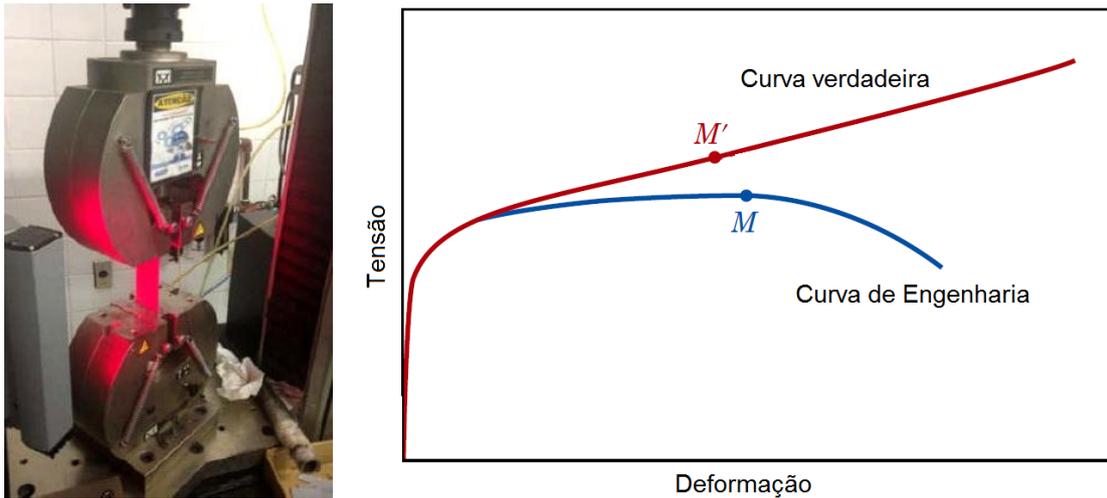
As chapas (*blanks*) de aço utilizadas no presente trabalho possuem a mesma especificação de composição química, porém foram consideradas duas espessuras diferentes, conforme Tabela 1.

**Tabela 1** – Especificação dos *blanks*.

Material	Espessura P1 (mm)	Espessura P2 (mm)	Composição Química			
			%C	%Mn	%P	%S
Aço EN 10327 DX56D	0,75	1,60	0,12	0,60	0,10	0,045

### 2.2 Caracterização do metal de base (*blanks*)

Para caracterização dos materiais de base, foram utilizadas as técnicas de ensaio de tração, para avaliação de propriedades mecânicas, bem como a microscopia óptica, para avaliação da microestrutura. O ensaio de tração foi realizado em uma máquina Instron com capacidade para 10 ton de carga (Figura 1a). Foi usada a velocidade de 3 mm/min até 2% de deformação e 10 mm/min após 2% de deformação para obtenção das curvas tensão-deformação de engenharia (Figura 1b). Para o cálculo da anisotropia normal (R)(curva verdadeira, Figura 1b), a velocidade inicial de aplicação de carga foi de 15 mm/min e final de 25 mm/min.



**Figura 1** – Ensaio de tração: (a) Máquina de ensaio Instron; (b) Curva genérica tensão-deformação verdadeira e de engenharia (adaptado de [7]).

O regime plástico da curva tensão-deformação verdadeira pode ser modelado pela equação 1.

$$\sigma = K\varepsilon_p^n \quad (1)$$

Onde:  $\sigma$  é a tensão verdadeira;  $\varepsilon_p$  é a deformação no regime plástico; K e n são constantes conhecidas como coeficiente de resistência e coeficiente de encruamento, respectivamente.

A anisotropia plástica pode ser determinada pela relação de deformação plástica de Lankford (r), calculada pela equação 2, pelo coeficiente de anisotropia normal (R), calculado pela equação 3.

$$r = \frac{\text{Deformação na largura}}{\text{Deformação na espessura}} = \frac{\ln \frac{w_f}{w_0}}{\ln \frac{t_f}{t_0}} \quad (2)$$

Onde:  $w_f$  e  $w_0$  são as larguras final (após a deformação) e inicial (antes da deformação);  $t_f$  e  $t_0$  são as espessuras final e inicial.

$$R = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (3)$$

Onde:  $r_0$ ,  $r_{45}$  e  $r_{90}$  são as relações de Lankford (r) na direção de laminação ( $0^\circ$ ), na direção diagonal ( $45^\circ$ ) e transversal ( $90^\circ$ ), respectivamente.

### 2.3 Montagem e soldagem dos blanks

Como mencionado anteriormente, os blanks utilizados possuem espessuras de 0,75 e 1,60 mm. Para soldagem, estes foram posicionados lado a lado, possuindo chanfro reto, alinhados pela base, como mostra a Figura 2. A orientação

da direção de laminação de cada *blanks* foi variado, como mostra a Tabela 2, que indica também as designações das amostras de teste.



**Figura 2** – Croqui da montagem dos *blanks* para soldagem, alinhados pela base.

**Tabela 2** – Identificação das amostras baseada na orientação das chapas.

Designação da amostra	Direção de laminação	
	P1	P2
1	↕	↕
2	↕	↔
3	↔	↔
4	↔	↕

Para soldagem foi utilizada uma máquina de solda com ressonador laser a gás de CO<sub>2</sub> de 8 kW de potência (Figura 2), fabricado pela empresa alemã Nothelfer, utilizando 100% da potência nominal da máquina e velocidade de soldagem de 7 m/min.



**Figura 3** – Máquina de solda a laser utilizada.

O diâmetro do feixe incidente na lente ótica do equipamento possui dimensão de 22 mm, e os gases inertes utilizados foram o hélio e o argônio, 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, sendo adicionado por duas vias de fluxo, posicionadas no sentido transversal ao movimento dos blanks, protegendo o topo da solda pelo lado esquerdo e direito. O argônio foi utilizado para proteger a raiz da solda, através de fluxo único conduzido por um bocal posicionado na parte inferior do equipamento.

## 2.4 Caracterização dos TWB

### 2.4.1 Inspeção visual

Foi realizada inspeção visual nos TWB, buscando avaliar discontinuidades nas soldas. As medições foram realizadas conforme numeração na Figura 4: (1) espessuras; (2) desalinhamento vertical; (3) concavidade e (4) convexidade. As amostras foram preparadas por lixamento e ataque químico com Nital.

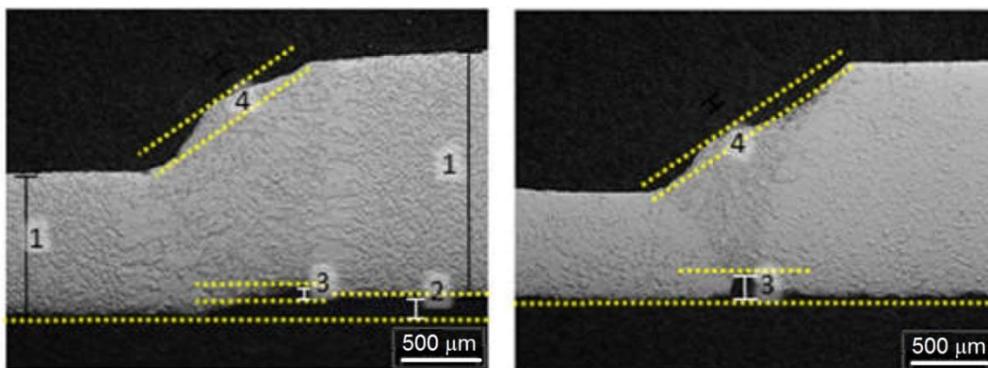


Figura 4 – Locais de medidas na inspeção visual.

### 2.4.2 Embutimento Erichsen

Para realização do ensaio de Embutimento Erichsen (Figura 5), as amostras foram cortadas em uma guilhotina, mantendo-se 90 mm de chapa (45 mm de cada lado do cordão de solda), conforme recomendação dos padrões usados na indústria automotiva. Para lubrificação foi utilizada graxa grafitada. Foram utilizados os parâmetros na prensa: 1) velocidade de aplicação da carga de 5 mm/min; 2) sensibilidade de 2,5; 3) carga do prensa-chapas: 11 kN; 4) extensão do ensaio - até o início da ruptura (passagem de luz).



Figura 5 – Prensa para ensaio de embutimento Erichsen.

Após a execução do ensaio, foi avaliado o valor disposto no visor da máquina de embutimento, que é a profundidade de teste em mm, e a forma de ruptura no corpo-de-prova. A razão ( $Q$ ) entre as profundidades de teste na solda (3 pontos ao longo do comprimento) e a média das profundidades de teste no metal de base (*blank* mais fino) pode ser tomada como uma medida da estampabilidade da junta soldada, como mostra a equação 4:

$$Q(\%) = \frac{y_s}{\bar{y}_b} \cdot 100\% \quad (4)$$

Onde:  $y_s$  = profundidade de teste na solda (por ponto);  $\bar{y}_b$  = média das profundidades de teste no metal de base (*blank* mais fino).

Segundo prática industrial comum será considerada eficiente a solda que não obtiver valor de  $R$  abaixo de 70%.

### 2.4.3 Microdureza Vickers

A microdureza Vickers foi avaliada pois esta possui correlação inversa com a formabilidade do material [3]. Perfis de microdureza foram obtidos ao longo da seção transversal das soldas, como mostra a Figura 6. Foi utilizado um microdurômetro HMV Shimadzu, com carga de 0,1 kgf aplicada por 10 s.

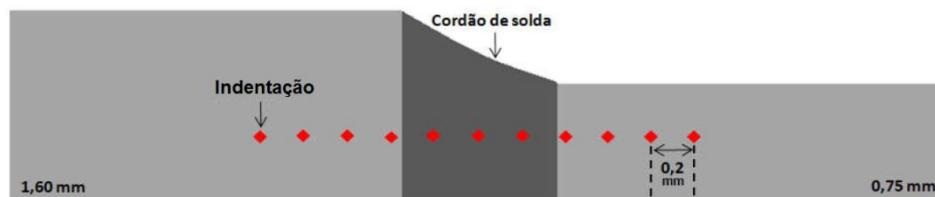


Figura 6 – Locais de medição de microdureza das amostras de teste.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Caracterização do metal de base (*blanks*)

#### 3.1.1 Propriedades mecânicas

A Tabela 3 mostra os resultados de ensaio de tração nos *blanks*. Todos os resultados foram dentro do esperado para um aço de baixo carbono para conformação mecânica [8].

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos *blanks*.

Blank	Orientação <sup>1</sup> (°)	Espessura (mm)	$\sigma_e$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	AL %	R (20%)	n (10-18%)	n (10-20%)
P1	0	0,75	163	285	48	2,990	0,249	0,236
P1	45	0,75	156	287	44	2,512	0,245	0,235
P1	90	0,75	163	288	46	2,579	0,229	0,229
P2	0	1,60	170	276	53	2,321	0,233	0,233
P2	45	1,60	161	278	47	2,015	0,230	0,230
P2	90	1,60	175	289	44	1,619	0,218	0,218

<sup>1</sup>Ângulo de extração do corpo-de-prova em relação à direção de laminação

### 3.1.2 Aspecto microscópico

A Figura 7 mostra a microestrutura dos aços dos *blanks*. A microestrutura é 100% ferrítica, com algumas inclusões não metálicas esparsas, compatível com a estrutura de um aço de baixo carbono para conformação mecânica [8].

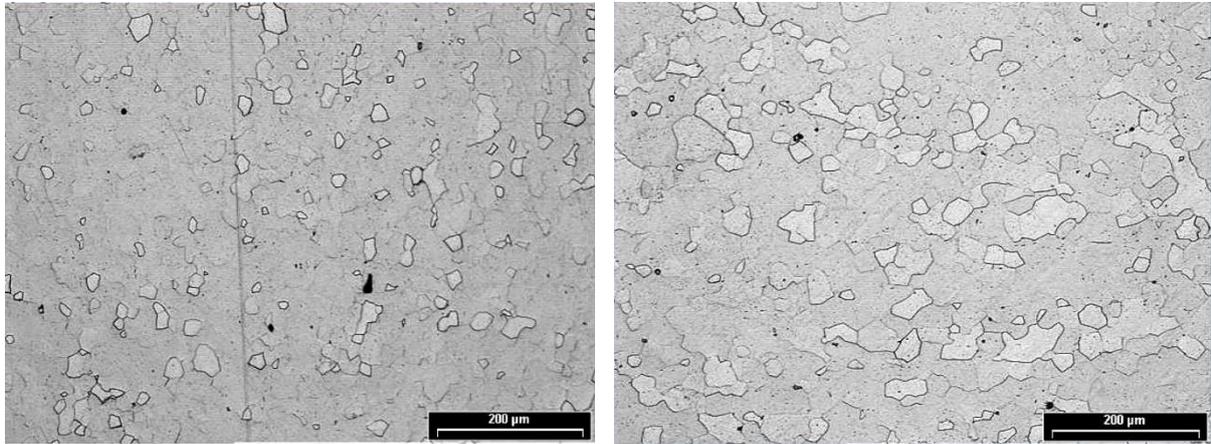


Figura 7 – Microestrutura ferrítica dos *blanks*: (a) P1 e (b) P2.

## 3.2 Caracterização dos TWB

### 3.2.1 Inspeção visual

Em todos os blanks soldados foram encontrados resultados satisfatórios para inspeção visual: cordão de solda uniforme com penetração completa, ausência de furos, *rollover*, concavidade ou convexidade excessivos ou quaisquer outros tipos de defeitos visíveis a olho nu, como mostram as Figuras 8 e 9.

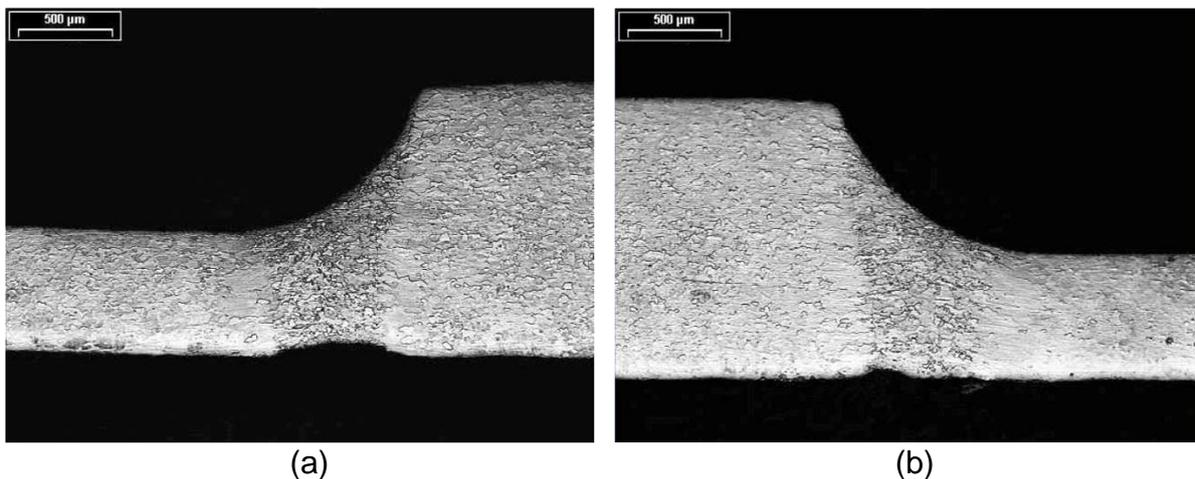


Figura 8 – Macrografias das soldas dos TWB, amostras de teste: (a) 1, (b) 2.

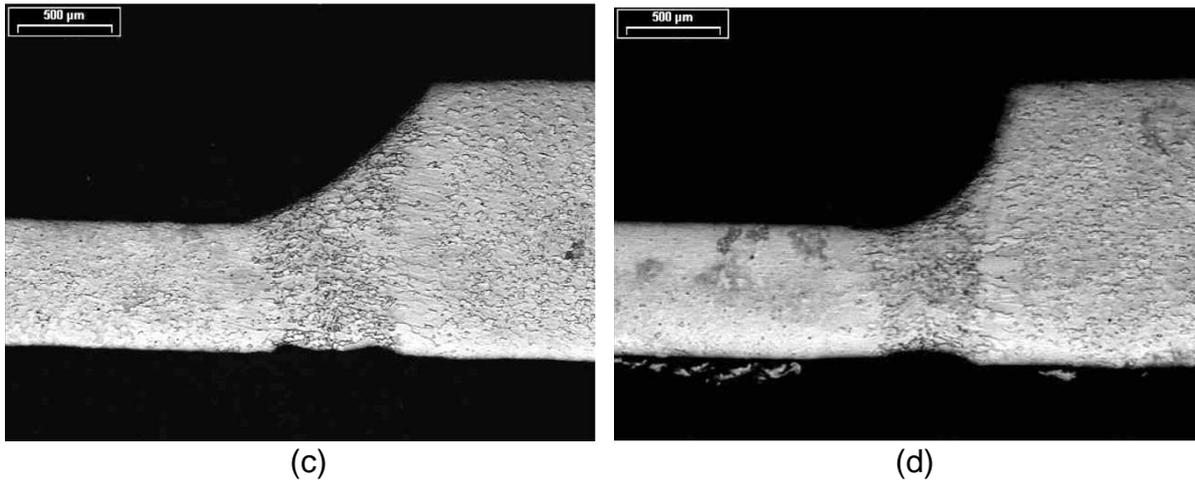


Figura 9 – Macrografias das soldas dos TWB, amostras de teste: (a) 3; (b) 4.

### 3.2.2 Embutimento Erichsen

A Tabela 4 e Figura 10 mostram os resultados do Ensaio Erichsen.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de embutimento Erichsen.

Nº amostra→	1	2	3	4
$y_s$ (mm)	8,3	8,2	8,4	8,3
$\bar{y}_b$ (mm)	10,87	10,87	10,87	10,87
Q (%)	78	77	79	78

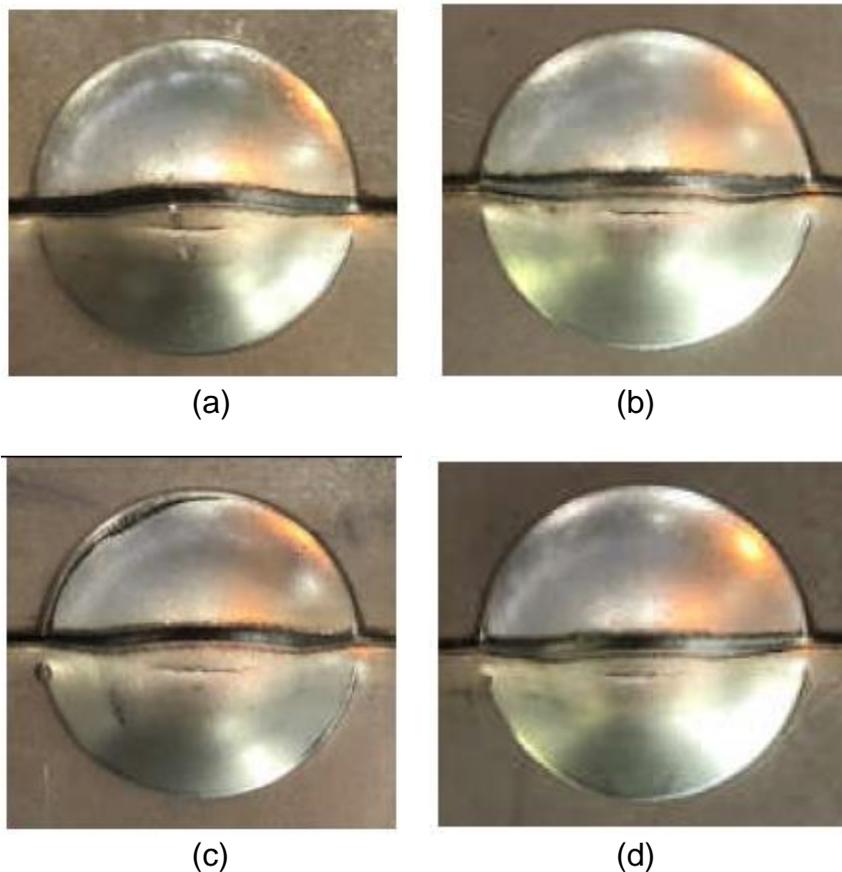


Figura 10 – Aspecto topográfico das amostras do ensaio Erichsen: número (a) 1; (b) 2; (c) 3 e (d) 4.

Observa-se que não houve variação no desempenho dos TWB no ensaio de embutibilidade Erichsen com a variação do sentido de laminação dos *blanks*. Todas as fraturas ocorreram, como esperado, no metal de base.

### 3.2.3 Microdureza Vickers

A Figura 11 mostra o perfil de microdureza na seção transversal das soldas dos TWB. Os resultados foram considerados aceitáveis, já que em nenhum ponto se ultrapassou em 3 vezes o valor de microdureza do metal de base. A dureza aumentada no cordão de solda é considerada dentro do esperado, devido a alta taxa de resfriamento característica desse processo de soldagem.

Os perfis são bem similares e indicam uniformidade nos resultados, não demonstrando diferença com a variação do sentido de laminação dos *blanks*.

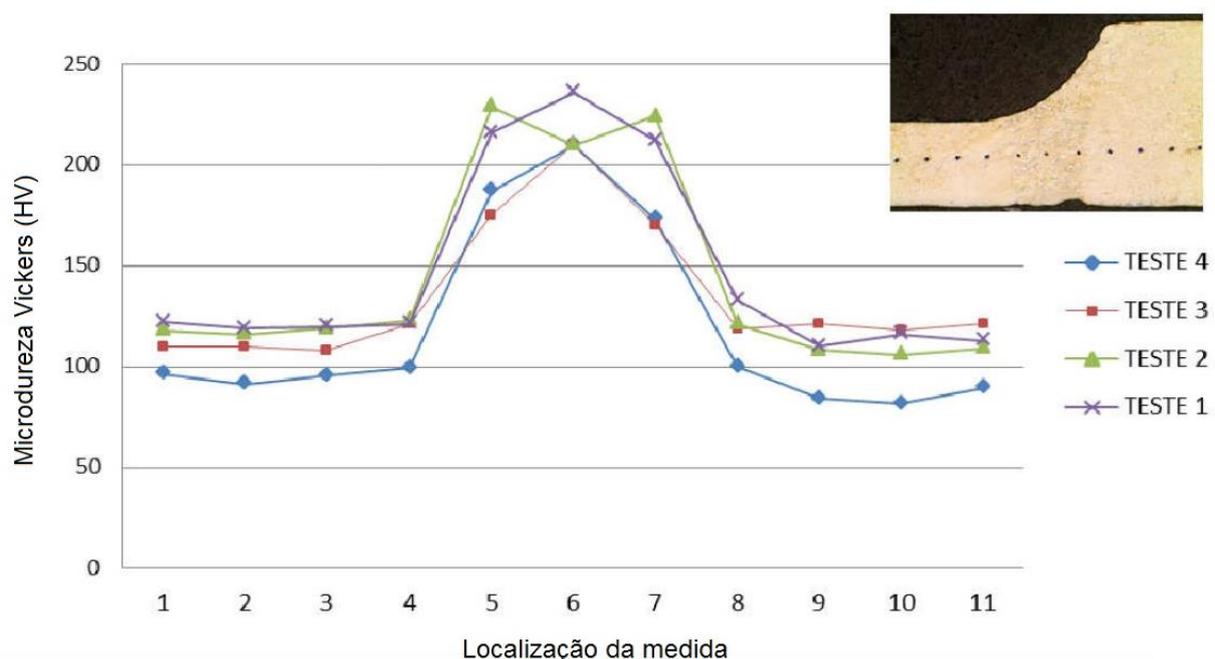


Figura 11 – Perfil de microdureza Vickers das soldas.

## 3 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi estudada a influência da inversão do sentido de laminação na estampabilidade de *Tailor Welded Blanks* (TWB) de aço EN 10327 DX56D obtidos por soldagem a laser.

O aço dos *blanks* foi caracterizado por microscopia óptica e ensaio de tração. Verificou-se microestrutura ferrítica com inclusões não-metálicas esparsas, e propriedades mecânicas características de aços de baixo carbono para conformação mecânica ( $\sigma_e \sim 165$  MPa,  $\sigma_u \sim 285$  MPa, %AL  $\sim 47\%$ , R  $\sim 2,33$ , n  $\sim 0,23$ ).

Não foram observadas diferenças na macroestrutura, na embutibilidade Erichsen ou nos perfis de microdureza nas diferentes soldas, indicando que não há influência da inversão do sentido de laminação nas propriedades estudadas.

## Agradecimentos

Os autores do presente trabalho agradecem à CSN e seus colaboradores, pela disponibilidade dos equipamentos para testes.

## REFERÊNCIAS

- 1 Merklein M, Johannes M, Lechner M, Kuppert A. A review on tailored blanks – Production, applications and evaluation. J. Mater. Process. Tech. 2014; 214:151-164.
- 2 Assunção E, Quintino L, Miranda R. Comparative study of laser welding in tailor blanks for the automotive industry. Int. J. Manuf. Technol. 2010; 49:123-131.
- 3 Elshalakany AB, Ali S, Osman TA, Megaid H, Mokadem AE. An experimental investigation of the formability of low carbon steel tailor-welded blanks of different thickness ratios. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2017; 88:1459-1473.
- 4 Riahi M, Amini A, Sabbaghzadeh J, Torkamany MJ. Analysis of weld location effect and thickness ratio on formability of tailor welded blank. Sci. Technol. Weld Joi. 2012; 17(4):282-287.
- 5 Tajul L, Maeno T, Kinoshita T, Mori K. Successive forging of tailored blank having thickness distribution for hot stamping. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2017; 89:3731-3739.
- 6 Xu PG, Yin FX, Huan YH, Tomota Y, Nagai K. Texture dedicated grain size dependence of normal anisotropy in low-carbon steel strips. 2006; 433:8-17.
- 7 Callister WD, Rethwisch DG. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC. 2010. p.147.
- 8 Silva ALVC, Mei PR. Aços e ligas especiais. 3ª ed. rev. São Paulo: Blucher. 2010. p. 318-325.