

Ensaio

Conheça as características de conformação dos *tailored welded blanks*

A união de chapas metálicas de diferentes materiais, espessuras e propriedades mecânicas formando uma geratriz para estampagem é uma estratégia que a indústria automobilística vem utilizando no desenvolvimento e fabricação de estruturas leves com o objetivo de reduzir o peso dos veículos. Uma dessas estratégias se chama *tailored welded blanks* (TWB), em que duas ou mais chapas são unidas pelo processo de soldagem. O trabalho relatado neste artigo analisa, dentro do contexto de estruturas leves, o comportamento mecânico do material ST05 com espessuras de 1,2 e 1,5mm. Os ensaios tecnológicos utilizados para caracterização do material foram o ensaio de tração uniaxial e o ensaio Nakajima modificado.

R. S. Crivellaro, S. E. S. Neto, N. Malveira e L. Schaeffer

O setor automobilístico, a cada ano que passa, aumenta seus investimentos no desenvolvimento de novas tecnologias de fabricação e materiais, os quais resultam em lançamentos de novos modelos de veículos. Neste contexto existem três setores na demanda por novos componentes que se completam respectivamente e se adequam às tendências atuais da melhor maneira possível: a construção de estruturas mais leves, materiais a serem utilizados e combinação de materiais. Sendo assim, novos produtos com maior resistência, melhor conformabilidade e menores espessuras de chapas têm

sido desenvolvidos visando em especial à redução do peso e ao aumento da segurança dos veículos.

Uma variante na maneira de reduzir o peso de um veículo, por exemplo, é unir chapas de diferentes espessuras e comportamentos mecânicos, o que implica a necessidade de melhorar as propriedades de resistência mecânica na deformação a frio⁽¹⁾. Chapas soldadas representam um elemento tecnológico estrutural na formação de componentes⁽²⁾, e as chapas finas que são unidas pelo processo de soldagem

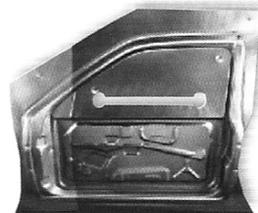


Fig. 1 – Lateral interna de um veículo produzido por TWB⁽⁶⁾

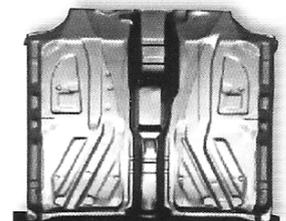


Fig. 2 – Assoalho de um veículo produzido por TWB⁽⁶⁾

são chamadas de *tailored welded blanks* (TWB), podendo combinar diferentes materiais com diferentes espessuras, propriedades mecânicas e superfícies.

Os TWB podem ser considerados produtos semi-acabados para peças estampadas da indústria automobilística ou indústrias que utilizem chapas metálicas nos seus produtos. O programa desenvolvido nessa área é conhecido como ULSAB. Conforme Taiss⁽³⁾, o projeto fornece valores comerciais para o uso de TWB a

Rafael Schilling Crivellaro (rsc@fieb.org.br) é pesquisador do Senai/Cimatec (BA); Sérgio Eglan Silveira Neto (eglan.silveira@ufrgs) é pesquisador e doutorando e Nixon Malveira (nixon.malveira@ufrgs.br) é pesquisador do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); Lírio Schaeffer (schaeffer@ufrgs.br) é coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da UFRGS. Este artigo foi apresentado no 59º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), de 19 a 21 de julho de 2004, em São Paulo (SP). Reprodução autorizada pelos autores.

custos compatíveis com a produção em escala comercial e viabiliza o aumento do seu uso na construção de automóveis. Portas, assoalhos, tetos, colunas e outras partes passam a ter uma montagem simples pelo uso de multi-materiais e chapas pré-cortadas. Sendo assim, pesquisas são desenvolvidas visando ao melhor desempenho dos TWB quanto à conformabilidade.

Tailored welded blanks

O conceito de TWB consiste em duas ou mais chapas planas normalmente unidas por diferentes processos de junção. Pode-se combinar chapas com diferentes propriedades mecânicas, espessura, acabamento superficial ou até mesmo diferentes materiais. A principal vantagem de usar o TWB na indústria automobilística está no fato de ele possuir materiais com características específicas (graus de estampabilidade) nas partes unidas, favorecendo a redução de peso e custos^(4, 5).

Combinar diferentes materiais em uma única peça facilita o desenvolvimento de componentes com formas mais precisas, evitando o excesso de peso e propiciando assim um melhor desempenho da estrutura. Algumas partes da geratriz utilizada podem conter chapas de um material mais resistente com o objetivo de aumentar a rigidez e, no caso da chapa mais fina, a deformação localizada. Esta definição é melhor compreendida nas figuras 1 e 2 (pág. 84), onde estão representadas um painel interno da porta e o assoalho de um veículo que foram produzidos pela tecnologia de *tailored welded blanks*.

Jaroni e Dohr⁽⁷⁾ citam em seu trabalho outras vantagens atribuídas

ao uso de TWB pela indústria automobilística com respeito ao processo, produto e *design*.

Algumas das vantagens que podem ser enumeradas são:

- redução de tolerâncias das partes unidas, tais como a otimização do tamanho da chapa a ser utilizada no processo de estampagem;
- aumento do potencial de absorção de energia no caso de colisão;
- redução do número de partes a serem montadas, resultando em uma logística simplificada.

No entanto, para o processo também são atribuídas algumas desvantagens, a saber:

- altos investimentos em processos de solda e automação da linha de alimentação das chapas;
- qualidade do cordão de solda.

Com novos conceitos de construção de estruturas mais leves, a indústria automobilística agrega ainda o atendimento às atuais normas ambientais, pois esta forma de construção satisfaz os requisitos quanto ao desempenho ambiental de um veículo: reduzir a emissão de poluentes, o consumo de combustível e aumentar a viabilidade de reciclagem do material⁽⁸⁾.

Procedimentos experimentais

Material-base

O aço refosforado ST05 nas espessuras de 1,2 mm e 1,5 mm foi unido pelo processo de soldagem a *laser*, formando a geratriz. O material utilizado nos ensaios, bem como suas diferentes espessuras, foram escolhidos por se tratar de um material com os qual são confeccionadas

Ensaio

partes específicas de um veículo produzido no País.

Processo de soldagem

O tipo de processo utilizado para união das chapas foi a soldagem a laser de CO_2 . A potência da fonte utilizada para união do material foi de 75% com uma velocidade de soldagem de 7m/min. A espessura resultante do cordão de solda a laser não deve ultrapassar 1 mm.

Corpos-de-prova

Hennig⁽⁹⁾ propôs, com o objetivo de alcançar um maior nível de deformações principais na curva-limite de conformação (CLC), uma série de oito corpos-de-prova de forma retangular de mesmo comprimento, porém com diferentes larguras e raios dos entalhes. A figura 3 ilustra uma família (maneira como é identificada uma série de oito corpos-de-prova com diferentes dimensões de entalhes e largura) usada no ensaio. Na figura 3 está relacionada a dimensão da largura em função do raio do entalhe. Tomou-se o cuidado

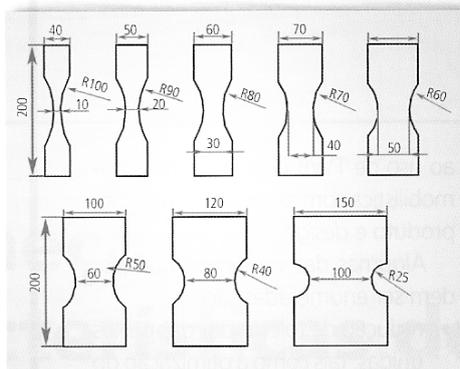


Fig. 3 – Família de corpos-de-prova para determinar a CLC pelo ensaio Nakajima modificado

de manter o cordão de solda exatamente na metade do comprimento dos corpos-de-prova.

Para a determinação da CLC do material estudado, são medidas na superfície da chapa, após o ensaio, as deformações logarítmicas maiores (ϕ_1) e menores (ϕ_2) que resultam na construção de um sistema de coor-

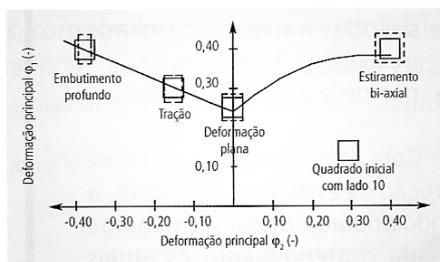


Fig. 4 – Representação esquemática da CLC

denadas similar ao da figura 4, conhecida como curva-limite de conformação.

Resultados experimentais

Composição química

Para efeito de análise, foi determinada a composição química do material ensaiado em laboratório. O equipamento utilizado para levantamento da composição química foi um espectrômetro de emissão óptica. A tabela 1 (pág. 87) mostra os resultados obtidos.

Propriedades mecânicas

Os corpos-de-prova para o ensaio de tração foram usinados conforme a norma DIN 10002, nas três direções principais de laminação (0° , 45° , 90°), e posteriormente tracionados em uma máquina de ensaio universal da marca Kratos com capacidade de 10kN, na taxa de deformação de 0.005s^{-1} à temperatura ambiente. O equipamento utilizado para medir a variação

Tab. 1 – Composição química do material estudado levantado em laboratório

Material	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Al (%)	Ti (%)
ST 05	= 0,02	= 0,3	= 0,1	= 0,025	= 0,02	= 0,02	= 0,3

de deformação do comprimento na zona de medição foi um *clip gauge* da marca Instron modelo 2630-100, com variação da amplitude de ± 25 mm. Os ensaios foram conduzidos com velocidade constante até o aparecimento da fratura, quando então o teste era dado por encerrado. A tabela 2 indica os resultados dos ensaios de tração para o ST 05.

Também foram executados ensaios de tração envolvendo o material na forma de TWB. O ensaio foi executado na mesma condição do material-base citado anteriormente.

O que foi verificado no resultado do ensaio de tração do corpo-de-prova com cordão de solda a *laser* é que a fratura sempre ocorreu no lado da chapa de menor espessura. Todas as fraturas nos corpos-de-prova na forma de TWB se localizaram paralelamente ao cordão de solda e perpendicularmente ao sentido da força aplicada. A figura 5 (pág. 88) faz um comparativo dos resultados dos ensaios de tração para o material

na forma de metal-base e na forma de TWB.

O que se verifica nos resultados apresentados é que tanto o limite de escoamento (LE) quanto o limite de resistência (LR) do material soldado são maiores do que os do material-base. Neste caso, o cordão de solda retém por um certo tempo o material durante o ensaio de tração, pois na região da solda a dureza é praticamente o dobro daquela do material-base devido à alta taxa de resfriamento da área do cordão de solda. Essa característica contribuiria para se alcançarem valores maiores para o limite de resistência e o limite de escoamento. Uma outra hipótese seria a de que o material mais fino comesse a encruar antes que o material mais grosso, devido a este começar a se deformar antes. Neste caso, há

uma resistência maior ao escoamento, elevando, conseqüentemente, os valores de LE e LR.

Conforme descrito por Lee em seu trabalho⁽¹⁰⁾, começa a ocorrer primeiro uma deformação plástica na chapa mais fina, enquanto a chapa mais grossa ainda se encontra em uma deformação elástica. À medida que o ensaio avança, a chapa mais grossa começa a se deformar, interagindo com o outro material e fazendo com que se atinjam valores maiores para o LE e LR.

Tab. 2 – Propriedades mecânicas do aço ST 05 determinadas no LdTM

Propriedades mecânicas	Ângulo referente ao sentido de laminação			
	0°	45°	90°	Valor médio
Limite de escoamento (LE)	211,4	221,3	214,1	215,6
Limite de resistência (LR)	368,2	364,9	356,1	363,1
Ag50	56	58	57	57
n	0,21	0,22	0,23	0,22
r	1,76	1,60	2,26	1,81
Δr	0,41			

Ensaio

Os aumentos do LE e do LR de geratrizes soldadas no ensaio de tração também foram verificados por Adonyi e Milián⁽¹¹⁾ em seu trabalho. Na sua investigação, os autores pesquisaram a influência da soldagem a laser e por esmagamento nas propriedades mecânicas de cinco diferentes aços de baixo carbono. Em todos os resultados alcançados o LE e o LR verificado das geratrizes soldadas (de ambos os processos de solda) foram maiores que os valores do material-base.

Análise da junta soldada

Para obter sucesso na junção de chapas, a qualidade do corte da aresta a ser soldada deve ser muito precisa, sem qualquer tipo de espaço

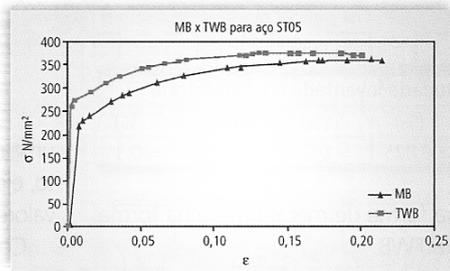


Fig. 5 – Ensaio de tração comparando o comportamento do MB e TWB para o aço ST 05

ou “dentes” entre as arestas a serem unidas. Desta maneira consegue-se unir materiais com diferentes propriedades mecânicas e composição química⁽¹²⁾. Para caracterizar as propriedades da zona soldada do conjunto, foi medida a microdureza da seção soldada, desde o material-base até atravessar a zona onde se encontra o cordão de solda. O equipamento utilizado para medir a microdureza Vickers da junta soldada foi um microdurômetro da marca Bueller modelo Micromet 2001. A figura

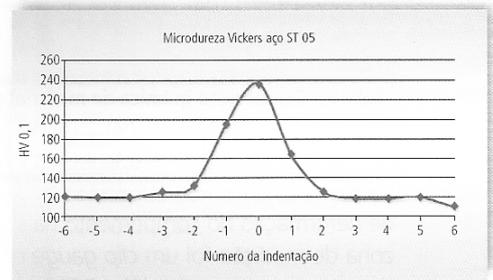


Fig. 6 – Distribuição de dureza ao longo da seção transversal do aço ST 05

6 relaciona o valor da microdureza medida no material-base e na zona de fusão.

Na zona de fusão a dureza é aproximadamente o dobro da medida no material-base. Também se justifica esta medida de dureza pela composição química dos materiais, espessura e a velocidade de soldagem. Conforme concluem Waddell e Wallach⁽¹³⁾, um dos principais fatores que controlam a dureza da solda é a quantidade de carbono equivalente e de elementos de

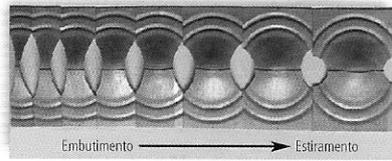


Fig. 7 – Corpos-de-prova após ensaio Nakajima utilizados para levantamento da CLC de TWB

liga presentes no material-base, ou seja, aços com mesma tensão de escoamento ter diferentes características de conformabilidade, dependendo somente da sua composição química.

Avaliação da conformabilidade através da CLC

A utilização de corpos-de-prova com diferentes larguras e raio de entalhe permite a obtenção de diferentes pontos na CLC (diferentes estados de deformações), que abrangem os campos referentes ao embutimento profundo e estiramento. A figura 7 ilustra uma família (composta de oito corpos-de-prova) após o ensaio, indicando o sentido da deformação que corresponde a cada geometria de corpo-de-prova. O cordão de solda faz uma separação simétrica do tamanho do corpo-de-prova (100 mm para cada lado), garantindo desta maneira que o cordão de solda esteja exatamente no meio do punção no momento dos ensaios para determinação das CLC.

O ensaio foi conduzido da seguinte maneira: com o corpo-de-prova centrado e posicionado

adequadamente, baixava-se a parte superior do prensa-chapas até que o valor da força indicasse a força pré-determinada, que era da ordem de 5kN, suficiente para evitar o escoamento do material durante o ensaio junto com a ação dos *draw-beads*.

Com uma velocidade de avanço reduzida e constante do punção em direção ao corpo-de-prova, o ensaio era conduzido até o aparecimento da fissura na superfície da chapa, o que caracterizava o fim do procedimento. A fissura que ocorreu em todos os corpos-de-prova foi paralela ao cordão de solda, conforme já verificado anteriormente no ensaio de tração.

A malha quadrada deformada se transforma em um retângulo que permite determinar as deformações máximas e mínimas pelo maior e menor lado do retângulo. As deformações assim mensuradas são colocadas em um gráfico, tendo como eixos um sistema de coordenadas φ_1 e φ_2 . Para plotar o gráfico da CLC foram medidos os quadrados em que a fissura passa no meio e aqueles próximos à falha.

A figura 8 traz a CLC da junção de TWB do aço ST 05. A nuvem dos valores de ruptura corresponde aos pontos assinalados em triângulos, e a nuvem dos valores “bom” corresponde aos pontos assinalados em círculos.

Para traçar a CLC, a ruptura do material, foi traçada uma curva posicionada logo abaixo da nuvem correspondente aos valores de ruptura. A CLC traçada corresponde ao conjunto soldado e não somente à chapa mais fina, onde ocorreram as fraturas. Lange⁽¹⁴⁾ afirma que a espessura da chapa exerce

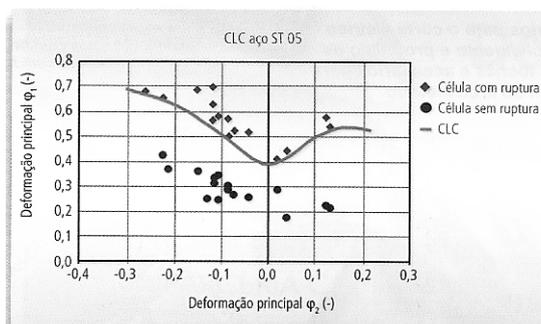


Fig. 8 – CLC correspondente ao material TWB do aço ST 05

Ensaio

uma influência sobre a construção da CLC. Se, por hipótese, é traçada a CLC dos materiais separadamente, a curva mais acima corresponderia à do material mais grosso, e a curva mais para baixo à do material mais fino.

Segundo Lee⁽¹⁵⁾, há uma interação entre os materiais soldados na hora da sua conformação. Conforme foi verificado nos ensaios de tração, o cordão de solda exerce uma influência sobre os resultados dos ensaios. Suponha-se ele também exerça influência no traçado das CLC dos materiais soldados. Sendo assim, é provável que a CLC plotada para o material soldado (figura 8, pág. 89) corresponda a uma curva que estaria localizada entre as curvas resultantes do ensaio feito separadamente dos ma-

teriais de menor e maior espessura. Desta maneira, é provável que a CLC do material soldado não deva estar abaixo da curva do material de menor espessura, pois não seria vantajoso unir chapas com o objetivo de formar geratrizes visando à redução de peso e melhorando as propriedades mecânicas, já que a geratriz da chapa mais fina teria uma capacidade maior de conformação devido às deformações medidas serem maiores.

Conclusões

Os resultados apresentados para o LE e o LR das chapas TWB levantadas no ensaio de tração foram um pouco superior àqueles levantados para o MB. Há duas hipóteses para este resultado:

- a presença do cordão de solda que retém o material no início do ensaio, fazendo com que o material mais fino atinja primeiro a deformação plástica, enquanto o material mais grosso ainda se encontra em deformação elástica,
- outra hipótese seria a de que o material mais fino, por se deformar antes que o material mais grosso, atinja um grau de encruamento maior, aumentando a resistência ao escoamento e elevando, consequentemente, os valores para LE e LR.

Nos ensaios de tração do material TWB, a fratura sempre ocorreu no lado da chapa de menor espessura, paralelo ao cordão de

solda e perpendicular ao sentido da força aplicada. Este tipo de fratura ocorre quando a força é aplicada perpendicularmente ao cordão de solda.

O teste da microdureza mostrou que a dureza no ponto da junção era equivalente a praticamente o dobro da dureza medida no MB.

As CLC traçadas por meio da leitura das deformações maiores (ϕ_1) e menores (ϕ_2) constituem um dos métodos mais confiáveis para se avaliar o desempenho dos materiais quanto ao grau de deformação em uma linha de produção. As CLC levantadas para materiais TWB com diferentes espessuras para o mesmo material correspondem às geratrizes soldadas. É possível que a CLC do conjunto soldado esteja localizada entre a curva do material mais grosso e a do material mais fino. A espessura maior tende a levar a curva para cima, e espessura menor tende a levar a curva para baixo. Os valores de deformação medidos podem alimentar pro-

gramas específicos de simulação, proporcionando desta forma valores que garante uma peça livre de falhas catastróficas.

Referências

- 1) TOURRUÇO, M. *Estudo de chapas de aço de elevada resistência para a indústria automobilística*. Porto Alegre, 1999. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFRGS.
- 2) BERNADSKII, V. N. *Thin-Sheet welded Tailored Blanks in Automotive Industry* Welding International 15, 2001 p.898-906
- 3) TAISS, E. *A trajetória do Programa ULSAB – Ultra light Steel Auto Body e o Desenvolvimento da Usiminas no Atendimento ao Setor Automobilístico*. V Conferência Nacional de Conformação de Chapas. Gramado, 2002 p. 163-182
- 4) SAUNDERS, F.I; WAGONER, R.H. *Forming of Tailored Blanks*. Physical Metallurgy and Materials Science v27A n9 Setembro 1996 p.2605-2616
- 5) *TAILOR WELDED BLANK DESIGN AND CONSTRUCTION MANUAL*. A/SP Technical Report-1995 p.2-78
- 6) ZIMMERMANN, K. *Futuro do Desenvolvimento do Tailored Blank* Congresso Internacional SAE 2003 São Paulo Outubro 2003 p.1-9
- 7) JARONI E DOHR. *Tailored Blanks- von der Marktnische zur Weltweiten Produktion* Stahl und Eisen 118 (1998) Nr.8 p.35-38
- 8) HAUGER, A. *Flexibles Walzen als kontinuierlicher Fertigungsprozess für Tailor Rolled Blanks*, Alemanha, 1999 161p. Tese (Doutorado em Engenharia) RWTH-Aachen
- 9) HENNIG, R.; *Vergleichende Untersuchungen zur numerischen Simulation des Tiefziehens nichtzylindrischer rotationssymmetrischer und nichtrotationssymmetrischer Teile*, Alemanha, 1997 pág:131 Dissertação (Doutorado em Engenharia) Universidade Técnica de Dresden.
- 10) LEE T.C ET AL. *Tailor-Welded Blanks of Different Thickness Ratios Effects on Forming Limit Diagram*. Journal of Materials Processing Technology N 0 132 2003 p. 95-101.
- 11) ADONYI, Y.; MILIAN, J. L.; *Formability of Tailored Blanks for Automotive Applications* 34 th MWSP CONF. PROC., ISS – AIME Vol. XXX 1993 p.83-91
- 12) SULAN, M.; KAMPUS. Z.; TUSEK, J.; *Welding of Tailored Blanks of Different Materials* Journal of Materials Processing Technology N 0 119 2001 p.180-184
- 13) WADELL, W.; WALLACK, R.; JACKSON, S.; *The Influence of the Weld Structure on the Formability of Laser Welded Tailored Blank*. Society of Automotive Engineers Inc. – SAE N 0 982396 1998 p.257-268.
- 14) LANGE, K. *Handbook of Metal Forming*, Estados Unidos: McGraw-Hill, 1985 pág. 18.3-18.17.
- 15) LEE T.C ET AL. *Tailor-Welded Blanks of Different Thickness Ratios Effects on Forming Limit Diagram*. Journal of Materials Processing Technology N 0 132 2003 p. 95.