



43º SENAFOR

27th International Forging Conference
26th National Sheet Metal Forming Conference / 13th International Sheet Metal Forming
Conference / 10th BrDDRG Congress
13th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies –
Brazil/RS
2nd International Conference on Innovation in Materials and Manufacturing
Hotel Plaza São Rafael – P. Alegre RS, October 2-4, 2024

DETERMINAÇÃO DA CURVA LIMITE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS DE AÇO COM REVESTIMENTO ORGÂNICO PELO CRITÉRIO DE ESTRICÇÃO

Bastos, A. L. ⁽¹⁾
 Marcondes, P. V. P. ⁽²⁾
 Lajarin, S. F. ⁽³⁾

⁽¹⁾ Doutorando, UFPR – Whirlpool Corporation, alexandre_1_bastos@whirlpool.com

⁽²⁾ Doutor, Universidade Federal do Paraná, marcondes@ufpr.br

⁽³⁾ Doutor, Universidade Federal do Paraná, espanhol@ufpr.br

RESUMO

A indústria dos eletrodomésticos produz diversas peças estéticas a partir de chapas metálicas. No processo tradicional estas peças estéticas recebem a aplicação de uma pintura de acabamento após serem estampadas. Por sua vez, a conformação destas mesmas peças estéticas, mas a partir de chapas metálicas com revestimento orgânico aplicado ainda na bobina, apresenta diversas vantagens em relação ao processo tradicional, destacando-se a redução das emissões de compostos orgânicos voláteis e de resíduos perigosos classe 1, além das maiores produtividade e eficiência energética, e consequentemente um melhor custo total. Em contrapartida, esta chapa, agora com o revestimento orgânico, precisa resistir às tensões e às deformações, induzidas para a conformação da chapa, sem que os modos de falha característicos ocorram. Este trabalho teve como objetivo a obtenção das curvas limites de conformação (CLCs) da chapa revestida, segundo o critério de estrição do substrato em aço. Para execução de tal ensaio, foi utilizado um sistema ótico de correlação de imagem digital (DIC) para medição das deformações em tempo real, e através de um algoritmo baseado no tempo de ensaio, foi determinado o início da estrição.

Palavras-chave: Chapa metálica revestida. Revestimento polimérico. Revestimento orgânico. Aço pré-pintado. CLC.

ABSTRACT

The home appliance industry produces many aesthetic parts from sheet metal. In the typical process approach, these aesthetic parts are painted after being stamped. In turn, the forming of these same aesthetic parts but from sheet metal with a polymer coating previously applied to the coil, exhibits many advantages when compared to the typical approach, highlighting the reduction of emissions of volatile organic compounds and class one hazardous waste, in addition to greater productivity and energy efficiency, and consequently a better total cost. On the other hand, this sheet, now with the organic coating, needs to withstand the stresses and strains induced by the forming of the sheet metal, without the characteristic failure modes occurring. The objective of this work was to obtain the forming limit curves (FLC's) of the coated sheet metal, according to the steel substrate localized necking criterion. To perform this test, an optical digital image correlation (DIC) system was used to measure the major and minor strains in real time, and through a time-based algorithm, the start of the localized necking was determined.

Keywords: Pre-coated sheet metal. Polymeric coating. Organic coating. Preprinted steel. Formability. FLC.

1. INTRODUÇÃO

As peças estéticas, fabricadas a partir de chapas não revestidas ou com revestimento metálico, após serem conformadas, são revestidas para melhor proteção da superfície contra corrosão bem como para fins decorativos. Por exemplo, revestimentos orgânicos são necessários nas embalagens de alimentos e bebidas para impedir o contato do metal com o alimento ou a bebida. Portas e telhas metálicas são revestidos com várias cores por propósitos estéticos. Peças automotivas são geralmente revestidas com múltiplas camadas de pintura por razões estéticas, obtendo-se acabamentos de alta qualidade além de proteção à corrosão. Por todas estas razões, o processo tradicional de manufatura para chapas metálicas envolve a conformação desta chapa para obter a forma desejada seguido da aplicação de um revestimento [1], [2].

Para a aplicação do revestimento é indispensável que a peça tenha sua superfície completamente limpa, o que não é simples visto que as formas complexas das peças criam áreas de difícil acesso para limpeza. Este processo de limpeza requer equipamentos adicionais e que produzem grandes quantidades de água residual contaminada e que necessitam de estação de tratamento de efluentes [1], [2].

Após a aplicação do revestimento, as peças passam por fornos para a cura do revestimento. Nesta etapa, os compostos orgânicos voláteis (COVs), são liberados pelo revestimento durante o processo de cura. Na presença da luz do sol os COVs podem reagir com os óxidos de nitrogênio formando ozônio [1], [2], [3]. Este ozônio encontrado na faixa de ar próxima do solo, onde respiramos, é chamado de “mau ozônio” sendo tóxico e prejudicial à saúde, além de poder causar danos à vegetação. Diferentemente do ozônio encontrado na estratosfera, que tem a importante função de proteger a Terra, como um filtro, dos raios ultravioletas emitidos pelo Sol [4].

Todos estes fatores combinados tornam o processo de pintura das peças conformadas um grande risco ambiental. Por sua vez, padrões ambientais cada vez mais rígidos vem sendo implementados por governos no mundo inteiro, tornando ainda mais alto o custo de operação por parte dos fabricantes que possuem linhas de pintura nas suas instalações [1], [2].

Uma alternativa eficiente é a utilização de materiais bobinas ou chapas pré-

revestidas no processo de conformação. O processo de pintura de bobinas foi inventado em 1940 para auxiliar os fabricantes de venezianas [1]. São vários os métodos e tecnologias que têm sido utilizados para aplicação de revestimentos orgânicos na superfície de chapas metálicas de forma a garantir a uniformidade e qualidade. Um método comumente utilizado na indústria é a aplicação do revestimento, qualquer que seja a sua tecnologia, diretamente na bobina e de forma automática e contínua, permitindo assim revestir chapas de diversos tamanhos, em larga escala, com alta eficiência de cobertura e em ambas as faces simultaneamente [5].

Em 2018 a produção mundial de aços planos com revestimento orgânico atingiu 13,1 milhões de toneladas, isto representou cerca de 1,6% do total de aços planos produzidos naquele ano [17]. Hoje em dia, os aços planos com revestimento orgânico têm sua aplicação mais destacada nas indústrias de construção civil, de embalagens para alimentos e de eletrodomésticos, sendo que esta última produz peças com elevados requisitos estéticos como os painéis, gabinetes e portas, que serão utilizadas na fabricação de refrigeradores, fogões, lavadoras, secadoras, entre outros eletrodomésticos, e bem como equipamentos comerciais.

Chapas metálicas pré-revestidas apresentam diversas vantagens sobre as peças pós-pintadas. Algumas dessas vantagens são apresentadas na literatura e são resumidas na lista abaixo [1], [2], [5], [6], [7]:

- possibilitam utilização de figuras e decorações com excelente estética, padrão e acabamento;
- superiores aderência e uniformidade das camadas aplicadas, conferindo maior homogeneidade nas propriedades mecânicas e químicas do revestimento;
- melhor proteção contra corrosão e melhor resistência contra condições climáticas severas devido a melhor qualidade do revestimento;
- redução das emissões de compostos orgânicos voláteis (COVs) prejudiciais à saúde e ao meio ambiente;
- redução na geração de resíduos perigosos (classe 1);
- melhoria de produtividade e redução do custo de processamento devido à alta quantidade de área superficial coberta por minuto ($\sim 150 \text{ m}^2/\text{min}$). Em um único dia mais de 100 mil metros de bobina podem ser processados;
- maior eficiência energética;
- otimização do inventário de chapas/ peças estampadas/ peças pintadas;
- o revestimento pode apresentar uma certa função lubrificante a seco durante a conformação, podendo eliminar a necessidade de utilização de lubrificação adicional;
- o fato de possibilitar a não utilização de lubrificantes, torna o processo mais limpo e sem a necessidade de desengraxar ou lavar as peças para remoção do lubrificante;

Por outro lado, a superfície da chapa revestida é mais sensível e requer cuidados e proteção para evitar danos a mesma. Isto é especialmente problemático uma vez que tensões precisam ser aplicadas na chapa metálica para conformá-la e obter a forma final da peça. O revestimento precisa resistir ao processo de

conformação não somente sem sofrer qualquer dano, mas também, sem alterar significativamente suas propriedades [8].

Portanto, o limite de conformação é também determinado pelo revestimento orgânico e não somente pela chapa metálica. Durante o processo de conformação de chapas com revestimento orgânico, além dos modos de falha típicos da chapa como estrição, fratura, afinamento excessivo, estiramento insuficiente e enrugamento, outros modos de falha afetam a função protetiva e estética dos revestimentos orgânicos. Os modos de falha do revestimento são a desplacagem, microtrincas, perda de brilho, alterações de cor e rugosidade. Estes defeitos ocorrem devido aos esforços mecânicos na superfície, mas também afetam as propriedades do revestimento devido às mudanças de forma e alongamento durante o processo de conformação [9].

O desenvolvimento de ferramental e equipamentos para conformação depende de uma previsão com relativa acuracidade das propriedades finais das peças sem que haja a necessidade de construir ferramentais para validar o sucesso da operação, e por tentativa e erro, definir os parâmetros de processo, produto e materiais ideais. A simulação numérica da conformação por meio de programas de elementos finitos é a ferramenta utilizada para realizar essas análises de previsão dos modos de falha e ajustes nos parâmetros de processo, produto e materiais [2].

Portanto, tanto o substrato em aço, quanto o revestimento orgânico, devem ser devidamente caracterizados, permitindo o correto modelamento do material para a realização de simulações de conformação, e assim prever eficientemente os modos de falha de ambos durante a conformação.

O objetivo deste trabalho é avaliar a conformabilidade do substrato das chapas pré-pintadas de aço DX54D de 0,90 mm de espessura, e através do ensaio de Nakajima monitorado por um sistema de correlação digital de imagem (DIC), determinar a CLC à estrição. Esta CLC e os parâmetros do ensaio serão utilizados posteriormente, num estudo para determinação da conformabilidade do revestimento polimérico.

O método DIC é uma técnica óptica de medição sem contato do campo de deslocamentos para obtenção da distribuição de deformações com maior acuracidade. Atualmente, o DIC tem sido amplamente utilizado e está substituindo o método convencional de marcação da grade de círculos para medição das deformações e determinação da CLC [10].

O sistema de correlação digital de imagem trabalha a partir de imagens obtidas por câmeras fotográficas (dedicadas ou não), associadas a um programa para efetuar a medição de uma grandeza específica. Para medição das deformações utiliza-se uma câmera ou um conjunto de câmeras para detectar os deslocamentos, e a partir destes, as deformações são calculadas pelo programa [11].

O desempenho deste sistema de correlação digital de imagem é ideal para a medição das deformações em situações complexas. Além disso, o sistema óptico permite a aquisição de uma grande quantidade de dados e com elevada acuracidade e precisão quando comparado com os métodos manuais de medição [12], [13].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas no experimento amostras de um único tipo de material e um único lote de produção de um aço galvanizado com revestimento orgânico, sendo o substrato uma bobina de aço DX54D, chapa de aço galvanizado a quente de estampagem ultra profunda e segundo norma EN10142/ 10327, e com espessura de 0,90 mm, produzida pela CSN Porto Real.

Posteriormente, essa bobina foi processada numa linha de pintura de bobinas da CSN Paraná, passando por um pré-tratamento de fosfatização, seguido da aplicação de um primer a base de Ti e livre de cromo hexavalente, e posterior aplicação do acabamento branco, *topcoat*, à base de poliéster-melamina, esta última produzida pela AkzoNobel. As camadas resultantes deste processo estão ilustradas na figura 1.

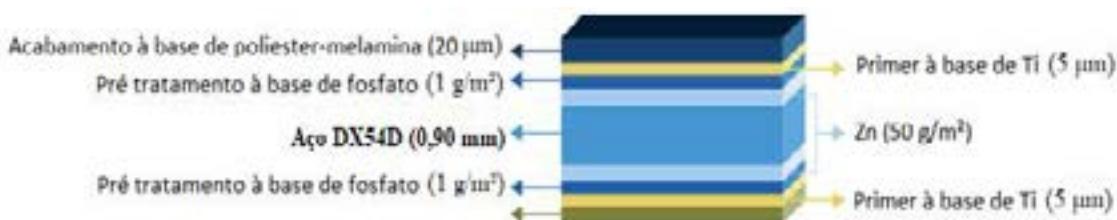


Figura 1: Composição das camadas da chapa pré-pintada utilizada.

A composição química e as propriedades mecânicas do aço DX54D são informadas nas tabelas 1 e 2 respectivamente.

Tabela 1: Composição química do aço DX54 (%), norma x valores reais.

DX54D	C	Si	Mn	P	S	Ti	Al	Ni	Cu	Cr	N	Nb
EN10327	<0,12	<0,5	<0,6	<0,1	<0,045	<0,3	-	-	-	-	-	-
Real	0,0024	0,006	0,115	0,008	0,011	0,042	0,069	0,06	0,04	0,011	0,002	0,001

Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço DX54, valores médios obtidos.

	Direção	LE (MPa)	LR (MPa)	Al (%)	Au (%)	r	n
EN 10327	90°	120-220	260-350	>36	-	>1,6	>0,18
Valores obtidos	0°	184	310	50	25,6	2,26	0,22
	90°	192	306	42	24,5	3,15	0,22
	45°	197	318	43	24,3	2,12	0,22

O equipamento utilizado para execução dos ensaios foi uma máquina universal de ensaio de chapas metálicas da Erichsen, modelo 145-60 básico, com capacidade de 60 tonf. Foi utilizada uma velocidade constante de deslocamento do punção de 1,0 mm/s. A força do prensa-chapas foi determinada para a maior amostra de *blank* (200 x 200), de modo que não houvesse qualquer deslocamento de material na região do quebra-rugas, tendo sido obtido o valor de 280 KN, valor este mantido durante todo o ensaio e para todos os tamanhos de corpo de prova.

Foi utilizado um ferramental Nakajima, figura 2, composto de 3 partes: punção de corpo cilíndrico com extremidade hemisférica e acionado por atuador hidráulico; prensa-chapas acionado por atuador hidráulico secundário e independente do atuador do punção; e matriz fixada na parte superior, sendo esta uma tampa basculante com travamento mecânico.

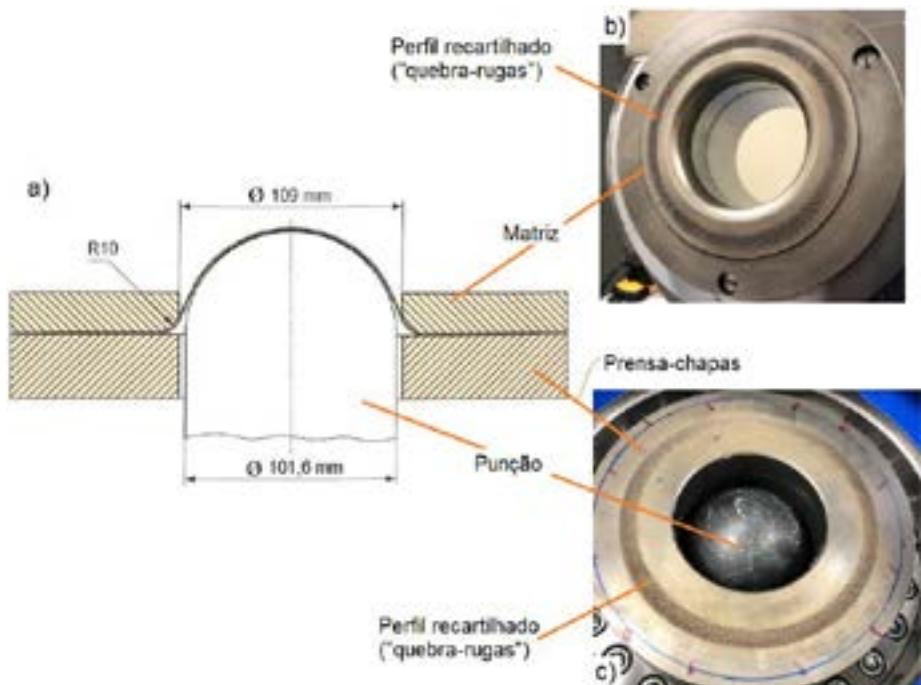


Figura 2: Ferramental Nakajima: a) Desenho esquemático conforme ISO 12004; b) Parte superior (matriz); c) Parte inferior (punção e prensa-chapas).

Foram utilizadas 5 diferentes larguras de corpo de prova: 25 mm, 50 mm, 100 mm, 150 mm e 200 mm, e 4 amostras de cada dimensão foram ensaiadas. Para os 2 corpos de prova maiores, foi utilizado o formato retangular, diferentemente dos corpos de prova menores, nos quais foi utilizado um formato de “gravata”, para assim obter uma deformação mais homogênea e com a estrição localizada ocorrendo na região esperada, próximo ao topo do domo hemisférico. Todos os corpos de prova foram cortados por jato de água nas geometrias e dimensões mostradas nas figuras 3 e 4.

Foi aplicada uma pintura de padrão estocástico por spray na cor preta e numa área delimitada por um aro de 100 mm de diâmetro, padrão este que foi utilizado como referência para a medição e cálculo das deformações principais críticas através de um sistema óptico.



Figura 3: Geometria dos corpos de prova Nakajima.

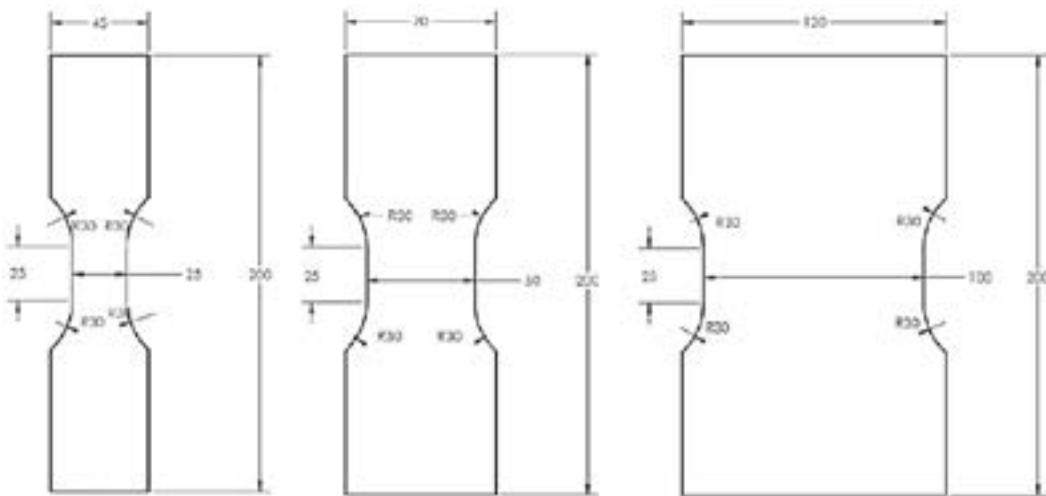


Figura 4: Dimensões dos corpos de prova Nakajima em formato “gravata”.

Imediatamente antes da colocação de cada corpo de prova dentro do ferramental, foi aplicada uma combinação de duas condições de lubrificação, primeiramente na região hemisférica do punção foi aplicado gordura de origem animal (sebo de ovelha), e após, duas folhas de teflon de 100 mm de diâmetro e com espessura de 0,127 mm foi colocada sobre o punção lubrificado. Por fim, o corpo de prova foi posicionado centralizadamente nas duas direções

Optou-se pela formação de estrição localizada como critério de falha para obtenção da CLC, pois além de ser este um critério mais adequado para peças estéticas, trincas nos corpos de prova prejudicariam os resultados dos ensaios acelerados de corrosão, previstos para o estudo posterior da conformabilidade do revestimento polimérico.

A detecção da estrição localizada foi possível devido ao método utilizado para medição das deformações, um sistema óptico de correlação digital de imagem montado sobre a máquina universal de ensaio, comumente chamado de DIC, Digital Image Correlation, tendo este a capacidade de aquisição automática e em tempo real das deformações durante o ensaio, como mostrado na figura 5. Foi utilizado o VIC-3D, fabricado pela Correlated Solutions Inc, bem como o programa VIC-Snap, versão 8, build 430.



Figura 5: Sistema de Correlação de Imagem (DIC).

Os valores críticos das maiores e menores deformações principais que resultam no início da estrição localizada, foram obtidos pela utilização de um algoritmo baseado na variação da taxa de afinamento com o decorrer do ensaio até o ponto de fratura [14]. De forma gráfica, ilustrado na figura 6, este algoritmo define como o início da instabilidade plástica o instante de tempo dado pela interseção das linhas L1 (linha vermelha) e L2 (linha verde). L1 e L2 são obtidas por regressão linear através do método dos mínimos quadrados.

Efetivamente pode-se constatar que a taxa de afinamento para L1 é praticamente constante, uma vez que neste período de ensaio a deformação é homogênea. Já para L2, a inclinação da linha evidencia um crescimento linear acentuado da taxa de afinamento, indicando a fase de instabilidade plástica e, portanto, de estrição localizada. Deste ponto no tempo de ensaio, definido pela interseção das linhas L1 e L2, são extraídos, da região onde ocorreu a estrição localizada, os dados das deformações principais críticas para definição da CLC para cada amostra.

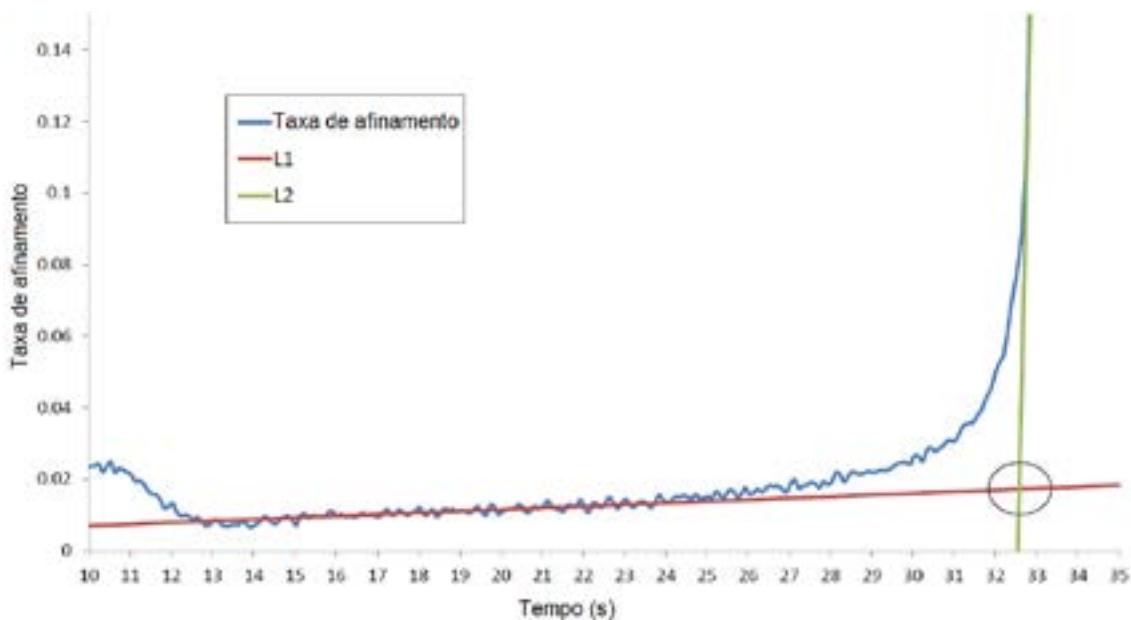


Figura 6: Determinação do início da instabilidade plástica.

O princípio de funcionamento destes sistemas de correlação digital de imagem, e como os deslocamentos são detectados. O programa reconhece a estrutura superficial em imagens digitais e aloca coordenadas para cada pixel da imagem. As coordenadas iniciais são contabilizadas como a imagem de referência, indicando o objeto de medição em seu estado não deformado. Após o objeto de medição ser deformado, uma segunda imagem é gravada. Neste ponto, o programa compara as imagens e pode registrar qualquer deslocamento característico do objeto. Todas as imagens de correlação usam um padrão estocástico de modo que o aspecto da superfície, em um ponto, é único [11].

Em seguida, é possível reconhecer e localizar um determinado ponto em várias imagens. Na prática, as imagens são divididas em pequenos quadrados chamados "facetos". Essas facetas são caracterizadas pela sua distribuição dos níveis de cinza. Em seguida, o sistema tenta corresponder a distribuição dos níveis de cinza destas facetas com a distribuição cinza nível em torno de um ponto da imagem deformada. Esta operação de harmonização é possível graças a uma transformação aplicada às

facetas. Esta transformação é uma combinação de uma translação, uma rotação e uma distorção.

3. RESULTADOS

Na figura 7 são mostrados os corpos de prova Nakajima após o ensaio até a fratura. Pode-se constatar que em todas as dimensões de corpo de prova e suas repetições, a trinca ocorreu no polo ou bem próximo ao polo, o que indica uma boa condição de lubrificação, bem como um formato de corpo de prova adequado.



Figura 7: Corpos de prova após ensaio Nakajima.

As deformações principais críticas resultantes dos ensaios Nakajima, segundo critério de falha por início da estrição, são apresentadas na tabela 3. Observa-se que os dados apresentaram um desvio padrão aceitável, à exceção de uma amostra de largura 25 mm, considerada um outlier, por não pertencer a distribuição normal. Aponta-se alguma falha na preparação do ensaio para esta amostra, como uma falha na lubrificação ou mau posicionamento da amostra, como possíveis causas para este desvio.

Tabela 3: Dados do ensaio Nakajima para CLC do aço pelo critério da estrição utilizando DIC.

Largura CDP (mm)	Repetição	ε_1 (mm/mm)	ε_2 (mm/mm)
25	1	0,524	-0,313
25	2	0,636	-0,367
25	3	0,445	-0,268
25	4	0,549	-0,331
Média		0,570	-0,337
Desvio padrão		0,0588	0,0275
50	1	0,550	-0,236
50	2	0,517	-0,233
50	3	0,485	-0,209
50	4	0,495	-0,216
Média		0,512	-0,224
Desvio padrão		0,0288	0,0131
100	1	0,371	-0,018
100	2	0,363	-0,022
100	3	0,4	-0,02
100	4	0,332	-0,013
Média		0,367	-0,018
Desvio padrão		0,0280	0,0039
150	1	0,311	0,092
150	2	0,333	0,08
150	3	0,322	0,105
150	4	0,318	0,098
Média		0,321	0,094
Desvio padrão		0,0092	0,0106
200	1	0,487	0,257
200	2	0,347	0,215
200	3	0,390	0,228
200	4	0,340	0,216
Média		0,391	0,229
Desvio padrão		0,0717	0,0215

Os valores encontrados para as deformações críticas ε_1 e ε_2 , obtidas no ensaio Nakajima, foram então plotados num gráfico ε_1 x ε_2 , que é mostrado na figura 8. Neste gráfico os valores médios por tamanho de corpo de prova foram então conectados, sendo então constituída a CLC do aço DX54D pré-pintado.

Observa-se que o ponto de inflexão da CLC, chamado de $CLC_0=0,32$, está deslocado para a direita, em direção a região de estiramento biaxial e não exatamente sobre o eixo da deformação principal maior. Este deslocamento do CLC_0 é uma consequência da trajetória de deformação influenciado por uma pequena pré-deformação biaxial [15]. Isto é típico do ensaio Nakajima, devido à superfície curva das amostras.

Este efeito fica bastante evidente no gráfico da figura 9, que mostra este desvio nas trajetórias de deformação dos diferentes tamanhos de corpo de prova. Além disso, o formato retangular do perímetro externo dos blanks, segundo a ISO 12004, pode causar uma distribuição menos uniforme dos pontos da CLC quando comparado com a geometria circular que acompanha a geometria do ferramental.

Utilizando o modelo de Keeler para previsão do CLC_0 , conforme [18], encontra-se o valor de $CLC_0=0,37$. Esta redução de 13% no valor encontrado para a CLC obtida era esperada, dado que o modelo de Keeler faz a previsão para a curva à fratura, além do que, o processo térmico na aplicação do revestimento orgânico, pode ter causado uma recuperação parcial da estrutura cristalográfica do DX54D.

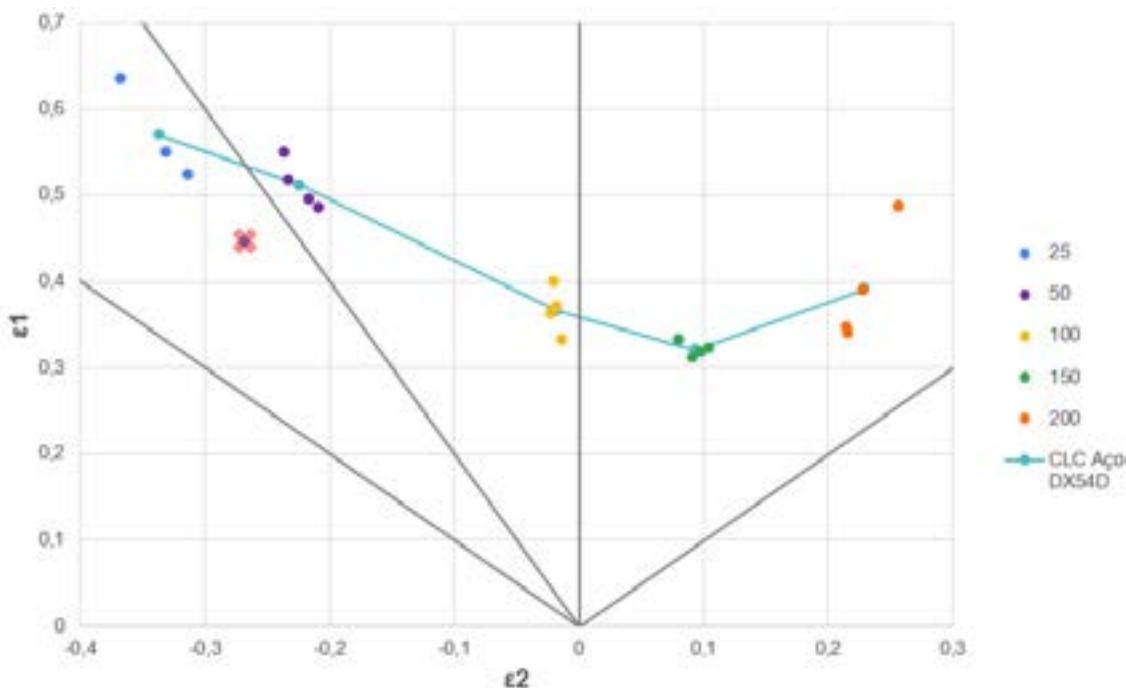


Figura 8: CLC do aço DX54D com revestimento orgânico.

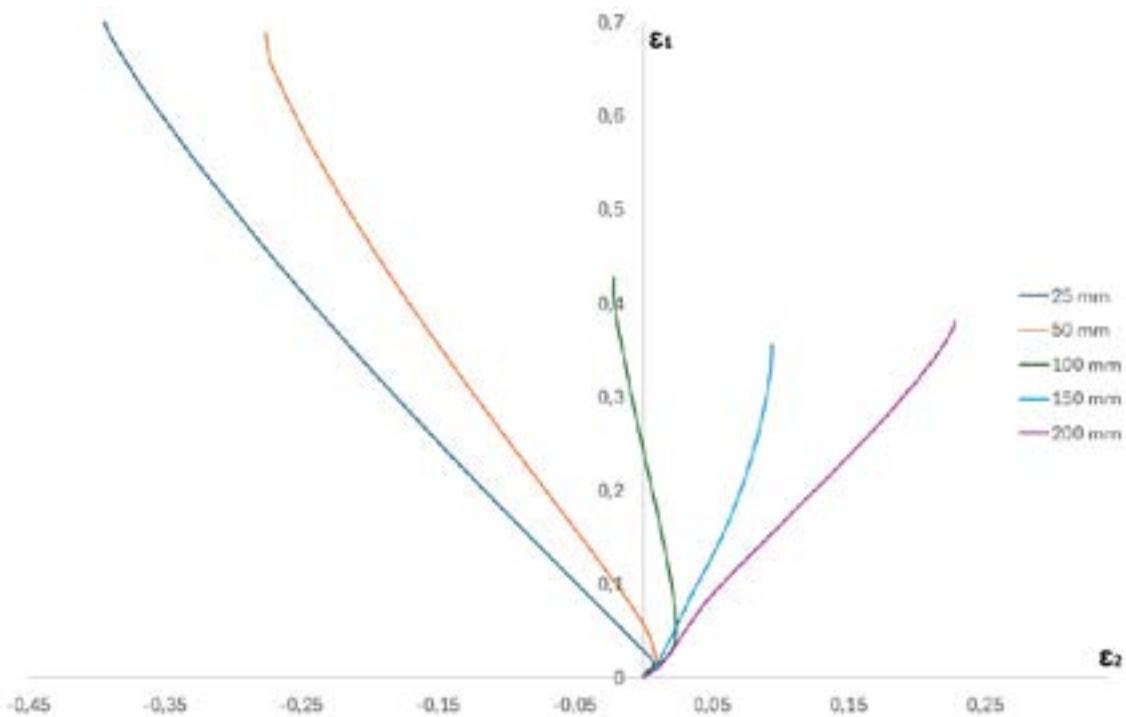


Figura 9: Trajetórias de deformação inerente ao corpo de prova Nakajima.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou a conformabilidade do substrato em aço após a aplicação de revestimento orgânico em linha de pintura de bobina. Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que:

- O ensaio Nakajima, mesmo realizado até a fratura, quando instrumentado com DIC e utilizando o algoritmo proposto em [14], conseguiu detectar adequadamente o início da estrição, e assim, possibilitando a construção da CLC.
- As trincas nos corpos de prova ocorreram somente na região central do domo, o que mostra uma deformação homogênea, resultado de uma boa lubrificação, bem como o formato adequado dos blanks.
- Foi constatado o efeito da superfície curva do corpo de prova Nakajima na trajetória de deformação, o que causou o deslocamento do CLC₀ para o lado direito, em direção à região do estiramento biaxial.
- Por fim, pode-se também comparar o valor obtido de CLC₀= 0,32 para o DX54D com revestimento polimérico, com o valor previsto pelo modelo de Keeler, CLC₀= 0,37. Encontrou-se uma redução de 13%, o que é aceitável dada a natureza da curva prevista pelo modelo Keeler, à fratura, e de possíveis efeitos na microestrutura do DX54D após o processo de aplicação do revestimento orgânico, em especial o processo térmico de cura do revestimento.

REFERÊNCIAS

- [1] HUANG, Y. On Coating Durability of Polymer Coated Sheet Metal Under Plastic Deformation. Ph.D., Mechanical Engineering, - Texas A&M University, College Station, Texas, 2010.
- [2] HEINZEL, H.; RAMEZANI, M.; NEITZERT, T. Experimental Investigation of the Formability of Organic Coated Steel Sheet Metal. In: 43rd Proceedings of the North American Manufacturing Research, Volume 30, 2015. p. 1–12.
- [3] VAYEDA R.; WANG J. Adhesion of coatings to sheet metal under plastic deformation. International Journal of Adhesion and Adhesives 2007; 27(6): 480-492.
- [4] COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Qualidade do Ar. 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>. Acesso em 3 fev. 2024.
- [5] PUROHIT, Z. Performance of Polymer Coatings Under Forming Conditions. M.S., Mechanical Engineering, Texas A&M University, College Station, Texas, 2010
- [6] SON, Y.; LEE, KO, D.; KIM, B. Prediction of Delamination and Tearing During Stamping of Polymer-Coated Metal Sheet. In: Journal of Materials Processing Technology, Volume 220, 2015, p.146(11).
- [7] JEON Y.P.; SEO H.Y.; KIM J.D.; KANG C.G. Experimental analysis of coating layer behavior of Al-Si coated boron steel in a hot bending process for IT applications. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2013; 67(5-8): 1693-1700.
- [8] LI H, CHEN J.; YANG J. Experimental and numerical investigation of laminated steel sheet in V bending process considering nonlinear visco-elasticity of polymer layer. Journal of Materials Processing Technology 2012; 212 (1): 36-45.
- [9] BEHRENS, B.A.; HUBNER, S.; GAEBEL, C. M. Forming-induced Gloss Reduction of Coil Coated Sheets for White Goods. In: Procedia Engineering, Volume 183, 2017. p. 107–112.
- [10] LISIECKA-GRACA, P.; KWIECIEN, M.; MADEJ, L.; MAJTA, J.; MUSZKA, K. Application of the DIC System to Build a Forming Limit Diagram (FLD) of Multilayer Materials. Key Engineering Materials 2022; v. 926, p. 963-969.
- [11] FARIA, A.; Avaliação do Processamento por Atrito Linear em Chapas da Liga de Titânio Ti-6Al-4V, Tese de doutorado, Engenharia Mecânica, USP, São Paulo, 2015.
- [12] FLORES, P. Development of Experimental Equipment and Identification Procedures for Sheet Metal Constitutive Laws. PhD Thesis, University of Liege, Liege, 2005.

- [13] ORTEU, J.-J. 3-D computer vision in experimental mechanics. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 47, n. 3-4, p. 282–291, 2009.
- [14] VOLK, W., HORA, P. New algorithm for a robust user-independent evaluation of beginning instability for the experimental FLC determination. *International Journal of Material Forming*, 2011, Volume 4, p. 339-346.
- [15] PAUL, S. K. Controlling factors of forming limit curve: A review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* 2, 2021.
- [16] KOHL, D.; MERKLEIN, M. Alternative characterization method for the failure behavior of sheet metals derived from Nakajima test. *IDDRG 2021*.
- [17] GLOBAL MARKET INSIGHTS. Relatório Mercado Global de Bobinas de Aço com Revestimento PET. 2024.
- [18] CHEN, W.; SONG, H.; CHEN, S.; XU, Y.; DENG, S.; CAI, Z.; PEI, X.; ZHANG, S. A New Phenomenological Model to Predict Forming Limit Curves from Tensile Properties for Hot-Rolled Steel Sheets. *Metals 2024*.