

COBEF2017-1165 - IDENTIFICAÇÃO POR PERFIL DE MICRODUREZA DA INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DE LAMINAÇÃO DE CHAPAS NA LOCALIZAÇÃO DA LINHA NEUTRA EM PROCESSOS DE DOBRA DO AÇO SAE 304

Rhafaél Beppler, rhafa_beppler@hotmail.com¹
Priscila Eduarda Kraft Lopes, priscila.kraft@gmail.com²
Alexandre Galiotto, galiotto@ifsc.edu.br²
Fabiano Cardoso, fabianoa.c@hotmail.com²

¹Universidade do Estado de Santa Catarina – Centro de Ciências Tecnológicas, Rua Paulo Malschitzki, 200 - Zona Industrial Norte, Joinville - SC, 89219-710.

²Instituto Federal de Santa Catarina – Geraldo Werninghaus, Rua dos imigrantes, 341 - Rau, Jaraguá do Sul - SC, 89254-340.

Resumo: O presente trabalho discute a localização da linha neutra em amostras dobradas de aço SAE 304 tendo como método a utilização de perfil de microdureza Vickers. Para tal, são utilizadas amostras com três diferentes direções de laminação: 0°, 45° e 90°, onde os ângulos são respectivos à posição do punção. As amostras foram dobradas em três ângulos: 60°, 90° e 120°. Foram produzidas curvas de microdureza da seção transversal a dobra, cuja diferença de microdureza identifica a localização da linha neutra. Os resultados obtidos foram comparados entre si e também com o cálculo estabelecido pela norma DIN 6935: 2010. Foi identificado que tanto a direção de laminação quanto o ângulo de dobramento interferem na posição da linha neutra, sendo a direção de laminação a principal influência. Foi identificado que a utilização de tal método é aplicável para a identificação da linha neutra, bem como que os resultados foram aproximados ao fornecido pelo cálculo, salvo os fatores responsáveis pela alteração do resultado final, o que pressupõe que o ângulo de dobramento e a direção de laminação devem ser considerados no cálculo.

Palavras-chave: dobramento, linha neutra, microdureza, direção de laminação, ângulo de dobramento.

1. INTRODUÇÃO

O processo de conformação por dobramento é um dos mais utilizados na indústria atualmente, por garantir forma final ao produto e boa reprodutibilidade. Para a utilização do processo, algumas ferramentas são requeridas, entre elas o punção e a matriz, responsáveis por dar forma a peça final. Entretanto, essas ferramentas não são utilizáveis para todos os materiais, já que necessitam de projeto e desenvolvimento adequado de acordo com as características do material a ser dobrado, atendendo a conformidade da norma DIN 6935: 2010.

A norma também prevê fatores de correção para as dimensões nas peças finais. Tais fatores são responsáveis por corrigir as deformações que o material sofre durante o processo, como por exemplo, o retorno elástico, o encruamento e a deformação plástica na região conformada e a posição final da linha neutra da chapa conformada. Esses fatores levam em consideração a espessura da chapa, raio de punção e ângulo de dobramento da peça final.

Porém, para a correção da linha neutra, a norma DIN 6935:2010 não prevê a influência do ângulo de dobramento, considerando somente a espessura da chapa e o raio de dobramento, conforme Eq. (1) e a posição da linha neutra conforme Eq. (2).

$$k = 0,65 + \frac{1}{2} * \log \frac{r}{s} \quad (1)$$

$$y = \frac{s}{2} * k \quad (2)$$

Onde:

k= fator de correção da linha neutra

r= raio do punção

s= espessura da chapa

y= posição da linha neutra na chapa

A não consideração do ângulo de dobramento pode representar um erro na definição da posição da linha neutra, interferindo nas demais correções, já que sua posição interfere na espessura das regiões comprimida e tracionada, conforme Sales (2013) descreve. O mesmo relata também que a linha neutra pode ser determinada pelo fator de encruamento do material, já que na linha neutra não é esperada nenhuma deformação plástica, ou seja, não será observada região comprimida e nem tracionada. Rocha (2006) utiliza do ensaio de microdureza para a identificação da linha neutra, pois o aumento da microdureza é resultado do encruamento do material, buscando a confirmação da menor dureza na região

onde o cálculo da norma prevê a localização da linha neutra. O mesmo autor também estudou o efeito da anisotropia de chapas nas propriedades mecânicas, identificando que altera levemente os valores, no entanto, desconsiderando seu efeito.

O objetivo do presente trabalho é identificar a posição da linha neutra através de perfil de microdureza, onde o valor de menor dureza é apontado como sendo a posição da linha neutra, analisando a influência do ângulo de dobramento e da direção de laminação em chapa de aço inoxidável SAE 304 com espessura de 4,18mm, após o processo de dobramento em “V” com punção de raio 4,18mm, o que mantém fixo o valor de correção da linha neutra.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As amostras utilizadas foram extraídas de chapas de aço inoxidável SAE 304 laminadas com espessura de 4,18mm. As amostras foram cortadas por eletroerosão a fio, garantindo o máximo aproveitamento das chapas, além de garantir a orientação das amostras quanto ao sentido de laminação. Foram cortadas quatro amostras para cada sentido de laminação, sendo eles a 0°, 45° e 90°, sendo este ângulo respectivo a direção da dobra, conforme Fig. (1).

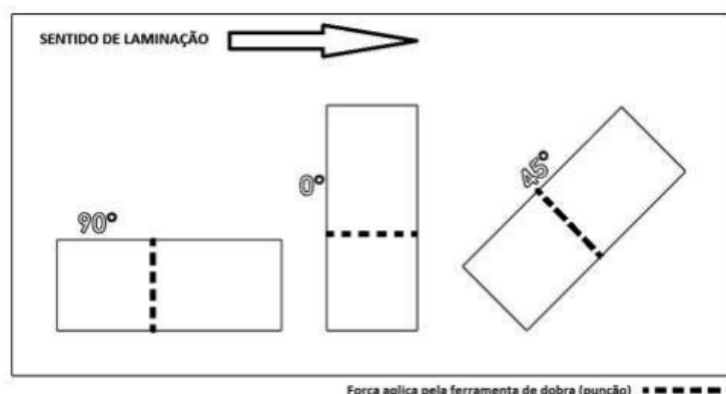


Figura 1. Orientação do corte das amostras quanto ao sentido de laminação.

As amostras foram cortadas com 50mm de comprimento e 20mm de largura, possibilitando seu alojamento na matriz de dobra utilizada. A matriz de dobra possui quatro aberturas, cada qual com um ângulo de abertura. Tal matriz possibilita a dobra nos respectivos ângulos: 60°, 90° e 120° de abertura. No total, foram utilizadas 9 amostras para o experimento, conforme Tab. (1).

Tabela 1. Relação das amostras utilizadas.

Ângulo de dobra	Direção de laminação		
60°	0°	45°	90°
90°	0°	45°	90°
120°	0°	45°	90°

As amostras foram dobradas em uma máquina de ensaios universal EMIC DL10000, a qual foi acoplado um punção cujo raio de ponta é igual a espessura da chapa dobrada (4,18mm), atendendo ao mínimo especificado na norma DIN 6935:2010. A matriz foi posicionada com a abertura utilizada no centro do equipamento, sendo que o punção atinja o centro da chapa, conforme indicado na Fig. (1).

As amostras foram dobradas aleatoriamente, minimizando o efeito do ambiente e erros do equipamento de ensaio. Após cada dobramento as amostras foram retiradas e identificadas. O método de dobramento utilizado foi o de dobramento a fundo sem carga final, onde o punção é responsável por deslocar a amostra até o fundo da matriz, dando forma a amostra ensaiada.

Após o processo de dobramento das amostras, partiu-se para o condicionamento da superfície através da preparação metalográfica. Tal procedimento é importante para a medição da microdureza Vickers. As amostras foram lixadas em lixadeiras rotativas, na sequência de lixas: 50, 120, 240, 320, 400, 600 e 1200. Posteriormente foi realizado o polimento das amostras e ataque eletrolítico com solução saturada de ácido oxálico, possibilitando a identificação microestrutural. A superfície preparada foi aquela perpendicular à direção de dobra, conforme identificado na Fig. (2).



Figura 2. Amostras dobradas, de cima para baixo, dobradas a 120°, 90°, 60° e 30°, com a face analisada.

Com as amostras preparadas e atacadas, foi realizada a medição da microdureza. Tal procedimento foi realizado sob a superfície polida, sendo identificada a região da amostra que teve contato com o punção. Com a região devidamente identificada e posicionada, foi iniciado o processo de medição.

A medição da microdureza foi realizada em microdurômetro Vickers, seguindo método proposto por Sales (2013), com indentador piramidal de base quadrada de diamante. A carga utilizada foi de 200gf. Tal método permite a medição da dureza em uma pequena área, possibilitando várias medições ao longo da espessura da chapa. As indentações foram realizadas com uma distância entre centros de 10µm, sendo realizadas ao longo de toda a seção transversal da chapa, paralelo ao posicionamento do punção, no centro da dobra. Para cada posição foram realizadas três medições, sendo indicado no gráfico o valor médio da microdureza.

Os dados foram processados analisados em software específico de planilha e também foi realizada uma análise fatorial dos dados (ANOVA) e calculada a equação de regressão quadrática.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme as Eq. (1) e (2), os valores de linha neutra, para todos os ângulos de dobramento devem corresponder à:

$$k = 0,65 + \frac{1}{2} * \log \frac{4,18}{4,18} \quad (1)$$

$$k = 0,65 \quad (1)$$

$$y = \frac{4,18}{2} * 0,65 \quad (2)$$

$$y = 1,3585 \text{ mm} \quad (2)$$

De acordo com as equações acima, este valor não se altera com o ângulo de dobramento da amostra, nem tão pouco com a direção de laminação da chapa para o processo de dobramento, onde a linha neutra se localiza aproximadamente a 1,36mm da superfície que entra em contato com o punção, sendo a região tracionada maior em área do que a região comprimida devido à resistência a compressão ser superior à tração.

A partir deste valor, iniciou-se a análise da microdureza da seção dobrada da amostra. Para isso utilizou-se de um perfil de microdureza em função da espessura da chapa, partindo sempre da região comprimida em direção a região tracionada, ou seja, da região onde o punção está em contato para a região que ficou em contato com a matriz. Para cada amostra se construiu um perfil de microdureza, totalizando doze condições diferentes.

Para uma melhor visualização, as curvas foram separadas e agrupadas em condições específicas, facilitando o entendimento e discussão dos dados.

Na Figura 3, são apresentados os valores para o dobramento a 60°. Para esse ângulo de dobramento, foi observado que a direção de laminação a 90° foi a que apresentou resultado mais próximo do calculado. Entretanto, para a condição laminada a 45°, houve uma pequena região de transição, a qual torna a posição da linha neutra semelhante a condição a 90°. Para a amostra laminada a 00°, houve uma diferença considerável de aproximadamente 0,4mm na localização da linha neutra.

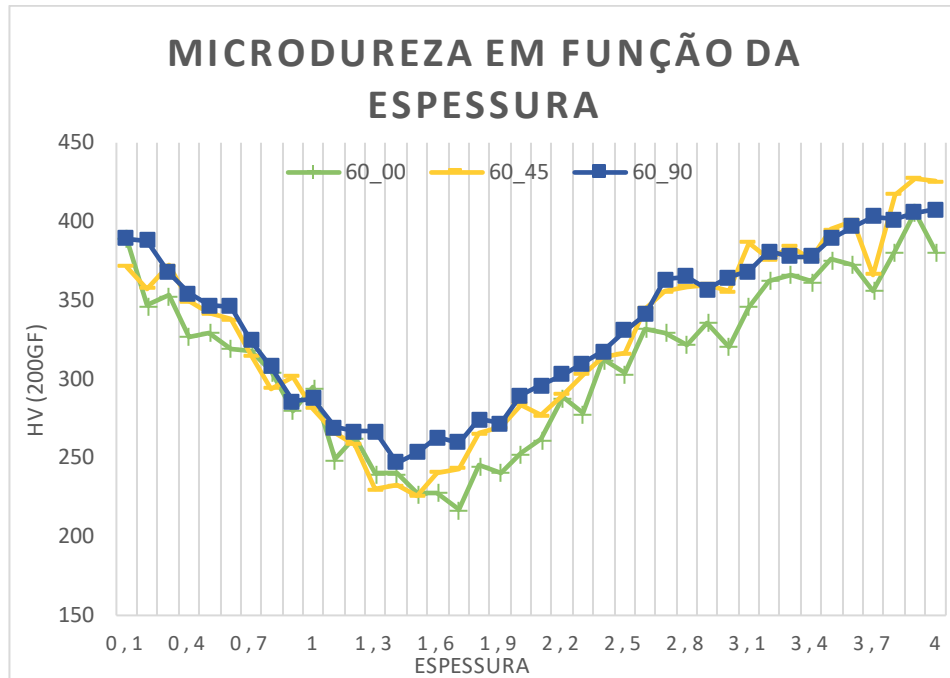


Figura 3. Perfil de microdureza para condições dobradas a 90°.

A Figura 4 apresenta as curvas para as amostras dobradas a 90°. Semelhante ao dobramento a 60°, a condição laminada a 90° foi a que se manteve mais aproximada do valor calculado, seguida da condição laminada a 45°. A condição laminada a 00° apresentou uma variação aproximada de 0,4mm na posição da linha neutra, deslocando a mesma para a região tracionada.

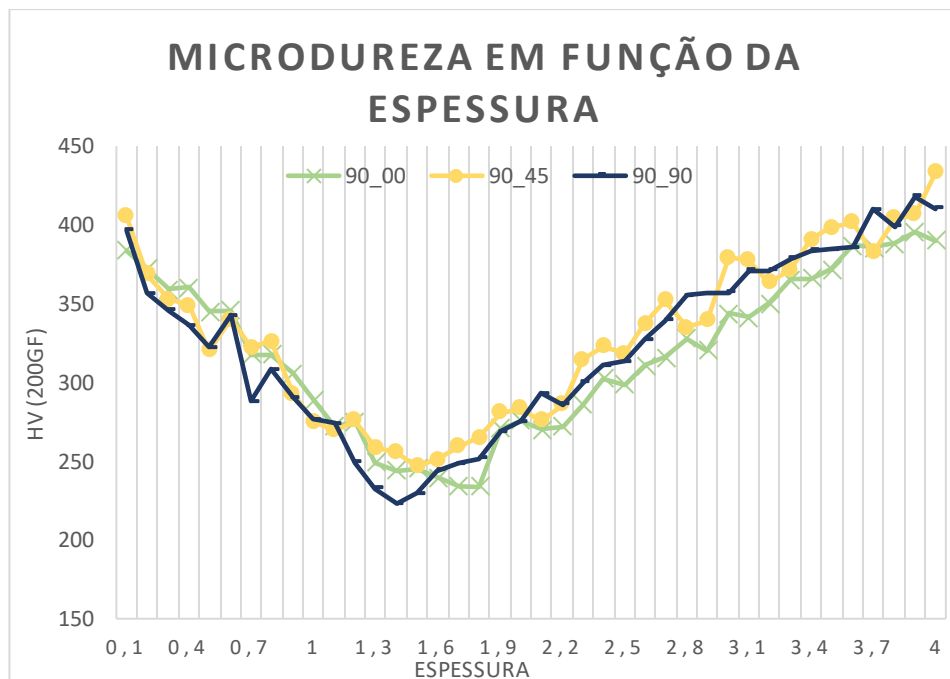


Figura 4. Perfil de microdureza para condições dobradas a 60°.

As curvas para as amostras dobradas a 120° são apresentadas na Fig. (5). Nesta condição, a posição da linha neutra para todas as curvas sofreu uma variação considerável de 0,3mm em relação ao valor calculado. Novamente a condição que se manteve com o valor mais aproximado foi a laminada a 45°, semelhante as amostras dobradas a 30°, seguida da amostra laminada a 90° com leve variação. A amostra laminada a 00° teve a posição da linha neutra próxima ao centro da amostra, ficando localizada a 1,9mm de espessura, a partir da região comprimida.

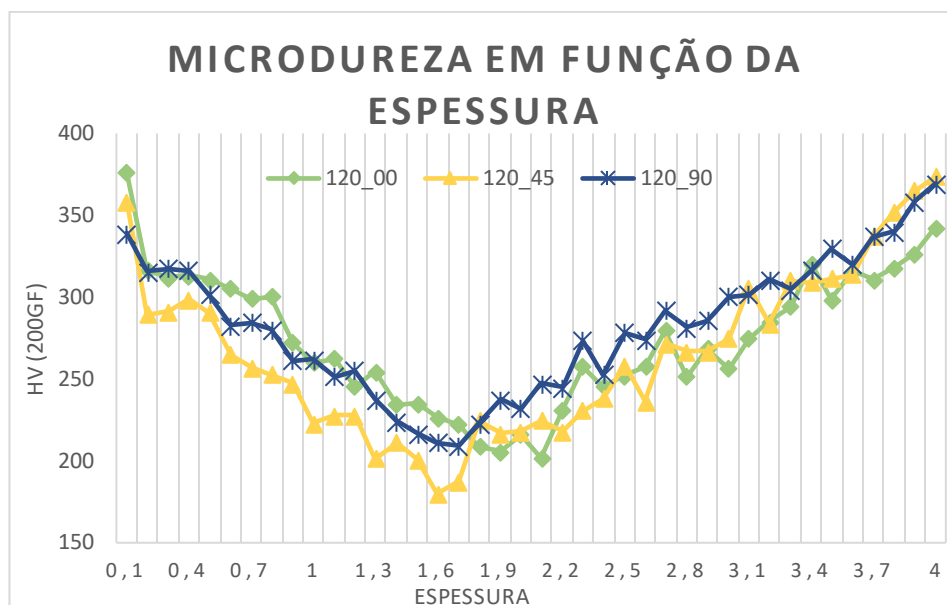


Figura 5. Perfil de microdureza para condições dobradas a 120°.

Agora analisando as condições de mesma direção de laminação, são apresentadas as curvas para as amostras dobradas nos três ângulos diferentes. A Fig. (6) apresenta as curvas para as amostras laminadas a 00°, onde é possível observar a variação na posição da linha neutra em função do ângulo de dobramento. Para as condições dobradas a 60° e 90°, a variação foi pequena, assim como a variação na dureza. Porém, para a amostra dobrada a 120°, a posição da linha neutra é afetada pelo ângulo de dobramento, diferindo do valor calculado. Assim como a posição é afetada, a dureza da amostra também foi menor nessa condição, isso devido ao fato desta amostra apresentar menor encruamento.

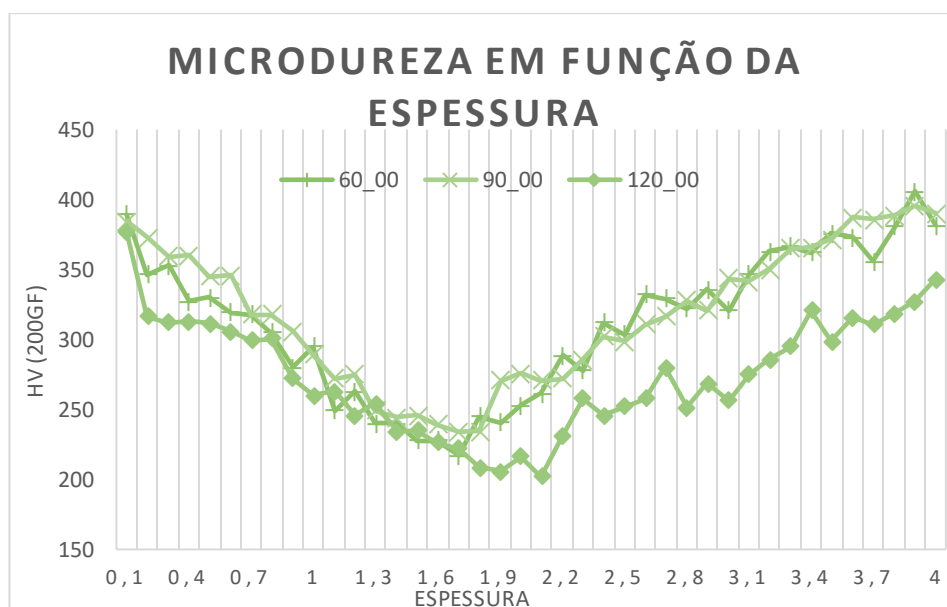


Figura 6. Perfil de microdureza para condições laminadas a 0°.

Observando a Fig. (7), para as amostras laminadas a 45°, observa-se comportamento semelhante ao citado anteriormente, onde os ângulos de dobramento 60° e 90° não afetam significativamente a posição da linha neutra e o ângulo de 120° afeta o posicionamento, deslocando-o para a região central da amostra. O mesmo ocorre com a dureza das amostras, onde a amostra dobrada a 120° apresenta a menor dureza na seção transversal em consequência do menor encruamento.

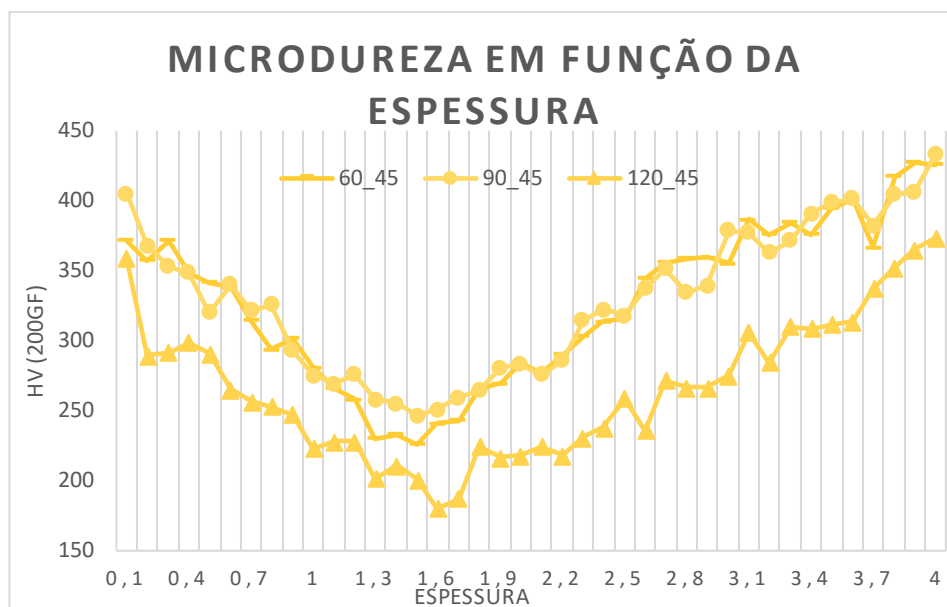


Figura 7. Perfil de microdureza para condições laminadas a 45°.

A Figura 8 apresenta as curvas para as amostras laminadas a 90°. Semelhantes as anteriores, os ângulos de dobramento até 90° não afetam significativamente a posição da linha neutra e o ângulo de 120° afeta, deslocando a posição para a região central da amostra, porém com menor diferença, apresentando-se como a direção menos instável. Observando a dureza, a amostra dobrada a 120° apresenta menor dureza na seção transversal, resultado semelhante aos anteriores, porém apresenta menor disparidade nos valores de dureza, ou seja, os valores para todos os ângulos de dobramento são semelhantes.

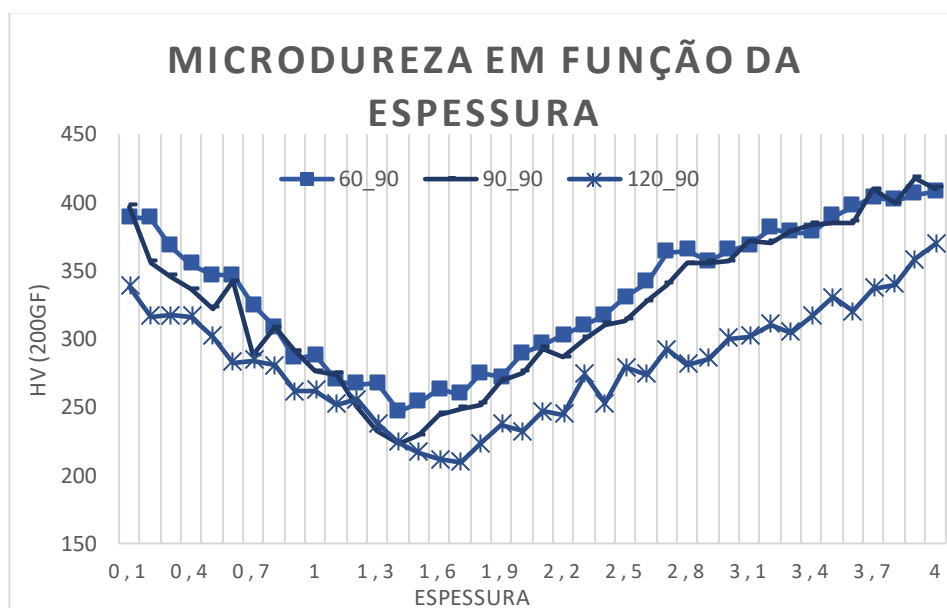


Figura 8. Perfil de microdureza para condições laminadas a 90°.

Observando as diversas condições, nota-se que tanto a direção de laminação quanto o ângulo de dobramento afetam a posição da linha neutra. Outro fator importante a se discutir é a diferença de dureza nas amostras. Observou-se que as amostras laminadas a 45° foram as que apresentaram maior dureza, quando comparadas as demais condições. Já as amostras laminadas a 00° e 90° apresentaram durezas inferiores a laminada a 45° e valores mais aproximados entre os diferentes ângulos de dobramento, especialmente nas amostras dobradas a 120°. Isso demonstra que a direção de laminação interfere na dureza da amostra e possivelmente na força de dobramento das amostras.

Ao se analisar os dados estatisticamente, foi feito análise de variância (ANOVA) para identificar se estes resultados observados são significantes, para um índice de significância de 5%. Os dados são apresentados na Tab. (2).

Tabela 2. Tabela ANOVA.

Fator	Soma Quadrados	Grau de liberdade	F	p
Ângulo dobramento (L)	0,106667	1	11,18447	0,044245
Ângulo dobramento (Q)	0,035556	1	3,72816	0,149043
Direção de laminação (L)	0,166667	1	17,47573	0,024939
Direção de laminação (Q)	0,035556	1	3,72816	0,149043
1L*2L	0,0025	1	0,26214	0,643964
Erro	0,028611	3		
Soma dos quadrados total	0,375556	8		

Conforme é observado, tanto o ângulo de dobramento quanto a Direção de laminação interferem estatisticamente na posição da linha neutra. Já a interação entre eles não é significativa, assim como os fatores quadráticos. O índice de explicação do experimento (R^2) foi de 0,92382.

A Figura 9 apresenta o gráfico de pareto para os fatores analisados. Ela ilustra graficamente os fatores que interferem no resultado da posição da linha neutra.

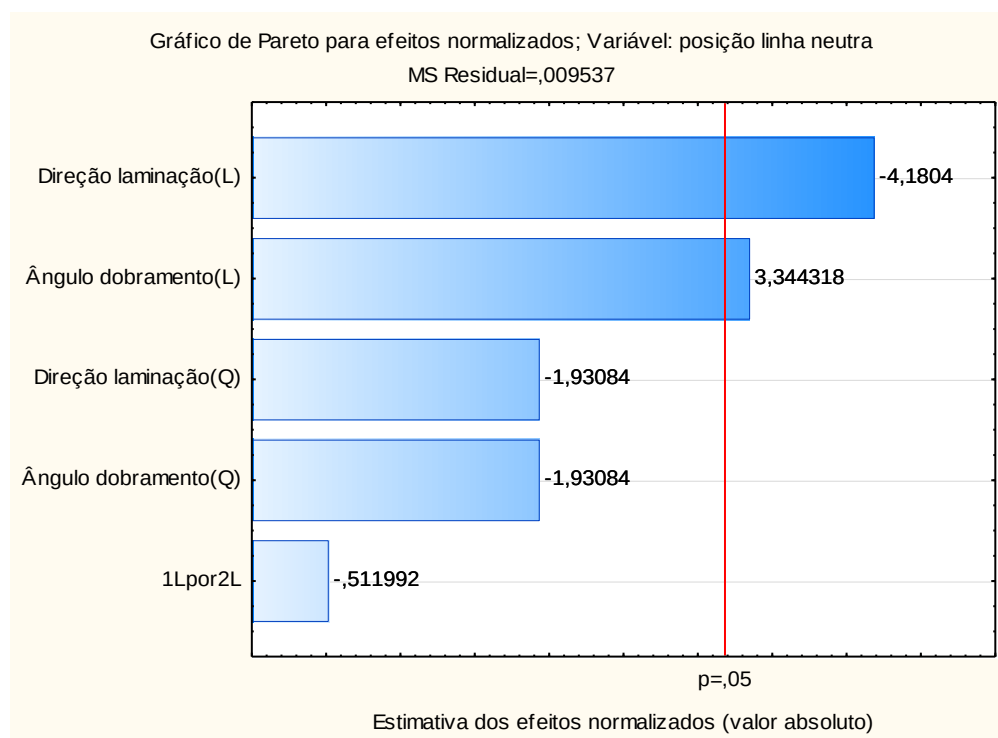


Figura 9. Gráfico de pareto para os fatores

Já a Figura 10 apresenta um gráfico de superfície para todos os fatores encontrados, onde é possível observar que somente para baixos ângulos de dobramento é possível obter a linha neutra próxima ao valor indicado pela equação da norma. Ao se calcular os coeficientes de regressão, é possível identificar uma equação quadrática que leve em consideração tanto o ângulo de dobramento quanto a direção de laminação no cálculo da posição da linha neutra. Essa equação é apresentada a seguir:

$$z = 15.10^{-5}x^2 + 7.10^{-5}y^2 - 2.10^{-5}xy - 7,96.10^{-3}y - 21,39.10^{-3}x + 2,46945; \quad (3)$$

onde:

x= ângulo de dobramento

y= direção de laminação

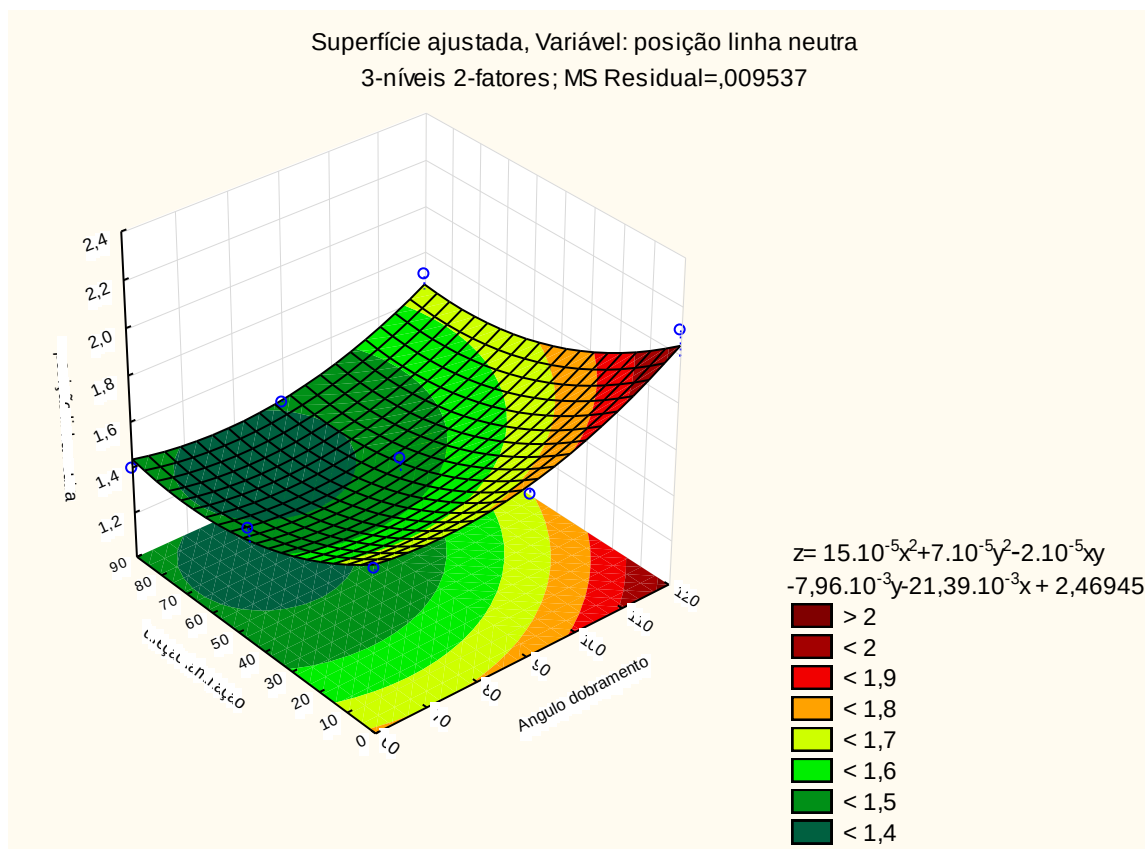


Figura 10. Gráfico de superfície para a posição da linha neutra.

A Tabela (3) apresenta os valores observados experimentalmente e os valores calculados pela equação quadrática. É possível observar que os valores têm leve discrepância entre os resultados, sendo possível usá-la para a identificação da posição.

Tabela 3. Relação entre valores medidos e calculados pela equação de regressão quadrática.

Ângulo de dobramento	Direção de laminação	Valor experimental (mm)	Valor calculado (mm)
60°	0°	1,7	1,72605
60°	45°	1,5	1,4556
60°	90°	1,4	1,46865
90°	0°	1,7	1,75935
90°	45°	1,5	1,4619
90°	90°	1,4	1,44795
120°	0°	2,1	2,06265
120°	45°	1,6	1,7382
120°	90°	1,7	1,69725

4. CONCLUSÃO

Com os resultados do trabalho, conclui-se que:

- Tanto a direção de laminação quanto o ângulo de dobramento interferem na posição da linha neutra;
- As amostras dobradas a 30°, 60° e 90° apresentaram resultados semelhantes quanto a posição da linha neutra, sendo que para estes ângulos o valor calculado aproxima-se do encontrado;
- O ângulo de 120° de dobramento, interfere significativamente na posição da linha neutra, deslocando-a para o centro da amostra;
- Os resultados mais aproximados aos calculados foram obtidos com amostras laminadas a 90°, sendo que teve uma diferença insignificante ao valor calculado, para as condições dobradas a 30°, 60° e 90°. Já para o dobramento a 120°, foi a condição que apresentou menor disparidade com relação ao valor calculado, diferindo 0,4mm;
- Amostras laminadas a 45° apresentaram maior dureza na seção transversal, além de apresentar diferença significativa na dureza da amostra dobrada a 120°, deixando sua dureza menor que as demais;

- A identificação da linha neutra através da microdureza é possível e garante grande precisão com relação ao posicionamento da linha neutra.
- Com o uso de ANOVA, foi possível comprovar estatisticamente que os fatores analisados interferem na posição da linha neutra. Também foi possível montar a equação que realmente indique a posição da linha neutra em função do ângulo de dobramento e da direção de laminação.

5. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao aluno já graduado Cléber José Pedroso pelas amostras doadas após o uso em seu trabalho de conclusão de curso. Agradecem também ao IFSC Geraldo Werninghaus pelo uso do laboratório de ensaios de materiais.

6. REFERÊNCIAS

- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 6935: Kaltabkanten und Kaltbiegen von Flacherzeugnissen aus Stahl, 2010.
- ROCHA, Marcio Roberto da, 2006, “Estudo da conformabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos 304n e 304h e suas correlações com as microestruturas obtidas.”, 154 f. Monografia (Especialização) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina.
- SALES, Valmir, 2013, “Análise do comportamento dos aços inoxidáveis AISI 304 e SAF 2205 em diferentes condições de dobramento.” 116 f. Dissertação - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

COBEF2017-1175 - IDENTIFICATION BY MICROHARDNESS PROFILE OF THE INFLUENCE OF THE SHEET ROLLING DIRECTION AT LOCATION OF THE NEUTRAL LINE IN SAE 304 STEEL BENDING PROCESSES

Rhafael Beppler, rhafa_beppler@hotmail.com¹
Priscila Eduarda Kraft Lopes, priscila.kraft@gmail.com²
Alexandre Galiotto, galiotto@ifsc.edu.br²
Fabiano Cardoso, fabianoa.c@hotmail.com²

¹State University of Santa Catarina – Center of technological sciences, Street Paulo Malschitzki, 200 – North Industrial Area, Joinville - SC, 89219-710.

²Federal Institute of Santa Catarina – Geraldo Werninghaus, Street of immigrants, 341 - Rau, Jaraguá do Sul - SC, 89254-340.

Abstract: *The present work discusses the location of the neutral line in folded samples of SAE 304 steel having as method the use of microhardness Vickers profile. For this, samples with three different rolling directions are used: 0°, 45° and 90°, where the angles are respective to the position of the punch. The samples were folded at three angles: 60°, 90° and 120°. Microhardness curves were produced from the cross-section to the fold, whose microhardness difference identifies the location of the neutral line. The results obtained were compared with each other and also with the calculation established by DIN 6935: 2010. It was identified that both the rolling direction and the angle of folding interfere in the position of the neutral line, with the rolling direction being the main influence. It was identified that the use of such method is applicable to the identification of the neutral line, as well as that the results were approximated to the one provided by the calculation, except for the factors responsible for the alteration of the final result, which presupposes that the angle of folding and the direction shall be taken into account in the calculation.*

Keywords: *bending, neutral line, microhardness, rolling direction, folding angle.*

COPYRIGHT

Authors are solely responsible for the content of the printed material included in their work