

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DOS LIMITES DE DEFORMAÇÃO DE UM AÇO LIVRE DE INTERSTICIAIS

Maria Carolina dos Santos Freitas, carol@metal.eeimvr.uff.br¹

Luciano Pessanha Moreira, luciano.moreira@metal.eeimvr.uff.br¹

Andersan dos Santos Paula, andersan@metal.eeimvr.uff.br¹

Luiz Carlos de Andrade Vieira, luiz@metal.eeimvr.uff.br^{1,2}

Ecy Cardoso Romão, ecy.romao@csn.com.br²

Renato Aguiar da Silva, renato.aguiar@csn.com.br²

¹Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense,
Av. dos Trabalhadores, CEP 27 255 125 Volta Redonda, RJ, Brazil.

²Centro Universitário de Volta Redonda, Fundação Oswaldo Aranha, Av. Paulo Erlei Alves Abrantes, nº 1325, CEP:
27240-560 Três Poços, Volta Redonda, RJ, Brazil.

Resumo: O conceito de curva limite de conformação (CLC) introduzido inicialmente por Keeler e Goodwin é um instrumento muito útil para avaliação do comportamento plástico de chapas. Este trabalho realiza a determinação experimental da CLC através do ensaio Nakazima. Primeiro, o comportamento plástico de um aço Livre de Intersticiais (LI) foi avaliado através de ensaios de tração uniaxial. Em seguida, o ensaio Nakazima foi realizado. A CLC foi então estabelecida adotando-se duas metodologias de análise de resultados. A primeira baseada nas deformações limites na estrição em uma região simétrica ao sítio da fratura. A segunda faz a tomada das medidas de deformações limites em pontos vizinhos à fratura. Os resultados das diferentes metodologias foram comparados e ambos apresentaram pontos com altos níveis de deformação para a condição de embutimento profundo.

Palavras-chave: Aço IF – Curva limite de conformação – Conformação de chapas.

1. INTRODUÇÃO

A estampagem é uma operação que permite obter peças de formas complexas por meio de deformação plástica de um esboço metálico. É um processo amplamente utilizado e produz uma grande diversidade de peças, como carrocerias de automóveis, utensílios de cozinha, embalagens metálicas, componentes mecânicos, entre outros. Neste sentido, faz-se necessário a compreensão do comportamento mecânico dos materiais para que se tenha sucesso neste processo de conformação mecânica.

Os ensaios de estampagem procuram avaliar as condições do esboço metálico para um determinado nível de deformações que a peça tenha sofrido evitando, deste modo, a falha do material, que é caracterizada pelo aparecimento de trincas, rugas, estrição ou até mesmo a ruptura do material. No caso de deformações, a curva limite de conformação (CLC) é uma representação geométrica que separa as regiões de sucesso e falha do material na conformação de chapas finas. Para fins de desenvolvimento tanto de produto quanto de processos a CLC deve então reproduzir condições bem próximas da realidade. A idéia de construir um diagrama de deformações que correspondem à ruptura de um material embutido em laboratório ou em peças reais surgiu nos anos 60 introduzida por Keeler (1965) e Goodwin (1968). Atualmente, existem muitos ensaios experimentais destinados à determinação da CLC, como a tração uniaxial e biaxial e os testes propostos por Swift, Fukui e Erichsen. A CLC é geralmente determinada experimentalmente com o auxílio de um ferramental simples empregando-se corpos de prova de diferentes larguras, conforme os métodos propostos originalmente por Nakazima (1968) e Marciniak (1967), nos quais o esboço é bloqueado em sua periferia e deformado por um punção hemisférico (Nakazima) ou de fundo plano (Marciniak).

É comum atribuir-se a CLC como uma propriedade intrínseca do material da chapa. Entretanto, variáveis como, por exemplo, aspectos tribológicos e reológicos, geometria do ferramental, espessura inicial da chapa metálica, entre outros fatores, dificultam a reprodutibilidade da CLC mesmo sob condições controladas de ensaios. Na verdade, flutuações destas variáveis podem afetar os níveis de deformações da curva limite de conformação. Por outro lado, existem diversas abordagens teóricas e numéricas para estimar os limites de conformabilidade de chapas metálicas e, portanto, reduzir etapas de tentativas e erros adotados comumente nas estamparias.

Este trabalho realiza a determinação experimental da CLC através do ensaio Nakazima (1968). Em um primeiro tempo, o comportamento plástico do material (aço Livre de Intersticiais (LI)) foi avaliado através de ensaios de tração uniaxial. Em um segundo tempo, o ensaio Nakazima foi realizado para dez diferentes larguras do corpo de prova. A depuração e análise dos resultados do ensaio Nakazima foi feita com o auxílio do software de análise de imagens ASAME. Luiz et al (2007) utilizou este mesmo software para determinação da CLC na estrição de um aço LI através do ensaio Nakazima e observou que os resultados se apresentaram de maneira mais “conservadora”, ou seja, mais realística quando comparados a resultados de soluções numéricas ou analíticas. No presente trabalho, a curva limite de conformação foi estabelecida por meio de duas metodologias distintas de análise de resultados. A primeira, baseada nas deformações limites na estrição em uma região simétrica a fratura. A segunda metodologia de análise de resultados faz a tomada das medidas de deformação limite em pontos vizinhos à fratura.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A caracterização experimental do comportamento plástico de chapas é de grande importância tanto do ponto de vista industrial como do ponto de vista científico. Atualmente, a redução de etapas de ajuste de ferramentas e esboços e, por conseguinte, do tempo de finalização de um estampo, é realizada com bases em experiências prévias. O ensaio Nakazima foi utilizado na determinação experimental da CLC, obtendo assim a conformabilidade de um aço Livre de Intersticiais (LI). Neste sentido, buscou-se avaliar o comportamento plástico deste material através de ensaios de tração uniaxial. Foram realizados ensaios em corpos de prova extraídos em 7 orientações angulares a partir da direção de laminação da chapa, a saber, 0, 15, 30, 45, 60, 75 e 90 graus. O ensaio de Nakazima foi realizado para 10 diferentes dimensões do corpo de prova, a saber, 200X200mm, 200X180mm, 200X170mm, 200X160mm, 200X150mm, 200X140mm, 200X120mm, 200X110mm, 200X100mm e 200X90mm (comprimento X largura). A depuração dos resultados do ensaio Nakazima foi realizada com o emprego de um sistema automático de aquisição de imagens digitais, ASAME, versão 4.1.

2.1 Material

O material adotado para realização dos ensaios foi processado pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e se caracteriza por um aço livre de átomos intersticiais (LI), laminado em chapas finas com espessura nominal de 0,7mm. A escolha deste tipo de aço se prende a sua alta capacidade de conformação a frio por possuir um baixo limite de escoamento, aliado a uma alta resistência à redução de espessura da chapa. Outra vantagem importante é que após o processamento suas propriedades permanecem estáveis, ou seja, este material não sofre “envelhecimento”. Os aços LI são comercializados em forma de chapas finas e têm utilização destacada nas indústrias automobilística e de eletrodomésticos.

2.1.1 Amostragem

Através do Centro de Pesquisas da CSN, uma bobina de aço LI foi selecionada na linha de produção da Usina Presidente Vargas em Volta Redonda, e disponibilizada para o fornecimento de amostragem representativa para o presente estudo. Tomando-se como referencial a direção de laminação, retirou-se de maneira contínua uma amostra de 8000mm (comprimento) x 1500mm (largura da chapa), conforme mostrado na Fig. 1, totalizando aproximadamente 12 m² de área de chapa. Foi tomada a região central da bobina do lote 793736-200 de modo a evitar as regiões mais heterogêneas, isto é, aquelas próximas da ponta ou cauda em relação à direção de laminação da chapa. A partir deste princípio, entende-se que variações de propriedades mecânicas têm maior significado em função das mudanças angulares para extração dos corpos de prova. Os corpos de prova empregados foram extraídos das amostras A, B, C, D. As amostras E até H, não utilizadas neste trabalho, foram reservadas para realização de futuros estudos.

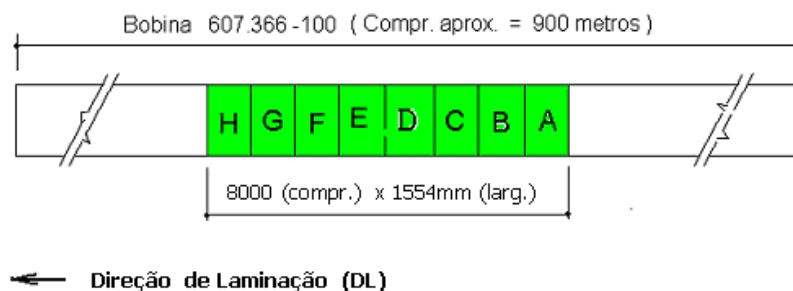


Figura 1 – Mapeamento para retirada de amostras na chapa de aço LI – CSN.

De um modo geral, as chapas apresentam variações de espessura e dureza, sobretudo no sentido transversal à direção de laminação. Para se avaliar estas diferenças foram realizados ensaios de controle de medidas de espessura e dureza superficial antes de proceder ao mapeamento para confecção de corpos de provas e também o ensaio de embutimento Erichsen. Estas medidas foram realizadas na amostra D, em tiras de 40mm para o controle de espessura e dureza e 90mm para o ensaio Erichsen. A partir das amostras A e B foram retirados os corpos de prova para os ensaios de tração. A partir da amostra A foram retirados os CPs com orientação de 0, 15, 30 e 45 graus em relação à direção de laminação. A partir da amostra B foram retirados os CPs na inclinação de 60, 75 e 90 graus. Os corpos de prova para o ensaio Nakazima foram retirados da amostra C.

2.1.2 Planejamento de experimentos

Para definição do número de corpos de provas do ensaio de tração, empregou-se um tratamento estatístico de modo a minimizar os erros associados aos resultados obtidos nos ensaios. Inicialmente, foi adotado o intervalo de confiança do modelo de pequenas amostras “Student t” (Spiegel, 1994), definido por:

$$IC(\%) = \bar{X} \pm t_c \frac{S}{\sqrt{N-1}} \quad (1)$$

no qual \bar{X} é a média aritmética dos valores experimentais obtidos a partir de N ensaios, S o desvio padrão correspondente e t_c o fator de distribuição para $v = N - 1$ graus de liberdade respectivamente. Durante a realização dos trabalhos experimentais, onde são utilizados instrumentos e equipamentos diversos, além do desenvolvimento de inúmeras atividades de forma manual, é possível ter-se algumas variações nos resultados finais para cada corpo de prova ensaiado. Assim sendo, adotou-se uma incerteza de 5% para o modelo escolhido, suficiente para compensar estas possíveis variações o que fornece seis corpos de prova para cada direção. Esta quantidade viabilizou a fabricação dos corpos de prova, execução dos ensaios e tratamento dos dados obtidos.

2.2 Métodos

2.2.1 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados no laboratório de ensaios mecânicos da Galvasud/CSN. Foi utilizada uma máquina de tração e compressão INSTRON modelo 5582, com capacidade de 100kN. Este equipamento possui dois extensômetros INSTRON modelo HRDE 2665-012 automatizados com acionamento pneumático, posicionados nos sentidos longitudinal e transversal. Os procedimentos quanto a realização dos ensaios seguiram a Norma ABNT NBR 6673 que determina uma velocidade de 3mm /min até atingir a deformação total de 3% e a partir deste ponto adota-se a velocidade de 10mm /min até o rompimento do corpo de prova. O sistema de aquisição de dados opera com o “software” Merlin, fornecido e instalado pela INSTRON.

Uma vez concluídos os ensaios de tração os dados foram organizados em planilhas do tipo Excel (MS Windows Office). Em um primeiro tempo, os limites de escoamento foram recalculados pelo método “off-set” a partir do diagrama tensão-deformação construído com os valores de força e alongamento resultantes de cada ensaio. Em seguida, os dados foram reorganizados em arquivos de texto para que fosse possível a manipulação destas informações em programas em linguagem Fortran 90 (Romão et al, 2005). O programa elaborado em linguagem Fortran foi fundamental para o cálculo dos parâmetros da lei de encruamento de Swift-Krupwoski, a saber, coeficiente de resistência (K), expoente de encruamento (n), pré-deformação verdadeira (ϵ_0) e deformação plástica verdadeira (ϵ_p), com rapidez e precisão desejadas.

2.2.2 Ensaio Nakazima

O ensaio Nakazima foi realizado no centro de pesquisas da CSN. Este ensaio é composto por um ferramental com um punção hemisférico, uma matriz e um prensa chapas. O punção é composto de aço SAE 4340 temperado e revenido com uma dureza de 53 RC. Suas dimensões podem ser visualizadas na Fig. 2. A matriz e o prende-chapas foram confeccionados com aço SAE 4140 temperado e revenido com uma dureza de 53 RC. Estes equipamentos foram acoplados a uma prensa AMSLER 100t.

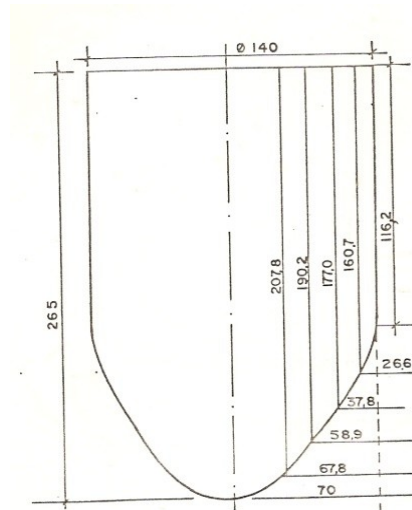


Figura 2 – Dimensões do punção empregado no ensaio Nakazima.

O grau de lubrificação é um fator de importância no levantamento da CLC. O lubrificante atua, através da variação do coeficiente de atrito entre punção e a chapa, no estado de tensões atuantes durante o ensaio. Foi utilizado óleo sintético como lubrificante entre punção e a chapa para todos os ensaios. Para os ensaios localizados no domínio de expansão foi utilizado um filme de PVC como lubrificante.

Para a etapa de fixação do corpo de prova na prensa, convém mencionar, que a carga a ser dada no prendechapa é função do lubrificante usado, do tipo do CP e da espessura da chapa.

Durante a execução do ensaio Nakazima uma válvula de fluxo permite o controle da velocidade de acionamento do punção de forma que a ruptura do corpo de prova não exceda o patamar que comprometa os resultados dos ensaios. Em outras palavras, a válvula permite que os corpos de prova não se partam por completo, de forma a apresentar uma leve trinca que determine o final do ensaio. O manômetro por sua vez fornece a leitura da carga exigida para a deformação do material (resistência da chapa metálica), o que permitiu durante os ensaios a percepção prévia do instante de ruptura do material. Isto era percebido quando, durante a estampagem, a carga parava de subir devido ao material sofrer estricção (relaxamento de tensões do material), fenômeno este que ocorre num último instante antes da ruptura. A depuração de resultados do ensaio Nakazima foi realizada com o emprego de um sistema automático de aquisição de imagens digitais, ASAME versão 4.1.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios de controle do aço LI de fabricação da CSN. Em seguida, são apresentados resultados da caracterização experimental. Em particular, as variações de propriedades plásticas no plano da chapa determinadas através de ensaios de tração uniaxial (limite de escoamento e anisotropia plástica). Finalmente, são apresentados os resultados do ensaio Nakazima com valores de deformação principal e secundária no plano da chapa.

3.1. Análises química e metalográfica

A análise química com amostras na forma de chapa, realizada no Centro de Pesquisas da CSN, foi executada via espectrometria de emissão ótica. Os resultados podem ser visualizados na Tab.1, onde é apresentada a composição química em % de peso referente aos elementos manganês, fósforo, silício, cobre, níquel, cromo, molibdênio, estanho, nióbio, boro, titânio e alumínio respectivamente. Os resultados da análise química via absorção atômica também realizada no centro de pesquisas da CSN estão mostrados na Tab. 2 onde são apresentadas as composições químicas em % de peso do carbono, enxofre e nitrogênio. Esta análise química foi realizada com as amostras na forma de limalha.

Tabela 1 – Composição química do aço LI –CSN (% peso).

Elementos (%)											
Mn	P	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Sn	Nb	B	Ti	Al
0,1176	0,014	0,0834	0,0184	0,007	0,0178	<0,0001	<0,001	0,0294	<0,0001	0,0384	0,0344

Tabela 2 – Composição química do aço LI –CSN (% peso).

Elementos (%)		
C	S	N
0,012	0,0061	0,0029

Os ensaios metalográficos foram realizados no Centro de Pesquisas da CSN segundo a norma PR120037 PR120038. Os resultados da análise da microestrutura mostraram que a estrutura do material é composta por grãos ferríticos poligonais.

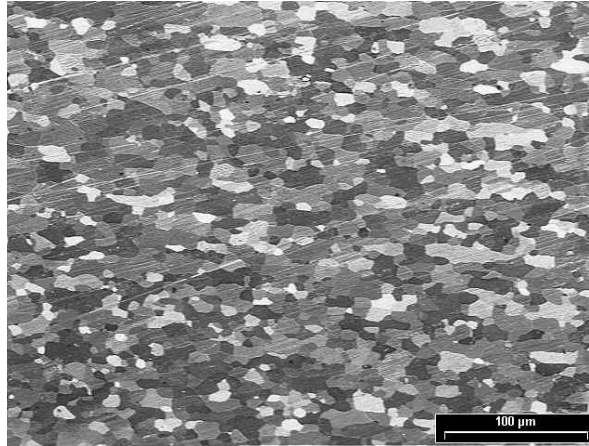


Figura 3 – Micrografia aço LI.

3.2. Análise de espessura, dureza e índice de embutimento Erichsen

A distribuição de espessura e dureza ao longo da largura está mostrada nas Figs. 4a e 4b. A partir dos valores de espessura é possível verificar maiores variações nas regiões próximas as bordas (~ 200mm) ao passo que a região central apresenta um valor médio de 0,665mm próximo à espessura nominal de 0,70mm. No ensaio de dureza utilizou-se uma máquina Wilson Instron Series 2000 segundo padrão PR 170457. Foram verificadas variações na dureza do material, vide Fig 4b, devido aos efeitos de borda provocados pelas deformações nos cilindros dos laminadores e principalmente pelo gradiente de temperatura que ocorre durante a redução de espessura. O ensaio Erichsen foi realizado segundo o padrão PR120153 e apresentou um índice de embutimento Erichsen médio de 11,25mm ao longo da largura da chapa.

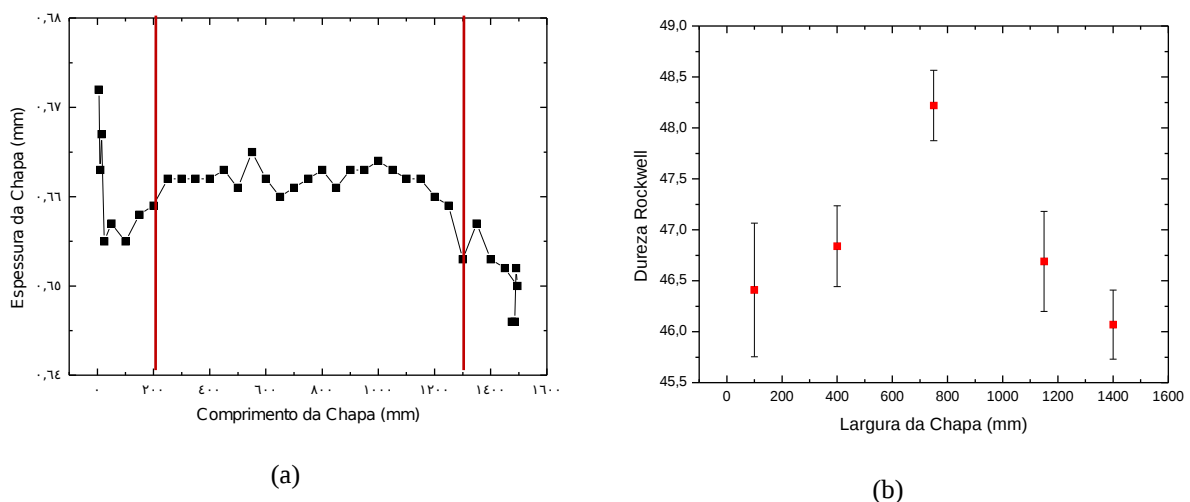


Figura 4 – Distribuição de espessura (a) e dureza (b) ao longo da largura da amostra D.

3.3. Ensaio de Tração

Buscou-se através dos ensaios de tração uniaxial avaliar as variações de propriedades no plano da chapa relacionadas com o encruamento e a anisotropia plástica, a saber, o limite de escoamento, determinado a partir do método

off-set, e o coeficiente de Lankford, determinado com auxílio do software Merlin no laboratório de ensaios mecânicos da Galvasud/CSN. A seguir a Tab. 3 resume os resultados experimentais obtidos nos ensaios de tração uniaxial para o aço LI-CSN. Nesta tabela, ϵ_t e σ_r são a deformação total uniforme e o limite de resistência ao passo que K, ϵ_0 e n são parâmetros da lei de encruamento de Swift-Krupkowski. Ainda, os caracteres em fonte normal representam os valores médios e os em itálico os valores do desvio padrão determinados a partir de 6 ensaios realizados para cada orientação angular α , em relação a direção de laminação. É possível verificar que os valores dos coeficientes de resistência K, expoente de encruamento, n, deformação total, ϵ_t e limite de resistência, σ_r , apresentam evoluções decrescentes entre as orientações angulares. O coeficiente de Lankford, R, apresentou evoluções crescentes entre os eixos de simetria ortotrópica de 0 e 90 graus. Enquanto que o limite de escoamento a 0,2% de deformação plástica, σ_e , teve um comportamento constante para as diferentes direções angulares.

Tabela 3 – Resultados ensaio de tração uniaxial.

α (graus)		σ_e (MPa)	R	ϵ_t (%)	σ_r (MPa)	K (MPa)	ϵ_0 (%)	n
0	Média	191,750	1,980	0,293	458,724	638,971	0,021	0,312
	<i>Desvio Padrão</i>	<i>8,598</i>	<i>0,091</i>	<i>0,004</i>	<i>6,171</i>	<i>8,605</i>	<i>0,006</i>	<i>0,010</i>
15	Média	179,714	1,800	0,287	450,056	626,046	0,015	0,299
	<i>Desvio Padrão</i>	<i>3,988</i>	<i>0,092</i>	<i>0,006</i>	<i>4,219</i>	<i>8,378</i>	<i>0,003</i>	<i>0,009</i>
30	Média	189,375	1,821	0,295	452,153	632,039	0,021	0,314
	<i>Desvio Padrão</i>	<i>8,518</i>	<i>0,058</i>	<i>0,004</i>	<i>2,580</i>	<i>5,185</i>	<i>0,005</i>	<i>0,009</i>
45	Média	190,667	2,045	0,287	444,773	622,232	0,046	0,305
	<i>Desvio Padrão</i>	<i>12,379</i>	<i>0,165</i>	<i>0,005</i>	<i>4,354</i>	<i>8,127</i>	<i>0,076</i>	<i>0,012</i>
60	Média	192,400	2,380	0,279	436,557	606,882	0,023	0,300
	<i>Desvio Padrão</i>	<i>10,469</i>	<i>0,029</i>	<i>0,005</i>	<i>2,414</i>	<i>4,032</i>	<i>0,005</i>	<i>0,008</i>
75	Média	192,625	2,433	0,272	443,484	613,794	0,021	0,291
	<i>Desvio Padrão</i>	<i>10,309</i>	<i>0,060</i>	<i>0,006</i>	<i>2,401</i>	<i>7,242</i>	<i>0,005</i>	<i>0,008</i>
90	Média	187,300	2,398	0,266	443,830	613,957	0,014	0,278
	<i>Desvio Padrão</i>	<i>3,164</i>	<i>0,123</i>	<i>0,005</i>	<i>3,426</i>	<i>7,375</i>	<i>0,001</i>	<i>0,006</i>

3.4. Ensaio Nakazima

Neste item são mostradas previsões de deformações limites para o aço LI através do ensaio Nakazima. Um esquema dos corpos de prova após a realização do ensaio pode ser visualizado na Fig 5.



Figura 5 – Corpos de prova deformados através do ensaio Nakazima

Este ensaio propõe um total de 18 corpos de prova com a largura variando desde 40 até 200mm, todos com 200mm de comprimento. A partir desta configuração de ensaio, tomando-se, porém, um número reduzido de corpos de prova foi obtida a curva limite de conformação por meio de duas metodologias distintas de análise de resultados. A primeira faz a previsão das deformações limites na estricção, instante precedente a fratura do material, a partir de pontos simétricos a fratura. Para isto as medidas de deformações foram tiradas em uma região simétrica a região que sofreu a fratura, conforme mostrado na Fig. 6.

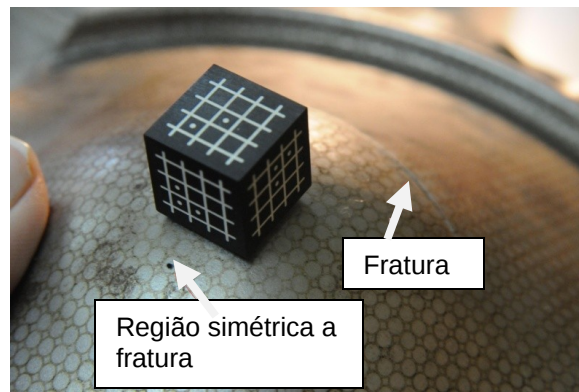


Figura 6 – Região da fratura e região simétrica a fratura.

Os pontos obtidos a partir desta metodologia de análise de medidas formam a curva limite de conformação de pontos simétricos a fratura, doravante, CLC_{SF} . Os resultados desta análise podem ser visualizados na Fig 7. apresentando altos níveis de deformação para a condição de estampagem, onde a deformação principal chegou a 0,52. Em contrapartida, para o lado direito da curva, o qual representa a condição de estiramento, o nível máximo de deformação atingido não foi tão elevado. A deformação principal chegou a 0,25 e a deformação secundária a 0,06. Este fato apontou uma dificuldade característica deste tipo de ensaio em se atingir um estado de deformação biaxial simétrica, alcançando apenas pequenos níveis de deformação secundária.

A explicação para esta diferença nos níveis de deformações atingidas para o embutimento profundo e para o estiramento se encontra na relação largura-comprimento dos corpos de prova. Como o embutimento profundo é um modo de deformação que permite certo escorregamento da chapa durante o embutimento, à medida que se reduzia a largura dos corpos de prova se diminuía conseqüentemente a ação do freio de estampagem, que tem como objetivo prender o material circunferencialmente em torno do punção, impedindo o escorregamento da chapa. Desta forma, uma porção lateral dos copos de prova mais estreitos que o diâmetro do freio de estampagem oferecia certa liberdade para o material se deformar, tendendo a promover um esforço uniaxial de tração, gerando assim um maior alongamento do corpo de prova no sentido do comprimento e uma redução na largura. Isto ocasionou elipses mais alongadas (maior deformação ϵ_1) e estreitas (deformação negativa ϵ_2). Assim sendo, quanto menor a largura dos corpos de prova utilizados menores eram as deformações ϵ_2 obtidas, fato este que permitiu a obtenção de todo o perfil da CLC para o embutimento profundo. Em contrapartida, o modo de deformação por estiramento era limitado em termos do número de corpos de prova possíveis de serem utilizados. Isto porque a partir de certa largura, acima de 125mm, o freio de estampagem já atuava em todo o contorno do copo formado no embutimento, o que mantinha a chapa presa em todos os sentidos de deformação, gerando um estado biaxial de tensão. A restrição do ensaio, porém, em se obter pontos com maiores níveis de deformações para ϵ_2 , se concentrou no fato de que a utilização de corpos de prova maiores não resultaria em maiores deformações, ao passo que estando o freio de estampagem atuando em todo o contorno do punção, a condição necessária para promover o estiramento já estava atendida, de forma que a porção excedente de material em nada influenciaria. Sendo assim, uma possível solução para se obter um maior perfil da CLC no estiramento, seria a utilização de um lubrificante (filme de poliuretano) que diminui o atrito entre o punção e a chapa, aumentando a conformabilidade do material e, conseqüentemente, as deformações ϵ_1 e ϵ_2 que geram a CLC.

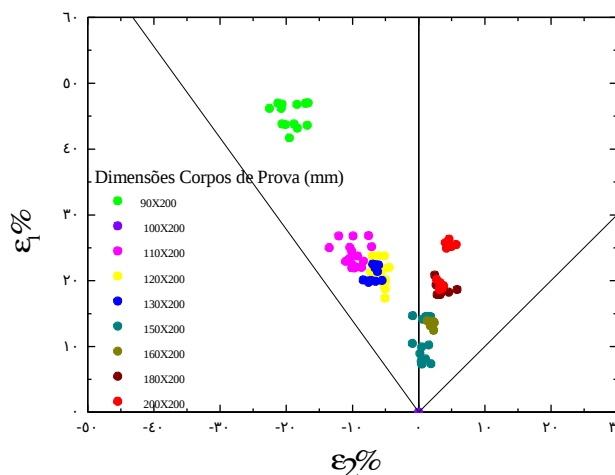


Figura 7 – Valores de deformações limites obtidos a partir de pontos simétricos a fratura.

A segunda metodologia de análise de resultados proposta neste trabalho faz as medidas de deformação limite em pontos vizinhos à fratura. A partir do momento em que ocorre a fratura os pontos fraturados deixam de transmitir esforço a seus elementos vizinhos e com isso estes elementos vizinhos deixam de sofrer deformação. De certa forma estes pontos vizinhos à fratura são pontos na estrição, visto que seus valores de deformação são imediatamente precedentes aos valores de fratura. Os pontos obtidos a partir desta metodologia de análise de resultados formam a curva limite de conformação de pontos vizinhos a fratura, doravante, CLC_{VF} .

A forma da grade impressa no corpo de prova pode ser considerada de grande importância, principalmente quando os pontos a serem analisados se localizam próximos a região fraturada. A grade utilizada para auxílio das medidas de deformação neste trabalho foi a circular. Para o cálculo das deformações na chapa o software de análise de imagens ASAME transforma a grade originalmente circular em uma grade quadrada onde o vértice de cada quadrado é localizado no centro de cada círculo. Com isso é necessário quatro círculos para que seja construído um único quadrado. As medidas de deformação de pontos vizinhos à fratura também são dificultadas pela utilização da grade circular. O software de análise de imagens não consegue localizar o centro dos círculos fraturados e com isso a grade quadricular só consegue ser formada a partir de certa distância da fratura, conforme mostrado na Fig. 8, o que pode gerar incerteza maior nos resultados.

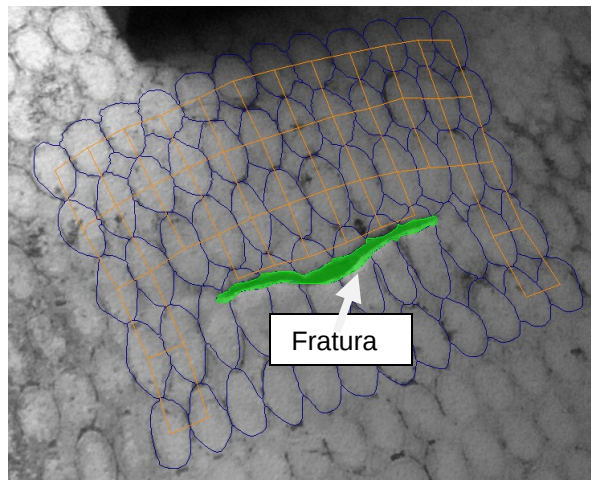


Figura 8 – Medidas de deformação na fratura.

Com o objetivo de eliminar este problema uma nova metodologia de tomada de medidas na região vizinha a fratura foi proposta. O que se fez foi unir os círculos fraturados de forma que seus centros possam ser reconhecidos e assim a grade possa ser formada e os valores de deformação calculados. Em seguida, os valores da deformação dos pontos fraturados são ignorados, mas a deformação dos pontos vizinhos pode ser considerada como medidas de deformação de pontos na estrição localizada. Duas regiões referentes a esta nova metodologia proposta devem ser consideradas:

- 1- A primeira região trata de pontos próximos à fratura, doravante região I. Estes pontos estão mais próximos à fratura que os pontos vizinhos à fratura, vide Fig 9. Seus valores de deformação são determinados através da nova metodologia proposta neste item, onde é feita a união dos círculos fraturados de forma que seus centros possam ser reconhecidos e assim a grade possa ser formada e os valores de deformação calculados.
- 2- A segunda região trata dos pontos vizinhos à fratura, doravante região II. Estes pontos estão mais afastados da fratura que a região I e conseguem ser medidos com a utilização da grade circular, contudo seus resultados podem ser imprecisos devido a seu afastamento da fratura.

A Fig. 9 mostra uma comparação entre os valores de deformação principal em uma escala percentual para áreas localizadas nas regiões I e II para o corpo de prova de 90 X 200mm. A região I apresentou uma deformação principal de 45%, enquanto que a região II, 38%. Como esperado, observou-se que com o aumento da distância da tomada de medidas da região fraturada existe uma diminuição dos valores de deformação principal.

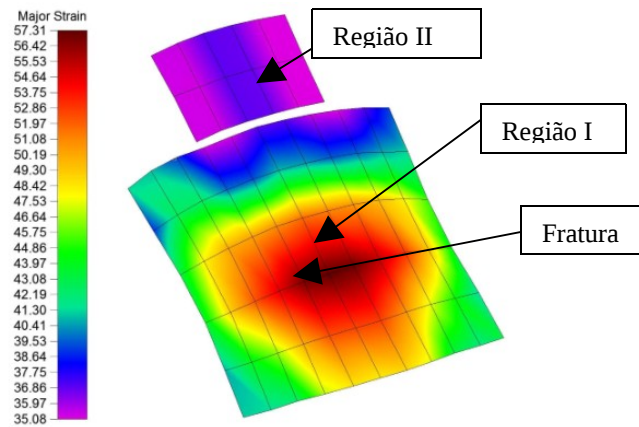


Figura 9 – Medidas de deformação próximas a fratura obtidas para o corpo de prova 90 X 200mm.

A Curva Limite de Conformação na estrição do material é construída a partir das deformações limites determinadas nas regiões de estrição para os diferentes corpos de prova utilizados no ensaio Nakazima. A Fig 10 compara as nuvens de pontos e as curvas limite obtidas através das duas metodologias distintas de análise de resultados utilizadas neste trabalho, a saber, CLC a partir da região simétrica a fratura (CLC_{SF}) e CLC a partir da região vizinha a região fraturada (CLC_{VF}). Ainda, a CLC_{VF} pode ser obtida através de duas regiões distintas, região I e região II. É possível verificar que a nuvem de pontos oriunda da região vizinha à fratura apresenta maiores valores de deformação limite quanto comparada a nuvem de pontos localizados na região simétrica a fratura. A partir dessa análise é possível concluir que a melhor região para se determinar os valores de estrição localizada é a região vizinha à fratura. A região simétrica à fratura apresenta valores de estrição difusa. Ainda, a tomada de pontos na região I é tida como mais representativa do processo de estrição localizada do que a região II. Para evitar o erro de medidas causado pela grade circular é sugerida a utilização da grade quadrada em trabalhos futuros, tornando-se interessante uma comparação dos valores de deformação determinados a partir dessas diferentes formas de gradeamento.

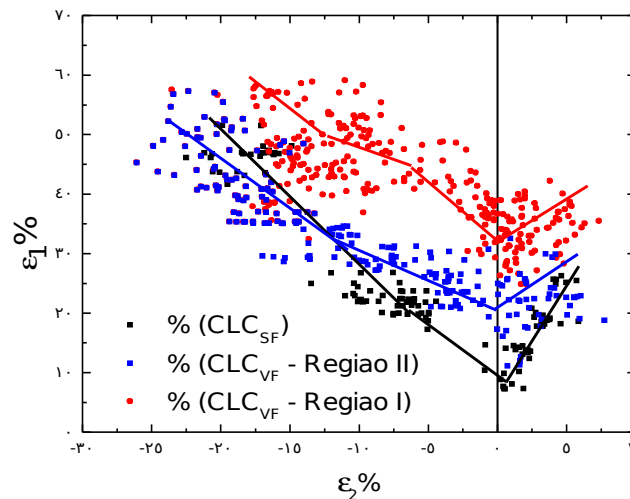


Figura 10 – Comparação da CLC do aço LI de pontos localizados em área simétrica a fratura, área próxima a fratura e área vizinha a fratura.

4. CONCLUSÕES

As medidas de deformação limite foram obtidas a partir do ensaio Nakazima. Foi possível concluir que em todos os casos os pontos localizados na região mais próxima a fratura sempre possuem maiores valores de deformações que os pontos localizados em uma região vizinha a fratura. Uma vantagem da tomada de pontos na região mais próxima da fratura é que uma maior área pode ser analisada e com isso a margem de erro nas medidas de deformações é reduzida. Sendo assim, a tomada de pontos na região mais próxima a fratura é tida como mais representativa das deformações limites em chapas metálicas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a CSN pelo fornecimento das chapas de aço LI, preparação de amostras e realização de ensaios de caracterização mecânica e metalográfica. Maria Carolina dos Santos Freitas agradece a CAPES pelo financiamento de bolsas de doutorado no âmbito do programa PROAP/CAPES. Luciano Pessanha Moreira agradece a FAPERJ pelo apoio financeiro (Jovens Cientistas do Nosso Estado).

6. REFERÊNCIAS

- Keeler, S.P., Determination of the forming limits in automotive stamping, Sheet Metal Industries, Vol. 461, 1965, p. 683-691.
- Goodwin, G.M., Application of the strain analysis to sheet metal forming in the press shop, La Metallurgia Italiana, Vol.8, 1968, p. 767-772.
- Nakazima, K., Kikuma T. e Hasuka, K., Study on the formability of steel sheets, Yawata Technical Report No 264, 1968, p. 141.
- Marciniak Z. e Kuczynski, K., Limit strains in the process of stretch-forming sheet metals, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 9, 1967, p. 609-620.
- Luiz, V. D., Campos H. B., Melo, T. M. F., Rubio J. C. C. Curva Limite de Estampagem à fratura (CLEF) Versus Curva Limite de Estampagem à Estricção (CLEE). 62º Congresso Anual da ABM, 2007, p44-51.
- Spiegel, M. R., Estatística, 3ª Edição, São Paulo, Ed.McGraw-Hill, 1994, p.283-286.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE LIMIT STRAINS OF AN INTERSTITIAL FREE STEEL

Maria Carolina dos Santos Freitas, carol@metal.eeimvr.uff.br¹

Luciano Pessanha Moreira, luciano.moreira@metal.eeimvr.uff.br¹

Andersan dos Santos Paula, andersan@metal.eeimvr.uff.br¹

Luiz Carlos de Andrade Vieira, luiz@metal.eeimvr.uff.br^{1,2}

Ecy Cardoso Romão, ecy.romao@csn.com.br²

Renato Aguiar da Silva, renato.aguiar@csn.com.br²

¹Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense, Av. dos Trabalhadores, CEP 27 255 125 Volta Redonda, RJ, Brazil.

²Centro Universitário de Volta Redonda, Fundação Oswaldo Aranha, Av. Paulo Erlei Alves Abrantes, nº 1325, CEP: 27240-560 Três Poços, Volta Redonda, RJ, Brazil.

Abstract. The concept of the Forming Limit Curve (FLC), first introduced by Keeler and Goodwin, is a very useful tool to analyze the plastic behavior of thin sheets. This work presents a methodology of experimental determination of the FLC using the Nakazima test. The plastic material behavior of an Interstitial Free (IF) steel sheet was first evaluated by means of uniaxial tensile tests. Then, the hemispherical punch Nakazima test was performed. The FLC was evaluated from two different methodologies. In the first, the limit strains were obtained in the regions symmetrically opposed to the fracture sites whereas in the second the corresponding strains were measured in the fracture neighborhood. The proposed methodologies were compared and both presented high-strain limiting strains for the deep-drawing region. The proposed methodologies were compared and both presented high-strain limiting strains for the deep-drawing region.

Keywords: IF steel – Forming limit curve – Sheet metal forming