

AValiação DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM DE CHAPAS DE AÇO ATRAVÉS DA CLC

Alexandre Lundgren Bastos, alexandre_l_bastos@whirlpool.com¹
Carlos Augusto Silva de Oliveira, carlosa@emc.ufsc.br²

¹Engenharia Industrial - Processos Metais Whirlpool Latin America, Rua Dona Francisca, 7200, Distrito Industrial, CEP 89219-900, Joinville – SC.

²UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário, Trindade, CEP: 88040-900, Florianópolis, SC

Resumo: *O presente trabalho teve como objetivo aplicar na indústria de eletrodomésticos da linha branca uma metodologia para avaliação do processo de estampagem de chapas de aço que auxilia a seleção do grau de estampagem e parâmetros de processo mais adequados a aplicações específicas. Esta metodologia foi adaptada a partir da metodologia já largamente difundida na indústria automobilística, e consiste no estudo das propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência, razão elástica, alongamento total, coeficiente de encruamento, coeficientes de anisotropia normal e planar, dureza, rugosidade) e de ensaios simulativos (CLC's) buscando o melhor equilíbrio entre o atendimento aos requisitos de produto e as necessidades do processo. Neste trabalho são apresentadas as curvas CLC's determinadas em laboratório e a análise da força de sujeição e da lubrificação nas distribuições das deformações em uma peça específica (painel de estufa de um forno doméstico) utilizando um aço de estampagem profunda.*

Palavras-chave: Estampabilidade – Curvas CLC - Eletrodomésticos

1. INTRODUÇÃO

A estampagem é o processo de transformação de uma chapa plana em uma peça com uma geometria definida pela ação de uma matriz e um punção. A ocorrência de defeitos como fratura, estrição, empenamento, enrugamento e distorção de forma são relativamente comuns durante a estampagem, mas são indesejáveis, pois levam ao descarte das peças.

A utilização de um material com elevado grau de estampagem aumenta a probabilidade da operação de estampagem ser bem sucedida, entretanto, o material representa uma fração significativa do custo total dos produtos, de modo que para reduzir os custos, otimizações dos materiais utilizados e dos processos de estampagem, se fazem necessários. Deste modo, pequenas diferenças nas propriedades do material, nas condições do ferramental e prensas, na lubrificação e em parâmetros de operação como velocidade e força de prensagem podem causar mudanças consideráveis no processo.

Neste contexto, a determinação da curva de limite conformação (CLC) do material pode ser interessante. Ela corresponde ao lugar geométrico dos pontos de máxima deformação de uma chapa metálica submetida aos diversos modos de deformação (Rees, 2001; Butuc, 2003). O conhecimento da CLC e da distribuição das deformações característica de cada peça é importante para que possam ser definidos os parâmetros de processo de tal forma que a deformação durante a operação industrial não exceda ao percentual seguro, assim garantindo a qualidade final da peça.

A partir de uma CLC e da distribuição das deformações, ainda podem ser obtidos:

- a) A margem de segurança na estampagem de peças, sem que ocorra a falha do material na prensa;
- b) Os ponto(s) crítico(s) para a estampagem de determinada peça;
- c) A adequação dos parâmetros e condições de operação (força no prensa-chapas, lubrificação, velocidade de prensagem, acabamento superficial do ferramental, homogeneidade da geometria do ferramental, paralelismo entre martelo e mesa da prensa, distribuição homogênea da força pelo prensa-chapas) para se ter uma boa qualidade das peças;

d) O efeito das propriedades do material, lote a lote, na qualidade da peça estampada.

O objetivo deste estudo, portanto, foi aplicar na indústria da linha branca uma metodologia que consiste da análise do processo de estampagem através da CLC e das distribuições das deformações. Diferentes aços e espessuras foram estudados. Foi analisado ainda, o efeito da força de sujeição e da lubrificação nas distribuições das deformações em uma peça específica (painel de estufa de um forno doméstico) utilizando um aço de estampagem profunda.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste estudo foram utilizadas chapas de aço de 3 diferentes graus de estampagem, conforme mostrado na tabela 1. Na tabela 2 são mostradas as composições químicas das amostras utilizadas.

Foi determinada a frente máxima de deformação nas regiões críticas do painel de estufa de um forno doméstico fabricado na estamparia da Whirlpool. Este estudo foi realizado nesta peça devido ao histórico da quantidade de falhas durante o processo de estampagem. Na produção do painel de estufa são utilizadas 2 operações, sendo a primeira de conformar e a segunda de recortar. Como o objeto deste estudo foi analisar as operações críticas, embutimento e estiramento, a segunda operação não foi avaliada.

Neste trabalho são apresentados as CLC's, determinadas em laboratório dos aços estudados e o efeito da força de sujeição e da lubrificação nas distribuições das deformações no painel de estufa de um forno doméstico, utilizando o aço de estampagem profunda. Possíveis variações na CLC devido a diferentes lotes de um mesmo grau de estampagem também foram estudadas.

As propriedades mecânicas obtidas por Bastos (2009), são mostradas nas tabelas 3 a 5.

Tabela 1 – Aços utilizados neste trabalho

Material	Grau de estampagem	Espessura (mm)
Chapa Fina Laminada a Frio	Qualidade Comercial (QC), conforme NBR06658	0,60
Chapa Fina Laminada a Frio	Estampagem Extra Profunda (EEP), conforme NBR05915	0,60
Chapa Fina Laminada a Frio Eletrolgalvanizada (EG)	Estampagem Extra Profunda para peça crítica (EEP-PC), conforme NBR05915	0,55

Tabela 2 – Composição química dos aços utilizados

Grau de estampagem	Composição química					
	C	Mn	P	S	Al	Ti
QC	0,11	0,45	0,015	0,010	0,03	0,001
EEP	0,05	0,30	0,014	0,018	0,04	0,001
EEP-PC EG	0,04	0,22	0,011	0,009	0,04	0,001

Tabela 3 – Valores obtidos para as propriedades mecânicas (Bastos, 2009).

Aço	Dureza (HRB)	LE (MPa)			LR (MPa)			Alongamento (%)		
		0°	90°	45°	0°	90°	45°	0°	90°	45°
QC lote 1	58	261	263	269	379	379	383	38	33	35
QC lote 2	60	351	343	355	399	402	411	37	37	35
EEP lote A	45	195	203	203	297	298	301	42	40	42
EEP lote B	44	191	188	197	290	280	295	42	42	42
EEP lote D	47	237	230	235	333	326	335	46	44	42
EEP PC EG	31	195	198	208	316	313	320	50	49	48

Tabela 4 – Resultados obtidos para o coeficiente de encruamento, n , nas 3 direções e médio (Bastos, 2009).

	Coeficiente de Encruamento (n)			
	0°	90°	45°	Médio
QC Lote 1	0,19	0,20	0,20	0,20
QC Lote 2	0,20	0,20	0,20	0,20
EEP lote A	0,23	0,21	0,21	0,22
EEP lote B	0,22	0,21	0,21	0,22
EEP lote D	0,23	0,20	0,21	0,21
EEP-PC EG	0,24	0,23	0,23	0,24

Tabela 5 – Coeficiente de anisotropia nas 3 direções e os valores calculados de \bar{r} e Δr (Bastos, 2009).

	Coeficiente de anisotropia, r			\bar{r}	Δr
	0°	90°	45°		
QC Lote 1	1,17	1,26	1,10	1,15	0,12
QC Lote 2	1,35	0,83	0,67	0,88	0,42
EEP lote A	1,43	1,56	1,29	1,39	0,21
EEP lote B	1,67	1,98	1,39	1,61	0,43
EEP lote D	1,50	1,99	1,40	1,57	0,34
EEP-PC EG	1,58	1,74	1,50	1,58	0,16

2.1 Determinação da CLC

A determinação das CLC's foi baseada no procedimento e ferramental proposto por Nakazima e descrito por Lobão (2003) de acordo com as normas ASTM E2218-02 e ISO/WD 12004.

Foram utilizados nove diferentes corpos de prova para cada lote de material. Estes corpos de prova foram cortados em tesoura guilhotina, evitando a geração de rebarbas. As dimensões dos corpos de prova foram:

- Comprimento = 215 mm (paralela a direção de laminação);
- Largura = 55 a 215 mm, de 20 em 20 mm.

Em cada corpo de prova foi gravado, através de processo eletroquímico, uma grade para medição das deformações, composta de círculos de diâmetro 3mm e quadrados. O equipamento utilizado foi o modelo RB200 Industrial, fabricado pela Tecnigrav, bem como o líquido eletrolítico, o líquido de neutralização e a matriz de gravação.

Para realização dos ensaios foi adaptada uma máquina universal de ensaios ZDM U 30T. As chapas foram fixadas através de uma prensa-chapas com *draw beads* (quebra-rugas) para evitar o escorregamento da chapa durante a deformação. Entre a chapa e o punção foi utilizado como lubrificante bissulfeto de molibdênio (*Molikote*).

O critério utilizado para o término do ensaio foi à fratura da chapa devido à maior simplicidade e à máquina não possuir sensibilidade para a detecção do início da estricção no material. A velocidade de deslocamento utilizada foi de 15 mm/min.

Após o ensaio, os corpos de prova foram avaliados com relação ao posicionamento da fratura, e então, pedaços de papel milimetrado foram colados junto às regiões de falha dos corpos de prova, para servir como escala. Em seguida foram retiradas três fotografias destas regiões para cada corpo de prova. Para isso, procurou-se posicionar as chapas metálicas de tal forma que as regiões de falha ficassem o mais paralelo possível em relação à lente da câmera fotográfica, com o intuito de diminuir o erro devido à planificação das fotos.

As medidas dos diâmetros, menor e maior, dos círculos deformados foram realizadas nos softwares de análise de imagens, *Image-Pro Express* e *UTHSCSA Image Tool*. Foram medidos de três a cinco círculos por foto, sendo que foram selecionados somente círculos não fraturados próximos às fraturas. Procurou-se medir sempre os mesmos círculos nas diferentes fotos.

A média das deformações obtidas foi dividida em dois grupos, sendo:

- Grupo 1 - formado pelos corpos de prova em que a deformação ϵ_2 foi predominantemente negativa;
- Grupo 2 - formado pelos corpos de prova em que a deformação ϵ_2 foi predominantemente positiva;

A CLC foi então determinada através de linhas de tendência para os dois grupos separadamente, sendo estas linhas de tendência linear para o grupo 1 e logarítmica para o grupo 2. Unindo ambas as linhas de tendência, obtêm-se a CLC na sua forma final.

2.2 Determinação da Distribuição das Deformações

O efeito da força de sujeição e da lubrificação nas distribuições das deformações no painel de estufa de um forno doméstico utilizando o aço de estampagem profunda foi avaliada utilizando os parâmetros mostrados na tabela 6. Como na determinação da CLC, foi gravada nos *blanks* uma grade para medição das deformações. A peça, foi estampada em uma prensa hidráulica, com capacidade de 300 toneladas-força pelo martelo (transmitida ao punção) e 80 toneladas-força na almofada hidráulica (transmitida para o prensa-chapas).

Tabela 6- Parâmetros utilizados no estudo das distribuições das deformações

Peça	Aço	Força de Sujeição (KN)	Lubrificação	Tratamento
Painel de Estufa	EEP	118	Seco	6
		294	Seco	7
		294	Filme de polietileno (PE)	8
		392	Filme de polietileno (PE)	9

Os círculos selecionados foram aqueles com maiores deformações percebidas. A medição das deformações no painel de estufa foi realizada em 6 regiões, mostradas na figura 1. Cada uma destas regiões ainda foi subdividida em 4 localizações com base nos modos de deformação pré-visualizados, mostrados na figura 2.

Pelo observado pode-se determinar 3 modos de deformação distintos nestas regiões, são eles:

- Localização 1 (L1) e Localização 2 (L2) => deformação plana e tração uniaxial;
- Localização 3 (L3) => estiramento equi-biaxial;
- Localização 4 (L4) => embutimento.

Após selecionados os círculos deformados, a medição e cálculo das deformações seguiu o mesmo procedimento utilizado na determinação das CLC's.

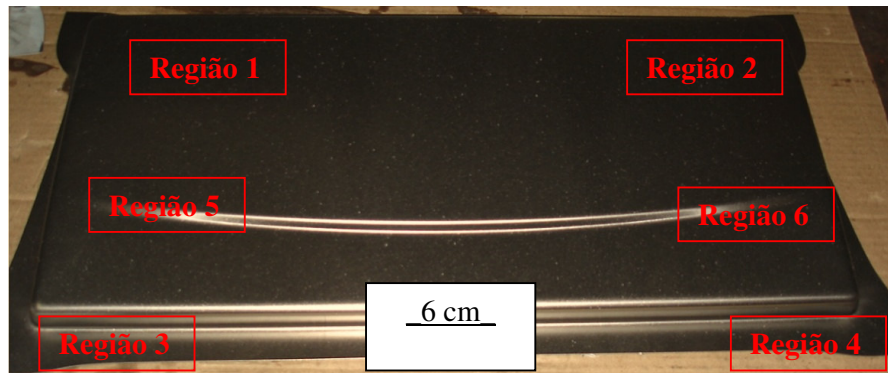


Figura 1 – Regiões analisadas no painel de estufa

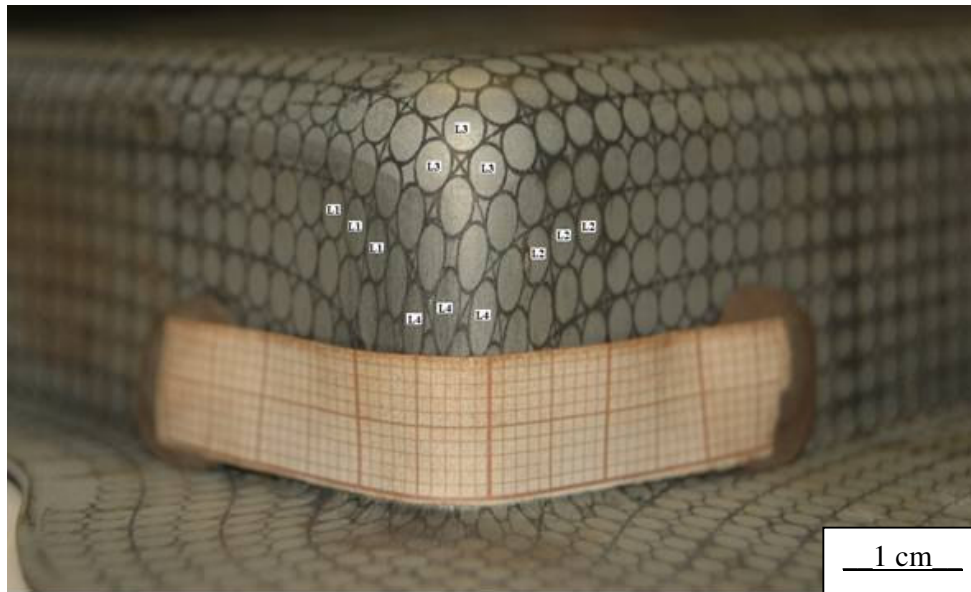


Figura 2 – Representação das localizações dos diferentes modos de deformação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 3 são apresentadas as CLCs obtidas para os aços QC, e também são representadas as linhas que indicam os principais modos de deformação.

Comparando as CLCs do aço QC lote 1 com o lote 2, pode ser observado que apesar de ambas as curvas cortarem o eixo ϵ_1 praticamente no mesmo ponto, ocorreu um deslocamento para baixo e para a direita do cotovelo da CLC do lote 2. Este cotovelo é formado pela interseção das linhas de tendência. Isto resulta numa queda acentuada nos valores das deformações máximas na região do estiramento biaxial. Já na região de tração uniaxial e embutimento o aço QC lote 2 apresentou maiores deformações máximas.

Correlacionando o comportamento da CLC com as propriedades mecânicas destes dois lotes, obtidas por Bastos (2009), tabelas 3 a 5, pode-se verificar que:

- i. Os mesmos valores da interseção das CLCs com o eixo ϵ_1 indicam que o coeficiente de encruamento, n , dos dois lotes devem ser aproximadamente iguais. Fato este comprovado por Bastos (2009). Entretanto, o cotovelo e consequentemente a região de estiramento biaxial apresentaram diferenças significativas;
- ii. Apesar do aço QC lote 1 ter apresentado um coeficiente de anisotropia normal maior que o aço QC lote 2, o que teoricamente deveria conferir maior limite de conformação na região de embutimento, a CLC do aço QC lote 1 apresentou um limite de conformação menor para esta região. O aço QC lote 2, ainda apresentou valores de coeficiente de anisotropia normal inferiores a 1, o que indica limites de conformação ainda menores;
- iii. O efeito do coeficiente de anisotropia nas diferentes direções foi justamente o oposto do esperado segundo Silveira Netto (2004), pois o lote 2 não apresentou valores de $r_{90^\circ} > r_{0^\circ} > r_{45^\circ}$, mas a CLC foi rotacionada no sentido horário em relação ao lote 1, que apresentou valores $r_{90^\circ} > r_{0^\circ} > r_{45^\circ}$. Esta rotação fez com que o limite de conformação do aço QC lote 2 tenha aumentado no lado esquerdo da curva e diminuído no lado direito na curva em relação ao lote 1.

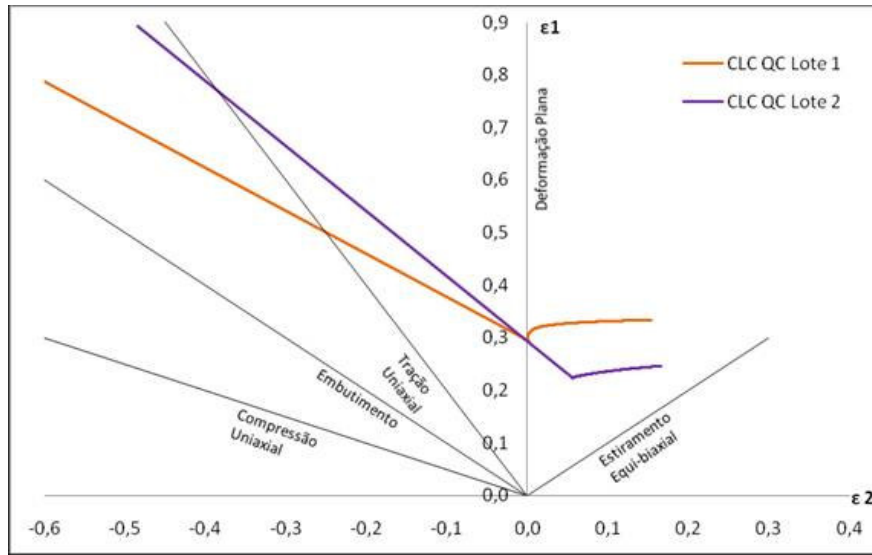


Figura 3 – CLC's dos aços QC (lote 1 e lote 2).

A figura 4 mostra as CLCs obtidas para os 3 lotes do aço EEP. Pode-se observar uma grande similaridade na parte esquerda das CLCs dos 3 lotes do aço EEP, inclusive no ponto onde a curva corta o eixo ϵ_1 . Os valores são ligeiramente maiores para o lote A, seguido do lote B e por último o lote D.

No lado direito da CLC, na região de estiramento biaxial, observa-se que o lote A é o que apresenta os menores limites de conformação, seguido pelo lote D e por fim o lote B.

Correlacionando o comportamento da CLC com as propriedades mecânicas apresentadas por estes lotes, tabelas 3 a 5, pode-se verificar que:

- i. Os aços EEP lote B e EEP lote D apresentaram valores de coeficiente de anisotropia normal semelhantes, e isto pode ser observado também na semelhança entre o lado esquerdo das CLCs destes dois lotes.
- ii. O lote A do aço EEP apresentou um valor do coeficiente de anisotropia normal menor que os outros lotes, entretanto, observando o lado esquerdo das CLCs não se encontram diferenças significativas.
- iii. Os 3 lotes do aço EEP apresentaram praticamente o mesmo valor do coeficiente de encruamento, o que se refletiu na proximidade da interseção das CLCs com o eixo ϵ_1 .
- iv. Quanto às diferentes posições dos cotovelos das CLC's, pode ser constatada uma correlação com o coeficiente de anisotropia. Quanto menor o coeficiente de anisotropia mais foi deslocado para a direita e para baixo o cotovelo da CLC.

Caminhos de deformação não lineares podem resultar nestes deslocamentos do cotovelo da CLC. Em experimentos realizados em uma liga de alumínio, Graf e Hosford (1993) utilizaram mudanças bruscas no caminho de deformação durante o ensaio para determinação da CLC através de pré-deformações dos corpos de prova. Estas mudanças resultaram no deslocamento do cotovelo da CLC e na alteração na inclinação do lado direito da curva. Na prática, estas mudanças no caminho de deformação podem ser causadas por lubrificação irregular.

Na figura 3, que mostra a CLC obtida para os dois lotes do aço QC, pode-se observar que a correlação do coeficiente de anisotropia normal com a posição do cotovelo da CLC também é válida.

Na figura 5, é apresentada uma comparação entre as CLCs do aço EEP-PC EG, do aço EEP, representado pela CLC do lote D, e do aço QC, representado pelo lote 1.

Pode-se observar que o lado esquerdo das CLCs, região de embutimento e tração uniaxial, as CLCs são paralelas, sendo que a CLC do aço EEP-PC EG intercepta o eixo das maiores deformações, ϵ_1 , no maior valor, seguido do aço EEP e então o aço QC.

No lado direito das CLC's, observam-se inclinações e posições do cotovelo diferentes entre as CLC's dos 3 aços. Apesar disto, o limite de conformação na região de estiramento biaxial é maior para o aço EEP-PC EG, seguido do aço EEP e então do aço QC.

Correlacionando o comportamento da CLC com as propriedades mecânicas apresentadas por estes três aços, tabelas 3 a 5, pode-se verificar que:

Os valores do coeficiente de encruamento dos aços correlacionaram-se direta e proporcionalmente com o ponto interseção das CLCs com o eixo ϵ_1 . Por exemplo, o aço EEP-PC EG apresentou um coeficiente de anisotropia de 0,24 e interseção com o eixo ϵ_1 em 0,38, enquanto que o aço EEP apresentou um coeficiente de anisotropia de 0,22 e interseção com o eixo ϵ_1 em 0,34. Portanto, o aço EEP-PC EG apresentou tanto um coeficiente de anisotropia quanto uma interseção com o eixo ϵ_1 cerca de 10% maiores que o aço EEP.

Para as diferenças na inclinação no lado direito das CLCs dos aços não foi encontrada nenhuma correlação com as propriedades mecânicas. É provável que este comportamento seja devido a outro fator que também afeta consideravelmente a CLC, o coeficiente de atrito. Este é um fator de difícil controle, e apesar dos cuidados no momento da lubrificação do punção, variações entre os ensaios são prováveis.

Apesar da menor espessura do aço EEP-PC EG (0,57 mm) em relação aos aços EEP (0,60 mm), a maior capacidade de deformação do material EEP-PC EG pode ser evidenciada em todos os modos de deformação, pois a CLC deste aço está posicionada no diagrama das deformações acima das demais. Isto faz com que o aço EEP-PC EG seja o mais indicado tanto para operações de embutimento quanto estiramento.

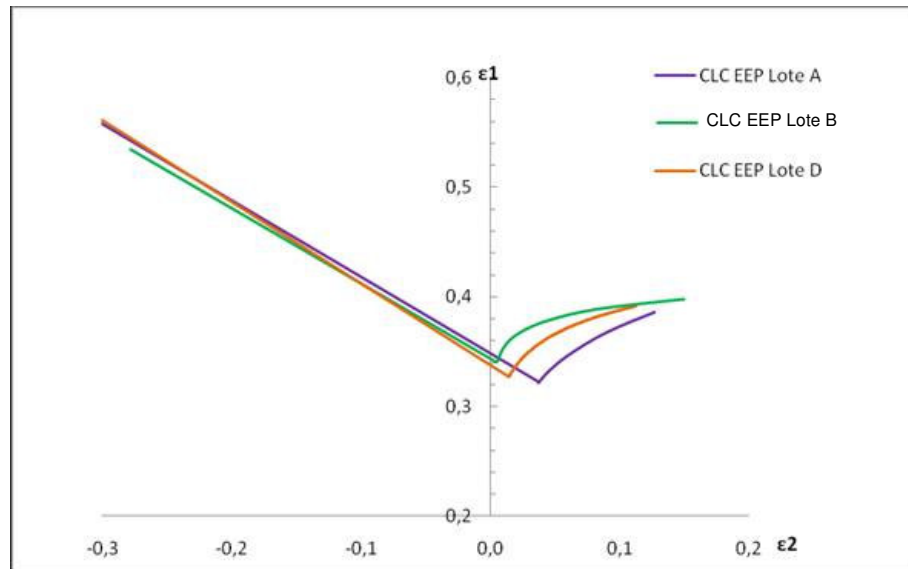


Figura 4 – CLC's dos aços EEP (lote A, B e D).

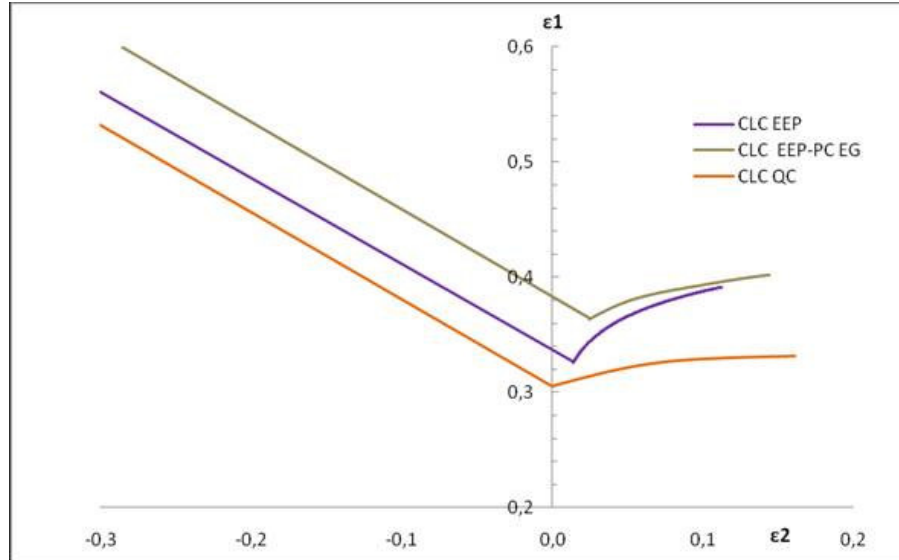


Figura 5 – Comparativo das CLC's aços QC, EEP e EEP-PC.

Portanto, assim como indicado pelos valores dos coeficientes de encruamento e de anisotropia normal, a análise das CLCs indicou que o material EEP-PC EG foi o que apresentou o maior limite de conformação quando submetido às operações tanto de embutimento quanto de estiramento.

O aço QC apresentou os menores limites de conformação tanto nas análises através das propriedades mecânicas quanto na representação através das CLCs.

Para o aço EEP, a análise das propriedades mecânicas indicou um limite de conformação nas operações de estiramento menor que o aço EEP-PC EG, o que foi confirmado na análise das CLCs. Já para a região de embutimento, enquanto que o coeficiente de anisotropia normal indicava um limite de conformação similar entre estes dois aços, na

análise da CLC ficou evidente que o EEP-PC EG possuía um limite de conformação mais elevado, provavelmente em função do maior coeficiente de encruamento que elevou a CLC como um todo.

3.1 Distribuição das deformações do painel estufa estampado com o aço EEP e avaliação do efeito da força de sujeição e do tipo de lubrificação

A figura 6 mostra a distribuição das deformações de quatro peças do painel estufa, estampadas com o aço EEP (tratamentos de 6 a 9), com forças de sujeição de 118, 294 e 392 kN, e combinadas com duas condições de lubrificação (sem lubrificação e lubrificado com filme PE), conforme tabela 6.

Pode ser observado que os tratamentos 7 e 9 apresentaram pontos acima da CLC, estando coerentes com os resultados da inspeção visual, tabela 7, que detectou estricção e fratura, respectivamente para estes tratamentos. O tratamento 6 apresentou ainda ondulações em duas regiões.

Ao comparar as distribuições das deformações das peças do painel estufa estampados com aço EEP, força de sujeição de 294 kN, tratamentos 7 e 8, pode ser avaliado o efeito da lubrificação com o filme sólido de polietileno. Na região do embutimento, observa-se que os círculos deformados se deslocaram para baixo no diagrama de deformações, conforme previsões de Keeler (2005), deixando a região crítica, acima da CLC. Na região do estiramento o efeito não foi o esperado, pois as deformações diminuíram em direção à deformação plana. É provável que o aumento na espessura devido à adição do filme de polietileno tenha criado uma restrição ao movimento do material.

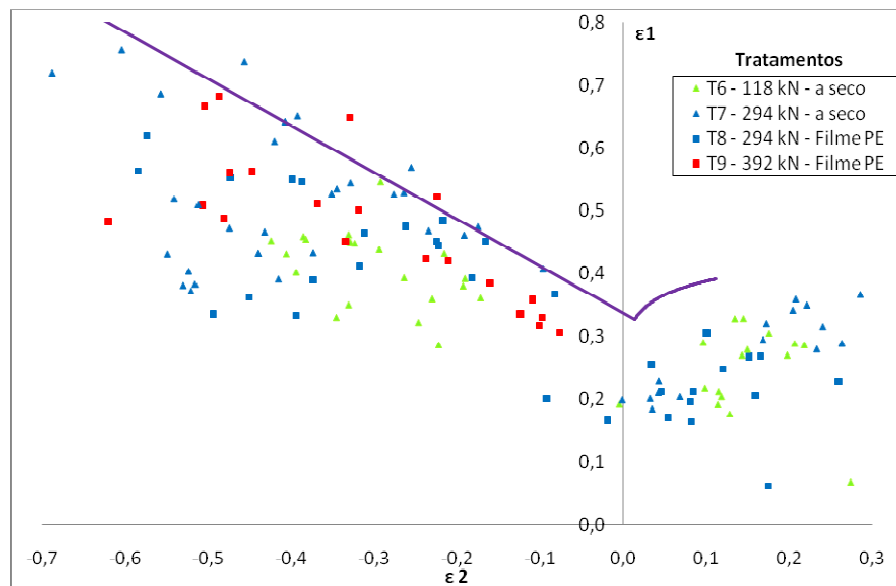


Figura 6 – Distribuição das deformações do painel estufa estampado com o aço EEP – Tratamentos 6 a 9.

Analisando o efeito da força de sujeição na estampagem do painel estufa com o aço EEP pela comparação dos tratamentos 6 e 7, ambos sem lubrificação, observa-se que com o aumento desta força, as deformações aumentaram nas duas direções principais, ϵ_1 e ϵ_2 , em todos os modos de deformação. Entretanto, o aumento das deformações no lado esquerdo (embutimento e tração uniaxial) foi mais pronunciado do que no lado direito (estiramento biaxial e deformação plana). Já quando se comparam os tratamentos 8 e 9, exceto por dois pontos que excedem a CLC, não fica tão evidenciado o aumento no nível das deformações.

A intensidade do efeito do aumento da força de sujeição varia em função das condições de atrito entre as superfícies (sem lubrificação e lubrificação por meio de filme de polietileno), conforme mostrado por Tigrinho (2005). Tanto a lubrificação quanto a força de sujeição afetam diretamente a força de atrito entre a chapa e o prensa chapas, alterando o fluxo de material que se deforma para dentro da matriz. Pode-se entender este comportamento, comparando também os tratamentos 7 e 9, onde apesar do aumento da força de sujeição de 294 para 392 kN, as deformações encontradas para o tratamento 9 foram ligeiramente menores, em função da lubrificação com filme de polietileno.

Com o aumento da força de sujeição do tratamento 6 para o 7, foi possível eliminar as ondulações, entretanto surgiram estricções numa região. A utilização de lubrificação com filme de PE eliminou estas estricções. Uma alternativa que poderia ser empregada seria utilizar uma força de sujeição intermediária entre as dos tratamentos 6 e 7.

Tabela 7 – Resultados da inspeção visual para identificação de defeitos de estampagem do painel da estufa.

Peça	Aço	Força de Sujeição (KN)	Lubrificação	Tratamento	Região de ocorrência de defeitos (figura 1)				
					Fra-tura	Estricção	Ondulação	Enrugamento	Distorção de forma
Painel de Estufa	EEP	118	Seco	6	Não	Não	5 e 6	Não	Não
		294	Seco	7	Não	2	Não	Não	Não
		294	Filme de PE	8	Não	Não	Não	Não	Não
		392	Filme de PE	9	2	Não	Não	Não	Não

4. CONCLUSÕES

- Foi observado que o ponto em que a CLC intercepta o eixo das deformações ϵ_1 é proporcional ao coeficiente de anisotropia.
- No procedimento para a obtenção da CLC, a posição do cotovelo e a inclinação do lado direito da CLC mostraram-se bastante sensíveis às condições de lubrificação do punção, que pode causar mudanças no caminho das deformações e conseqüentemente alterações nos limites de conformação.
- A avaliação da operação de estampagem através da distribuição das deformações da peça em função da CLC do material utilizado mostrou-se capaz de identificar estricções e fraturas, desde que estas últimas sejam de pequenas proporções.
- O aço EEP, quando utilizado na estampagem do painel de estufa, apresentou resultados satisfatórios quanto ao não aparecimento de defeitos, pois numa faixa intermediária de força de sujeição, foi possível a obtenção de peças sem qualquer defeito, sendo caracterizada uma “janela de conformação”.
- O filme de polietileno apresentou boa capacidade de lubrificação, quando submetido ao modo de deformação embutimento.
- A força de sujeição mostrou-se bastante efetiva no controle do fluxo de material, reduzindo as ondulações e enrugamentos, mas por outro lado, aumentando os níveis de deformação, aumentando a probabilidade do surgimento de estricções e fraturas.
- Foi observada uma interação da força de sujeição com a condição de lubrificação, fato já esperado, pois ambas afetam diretamente o atrito entre a chapa e o prensa chapas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Whirlpool SA pela possibilidade de realizar este trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Bastos, A.L., “Análise do Processo de Estampagem de Chapas de Aço Através da Curva Limite de Conformação (CLC)”. Dissertação (Mestrado em Ciência e Eng. dos Materiais), UFSC, Florianópolis, 2009. 118 f.
- Butuc, M. C.; Gracio, J. J.; Rocha, A. B., A Theoretical Study on Forming Limit Diagrams Prediction, Journal of Materials Processing Technology, 142, 2003
- Graf, A.; Hosford, W.F. “Calculations of forming limit diagram for changing strain paths”, *Metall. Trans.* 24, 1993.
- Keeler, S.P. “The Science of Forming”, Vol. 2, Precision Metalforming Association, 2005.
- Lobão, M.C. “Determinação de Curvas Limite de Conformação por Procedimentos Experimentais e Simulação Numérica do Processo de Estampagem”. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica), UFSC, Florianópolis, 2003. 133 f.
- Rees, D. W. A., Factors Influencing the FLD Automotive Sheet Metal, Journal of Materials Processing Technology 118, 2001.
- Silveira Netto, S.E.. “Desenvolvimento do Processo de Construção de Curvas Limite de Conformação”. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2004.
- Tigrinho, L.M.V. Influência da Lubrificação na Estampagem Via Análise das Deformações Obtidas em uma Chapa de Aço de Alta Estampabilidade. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

7. DIREITOS AUTORAIS

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



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

ANALISE OF THE STEEL SHEET FORMING PROCESS BY FLD

Alexandre Lundgren Bastos, alexandre_l_bastos@whirlpool.com¹
Carlos Augusto Silva de Oliveira, carlosa@emc.ufsc.br²

¹Engenharia Industrial - Processos Metais Whirlpool Latin America, Rua Dona Francisca, 7200, Distrito Industrial, CEP 89219-900, Joinville – SC.

²UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário, Trindade, CEP: 88040-900, Florianópolis, SC

Abstract. *This work had as objective to apply in home appliances industry a methodology to evaluate the sheet metal forming process that aids the selection of steel forming grade and process parameters suitable to specific applications. This methodology was adapted from the methodology already widely applied in the automobile industry, and it consists about mechanical properties study (yield strength, tensile strength, tensile/yield ratio, total elongation, strain-hardening index, normal and planar plastic anisotropy ratio, hardness, roughness) and simulative tests analysis (forming limit diagrams – FLD's) looking for the best balance between fulfillment the product requirements and the process needs. The work was divided in two main steps: i) FLD's attainment in laboratory and ii) strain distributions attainment in one specific parts to evaluate the effect of the blank-holder force and type of lubrication.*

Keywords: *Formability, FLD, Sheet metal forming*