



**37<sup>th</sup> SENAFOR**

*21<sup>th</sup> International Forging Conference*

*20<sup>th</sup> National Sheet Metal Forming Conference / 7<sup>th</sup> International Sheet Metal Forming Conference / 4<sup>th</sup> BrDDRG Congress*

*7<sup>th</sup> International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS*

*International Conference on Surface Engineering in Material Forming*

**Centro de Eventos do Hotel Continental Porto Alegre/RS**

**October 4-6, 2017**

## **Avaliação do Limite de Estricção do Aço Dual Phase DP 600 Através da Curva Limite de Conformação**

Lima. Edimar <sup>(1)</sup>

Marcondes. Paulo V. P. <sup>(2)</sup>

Chemin Filho. Raviilson A. <sup>(3)</sup>

### **RESUMO**

Atualmente na área de conformação de chapas, espera-se obter o máximo de alongamento com o mínimo de defeitos. Para este fim, são consideradas CLCs (Curvas Limite de Conformação) das chapas metálicas, as quais fornecem uma condição adequada para o limite de estampagem do material, bastando trabalhar em regiões inferiores a elas. Os parâmetros da máquina de trabalho, como aquecimento do óleo e de sistemas, raramente são considerados para levantamento das CLCs, mas estes apresentam influência significativa no processo. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi a adequação da máquina de ensaios para a obtenção da deformação de chapas metálicas no início da estricção, buscando assim um resultado mais preciso da conformabilidade dos principais materiais utilizados na indústria, em especial os aços avançados de alta resistência. Inicialmente foi realizada uma análise da máquina de ensaios onde, aproveitando os sensores de deslocamento e pressão de óleo presentes, determinou-se uma nova programação de controle no CLP (Controlador Lógico Programável), afim de parametrizar pontos que antecedem a ruptura da chapa durante o ensaio de estampagem. Um problema observado, porém, foi que a variação de temperatura do óleo hidráulico influenciou na padronização destes pontos. Desta forma, foram realizados testes de estampagem em diferentes condições de aquecimento da máquina, tornando possível a definição de uma condição precisa de parada da máquina no ponto de estricção do material, sem a influência de parâmetros associados ao equipamento. Nessas condições foi determinada a CLC do aço dual phase DP600 até a sua ruptura e, posteriormente, até o ponto de início da sua estricção, o que permitiu a definição do real limite de conformabilidade deste material. Além desta conclusão quanto ao comportamento do material, considerando os processos industriais, os resultados obtidos permitem ainda a determinação de pontos de ajuste de máquinas mais adequados aos limites de deformação no material.

**Palavras-chave: Ensaio Nakazima. Curva CLC. Aços Dual-Phase.**

<sup>(1)</sup> Mestrando, Universidade Federal do Paraná, edimar.lima@ufpr.br.

<sup>(2)</sup> Prof. Dr.; Universidade Federal do Paraná, marcondes@ufpr.br.

<sup>(3)</sup> Prof. Dr.; Universidade Federal do Paraná, raviilson@ufpr.br.

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria automotiva tem buscado constantemente novos materiais para suprir a sua demanda por melhoria na segurança veicular, redução na emissão de poluentes e melhoria no design, buscando sempre baixos custos de produção. Procurando soluções para este mercado, surgiram os aços avançados de alta resistência no final dos anos 90, de acordo com Keeler e Menachem (2014). Utilizando elementos de liga e um processo de fabricação controlado, obtêm-se materiais com elevada resistência mecânica e boa conformabilidade. Materiais que possuem diferentes fases em sua microestrutura e fases que sofrem transformações durante o processo de conformação e aquecimento fazem parte desta família chamada AHSS (advanced high strength steels). Nesta família estão os aços Dual Phase (DP), Complex-Phase (CP), Ferritic-Bainitic (FB), Martensitic (MS ou MART), Transformation-Induced Plasticity (TRIP), Hot-Formed (HF) e o Twinning-Induced Plasticity (TWIP). Estes aços são obtidos com um processo de fabricação das chapas de aço cuidadosamente controlado, de maneira que a taxa de resfriamento e os elementos de liga presentes foram uma microestrutura com quantidades definidas de martensita, bainita, austenita retida e ferrita.

Em estudo apresentado por Chemin Filho (2011), foram feitos ensaios de estampabilidade com o método proposto por Nakazima utilizando o aço DP600. Após a construção da curva CLC deste material, a ferramenta foi modificada, retirando-se o draw-bead de maneira que o material pudesse escoar para dentro da matriz. Foi verificada então uma modificação no comportamento da curva CLC obtida para diferentes cargas de prensa chapas, com ganho em estampabilidade para cargas elevadas no prensa chapas e uma perda significativa quando baixa carga no prensa chapas deixou uma quantidade maior de material escoar para dentro da matriz.

Foi concluído no trabalho de Chemin Filho (2011) que esta perda de estampabilidade está associada à fragilização do material, que sofre uma estricção localizada quando dobra sobre o raio da matriz, em consequência do escoamento do material proporcionado pela redução da carga no prensa chapas.

Considerando o aço DP600, foi estudado um método de ajuste da prensa hidráulica para maior precisão nos limites de deformação do material, buscando o ponto de estricção para levantamento e análise de curva CLC, propondo parametrizar processos industriais.

## 2. METODOLOGIA

Inicialmente a prensa hidráulica foi estudada para verificar o funcionamento por completo de sensores, CLP (Controlador Lógico Programável) e Software, que fazem parte do sistema de acionamento das válvulas hidráulicas e monitoramento. Os sensores são responsáveis por monitorar o deslocamento do punção hemisférico e da linha de pressão hidráulica do mesmo.

Para o ensaio Nakazima, é usado originalmente um punção hemisférico de raio 50mm, com matriz reta e draw bead, porém, o conjunto utilizado (modificada por Chemin Filho, 2011), não possui draw-bead, pois foi testada pelo autor e com a aplicação de 80ton de prensa chapas, e obteve-se resultados similares ao ensaio com draw-bead, dessa forma, descartou-se a exigência deste.

Definidos o sistema, tratou-se de definir parâmetros de monitoramento durante os ensaios, sendo que para esta aplicação o software de controle possui uma função, onde é possível visualizar e salvar os valores obtidos nos sensores com intervalos de tempo de 100ms.

### 2.1 Preparação das Amostras

O ensaio Nakazima prevê um total de dezoito corpos de prova, todos com 200mm de comprimento e largura que varia de 40mm à 200mm, contudo, devido a quantidade de

possíveis ensaios que seriam necessários para caracterização da máquina, foram utilizados oito corpos, quantidade considerada suficiente para o propósito esperado. Estes corpos foram definidos nas medidas 25mm, 50mm, 75mm 100mm, 120mm, 150mm, 175mm e 200mm, todos cortados na guilhotina. Apesar de não serem as mesmas dimensões sugeridas pela norma ISO 12004-1:2008, esta norma prevê a utilização de corpos de prova retangulares de maneira a simplificar o procedimento experimental.

Os corpos de prova passaram por impressão da malha de círculos na sua superfície, destinada à medição da deformação sofrida pelo material após a estampagem. O processo utilizado foi a serigrafia, a qual trata-se de aplicação de tinta através de uma tela, designada a este fim e com o desenho da malha desejada. Somente a tinta utilizada, do tipo vinílica de cor preta, não é suficiente para uma marcação eficiente, pois a superfície da amostra não adere a esta tinta com facilidade. Para solucionar este problema, foi adicionado Ácido Nítrico, na proporção de 10% em relação ao volume da tinta. Este ácido melhora a aderência da tinta à superfície do material, resultando em malhas perfeitas antes e depois do ensaio.

## 2.2 Levantamento da CLC até o limite de ruptura

O primeiro ensaio realizado baseou-se no levantamento da CLC levando os corpos a ruptura. Cada amostra foi colocada na prensa com uma força de prensa chapas de 80ton, e deformada até perceber-se a ruptura por meio de queda de pressão do sistema hidráulico. Com este ensaio, buscou-se levantar uma curva CLC para validar com a curva obtida por Chemin (2011).

Durante os ensaios, monitorou-se o deslocamento e pressão hidráulica do punção, estes dados são o segundo objetivo deste, pois com eles é possível encontrar parâmetros da máquina no ponto da ruptura, ou seja, faz-se o ensaio até a ruptura e analisa-se como foram os dados de pressão hidráulica e deslocamento do punção neste ponto.

## 2.3 Ensaio até o limite de estrição

Com os valores de máquina (pressão e deslocamento) levantados para o ponto de ruptura, analisou-se que o ponto de estrição deveria representar valores ligeiramente inferiores. Dessa forma, estimou-se um valor de variação para testes onde uma redução de 1% a cada ensaio deveria representar valores satisfatórios. Então, considerando os valores de máquina obtidos para a ruptura como 100%, reduziu-se este gradativamente até que o ponto de estrição fosse percebido visualmente.

Estes valores foram atribuídos ao software de controle da máquina, tornando a parada do ensaio totalmente automática, ou seja, quando a pressão hidráulica ou o deslocamento do punção alcancem os valores determinados o ensaio é interrompido, e a amostra analisada visualmente.

## 2.4 Ensaios com temperatura controlada

Observou-se que alguns parâmetros não monitorados poderiam interferir nos ensaios, um deles a temperatura hidráulica da máquina poderia interferir na leitura dos sensores. Com isso, novos ensaios foram realizados afim de verificar se a temperatura realmente interferia nos resultados.

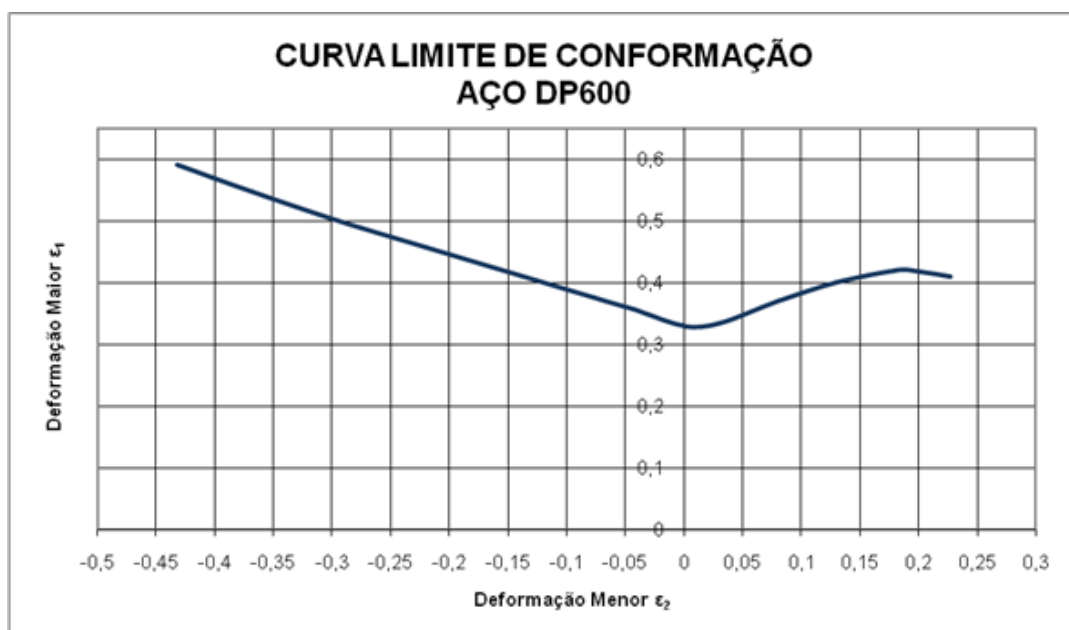
Inicialmente monitorou-se a temperatura da máquina em três pontos, considerados mais críticos, sendo eles a bomba hidráulica, o bloco de entrada, que distribui para as válvulas direcionais, e o sensor de pressão hidráulica que envia a medida ao CLP. Foi necessário verificar a qual temperatura os três pontos estabilizassem, pois a partir deste, não deveria haver variações significativas. Atribuiu-se de modo empírico um monitoramento a cada 05 minutos nesses três pontos, até que a temperatura não mais alterasse. O procedimento ocorreu durante 105 minutos (01 hora e 45 minutos), porém, com 70 minutos a temperatura alcançou a estabilidade sem variações posteriores.

Novos ensaios levando os corpos à ruptura foram conduzidos partindo da temperatura estável, ou seja, o ensaio iniciava nestas condições e aguarda-se até que os pontos medidos se estabilizassem para um novo ensaio. O objetivo foi verificar se a temperatura dos elementos da prensa inferiria no resultado da CLC até a ruptura. Assim como todos os outros ensaios, os valores de pressão hidráulica e deslocamento do punção foram monitoradas e registradas para análise.

Seguindo os parâmetros de máquina obtidos nos ensaios até a ruptura com temperatura controlada, alimentou-se o software de controle da máquina com 95% da pressão, e 98% do valor de deslocamento dos valores obtidos nos ensaios. Estes valores foram atribuídos com base nos resultados dos ensaios descritos no item 2.2, que apresentaram resultado satisfatório nesses percentuais

### 3. RESULTADOS

Os ensaios de estampagem Nakazima, nesta etapa realizados segundo o método tradicional proposto pelo autor, tiveram dois focos importantes no estudo. O primeiro visando finalizar a caracterização do aço DP600, material de estudo nesta pesquisa, e o segundo com o objetivo de gerar uma base comparativa para os testes subsequentes, ou seja, os resultados dos ensaios Nakazima com interrupção no momento da estrição, que foram comparados aos resultados dos ensaios pelo método tradicional para verificação dos efeitos produzidos por esta variável de processo.



**Figura 01** – Curva Limite de conformação do aço DP600, obtida através do ensaio de estampagem Nakazima. Chemin (2011).

#### 3.1 Determinação do Ponto de Estricção do Material

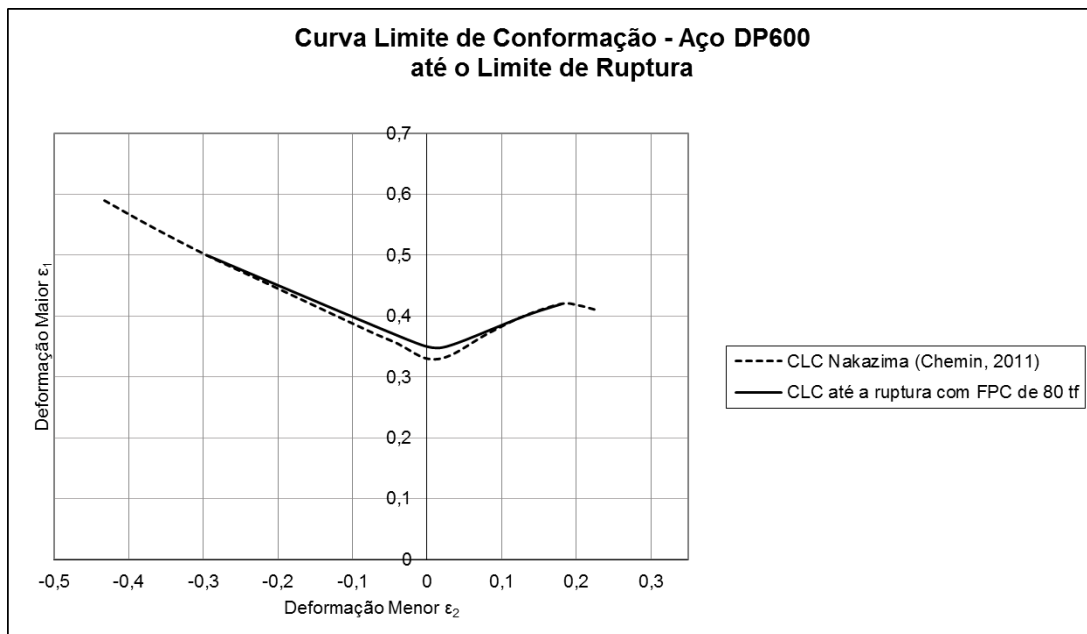
Ao realizar os ensaios para levantar a CLC de caracterização e comparação com o fornecido com o fabricante, os parâmetros da máquina (mencionados no item 2.2) foram resgistrados.

Inicialmente a hipótese era de que quando o material alcançasse parâmetros da máquina próximos aos levantados durante o ensaio até a ruptura, estaria no início da ruptura ou na estrição visível, dessa forma, o software do CLP foi alimentado com os dados obtidos, seguindo a descrição do item 2.3, para verificar o proposto. A variação de valores limite permitiu a parada eficiente em pontos onde o início da estrição ocorreu visivelmente, sendo

os valores mais eficientes na faixa de 95% de pressão hidráulica e 98% de deslocamento do punção.

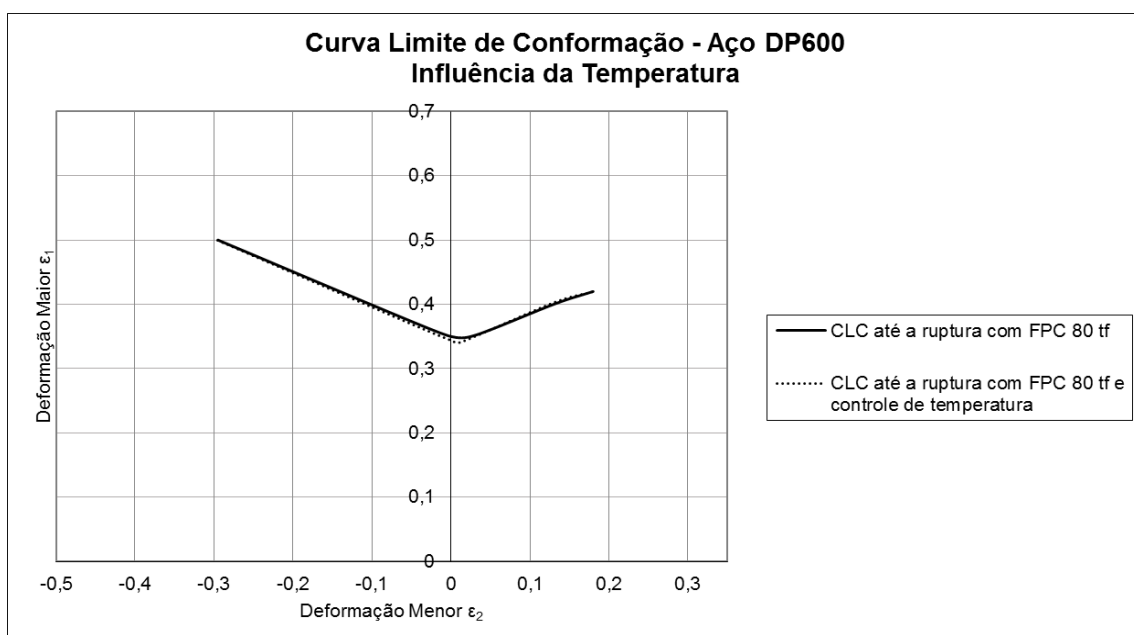
### 3.2 Curva Limite de Conformação na estrição do material

Primeiramente realizou-se a comparação da curva obtida pelo método Nakazima tradicional do aço DP600, determinada por Chemin (2011), com a curva CLC obtida através do ensaio de estampagem com o ferramental sem “draw bead”. A figura 02 mostra a comparação entre essas curvas, onde pode-se observar uma proximidade entre elas.



**Figura 02** – Comparação das curvas obtidas por Chemin (2011) e pelo autor (2017).

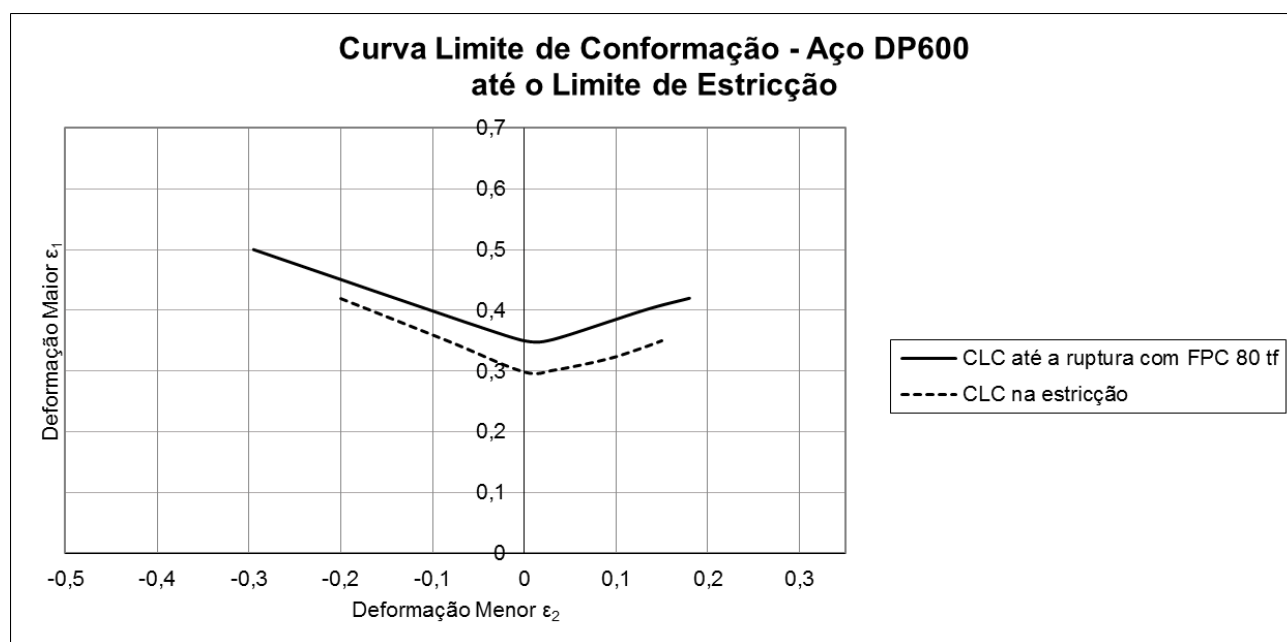
A figura 03 mostra uma comparação entre as curvas CLC obtidas com a carga de prensa-chapas de 80 ton, com e sem o monitoramento de temperatura da máquina. Observa-se que a CLC ficou equivalente à condição sem o controle de temperatura, ou seja, pode-se dizer o aquecimento imposto pela bomba ao óleo não está acarretando numa variação de pressão hidráulica ao sistema suficientemente grande, a ponto de afetar a determinação da conformabilidade do aço.



**Figura 03** – Comparação das curvas obtidas com e sem controle de temperatura.

De acordo com a condição observada na figura 02, ou seja, uma diferença inferior a 0,02 na deformação maior no estado plano de deformações entre a CLC obtida pelo método Nakazima e com carga de 80 toneladas do prensa-chapas, e a não influência da temperatura da máquina nos ensaios de estampagem (observado na figura 03), pode-se admitir a curva CLC determinada com a carga de prensa-chapas de 80 ton como base de comparação para os demais ensaios.

Desta forma, realizaram-se ensaios de estampagem com a carga de 80 ton no prensa-chapas, controlando o ponto de parada do punção 5% antes do limite máximo de pressão hidráulica e 2 % antes do limite máximo de deslocamento do punção, em relação aos ensaios realizados até a ruptura do material.

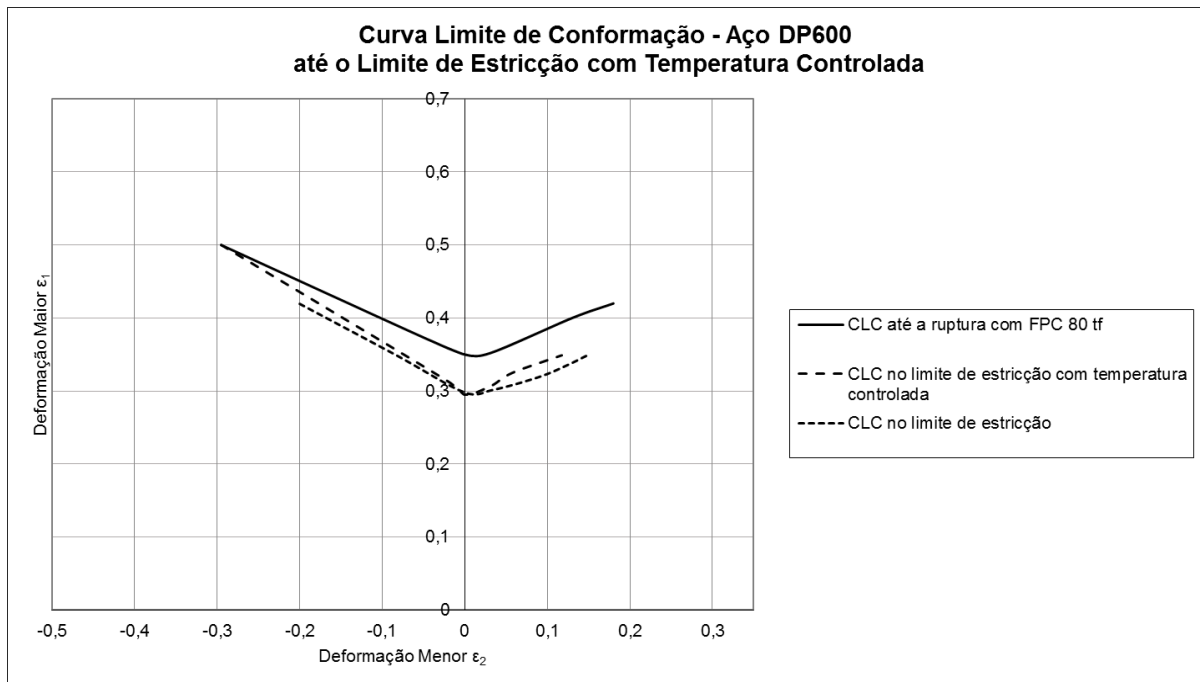


**Figura 04** – Comparação da curva obtida até o limite de estricção com a curva levantada para o aço DP600

A figura 04 mostra a redução sofrida na CLC do aço DP600, quando consideradas as deformações máximas no ponto de estricção do material, em comparação a CLC obtida na condição de ruptura do material. Essa diferença chega a 0,05 na deformação maior no estado plano de deformações, diferença esta que aumenta para o modo de deformação por estiramento e diminui no modo de deformação por embutimento profundo. Pode-se dizer assim que, na condição de estiramento há uma diferença mais acentuada entre os limites de estricção e ruptura do que no embutimento profundo, onde essa diferença tende a diminuir para deformações menores mais acentuadas.

Foram realizados ainda testes de estampagem com a mesma condição de parada no ponto de estricção do material, porém, com o controle de temperatura, como mostra a figura 05.

Nesta condição, pode-se observar uma pequena variação entre as curvas que caracterizam o limite de estricção do material, com e sem o controle de temperatura da máquina. No estado plano de deformações praticamente inexistente diferença entre as curvas, e para o modo de embutimento profundo essa variação foi muito pequena. Para o modo de deformação por estiramento, no entanto, houve uma diferença mais acentuada, na ordem de 0,02 para a deformação maior.



**Figura 05** – Comparação da curva obtida até o limite de estricção com temperatura controlada.

Isso se justifica pelo fato de que o nível de pressão hidráulica no estiramento é maior do que no embutimento profundo, ou seja, no estiramento a ação do prensa-chapas é maior no flange da chapa, exigindo maior força para a estampagem da mesma. Dessa forma é no estiramento que a variação de viscosidade do óleo, decorrente aquecimento imposto a ele, resulta numa maior variação na CLC. Nos ensaios até a ruptura, a diferença entre a CLC com e sem o controle de temperatura inexistiu, porque nessa condição o material já havia excedido o seu limite de estricção, ou seja, já havia ocorrido o colapso metaúrgico da chapa, tornando imperceptível a influência da viscosidade do óleo da máquina sobre o limite de conformação do aço DP600.

#### 4. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos para os ensaios de estampagem do aço DP 600, pode-se dizer que o limite de estricção do material ficou aproximadamente 17% menor do que o seu limite de ruptura, de acordo com as CLC's levantadas nestas condições. Desta forma, tornou-se possível não apenas avaliar com exatidão a diferença entre o limite de estricção e de ruptura do material, mas definir com precisão o limite prático de conformabilidade do aço estudado, permitindo uma avaliação mais segura dos processos industriais. Tanto em projetos de matrizes como em ajustes de ferramentas, por exemplo, o sucesso da fabricação é alcançado desde que a chapa metálica se deforme em níveis seguros, abaixo do início da estricção do aço e, de acordo com essa premissa, os resultados apresentados definem claramente esse limite operacional.

Outra importante conclusão relativa ao estudo realizado, diz respeito à influência da máquina no processo de conformação da chapa metálica. Observou-se que, após o aquecimento da prensa, houve uma variação da CLC levantada no limite de estricção do aço DP600, caracterizada por um pequeno aumento no limite de conformabilidade do material. Isso deveu-se a influência do calor absorvido pelo óleo, que causou uma variação das suas propriedades e, como consequência disso, levou o material a uma maior deformação até que se atingisse o limite de pressão hidráulica, programado para a parada do ensaio no limite de estricção do aço.

Sendo assim, fica comprovado que certas variáveis inerentes ao equipamento influenciam diretamente o processo de conformação da chapa, o que, na prática, não

costuma ser observado na indústria. Observa-se assim que o estudo da influência de fatores decorrentes da máquina no processo, pode ser algo de grande relevância, não apenas para a solução de problemas na conformação mecânica, mas também para o desenvolvimento mais preciso de projetos de ferramentas. Baseado nisso, deve-se ressaltar ainda a importância de um estudo de possíveis melhorias das máquinas, visando uma melhora no processo, além de um plano de manutenção eficiente para que se mantenha o equipamento em condições adequadas de trabalho.

## Referências

- [1] CHEMIN FILHO, R. A. Estudo da fratura de aços de nova geração DP600 através da variação de pressão no prensa-chapas. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná**, Curitiba, 2011.
- [2] EN ISO 12004-2. Metallic materials - Sheet and Strip - Determination of forming-limit curve. [S.l.]: European Committee for standardization, 2008.
- [3] KEELER, S.; MENACHEM, K. Advanced High-Strength Steels Application Guidelines. **Worldautosteel**, 2014. Disponível em: <[www.worldautosteel.org](http://www.worldautosteel.org)>. Acesso em: 2015.
- [4] KIM, J.-H. et al. Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels. **Materials Science & Engineering A**, Changwon, South Korea, n. 559, 2012. ISSN 222-231.
- [5] SCHAEFFLER, D. J.; VINEBERG, E. J. **Metalworking: Sheet Forming - Troubleshooting Formability Problems Using Strain Analysis**. Ohio: ASM International, v. Volume 14B, 2006.
- [6] WAGONER, R. H. et al. The shear fracture of dual-phase steel. **International Journal of Plasticity**, n. 27, 2011.
- [7] WANG, W. et al. Study on stretch bendability and shear fracture of 800 MPa dual phase. **Materials and Design**, Shanghai, China, 2014.
- [8] Z. MARCINIAK, J. L. D. S. J. H. **Mechanics of Sheet Metal Forming**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.