

ESTUDO DO PROCESSO DE EMBUTIMENTO EM CHAPAS DE AÇO DP 350/600 E HSLA 350/440 VIA SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Laísa da Silva Teixeira

Ravilson Antônio Chemin Filho

Universidade Federal do Paraná – Av. Cel. Francisco H. Dos Santos, 100.

laisa.teixeira@ufpr.br

ravilson@ufpr.br

Sérgio Fernando Lajarin

Universidade Federal do Paraná – Av. Cel. Francisco H. Dos Santos, 100.

espanhol@ufpr.br

Paulo Victor Prestes Marcondes

Universidade Federal do Paraná – Av. Cel. Francisco H. Dos Santos, 100.

marcondes@ufpr.br

Resumo. Este trabalho consiste na análise do comportamento dos aços HSLA 350/440 (High Strength Low-Alloy – alta resistência e baixa liga) e DP 350/600 (Dual Phase – bifásico) quando submetidos ao ensaio de embutimento profundo em uma simulação numérica. Para realização da simulação computacional, o problema foi modelado no software abaqus, possibilitando uma análise por elementos finitos sobre a chapa. Na simulação, foram inseridas as propriedades dos materiais, oriundas das curvas de escoamento geradas no ensaio de tração uniaxial. Para análise dos resultados da simulação computacional, foram lidas as tensões principais resultantes, identificando as zonas mais críticas da chapa ao final do processo, e com maior probabilidade de ocorrência de falhas. Esses resultados foram observados em conjunto com imagens da microestrutura desses aços, obtidas pela microscopia ótica dos corpos de prova deformados do ensaio de tração. Desta forma, foi possível concluir que ambos os materiais apresentaram elevada resistência para uso nesse processo de conformação, fato justificado com base em suas propriedades e mecanismos de aumento resistência. Ao confrontar os resultados da simulação com as imagens de microscopia ótica, tornou-se possível um melhor entendimento dos dados, bem como a visualização direta do efeito da microestrutura sobre as propriedades dos aços.

Palavras chave: HSLA. DP. Simulação Numérica. Embutimento. Microestrutura.

1. INTRODUÇÃO

A indústria automotiva busca, constantemente, novos meios para suprir a sua demanda por melhoria no desempenho dos veículos, na segurança dos seus ocupantes, redução na emissão de poluentes e melhoria no design, sempre associados a uma melhor produtividade e redução dos custos de produção. Diante dessa necessidade, torna-se fundamental o aprofundamento nos estudos relacionados aos processos de conformação de chapas metálicas, uma vez que a maior parte dos componentes que integram a estrutura e carroceria dos veículos atuais são produzidos por estampagem. Nesse processo evolutivo, um grande avanço ocorreu com o surgimento dos aços avançados de alta resistência, quando foram criados materiais mais eficientes no atendimento aos requisitos operacionais impostos a eles na estampagem. Diante dessas novas matérias-primas, estudos relativos ao comportamento desses materiais e uma precisa avaliação do seu limite de conformabilidade, tornaram-se fundamentais para otimização da produção de um determinado componente.

Outro meio fundamental para o ganho de tempo na avaliação da conformabilidade do material e no desenvolvimento de projetos na área de estampagem, é a utilização de softwares que simulam as operações de conformação da chapa metálica.

Com base no exposto acima diversos autores podem ser citados, como o trabalho de Makinouchi (1996), em que a simulação numérica através do método dos elementos finitos já vinha sendo bastante explorada para prever diversos fatores da conformação de peças antes da realização do projeto final. Através da simulação, torna-se possível prever o comportamento do material, regiões prováveis de falha após o processo, entre outros fatores, garantindo à indústria a otimização de tempo e até mesmo redução de custos em seus projetos.

Quanto aos novos aços utilizados pela indústria automotiva, que possibilitam a redução de peso dos veículos sem, no entanto, acarretar em uma perda de resistência, o primeiro desenvolvido foi o HSLA (High Strength Low-Alloy – alta resistência e baixa liga), que passou a ter destaque na indústria devido a essa característica, segundo Baluch *et al* (2014).

Através dos avanços tecnológicos sobre o aço HSLA foi possível o desenvolvimento do aço DP (Dual Phase – Bifásico) que, por sua vez, deu início a um novo grupo de materiais: os AAAR (Aços Avançados de Alta Resistência).

Esse grupo de materiais, mais resistentes que o anterior, tornaram possível uma redução ainda maior no peso dos veículos, sendo os precursores no desenvolvimento de outros aços que compõe este grupo (Baluch *et al*, 2014).

Segundo Matlock *et al* (2012), o uso dos AAAR na indústria automobilística norte-americana cresceu aproximadamente 8% no ano de 2011, sendo que na época do estudo, havia também a projeção de crescimento em aproximadamente 15% até o ano de 2020.

Com base nisso, o presente trabalho tem por objetivo analisar o comportamento dos aços DP350/600 e HSLA350/440 quando submetidos ao processo de embutimento profundo em temperatura ambiente, via simulação numérica, e confrontar o resultado da simulação com a microestrutura dos materiais analisados, obtidas através de microscopia ótica. Desta forma, buscou-se entendimento mais preciso dos mecanismos de aumento de resistência desses materiais, que estão associados ao processo de deformação impostos a eles.

Conforme os dados obtidos em estudos anteriores (Diniz, 2019), espera-se que estes materiais apresentem uma boa resposta ao procedimento, ou seja, devendo apresentar alta deformabilidade e boa resistência mecânica, uma vez que foram desenvolvidos para atender essa característica dos processos de conformação, suprimindo aos anseios da indústria automotiva, entre outros aspectos (Gorni, 2009).

2. METODOLOGIA

Em um estudo anterior, Diniz, *et al* (2019), realizou ensaios de tração uniaxial sobre os materiais HSLA350/440 e DP350/600 em diferentes temperaturas, obtendo assim as curvas de tensão x deformação apresentadas na Fig. 1 e Fig. 2 a seguir.

Conforme Callister, W., através da curva de tensão x deformação de um material é possível extrair suas propriedades elásticas mais importantes, como a tensão de escoamento, assim como seus dados plásticos e tensão de ruptura.

Através da curva tensão x deformação a 30°C dos aços HSLA350/440 e DP350/600, foram extraídas as propriedades necessárias para a realização da simulação numérica do processo de embutimento profundo.

Na Figura 1 são mostradas as curvas obtidas dos ensaios de tração realizados sobre o HSLA 350/440. Na Tabela 1, os dados plásticos da curva tensão x deformação a 30° do HSLA foram transcritos com base na curva obtida neste ensaio.

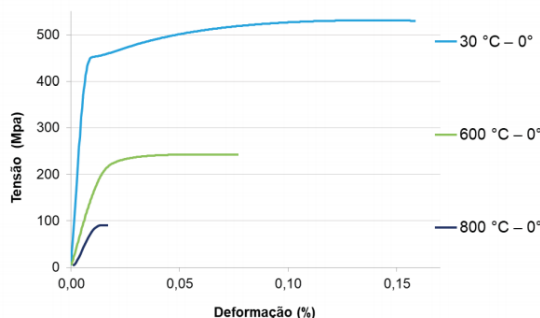


Figura 1 – Curvas verdadeiras de tensão x deformação do HSLA (Diniz, 2019).

Tabela 1 – Dados plásticos do HSLA (autora, 2021)

HSLA (t = 30°)	
σ (Mpa)	d (%)
450	0
500	0.05
510	0.1
520	0.15

A curva tensão x deformação possibilitou também a obtenção da tensão de escoamento do aço HSLA, ou seja, o valor máximo sob o qual o material pode se deformar de forma elástica:

$$\sigma_{esc} = 450 \text{ MPa}$$

Já no caso do DP 350/600, após o ensaio de tração uniaxial, obteve-se as curvas observadas na Fig. 2.

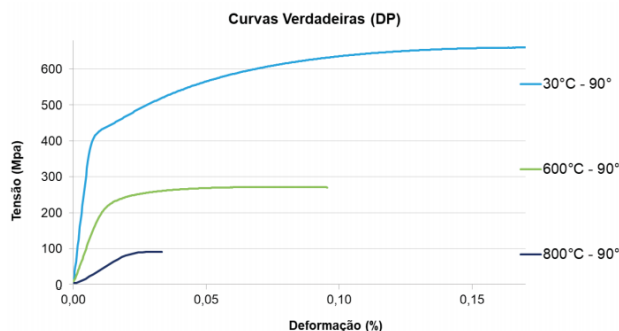


Figura 2 – Curvas verdadeiras de tensão x deformação do DP (Diniz, 2019).

Através da curva de escoamento a 30°C da Fig. 2, foi possível descrever os dados plásticos para o aço DP 350/600 conforme a Tab. 2, bem como sua tensão de escoamento.

Tabela 2 – Dados plásticos do DP (Autora, 2021).

DP (t = 30°)	
σ (Mpa)	d (%)
410	0
550	0.05
610	0.1
630	0.15

$$\sigma_{esc} = 410 \text{ MPa}$$

A simulação numérica do ensaio de embutimento profundo foi realizada através do *software abaqus*, com licença estudantil, edição 2020.

Este processo envolve o uso de três elementos descritos como corpos rígidos, sendo elas: matriz, punção e prensa-chapas. Sob a chapa foram aplicadas a malha e as propriedades dos materiais listadas anteriormente, para análise através do método dos elementos finitos.

As propriedades dos materiais foram descritas no software conforme os valores listados na Tab. 1 e Tab. 2, descrevendo assim seu comportamento plástico, enquanto o comportamento elástico foi definido como a tensão de escoamento de cada um dos materiais, demonstradas acima.

Com relação aos parâmetros do punção, força e avanço, necessários para esta simulação, foram utilizados os valores observados na Tab. 3. Esses valores foram disponibilizados por Marcondes, 2019, e estão disponíveis em <ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC143/Aulas%20Remotas/>, acessado em fev/2021.

Tabela 3 – Parâmetros aplicados no punção.

Força (N)	Profundidade de avanço (mm)
10000	70

Para ambas as simulações realizadas (DP e HSLA), foram utilizados os mesmos parâmetros do punção, possibilitando uma comparação mais direta entre os resultados encontrados.

A análise dos resultados da simulação foi realizada através da leitura das tensões máximas de Von Mises, conforme trabalhos anteriores em simulação numérica realizados por Lajarin, *et al* (2009?), e as tensões plásticas de estiramento, sugerido no material disponível em <ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC143/Aulas%20Remotas/>, acessado em fev/2021 e também no livro *Abaqus 6.11 Glossary*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na simulação de embutimento profundo com o HSLA350/440, foram gerados os resultados observados na Fig. 3 e Fig. 4, conforme abaixo:

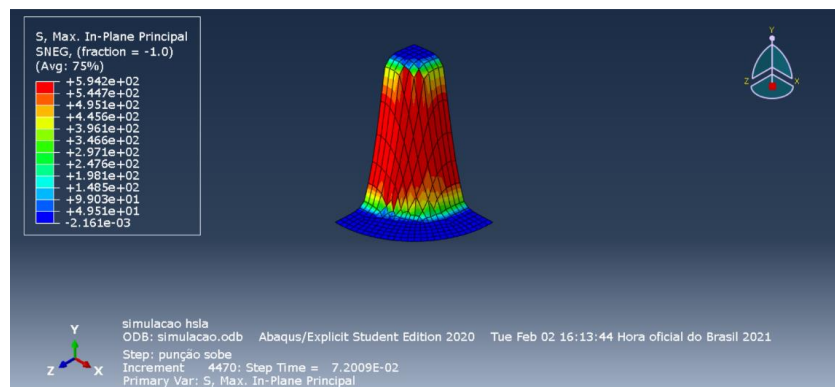


Figura 3 – Tensões máximas de Von Mises analisadas no HSLA. (Autora, 2021)

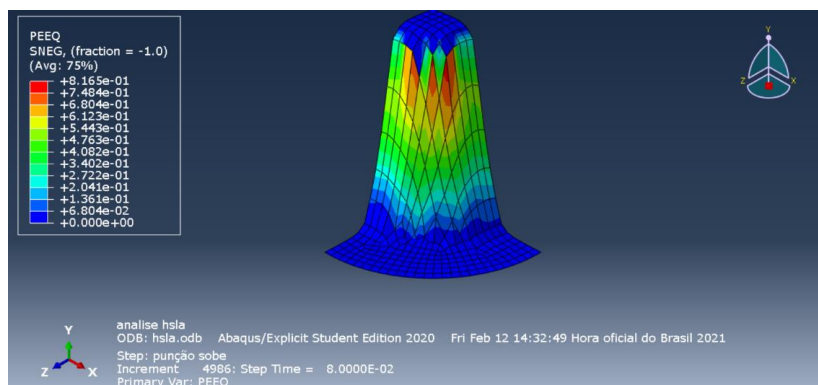


Figura 4 – Tensões plásticas de estiramento analisadas no HSLA (Autora, 2021)

Com base nessas duas imagens é possível avaliar: as tensões máximas de Von Mises que foram submetidas sobre a peça no ensaio de embutimento profundo (Fig. 3); e, também, identificar a região mais provável de falha através da análise da tensão plástica de estiramento, através da Fig. 4.

Os valores máximos para a tensão de Von Mises foram comparados à tensão de ruptura do HSLA na Tab. 4:

Tabela 4 – Comparação dos dados de tensão do HSLA (Autora, 2021)

Tensão de ruptura do HSLA (MPa) (Retirada do gráfico de tensão x deformação – Fig. 1)	Tensão máxima de Von Mises (MPa) (Fig. 3)
530	594

Os pontos onde a tensão máxima de Von Mises assume valores superiores à tensão de ruptura coincidem com as regiões destacadas em vermelho na análise da simulação mostrada na Fig. 4, ou seja, regiões com maior probabilidade de ocorrência de falha. No caso do HSLA, a maior probabilidade é de que, caso o experimento físico seja realizado, ocorra de fato uma trinca nessa região.

Essa avaliação é realizada após a inserção apenas das propriedades mecânicas do material no programa *abaqus*, obtidas após a leitura da curva de tensão x deformação, sem, no entanto, assumir todas as particularidades da microestrutura do aço.

A Figura 5 mostra uma imagem obtida através de microscopia ótica do aço HSLA, após submetido ao ensaio de tração à temperatura de 30°.

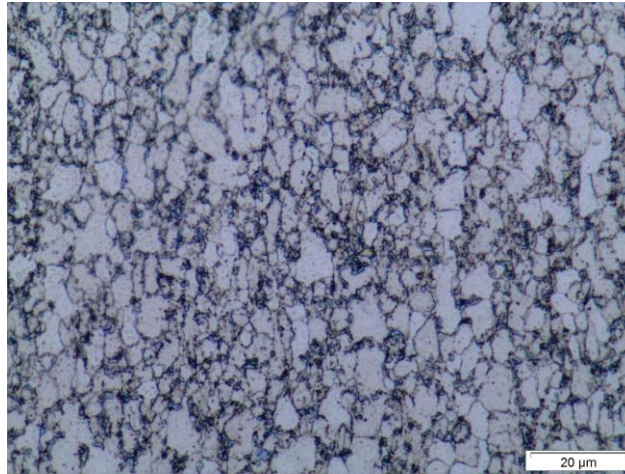


Figura 5 – Microestrutura do HSLA obtida através de microscopia ótica (Diniz, 2019)

No aço HSLA existem dois tipos de endurecimento predominantes: o refino de grão, e o endurecimento por precipitação, que consiste justamente na formação dos carbonetos na microestrutura do aço, segundo Arcelormittal, 2014. Na Figura 5 é possível observar a presença dos carbonetos oriundos da precipitação.

Esses componentes conferem a esse aço a alta resistência e boa conformabilidade, identificados através dos valores de suas propriedades mecânicas. Ao sofrer um processo de conformação a frio, o material é submetido a mais um mecanismo de aumento de resistência, o encruamento, que consiste justamente no endurecimento do material quando submetido a uma deformação plástica, conforme Bresciani, 2017.

Para o aço DP 350/600, os resultados da simulação numérica são observados na Fig. 6 e Fig. 7 listadas abaixo.

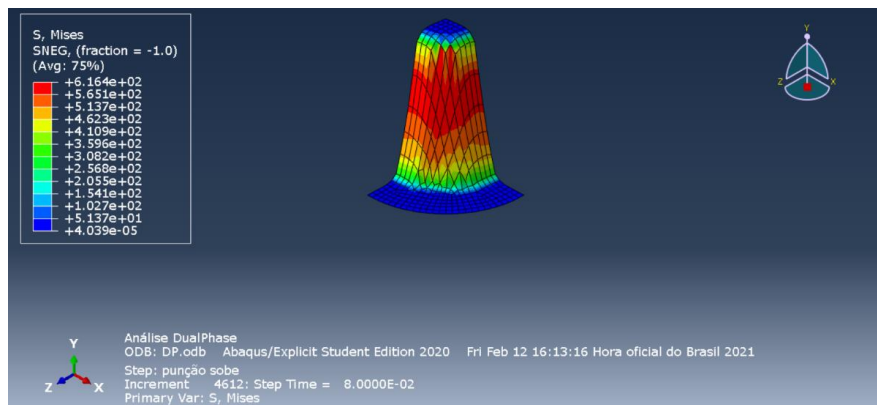


Figura 6 – Tensões de Von Misses obtidas para a análise do DP (Autora, 2021)

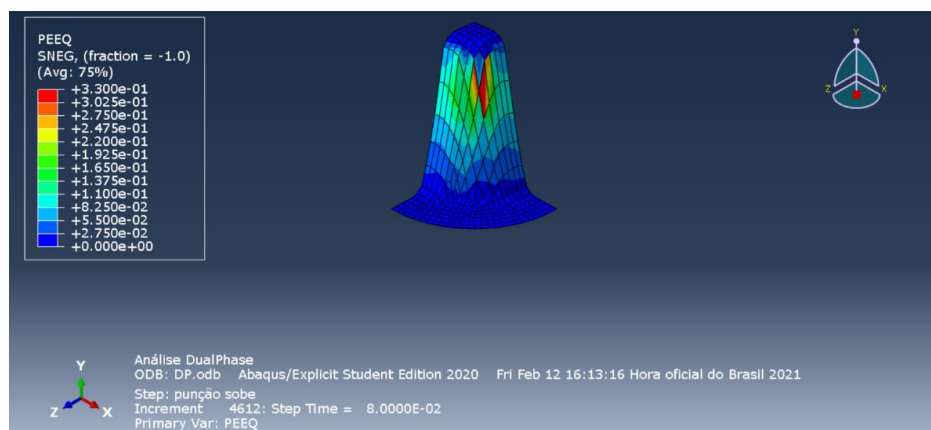


Figura 7 – Tensões plásticas de estiramento obtidas para a análise do DP (Autora, 2021)

Através da Figura 6, é possível visualizar que a peça foi submetida a elevadas tensões também na região central da peça, incluindo tensões próximas à tensão de ruptura do material. Os valores comparativos da tensão de ruptura do material e a tensão máxima de Von Mises obtida no ensaio se encontram na Tab. 5.

Tabela 5 – Comparativo das tensões obtidas para o DP (Autora, 2021).

Tensão de ruptura do DP (MPa) (Retirada do gráfico de tensão x deformação – figura 2)	Tensão máxima de Von Mises (MPa) (figura 6)
630	616

Na Figura 7 é possível verificar as regiões mais prováveis de aparecimento de fissuras, destacadas em vermelho na imagem. Ao comparar os valores mostrados na Tab. 5, porém, vemos que a tensão máxima de Von Mises atingida nesse ensaio não supera sua tensão de ruptura do aço DP, lida em sua curva de tensão x deformação.

Nesse caso, é esperado que, caso seja realizado um ensaio físico, utilizando todas as condições inseridas na simulação numérica, não ocorra uma trinca na região mostrada em vermelho na Fig. 7. Porém, o material ainda assim foi bastante solicitado mecanicamente, sendo provável a ocorrência de uma estricção nessa região em destaque.

Na Figura 8, é possível visualizar a microestrutura do DP, para melhor entendimento de quais mecanismos levam o aço a possuir alta resistência e como consequência, melhor entendimento dos resultados da simulação.

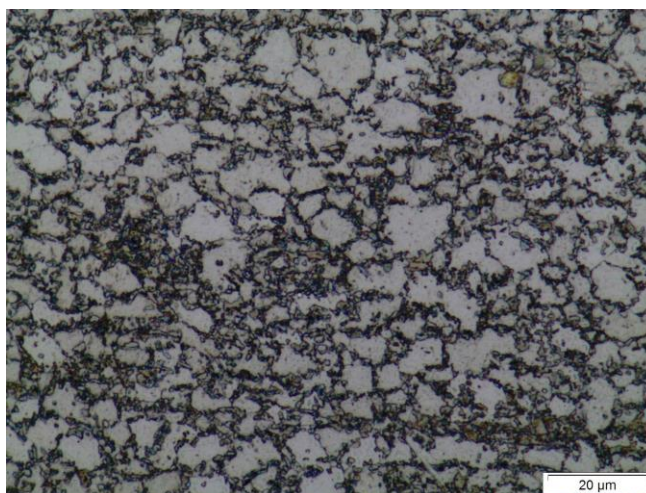


Figura 8 – Microestrutura do DP analisado através de microscopia ótica (Diniz, 2019).

O processo de endurecimento que torna o DP um aço avançado de alta resistência é o endurecimento pela presença de diferentes fases do carbono no material. É possível observar na Fig. 8 a formação de ilhas de martensita e bainita, que são fases do aço-carbono que proporcionam aumento de dureza e resistência ao material, segundo Souza, 1982 e Hornbogen, 1980.

Assim como citado anteriormente na análise microscópica do aço HSLA, ao conformar à frio este material, ele também será submetido ao encruamento, garantindo um aumento de sua dureza durante e após a realização desse processo.

Além da análise das tensões obtidas na simulação de ambos os aços e a identificação de seus mecanismos de endurecimento na Fig. 5 e Fig. 8, é importante observar também que a região provável de falha, composta pela área destacada em vermelho na Fig. 4 para o aço HSLA e na Fig. 7 para o aço DP, é a região mais provável de falha em um ensaio de embutimento profundo, conforme mencionado no estudo de Keeler, 1965.

4. CONCLUSÃO

A comparação entre os resultados da simulação numérica com a microestrutura dos aços analisados permitiu, de fato, melhor entendimento dos valores atingidos em cada uma das simulações realizadas. Ao observar os dados da simulação numérica, bem como os valores obtidos para as tensões de Von Mises e tensões plásticas de estiramento, ficou evidente que ambos os materiais em estudo apresentaram boa conformabilidade.

O fato da região provável de falha obtida em ambos os ensaios de simulação numérica ser próxima a região de falha esperada para um ensaio de embutimento profundo (conforme observado na literatura), é um fator importante na confirmação da simulação realizada, visto que não foi realizada a experimentação física nesse estudo.

No entanto, para melhor entendimento do processo evolutivo das propriedades mecânicas e microestruturais dos aços durante a deformação plástica, é necessária a realização de ensaios simulativos práticos de embutimento, o que

proporcionará, através de uma nova observação da microestrutura dos aços, a verificação do real efeito do processo no comportamento mecânico do material.

5. REFERÊNCIAS

- ARCELORMITTAL. Catálogo automóvel, 2003.
- BALUCH, N., UDIN, Z. M., ABDULLAH, C. S. Advanced high strength steel in auto industry: an overview. Engineering: Technology and Applied Science Reserch, Vol. 4, No. 4, p. 686-689, 2014.
- BRESCIANI FILHO, B. Conformação mecânica. São Paulo: Escola de Engenharia de Lorena, 2017.
- CALLISTER, William, “Ciência e engenharia dos materiais”, editora LTC – 8ª ed., 2008.
- CHEMIN, Ravilson, Avaliação das deformações de chapas finas e curvas CLC para diferentes geometrias de punções. UFPR, 2014, dissertação de mestrado – departamento de engenharia mecânica (DEMEC).
- DINIZ, Patrícia, Caracterização e análise metalográfica de amostras de aços de alta resistência, submetidas ao ensaio de tração à quente, em diferentes temperaturas. UFPR, 2019, dissertação – mestrado, departamento de engenharia mecânica.
- GORNI, A. A. Aços avançados de alta resistência: Microestrutura e propriedades mecânicas, In 5º Congresso de Corte e Conformação de Metais, Aran da Eventos, 2009, São Paulo.
- HIBBIT, KARLSSON, SORENSEN INC. Abaqus – Manual do Usuário. Versão 6.11, 2011.
- HORNBOGEN, E. et al. Zeitschrift für Metallkunde, 1980.
- KEELER, S.P. Determination of Forming Limits in Automotive Stampings, Society of Automotive Engineers, 1965.
- LAJARIN, S. F., LOURENÇO, H. J., MARCONDES P. V. P., Avaliação experimental e numérica de diferentes condições de atrito na conformação de chapas por estiramento, UFPR, departamento de engenharia mecânica – DEMEC, 2009?.
- MAKINOUCHI, A. Sheet metal forming simulation in industry. Journal of Materials, Processing, Technology, 60, p. 19-26, 1996.
- MARCONDES, P. Curvas Limite de Conformação. Laboratório de Conformação Mecânica (Labconf), DEMEC-UFPR.
- MATLOCK, D. K., SPEER, J. G., MOOR, E., GIBBS, P. J. Recent developments in advanced high strength sheet steels for automotive applications: an overview. Jestech – 15(1) p.1-12, 2012.
- REIS, Leonardo, Estudo dos parâmetros de influência na simulação numérica de estampagem de chapas. UFMG, 2002, dissertação de mestrado – Engenharia Metalúrgica.
- SOUZA, S.A., Ensaios mecânicos de materiais metálicos-fundamentos teóricos e práticos, Ed. Edgard Blucher LTDA., 5a edição, São Paulo, Brasil, 1982.
- SROUR JUNIOR, E. H. Determinação do grau de conformabilidade de chapa de aço para suporte de coluna de direção e identificação de similar nacional. 2002. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Study of deep drawing process on DP 350/600 E HSLA 350/440 steels through numerical simulation and microscopy analysis.

Laísa da Silva Teixeira

Ravilson Antônio Chemin Filho

Federal University of Parana – Av. Cel. Francisco H. Dos Santos, 100.

laisa.teixeira@ufpr.br

ravilson@ufpr.br

Sérgio Fernando Lajarin

Federal University of Parana – Av. Cel. Francisco H. Dos Santos, 100.

espanhol@ufpr.br

Paulo Victor Prestes Marcondes

Federal University of Parana – Av. Cel. Francisco H. Dos Santos, 100.

marcondes@ufpr.br

Abstract. *This work consists in the analysis of the behavior of HSLA350/440 (High Strength Low-Alloy) and DP350/600 (Dual-Phase) steels when subjected to the deep drawing rehearsal on a numeric simulation. To realize the computational study, the problem as well as its components were modeled in abaqus software so the calculation could be made by FEM through the algorithmics of the program. In the simulation, the materials properties obtained through the lecture of the real tension x deformation curve generated in the uniaxial traction rehearsal made above both the steels in ambient temperature (in a previous study) were insert. To analyze the results of the computational simulation the main tensions resulting in the process wore read, identifying critics zones on the sheet in the end of the process as well as the plastic tensions resulting. These results wore observe together with images from optical microscopy of the microstructure of these steels, also obtained in a previous study, after the rehearsal of uniaxial traction. In the end, it was possible conclude that both the materials showed high resistance in this conformation process, event that is justified through its properties and mechanisms of increasing resistance that could be observed in its microstructure.*

Keywords: HSLA, DP, numeric simulation, deep drawing, microstructure

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.