

AVALIAÇÃO DA CONFORMAÇÃO DE AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA NA FABRICAÇÃO DE UMA TRAVESSA DE SUSPENSÃO AUTOMOTIVA*

Edwaldo Ferreira Brandão¹
Jetson Lemos Ferreira²
Maurício Centeno Lobão³
Paulo Roberto Cetlin⁴

Resumo

Os aços avançados de alta resistência (*Advanced High Strength Steels* - AHSS) vêm sendo uma solução atrativa na construção de estruturas automotivas mais leves e seguras, pois combinam alta resistência e boa conformabilidade. Neste trabalho, foram realizadas simulações numéricas e experimentos em escala industrial, com aços fornecidos pela Usiminas, da estampagem de uma travessa dianteira de suspensão automotiva. O objetivo desses experimentos foi avaliar a estampabilidade deste componente, que atualmente é fabricado com o aço de alta resistência baixa liga (HSLA340, 2,0 mm), quando substituído pelos aços *Dual Phase* (DP600, 1,6 e 1,8 mm) e *Transformation Induced Plasticity* (TRIP700, 1,6 mm). As simulações numéricas reproduziram o padrão de deformação destes materiais durante os processos de conformação e o perfil geométrico do componente. A travessa de suspensão automotiva foi estampada com sucesso com os AHSS propostos.

Palavras-chave: *Dual phase*; TRIP; AHSS; Estampagem.

ADVANCED HIGH STRENGTH STEELS FORMING ASSESSMENT IN THE FABRICATION OF A CAR SUSPENSION CROSSMEMBER

Abstract

The advanced high strength steels (AHSS) have been attractive solutions in the construction of lighter and safer automotive structures, because they combine high strength and good formability. In this study, numerical simulations were carried out using the finite element method and physical experiments, utilizing steel supplied by Usiminas, involved the forming of a front crossmember automotive suspension. The purpose of these experiments was to evaluate the formability of this component, which is currently manufactured with high strength low alloy steel (HSLA340, 2.0 mm), when this steel was replaced by Dual Phase steels (DP600, 1.6 and 1.8 mm) and Transformation Induced Plasticity steels (TRIP700, 1.6 mm). The numerical simulations reproduced the pattern of deformation of these materials during the forming processes and the geometric profile of the component. As a practical result, the crossmember of automotive suspension was successfully formed with the proposed AHSS.

Keywords: *Dual Phase*; TRIP; AHSS; Sheet forming.

¹ Engenheiro Metalúrgico, Gerência Geral de Qualidade e Atendimento a Cliente, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico, Gerência Geral de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Departamento de Formability e Die Design, Vesta Engenharia, Contagem, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro Mecânico, PhD, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os *Advanced High Strength Steels* (AHSS), em especial os aços *Dual Phase* (DP) e *Transformation Induced Plasticity* (TRIP), apresentam características tais como alta resistência e boa conformabilidade, tornando-os uma excelente opção de uso na composição automotiva [1,2]. Essas características propiciam a maximização da vida em fadiga de componentes e potencializam a redução de massa do veículo, sem perda da rigidez dos conjuntos automotivos e em alguns casos, acarretam a melhoria da capacidade do veículo de absorver energia durante colisões. No entanto, esses aços apresentam maior propensão a trincas e rugas durante processos de estampagem.

No presente estudo foi feita a avaliação de AHSS, de menor espessura em relação ao aço HSLA (atualmente utilizado), através da análise da estampabilidade de uma travessa dianteira de suspensão automotiva. O processo de estampagem dessa peça foi avaliado por meio de simulações numéricas e estampagem física em escala industrial. O estudo utilizou materiais laminados a frio, não revestidos, da Usiminas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos Materiais

Os materiais utilizados para a avaliação da estampabilidade da peça são mostrados na tabela 1. Nessa tabela pode ser vista ainda a nomenclatura adotada para referenciar os materiais avaliados, o aço atualmente utilizado na aplicação e as expectativas quanto à redução de massa do componente.

Tabela 1. Identificação dos aços avaliados e expectativa quanto à redução de massa do componente.

Aços	Espessura nominal	Nomenclatura adotada	Observações
HSLA340/410	2,0 mm	HSLA340-2,0	Aço atualmente utilizado
DP340/600	1,6 mm	DP600-1,6	Redução de massa em 20%
DP340/600	1,8 mm	DP600-1,8	Redução de massa em 10%
TRIP450/700	1,6 mm	TRIP700-1,6	Redução de massa em 20%

Os materiais avaliados foram caracterizados em termos de microestrutura (em análise por Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV), de propriedades mecânicas em tração e de Curva Limite de Conformação (CLC). O método utilizado para o levantamento da CLC foi o Nakajima [3], à estrição e à fratura. As metodologias empregadas nos ensaios de estampagem para o levantamento da CLC encontram-se de acordo com as normas ISO 12004-1 [3] e ISO 12004-2 [4]. Os ensaios de estampagem foram realizados em uma prensa universal Erichsen, modelo 145-60. As deformações dos corpos de prova foram avaliadas utilizando-se o *AutoGrid Vario System*, que contempla a filmagem do ensaio por meio de 4 câmeras [5].

2.2 Simulação Numérica da Estampagem da Travessa

As simulações numéricas da operação de repuxo da travessa foram realizadas por uma empresa terceirizada especializada utilizando os dados de propriedades mecânicas dos materiais levantados na Usiminas. Os *softwares* utilizados nas

simulações numéricas do processo de estampagem dessa peça foram o AUTOFORM® e o PAM-STAMP®.

2.3 Estampagem Física da Travessa Automotiva

A estampagem do componente em operação de repuxo, a partir dos diferentes materiais, foi realizada em prensa hidráulica de duplo efeito, na empresa Aethra Sistemas Automotivos. Os parâmetros de estampagem utilizados seguiram as condições previstas nas simulações numéricas. Para a avaliação das deformações e das geometrias finais das travessas estampadas com os diferentes aços, utilizou-se o sistema *AutoGrid Compact*. Para possibilitar essa análise, uma malha quadrada (2,5 mm de lado) foi previamente impressa na superfície dos *blanks* por marcação eletroquímica. Por meio da alteração geométrica dessa malha, após a estampagem do componente, o *software AutoGrid Compact* gerou um desenho 3D e avaliou as deformações impostas em regiões críticas da peça.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização dos Aços

O aspecto microestrutural dos aços analisados pode ser visto na figura 1. A microestrutura do aço HSLA340-2,0 é composta por ferrita (F) e carbonetos (Fe_3C), a dos aços DP600-1,6 e DP600-1,8 é composta por ferrita, bainita (B) e martensita (M) e a do aço TRIP700-1,6 por ferrita, bainita e austenita retida (AR).

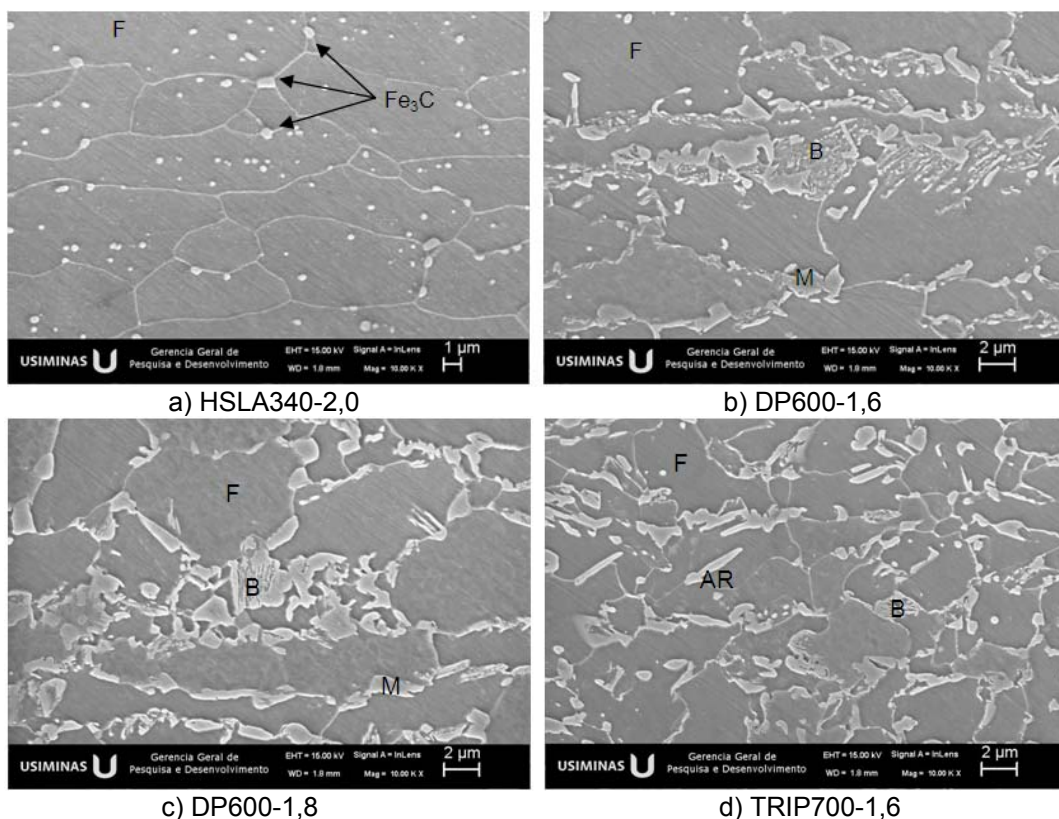


Figura 1. Microestruturas dos aços avaliados (MEV, ataque com nital 4% e aumento de 10.000X).

Os resultados de propriedades mecânicas em tração uniaxial dos aços avaliados são mostrados na tabela 2. Os valores obtidos de propriedades mecânicas encontram-se dentro das especificações de normas do setor automotivo destinadas à padronização dos aços AHSS[6,7]. Os coeficientes de anisotropia de Lankford ($r_{8\%}$ e \bar{r}) dos aços avaliados não são especificados para esta aplicação, contudo, foram obtidos, uma vez que são requeridos como dados de entrada em simulações numéricas de processos de estampagem. Na figura 2 podem ser observadas curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira dos aços analisados. Esta figura destaca a excepcional combinação entre capacidade de alongamento e resistência mecânica do aço TRIP700-1,6 em relação aos demais materiais avaliados.

Tabela 2. Propriedades mecânicas médias em tração uniaxial de amostras dos aços avaliados. Os ensaios foram realizados conforme as recomendações da norma ASTM A 370.

Identificação	Orientação ^I	LE (MPa)	LR (MPa)	Al ^{total} II (%)	n _{10%-eu} III	r _{8%} IV	\bar{r} V
HSLA340-2,0	90°	383	471	29,0	0,139	1,006	1,153
	45°	358	445	32,9	0,140	1,436	
	0°	351	460	29,3	0,143	0,733	
DP600-1,6	90°	404	629	27,9	0,171	1,052	0,919
	45°	405	625	26,8	0,170	0,827	
	0°	400	620	29,1	0,180	0,972	
DP600-1,8	90°	392	691	24,9	0,191	1,100	0,884
	45°	392	685	25,5	0,191	0,802	
	0°	380	678	26,7	0,200	0,833	
TRIP700-1,6	90°	479	746	29,6	0,246	1,155	0,954
	45°	474	748	29,5	0,249	0,886	
	0°	465	734	31,5	0,255	0,889	

^I Orientação em relação à direção de laminação dos aços.

^{II} Al^{total} – Alongamento total avaliado com base de medida de 50 mm.

^{III} n_{10%-eu} – Expoente de encruamento da equação de encruamento isotrópico de Hollomon.

^{IV} r_{8%} – Razão entre as deformações verdadeiras na largura e na espessura para uma deformação de engenharia de 8%.

^V \bar{r} – Coeficiente de anisotropia normal de Lankford.

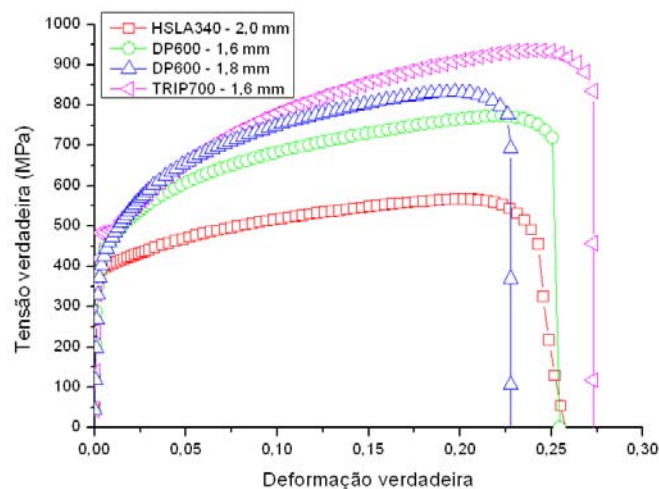


Figura 2. Curvas tensão verdadeira x deformação verdadeira dos aços analisados, levantadas a partir de corpos de prova *sheet type* da norma ASTM A 370[8], com comprimento disposto de forma longitudinal à direção de laminação.

Na figura 3 são mostradas as CLCs levantadas à estricção e à fratura. Os aços apresentam capacidade similar de deformação nos diferentes modos de deformação, para as CLCs levantadas à estricção. Contudo, a CLC à fratura do aço HSLA nas condições de tração uniaxial, de deformação plana e de baixo estiramento biaxial, é mais alta em relação à dos demais aços. Esse comportamento pode ser explicado pela maior espessura desse aço em relação aos demais, que propiciou uma maior deformação entre o início da estricção e a ocorrência da fratura.

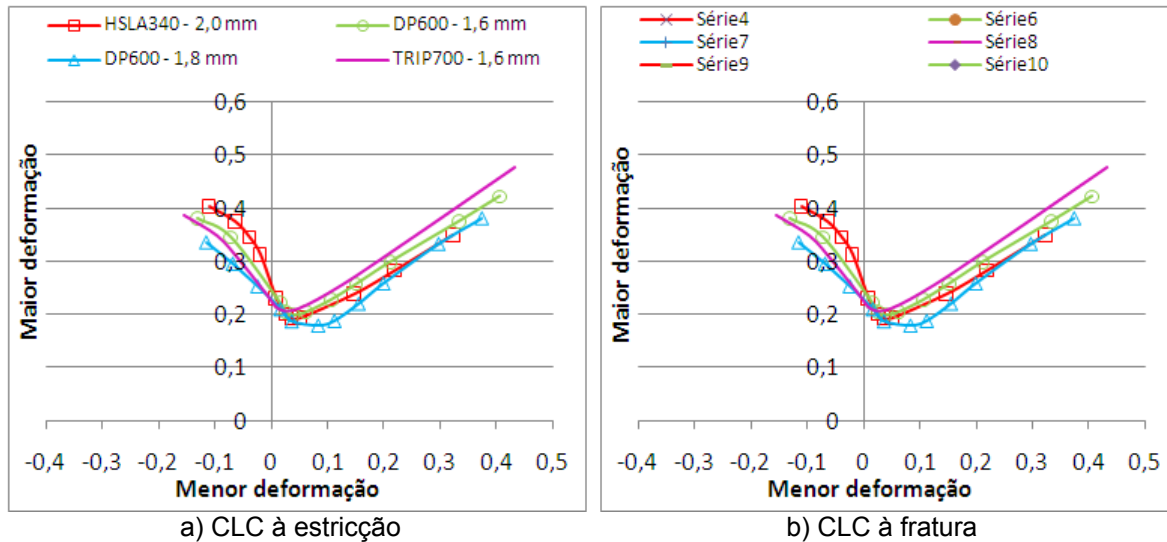
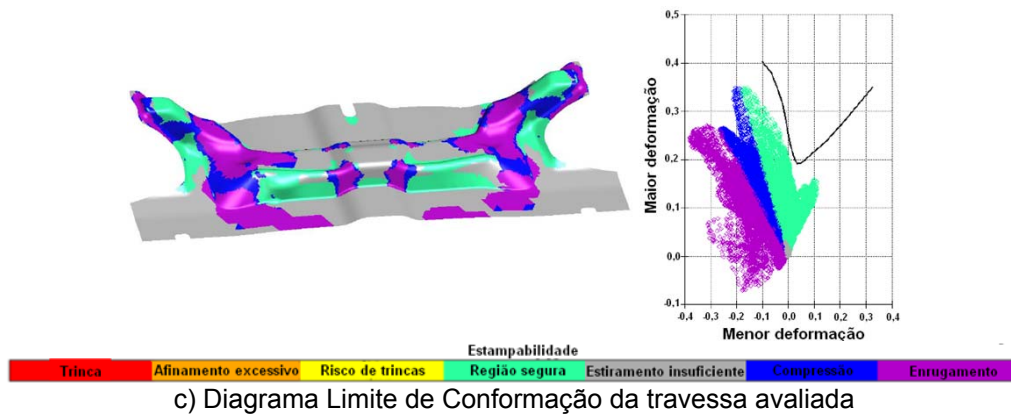


Figura 3. Curvas Limite de Conformação, levantadas pelo método de Nakajima, à estricção (ISO 12.004-2) [1] e à fratura, referentes aos aços HSLA e AHSS avaliados.

3.2 Simulação Numérica Computacional da Estampagem da Travessa

A operação de repuxo da travessa avaliada pode ser considerada de elevada complexidade. Isso porque a geometria da peça apresenta regiões, bem próximas, que são submetidas a elevado estiramento e que exibem alta propensão à formação de rugas. Como as ações para evitar trincas por excesso de estiramento e para restringir a ocorrência de rugas são antagônicas, é inevitável que a correção de um aspecto comprometa o outro. Na figura 4 são mostradas simulações numéricas, feitas a partir do *software* AUTOFORM®, da condição atual de operação de repuxo da travessa (HSLA340-2,0), em duas condições de avanço do punção durante o processo de estampagem (a 15 e a 7 mm do fim de curso do punção) e na condição final de conformação, mostrando as deformações da peça em um Diagrama Limite de Conformação (DLC). Por meio da utilização desse DLC pode-se ter uma estimativa sobre a propensão para a formação de estricção e de trincas durante a estampagem do componente. Quanto mais próximas as deformações da peça estiverem da curva, maior a probabilidade da ocorrência de falhas. Nota-se que para a condição atual de produção, há a formação de rugas, mas estas não chegam a se sobrepor, e as deformações encontram-se bem próximas da CLC do material, indicando que quaisquer anormalidades no material e/ou no processo de estampagem podem ocasionar a ocorrência de rugas sobrepostas e/ou de trincas.

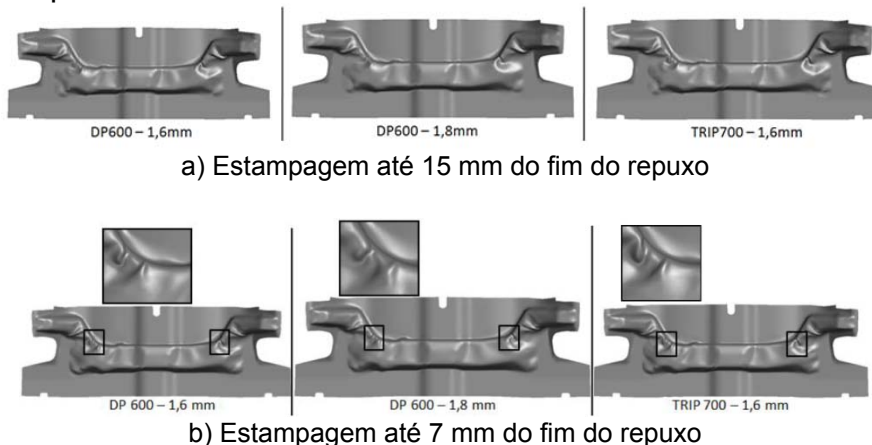




c) Diagrama Limite de Conformação da travessa avaliada

Figura 4. Simulações numéricas feitas a partir do *software* AUTOFORM® da condição atual de operação de repuxo da travessa (HSL340-2,0), em duas condições de deslocamento do punção e até o fim de curso: (a) 15 e (b) a 7 mm; (c) na condição final de conformação.

A fim de avaliar se os AHSS podem substituir o aço HSLA no componente avaliado, sem alteração do ferramental de estampagem, foi simulada numericamente a operação de repuxo considerando uma folga de 2 mm entre a matriz e o punção. A figura 5 apresenta os resultados para estampagens a 15 mm e a 7 mm do final da operação de repuxo. Verifica-se o aparecimento de rugas para todos os AHSS, que em comparação com as do aço HSLA340-2,0, são bem mais proeminentes. A justificativa para esse fato pode ser atribuída à utilização de folga excessiva, devido às menores espessuras dos AHSS.



a) Estampagem até 15 mm do fim do repuxo

b) Estampagem até 7 mm do fim do repuxo

Figura 5. Ilustrações obtidas na simulação numérica (AUTOFORM®) de dois estágios da operação de repuxo da travessa, a partir dos AHSS avaliados. a) até 15 mm do final do repuxo e b) até 7 mm do final do repuxo.

A partir dessas análises numéricas pôde-se concluir que, com o ferramental de produção e utilizando as condições de operação da prensa, os AHSS avaliados não seriam capazes de estampar com sucesso a travessa. Para as modificações no ferramental de estampagem utilizou-se o aço TRIP700-1,6 como referência, pois devido às suas propriedades mecânicas e CLC, este material seria o mais promissor para a estampagem do componente com sucesso. As principais modificações foram a diminuição da folga entre o punção/matriz, a alteração geométrica da peça na região de ocorrência das rugas e a redução da força de prensa-chapas para impedir a formação de trincas. Constatou-se nas simulações numéricas que, após as modificações do processo de estampagem, o aço TRIP700-1,6 foi capaz de estampar a travessa sem a ocorrência de rugas e de trincas, pelo fato das suas deformações situarem-se abaixo da CLC desse aço (figura 6.a). Na simulação

numérica da operação de repuxo utilizando como substrato os aços DP600-1,6 e DP600-1,8, conforme pode ser visto respectivamente nas figuras 6.b e 6.c, foram encontrados pontos de deformação situados acima das CLC's, indicando assim que provavelmente ocorreriam trincas durante a estampagem. Cabe ressaltar, que esse comportamento dos aços DP600 poderia ser esperado, pois a ferramenta foi alterada levando em consideração simulações numéricas tendo o aço TRIP700-1,6 como referência.

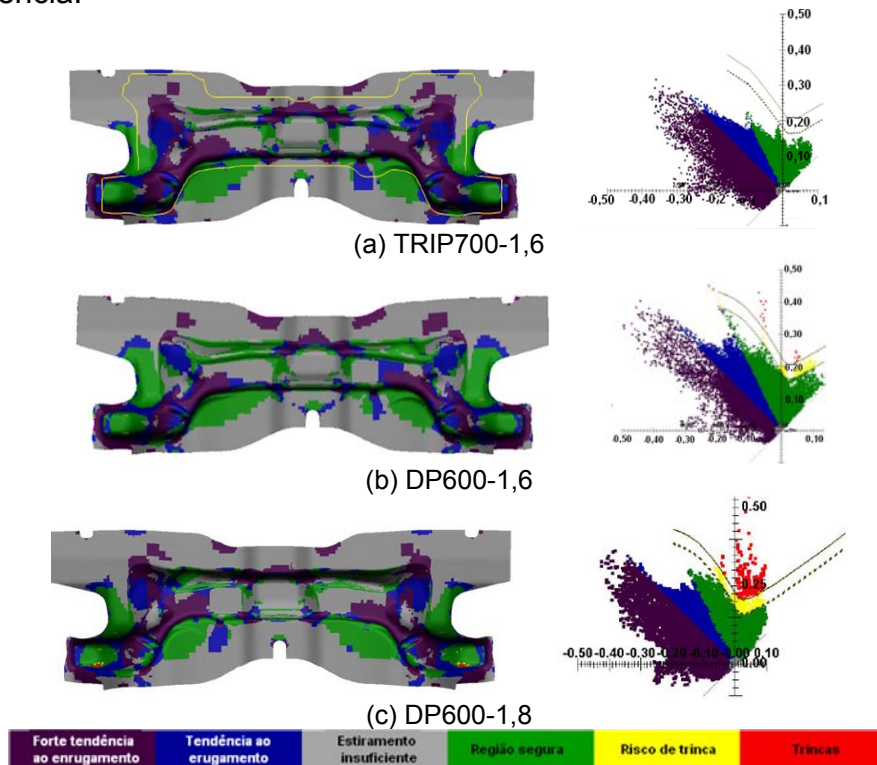


Figura 6. Simulações numéricas feitas a partir do *software* PAM-STAMP® após as modificações do processo de estampagem da operação de repuxo da travessa, utilizando como substrato os aços (a) TRIP700-1,6, (b) DP600-1,6 e (c) DP600-1,8.

Apesar dos aços DP600 terem apresentado falhas durante a operação de repuxo nas simulações numéricas, isso não foi impeditivo para a realização de testes físicos com esses materiais, visando à comparação entre o comportamento real e virtual. Esta avaliação prática (*tryout*) é importante devido à dificuldade em se prever e controlar, em simulação numérica, todas as variáveis envolvidas no processo de estampagem. Outro ponto que merece destaque é a possibilidade de intervenções no processo de estampagem não previstas em simulação numérica, tais como a lubrificação de determinada região da peça para maximizar a capacidade de estiramento e o aumento da restrição do fluxo de material de determinada região da peça, por meio, por exemplo, do aumento local da rugosidade da ferramenta, de forma a aumentar o coeficiente de atrito localmente.

3.3 Estampagem Física da Travessa

O comportamento dos AHSS, durante estampagem física da travessa, foi o mesmo do previsto em simulação numérica, ou seja, apresentou rugas com o ferramental atual de produção e após alteração da ferramenta, o aço TRIP700-1,6 estampou a peça sem problemas. No caso dos aços DP600, a alteração do ferramental não foi suficiente para o sucesso da estampagem, então tornaram-se necessárias

intervenções físicas que variaram desde a lubrificação do *blank* em certas regiões propensas ao estiramento, à utilização de fita adesiva para aumentar o atrito em regiões de enrugamento.

As regiões críticas analisadas das travessas, produzidas com cada aço avaliado, os perfis de deformação e os DLC's destes locais são mostrados na figura 7. As Curvas Limite de Conformação mostradas nesses diagramas foram levantadas à estricção (mais baixas) e à fratura (mais elevadas). Percebe-se, como previsto em simulação numérica, que a região avaliada da travessa atual de produção, estampada com o aço HSLA340-2,0, é considerada bastante crítica, pois exibe pares de maior (φ_1) e menor (φ_2) deformação, em condição de estiramento, situados acima das CLC's à estricção. Esse comportamento também foi encontrado para os aços DP600, após estampagem com as alterações da ferramenta previstas em simulação numérica. A exceção foi o aço TRIP, que exibiu pares de deformação bem abaixo de sua CLC, conforme os DLC's obtidos em simulação numérica. Comparando os DLC's dos aços HSLA340-2,0 e TRIP700-1,6, verifica-se que com a alteração do processo de estampagem e utilizando o aço AHSS, a conformação da peça torna-se menos crítica em relação ao aço HSLA340. Cabe ressaltar também que o aço DP600-1,8 se mostrou apto a estampar a peça após algumas intervenções físicas.

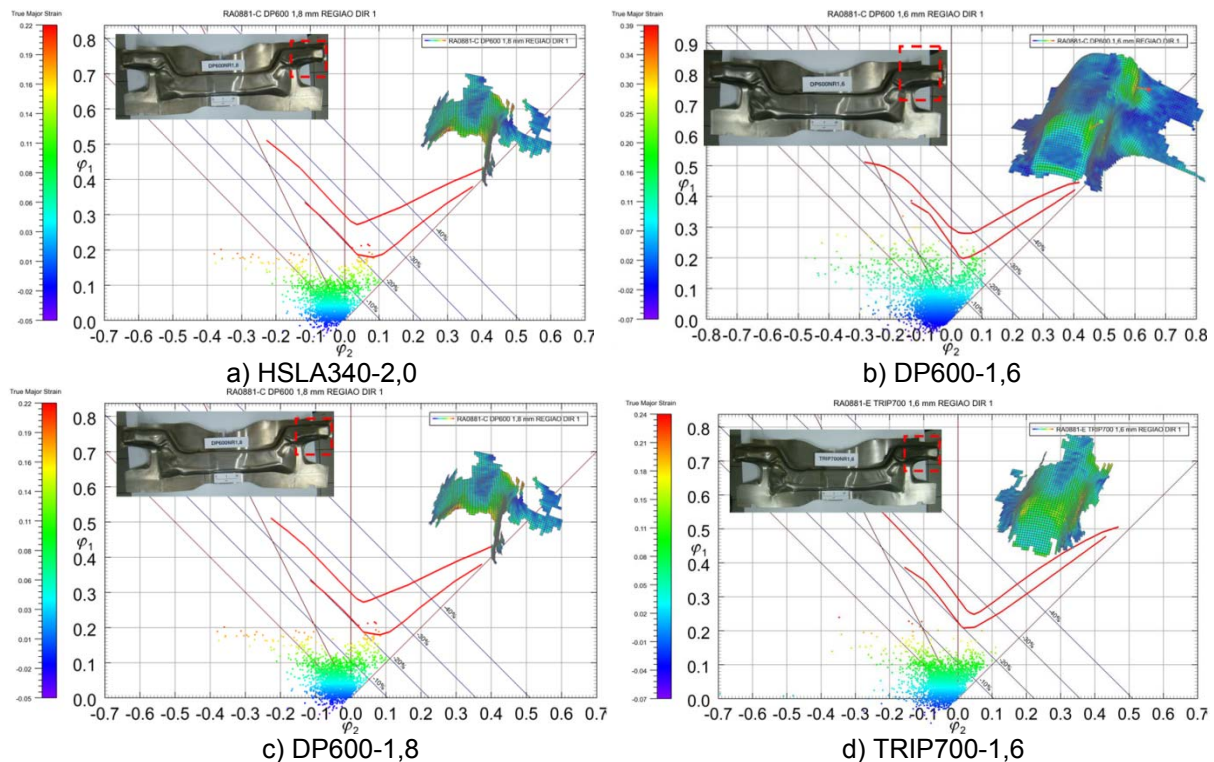


Figura 7. Diagramas Limite de Conformação das regiões analisadas das travessas produzidas com cada aço avaliado. As Curvas Limite de Conformação foram levantadas à estricção (mais baixa) e à fratura (mais elevadas).

3.4 Comparação entre os Resultados Virtual e Real da Estampagem da Travessa

A comparação dos pares de deformação do componente travessa dianteira de suspensão automotiva, obtidos por simulação numérica e por meio de medições das peças físicas, é mostrada na figura 8. Os dados referentes à simulação numérica contemplam todos os pares de deformação da peça, enquanto que os dados

referentes ao ensaio físico mostram somente as deformações das regiões críticas avaliadas. De um modo geral, pode-se afirmar que a simulação numérica da estampagem da travessa reproduziu com precisão as deformações do componente estampado. Verifica-se que as deformações sob estiramento biaxial da peça estampada com aço HSLA340-2,0 ficaram ligeiramente acima da simulada numericamente. Essa diferença pode ser atribuída a condições experimentais, tais como regiões com baixa lubrificação, não previstas pelos softwares de simulação. Nota-se que as simulações de estampagem da peça para os demais aços correspondem de forma bem similar aos pares de deformação encontrados nas peças físicas. Destaca-se a simulação feita para o aço TRIP700-1,6, pois a ferramenta foi projetada e confeccionada para a estampagem da peça utilizando como dados de entrada, as propriedades mecânicas deste aço.

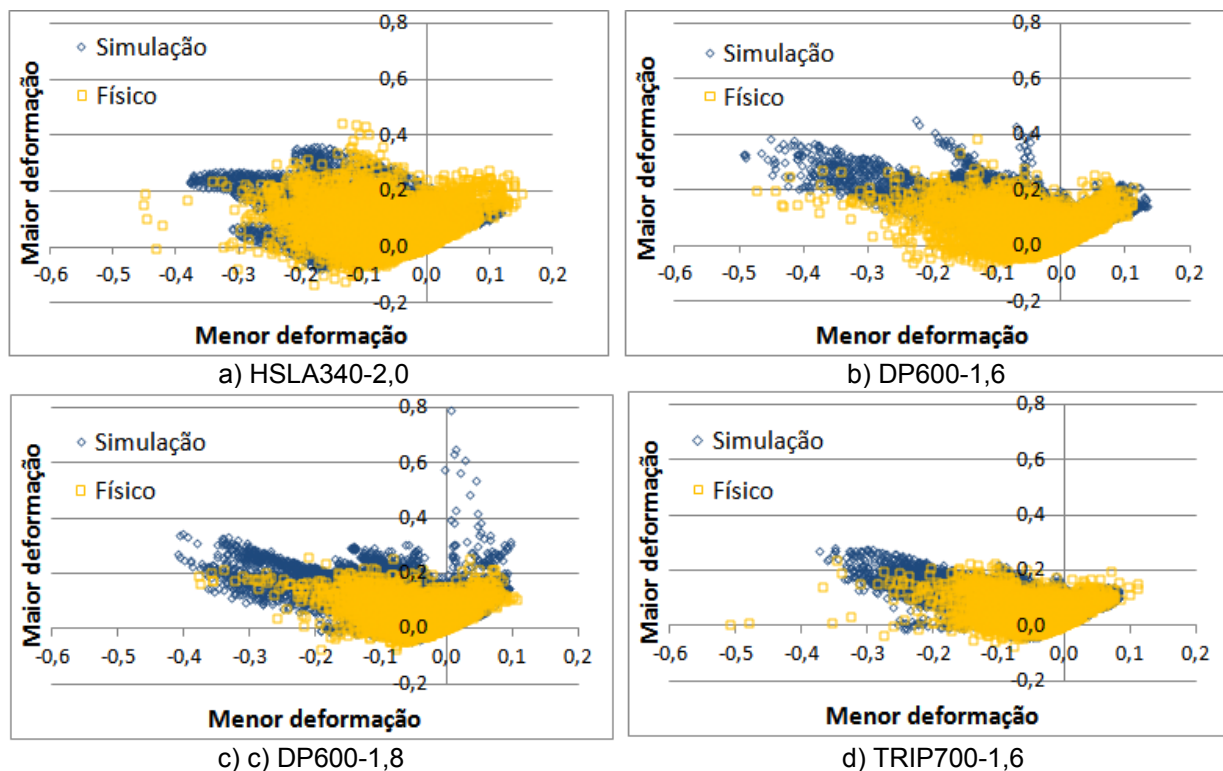


Figura 8. Comparação dos pares de deformação do componente travessa de suspensão obtidos por simulação numérica e por meio de medições físicas das peças.

4 CONCLUSÃO

Os aços avaliados apresentaram características microestruturais e propriedades mecânicas esperadas para seus respectivos graus.

Segundo as simulações computacionais, os AHSS avaliados não foram capazes de estampar com sucesso a travessa a partir do ferramental atual de produção. Então o ferramental do componente supracitado teve de sofrer alterações para tornar possível a operação de repuxo. Após essas alterações propostas em simulação numérica e empregando intervenções físicas no processo de conformação e ajustes na prensa, a estampagem da peça foi realizada com sucesso para todos os AHSS avaliados.

Comparando as deformações e os perfis geométricos da peça após operação de repuxo, que foram obtidos por simulação numérica e pela avaliação física, verificou-se que a análise virtual reproduziu com precisão a estampagem do componente.

Essa precisão pode ser associada à utilização de dados de entrada adequados e modelos numéricos que representaram de forma confiável o componente automotivo avaliado.

A operação de repuxo do componente travessa de suspensão dianteira, com os aços DP600 de 1,6 e 1,8 mm de espessura e TRIP700 com 1,6 mm é considerada viável, e propicia reduções de massa do componente de 10% (1,8 mm) e 20% (1,6 mm).

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Usiminas pela oportunidade e pelos recursos disponibilizados para a realização deste trabalho.

A Universidade Federal de Minas Gerais e ao CAPES-PROEX, destacando a pessoa do professor Paulo Roberto Cetlin pelo apoio e orientação neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 ULSAB-AVC CONSORTIUM – Technical Transfer Dispatch # 6 – ULSAB-AVC Body Structure Materials, Appendix III, 2001.
- 2 AUTOSTEEL PARTNERSHIP – Advanced High Strength Steels (AHS) Application Guidelines – Auto/Steel Partnership, Revision 6.1 August of 2002. On line at www.worldautosteel.org.
- 3 ISO 12004/2008 - Metallic materials - Sheet and strip - Determination of forming-limit curves - Part 1: Measurement and application of forming-limit diagrams in press shop – 2008.
- 4 ISO 12004/2008 - Metallic materials - Sheet and strip - Determination of forming-limit curves - Part 2: Determination of forming-limit curves in the laboratory – 2008.
- 5 Feldman, P. – Catálogo de Produto ViaLux – Vario System, 2008.
- 6 FIAT. 52815. – Multiphase and Ultra-High Resistance Hot and Cold-Rolled Steel Sheets and Strips – Edition: 2004.
- 7 FIAT. 52811. – Multiphase Steel sheets and strips Microalloy, Cold Rolled with High Yield Strength. – Edition: 2004.
- 8 Norma ASTM A370 – Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products - ASTM, Edition: 2009.