

CARACTERÍSTICAS ELASTO-PLÁSTICAS E MICROESTRUTURAIS DOS AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA¹

Sérgio Fernando Lajarin²

Nixon Vieira Malveira³

Paulo Victor Prestes Marcondes⁴

Resumo

Aços de alta resistência são utilizados na indústria automotiva para a manufatura de chassis e carrocerias. Eles são classificados metalurgicamente em aços convencionais de alta resistência (HSS) e avançados de alta resistência (AHSS). Esse segundo grupo vem ganhando cada vez mais espaço na indústria devido a alta-resistência aliada a grande capacidade de deformação plástica de alguns de seus aços, tais como o bifásico e o Trip. A utilização desses aços em substituição aos convencionais permite que chapas mais finas possam ser usadas, possibilitando assim a redução de peso dos veículos sem comprometer aspectos de segurança, como a capacidade de absorção de impacto em colisão. Porém, a sua ampla aplicação na indústria automotiva ainda está limitada devido a desafios na conformabilidade, união de chapas, retorno elástico e vida de ferramenta. Um melhor entendimento das propriedades mecânicas e metalúrgicas desses aços se faz necessário. Dessa forma, o objetivo desse trabalho é discutir as características elasto-plásticas e metalúrgicas de alguns aços de alta resistência. As propriedades mecânicas são observadas por meio de diferentes ensaios uniaxial de tração e as diferenças microestruturais por meio de análises metalográficas. Os resultados apontaram as peculiaridades de cada aço, assim como aspectos que devem ser considerados durante procedimentos de *try-out* e previsão numérica de processos de conformação de chapas.

Palavras-chave: Aços avançados de alta resistência; Conformação de chapas; Retorno elástico; Módulo de elasticidade.

CHARACTERISTIC ELASTO-PLASTIC AND MICROSTRUCTURAL OF HIGH STRENGTH STEEL

Abstract

High strength steels are used in the automotive industry for the manufacture of chassis and car bodies. These steels are metallurgically classified in conventional high strength steels (HSS) and advanced high strength steels (AHSS). This second group is gaining more space in the industry due to high-strength combined with large capacity for plastic strain, such as, two-phase and TRIP steels. The use of these advanced steels to replace conventional steels allows the use of finer blanks, thus enabling to reduce vehicle weight without compromising safety aspects, such as, the ability to absorb impact in a collision. However, its wide application in the automotive industry is still limited due to challenges in formability such as springback. Nowadays, a better understanding of the mechanical and metallurgical properties of these steels is required. The main aim of this work is to study the elastic-plastic behavior and metallurgical aspects of some high strength steels. The mechanical properties were obtained through different uniaxial tensile tests and the microstructural differences are discussed through metallographic analysis. The results showed the peculiarities of each steel, as well as, the aspects that should be considered during the try-out procedures and numerical prediction during forming processes.

Key words: Advanced high strength steels; Sheet forming; Springback; Elastic modulus.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

² Eng. Computação. Dr. Eng. Mecânica. Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil.

³ Eng. Mecânico. Mestre em Eng. Mecânica, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil.

⁴ Eng. Mecânico. Doutor em Eng. Mecânica, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva sofre nas últimas décadas uma grande pressão internacional para se adequar às exigências ambientais para redução das emissões de gases poluentes na atmosfera. Uma das alternativas explorada é diminuir o consumo de combustível por meio da redução de massa dos veículos, usando chapas metálicas mais finas ou materiais mais leves. Porém, para reduzir a espessura das chapas sem comprometer aspectos de segurança como a capacidade de absorção de impacto a indústria automotiva tem sido obrigada a testar outros tipos de aço.

Os aços convencionais de baixa e alta resistência são aços amplamente utilizados na fabricação de carrocerias de automóveis. Os aços convencionais de baixa resistência tem microestrutura essencialmente ferrítica e possuem baixo percentual de carbono presente na sua constituição. Eles são projetados para aplicações em estiramento e embutimento profundo. Na indústria automotiva esses aços são utilizados tanto em componentes visíveis quanto estruturais que exijam grande capacidade de deformação, porém são limitados devido à baixa resistência. Os aços convencionais de alta resistência são aqueles com microestrutura semelhantes a dos aços de baixo carbono, livre de intersticial e isotrópico, porém com faixa de resistência mais elevada, tensão de escoamento de 210 MPa até 550 MPa e limite de resistência máxima de 270 MPa até 700 MPa. O aço com maior destaque desse grupo é o aço de alta resistência e baixa liga (HSLA), que contém micro-adições de Nb, Ti e V e microestrutura ferrítica perlítica mais refinada, que proporciona maior resistência mecânica que os aços de baixo carbono aliado a boa conformabilidade.

Objetivando manter a hegemonia do uso do aço nos veículos, e não perder mercado para novos materiais tais como o alumínio e as ligas de magnésio, a solução proposta pelos grandes fabricantes de aço, foi o desenvolvimento do grupo de aços chamados de avançados de alta resistência (AHSS). Os dois aços mais populares desse grupo são o DP (*Dual phase*) e o TRIP (*Transformation-Induced plasticity*). Segundo Asgari et al.⁽¹⁾ a principal diferença física entre os aços AHSS e os convencionais, está na microestrutura. Eles possuem matriz ferrítica com variados percentuais de martensita dura, bainita e/ou austenita retida. A microestrutura diferenciada garante a esses aços maior resistência do que os aços convencionais, aliada a uma boa ductilidade. Na Figura 1 pode ser observado a relação apresentada por Iyengar et al.⁽²⁾ entre tensão limite de resistência e alongamento total para vários tipos de aços.

O aço DP é um dos AHSS de melhor equilíbrio entre resistência e ductilidade, devido ao seu alto coeficiente de encruamento ele garante maior conformabilidade do que aços convencionais de mesma faixa de resistência. Ele consiste de uma matriz ferrítica contendo uma segunda fase dura, martensítica, disposta em forma de ilhas. A fração volumétrica dessa segunda fase mais dura é responsável por indicar o nível de resistência do grau (Worldautosteel).⁽³⁾ Durante a produção do aço DP, sua microestrutura é conseguida por meio de um resfriamento controlado durante a fase austenítica (em produtos laminados a quente) ou de duas fases, ferrita mais austenita (para produtos laminados a frio e revestido por imersão a quente). O resfriamento controlado tem como objetivo transformar parte de austenita em ferrita antes de um rápido resfriamento que transformará o restante da austenita em martensita. Dependendo da composição química e do processo, a microestrutura pode conter uma quantidade significativa de bainita que aumenta a capacidade de estiramento do aço.

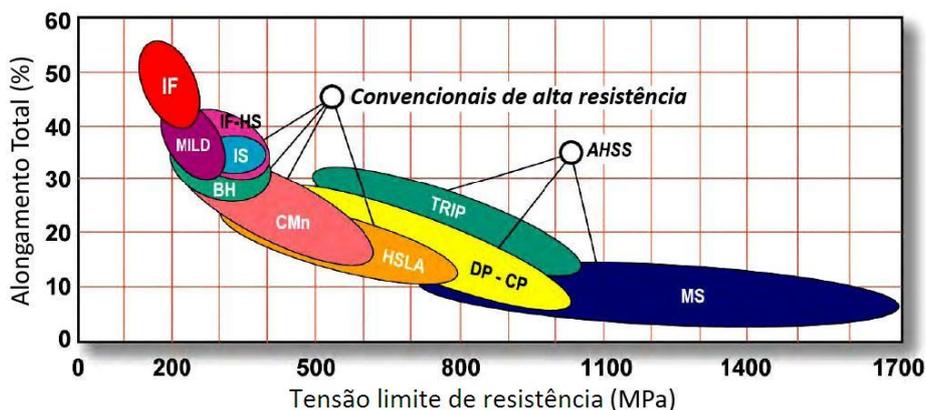


Figura 1. Relação entre tensão máxima de resistência e alongamento total para vários tipos de aços.⁽²⁾

O aço TRIP é um material multifásico com austenita retida em uma matriz primária ferrítica. Além de um volume mínimo de 5% de austenita retida, fases duras como martensita e bainita estão presentes em quantidades variadas. Durante a deformação, a dispersão de uma segunda fase na ferrita mais macia cria uma alta taxa de encruamento, o que também é observado nos aços DP. No entanto, o aço TRIP quando deformado, transforma gradativamente a austenita retida em martensita, fazendo com que a taxa de encruamento aumente para níveis de deformação maiores.

Com o aumento da resistência dos AHSS é possível que chapas mais finas possam ser usadas em componentes automotivos, sem que isso comprometa a segurança, ou seja, sem afetar a capacidade de absorção de impacto em colisão. Porém, a sua ampla aplicação na indústria automotiva ainda está limitada devido a desafios na conformabilidade, união de chapas, vida de ferramenta e retorno elástico. Segundo Placidi et al.⁽⁴⁾ o retorno elástico é o principal problema que compromete a produção em massa de componentes estruturais automotivos com AHSS. O retorno elástico é identificado como uma mudança ocorrida na forma do componente após a remoção da ferramenta de conformação, provocada por uma redistribuição de tensões elástica residuais (Worldautosteel).⁽³⁾ Prever a ocorrência do fenômeno do retorno elástico durante a fase de projeto da ferramenta é fundamental para propor soluções para diminuir ou eliminar o problema.

A simulação computacional por meio de Métodos de Elementos Finitos (MEF) tem sido uma ferramenta cada vez mais utilizada em projeto e avaliação de processos de conformação. Entretanto, a precisão dos resultados numéricos ainda não conseguiu chegar a um nível satisfatório. Isto é devida, principalmente a dificuldade de descrever o comportamento dos materiais durante a deformação elasto-plástica. Segundo Placidi et al.,⁽⁴⁾ vários fenômenos não lineares resultantes de alterações microestruturais ocorridas durante a deformação plástica não são bem descritos pelas equações constitutivas convencionais. O fenômeno da variação do módulo de elasticidade durante o descarregamento é apontado como um dos principais causadores da não linearidade do comportamento desses aços.

A variação no comportamento elástico durante o descarregamento foi apresentado experimentalmente pela primeira vez por Lems.⁽⁵⁾ Autores como Clevelan e Ghosh⁽⁶⁾ e Morestin e Boivin,⁽⁷⁾ estudaram a variação do módulo de elasticidade no alumínio. Morestin e Boivin⁽⁷⁾ investigaram o decréscimo do módulo de elasticidade de diversos tipos de aços após a deformação plástica e descobriram que o módulo de elasticidade pode diminuir 17.5% do seu valor inicial após 5% de deformação

plástica para aços de alta resistência. Pesquisadores como Cleveland e Ghosh,⁽⁶⁾ Perez, Benito e Prado,⁽⁸⁾ Cobo et al.,⁽⁹⁾ entre outros, mencionam que movimentações e empilhamentos de discordâncias provocadas por deformação plástica são consideradas as principais causas da variação do módulo de elasticidade durante o descarregamento. Durante a deformação plástica, discordâncias livres movem-se ao longo de planos de escorregamento e facilmente se empilham quando impedidas por solutos, contornos de grão ou outros obstáculos. Esses empilhamentos podem retornar quando a tensão de cisalhamento é retirada durante o descarregamento, levando a uma pequena parcela de deformação não elástica. Cobo et al.⁽⁹⁾ estudaram a variação do módulo de elasticidade com a deformação plástica em diferentes graus de aço DP, de DP550/800 até DP1430/1520. O procedimento usado para determinar a variação do módulo de elasticidade é semelhante ao apresentado por Cleveland e Ghosh,⁽⁶⁾ Perez, Benito e Prado⁽⁸⁾ e Benito et al.⁽¹⁰⁾ Devido a isso, o objetivo desse estudo é caracterizar experimentalmente o comportamento elasto-plástico e microestrutural de diversos aços automotivos. A variação do módulo de elasticidade durante o descarregamento foi observada em todos os aços e considerações sobre eles foram apresentadas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Materiais

Na Tabela 1 são apresentados os diversos aços analisados. Eles variam de convencionais de baixa resistência até avançados de alta resistência.

Tabela 1. Materiais ensaiados

Material	Espessura média (mm)	Fornecedor
ARC05	1.50	A
HSLA 360/420	1.57	A
HSLA 420/490	2.16	A
DP 350/600-A	1.50	A
DP 350/600-B	1.50	B
DP 450/700	1.96	B
DP 750/980	2.00	B
TRIP 450/780	1.52	A

2.2 Ensaio Uniaxial de Tração

Foram realizados ensaios uniaxial de tração com o objetivo de levantar as seguintes propriedades mecânicas: coeficiente de encruamento (n), parâmetros de anisotropia, alongamento total e uniforme, tensão limite de escoamento (LE) e tensão limite de resistência (LR). Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaio universal da marca EMIC[®], com capacidade de carga de 10 toneladas. O dimensionamento e o formato adotado para o corpo de prova foram tomados a partir da norma NBR 6673.⁽¹¹⁾ Na Tabela 2 pode ser vista a quantidade de corpos de prova usados para cada ensaio.

Tabela 1. Quantidade de corpos de prova para levantamento das propriedades mecânicas

Direção de laminação	CPs para determinar n e R	CPs para determinar LR, LE e A_l	Cps para determinar E	Total de CPs para cada direção de laminação
0°	3+3	3	3	12
45°	3+3	3	3	12
90°	3+3	3	3	12
Total de corpos de prova				36

2.3 Análise Metalográfica

O procedimento adotado nas metalografias seguiu recomendações encontradas em Souza,⁽¹²⁾ que de forma simplificada compreende as seguintes etapas: (i) embutimento de uma amostra do material em baquelita, sob condições controladas de pressão e temperatura; (ii) lixamento por meio de quatro granulações diferentes de lixa; (iii) polimento com alumina; (iv) ataque químico com nital 2% ($C_2H_5OH + HNO_3$) e (v) análise microscópica.

2.4 Ensaio para Levantamento da Variação do Módulo de Elasticidade

A variação no comportamento elástico durante o descarregamento foi analisada na faixa de deformação de 0% até a ocorrência da ruptura. A deformação do material foi feita por meio de ensaios uniaxial de tração com velocidade de deformação de 0.5 mm/min. Os percentuais de deformação foram registrados por um extensômetro EMIC[®] com 50 mm de curso.

Três corpos de prova de cada material foram submetidos, sucessivamente aos seguintes percentuais de deformação: (0.5 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 2 + 2 + 2 + 3%... até a ruptura). Esses valores foram escolhidos, pois conforme pode ser visto em Morestin e Boivian⁽⁷⁾ e Cobo et al.⁽⁹⁾ a maior parte da variação ocorre até 5% de deformação plástica. Após esse valor, geralmente, o módulo de elasticidade no descarregamento tende a se estabilizar.

Entre cada etapa de deformação as amostras foram mantidas em repouso durante 24 horas em temperatura ambiente, pois de acordo com Perez, Benito e Prado⁽⁸⁾ é necessário um tempo entre os ensaios para que haja alívio das tensões residuais das amostras. O procedimento seguiu os seguintes passos: (i) deformação inicial até 0.5% com registro do módulo de elasticidade no carregamento; (ii) registro do módulo de elasticidade durante o descarregamento; (iii) amostra colocada em repouso durante 24 horas; (iv) procedimento reiniciado submetendo a amostra ao novo percentual de deformação; e (v) registro do módulo de elasticidade no descarregamento; repetindo o procedimento até a ruptura. No fluxograma da Figura 2 é ilustrado com detalhe o procedimento.

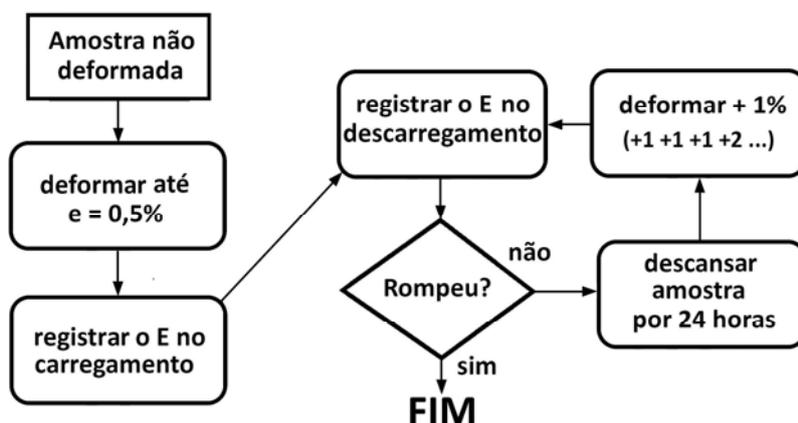


Figura 2. Fluxograma do procedimento de registro da variação no comportamento elástico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 3 são descritos todos os materiais ensaiados e algumas de suas propriedades mecânicas. Os aços DP apresentaram bom alongamento, os graus DP 350/600 tiveram alongamento, uniforme e total, superior aos HSLA e o grau DP450/700 apresentou alongamento uniforme maior que o HSLA 420/490. Esse resultado confirma a interessante combinação de bom alongamento e alta resistência. Como pode ser observado, os graus de DP 350/600 tem LE semelhante aos graus de HSLA, mas com LR bem superior.

O aço DP750/980 apresentou alongamento uniforme de 10.1%, que pode ser considerado bom para um aço com essa resistência ultra-alta.

O aço TRIP com 22,6% de alongamento uniforme foi o material que apresentou o melhor desempenho, pois consegue aliar essa excelente capacidade de deformação a um limite de resistência de 860 MPa. Essa grande capacidade de alongamento é influenciada pelo alto valor de n , 0,252 que superou até o valor de 0,240 do aço ARC05.

Tabela 3. Propriedades dos materiais ensaiados

Material	Tensão de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Along. Unif. (%)	Along. Total (%)	n	K	Módulo elástico inicial (GPa)
ARC05	176	280	16,6	26,1	0,240 [*]	502	206
DP350/600-A	395	620	14,9	20,0	0,149	967	206
DP350/600-B	387	605	15,8	23,0	0,188	1164	207
HSLA360/450	256	449	14,9	20,8	0,143	695	206
HSLA420/490	415	542	12,3	17,5	0,121	796	208
DP450/780	488	741	12,7	17,0	0,166	1.192	205
TRIP450/780	548	860	22,6	24,4	0,235 [*]	1.489	206
DP750/980	828	934	7,0	10,4	0,085 ^{**}	1.289	208

n = coeficiente de encruamento, k =constante de resistência; ambos obtidos de $0,04 < e < 0,12$; ^{*} obtido de $0,04 < e < 0,20$; ^{**} obtido de $0,03 < e < 0,06$.

Na Tabela 4 são apresentadas as propriedades anisotrópicas dos materiais. O aço com maior capacidade de resistir ao afinamento quando submetido a forças de tração e/ou compressão no plano é o aço ARC05 com r_m de 1.572 e o menor é o DP 350/600-A com r_m de 0,820.

Todos os materiais apresentaram anisotropia normal e planar. O aço HSLA 360/450 apresentou o menor Δr e o aço ARC05 a maior. Esse parâmetro indica a diferença de comportamento mecânico no plano da chapa. Os materiais com Δr (+) indicam uma tendência de orelhamento nas direções: longitudinal e transversal à de laminação, enquanto os materiais com Δr (-) indicam orelhamento na direção diagonal.

Tabela 4. Propriedades anisotrópicas dos materiais ensaiados

Material	r_0	r_{45}	r_{90}	Δr	r_m
ARC05 *	1,958	1,354	1,624	0,436	1,572
HSLA 360/450	0,777	0,876	0,903	-0,036	0,858
HSLA 420/490	0,988	1,015	0,568	-0,237	0,897
DP 350/600-A	0,835	0,676	1,088	0,285	0,819
DP 350/600-B	0,638	1,097	0,802	-0,377	0,909
DP 450/780	0,682	1,113	0,814	-0,365	0,931
DP 750/980 **	0,875	1,038	0,932	-0,134	0,971
TRIP 450/780	0,847	0,902	1,092	0,068	0,936

* Obtido em $e = 0.18$; ** obtido em $e = 0.06$; os demais materiais foram obtidos a $e = 0.12$.

Na Figura 3 pode ser visto o diferente comportamento da curva tensão-deformação dos materiais ensaiados. Os graus de aço DP apresentaram maior encruamento inicial (até 7%) e depois disso se estabilizou. Os aços DP 350/600 dos fornecedores A e B apresentaram comportamento diferente, apesar de serem graus semelhantes. O aço do fornecedor B apresentou maior alongamento e um leve patamar de transição elasto-plástico, comum nos aços HSLA. Por outro lado, o aço do fornecedor A apresentou um alto encruamento inicial, típico dos bifásicos, mas que se estabilizou mais rápido, resultando um alongamento 0.9% menor.

O aço TRIP 450/780 apresenta uma característica positiva do ponto de vista prático, que é a baixa relação LE/LR em torno de 0.63. Conforme pode ser visto na Figura 3, a grande margem entre a LE e LR pode ser vantajosa para operações de estampagem. O encruamento inicial do aço TRIP foi menor que o do DP, porém se prolonga por muito mais tempo e alcançou um alongamento uniforme de 22.6%, próximo do alongamento do aço ARC05.

Na Figura 4 são ilustradas micrografias dos aços ensaiados. Os três primeiros, (Figuras 4a a 4c) são aços convencionais e todos são aços ferríticos com grãos poligonais. O aço ARC05 (Figura 4a) é o que apresentou grãos mais uniformes e maiores, em torno de 40 μm .

Os demais são aços AHSS que diferentemente dos aços convencionais, possuem uma ou mais fases associadas à matriz ferrítica. Nos aços DP350/600 (Figura 4d) e (Figura 4e) ilhas de martensita se concentram nos contornos dos grãos. Autores como Oliver, Jones e Fournalis⁽¹³⁾ mensuraram em torno de 13.4% de martensita e 1.1% de bainita em aços de mesmo grau e grãos de ferrita com tamanho médio de 5.68 μm . No DP350/600-A (Figura 4d) o tamanho médio dos grãos de ferrita foi de 6.21 μm , enquanto que o DP350/600-B (Figura 4e) foi de 5.86 μm .

Na Figura 4f é ilustrada a micrografia do DP450/780. Nela pode ser observada que o percentual de martensita nos contornos de grãos é maior que nos casos anteriores, e o tamanho médio dos grãos diminuiu para 4.84 μm . Oliver, Jones e Fournalis⁽¹³⁾ mensuraram 26% de martensita e grãos com tamanho médio de 5.16 μm .

O aumento da resistência do aço DP450/780 quando comparado ao DP350/600 pode ser atribuída primeiramente a maior quantidade de martensita e também a um maior refinamento do grão.

Na Figura 4h é ilustrada a micrografia do TRIP 450/780. Oliver, Jones e Fournalis⁽¹³⁾ conseguiram revelar com bastante sucesso as fases de aço TRIP de mesmo grau e os autores mensuraram 72.4% de ferrita, 13.9% de austenita retida, 10.4% de bainita e 3.3% de martensita e grãos médio de ferrita com 4.34 μm .

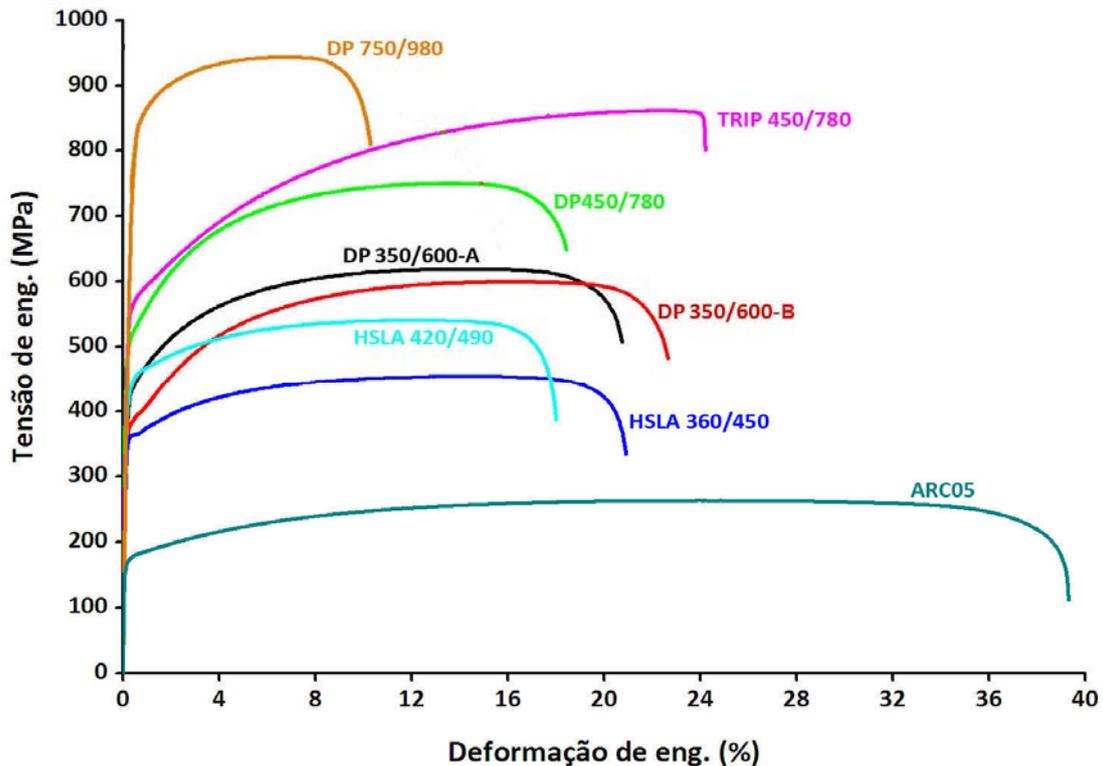


Figura 3. Curvas tensão-deformação de engenharia para diferentes graus de aços de alta resistência e um aço convencional de baixa resistência.

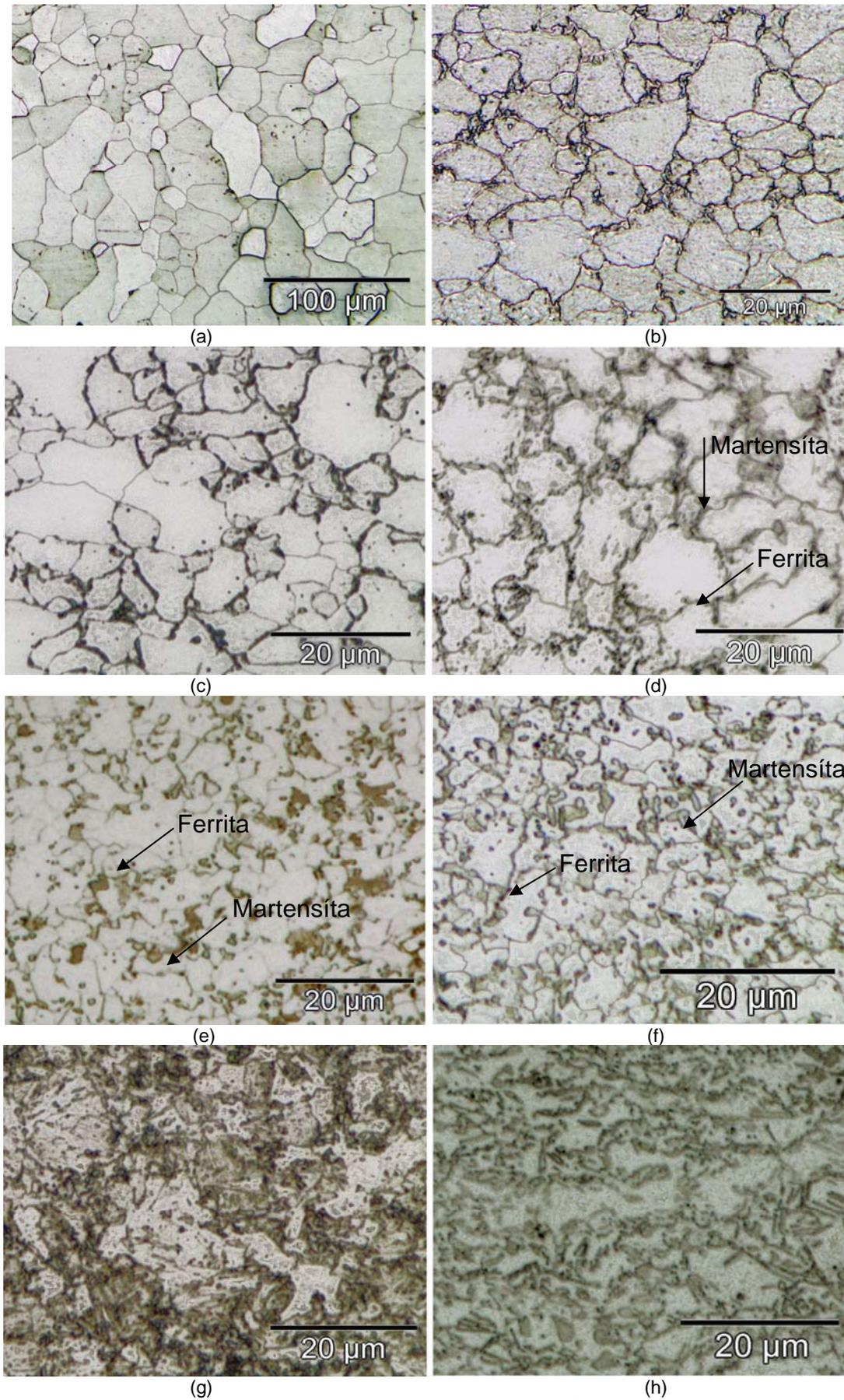


Figura 4. Micrografia ótica dos aços, em (a) aço ARC05; (b) HSLA360/450; (c) HSLA420/490; (d) DP350/600-A; (e) DP350/600-B; (f) DP450/780; (g) DP750/980; e (h) TRIP450/780.

Todos os materiais apresentaram módulo de elasticidade inicial entre 205 GPa e 212 GPa, faixa de valor típica de aços ao carbono. Na Figura 5 são ilustradas as curvas do módulo de elasticidade no descarregamento versus deformação plástica de todos os materiais ensaiados. As curvas estão representadas pela média dos resultados nas três direções de laminação.

Pode ser observado que fora o aço DP750/980 os aços avançados de alta resistência tiveram redução no módulo de elasticidade de acordo com a sua resistência. Em outras palavras, o aço TRIP 450/780 que é o aço que apresentou o maior limite de resistência entre os materiais ensaiados apresentou a maior redução no módulo de elasticidade, seguido pelo aço DP 450/780, do DP350/600-A, do DP350/600-B e por fim os aços convencionais HSLA com menor redução no módulo de elasticidade. Eggertsen e Mattisson⁽¹⁴⁾ chegaram a resultados semelhantes. Os autores analisaram dois aços DP350/600 e dois aços de baixo carbono - DX56 e 220IF - e verificaram maior redução no módulo de elasticidade para os aços de maior resistência. Essa relação é compreensiva se considerarmos que quanto maior a resistência no ponto imediatamente anterior ao descarregamento, maior será a recuperação elástica não linear – que foi observada nas figuras acima – e conseqüentemente, menor será a inclinação da reta secante que indica o módulo de elasticidade no descarregamento. Entretanto, esse resultado é contrário ao obtido por Cobo et al.⁽⁹⁾ que analisou diferentes graus de aços DP e observou que quanto maior a resistência menor foi o decréscimo do módulo de elasticidade. No caso deles, a principal diferença microestrutural entre os aços estudados foi a quantidade de ferrita. Para o aço DP 550/800 - de menor resistência – a matriz era ferrítica com conteúdo de 75%. Para os outros aços DP de maior resistência a ferrita era intergranular com percentagem abaixo de 10% em uma matriz martensítica. A conclusão dos autores foi que a redução do módulo de elasticidade diminui assim que o percentual de ferrita também diminui, e a justificativa para isso é o fato que a movimentação de discordâncias é mais fácil em estrutura ferrítica CCC do que em martensita. Dessa forma, deformações microplásticas podem ser produzidas em menor quantidade conforme a quantidade de ferrita aumenta.

Essa justificativa dada por Cobo et al.⁽⁹⁾ pode ser usada para explicar o comportamento do aço DP750/980 da Figura 5. Conforme pode ser visto na micrografia desse aço ilustrada na Figura 4 ele possui um grande percentual de ferrita intergranular em matriz martensítica. Por outro lado, o aço DP450/780 pode ter apresentado grande redução do módulo de elasticidade devido ao fato de possuir ainda uma microestrutura ferrítica com martensita em forma de ilhas nos contornos dos grãos. Assim como o aço TRIP que possui uma matriz ferrítica apresentou a maior redução do módulo de elasticidade.

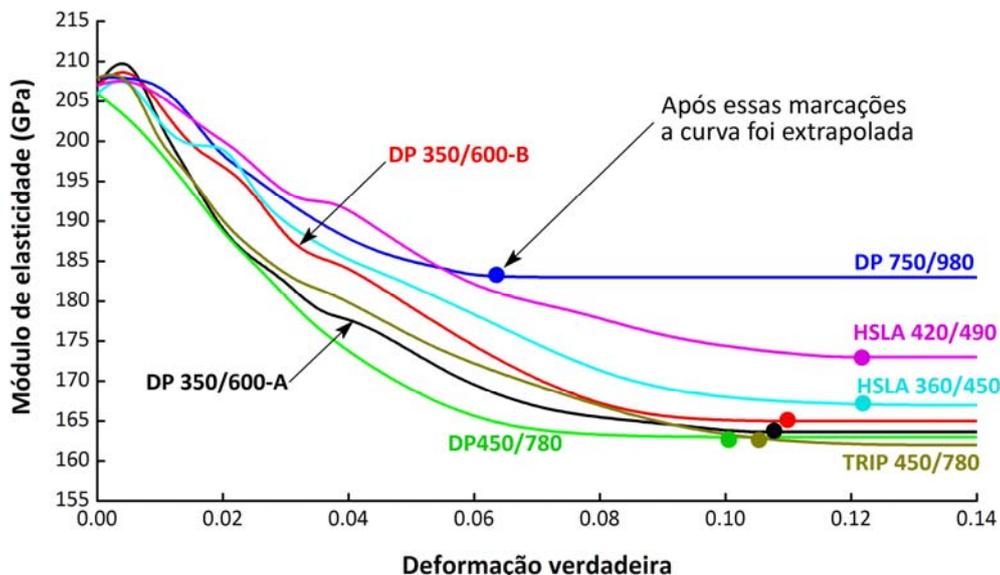


Figura 5. Módulo de elasticidade no descarregamento vs. deformação plástica.

4 CONCLUSÃO

As principais conclusões obtidas desse estudo são listadas abaixo:

- os aços DP350/600 tiveram alongamento superior aos HSLA e o grau DP450/700 apresentou alongamento uniforme maior que o HSLA 420/490, confirmando a interessante combinação de bom alongamento e alta resistência;
- o aço DP750/980 apresentou um bom alongamento para seu nível de resistência ultra-alta e pode ser interessante para aplicações em componentes estruturais que exijam baixa deformação plástica;
- o aço Trip foi o material que apresentou o melhor desempenho do ponto de vista industrial, pois consegue aliar maior capacidade de deformação plástica, menor relação LE/LR e limite de resistência de 860 MPa;
- todos os materiais apresentaram anisotropia normal e planar e o aço DP 350/600-A apresentou a menor resistência ao afinamento em deformação plana;
- os graus de aço DP apresentam maior encruamento inicial e os aços DP350/600 dos fornecedores A e B apresentaram comportamento levemente diferente, apesar de serem mesmo grau; e
- todos os materiais apresentaram variação no módulo de elasticidade durante o descarregamento. Com exceção do DP750/980 os AHSS apresentaram maior redução de acordo com a maior resistência do aço. O comportamento diferenciado do aço DP750/980 é creditado a microestrutura com grande percentual de ferrita intergranular em matriz martensítica, enquanto os outros casos a matriz é ferrítica. Dessa forma, conclui-se que o percentual de ferrita influencia na variação do módulo de elasticidade durante o descarregamento e consequentemente no retorno elástico final.

Agradecimentos

Os autores agradecem as empresas ArcelorMittal e Usiminas pelo fornecimento dos aços utilizados no neste estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 ASGARI S.A, *et al.*, Statistical analysis of finite element modeling in sheet metal forming and springback analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 18, pp.129-136., 2008.
- 2 IYENGAR R. M. *et al.*, Implications of Hot-Stamped Boron Steel Components in Automotive Structures, SAE Paper 2008-01-0857, 2008.
- 3 WORLDAUTOSTEEL, Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines, Versão 4.1, 2009. Disponível em: www.worldautosteel.org, acesso em 10 jan 2012.
- 4 PLACIDI F., VADORI R., CIMOLIN F., CAMPANA F., 2008, An efficient approach to springback compensation for ultra high strength steel structural components for the automotive field, *New Developments*.
- 5 LEMS, W. The change of Young's modulus after deformation at low temperature and its recovery. PhD thesis, Delft University of Technology, 1963.
- 6 CLEVELAND, R., GHOSH, A. K., 2002, Inelastic Effects on Springback in Metals, IDDRG Conf.
- 7 MORESTIN F., BOIVIN M., On the necessity of taking into account the variation in the Young modulus with plastic strain in elastic-plastic software, *Nucl. Eng. and Des.*, v. 162, p. 107-116, 1996.
- 8 PEREZ, R., BENITO, J. A., PRADO, J. M., 2005, Study of the inelastic response of TRIP steels after plastic deformation, *ISIJ Inter.*, Vol.45, pp. 1925-1933.
- 9 COBO. R., PLA M., HERNÁNDEZ R., BENITO J. A., 2009, Analysis of the decrease of the apparent young's modulus of advanced high strength steels and its effect in bending simulations, International Deep Drawing Research Group, IDDRG 2009 International Conference, Golden, CO, USA.
- 10 BENITO, J.A., MANERO, J.M., JORBA, J., E ROCA, A., 2005, Change of Young's Modulus of cold deformed pure iron in a tensile tests, *Metall. And Mater, trans. A*. Vol.36, pp. 3317-3324.
- 11 NBR 6673, Produtos planos de aço – Determinação das propriedades mecânicas à tração, ABNT, Rio de Janeiro, Julho de 1981.
- 12 SOUZA, S.A, *Ensaaios mecânicos de materiais metálicos – Fundamentos teóricos e práticos*. 5. ed. São Paulo, Edgard Bluncher, 2004.
- 13 OLIVER, S., JONES, T.B., FOURLARIS, G., Dual phase versus TRIP strip steels: Microstructural changes as a consequence of quasi-static and dynamic tensile testing, *Materials Characterization*, v. 58, pp. 390–400, 2007.
- 14 EGGERTSEN, P.-A., MATTIASSON, K., On constitutive modeling for springback analysis, *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 52 (6) 804-818, 2010.