

EFEITO DO MÉTODO DE CONTROLE DA VELOCIDADE DE ENSAIO SOBRE O COMPORTAMENTO EM TRAÇÃO DE AÇOS IF E DUAL PHASE LAMINADOS A FRIO*

Túlio Magno Fuzessy de Melo¹
André de Almeida Araújo²
Cleydson Fernando Gomes Torres³

Resumo

O controle do ensaio de tração em metais pode ser realizado através das velocidades de tensionamento ou de deslocamento do cabeçote da máquina. Cada método gera solicitações distintas, que podem afetar o comportamento mecânico e as propriedades do material testado. Neste estudo, avaliou-se o comportamento de dois aços laminados a frio (*Interstitial Free* - IF e *Dual Phase* - DP) em ensaios controlados por ambos os métodos, utilizando duas geometrias de corpos de prova (cps). A aplicação de uma velocidade de tensionamento constante provocou a aceleração contínua do cabeçote após a reta elástica, resultando em taxas de deformação, na região do limite de escoamento, dependentes do aço testado. Nos ensaios com velocidade de deslocamento constante, a taxa de deformação também aumentou após a região elástica, mas atingiu um valor constante, similar para as geometrias e os aços avaliados. O limite de escoamento do aço IF é mais sensível ao método de controle, aumentando com a elevação da taxa de deformação. Velocidades mais altas também reduziram os valores de alongamento após fratura, especialmente do aço IF. O método de controle e a geometria dos cps não afetaram significativamente o limite de resistência dos aços.

Palavras-chave: Ensaio de Tração; Taxa de Deformação; Aço IF; Aço *Dual Phase*.

EFFECT OF THE RATE CONTROL METHOD ON THE TENSILE TEST BEHAVIOR OF COLD ROLLED IF AND DUAL PHASE STEELS

Abstract

Tension test of metals can be controlled either by the rate of stressing or the speed of the machine crosshead. The conditions created by each control method can affect the mechanical behavior and properties of the material being tested. In this study the behavior of two cold rolled steels (*Interstitial Free* – IF and *Dual Phase* – DP) was evaluated in tension tests controlled by both methods, using two specimen geometries. The application of a constant stressing rate demanded the continuous acceleration of the crosshead after the elastic region, resulting in a material dependent strain rate at the yield area. In the tests with a constant crosshead speed the strain rate also increased after the elastic region but reached a constant value similar for the steels and geometries tested. The yield strength of the IF steel was more sensitive to the speed control method, increasing with higher strain rates. Higher speeds also reduced the elongation after fracture, especially of the IF steel. The tensile strength of both steels was not significantly affected by the specimen geometry and the speed control method.

Keywords: Tensile Test; Strain Rate; IF Steel; Dual Phase Steel.

¹ Engenheiro Mecânico, Dr.-Ing., Centro de P&D, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

² Técnico em Metalurgia, Gerência de Laboratórios, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

³ Engenheiro de Materiais, M.Sc., Gerência de Laboratórios, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

As propriedades mecânicas fundamentais dos aços, tais como os limites de escoamento (LE) e resistência (LR) e o alongamento após a ruptura (A), são determinadas através de ensaios de tração, sob condições definidas em normas nacionais e internacionais [1-5]. Além da geometria dos corpos de prova (cps) e dos procedimentos para a determinação de cada propriedade, as normas também fixam a velocidade a ser aplicada, já que ela pode afetar os resultados dos ensaios para materiais sensíveis.

De maneira geral, as normas especificam a velocidade de ensaio através de três parâmetros: velocidade de carregamento (ou tensionamento), taxa de deformação do cp ou velocidade de deslocamento do cabeçote móvel da máquina de ensaio. O método de controle tradicional, baseado na velocidade de tensionamento, é vantajoso para máquinas mais antigas, acionadas hidraulicamente, nas quais só é possível controlar a velocidade de aumento da pressão aplicada no pistão, que corresponde à velocidade de aumento da tensão aplicada no cp. Nas máquinas mais modernas, porém, a utilização de uma mesma velocidade de tensionamento para todas as espessuras de produtos e larguras de cps a serem testados exige que a velocidade de carregamento seja ajustada caso a caso. Além disso, para que a velocidade de tensionamento seja mantida constante ao longo de todo o ensaio, a velocidade de deslocamento do cabeçote da máquina deve aumentar continuamente após a região elástica, o que pode afetar o comportamento de materiais sensíveis a esse parâmetro.

Para minimizar esses efeitos, as normas recomendam o controle direto da taxa de deformação, com base no sinal de um extensômetro acoplado ao cp. Contudo, além de exigir acessórios especiais e máquinas capazes de operar em *loop* fechado, o controle pode ser comprometido durante o fenômeno de escoamento descontínuo e no caso de ocorrerem deslocamentos inesperados do cabeçote ou deslizamentos do extensômetro. A alternativa permitida pelas normas é o controle indireto da taxa de deformação, através da velocidade de deslocamento do cabeçote da máquina de ensaio, usando um valor equivalente à taxa de deformação especificada. Contudo, como o deslocamento do cabeçote e a abertura do extensômetro só são proporcionais na região elástica, é preciso conhecer a evolução da taxa de deformação durante o ensaio e seu efeito sobre as propriedades de cada material testado.

O objetivo deste estudo foi verificar o comportamento de dois aços laminados a frio, um com baixa e outro com alta resistência, submetidos a ensaios de tração controlados pela velocidade de tensionamento e pela velocidade de deslocamento do cabeçote. Além do método de controle da velocidade, também foi avaliado o efeito das dimensões dos cps sobre as propriedades mecânicas dos dois aços.

2 METODOLOGIA

2.1 Aços Avaliados

Foram utilizadas amostras de dois aços laminados a frio e recozidos em linha contínua na Usiminas, com espessura nominal de 1,5 mm. Os aços selecionados foram um ultrabaixo carbono e um bifásico, aqui denominados IF (*Interstitial Free*) e DP (*Dual Phase*), respectivamente. As faixas de composição química e propriedades mecânicas dos dois aços são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química e propriedades mecânicas dos aços utilizados

Aço	Composição química (% de peso)				Propriedades mecânicas		
	C	Si	Mn	Nb + Ti	LE (MPa)	LR (MPa)	A (%)
IF	≤ 0,020	–	≤ 0,35	≤ 0,50	120 ~ 180	270 ~ 350	≥ 39
DP	≤ 0,23	≤ 1,0	≤ 3,30	–	340 ~ 440	≥ 590	≥ 20

2.2 Ensaio de Tração

Para cada aço, foram preparados cps de tração, alinhados paralelamente à direção de laminação, com as dimensões listadas na Tabela 2, seguindo duas normas distintas: ISO 6892-1 [3] e JIS Z 2241 [4].

Tabela 2. Principais dimensões iniciais dos cps utilizados

Norma	B ^(a) (mm)	L _c ^(b) (mm)	L ₀ ^(c) (mm)
ISO 6892-1	20,0	90,0	80,0
JIS Z 2241	25,0	60,0	50,0

(a) B = largura;

(b) L_c = comprimento paralelo (parte útil);

(c) L₀ = base de medida (abertura inicial do extensômetro).

Conforme permitido nas normas, foi utilizada uma velocidade mais baixa na parte inicial de cada ensaio, onde se determina o LE, e outra mais alta na parte final, onde são medidos o LR e o alongamento. Para cada material e geometria de cp, na primeira parte dos ensaios aplicou-se o controle pela velocidade de carregamento, em kgf/min, ou pela velocidade de deslocamento do cabeçote da máquina, em mm/min. A velocidade de carregamento visada foi calculada a partir da espessura e da largura nominais do cp de cada norma, de forma que fosse mantida uma velocidade de tensionamento em torno de 8,0 MPa/s, próxima ao limite superior (10 MPa/s) fixado em normas mais antigas [1]. Nos ensaios controlados pelo deslocamento, foi visada uma velocidade de 1,5 mm/min, valor típico aplicado em laboratórios que usam esse método. A parte final dos ensaios, após o escoamento, foi controlada apenas pela velocidade de deslocamento, visando-se um valor distinto para cada geometria de cp. As condições aplicadas nos ensaios estão detalhadas na Tabela 3. Para cada condição, foram ensaiados cinco cps.

Tabela 3. Condições visadas para os ensaios de tração

Método de controle	Geometria de cp (norma)	Velocidade visada	
		Até o final do escoamento	Após o escoamento
Carregamento	ISO 6892-1	1419 kgf/min (7,7 MPa/s)	58 mm/min
	JIS Z 2241	1820 kgf/min (7,9 MPa/s)	25 mm/min
Deslocamento do cabeçote	ISO 6892-1	1,5 mm/min	58 mm/min
	JIS Z 2241		25 mm/min

Os ensaios foram realizados em máquina Instron[®] modelo 5582, controlada por um software dedicado (*Bluehill*[®]), que também faz a aquisição de dados e a análise dos resultados. Ao longo de cada ensaio foram registrados os dados de deslocamento do cabeçote, carga aplicada e alongamento do cp, medido por vídeo-extensometria. Os valores de LE foram determinados pelo software para uma deformação plástica de 0,2%, já que ambos os aços apresentam escoamento contínuo. Os valores de LR

e A_u (alongamento uniforme) foram calculados no ponto de carga máxima de cada curva, enquanto o alongamento total (A) foi determinado no ponto de ruptura do cp.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Exemplos típicos das curvas tensão-deformação obtidas são mostrados na Figura 1. Conforme esperado, para todas as condições avaliadas o aço DP apresenta LE e LR mais altos e A mais baixo em relação ao IF. A análise do efeito das condições de ensaio sobre os dois aços será realizada a seguir, de forma separada para a parte inicial dos ensaios, até o escoamento, e para a parte final, após o escoamento.

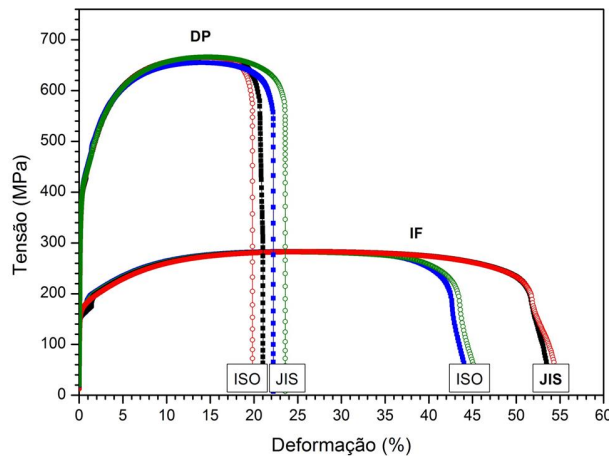


Figura 1. Exemplos típicos das curvas tensão-deformação obtidas.

3.1 Parte Inicial - Até o Escoamento

3.1.1 Controle da velocidade de carregamento

O comportamento típico dos aços avaliados nos ensaios realizados com velocidade de carregamento constante é apresentado na Figura 2. Como se vê na Figura 2 (a), a máquina de ensaio foi capaz de manter, ao longo de toda a etapa inicial, a velocidade visada, indicada na Tabela 3.

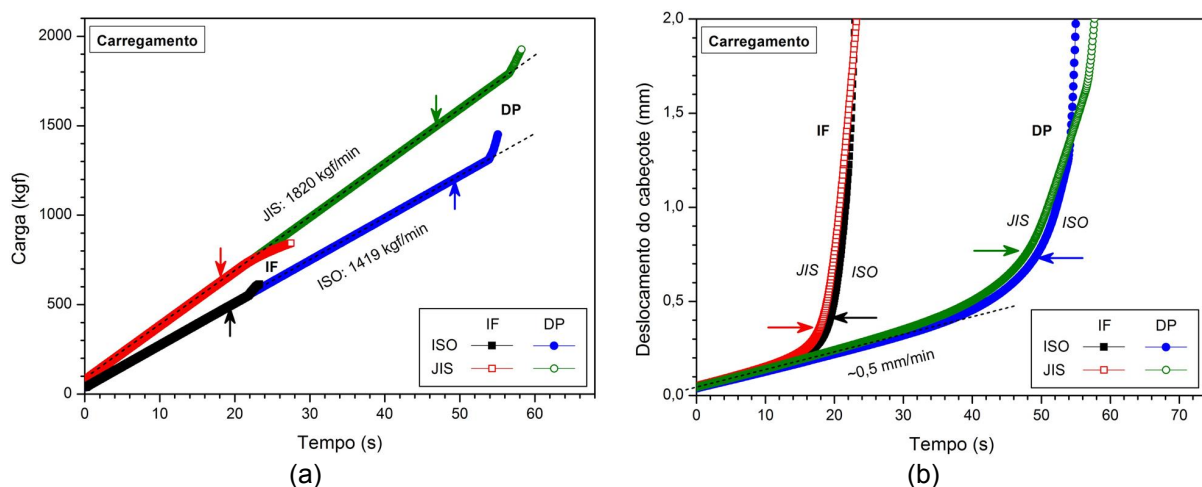


Figura 2. Exemplo típico da parte inicial das curvas de (a) carga e (b) deslocamento do cabeçote ao longo do tempo, para os ensaios controlados pela velocidade de carregamento. As setas indicam a posição onde foi medido o LE.

As velocidades de tensionamento obtidas, calculadas a partir da inclinação das curvas de carga-tempo, considerando as dimensões reais de cada cp, são listadas na Tabela 4. Verifica-se que, para esse método de controle, as velocidades de tensionamento ficaram próximas do valor de 8,0 MPa visado, portanto abaixo do máximo permitido em normas mais antigas [1] e dentro das faixas especificadas em normas mais recentes [2-5].

Tabela 4. Velocidades de tensionamento e de deslocamento do cabeçote medidas nos ensaios controlados pelo carregamento

Método de controle	Norma	Aço	Velocidade de tensionamento (MPa/s)	Velocidade de deslocamento (mm/min)	
				Reta elástica	Posição do LE
Carregamento	ISO 6892-1	IF	7,9	0,5	10,0
		DP			3,6
	JIS Z 2241	IF	8,1		7,6
		DP			2,8

Contudo, como se vê nas curvas da Figura 2 (b), a velocidade de deslocamento do cabeçote apresentou um valor constante apenas na região elástica, na qual a carga e o deslocamento são proporcionais. A partir daí, para manter uma velocidade de carregamento constante, a máquina de ensaio passou a acelerar o cabeçote, de forma a compensar o alívio de carga, em relação à reta elástica, associado à crescente parcela plástica da deformação aplicada.

Os valores da velocidade de deslocamento do cabeçote na região elástica e no ponto de determinação do LE, estimados através da inclinação de cada curva da Figura 2 (b), são apresentados na Tabela 4. Na região elástica, a velocidade de deslocamento foi similar para os dois aços, mas na posição do LE o valor medido para o aço DP foi menor do que para o IF. Essa diferença decorre do encruamento distinto dos dois aços na região plástica, visível nas curvas tensão-deformação da Figura 1. A taxa de encruamento mais alta no aço DP resulta em uma menor queda de carga associada à deformação plástica, em relação àquela necessária para a deformação apenas elástica, exigindo com isso uma menor aceleração do cabeçote para manter constante a velocidade de carregamento.

Os resultados da Tabela 4 também indicam uma velocidade de deslocamento do cabeçote um pouco mais alta para os cps da norma ISO 6892-1, cujo comprimento paralelo é igual a 90 mm. Para os cps da norma JIS Z 2241, que possuem um comprimento paralelo menor (60 mm), a velocidade foi mais baixa.

3.1.2 Controle da velocidade de deslocamento do cabeçote

Conforme se observa na Figura 3 (a), nos ensaios controlados pelo deslocamento do cabeçote a velocidade permaneceu constante ao longo de toda a etapa, com o valor igual ao visado (1,5 mm/min), para todos os aços e geometrias avaliados. A velocidade de carregamento, por outro lado, só permaneceu constante na região elástica, caindo continuamente a partir daí (Figura 3 b). Conforme discutido acima, esse comportamento está ligado à ocorrência de deformação plástica, que provoca uma queda na carga aplicada em relação àquela necessária para a deformação totalmente elástica.

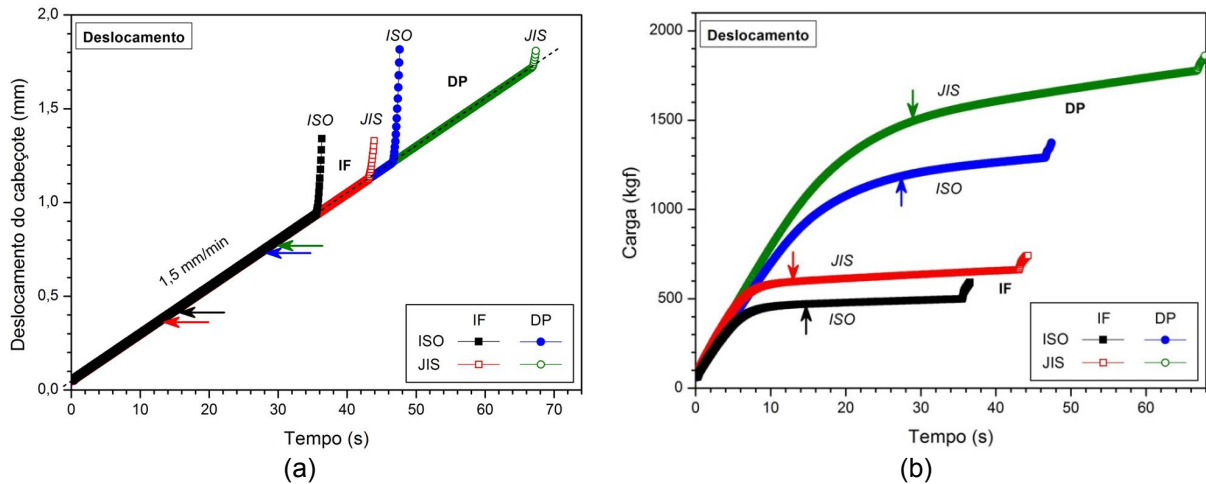


Figura 3. Exemplo típico da parte inicial das curvas de (a) deslocamento e (b) carga ao longo do tempo, para os ensaios controlados pela velocidade de deslocamento do cabeçote. As setas indicam a posição onde foi medido o LE.

Como pode ser visto na Tabela 5, para a velocidade de deslocamento do cabeçote igual a 1,5 mm/min, a velocidade de tensionamento na região elástica ficou em torno de 21 MPa/s para os dois aços avaliados, independentemente da geometria de cp (norma) utilizada. Esse valor excede o máximo de 10 MPa/s permitido por normas mais antigas, como a NBR 6673 [1], mas está dentro das faixas previstas em normas mais recentes, entre elas a ISO 6892-1 (de 6 MPa/s a 60 MPa/s) [3] e a JIS Z 2241 (de 3 MPa/s a 30 MPa/s) [4]. Na posição onde foi determinado o LE, indicada pelas setas na Figura 3 (b), a velocidade de tensionamento ficou bem mais baixa, variando principalmente com o aço testado. Para o aço DP, os valores obtidos ficaram entre 3,3 MPa/s e 4,3 MPa/s, enquanto para o aço IF foram identificadas velocidades ainda menores, entre 0,6 MPa/s e 0,8 MPa/s. Conforme discutido anteriormente, a diferença de comportamento dos dois aços está associada à taxa de encruamento na região plástica, menor no aço IF que no DP. Embora os valores obtidos sejam baixos, todos eles atendem às normas, que só especificam faixas para a região elástica [1-5].

Tabela 5. Velocidades de deslocamento e de carregamento medidas nos ensaios controlados pelo deslocamento do cabeçote

Método de controle	Norma	Aço	Velocidade de deslocamento (mm/min)	Velocidade de tensionamento (MPa/s)	
				Reta elástica	Posição do LE
Deslocamento	ISO 6892-1	IF	1,5	21,0	0,6
		DP			3,3
	JIS Z 2241	IF			0,8
		DP			4,3

3.1.3 Comparação dos métodos de controle

O principal objetivo da primeira parte do ensaio de tração é determinar o valor da tensão necessária para dar início à deformação plástica do material, ou seja, seu LE, quando submetido a uma sollicitação uniaxial. Na execução do ensaio, a sollicitação é imposta ao cp pelo deslocamento do cabeçote da máquina, e o material responde com uma resistência à deformação, medida pela célula de carga. Portanto, para que

a solicitação imposta seja igual para qualquer material e geometria de cps, deveria ser aplicada uma mesma taxa de deformação, medida pela abertura de um extensômetro.

Como se vê nos exemplos da Figura 4, a evolução da deformação aplicada ao longo dos ensaios foi similar para os dois métodos de controle utilizados. Nos ensaios controlados pela velocidade de carregamento, a taxa de deformação permaneceu constante na região elástica, com um valor da ordem de $0,00003 \text{ s}^{-1}$, para ambos os aços e as duas geometrias de cp usadas. A partir do início da deformação plástica, a taxa de deformação aumentou continuamente, em consequência da aceleração do cabeçote, mostrada na Figura 2 (b). Nos ensaios controlados pelo deslocamento do cabeçote, mostrados na Figura 4 (b), embora a velocidade tenha sido mantida em $1,5 \text{ mm/min}$ ao longo de toda etapa, a taxa de deformação também ficou constante apenas na região elástica, com um valor em torno de $0,00010 \text{ s}^{-1}$. A partir daí, a taxa cresceu durante algum tempo, de forma mais lenta que nos ensaios controlados pelo carregamento, atingindo um novo valor no qual permaneceu aproximadamente constante até o final da etapa.

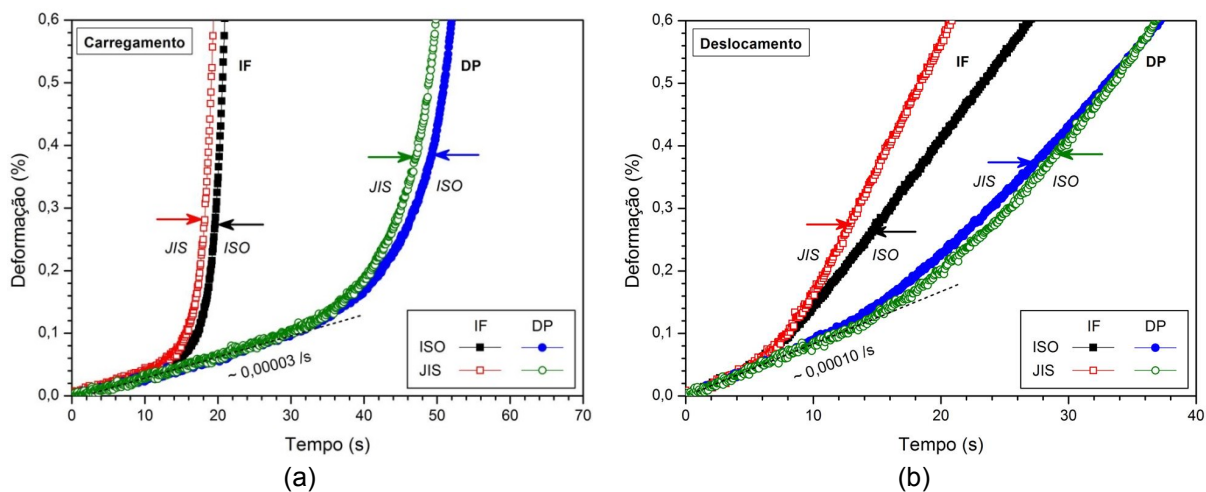


Figura 4. Exemplo típico da parte inicial das curvas de deformação ao longo do tempo, para os ensaios controlados pela velocidade de (a) carregamento e (b) deslocamento do cabeçote. As setas indicam a posição onde foi medido o LE.

O fato de a taxa de deformação ter variado ao longo dos ensaios controlados pela velocidade de deslocamento do cabeçote está ligado à crescente parcela plástica da deformação aplicada, não proporcional à deformação elástica do material testado e da própria estrutura da máquina de ensaio. Caso os ensaios fossem realizados com uma taxa de deformação constante, controlada pela abertura do extensômetro, a máquina seria obrigada a reduzir a velocidade de deslocamento do cabeçote a partir do final da região elástica, compensando o crescimento da parcela plástica não linear da deformação aplicada.

Na Tabela 6 são listados os valores da inclinação das curvas da Figura 4, que corresponde à taxa de deformação, medida em torno do ponto onde foi determinado o LE, indicado pela seta em cada curva. Observa-se que a taxa de deformação nessa região foi sempre mais alta nos ensaios controlados pelo carregamento, especialmente para o aço IF, no qual a diferença entre os valores dos dois métodos chegou a cerca de 500% em alguns casos. Para o aço DP, a taxa medida nos ensaios controlados pelo carregamento ficou cerca de 100% acima daquela resultante da velocidade de deslocamento constante. Como discutido

anteriormente, a diferença entre os dois aços decorre de seu comportamento distinto na região plástica: o aço DP apresenta uma taxa de encruamento mais alta que o IF, exigindo com isso uma menor aceleração do cabeçote para manter constante a velocidade de carregamento. Já em relação à geometria dos cps, as taxas de deformação medidas na região do LE foram da mesma ordem de grandeza para os cps das duas normas. Deve-se ressaltar que, apesar das grandes variações observadas na Tabela 6, as taxas de deformação obtidas para todas as condições avaliadas estão dentro das faixas especificadas nas normas ISO 6892-1 [3] e JIS Z 2241 [4].

Tabela 6. Taxas de deformação medidas nos ensaios realizados

Aço	Método de controle	Norma	Taxa de deformação (s^{-1})	
			Reta elástica	Região do LE
IF	Carregamento	ISO 6892-1	0,00003	0,00170
		JIS Z 2241		0,00170
	Deslocamento	ISO 6892-1	0,00010	0,00030
		JIS Z 2241		0,00040
DP	Carregamento	ISO 6892-1	0,00003	0,00050
		JIS Z 2241		0,00050
	Deslocamento	ISO 6892-1	0,00010	0,00025
		JIS Z 2241		0,00025

O efeito das condições de ensaio sobre a parte inicial das curvas tensão-deformação obtidas para cada aço avaliado pode ser visto na Figura 5. A inclinação da parte elástica ficou em torno de 200 GPa para o aço IF e 230 GPa para o DP, não sendo significativamente afetada pela geometria do cp ou pelo método controle usado. Isso indica que a variação da taxa de deformação na região elástica dentro da faixa mostrada na Tabela 6 (de 0,00003 s^{-1} a 0,00010 s^{-1}) não afetou o valor do módulo de rigidez dos aços testados.

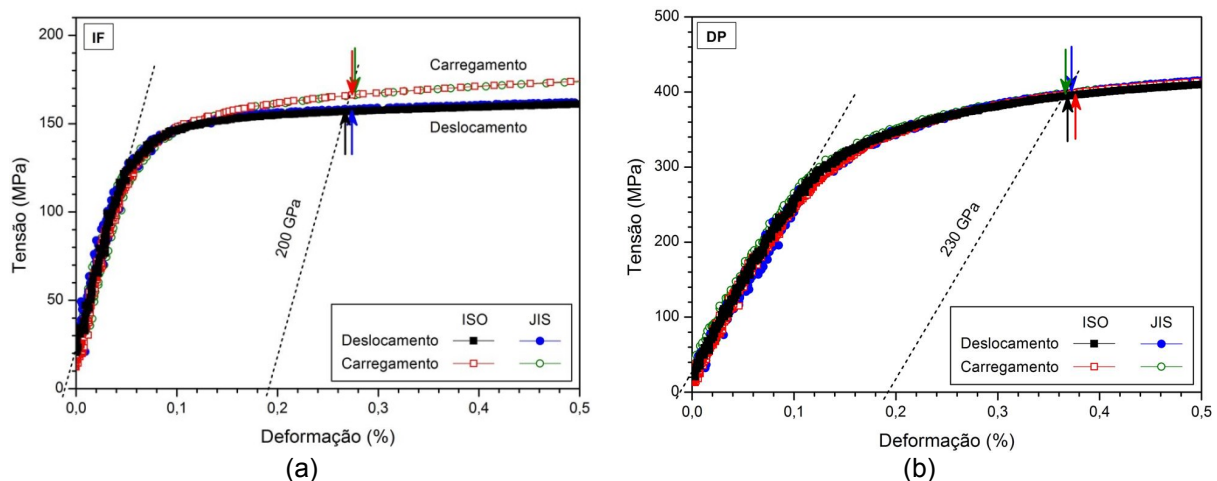


Figura 5. Exemplo típico da parte inicial das curvas tensão-deformação obtidas para os aços (a) IF e (b) DP. As setas indicam a posição onde foi medido o LE.

Por outro lado, fica evidente nas curvas da Figura 5 que o método de controle afetou os valores de LE do aço IF, o mesmo não ocorrendo com o aço DP. Os valores determinados pelo software dedicado da máquina de ensaio, apresentados na

Tabela 7, confirmaram essa observação. Embora todos os resultados obtidos estejam dentro das faixas especificadas para os dois aços, os valores médios de LE do aço IF nos ensaios controlados pelo carregamento ficaram até 9,0 MPa acima daqueles medidos sob controle de deslocamento do cabeçote, diferença muito maior que a própria dispersão dos resultados dos cinco cps testados em cada condição. Essa variação está relacionada à grande diferença entre as taxas de deformação aplicadas pelos dois métodos de controle na região do LE do aço IF, mostradas na Tabela 6. Já para o aço DP, embora a taxa de deformação nos ensaios controlados pelo carregamento tenha sido cerca do dobro daquela medida sob controle de deslocamento, a diferença entre os valores médios de LE obtidos pelos dois métodos ficou abaixo da dispersão dos resultados individuais. Os valores da Tabela 7 também mostram que a geometria de cp não teve efeito importante sobre o LE dos aços, seguindo a tendência observada na taxa de deformação (Tabela 6).

Tabela 7. Resultados de LE obtidos nos ensaios realizados (média±desvio padrão)

Aço	Norma	Método de controle	LE (MPa)	Diferença entre as médias (MPa)
IF	ISO 6892-1	Carregamento	166,2± 0,5	9,0
		Deslocamento	157,2± 1,6	
	JIS Z 2241	Carregamento	166,0± 0,7	8,4
		Deslocamento	157,6± 0,6	
DP	ISO 6892-1	Carregamento	398,0± 2,5	0,3
		Deslocamento	398,3± 3,5	
	JIS Z 2241	Carregamento	397,0± 1,0	0,3
		Deslocamento	397,3± 1,9	

3.2 Parte Final - Após o Escoamento

Conforme mencionado anteriormente, a parte final dos ensaios, após o escoamento, foi controlada apenas pela velocidade de deslocamento do cabeçote, visando-se um valor distinto para cada geometria de cp (Tabela 3). Os exemplos apresentados na Figura 6 mostram que as velocidades visadas foram mantidas ao longo de toda a etapa, independentemente do material e do método de controle usado na parte inicial, anterior ao escoamento.

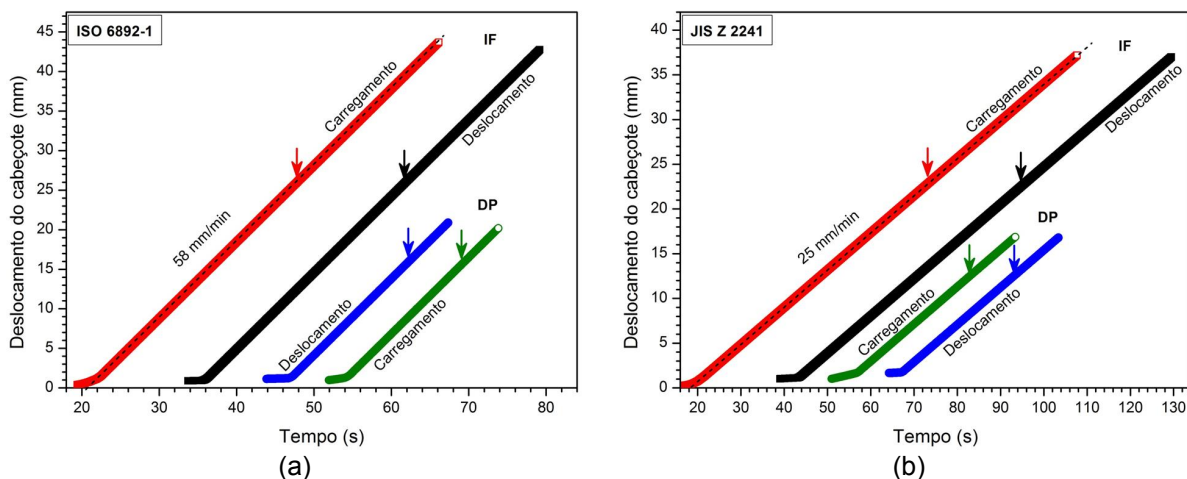


Figura 6. Exemplo típico da parte final das curvas deslocamento-tempo para os cps das normas (a) ISO 6892-1 e (b) JIS Z 2241. As setas indicam o ponto de carga máxima de cada curva.

A exemplo do que se observou na primeira parte dos ensaios, embora a velocidade de deslocamento do cabeçote tenha permanecido constante ao longo do tempo, o mesmo não aconteceu com a taxa de deformação, como se vê nos exemplos da Figura 7. Nessa Figura é mostrada a evolução da deformação aplicada ao longo da segunda etapa, calculada pela razão entre a abertura do vídeo-extensômetro e a base de medida inicial. As curvas foram interrompidas no ponto de carga máxima, indicado pelas setas, porque a partir daí a deformação concentra-se na estricção, onde a taxa de deformação real do material passa a ser maior que a velocidade de abertura do extensômetro. As curvas da Figura 7 mostram que, embora varie ao longo da região plástica, a taxa de deformação atinge, em torno do ponto de carga máxima, um valor para cada geometria de cp aproximadamente independente do aço e do método de controle aplicado na primeira parte dos ensaios. Para os cps da norma ISO 6892-1, submetidos a uma velocidade de deslocamento de 58 mm/min, a taxa de deformação na região do LR ficou em torno de $0,011 \text{ s}^{-1}$, ultrapassando o valor máximo permitido nessa norma ($0,008 \text{ s}^{-1}$) [3]. Já para os cps da JIS Z 2241, testados a uma velocidade mais baixa (25 mm/min), a taxa de deformação foi menor, da ordem de $0,007 \text{ s}^{-1}$, atendendo ao limite fixado [4].

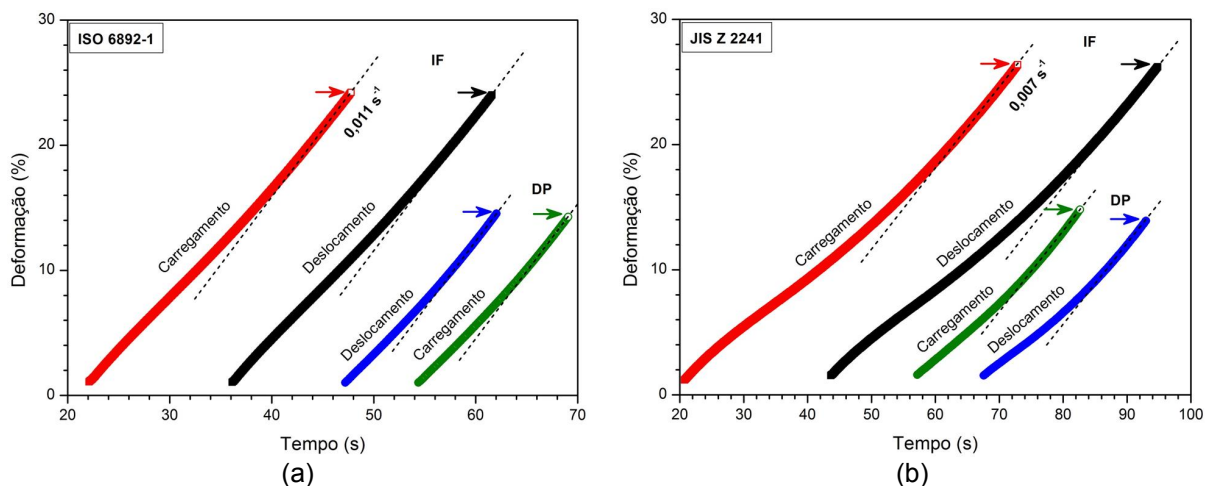


Figura 7. Exemplo típico da parte final das curvas deformação-tempo obtidas para os cps das normas (a) ISO 6892-1 e (b) JIS Z 2241. As setas indicam o ponto de carga máxima, onde foram medidos o LR e o A_u .

As propriedades mecânicas medidas na etapa final dos ensaios realizados são apresentadas na Tabela 8. O valor médio de LR de cada material não foi afetado de forma significativa pela velocidade de deslocamento aplicada ou pelas dimensões dos cps usados, apesar das diferenças na taxa de deformação mostradas na Figura 7. Já o alongamento total (A) de ambos os aços foi sempre maior nos ensaios com velocidade mais baixa, aplicada nos cps da norma JIS Z 2241. Essa diferença, já visível nas curvas tensão-deformação mostradas na Figura 1, foi mais significativa para o aço IF, confirmando que ele é mais sensível à taxa de deformação que o aço DP. Com relação ao alongamento uniforme (A_u), também foram obtidos valores médios maiores nos ensaios com velocidade mais baixa, porém a diferença entre os resultados foi menor que no caso do alongamento total. Isso indica que a velocidade de deslocamento do cabeçote e, conseqüentemente, a taxa de deformação aplicada na parte final dos ensaios afeta principalmente o alongamento não uniforme dos

aços testados, que corresponde à deformação concentrada na região da estrição. Conforme mencionado acima, esse efeito foi maior no aço IF do que no DP.

Tabela 8. Propriedades mecânicas determinadas na etapa final dos ensaios realizados (média±desvio padrão)

Aço	Norma	Velocidade de ensaio	Método de controle inicial	LR (MPa)	A _u (%)	A (%)
IF	ISO 6892-1	58 mm/min	Deslocamento	283,2±2,1	24,2±0,2	44,7±0,7
			Carregamento	282,0±1,0	24,4±0,3	44,9±0,8
	JIS Z 2241	25 mm/min	Deslocamento	282,8±1,1	26,2±0,1	54,0±0,4
			Carregamento	281,6±0,9	26,1±0,4	54,5±0,7
DP	ISO 6892-1	58 mm/min	Deslocamento	670,7±2,5	13,5±1,0	20,2±1,9
			Carregamento	662,7±1,2	13,6±1,1	20,5±0,5
	JIS Z 2241	25 mm/min	Deslocamento	668,7±2,2	14,5±0,2	24,7±1,5
			Carregamento	664,3±0,6	14,8±0,1	24,7±1,4

4 CONCLUSÃO

Os dois métodos de ensaio avaliados (controle do tensionamento e do deslocamento do cabeçote) resultam em uma taxa de deformação constante na região elástica dos aços avaliados, não afetando o valor de seu módulo de rigidez.

A partir do final da reta elástica, ambos os métodos provocam um aumento contínuo da taxa de deformação, como resultado de mecanismos distintos. Nos ensaios com velocidade de deslocamento constante, o aumento da taxa de deformação está associado à parcela plástica da deformação aplicada, que cresce mais rapidamente que a parte elástica linear, com um comportamento similar para os dois aços avaliados. Nos ensaios com velocidade de tensionamento constante, a deformação plástica provoca uma queda de carga em relação à reta elástica, compensada por uma aceleração contínua do cabeçote da máquina. Como a queda de carga é maior no aço IF, em função de seu menor encruamento, ele apresenta um aumento mais acentuado da taxa de deformação em relação ao aço DP nos ensaios controlados por esse método. Como resultado, os valores de LE do aço IF medidos sob velocidade de tensionamento de 8,0 MPa/s ficaram até 9,0 MPa acima daqueles registrados nos ensaios com 1,5 mm/min, enquanto para o aço DP os valores de LE foram similares nos dois métodos de controle. As dimensões dos corpos de prova utilizados, baseadas nas normas ISO 6892-1 e JIS Z 2241, não tiveram efeito importante sobre a taxa de deformação aplicada e, conseqüentemente, sobre o LE de cada aço. Os resultados obtidos indicam que o controle da velocidade de tensionamento, além de exigir o ajuste da velocidade de carregamento para cada espessura, resulta em uma solicitação variável em função da resposta de cada material testado, podendo afetar significativamente os valores de LE medidos.

Na parte final dos ensaios, após o escoamento, a utilização de uma velocidade de deslocamento mais alta não afetou o LR dos aços avaliados, mas provocou uma diminuição no alongamento total, principalmente do aço IF. Embora a parte uniforme do alongamento também tenha sofrido uma pequena queda, o maior efeito da velocidade de ensaio mais alta foi identificado no alongamento não uniforme.

REFERÊNCIAS

- 1 Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6673. Produtos planos de aço – Determinação das propriedades mecânicas à tração, 1981.

- 2 European Committee for Standardization, EN 10002-1. Metallic materials – Tensile testing - Part 1: Method of test at ambient temperature. Brussels, 2001.
- 3 European Committee for Standardization, EN ISO 6892-1. Metallic materials – Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature. Brussels, 2009.
- 4 Japanese Standards Association, JIS Z 2241. Metallic materials – Tensile testing – Method of test at room temperature, 2011.
- 5 American Society for Testing and Materials, ASTM E8/E8M. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2013.