

# Equipamento inovador para ensaios uniaxiais de caracterização mecânica de tração-compressão utilizando provetes miniaturizados de chapa metálica

A novel uniaxial test equipment for tension-compression mechanical characterization using miniaturized sheet metal specimens

Daniel J. Cruz<sup>1</sup> | Rui L. Amaral<sup>1</sup> | Sara S. Miranda<sup>1</sup> | Abel D. Santos<sup>2</sup> | Joaquim Mendes<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI), Portugal, ([dcruz@inegi.up.pt](mailto:dcruz@inegi.up.pt), [ramaral@inegi.up.pt](mailto:ramaral@inegi.up.pt), [smiranda@inegi.up.pt](mailto:smiranda@inegi.up.pt))

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade do Porto (FEUP), Portugal, ([abel@fe.up.pt](mailto:abel@fe.up.pt), [jgabriel@fe.up.pt](mailto:jgabriel@fe.up.pt))

## resumo

A crescente utilização de materiais metálicos mais leves, em combinação com a complexidade dos componentes a produzir, tem associados novos desafios para a indústria de conformação de chapa metálica, como é o caso da necessidade de uma mais ampla e melhor caracterização dos materiais. A conformação plástica destes materiais envolve operações onde o material tem solicitações, tanto de tração como de compressão, bem como de ambas em combinação alternada. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema experimental para determinação de propriedades fundamentais de materiais metálicos em chapa fina, através de ensaios de caracterização mecânica para solicitações com inversão de sentido. Como a encurvadura do provete é um fenómeno inerente à compressão envolvendo espessuras finas, a sua geometria foi devidamente estudada e otimizada para minimizar e evitar esse efeito. Para avaliar o desempenho do sistema desenvolvido são apresentados resultados experimentais de ensaios monotónicos e ensaios com inversão no sentido realizados em dois aços, DP500 e DP780, estudando-se fenómenos característicos, por exemplo, o efeito de *Bauschinger*.

**Palavras-chave:** caracterização mecânica de materiais, efeito de *Bauschinger*, correlação digital de Imagem (DIC)

## abstract

The increasing use of lighter metallic materials, in combination with the complexity of the components to be produced, has associated new challenges for the sheet metal forming industry, such as the need for wider and better material characterization. The forming processes of these materials involve operations where the material is subjected to tensile or compressive stresses, which may be applied in alternating combination. This paper presents the development of an experimental system for the determination of fundamental properties of sheet metal materials during reverse loadings. Buckling of the specimen is an inherent phenomenon in compression, especially for thin materials; therefore, specimen geometry was properly studied and optimized to minimize and avoid this effect. To evaluate the performance of the developed system, experimental results of monotonic tests and tests with reverse loadings are presented, applied to high-strength steels, DP500 and DP780, by studying characteristic phenomena, such as the Bauschinger effect.

**Keywords:** materials mechanical characterization, Bauschinger effect, digital image correlation (DIC)

# 1. INTRODUÇÃO

Os recentes desafios relativos à importância da eficiência energética, que são materializados na redução dos limites de emissão de gases de escape, têm como consequência a procura de componentes construtivos na indústria automóvel cada vez mais leves (Berladir et al., 2017; Ghosh et al., 2019). Esse desafio tecnológico leva à utilização, quer de aços avançados, como é o caso dos DP (*Dual Phase*, ou bifásicos), quer de ligas de alumínio de alta resistência ou ainda de outros materiais. Os aços avançados de alta resistência (AHSS – *Advanced High Strength Steels*) estão entre os materiais mais utilizados devido à sua elevada relação resistência/peso. No entanto, o fabrico de componentes com este tipo de materiais tem imposto à indústria novos desafios no seu processamento (Hilditch et al., 2015).

O processo de conformação plástica de chapa metálica é um procedimento tipicamente complexo, no qual, o material pode ser sujeito a diferentes trajetórias de deformação (Chang et al., 2020). Na maioria dos processos clássicos, as peças obtidas por conformação plástica podem ser obtidas em etapas simples. Contudo para produzir peças de maior complexidade geométrica é necessário dividir o processo em diferentes etapas, envolvendo trajetórias de deformação mais complexas. Tal como se pode observar na Fig. 1, no processo de estampagem inversa a chapa é deformada de modo inverso em duas etapas sucessivas (Ben Othman et al., 2017). Nesta operação, a trajetória de deformação do material altera-se de modo evidente na segunda etapa, conseguindo-se um incremento de conformabilidade do material e uma possível alteração da tensão aplicada. Neste contexto, um fenómeno relevante foi descoberto por *Bauschinger* (1881) que observou que alguns materiais sujeitos a cargas compressivas após cargas de tração, apresentavam tipicamente uma menor tensão de cedência após a inversão. Este efeito ficou conhecido como o efeito *Bauschinger* (BE). *Yoshida et al.* (2002) demonstraram que o efeito de *Bauschinger* pode ser dividido em três fenómenos característicos tal como representado na Fig. 2: i) **cedência após inversão**, que normalmente se manifesta através de uma diminuição da tensão de cedência observada após a inversão da direção da carga; ii) **efeito de *Bauschinger* transitório**, que geralmente ocorre após a inversão da tensão aplicada ter mudado de tração para compressão; iii) **amacramento permanente**, que ocorre após o efeito de *Bauschinger* transitório.

O efeito de *Bauschinger* pode ser explicado com base em dois mecanismos distintos. O primeiro propõe que a presença de tensões residuais localizadas, como as que encontram agrupadas nos limites de grão após carregamento do material, facilitam a entrada em regime plástico quando o material é solicitado em sentido contrário ao inicial. O segundo mecanismo é baseado na teoria das deslocações. Durante a deformação plástica as deslocações nas bandas de escorregamento ativas vão deslizando até serem imobilizadas em obstáculos, formando

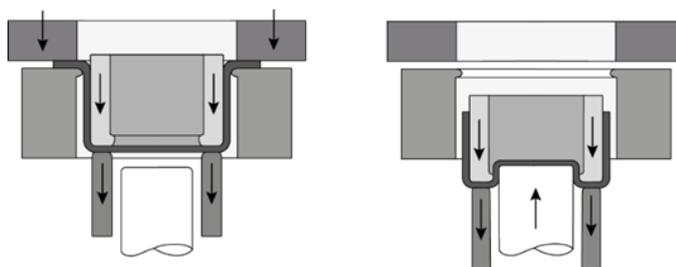


Fig. 1 | Representação esquemática do processo de estampagem inversa

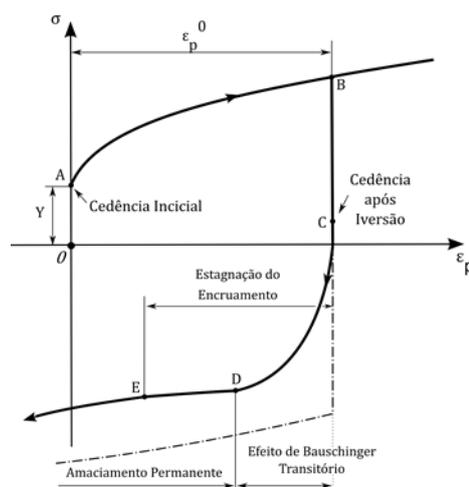


Fig. 2 | Representação do efeito *Bauschinger* numa curva tensão-extensão de um material dúctil

empilhamentos de elevada densidade. Quando a solitação do provete é retirada, para além de um pequeno recuo de algumas deslocações, tal estado pode persistir indefinidamente a baixas temperaturas, uma vez que a estrutura é bastante estável mecanicamente. Contudo, quando a direção do carregamento é invertida, algumas das deslocações nas bandas de deslizamento deslocam-se apreciavelmente, com baixas tensões de corte, pois nesta direção as barreiras não são tão fortes como eram na direção oposta (Stoudt et al., 2017).

Experimentalmente, o efeito *Bauschinger* para materiais sob a forma de chapa metálica pode ser analisado e quantificado em ensaios experimentais onde ocorra uma mudança na trajetória de deformação. Estes testes podem ser agrupados principalmente em três categorias: (i) ensaio de corte cíclico no plano; (ii) ensaio de dobragem e desdobragem e (iii) ensaio de tração-compressão uniaxial no plano (Zang et al., 2014).

O ensaio de corte cíclico no plano foi utilizado por diversos autores (Cao et al., 2009; Thuillier & Manach, 2009; Yoon et al., 2005) para avaliar o efeito *Bauschinger* em materiais sob a forma de chapa metálica, contudo a deformação na região de corte pode ser não homogénea e muitas vezes é difícil de quantificar (Bouvier et al., 2006). O ensaio de dobragem e desdobragem é utilizado para avaliar o efeito de *Bauschinger* de um dado material uma vez que neste tipo de solitação as fibras internas e externas do material estão sujeitas a solitações alternadas de compressão-tração e tração-compressão respetivamente. Embora seja utilizado por diversos autores (Carbonniere et al., 2009; Geng et al., 2002; Yoshida et al., 1998; Zang et al., 2014) este teste apresenta algumas desvantagens: em primeiro lugar, para grandes deformações o efeito de *Bauschinger* é difícil de identificar; em segundo lugar, a tensão e a deformação estão distribuídas de uma forma gradiente na área de análise; em terceiro lugar, as propriedades de encruamento do material sob uma carga monotónica não podem ser adquiridas utilizando este tipo de ensaio (Chang et al., 2020).

O ensaio de tração-compressão uniaxial tem sido alvo de atenção nas últimas décadas. Contudo a realização de ensaios uniaxiais de compressão no plano para chapas metálicas constitui um verdadeiro desafio. Na realidade, quando uma chapa é submetida a cargas compressivas, os fenómenos de encurvadura tendem a tornar-se significativos, devido à própria natureza esbelta da

chapa. Este fenômeno intensifica-se, sobretudo, quando a razão entre o comprimento e espessura da chapa é elevada. Para estes casos, não é fácil que o ensaio prossiga até elevadas extensões, porque o provete sofre encurvadura e os resultados do ensaio deixam de ser válidos.

Nos últimos anos, vários investigadores propuseram diversas soluções para ultrapassar a questão da encurvadura nos ensaios de compressão. Os objetivos gerais em todas elas passam por maximizar a extensão admissível à compressão e uniformizar ao máximo a distribuição da extensão e tensão ao longo da secção calibrada. Essencialmente existem três tipos de soluções para esse fim: i) ensaio de compressão com empilhamento de provetes metálicos (*pack method*); ii) ensaio de compressão com um sistema de suporte lateral; iii) ensaio de compressão com amostras miniaturizadas.

*Aitchison and Tuckerman (1939)*, empilharam provetes de chapa metálica num único conjunto, para testar materiais em compressão. As diferentes amostras são unidas através de um adesivo ou elementos mecânicos (*Tozawa, 1978*). Durante o teste, a estabilidade lateral é conseguida com a utilização de suportes entre os provetes mais exteriores. Contudo, este método é incapaz de avaliar o comportamento do material até grandes deformações devido à encurvadura da região suportada lateralmente. Uma vez que a junção dos provetes pode não ser suficiente para prevenir a encurvadura, *Kurukuri et al. (2014)* desenvolveram um método de ensaio onde o comprimento do conjunto é reduzido de modo a evitar o fenómeno de encurvadura. *Yoshida et al. (2002)* utilizaram uma variação deste método, onde se conseguiram atingir deformações compressivas entre 13 e 25% para diferentes classes de materiais.

Devido ao elevado número de amostras e à complexa preparação das mesmas, os métodos de ensaio utilizando apenas um provete de chapa metálica auxiliado por um sistema de suporte lateral, são preferenciais (*Tan et al., 1994*). *Dietrich and Turski (1978)* utilizaram um conjunto de placas de suporte lateral e evitaram a encurvadura até valores de deformação compressiva de 0,3%. *Boger et al. (2005)*, utilizaram duas placas de suporte sólidas que aplicava no provete uma força lateral de contenção constante gerada por um cilindro hidráulico. Com esta metodologia foi possível atingir um máximo de deformação compressiva de cerca de 8% em testes cíclicos. Outro dispositivo comum, desenvolvido por *Sekine and Kuwabara (2005)* utiliza dois suportes com um formato em "pente" ou "garfo" de forma a reduzir a região do provete que não está suportada. Este *design* é uma melhoria em relação aos suportes sólidos porque, à medida que a amostra é comprimida, os modelos "macho" e "fêmea" passam um pelo outro, permitindo que todo o comprimento da amostra seja suportado. Ao eliminar o problema de interferência entre as placas e o dispositivo de suporte, foram obtidas deformações na ordem de 15 a 20% para chapas à compressão. Alternativamente, *Cao et al. (2009)* desenvolveram uma configuração experimental onde o provete é colocado entre dois conjuntos de blocos deslizantes em forma cunha, sem área não suportada, onde foi possível atingir uma deformação à compressão de cerca 10%.

Em solicitações de compressão, a encurvadura do provete é influenciada principalmente pela relação entre o seu comprimento e espessura (*Boger et al., 2005*). Neste sentido, de forma a reduzir a encurvadura precoce do material, os métodos de ensaio com recurso a amostras miniaturizadas são uma solução poderosa para a correta caracterização mecânica de um dado material à compressão. *Tritschler et al. (2014)* testaram uma liga de

titânio de 1,2 mm de espessura em compressão utilizando amostras com uma largura e um comprimento de secção uniforme de 2 mm e 2,5 mm, respetivamente. Com esta geometria, foi possível atingir uma extensão de compressão de cerca 2%. *Hußnätter (2009)* utilizou uma geometria de amostra com um comprimento e largura de 2x2 mm para a caracterização de uma liga de magnésio (AZ31). Neste estudo, foram obtidas deformações à compressão de cerca de 5%. *Suttner and Merklein (2016)* desenvolveram um protótipo para a caracterização de materiais metálicos quando sujeitos não só a cargas uniaxiais de compressão como também a carregamentos cíclicos. O provete miniaturizado considerado possui uma área uniforme de análise com 2 mm de comprimento e largura. Este dispositivo foi capaz de realizar com sucesso testes de compressão para extensões abaixo de 20%. Estes resultados são interessantes, contudo a utilização de provetes miniaturizados em ensaios mecânicos tem inerentes diversas dificuldades, sobretudo na medição precisa das propriedades de força e extensão.

Neste artigo é apresentado um dispositivo experimental especialmente desenvolvido para a realização de ensaios mecânicos uniaxiais em provetes metálicos miniaturizados. Com este equipamento pretende-se realizar não só ensaios monótonicos de tração e compressão, como também ensaios com inversão de sentido, com a finalidade de estudar o comportamento de materiais sob a forma de chapa metálica quando sujeitos a este tipo de sollicitação. Neste sentido foram selecionados dois aços bifásicos, de resistência diferente - DP500 e DP780. Com o equipamento desenvolvido foram realizados diversos ensaios uniaxiais que incluem ensaios monotónicos de tração e compressão e ensaios com inversão de sentido com o objetivo de avaliar o efeito de *Bauschinger* aos materiais selecionados.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Materiais

Neste trabalho, foram utilizados dois aços avançados de alta resistência (AHSS) produzidos pela empresa SSAB, mais especificamente aço bifásicos (*Dual Phase Steels*) - DP500 e DP780 – ambos com uma espessura inicial de 0,8 mm. A tabela 1 lista a percentagem de elementos de liga presentes na composição química de cada material.

Tabela 1 | Composição química [%] dos aços bifásicos: DP500 e DP780

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	V	Cu	Al	Nb	B	N	EC <sup>1</sup>
DP500	0.079	0.31	0.65	0.003	0.003	0.03	0.03	0.01	0.01	0.038	0.0	0.0003	0.003	0.20
DP780	0.138	0.20	1.52	0.011	0.002	0.03	0.03	0.02	0.01	0.038	0.014	0.0002	0.003	0.40

<sup>1</sup>  $EC = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni+Cu}{15} + \frac{Cr+Mo+V}{5}$

## 2.2. Equipamento experimental

Os ensaios experimentais foram realizados num equipamento especificamente desenvolvido para testar provetes a uma escala reduzida denominado - *Mini Sample Tester Device (MSTD)* (Cruz et al., 2020) representado na Fig. 3a. A geometria dos provetes miniaturizados considerada, representada na Fig. 3b, foi obtida através de eletroerosão por fio.

O MSTD é composto por três grupos de componentes com a sua função bem definida: o primeiro é o grupo motor, que inclui um fuso de esferas acionado por um motor de passo, que garante um movimento contínuo e preciso do provete. Deste modo, consegue garantir-se um deslocamento mínimo de 2  $\mu\text{m}$  por cada passo do motor; o segundo grupo é o condutor, que assegura o guiamento dos diversos componentes, constituído por quatro rolamentos lineares que deslizam sobre dois veios retificados; o terceiro grupo é o da instrumentação, constituído por uma célula de carga do tipo "S" de 5 kN e dois componentes de medição da extensão - uma régua linear para medição e controlo do posicionamento da mesa móvel e um sistema de correlação digital de imagem (DIC). O layout do MSTD permite que todos os componentes estejam num mesmo plano comum, o que se revela vantajoso para o alinhamento preciso do provete durante o ensaio. Assim, minimiza-se o aparecimento de momentos fletores indesejáveis, sobretudo em compressão, aspeto essencial para evitar a encurvadura do provete. O equipamento, projetado para ensaiar provetes de escala meso tem capacidade de suportar um esforço axial máximo de 2,5 kN.

## 2.3. Correlação Digital de Imagem

Os extensómetros são, tradicionalmente, os instrumentos de medição preferenciais em ensaios de tração convencionais. Contudo, em ensaios de pequena escala, a sua utilização é quase impossível devido à dimensão reduzida da amostra. Nesta situação, torna-se necessário recorrer a métodos de medição sem contacto, como por exemplo o uso de lasers ou técnicas de imagem. Neste sentido, no presente trabalho foi utilizada a técnica de Correlação Digital de Imagem (DIC) para quantificar a deformação do material na secção uniforme do provete. Ao contrário dos métodos tradicionais este método permite obter não só a extensão longitudinal do provete como também a extensão transversal,  $\epsilon_{xx}$  e  $\epsilon_{yy}$  respetivamente (de acordo com o sistema de coordenadas globais, ver Fig. 3b. Devido à área

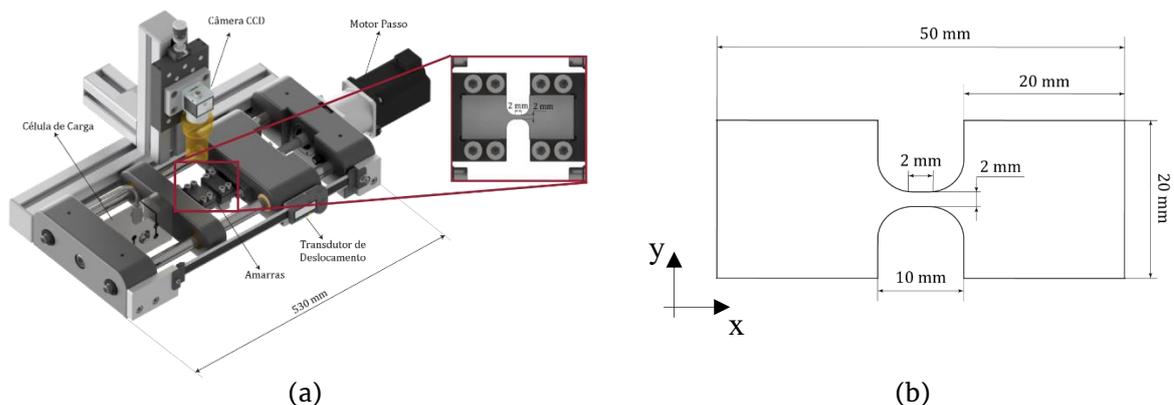


Fig. 3 | (a) Equipamento Experimental - MSTD (Mini Sample Tester Device); (b) geometria dos provetes miniaturizados

uniforme de análise foi considerado um tamanho médio de speckle inferior a 15  $\mu\text{m}$ . As imagens utilizadas no sistema DIC foram obtidas a uma frequência de 20 Hz com uma câmara de 5 MPixel (BasleracA2440-75um, 2448x2048pixels) em conjunto com uma lente telecêntrica (InfaimonOPE-TC-23-09,45mm). O software comercial VIC-2D.v6 foi utilizado para calcular o campo de deformações considerando um *step size* de 7 e um *subset* de 75 para a região de interesse.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1. Ensaio uniaxial monotónico

A fim de avaliar o comportamento monotónico dos aços DP500 e DP780, foram realizados ensaios de tração uniaxial, utilizando amostras miniaturizadas com a geometria representada na Fig. 3b. Adicionalmente, os mesmos materiais foram testados em provetes de tração macro, de acordo com a norma ISO 6892-1:2016 Estes ensaios foram realizados numa máquina de ensaio *Instron 5900R* de 300 kN. As condições experimentais para ambas as geometrias estão apresentadas na Tabela 2. Os provetes foram testados a uma velocidade de ensaio constante, resultando numa taxa de extensão inicial na ordem de  $10\text{e}^{-3}\text{s}^{-1}$ , até à rotura do material. Para garantir a repetibilidade dos resultados, foram testadas três amostras para cada geometria, contudo para facilitar a análise dos resultados apenas uma curva representativa da tensão-extensão será analisada para cada um dos materiais (Fig. 4).

As curvas tensão-extensão de engenharia, representadas na Fig. 4a, indicam que os resultados obtidos são de uma maneira geral comparáveis. De facto, para ambos os materiais, o encruamento é muito semelhante para a geometria mini e macro tal como se pode ver na curva tensão-extensão real representada na Fig. 4b. No entanto, é visível que após o ponto de resistência máxima à tração a geometria miniaturizada apresenta um alongamento total superior quando comparado à geometria macro. Esta diferença pode ser justificada pela estricção que ocorre após se atingir o ponto de tensão máxima, e que se traduz numa zona de deformação localizada cuja dimensão é independente do comprimento de referência do provete. Como é independente do comprimento, é expectável que a deformação localizada tenha uma influência maior no valor da extensão total medida para comprimentos de referência

Tabela 2 | Condições experimentais dos ensaios de tração uniaxiais

	Ensaio de tração macro	Ensaio de tração mini
<b>Número de provetes testado</b>	2	2
<b>Comprimento de referência (DIC)</b>	50 mm	1.5 mm
<b>Velocidade do travessão</b>	5 mm/min	0.5 mm/min
<b>Taxa de aquisição</b>	20 Hz	10 Hz
<b>Temperatura</b>	23 °C	23 °C
<b>Humidade Relativa</b>	53 %	53%

menores. Outro fator a considerar é o estado de tensão multiaxial após a estricção, sobretudo em comprimentos de referência menores. A influência da deformação localizada em cada uma das geometrias pode ser verificada na Fig. 5, onde é visível o campo das deformações principais (Hencky  $\epsilon_1$ ).

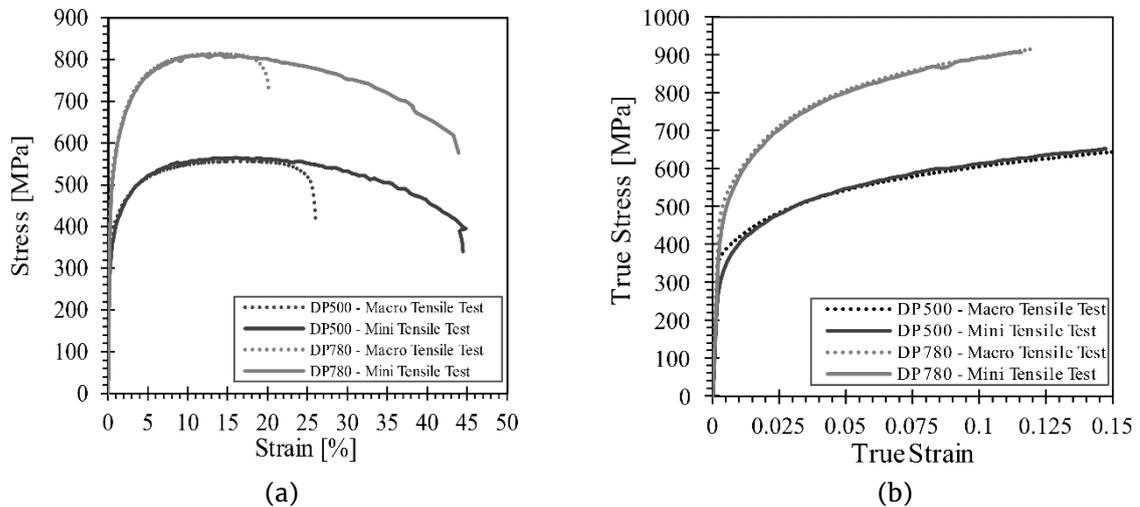


Fig. 4 | Representação gráfica das curvas experimentais (a) tensão-extensão de engenharia e (b) tensão-extensão real para os materiais DP500 e DP780

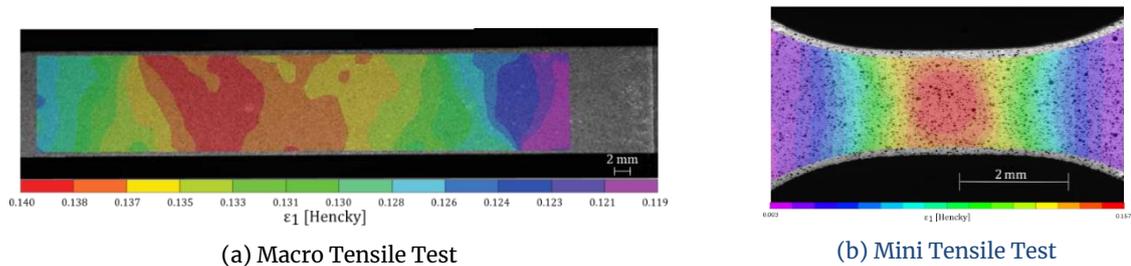


Fig. 5 | Campo de extensão principal ( $\epsilon_1$ ) obtido através da técnica de correlação digital de imagem para o ensaio de tração com provetes (a) macro e (b) mini

O comportamento à compressão dos dois aços bifásicos foi também avaliado. Contudo para este tipo de solicitação apenas foram utilizados os provetes miniaturizados, representados na Fig. 3b. A curva tensão-extensão real, relativa ao ensaio de compressão uniaxial, para cada um dos materiais está representada na Fig. 6a. Adicionalmente, nesta figura está representado, para cada material, a curva de referência do ensaio de tração, linha pontuada, obtida com o mesmo tipo de geometria. Por fim, as linhas tracejadas representam, para cada material, a curva de compressão em valores absolutos.

Através da análise dos resultados verifica-se que o encruamento é semelhante em tração e compressão para ambos os materiais, contudo em compressão os valores de deformação atingidos no ensaio de compressão foram inferiores aos atingidos em tração. Tal como se pode observar na Fig. 6b para um valor de extensão próximo de 7% a força atinge um valor máximo em valor absoluto. Neste ponto, o ensaio torna-se não-planar e o fenómeno de encurvadura (*'buckling'*) torna-se evidente. Assim esta instabilidade traduz-se no decaimento da curva fazendo com que o ensaio a partir deste ponto deixe de ser válido.

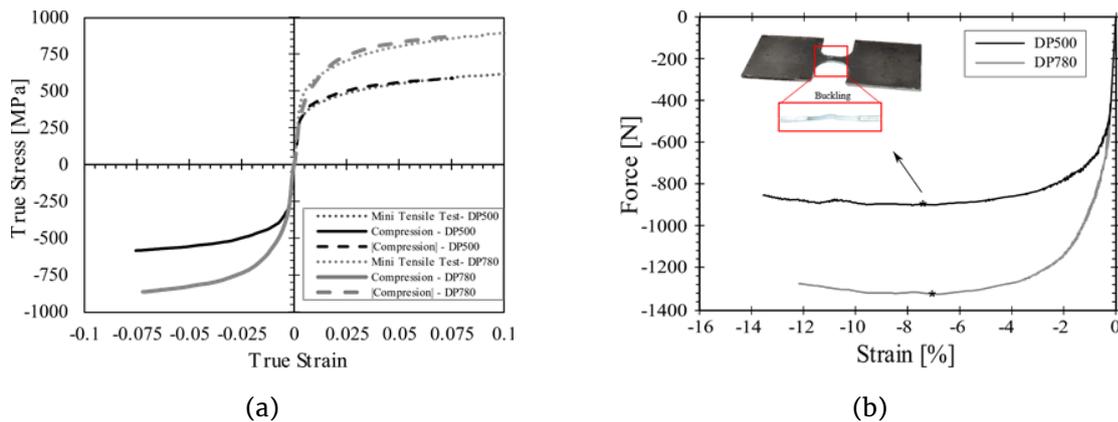


Fig. 6 | (a) Curvas Tensão-Extensão real obtidas a partir de testes de compressão uniaxial e a sua comparação com a curva de tração; (b) representação do ponto onde ocorre o efeito de encurvadura no ensaio de compressão uniaxial

### 3.2. Ensaio uniaxial com inversão de sentido

O efeito de *Bauschinger* foi avaliado através de ensaios uniaxiais com inversão de sentido utilizando a mesma geometria dos ensaios monótonicos. O ensaio inclui uma etapa de tração seguida de uma etapa de compressão. Inicialmente a etapa de tração é realizada até que uma pré-extensão definida,  $\varepsilon_p^0$ , seja atingida. Neste sentido foram selecionados três valores de pré-extensão, de aproximadamente 0,025, 0,050 e 0,075. Após esta pré-extensão em tração a etapa compressiva é realizada até que o fenômeno de encurvadura comece a ser evidente nos resultados, o que é evidenciado, como já foi referido, por um decaimento do valor da tensão na curva tensão-extensão. Os resultados para os aços DP500 e DP780 estão representados nas Fig. 7a e Fig. 7b, respetivamente. A curva de tração de referência uniaxial está também representada para efeitos de comparação. Para facilitar a leitura e respetiva análise dos resultados as curvas relativas à etapa de compressão, foram rodadas estando representadas pela curva pontilhada. Nestas figuras estão adicionalmente representados os pontos de cedência para a etapa de tração assim como para as curvas de compressão absolutas. Estes valores de tensão de cedência foram definidos como 0,002 de extensão plástica. Analisando os resultados é possível observar que as etapas de tração para os diferentes casos coincidem com a curva de tração de referência, o que confirma que o equipamento e a metodologia utilizada proporcionam uma excelente repetibilidade de resultados. Por outro lado, para ambos os materiais, as curvas relativas à etapa de compressão apresentam uma tendência semelhante para os diferentes valores de pré-extensão.

Um modo de quantificar o efeito de *Bauschinger* é através da ‘Razão de Bauschinger ( $\beta$ )’, expresso matematicamente pela Eq. (1). Nesta,  $\sigma_{max}^T$  representa o ponto de tensão máximo antes do ponto de inversão, ponto B na Fig. 2, e  $\sigma_Y^C$  a tensão de cedência atingida na etapa de compressão após inversão de sentido, ponto C da Fig. 2.

$$\text{Razão de Bauschinger } (\beta) = \frac{|\sigma_{max}^T| + |\sigma_Y^C|}{|2\sigma_{max}^T|} \quad (1)$$

Quanto menor for o parâmetro  $\beta$  maior será o efeito de *Bauschinger* do material. A razão de *Bauschinger* representa o rácio entre a superfície de cedência atual em relação à dimensão da superfície de cedência para o caso de encruamento isotrópico. Assim, para o caso de encru-

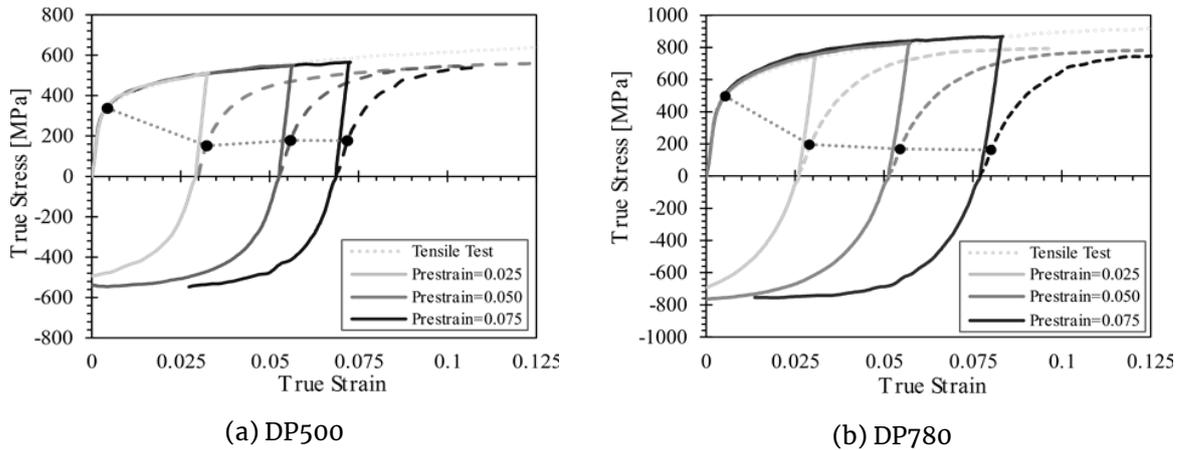


Fig. 7 | Ensaio uniaxial com inversão para o aço (a) DP500 e (b) DP780, com a inversão de sentido a ocorrer para diferentes valores de pré-extensão

amento isotrópico a razão de *Bauschinger* assume o valor unitário. A razão de *Bauschinger* para os materiais em estudo está representada na Fig. 8 em função da pré-extensão aplicada. Pela análise destes resultados é possível observar que ambos os materiais apresentam um forte efeito de *Bauschinger* uma vez que sempre que a direção de carregamento é invertida a tensão de cedência atingida sofre uma redução de cerca 40% em relação ao valor da solitação em sentido contrário.

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu o desenvolvimento e validação de um equipamento especializado na realização de ensaios uniaxiais, de tração-compressão, em provetes metálicos miniaturizados. O equipamento experimental, designado por MSTD - *Mini Sample Tester Device*, permite o ensaio de provetes na escala miniaturizada que tem como principal vantagem a supressão do fenómeno de encurvadura em solitações compressivas. Além dos ensaios uniaxiais de tração, compressão e cíclicos é ainda possível adaptar as interfaces do equipamento para outros tipos de ensaio, como por exemplo os de corte, fazendo uso da possibilidade de medição de força e extensão.

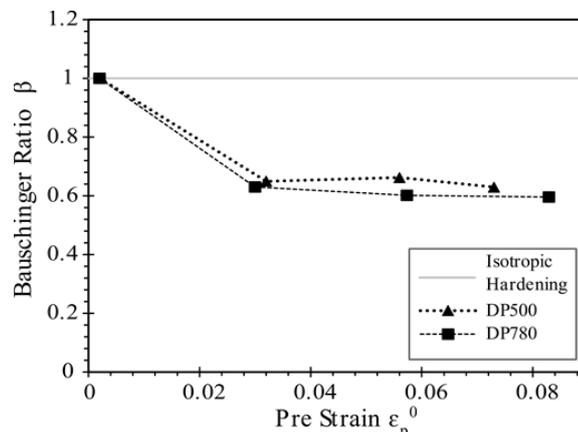


Fig. 8 | Razão de *Bauschinger* para os aços DP500 e DP780

De forma a validar a solução desenvolvida foram realizados diversos ensaios experimentais utilizando dois aços bifásicos – DP500 e DP780. Os ensaios realizados no equipamento permitiram comparar os resultados para diferentes tipos de sollicitação. Inicialmente foram realizados ensaios monotónicos de tração e os resultados obtidos com os provetes miniaturizados foram em tudo semelhantes aos resultados obtidos através da geometria convencional utilizada em ensaios de tração normalizados à escala macro. Os resultados dos ensaios de compressão demonstraram que com o equipamento desenvolvido é possível caracterizar os materiais utilizados até valores de extensão em compressão de cerca 7,5% sem que ocorra o fenómeno de encurvadura no material. Contudo até este valor de deformação de compressão o encruamento do material em compressão mostrou-se em tudo semelhante ao encruamento do material em tração. Por fim os ensaios uniaxiais com inversão de sentido mostraram que este tipo de material apresenta um forte efeito de *Bauschinger* uma vez que a tensão de cedência sofre um decréscimo considerável sempre que ocorre a inversão de sentido da sollicitação.

Em suma, os resultados experimentais realizados no equipamento evidenciaram resultados satisfatórios tanto em tração como em compressão o que de certa forma valida a solução desenvolvida e confirma a sua aplicabilidade em ensaios mecânicos uniaxiais com inversão de sentido.

## AGRADECIMENTOS

Ao Engenheiro José Bessa Pacheco agradece-se e destaca-se a partilha de conhecimentos e a sua participação nas fases de desenvolvimento do projeto e construção do equipamento. Os autores agradecem o financiamento no âmbito dos projetos POCI-01-0145-FEDER-031243, POCI-01-0145-FEDER-030592, POCI-01-0145-FEDER-032466, NORTE-01-0145-FEDER-032419, cofinanciados pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (Compete2020) e Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através da sua componente do Orçamento de Estado. O terceiro autor está também grato à FCT pela bolsa de doutoramento SFRH/BD/146083/2019 ao abrigo do programa POCH, co-financiado pelo Fundo Social Europeu (FSE) e pelos Fundos Nacionais Portugueses do MCTES.

## REFERÊNCIAS

- Aitchison, C. S., & Tuckerman, L. B. (1939). *The pack method for compressive tests of thin specimens of materials used in thin-wall structures*.
- Bauschinger, J. (1881). Über die Veränderung der Elastizitätsgrenze und des Elastizitätsmoduls verschiedener Metalle. *Civilingenieur XXVII*, 289–348.

- Ben Othman, K., Sai, k., Elleuch, K., & Manach, P. Y. (2017). Reverse deep drawing process: Material anisotropy and work-hardening effects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L Journal of Materials Design and Applications*, 233. <https://doi.org/10.1177/1464420717701950>
- Berladir, K., Hovorun, T., I, P., G, R., & I, M. (2017). Modern materials for automotive industry. *Journal of engineering sciences*, 4, F8-F18. [https://doi.org/10.21272/jes.2017.4\(2\).f8](https://doi.org/10.21272/jes.2017.4(2).f8)
- Boger, R. K., Wagoner, R. H., Barlat, F., Lee, M.-G., & Chung, K. (2005). Continuous, large strain, tension/compression testing of sheet material. *International Journal of Plasticity*, 21, 2319-2343. <https://doi.org/10.1016/j.jiplas.2004.12.002>
- Bouvier, S., Haddadi, H., Levee, P., & Teodosiu, C. (2006). Simple shear tests: Experimental techniques and characterization of the plastic anisotropy of rolled sheets at large strains. *Journal of Materials Processing Technology*, 172, 96-103. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.09.003>
- Cao, J., Lee, W., Cheng, H., Seniw, M., Wang, H.-P., & Chung, K. (2009). Experimental and numerical investigation of combined isotropic-kinematic hardening behavior of sheet metals. *International Journal of Plasticity*, 25, 942-972. <https://doi.org/10.1016/j.jiplas.2008.04.007>
- Carbonniere, J., Thuillier, S., Sabourin, F., Brunet, M., & Manach, P. Y. (2009). Comparison of the work hardening of metallic sheets in bending-unbending and simple shear. *International Journal of Mechanical Sciences - INTJMECH SCI*, 51, 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2008.12.006>
- Chang, Y., Wang, B. T., Li, X. D., Wang, C. Y., Zhao, K. M., & Dong, H. (2020). A new continuous tensile-compressive testing device with friction-counteracting and anti-buckling supporting mechanism for large strain. *Journal of Materials Processing Technology*, 278, 116540. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116540>
- Cruz, D. J., Shamchi, S. P., Santos, A. D., Amaral, R. L., Tavares, P. J., & Moreira, P. (2020). Development of a mini-tensile approach for sheet metal testing using Digital Image Correlation. *Procedia Structural Integrity*, 25, 316-323. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.04.036>
- Dietrich, L., & Turski, K. (1978). New Method of Studying Thin Sheets During Compression.[NOWA METODA BADANIA CIENKICH BLACH PRZY SCISKANIU.]. *Rozpr Inz*, 26, 91-99.
- Geng, L., Shen, Y., & Wagoner, R. H. (2002). Anisotropic hardening equations derived from reverse-bend testing. *International Journal of Plasticity*, 18, 743-767. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(01\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(01)00048-1)
- Ghosh, M., Ghosh, A., & Roy, A. (2019). Renewable and Sustainable Materials in Automotive Industry. In (pp. 1-18). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11461-4>
- Hilditch, T. B., de Souza, T., & Hodgson, P. D. (2015). 2 - Properties and automotive applications of advanced high-strength steels (AHSS). In M. Shome & M. Tumuluru (Eds.), *Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)* (pp. 9-28). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-436-0.00002-3>
- Hußnätter, W. (2009). Yielding of magnesium alloy AZ31. *Proceedings of ICTP2008*, 109.
- Kurukuri, S., Worswick, M., Ghaffari Tari, D., Mishra, R., & Carter, J. (2014). Rate sensitivity and tension-compression asymmetry in AZ31B magnesium alloy sheet. *Philosophical transactions*.

Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences, 372, 20130216.  
<https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0216>

- Sekine, A., & Kuwabara, T. (2005). 616 Development of In-Plane Reverse Loading Test Apparatus and Measurement of the Bauschinger Effect of Sheet Metals. *The Proceedings of Autumn Conference of Tohoku Branch, 2005.41*, 251-252. <https://doi.org/10.1299/jsmetohoku.2005.41.251>
- Stoudt, M. R., Levine, L. E., & Ma, L. (2017). Designing a Uniaxial Tension/Compression Test for Springback Analysis in High-Strength Steel Sheets. *Experimental Mechanics*, 57(1), 155-163. <https://doi.org/10.1007/s11340-016-0202-x>
- Suttner, S., & Merklein, M. (2016). Influence of specimen size and sheet thickness on the material behavior of AZ31B under uniaxial tension. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 159, 012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/159/1/012016>
- Tan, Z., Magnusson, C., & Persson, B. (1994). The Bauschinger effect in compression-tension of sheet metals. *Materials Science and Engineering: A*, 183(1), 31-38. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)90887-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)90887-7)
- Thuillier, S., & Manach, P.-Y. (2009). Comparison of the work-hardening of metallic sheets using tensile and shear strain paths. *International Journal of Plasticity*, 25(5), 733-751. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00404007>
- Tozawa, Y. (1978). Plastic Deformation Behavior under Conditions of Combined Stress. In D. P. Koistinen & N.-M. Wang (Eds.), *Mechanics of Sheet Metal Forming: Material Behavior and Deformation Analysis* (pp. 81-110). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2880-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2880-3_4)
- Tritschler, M., Butz, A., Helm, D., Falkinger, G., & Kiese, J. (2014). Experimental analysis and modeling of the anisotropic response of titanium alloy Ti-X for quasi-static loading at room temperature. *International Journal of Material Forming*, 7, 259-273.
- Yoon, J., Barlat, F., Gracio, J., & Rauch, E. (2005). Anisotropic Strain Hardening Behavior In Simple Shear For Cube Textured Aluminum Alloy Sheets. *International Journal of Plasticity - INT J PLASTICITY*, 21, 2426-2447. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2005.03.014>
- Yoshida, F., Uemori, T., & Fujiwara, K. (2002). Elastic-plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension-compression at large strain. *International Journal of Plasticity - INT J PLASTICITY*, 18, 633-659. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(01\)00049-3](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(01)00049-3)
- Yoshida, F., Urabe, M., & Toropov, V. V. (1998). Identification of material parameters in constitutive model for sheet metals from cyclic bending tests. *International Journal of Mechanical Sciences*, 40(2), 237-249. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(97\)00052-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0020-7403(97)00052-0)
- Zang, S., Lee, M.-G., Sun, L., & Kim, j. h. (2014). Measurement of the Bauschinger Behavior of Sheet Metals by Three-point Bending Springback Test with Pre-strained Strips. *International Journal of Plasticity*, 59. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2014.03.015>