

ESTAMPABILIDADE DE AÇOS DE BAIXO CARBONO*

Jefferson Haag¹
Gabriel Oliveira Ferrant²

Resumo

A análise da estampabilidade de chapas metálicas consiste em ensaios e testes tecnológicos para obtenção de características específicas para os processos aos quais o material será submetido. Dentre as principais análises, pode-se destacar o ensaio de tração, a curva de escoamento e o índice de anisotropia, que fornecem dados a respeito do comportamento mecânico dos materiais, como a resistência, a ductilidade, o encruamento, entre outros. O presente trabalho tem o objetivo de avaliar a estampabilidade dos aços carbono AISI 1008 e AISI 1010 através dos ensaios de tração, ensaios para determinação da curva de escoamento e ensaios para determinação do índice de anisotropia. Para tanto, foram extraídos corpos de prova de chapas dos dois aços de baixo carbono, seguindo as normas ASTM E8/E8M e ASTM E517, para realização e análise dos resultados dos ensaios. Com base nos resultados obtidos, pode-se aferir que o aço 1008 possui maior ductilidade e melhores características anisotrópicas do que o aço 1010, que por sua vez apresenta maior resistência mecânica. Portanto, é possível concluir que o aço AISI 1008 apresenta melhor estampabilidade a partir de todas as propriedades adquiridas nos ensaios mecânicos.

Palavras-chave: Estampabilidade; Ensaio de Tração; Índice de Anisotropia; Curva de Escoamento; Aços Baixo Carbono.

FORMABILITY OF LOW CARBON STEELS

Abstract

Formability analysis of sheet metal consists on mechanical and technological testing to obtain specific characteristics for processes, in which the material will be submitted. The main analysis may be highlighted the tensile testing, the flow curve testing and the plastic strain ration r value, which provide information about the material's mechanical behavior, such as strength, ductility and strain hardening. This work aims to evaluate the formability of AISI 1008 and AISI 1010 carbon steels through tensile testing, determination of flow curve testing and method for plastic strain ratio r for sheet metal testing. To achieve this purpose, specimens were produced from sheet metal of both steels, following the ASTM E8/E8M and ASTM E517 standards. Based on the obtained outcomes, it may be asses that the AISI 1008 steel has higher ductility and better anisotropic characteristics than AISI 1010 steel, which shows greater mechanical strength. Therefore, it is possible to conclude that the AISI 1008 carbon steel presents higher formability from of all the proprieties acquired in mechanical testing.

Keywords: Formability, Tensile Testing, Plastic Strain Ratio, Flow curve; Low carbon steel.

¹ Engenheiro Metalúrgico, Mestre, Professor EBTT, IFRS, Caxias do Sul, RS, Brasil.

² Acadêmico em Tecnologia em Processos Metalúrgicos, IFRS, Caxias do Sul, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os aços carbono possuem diversas aplicações, desde componentes estruturais até peças estéticas. Tais materiais recebem essa denominação, pois os principais elementos de sua constituição são o ferro e o carbono. Para que seja considerado um aço, a composição química do material deve ter de 0,008 até 2,11% de carbono (de 2,11 até 6,67%, define-se como ferro fundido). Além desses elementos principais, podemos, também, ter elementos secundários presentes de forma intencional (adicionados para alcançar propriedades desejadas) ou, simplesmente, como impurezas provenientes do processo de fabricação.

Os aços carbono podem ser fornecidos pela indústria siderúrgica em diversas composições (baixo carbono, médio carbono e alto carbono), acabamento (laminado a quente, laminado a frio, etc.) e formatos (barras, chapas, tubos e perfis estruturais) [1]. Os aços de baixo teor de carbono são aqueles produzidos em maiores quantidades e contém, na maioria dos casos, menos que, aproximadamente, 0,25%C. As microestruturas desses aços consistem em ferrita e perlita. Como consequência disso, essa liga tem relativamente baixa dureza e baixa resistência, mas ductilidade e tenacidade excepcionais. Aplicações típicas incluem componentes das carcaças de automóveis, formas estruturais (vigas I, canaletas e cantoneiras) e chapas que são usadas em tubulações, edificações, pontes e latas estanhadas [2].

As chapas de aços baixo carbono normalmente são submetidas a processos de estampagem para produzir produtos metálicos, como copos, painéis, cartuchos, entre outros. Os principais processos de estampagem podem ser resumidos em três operações básicas: corte, dobramento e estampagem profunda, também conhecido como embutimento ou repuxo. Os aços precisam possuir características bem específicas para cada processo, que podem ser mensuradas a partir de ensaios mecânicos. Os principais testes que se dispõem para a caracterização da estampabilidade das chapas são [3]:

- Ensaio de tração;
- Curva de escoamento;
- Índice de anisotropia;
- Curvas limite de conformação;
- Testes tecnológicos (Erichsen, Olsen, Swift, entre outros);
- Testes para determinação do coeficiente de atrito.

1.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é o mais amplamente utilizado para a avaliação das propriedades mecânicas dos materiais devido ao fato de ser um tipo de ensaio relativamente simples e de realização rápida, além de fornecer informações importantes e primordiais para o projeto e fabricação de peças e componentes. O ensaio consiste na aplicação de uma carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até sua ruptura. Mede-se a variação no comprimento como função da carga aplicada e, após o tratamento adequado dos resultados, obtém-se uma curva de tensão (σ) versus a deformação (ϵ) do corpo de prova [4]. Dentre as principais propriedades obtidas a partir da curva tensão-deformação, destacam-se o limite de resistência à tração (LRT ou σ_u), o limite de escoamento (LE ou σ_e), o módulo de elasticidade (E) e o alongamento percentual (AL%). A Figura 1 mostra uma representação esquemática da curva tensão-deformação, demonstrando algumas das principais propriedades mecânicas.

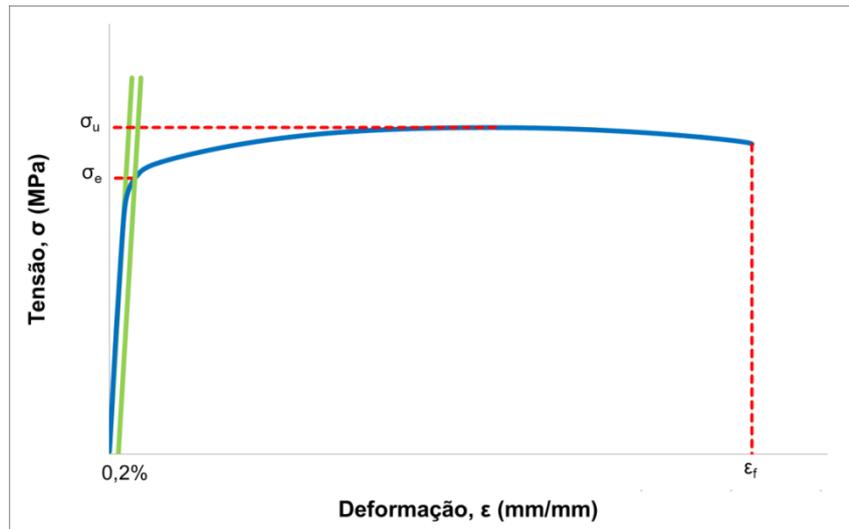


Figura 1. Representação esquemática da curva tensão-deformação de engenharia com escoamento contínuo.

O limite de resistência à tração (LRT) é determinado no ponto de carga máxima da curva tensão-deformação, calculando a tensão máxima através da carga máxima dividida pela área inicial do corpo de prova. A determinação do limite de escoamento (LE) depende do comportamento do material no escoamento, que pode ser contínuo ou descontínuo. Para o escoamento contínuo, é necessário plotar uma reta paralela à região elástica deslocada de um limite “n” (0,2% para a metais em geral) e obter a tensão no ponto de intersecção com a curva tensão-deformação do material. Por sua vez, quando o material apresenta um escoamento descontínuo, basta obter o valor mínimo de tensão do patamar de escoamento, conforme a Figura 2.

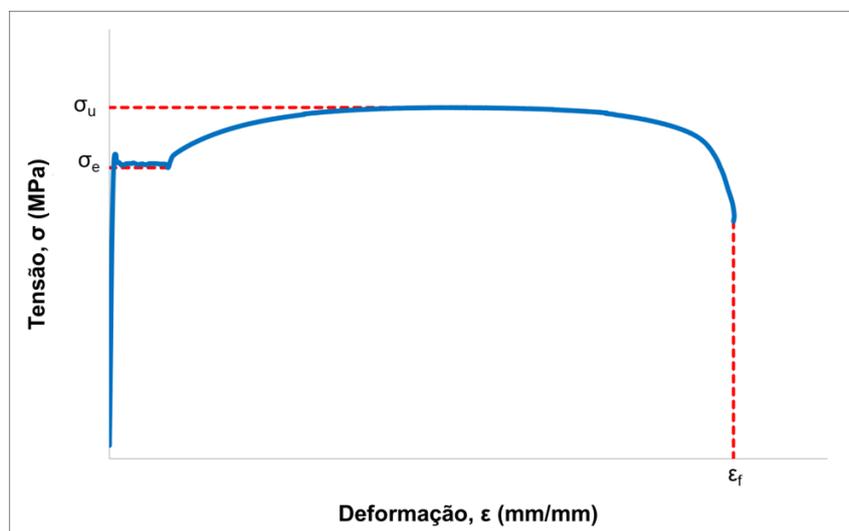


Figura 2. Representação esquemática da curva tensão-deformação de engenharia com escoamento descontínuo.

Módulo de elasticidade é definido pela inclinação da região linear inicial da curva tensão-deformação e, também, pode ser chamado de módulo de Young. Por fim, o alongamento percentual é calculado através do valor percentual da variação do comprimento útil inicial (Δl) dividindo-o pelo comprimento útil inicial (l_0). Ele também

pode ser obtido através da deformação final da curva tensão deformação, descontando o retorno elástico.

1.2 Curva de Escoamento

A variação da tensão de escoamento (k_f) que um material apresenta durante uma deformação em função da deformação verdadeira pode ser obtida através do ensaio de tração uniaxial, no qual, de forma semelhante ao ensaio de tração convencional, mede-se a força (F) e a variação do comprimento (l). A Equação 1 e a Equação 2 apresentam, respectivamente, a fórmula para calcular a tensão de escoamento (k_f) e a deformação verdadeira (ϕ). Nessas equações, “ A ” é área instantânea e “ l_0 ” é o comprimento útil inicial do corpo de prova.

$$k_f = \frac{F}{A} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1)$$

$$\phi = \ln \frac{l}{l_0} \quad [\text{mm/mm}] \quad (2)$$

A Figura 3 apresenta uma representação esquemática da curva de escoamento, que consiste da curva de tensão-deformação verdadeira na região plástica.

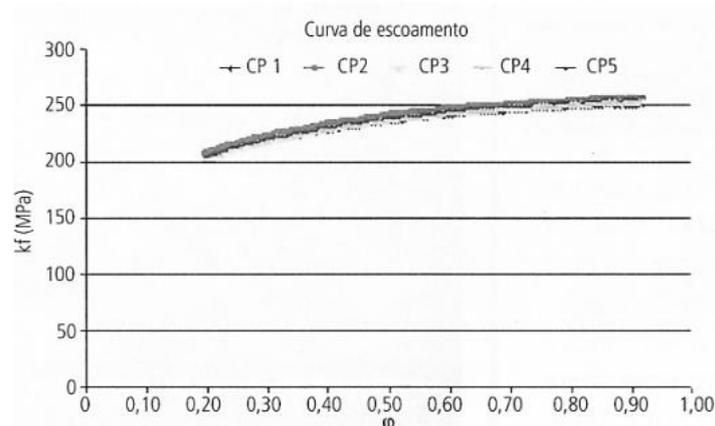


Figura 3. Curvas de escoamento para uma liga de alumínio AA6011 [5].

As curvas de escoamento, que sempre são obtidas experimentalmente, podem ser descritas por uma função matemática. Uma forma geral da representação da curva de escoamento de chapas é a equação de Hollomon e Ludwik, conforme apresentado na Equação 3 [3].

$$k_f = C \cdot \phi^n \quad (3)$$

Nessa equação, “ C ” é o coeficiente de resistência do material e “ n ” é o coeficiente de encruamento. O coeficiente de resistência quantifica o nível de resistência do material e é o valor de “ k_f ” quando “ ϕ ” é igual a 1. Por sua vez, o coeficiente de encruamento representa a capacidade de o material distribuir a deformação ao longo de seu volume. Dessa forma, valores altos de “ n ” significam que haverá uma maior deformação uniforme, menor deformação localizada, alta taxa de encruamento e, assim, uma distribuição uniforme de deformação na espessura.

1.3 Índice de Anisotropia

Em chapas metálicas, a microestrutura pode ser tanto uniforme em todas as direções (isotrópica) ou alinhada em certas direções (anisotrópica). A microestrutura pode ter um grande impacto na capacidade de o metal ser conformado em determinado formato. A principal causa da anisotropia em chapas metálicas é o processamento por laminação. Durante a laminação de uma chapa, os cilindros do laminador alongam os grãos da microestrutura do metal na direção de laminação e nas direções de laminação, causando diferentes propriedades mecânicas ao longo das direções do material [6]. A Figura 4 apresenta as orientações de uma chapa, mostrando a definição de anisotropia normal e anisotropia planar. A quantificação do efeito da anisotropia é realizada através do índice de anisotropia (r).

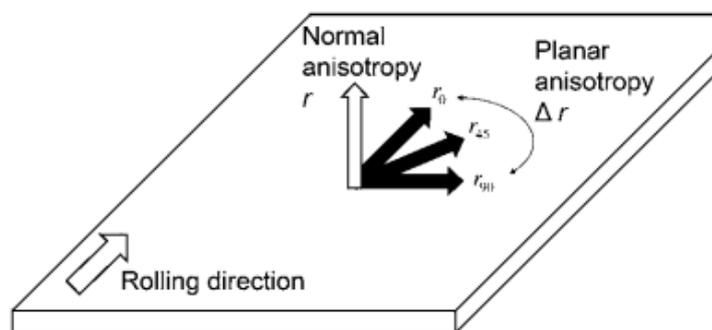


Figura 4. Orientações de uma chapa metálica relativo à anisotropia normal e planar [6].

O índice de anisotropia “ r ” é definido como a razão entre as deformações verdadeiras na direção da largura (φ_w) e na espessura (φ_t), após uma deformação longitudinal pré-definida, conforme mostrado na Equação 4 [7].

$$r = \frac{\varphi_w}{\varphi_t} = \frac{\ln(w_0/w_f)}{\ln(l_f \cdot w_f / l_0 \cdot w_0)} \quad (4)$$

Nesse caso, “ w_0 ” e “ l_0 ” são a largura e o comprimento iniciais, respectivamente, e “ w_f ” e “ l_f ” representam a largura e comprimento finais, respectivamente. A anisotropia normal ou média (r_m) de uma chapa é obtida através da média ponderada dos valores de r em três direções: 0° (paralela), 45° (diagonal) e 90° (perpendicular) à direção de laminação, conforme mostrado na Equação 5 [7].

$$r_m = \frac{r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4} \quad (5)$$

O material é considerado isotrópico para valores de anisotropia normal (r_m) iguais a 1. O material é anisotrópico para “ r_m ” maior que 1 deforma mais na largura. Por outro lado, se “ r_m ” é menor que 1, o material é anisotrópico e deforma mais na espessura. Para aplicações críticas, são desejáveis valores altos de “ r_m ”, como, no caso da estampagem profunda, em que o material pode sofrer fratura na parede que fica entre o punção e a matriz.

Por fim, há a anisotropia planar (Δr) que mede a tendência ao orelhamento de uma chapa quando submetida ao processo de estampagem profunda, que é calculado conforme a Equação 6 [7].

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{2} \quad (6)$$

Para valores de anisotropia planar (Δr) diferentes de 0, o material possui tendência de formar orelhas no processo de estampagem profunda, conforme pode ser visto na Figura 5. Assim, o ideal para esse processo é que o Δr seja próximo a zero para evitar a formação desse defeito de estampagem.

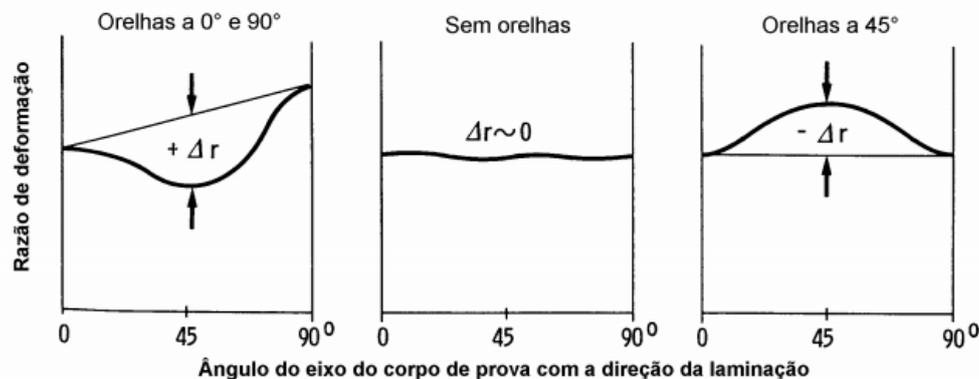


Figura 5. Relação entre a anisotropia planar e a tendência ao orelhamento no processo de estampagem profunda.

1.4 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é realizar uma análise de estampabilidade de aços baixo carbono através de ensaios mecânicos. Como objetivos específicos intenta-se comparar os dois aços com diferentes composições e espessuras, além de relacionar as propriedades mecânicas à curva de escoamento e ao índice de anisotropia.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo, as chapas metálicas utilizadas foram fabricadas a partir dos aços carbono AISI 1008 e AISI 1010, possuindo espessura de 0,6 mm e 0,4 mm, respectivamente. Os materiais têm composição química conforme a mostrado na Tabela 1, possuindo os limites de teores dos elementos químicos dentro das especificações da norma dos materiais. A microestrutura consiste em grãos de ferrita e pequenas quantidades de perlita alinhadas com o sentido de laminação das chapas. A Figura 6 e a Figura 7 apresentam, respectivamente, micrografias da seção longitudinal do aço AISI 1008 e do aço AISI 1010.

Tabela 1. Composição química dos materiais do trabalho.

Material	Elemento (% em peso)						
	C	Mn	P	S	Al	N	Fe
Aço AISI 1008	0,07	0,40	0,013	0,012	0,044	0,0021	Balanço
Aço AISI 1010	0,10	0,46	0,021	0,016	0,031	0,0035	Balanço

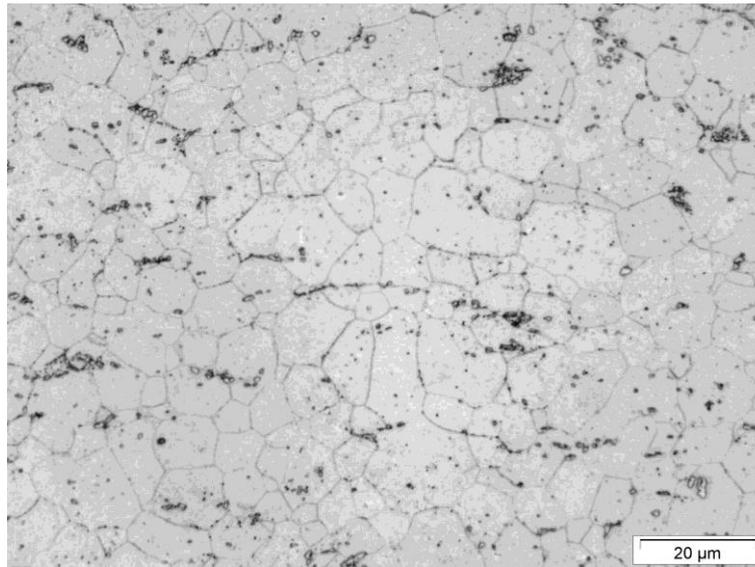


Figura 6. Microestrutura do aço AISI 1008.

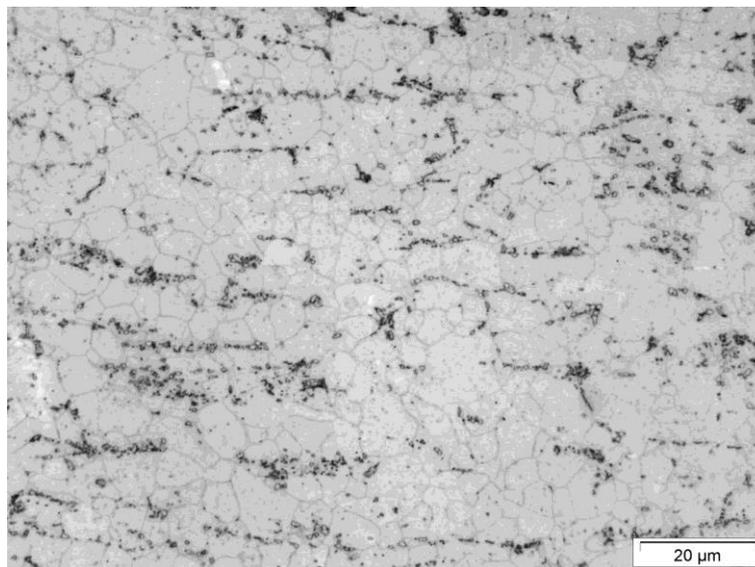


Figura 7. Microestrutura do aço AISI 1010.

Foram retirados corpos de prova para realização de ensaios de tração e para determinação do índice de anisotropia de diferentes sentidos das chapas por corte a laser, possuindo as dimensões conforme as normas ASTM E517 [7] e ASTM E8/E8M [8]. Para ambos os tipos de ensaios, os testes foram realizados nos sentidos de 0° , 45° e 90° em relação ao sentido de laminação. Foi adotado um sistema de identificação das amostras para garantir a qualidade dos ensaios, consistindo do seguinte padrão: X_YYYY_ZZ, no qual:

- X é o tipo de ensaio realizado (Tração, Curva de Escoamento ou Anisotropia)
- YYYY é o material ensaio (1008 ou 1010)
- ZZ é a orientação em relação ao sentido de laminação (0° , 45° e 90°)

A Figura 8 mostra os corpos de provas utilizados nos ensaios para um dos materiais, representando a quantidade de testes e orientações que foram seguidas neste trabalho.



Figura 8. Amostras e suas orientações em relação à laminação.

Os ensaios mecânicos foram realizados em uma máquina eletromecânica marca EMIC modelo DL10000 com capacidade de 100kN. Foram utilizadas as taxas de deslocamento da máquina de 0,75 mm/min e 5 mm/min para o ensaio de tração e para o ensaio para determinação do índice de anisotropia, respectivamente. Todos os ensaios foram realizados na temperatura ambiente. A Figura 9 mostra a realização do ensaio de tração na máquina de ensaios.



Figura 9. Montagem para realização dos ensaios mecânicos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do estudo de estampabilidade de aços de baixo de carbono foram subdivididos conforme as características obtidas pelos ensaios. Essas características serão abordadas e discutidas de maneira fragmentada para, posteriormente, serem consolidadas e, assim, chegar a conclusões sobre como os dois materiais se comportam frente a esse processo de fabricação.

3.1 Propriedades Mecânicas

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no ensaio de tração para os aços carbono AISI 1008 e AISI 1010 em relação as propriedades mecânicas, sendo que os ensaios foram realizados em diferentes orientações em relação ao sentido de laminação para ambos os materiais. A partir desses resultados, percebe-se que o aço 1010 é mais resistente do que o aço 1008, pois tanto o limite de escoamento

quanto o limite de resistência apresentaram maiores valores para esse material. Por outro lado, o aço 1008 possui maior ductilidade do que o aço 1010, visto que a alongamento percentual foi superior se comparado nos materiais de mesmo sentido de laminação. Essas duas características observadas são esperadas, devido ao fato de o teor de carbono influenciar as propriedades do aço carbono, uma vez que a resistência mecânica aumenta, proporcionalmente, e a ductilidade reduz, também proporcionalmente, com o aumento do percentual de carbono.

Tabela 2. Resultados do ensaio de tração para os aços de baixo carbono.

Corpo de Prova	Limite de Escoamento, LE (MPa)	Limite de Resistência, LR (MPa)	Alongamento Percentual, AL% (%)	Módulo de Elasticidade, E (GPa)
T-1008-00	257,11	354,10	48,64	161,31
T-1008-45	267,52	362,54	37,46	195,04
T-1008-90	266,64	356,57	42,34	208,89
T-1010-00	316,35	391,50	38,28	201,05
T-1010-45	314,21	394,70	35,52	193,67
T-1010-90	315,50	398,57	37,46	187,59

As curvas de tensão-deformação dos aços AISI 1008 e AISI 1010 são mostradas na Figura 10 e a Figura 11, respectivamente. Observado os diagramas, nota-se que ambos os materiais apresentam patamar de escoamento, comportamento este típico de materiais que apresentam menos de 0,20% de carbono quando no estado recozido. Além disso, pode-se perceber que não houve grande variação nas regiões características da curva para cada material, mas as pequenas diferenças são em decorrência da extração dos corpos de prova em diferentes sentidos de laminação da chapa, mostrando que a mesma tem propriedades anisotrópicas.

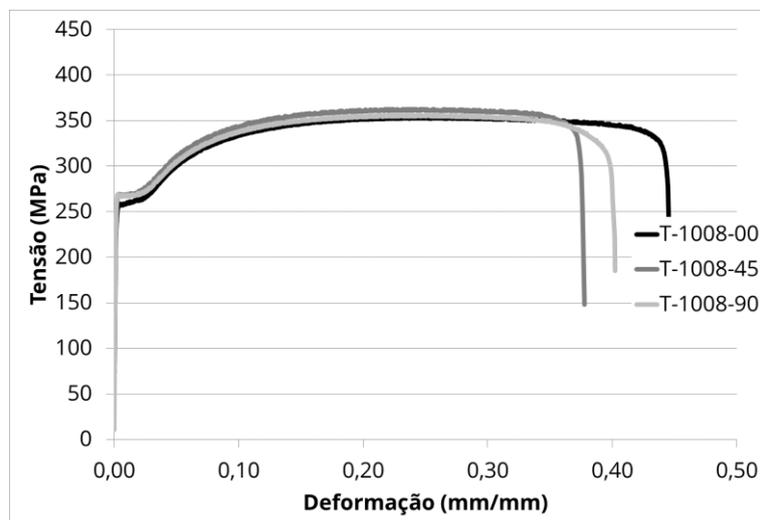


Figura 10. Curvas tensão-deformação do aço carbono AISI 1008.

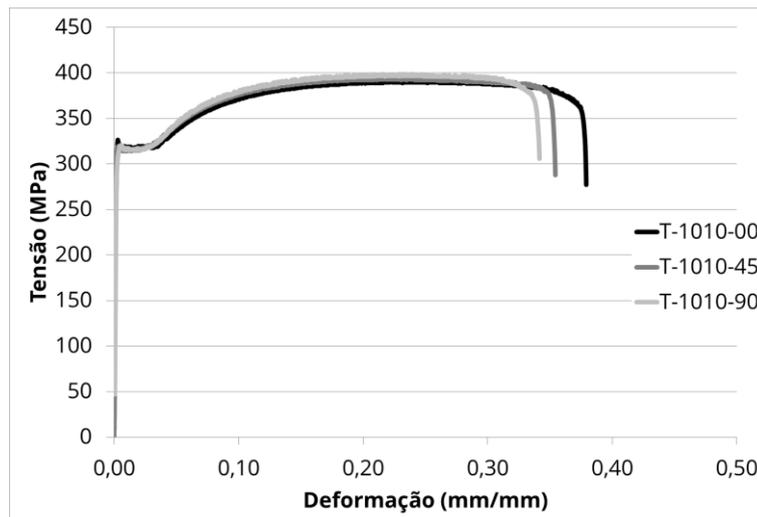


Figura 11. Curvas tensão-deformação do aço carbono AISI 1010.

3.2 Curva de Escoamento

A Tabela 3 Tabela 2 apresenta os resultados para a curva de escoamento dos aços carbono AISI 1008 e AISI 1010, que foram calculadas a partir dos dados oriundos do ensaio de tração. As informações obtidas com a curva de escoamento foram o coeficiente de resistência, que mostra que o aço 1010 é mais resistente que o 1008, e o coeficiente de encruamento, que, por sua vez, identifica que o aço 1008 apresenta maior estampabilidade que o 1010. Outra característica trazida nos resultados foi o coeficiente de determinação (R^2) para garantir que a regressão das curvas estava adequada, visto que seus valores foram superiores a 0,999 para todos os corpos de prova.

Tabela 3. Resultados da curva de escoamento para os aços de baixo carbono.

Corpo de Prova	Coeficiente de Resistência, C (MPa)	Coeficiente de Encruamento, n (MPa)	Coeficiente de Determinação, R^2
C-1008-00	614,17	0,2197	0,9994
C-1008-45	625,62	0,2153	0,9994
C-1008-90	614,02	0,2150	0,9994
C-1010-00	667,60	0,2093	0,9996
C-1010-45	667,15	0,2035	0,9995
C-1010-90	679,76	0,2085	0,9991

As curvas de escoamento dos aços AISI 1008 e AISI 1010 são apresentadas na Figura 12. Observa-se, entre curvas de mesmo material, que houve pouca variação, sendo essa variação associada à anisotropia das chapas metálicas, e que o aço 1010 apresenta maior resistência que o aço 1008. Além disso, contata-se a limitação do ensaio de tração para levantamento das curvas de escoamento, que é o máximo grau de deformação, o qual ficou na ordem de 0,20 ou 20%.

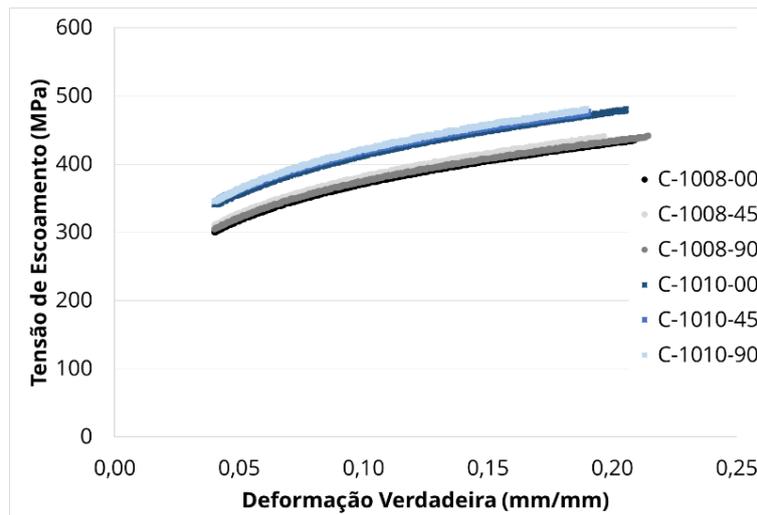


Figura 12. Curvas de escoamento para os aços carbono AISI 1008 e AISI 1010.

3.3 Índice de Anisotropia

A Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam os resultados dos ensaios para determinação do índice de anisotropia para os aços AISI 1008 e AISI 1010, respectivamente. Em cada amostra, foram realizadas três medidas de comprimento e largura inicial e final para reduzir o erro do ensaio. Comparando os dois materiais, percebe-se que o aço 1008 possui propriedades ligeiramente superiores, em virtude da anisotropia normal que apresentou valor um pouco maior do que no aço 1010. Por sua vez, a anisotropia planar, que caracteriza o embutimento profundo, foi igual para ambos os materiais.

Tabela 4. Resultados do ensaio de anisotropia do aço AISI 1008

Corpo de Prova	Comprimento Inicial (mm)	Largura Inicial (mm)	Comprimento Final (mm)	Largura Final (mm)	Índice de Anisotropia (r)
A-1008-00	50,00	12,48	59,26	11,48	0,98
A-1008-45	50,00	12,41	59,20	11,46	0,88
A-1008-90	50,00	12,49	59,29	11,39	1,18

Anisotropia Normal (r_m)	0,98
Anisotropia Planar (Δr)	0,20

Tabela 5. Resultados do ensaio de anisotropia do aço AISI 1010

Corpo de Prova	Comprimento Inicial (mm)	Largura Inicial (mm)	Comprimento Final (mm)	Largura Final (mm)	Índice de Anisotropia
A-1010-00	50,00	12,47	59,18	11,43	1,06
A-1010-45	50,00	12,40	59,24	11,51	0,78
A-1010-90	50,00	12,49	59,29	11,52	0,90

Anisotropia Normal (r_m)	0,88
Anisotropia Planar (Δr)	0,20

4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados alcançados nos ensaios mecânicos, pode-se avaliar que todas as análises realizadas contribuem para chegar à conclusão de que o aço 1008 possui estampabilidade superior à do aço 1010. Como foram realizados ensaios em diferentes orientações, percebeu-se que as propriedades dos materiais variavam com o sentido de laminação, fazendo com que fosse possível observar diferenças entre os resultados obtidos para o mesmo material.

Dentre os principais resultados do ensaio de tração, destacam-se as propriedades mecânicas de limite de escoamento (264 MPa e 315 MPa), limite de resistência à tração (358 MPa e 395 MPa) e alongamento percentual (42,8% e 37,1%), cujos valores médios são atribuídos aos aços AISI 1008 e AISI 1010, respectivamente. Ainda, destacam-se os resultados da curva de escoamento, que apresentaram o coeficiente de resistência (617,94 MPa e 671,50 MPa) e coeficiente de encruamento (0,217 e 0,207) para os aços 1008 e 1010, respectivamente. Por fim, salientam-se os resultados de anisotropia normal (0,98 e 0,88) e planar (0,20 e 0,20) para os aços 1008 e 1010, respectivamente.

Portanto, os ensaios de tração, de determinação da curva de escoamento e de determinação do índice de anisotropia fornecem as qualidades dos materiais necessárias para os processos de estampagem. As propriedades obtidas apresentaram importante e irrefutável correlação, o que era, de fato, esperado dado o estudo prévio da literatura existente. Em outras palavras, pode-se afirmar que o alongamento percentual é diretamente proporcional ao coeficiente de encruamento e à anisotropia normal, fornecendo indicativos de melhores características de estampabilidade.

REFERÊNCIAS

- 1 Chiaverini V. **Aços e ferros fundidos**. 7ª edição. Associação Brasileira de Metal; 2008.
- 2 Callister WD, Rethwisch DG. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8ª edição. LTC; 2012.
- 3 Schaeffer L. **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre: Editora Imprensa Livre; 2005.
- 4 Garcia A, Spim JA, Santos CA. **Ensaio dos Materiais**. 2ª edição. Rio de Janeiro: LTC; 2012.
- 5 Knoll P, Lima D, Schaeffer L. Estudo descreve a obtenção da curva de escoamento do alumínio por ensaios de compressão. **Corte & Conformação de Metais**. 2007.
- 6 Altan T, Tekkaya E. **Sheet Metal Forming: Fundamentals**. ASM International; 2012.
- 7 American Society for Testing and Materials. **ASTM E517-00: Standard test method for plastic strain ratio r for sheet metal**. West Conshohocken: ASTM International; 2010.
- 8 American Society for Testing and Materials. **ASTM E8/E8M-16a: Standard test methods for tension testing of metallic materials**. West Conshohocken: ASTM International; 2016.