

Caracterização dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 430 para aplicação em processos de estampagem profunda

Characterization of AISI 304 and AISI 430 stainless steels for application in deep drawing processes

DOI:10.34117/bjdv8n7-160

Recebimento dos originais: 23/05/2022

Aceitação para publicação: 30/06/2022

Rafael Pandolfo da Rocha

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Endereço: Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Porto Alegre - RS, CEP: 91509-900

E-mail: rafael.pandolfo@ufrgs.br

Matheus Henrique Riffel

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Endereço: Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Porto Alegre - RS, CEP: 91509-900

E-mail: matheus.riffel@ufrgs.br

André Rosiak

Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Endereço: Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Porto Alegre - RS, CEP: 91509-900

E-mail: andre.rosiak@ufrgs.br

Lirio Schaeffer

Professor Doutor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Endereço: Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Porto Alegre - RS, CEP: 91509-900

E-mail: schaeffer@ufrgs.br

RESUMO

O conhecimento prévio das propriedades mecânicas é fundamental para especificar os parâmetros dos processos de conformação de chapas metálicas, além de viabilizar, através de softwares de simulação computacional, o projeto de ferramentas e a redução de custos inerentes ao desperdício de matéria-prima, ocasionado por rugas, orelhas e, até mesmo, estricções localizadas. Embora a maioria dos softwares possuam em sua base de dados as propriedades genéricas da maioria dos aços comerciais, é imprescindível a caracterização prévia das suas propriedades mecânicas, as quais podem ser distintas para cada lote do mesmo tipo de material, o que pode levar os profissionais de manufatura a incorrer em alguns erros de projeto. Desse modo, este trabalho tem, como objetivo, caracterizar as propriedades mecânicas de chapas metálicas de aços inoxidáveis austenítico AISI 304 e

ferrítico AISI 430, com espessura de 1 mm, através de ensaio de tração normatizado, fornecendo dados corretos das variáveis de entrada aos softwares de simulação numérica. As propriedades mecânicas foram obtidas através da construção das curvas de engenharia e de escoamento através dos cálculos analíticos dos valores de tensão e de deformação, bem como através do Critério de Schaeffer e Rocha [10] durante a condição de “instabilidade em tração”, possibilitando, assim, uma avaliação do grau de verossimilhança entre os resultados fornecidos por esses métodos. Além disso, também foram avaliados a composição química e o grau de anisotropia das amostras em relação aos sentidos de laminação.

Palavras-chave: aços inoxidáveis, curva de engenharia, curva de escoamento, instabilidade em tração, índice de anisotropia.

ABSTRACT

The previous knowledge of the mechanical properties is fundamental to specify the parameters of the sheet metal forming processes, besides making possible, through computer simulation software, the tooling project and the cost reduction inherent to the raw material waste, caused by wrinkles, ears and even localized stresses. Although most of the softwares have in their database the generic properties of most of the commercial steels, it is essential the previous characterization of their mechanical properties, which can be different for each lot of the same type of material, which can lead the manufacturing professionals to incur in some project mistakes. Thus, this work aims to characterize the mechanical properties of sheet metal of austenitic stainless steel AISI 304 and ferritic AISI 430, with a thickness of 1 mm, through a standardized tensile test, providing correct data from the input variables to numerical simulation software. The mechanical properties were obtained by building the engineering and yield curves through analytical calculations of stress and strain values, as well as through Schaeffer and Rocha's Criterion [10] during the "tensile instability" condition, thus enabling an evaluation of the degree of likelihood between the results provided by these methods. In addition, the chemical composition and the degree of anisotropy of the samples in relation to the rolling directions were also evaluated.

Keywords: stainless steels, engineering curve, yield curve, tensile instability, anisotropy index.

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas com adições de, no mínimo, 11% de cromo, o que aumenta a sua resistência à oxidação e à corrosão. Em geral, esses aços possuem como elementos de liga o níquel e o molibdênio em proporções que variam de acordo com a família do aço inoxidável. A aplicação desses aços é adequada quando da necessidade de resistência à corrosão, resistência a alta temperatura ou resistência mecânica, o que não é atendido pelos aços ao carbono ou baixa liga em termos de viabilidade econômica ^[1].

Normalmente, os aços inoxidáveis são classificados em 05 grupos de acordo com a sua microestrutura: aços inoxidáveis ferríticos, austeníticos, martensíticos, duplex (ferríticos + austeníticos) e endurecíveis por precipitação. Ressalta-se que os aços inoxidáveis austeníticos são os mais comuns dentre os aços inoxidáveis, e são caracterizados pela alta tenacidade, resistência à corrosão e boa soldabilidade quando comparado aos aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos [2,3].

Os aços inoxidáveis austeníticos são, essencialmente, ligas ternárias Fe-Cr-Ni, contendo uma quantidade de cromo de 16 a 26%, níquel até 35% e manganês até 15%. Esses aços são, normalmente, não magnéticos na condição solubilizada e não podem ser endurecidos por tratamento térmico. Porém, através de deformação a frio, esses aços podem ter sua dureza aumentada. Os aços inoxidáveis austeníticos possuem excelentes propriedades criogênicas, alta resistência a elevadas temperaturas e elevada resistência à oxidação. Embora o níquel seja o principal elemento utilizado para estabilizar a austenita, carbono e nitrogênio também são utilizados, uma vez que eles são solúveis na sua estrutura cúbica de face centrada (CFC) [3].

Os aços inoxidáveis ferríticos possuem, em sua composição química, essencialmente Cr e Fe, com percentual de Cr variando de 10 a 23%. Esta classe de aço inox apresenta alta resistência em relação aos aços inoxidáveis austeníticos. Ainda, é caracterizado por sua boa estampabilidade, com certas limitações para o embutimento profundo, em razão do tipo de geometria da peça final, sendo, então, é aconselhável que o processo seja realizado em mais estágios. Os aços inox ferríticos são frequentemente utilizados em processos de soldagem, embora sua empregabilidade sofra limitações devido ao seu grau de fragilidade e à sua baixa resistência à corrosão. Em virtude da elevada concentração de Cromo, esses aços são, geralmente, empregados na fabricação de componentes domésticos, industriais, etc, devido à boa resistência à corrosão aliada ao seu baixo custo, quando comparados aos aços inox austeníticos. Porém, os aços inox ferríticos apresentam baixa resistência ao impacto. [4]

Durante os processos de deformação plástica, as chapas metálicas são submetidas a diversos níveis de tensões e de deformações até adquirir o formato dos moldes (matrizes). O conhecimento prévio das propriedades mecânicas e do grau de estampabilidade dos materiais viabiliza o emprego do método de análise por elementos finitos, ou, do inglês, *Finite element method* (FEM) para o projeto do ferramental, o planejamento e a otimização dos parâmetros do processo de estampagem a ser

empregado, reduzindo custos com desperdício de matéria-prima, com desgaste precoce do ferramental e com baixa qualidade dos produtos finais [5].

O ensaio de tração é amplamente utilizado para obtenção de informações relativas à resistência dos materiais metálicos e, inclusive, para controle das suas especificações, fornecendo informações importantes e essenciais ao projeto e à fabricação de peças e componentes mecânicos. No teste de tração, um corpo de prova padronizado é submetido a uma carga de tração uniaxial crescente até a sua ruptura, medindo-se, simultaneamente, os valores de carga aplicada (F) e de alongação da amostra (Δl). Através de um tratamento adequado desses resultados, obtém-se dados quantitativos das propriedades mecânicas dos materiais, a saber: limite de resistência (R_m), tensão de escoamento convencional (R_e), módulo de elasticidade (E), alongamento máximo, índice de encruamento (n) e constante C quando $\varphi = 1$. Além disso, também é possível observar a dependência dessas propriedades em relação à temperatura, velocidade de deformação, anisotropia do material, tamanho de grão, porcentagem de impurezas e demais condições ambientais [6].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

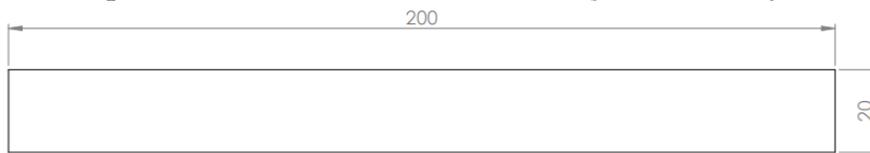
2.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

As chapas metálicas utilizadas neste estudo eram de aços inoxidáveis austenítico AISI 304 e ferrítico AISI 430, com espessuras de 1 mm, fornecidos pela empresa Comércio de Aços Premium Eirelli. A análise da composição química foi realizada através do espectrômetro de emissão ótica Q2ION, da marca BRUKER, localizado no Laboratório de Fundição (LAFUN) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

2.2 ENSAIO DE TRAÇÃO E DE ANISOTROPIA

As dimensões das amostras utilizadas e os procedimentos adotados durante os ensaios de tração atendem às especificações da norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013. Foram ensaiadas três amostras para cada direção de laminação do material (0° , 45° e 90°), cortadas a laser em formato retangular com as dimensões de 200 mm x 20 mm x 1 mm (figura 1).

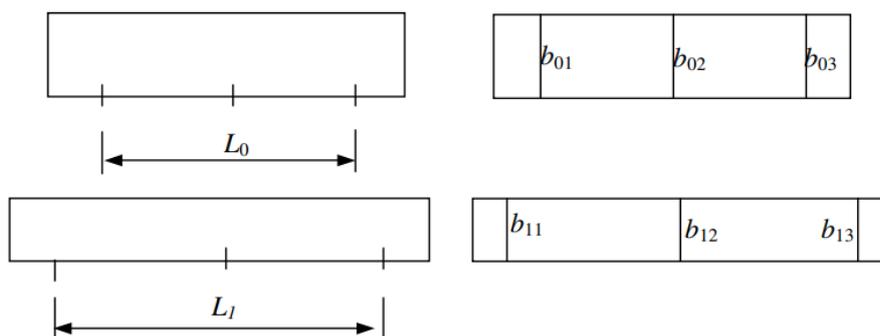
Figura 1 – Amostras utilizadas no ensaio de tração e de anisotropia.



Os ensaios de tração foram conduzidos à temperatura ambiente com velocidade de deslocamento da máquina de 5 mm/min, fazendo-se uso de uma máquina universal de ensaios mecânicos EMIC, modelo DL60000, com capacidade máxima de 600 kN. Os corpos-de-prova foram submetidos à carga axial trativa até a sua ruptura, medindo-se, instantaneamente, os dados de força (F) e de alongação das amostras (Δl). Em relação ao ensaio de anisotropia, destaca-se que foram usadas as mesmas configurações do ensaio de tração, limitando-se, porém, a alongação das amostras a cerca de 50% do deslocamento máximo do ensaio de tração, de modo que sejam promovidas, apenas, deformações plásticas uniformes ao material.

A figura 2 demonstra esquematicamente como são feitas as medidas dos corpos-de-prova para o ensaio de tração e de anisotropia. As amostras possuem um comprimento útil inicial (L_0) de 80 mm. Para a medição das deformações no ensaio de anisotropia, marcam-se as larguras iniciais b_{01} , b_{02} e b_{03} , sendo que, posteriormente, medem-se os valores de L_1 , b_{11} , b_{12} e b_{13} para calcular os índices de anisotropia (r), de anisotropia média (r_m) e planar (Δ_r) dos aços AISI 304 e do AISI 430.

Figura 2 - Medição das dimensões das amostras para o cálculo dos índices de anisotropia [7].

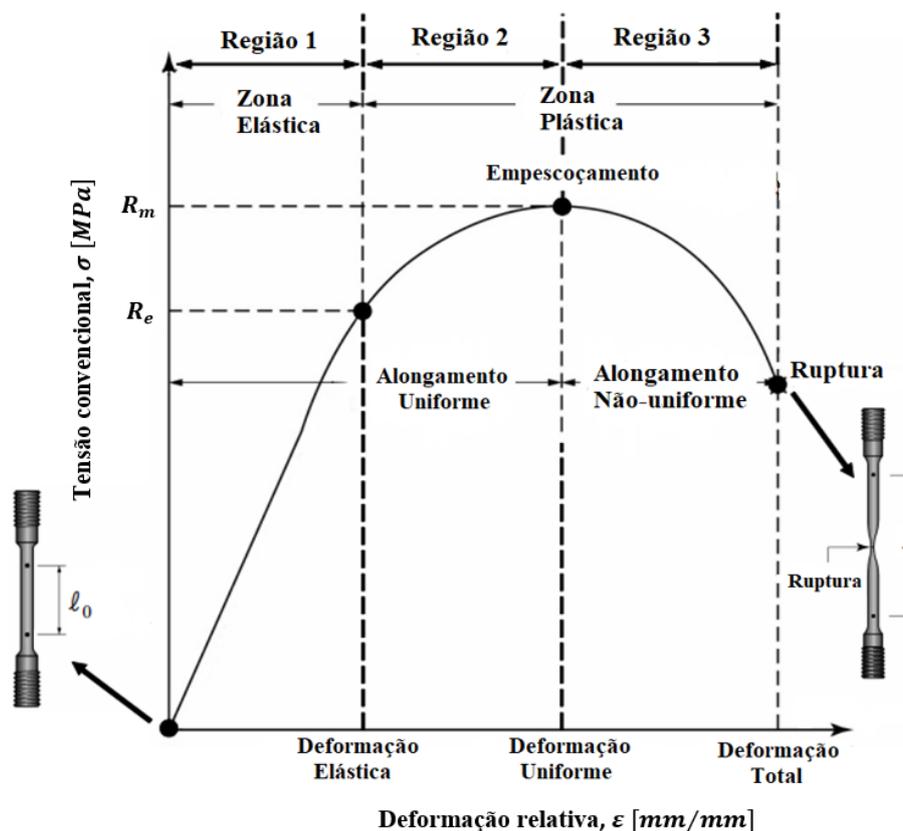


2.3 CURVA DE ENGENHARIA

Na curva tensão-deformação de engenharia (figura 3), são identificadas algumas das principais propriedades mecânicas dos materiais metálicos. Para construção dessa curva, são plotados os valores de tensão longitudinal desenvolvida no corpo de prova (σ) em função da deformação relativa ao comprimento (ϵ). Assim que a carga aplicada

durante o ensaio de tração ultrapassa a região elástica da curva de engenharia (região 1), o material é permanentemente deformado e, com o avanço progressivo da sua deformação, aumenta-se cada vez mais a tensão necessária para dar continuidade ao processo de deformação plástica, fenômeno esse denominado de encruamento ou trabalho a frio (região 2). Com o aumento significativo da tensão, reduz-se, em contrapartida, a área da seção transversal do corpo de prova em decorrência da sua elongação. No entanto, atinge-se um ponto em que a redução expressiva da área da seção transversal faz com que haja concentração de tensões triaxiais num determinado ponto do material, o que o torna menos resistente e, portanto, mais suscetível ao afinamento abrupto — início do fenômeno de empescoamento. O surgimento do pescoço na amostra corresponde ao instante em que foi aplicada a carga máxima durante o ensaio de tração, também correspondente à região do Limite de Resistência (R_m), de modo que, posteriormente, a carga e a tensão necessárias para deformar o corpo de prova diminuirão com a redução abrupta da seção transversal até se atingir a fratura (região 3) [8].

Figura 3 – Representação da curva de engenharia de um aço dúctil [9].



A tensão convencional ou de engenharia (σ) é dada em função da carga instantânea aplicada (F) e da área inicial da seção transversal do corpo de prova (A_0),

enquanto a deformação relativa (ε) é dada pela razão entre a alongação da amostra (Δl) e o seu comprimento inicial (l_0), conforme descreve as equações 1 e 2, respectivamente [7].

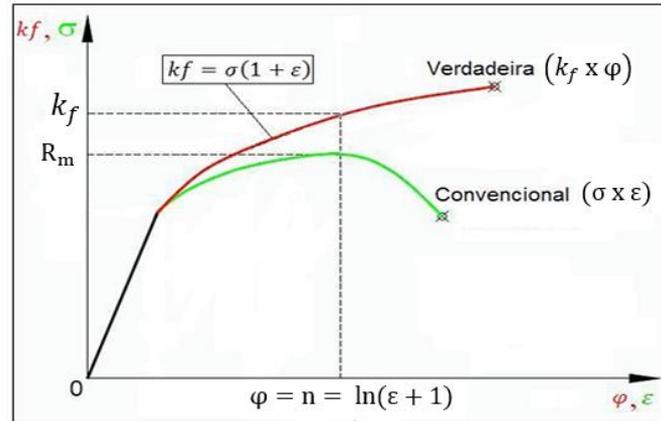
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2)$$

2.4 CURVA DE ESCOAMENTO

A curva tensão-deformação de engenharia não prevê, com eficiência, o comportamento real das tensões e deformações plásticas de um material metálico, visto que, conforme equações 1 e 2, essas propriedades são aferidas com base nas dimensões originais do corpo de prova, as quais são continuamente alteradas durante o ensaio de tração. Torna-se necessário obter dados de tensão e de deformação que sejam calculados com base nas dimensões instantâneas do corpo de prova, demonstrando o seu comportamento plástico verdadeiro. Para tanto, representa-se as características de escoamento dos metais através da curva tensão verdadeira - deformação verdadeira, também conhecida como curva de escoamento. A curva de escoamento é plotada com os dados de tensão e de deformação verdadeiras relativas à zona de deformação plástica uniforme. Em relação à curva de engenharia, nota-se que a curva de escoamento se difere pelo fato de que, mesmo com a redução abrupta da área da seção transversal da amostra devido à formação do pescoço, o material permanece encruando até a sua ruptura e, portanto, não há redução da tensão longitudinal (figura 4). Embora haja redução da carga aplicada assim que se forma o pescoço, a redução expressiva da área da seção da amostra compensa essa redução da força e faz com que a tensão verdadeira permaneça em ascensão até a ruptura do metal [8].

Figura 4 – Comparação entre as curvas de engenharia ($\sigma \times \varepsilon$) e de escoamento ($kf \times \varphi$) ^[10].



A tensão verdadeira (kf) é expressa em função da carga aplicada (F) e da área instantânea da seção transversal da amostra (A_i), podendo ser reescrita em função da tensão convencional ou de engenharia (σ) e da deformação relativa (ε), segundo as equações 3 e 4, respectivamente ^[7].

$$kf = \frac{F}{A_i} \quad (3)$$

$$kf = \sigma \cdot (\varepsilon + 1) \quad (4)$$

A deformação verdadeira (φ) correlaciona o comprimento inicial (l_0) e instantâneo da amostra (l), a qual também pode ser dada por uma relação estabelecida com a deformação relativa (ε), conforme equações 5 e 6, respectivamente. Essas equações são válidas somente até a formação do pescoço, uma vez que admitem que o volume da amostra é constante e que a distribuição das deformações seja uniforme ao longo do seu comprimento útil. Posteriormente à região do pescoço, deve-se utilizar a equação 7, correlacionando a área inicial (A_0) com a área instantânea do pescoço (A_i) ^[7,10].

$$\varphi = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (5)$$

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (6)$$

$$\varphi = \ln\left(\frac{A_0}{A_i}\right) \quad (7)$$

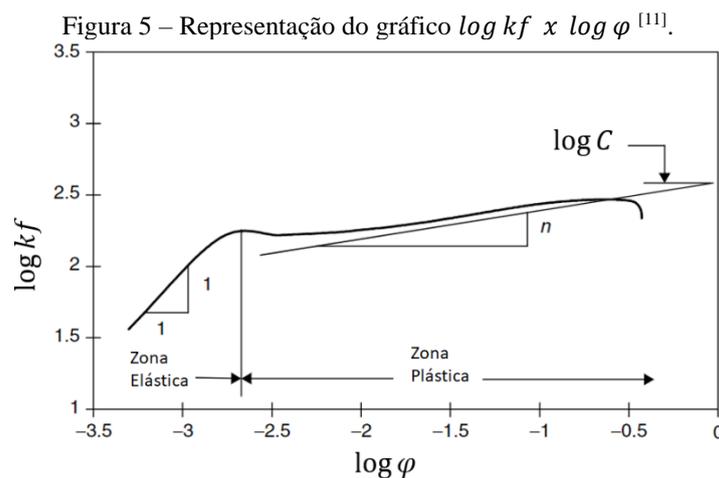
A curva de escoamento dos metais em geral pode ser expressa por uma relação potencial simples, conhecida como Lei de Ludwik-Hollomon (equação 8), a qual também

pode ser representada por um gráfico duplo logarítmico da tensão verdadeira e da deformação verdadeira (equação 9) [7, 11].

$$kf = C \cdot \varphi^n \quad (8)$$

$$\log kf = \log C + n \cdot \log \varphi \quad (9)$$

A constante C corresponde à tensão verdadeira quando $\varphi = 1$ e quantifica o nível de resistência que o material exerce contra a sua deformação, ou seja, quanto maior for esse coeficiente, maiores serão os esforços necessários para promover a sua deformação plástica. O índice de encruamento (n) corresponde à inclinação do gráfico $\log kf \times \log \varphi$ na região de deformação plástica uniforme (figura 5), o qual serve para mensurar a capacidade do material de distribuir a deformação plástica ao longo do seu volume. Para materiais com baixo índice de encruamento, o encruamento será localizado numa pequena região da amostra, fazendo com que níveis baixos de deformação levem o material a condições críticas ou mais próximas da fratura se comparado aos materiais com índices de encruamento maiores. Baixos índices de encruamento fazem com que haja grandes variações da deformação plástica para variações relativamente pequenas da tensão desenvolvida na região plástica. O índice de encruamento pode variar de $n = 0$ (sólido perfeitamente plástico) até $n = 1$ (sólido elástico), mas, para a maioria dos metais, seu valor fica entre 0,1 e 0,5 [6,8,11].



A definição algébrica do índice de encruamento (n) é obtida por uma relação estabelecida entre a taxa de encruamento ($dk_f/d\varphi$) e a tensão e deformação verdadeiras (equações 10 e 11) [8,11].

$$n = \frac{d(\log kf)}{d(\log \varphi)} = \frac{d(\ln kf)}{d(\ln \varphi)} = \frac{\varphi}{kf} \cdot \frac{dkf}{d\varphi} \quad (10)$$

$$\frac{dkf}{d\varphi} = n \cdot \frac{\varphi}{kf} \quad (11)$$

2.5 INSTABILIDADE EM TRAÇÃO

A deformação plástica em praticamente todos os tipos de metais resulta na concentração de tensão triaxiais numa determinada região do material, onde tende, normalmente, a ocorrer a sua respectiva ruptura. Embora a deformação plástica não seja completamente homogênea a nível microestrutural, ela é tida, em escala macroscópica, como homogênea até que o estrangulamento se inicie em um determinado nível de deformação, ponto em que a deformação plástica se torna localizada, a área da seção transversal da amostra se afina e a curva força-deslocamento começa a cair. Neste ponto, é utilizado o Critério de “Instabilidade em Tração” para entendimento da mecânica da deformação na região do Limite de Resistência (R_m), na curva de engenharia. Essa região da curva de engenharia corresponde à região do fenômeno de empescoçamento, onde ocorre, necessariamente, a redução do índice de encruamento do material (n)^[12].

O pescoço ou a deformação localizada se iniciam na carga máxima, onde o aumento da tensão devido à diminuição da área da seção reta transversal do corpo-de-prova se torna maior que o aumento da capacidade do metal suportar o carregamento em função do encruamento. Essa condição de instabilidade que provoca o empescoçamento é definida pela condição $dP = 0$, culminando na equação 12^[8].

$$dP = kf \cdot dA_i + A_i \cdot dkf = 0 \quad (12)$$

Em virtude da Lei da Constância de Volume, tem-se a equação 13^[8].

$$\frac{dl}{l} = -\frac{dA_i}{A_i} = d\varphi \quad (13)$$

E, em razão da condição de instabilidade, tem-se a equação 14^[8].

$$-\frac{dA_i}{A_i} = \frac{dkf}{kf} \quad (14)$$

Sendo assim, na região de formação do pescoço, obtém-se a equação 15^[8].

$$\frac{dkf}{d\varphi} = kf \quad (15)$$

O critério para surgimento do pescoço também pode ser explicado através da deformação de engenharia, partindo, inicialmente, da dedução analítica da equação 15, o que dará origem às equações 16 e 17 [8,12].

$$\frac{dkf}{d\varphi} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{d\varphi} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot \frac{dl/l_0}{dl/l} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot \frac{l}{l_0} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot (1 + \varepsilon) = \sigma \quad (16)$$

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\sigma}{(1 + \varepsilon)} \quad (17)$$

Por intermédio da substituição da condição que estabelece o surgimento do empescoamento da amostra (equação 15) na equação 10, percebe-se uma relação aritmética simples para a deformação verdadeira na qual ocorre o surgimento do pescoço, segundo Critério de Schaeffer e Rocha [10] (equação 18) [8,12].

$$\varphi = n \quad (18)$$

Através da equação 18, torna-se viável encontrar a equação que descreve a curva de escoamento nos moldes propostos por Ludwik-Hollomon, com base nos dados de Limite de Resistência (R_m) e da sua respectiva deformação relativa (ε). Calcula-se a deformação e tensão verdadeira nessa região (equação 6 e 4, respectivamente). Emprega-se os valores já conhecidos do índice de encruamento (n), da tensão (kf) e da deformação (φ) da região da força máxima na equação de Ludwik-Hollomon (equação 8), possibilitando, assim, encontrar o valor referente à constante C [10].

2.6 ÍNDICE DE ANISOTROPIA

Na etapa de projeto dos processos de estampagem, deve-se levar em consideração que o material não apresenta as mesmas propriedades em todas as suas direções, sendo, assim, caracterizados como anisotrópicos. A anisotropia de um metal policristalino se dá em virtude de que a rede cristalina dos grãos não é orientada de forma tão aleatória, a qual, pelo contrário, tende a preferir determinadas direções. O surgimento dessas orientações preferenciais pode estar vinculado à etapa de fabricação do metal e/ou a

algumas de suas etapas de processamento (laminação, tratamentos térmicos, dentre outros), fazendo com que, portanto, a resistência à tração e as demais propriedades mecânicas dependam da orientação da sua rede cristalina ^[13].

Para fins de medição do nível de anisotropia de um determinado material, utiliza-se o coeficiente de anisotropia (r), o qual correlaciona a deformação verdadeira da largura (φ_b) e da espessura (φ_s) de um determinado corpo de prova que foi submetido ao ensaio de tração, conforme equação 19. Na prática, é muito difícil de se aferir a variação da espessura do corpo de prova, motivo pelo qual são avaliadas as deformações do seu comprimento (φ_l) e da sua largura (φ_b), com base na Lei da Constância de Volume ^[7,13].

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = - \frac{\varphi_b}{(\varphi_b + \varphi_l)} \quad (19)$$

Além disso, afere-se a coeficiente de anisotropia média (r_m) do material, por intermédio da aferição do coeficiente de anisotropia (r) dos corpos-de-prova orientados a 0°, 45° e 90 em relação à direção de laminação, de acordo com a equação 20. A anisotropia média corresponde à habilidade de uma chapa metálica resistir ao afinamento da sua respectiva espessura, mais especificamente, quando submetida a forças de tração e/ou compressão no plano, de tal forma que, quanto maior o valor de r_m , maior será a sua resistência ao afinamento nos processos de estampagem profunda ^[7,13].

$$r_m = \frac{(r_{0^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ})}{4} \quad (20)$$

Desse modo, a variação do coeficiente de anisotropia em função da direção de laminação da chapa metálica é denominada de coeficiente de anisotropia planar (Δ_r), cuja formulação consta da equação 21. Considera-se isotrópico o material que apresentar r_m próximo de 1 e Δ_r próximo de 0 ^[7, 13].

$$\Delta_r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ} - 2 \cdot r_{45^\circ}}{2} \quad (21)$$

3 RESULTADOS

3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Os resultados da composição química dos aços inoxidáveis, obtidos pelo Espectrômetro de Emissão ótica, são fornecidos em percentual de massa dos elementos

químicos (tabelas 1 e 2). Também constam nas tabelas os valores de composição química encontrados na literatura.

Tabela 1– Composição química do aço inox AISI 304 (em % de massa dos elementos).

Fonte	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Ensaaios	0,042	0,41	1,37	0,04	0,01	17,59	0,082	8,04
Toit e Steyn [14]	0,040	0,49	1,19	0,026	0,02	18,27	0,088	8,65
Li <i>et al.</i> [15]	0,025	0,50	1,48	0,021	-	18,02	-	8,36
Naghizadeh e Mirzadeh [16]	0,040	0,48	1,65	-	-	17,50	0,073	9,33

Tabela 2– Composição química do aço inox AISI 430 (em % de massa dos elementos).

Fonte	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Ensaaios	0,05	0,37	0,42	0,003	0,015	16,10	0,078	0,170
Iquilio <i>et al.</i> [17]	0,042	0,24	0,52	0,009	0,005	16,81	-	0,095
Khorrami <i>et al.</i> [4]	0,046	0,60	0,58	0,022	-	17,13	0,019	0,130
Carneiro <i>et al.</i> [18]	0,029	0,40	0,44	0,036	0,002	15,54	0,006	0,18

A composição química encontrada para o aço inox AISI 304 (tabela 1) possui proporções dos elementos químicos próximas às encontradas por [14], [15] e [16], com variações na faixa de 5 a, no máximo, 10%, permitindo-se concluir que as amostras ensaiadas atendem às especificações nacionais e internacionais para classificação desse aço. Essa mesma faixa de variação dos resultados da composição química acontece com as amostras ensaiadas de AISI 430, cujos resultados obtidos se assemelham aos estudos de [4], [17] e [18], conforme demonstrado na tabela 2.

3.2 CURVA DE ENGENHARIA

Os dados de força instantânea aplicada axialmente (F) e da variação do comprimento da amostra (Δl) foram convertidos em tensão convencional (σ) e deformação relativa (ε) através das equações 1 e 2, respectivamente, levando-se em consideração um comprimento inicial (l_0) de 200 mm e uma área inicial (A_0) de 20 mm². As curvas de engenharia obtidas através do ensaio de tração para cada direção de laminação (0°, 45° e 90°) encontram-se nas figuras 6 e 7.

Figura 6 – Curvas de engenharia do aço inoxidável AISI 304 para cada direção de laminação.

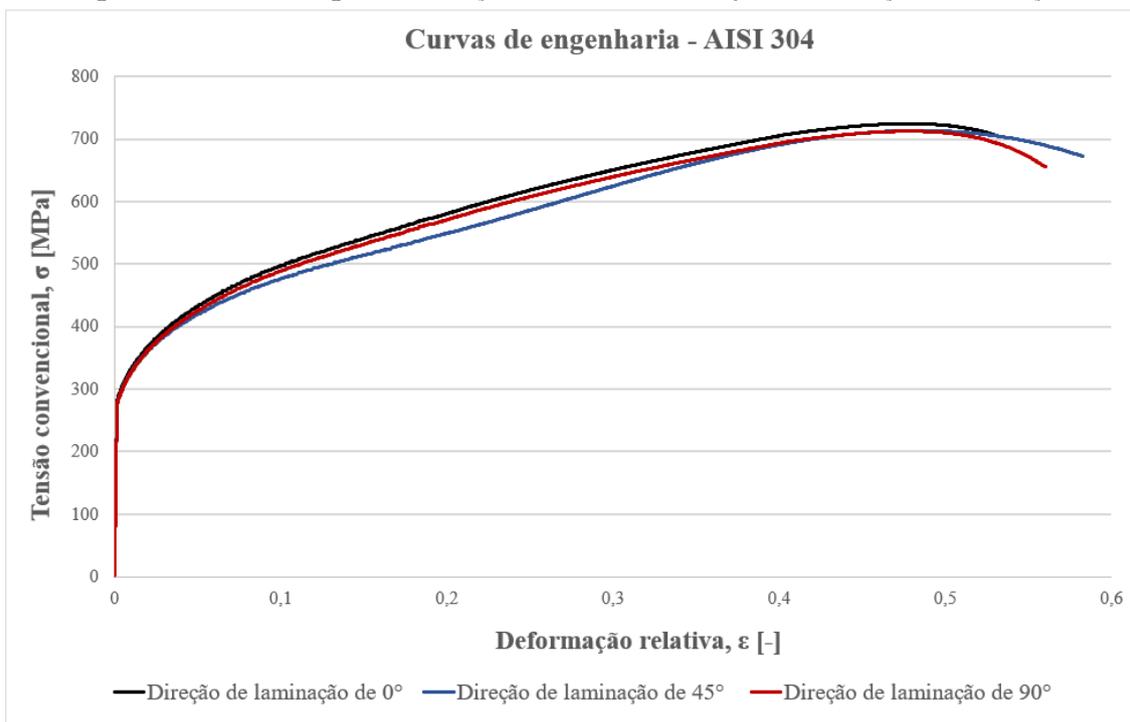
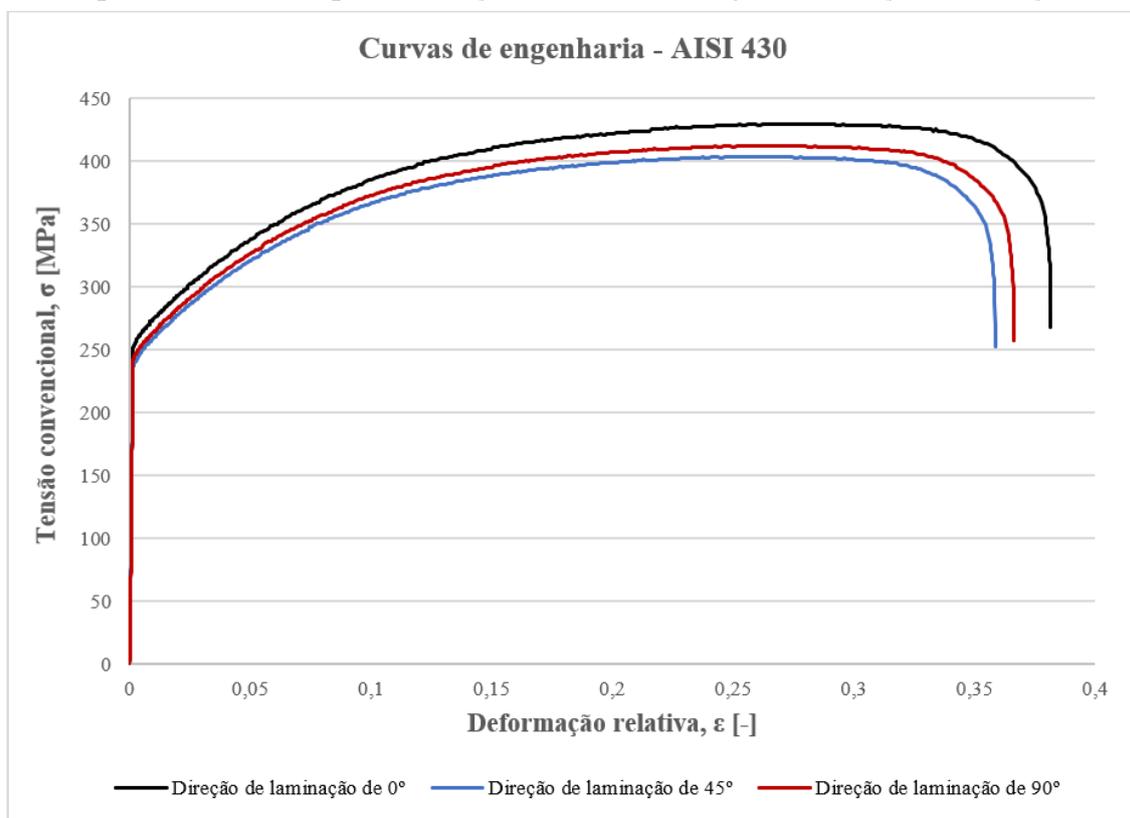


Figura 7 – Curvas de engenharia do aço inoxidável AISI 430 para cada direção de laminação.



Nas tabelas 3 e 4, encontram-se as informações sobre as principais propriedades mecânicas do material, coletadas a partir das curvas de engenharia: limite de escoamento

(R_e), limite de resistência (R_m), alongamento total (δ) e módulo de elasticidade (E). Conforme prevê a norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013, o valor do limite de escoamento foi encontrado através de uma reta que foi traçada paralelamente à zona elástica, deslocada à direita em 0,002 da deformação relativa. O ponto em que essa reta paralela cruzou a curva de engenharia foi definido como o limite de escoamento. Ademais, constam os valores dessas propriedades mecânicas encontrados na literatura nacional e internacional.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304.

Fonte	Propriedades mecânicas	Módulo de elasticidade, E	Limite de escoamento, R_e	Limite de resistência, R_m	Alongamento total, δ
Curva de engenharia	Direção 0°	200 GPa	307,21 MPa	724,78 MPa	53,29 %
	Direção 45°	200 GPa	303,14 MPa	713,74 MPa	58,24 %
	Direção 90°	200 GPa	300 MPa	712,66 MPa	56,02 %
Amree e Chaijit [19]	Direção 0°	200 GPa	289,29 MPa	630,51 MPa	53,20 %
	Direção 45°	200 GPa	280,02 MPa	599,13 MPa	55,5 %
	Direção 90°	200 GPa	283,49 MPa	606,52 MPa	56,9 %
Toit e Steyn [14]	Direção 0°	200 GPa	293 MPa	709 MPa	54 %
	Direção 45°	200 GPa	275 MPa	640 MPa	57 %
	Direção 90°	200 GPa	292 MPa	660 MPa	58 %
Othmen <i>et al.</i> [20]	Direção 0°	200 GPa	278 MPa	670 MPa	62 %
	Direção 45°	200 GPa	270 MPa	632 MPa	56 %
	Direção 90°	200 GPa	280 MPa	647 MPa	52 %

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 430.

Fonte	Propriedades mecânicas	Módulo de elasticidade, E	Limite de escoamento, R_e	Limite de resistência, R_m	Alongamento total, δ
Curva de engenharia	Direção 0°	200 GPa	253,7 MPa	429,6 MPa	38,13 %
	Direção 45°	200 GPa	239,5 MPa	403,8 MPa	35,85 %
	Direção 90°	200 GPa	244,6 MPa	412,4 MPa	36,61 %
Iquilio <i>et al.</i> [17]	Direção 0°	200 GPa	271 MPa	373 MPa	29,1 %
	Direção 45°	200 GPa	291 MPa	393 MPa	28,0 %
	Direção 90°	200 GPa	284 MPa	389 MPa	27,6 %
Prommajun e Chaijit [21]	Direção 0°	200 GPa	307,1 MPa	486,8 MPa	32,5 %
	Direção 45°	200 GPa	316,6 MPa	488,0 MPa	30,3 %
	Direção 90°	200 GPa	315,1 MPa	489,8 MPa	31,6 %
Ferrarini [22]	-	200 GPa	250 MPa	450 MPa	22 %

Nota-se que, quando comparado aos resultados dos ensaios de tração das pesquisas de [14], [19] e [20], os valores encontrados experimentalmente do limite de escoamento (R_e), do limite de resistência (R_m) e do alongamento total (δ) para o aço inox AISI 304 ficaram muito próximos, inclusive para as três direções de laminação avaliadas (0°, 45° e 90°), conforme tabela 3. De forma geral, os valores encontrados experimentalmente para essas propriedades foram superiores em, no máximo, 10% em

relação aos valores fornecidos pela literatura internacional, indicando que as amostras ensaiadas apresentam propriedades mecânicas muito próximas às amostras de aço inox AISI 304 comercializadas internacionalmente. Ainda, é possível concluir que esse aço inox apresenta uma boa capacidade de se deformar plasticamente, aliado ao aumento expressivo da sua resistência mecânica quando conformado a frio (encruamento).

Segundo consta da tabela 4, os resultados experimentais do limite de escoamento (R_e), do limite de resistência (R_m) e do alongamento total (δ) para o aço inox AISI 430 foram inferiores, na faixa de 10 a 15%, dos resultados fornecidos pelas referências internacionais [17] e [21], considerando as três direções de laminação avaliadas (0° , 45° e 90°), à exceção do trabalho de [22] que não avaliou a influência das três direções de laminação nas propriedades mecânicas. Essa discrepância entre os valores encontrados experimentalmente e os valores da literatura é, possivelmente, justificada pela condução dos ensaios experimentais de tração deste trabalho com uma velocidade inferior em relação aos autores que usaram na faixa de 10 mm/min, o que justifica o aumento significativo da resistência mecânica em detrimento da ductilidade (mensurada através do alongamento total). No entanto, a faixa de valores encontrados para as propriedades mecânicas avaliadas permite constatar que as amostras ensaiadas atendem às especificações nacionais e internacionais do aço inox AISI 430, o que também é corroborado pelos resultados da composição química.

3.3 CURVA DE ESCOAMENTO

As curvas de escoamento dos materiais foram determinadas selecionando-se, apenas, a região de deformação plástica uniforme da curva de engenharia, a qual parte do limite de escoamento e vai até o limite de resistência do material (figura 3). Os valores de tensão convencional e de deformação relativa foram transformados em termos de tensão verdadeira ou de escoamento (k_f) e de deformação verdadeira (φ), através das equações 4 e 6, respectivamente. As figuras 8 e 9 demonstram as curvas de escoamento dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 430 para cada direção de laminação (0° , 45° e 90°).

Figura 8 – Curvas de escoamento do aço inoxidável AISI 304 para cada direção de laminação.

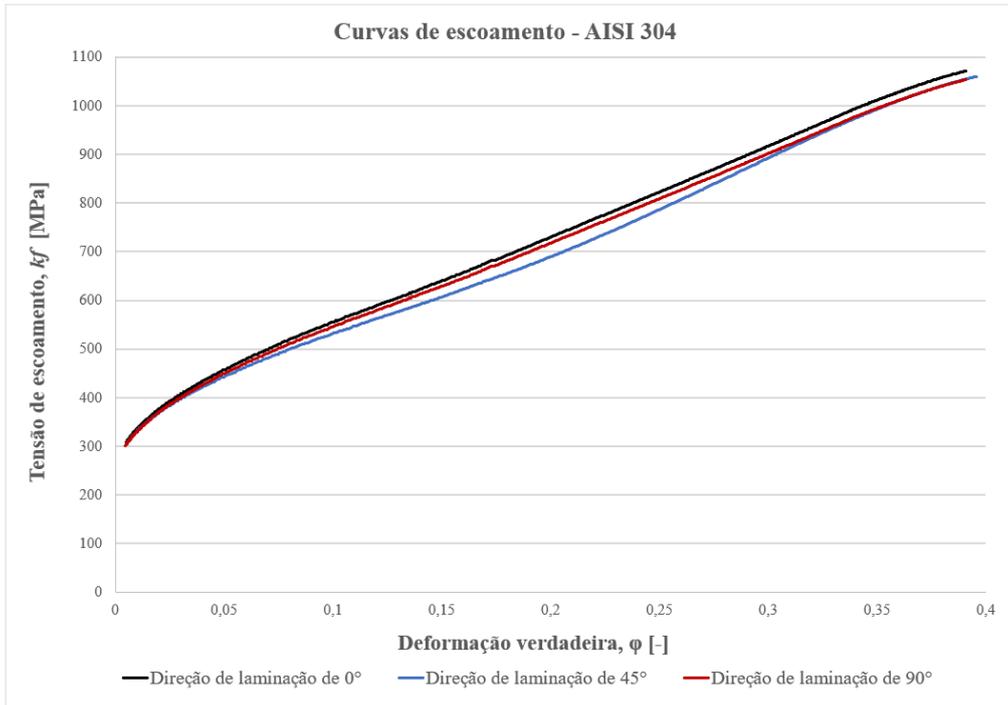
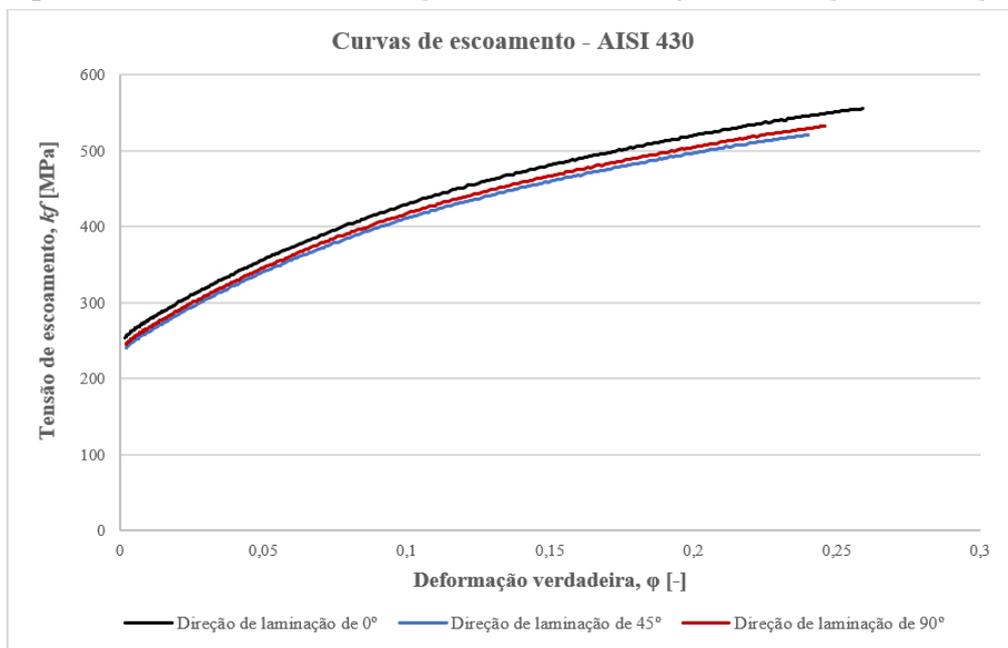


Figura 9 – Curvas de escoamento do aço inoxidável AISI 430 para cada direção de laminação.



Para descrever as curvas de escoamento dos materiais, foi utilizada a equação de Ludwik-Hollomon (equação 8), utilizando-se os resultados de tensão de escoamento (k_f) e de deformação verdadeira (ϕ) do ensaio de tração uniaxial. Com esses resultados e com auxílio do software MS Excel, encontraram-se as linhas de tendência de potência que descrevem analiticamente o comportamento da curva de escoamento para cada direção

de laminação. O número base e o expoente dessas equações de potência correspondem à constante C quando $\varphi = 1$ e ao índice de encruamento do material (n), respectivamente.

As equações 22, 23 e 24 descrevem as curvas de escoamento do aço AISI 304 para as direções de laminação de 0° , 45° e 90° , respectivamente.

$$kf = 1464,1. \varphi^{0,41} \quad (22)$$

$$kf = 1382,2. \varphi^{0,39} \quad (23)$$

$$kf = 1449,7. \varphi^{0,41} \quad (24)$$

As equações 25, 26 e 27 descrevem as curvas de escoamento do aço AISI 430 para as direções de laminação de 0° , 45° e 90° , respectivamente.

$$kf = 697,5. \varphi^{0,2} \quad (25)$$

$$kf = 663,9. \varphi^{0,2} \quad (26)$$

$$kf = 675,1. \varphi^{0,2} \quad (27)$$

Para fins de comparação, encontraram-se as equações das curvas de escoamento para cada direção de laminação do material por meio do Critério de Schaeffer e Rocha [10], bem como pelos dados do Limite de Resistência (R_m) e da sua respectiva deformação relativa (ε), obtidos através da curva de engenharia. A tensão e a deformação verdadeiras são calculadas através das equações 4 e 6, respectivamente. Inserindo os valores já conhecidos do índice de encruamento (n), da tensão (kf) e da deformação na região da força máxima (φ) na equação de Ludwik-Hollomon, torna-se possível encontrar o valor da constante C .

As equações 28, 29 e 30 descrevem as curvas de escoamento do aço AISI 304, obtidas através do Critério de Schaeffer e Rocha [10], para as direções de laminação de 0° , 45° e 90° , respectivamente.

$$kf = 1548,64. \varphi^{0,39} \quad (28)$$

$$kf = 1525,05. \varphi^{0,39} \quad (29)$$

$$kf = 1522,76. \varphi^{0,39} \quad (30)$$

As equações 31, 32 e 33 descrevem as curvas de escoamento do aço AISI 430, obtidas através do Critério de Schaeffer e Rocha [10], para as direções de laminação de 0° , 45° e 90° , respectivamente.

$$kf = 749,3 \cdot \varphi^{0,22} \quad (31)$$

$$kf = 678,1 \cdot \varphi^{0,21} \quad (32)$$

$$kf = 692,5 \cdot \varphi^{0,21} \quad (33)$$

Nas tabelas 5 e 6, concentram-se os valores do índice de encruamento (n) e da constante (C) obtidos através dos ensaios de tração para os aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 430, comparados aos valores encontrados na literatura.

Tabela 5 – Índice de encruamento (n) e constante C do aço inox AISI 304.

Fonte	Orientação	Índice de encruamento, n	Constante C
Equação de potência do MS Excel	Direção de laminação 0°	0,41 [-]	1464,1 MPa
	Direção de laminação 45°	0,39 [-]	1382,2 MPa
	Direção de laminação 90°	0,41 [-]	1449,7 MPa
Critério de Schaeffer e Rocha [10]	Direção de laminação 0°	0,39 [-]	1548,64 MPa
	Direção de laminação 45°	0,39 [-]	1525,05 MPa
	Direção de laminação 90°	0,39 [-]	1522,76 MPa
Toit e Steyn [14]	Direção de laminação 0°	0,41 [-]	1481 MPa
	Direção de laminação 45°	0,42 [-]	1370 MPa
	Direção de laminação 90°	0,41 [-]	1395 MPa
Sener e Kurtaran [23]	-	0,30 [-]	1528 MPa
Amree e Chaijit [19]	-	0,28 [-]	1229,5 MPa

Tabela 6 – Índice de encruamento (n) e constante C do aço inox AISI 430.

Fonte	Orientação	Índice de encruamento, n	Constante C
Equação de potência do MS Excel	Direção de laminação 0°	0,20 [-]	697,5 MPa
	Direção de laminação 45°	0,20 [-]	663,9 MPa
	Direção de laminação 90°	0,20 [-]	675,1 MPa
Critério de Schaeffer e Rocha [10]	Direção de laminação 0°	0,22 [-]	749,3 MPa
	Direção de laminação 45°	0,22 [-]	678,1 MPa
	Direção de laminação 90°	0,21 [-]	692,5 MPa
Prommajun e Chaijit [21]	Direção de laminação 0°	0,26 [-]	891,17 MPa
	Direção de laminação 45°	0,25 [-]	889,68 MPa
	Direção de laminação 90°	0,25 [-]	894,71 MPa
Iquilio <i>et al.</i> [17]	Direção de laminação 0°	0,19 [-]	621 MPa
	Direção de laminação 45°	0,18 [-]	651 MPa
	Direção de laminação 90°	0,18 [-]	638 MPa
Ferrarini [22]	Direção de laminação 0°	0,16 [-]	738,5 MPa
	Direção de laminação 45°	0,14 [-]	743,3 MPa
	Direção de laminação 90°	0,14 [-]	724,4 MPa

A respeito das equações das curvas de escoamento do AISI 304 (equações 22, 23 e 24) e do AISI 430 (equações 25, 26 e 27) obtidas experimentalmente, é possível observar que os resultados se encontram com uma variação inferior a 10% para o índice de encruamento (n) e para a constante C , quando comparados aos resultados encontrados através do Critério de Schaeffer e Rocha [10]. Não obstante, verificou-se que, no trabalho de [24], a equação não conseguiu descrever, com esse grau de precisão, a curva de escoamento a frio do aço avançado de ultra alta resistência 22MnB5, possivelmente em

razão do comportamento atípico dessa classe de materiais quando deformada plasticamente em temperatura ambiente.

Na tabela 5 (aço AISI 304), percebe-se que, à exceção de [19], os valores da constante C estão muito próximos da literatura, com uma variação inferior a 10%. Enquanto que, para o índice de encruamento (n) desse aço, apenas os resultados de [14] são próximos, dado que as demais referências apresentam uma variação superior a 20%. Em relação ao aço inox AISI 430 (tabela 6), percebe-se que os valores do índice de encruamento (n) e da constante C estão muito próximos da literatura [17] e [22], com uma variação inferior a 10%, enquanto os resultados de [21] encontram-se superiores acima de 20% em relação aos resultados experimentais.

3.4 ÍNDICE DE ANISOTROPIA

Os valores dos coeficientes de anisotropia médio (r_m) e planar (Δ_r) constam das tabelas 7 e 8, calculados através das equações 20 e 21, respectivamente. Para tanto, também foram calculados os coeficientes de anisotropia de cada direção de laminação (r_{0° , r_{45° e r_{90°), por meio da equação 19.

Tabela 7- Coeficientes de anisotropia médio (r_m) e anisotropia planar (Δ_r) do aço inox AISI 304.

Fonte	r_{0°	r_{45°	r_{90°	r_m	Δ_r
Ensaio	0,95	1,02	0,85	0,96	-0,12
Othmen <i>et al.</i> [20]	0,87	1,16	0,82	0,99	0,28
Sener, Esener e Firat [25]	0,83	1,22	0,95	0,93	0,22
Amree e Chaijit [19]	0,97	1,09	0,84	0,90	-0,10

Tabela 8- Coeficientes de anisotropia médio (r_m) e anisotropia planar (Δ_r) do aço inox AISI 430.

Fonte	r_{0°	r_{45°	r_{90°	r_m	Δ_r
Ensaio	1,37	1,10	1,31	1,22	0,29
Iquilio <i>et al.</i> [17]	0,91	0,58	1,48	0,89	0,61
Prommajun e Chaijit [21]	0,98	1,02	1,10	1,05	0,37
Ferrarini [22]	0,96	0,79	1,30	0,94	0,58

Os resultados dos coeficientes de anisotropia médio (r_m) e planar (Δ_r) contidos nas tabelas 7 e 8 indicam que os aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 430 se encontram em condições próximas da isotropia (r_m próximo de 1 e Δ_r próximo de 0) e que, portanto, não possuem limitações quanto à sua empregabilidade em processos de estampagem profunda, em razão da baixa propensão à defeitos como “orelhas”.

Os valores encontrados experimentalmente para os coeficientes de anisotropia do aço inox AISI 304 se aproximam, em parte, dos resultados contidos nos trabalhos de [19], [20] e [25]. Os valores dos coeficientes de anisotropia para cada direção de laminação (0° , 45° e 90°) e do coeficiente de anisotropia médio (r_m) encontram-se próximos da literatura, estando numa faixa de 5 a, no máximo, 12% de variação, conforme demonstrado na tabela 7. Porém, à exceção de [19], o coeficiente de anisotropia planar (Δ_r) encontrado experimentalmente encontra-se muito aquém aos resultados de [20] e [25], evidenciando-se, assim, eventuais erros de cálculo por esses autores, dado que os valores dos coeficientes de anisotropia para cada direção de laminação estão próximos e que, por conseguinte, o resultado de Δ_r também deveria estar, levando-se em consideração a adoção da equação 21.

Em relação aos resultados do aço inox AISI 430 (tabela 8), vislumbra-se que os resultados encontrados experimentalmente para os coeficientes de anisotropia para cada direção de laminação, bem como os coeficientes de anisotropia médio e planar, encontram-se expressivamente fora de uma faixa aceitável de variabilidade, muito embora a técnica empregada para avaliação do grau de anisotropia seja a mesma utilizada neste artigo. Em suma, nota-se que os resultados de Δ_r para [17], [21] e [22] sugerem alta propensão ao “orelhamento” das amostras quando submetidas aos ensaios de embutimento.

4 CONCLUSÃO

A composição química encontrada para os aços inox AISI 304 e AISI 430 (tabelas 1 e 2) possui proporções dos elementos químicos próximas às fornecidas pelas literaturas, com oscilações dos resultados que variam de 5 a, no máximo, 10%, permitindo-se concluir que as amostras ensaiadas atendem às especificações nacionais e internacionais para classificação desse aço, o que também é corroborado através da plotagem das curvas de engenharia (figuras 6 e 7). Com as curvas de engenharia, foi possível obter informações importantes sobre as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 430. Assim como defendido por [3] e [4], o aço inoxidável austenítico AISI 304 apresenta um grau de estampabilidade superior ao aço inox ferrítico AISI 430, em razão das suas elevadas resistência mecânica e ductilidade, sendo, portanto, mais indicado para operações de embutimento profundo. Constatou-se também que as amostras ensaiadas atendem às especificações nacionais e internacionais para classificação desses aços inoxidáveis.

A respeito das curvas de escoamento dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 430, é possível observar que os dados de n e C obtidos nos ensaios de tração encontram-se dentro do intervalo plausível, quando comparados a algumas referências internacionais. No entanto, os resultados experimentais se encontram com uma variação inferior a 10% para o índice de encruamento (n) e para a constante C , quando comparados aos resultados encontrados através do Critério de Schaeffer e Rocha [10]. Desse modo, evidencia-se que esse Critério apresenta um grau de assertividade inestimável para obtenção das curvas de escoamento desses aços inoxidáveis, sem que fosse necessário plotar a curva de escoamento e, posteriormente, extrair a equação de potência que a descreve, economizando tempo de projetistas da área de conformação mecânica no tratamento de dados para posterior emprego em softwares de simulação numérica, com o objetivo de fabricação de ferramentas ou, até mesmo, de implementação de melhorias ao processo.

Constatou-se que, por meio das tabelas 7 e 8, as amostras de aço inox AISI 304 e AISI 430 se encontram em condições relativamente próximas da isotropia (r_m próximo de 1 e Δ_r próximo de 0), sugerindo que, quando submetidas a processos de embutimento, é baixa a probabilidade de surgirem de defeitos do tipo “orelhas” e, conseqüentemente, menores os custos com desperdício de matéria-prima. Considerando que se espera de um aço de boa trabalhabilidade um r_m próximo de 1 e um Δ_r próximo de zero de acordo com [6], [7] e [8], conclui-se que esses materiais são indicados para operações de embutimento profundo, o que também é corroborado pelos resultados da curva de engenharia (figuras 6 e 7) que demonstram uma alta ductilidade atrelada à alta resistência mecânica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela infraestrutura para realização dos ensaios experimentais, bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão de bolsas que fomentam o desenvolvimento de pesquisas científicas nacionais.

REFERÊNCIAS

- [1] OIKAWA, P. M. V.: **Estudo do desempenho de aços inoxidáveis modificados para aplicação em meios corrosivos do processamento primário do petróleo**. 97 p. Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais- PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- [2] FERREIRA, R. C.: **Estudo da formação da fase sigma em aços inoxidáveis austeníticos – Foco nas ligas 317, 317L e 317LN**. 72 p. Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais- PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- [3] ISHIDA, M. A.: **Avaliação comparativa de barras laminadas do aço AISI 316L com e sem tratamento térmico de solubilização**. 78 p. Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais- PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- [4] KHORRAMI, M. S. *et al.* Study on microstructure and mechanical characteristics of low-carbon steel and ferritic stainless steel. **Materials Science And Engineering A**, Tehran, Iran, v. 608, p. 35-45, jul. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2014.04.065>.
- [5] HÄRTER, I. I.: **Simulação numérica do processo de estampagem considerando diferentes modelos tribológicos**. 98 p. Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- [6] GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. dos **“Ensaaios dos Materiais”**, Ed. LTC. Rio de Janeiro, 2012.
- [7] SCHAEFFER, L., **“Manufatura por Conformação Mecânica”**, Ed. Imprensa Livre. Porto Alegre - RS, 2016.
- [8] DIETER, G. E., **“Metalurgia Mecânica”**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- [9] CHOUNG, J. M.; CHO, S. R.. Study on true stress correction from tensile tests. **Journal Of Mechanical Science And Technology**, Ulsan, Korea, v. 22, n. 6, p. 1039-1051, jun. 2008. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-008-0302-3>.
- [10] SCHAEFFER, L.; ROCHA, A. da S., **“Conformação Mecânica: cálculos aplicados em processos de fabricação”**. Ed. Imprensa Livre. Porto Alegre – RS, 2007.
- [11] HU, S. J.; MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J. L., **“Mechanics of Sheet Metal Forming”**. Ed. Butterworth-Heinemann, Great Britain, 2002.
- [12] YASNIKOV, I.S.; VINOGRADOV, A.; ESTRIN, Y.. **Revisiting the Considère criterion from the viewpoint of dislocation theory fundamentals**. *Scripta Materialia*,

[S.L.], v. 76, p. 37-40, abr. 2014. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.12.009>.

[13] KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 4: forming**. Ed. Springer Science & Business Media, 2014.

[14] TOIT, M.; STEYN, H. G.. Comparing the Formability of AISI 304 and AISI 202 Stainless Steels. **Journal Of Materials Engineering And Performance**, Pretoria, South Africa, v. 21, n. 7, p. 1491-1495, set. 2011. Springer Science and Business Media LLC.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11665-011-0044-8>.

[15] LI, L. *et al.* Quantitative analysis of strength and plasticity of a 304 stainless steel based on the stress-strain curve. **Metals And Materials International**, Wuhan, China, v. 22, n. 3, p. 391-396, abr. 2016. Springer Science and Business Media LLC.
<http://dx.doi.org/10.1007/s12540-016-5466-2>.

[16] NAGHIZADEH, M.; MIRZADEH, H.. Effects of Grain Size on Mechanical Properties and Work-Hardening Behavior of AISI 304 Austenitic Stainless Steel. **Steel Research International**, Tehran, Iran, v. 90, n. 10, p. 1-9, jul. 2019. Wiley.
<http://dx.doi.org/10.1002/srin.201900153>.

[17] IQUILIO, R.A. *et al.* Novel experimental method to determine the limit strain by means of thickness variation. **International Journal Of Mechanical Sciences**, Santiago, Chile, v. 153-154, p. 208-218, abr. 2019. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.01.036>.

[18] CARNEIRO, J. P. S. *et al.* Comparative study of formability and mechanical properties of AISI 316 and AISI 430 stainless steel. **5Th International Conference On Integrity-Reliability-Failure**. Porto, Portugal, p. 213-220. jul. 2016.

[19] AMREE, C.; CHAJIT, S.. Strain Hardening Analysis of SUS 304 Stainless Steel Cup for Multi Stage Deep Drawing Using Finite Element Simulation Comparison with Experiment Result. **2018 2Nd International Conference On Engineering Innovation (Icei)**, Bangkok, Thailand, p. 35-41, jul. 2018. IEEE.
<http://dx.doi.org/10.1109/icei18.2018.8448624>.

[20] OTHMEN, K. B. *et al.* Ductile fracture of AISI 304L stainless steel sheet in stretching. **International Journal Of Mechanical Sciences**, Sfax, Tunisia, v. 172, p. 105404, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105404>.

[21] PROMMAJUN, N.; CHAJIT, S. Optimization of drawbead shape design for single step deep drawing of stainless steel rice bowl. **The 6Th TSME International Conference On Mechanical Engineering**. Thailand, p. 1-7. dec. 2015.

[22] FERRARINI, J. L. **Análise e determinação do coeficiente de atrito no processo de estampagem profunda**. 107 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

[23] SENER, B.; KURTARAN, H. Modeling the deep drawing of an AISI 304 stainless-steel rectangular cup using the finite-element method and an experimental validation. **Materials And Technology**, Istanbul, Turkey, v. 50, n. 6, p. 961-965, dez. 2016. Institute of Metals and Technology. <http://dx.doi.org/10.17222/mit.2015.278>.

[24] BUENO, T. G. M.: **Análise e Comparação dos Processos de Estampagem a Quente e Estampagem a Frio de um Aço Avançado de Alta Resistência 22MnB5**. 95 p. Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais- PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

[25] SENER, B.; ESENER, E.; FIRAT, M. Modeling plastic anisotropy evolution of AISI 304 steel sheets by a polynomial yield function. **SN Applied Sciences**, Istanbul, Turkey, v. 3, n. 2, jan. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s42452-021-04206-2>.