



ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS PARA ESTAMPAGEM DO AÇO AISI 409A E AISI 304A ¹

Valmir Dias Luiz²
José Carlos de Lacerda³
Diogo Henrique Quintão da Silva⁴

Resumo

Utilizando-se o ensaio de tração uniaxial em corpos de prova padronizados segundo normas internacionais é possível determinar as propriedades mecânicas necessárias ao estudo da conformabilidade de chapas de finas de aço. Entretanto, para a realização deste estudo comparativo foram utilizados dois aços inoxidáveis, o aço AISI 409A (ferrítico) e o aço AISI 304A (austenítico), ambos com grande aplicação industrial. Determinadas as propriedades mecânicas dos diferentes materiais no ensaio de tração, foi possível determinar a condição mais adequada para o embutimento profundo, e avaliar qual aço que garante uma estampagem de melhor qualidade, sem que haja defeitos de fabricação, como por exemplo, a formação de orelhas, que se deve um alto valor do coeficiente de anisotropia planar, como observado em um dos materiais estudados.

Palavras-chave: Propriedades mecânicas; Conformabilidade; Aço AISI 304A; Aço AISI 409A.

COMPARATIVE STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES FOR STAMPING STEEL AISI 409A AND AISI 304A

Abstract

Using tensile testing of uniaxial specimens in the standardized-test according to international standards is not possible to determine the mechanical properties necessary to study the formability of thin sheets of steel. However, for the realization of this comparative study we used two stainless steels, AISI 409A steel (ferritic) and steel AISI 304A (austenitic), both with large industrial application. Determined the mechanical properties of different materials by tensile test, it was possible to determine the best conditions for deep drawing steel and evaluate which ensures a better quality printing, with no manufacturing defects, such as the formation of ears, that should be a high coefficient of planar anisotropy, as observed in one of the materials studied.

Key words: Mechanical properties; Formability; Steel AISI 409A; Steel AISI 304A

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, M.Sc., DCX, Professor da Área de Ciências Exatas do UnilesteMG, Coronel Fabriciano, MG.

³ Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, M.Sc., DCX, Professor da Área de Ciências Exatas do UnilesteMG, Coronel Fabriciano, MG.

⁴ Engenheiro Mecânico, DCX, Graduado do Departamento de Ciências Exatas do UnilesteMG, Coronel Fabriciano, MG.



1 INTRODUÇÃO

Segundo Helman e Cetlin,⁽¹⁾ conformação mecânica é definida como sendo uma operação onde se aplicam solicitações mecânicas em metais, que respondem com uma mudança permanente de dimensões (deformação plástica). A estampagem é um dos processos de conformação mecânica mais difundido, que tem por finalidade a fabricação de peças a partir de chapas planas. Este processo tem como um dos seus maiores usuários a indústria automobilística, de eletrodomésticos, entre outras, em que a competitividade existente faz com que se procure a redução de tempo e custos durante este processo de fabricação.

O conceito de conformabilidade plástica está intimamente relacionado ao conceito de ductilidade, pois conformabilidade é a capacidade que o material possui de se deformar plasticamente antes da sua ruptura sem acarretar defeitos que inviabilizem seu uso, ou seja, é ter ductilidade. Keeler⁽²⁾ e Goodwin⁽³⁾ nos anos sessenta foram os pioneiros na caracterização da conformabilidade de chapas finas de aço, que posteriormente foi difundido em todo o mundo. Entretanto, este conceito é baseado em primeiro lugar na ruptura. Isto quer dizer que um material com boas características de conformabilidade não deve se romper durante a conformação. Mas não é apenas este o único fator a ser observado, em segundo lugar vem o conceito de rigidez de forma (ocorrência do efeito mola – *spring back* - rigidez do produto acabado – *oil canning*, *drumming* e *looseness*), e também a ocorrência de rugas.

Como a conformabilidade é uma qualidade difícil de ser medida, uma vez que não existe um único parâmetro que permite sua avaliação para um material específico, o importante é garantir que estas condições sejam asseguradas para as diversas condições de produção em diferentes estampos que utilizam a mesma matéria-prima. Através do presente trabalho, utilizando-se o ensaio de tração será feito um estudo comparativo das propriedades necessárias à conformabilidade de dois aços inoxidáveis, a fim de avaliar qual dentre os dois oferece uma maior conformabilidade quanto à estampagem.

De uma maneira geral, pode-se dizer que o ensaio de tração é o principal procedimento de ensaio para o levantamento das propriedades mecânicas fundamentais e parâmetros de estampabilidade de chapas metálicas, sendo apreciado não apenas em trabalhos da década de 60 e 80, como os de Keeler⁽⁴⁾ e Souza⁽⁵⁾ mas também em trabalhos recentes, como o de Hosford e Duncan,⁽⁶⁾ que utiliza o ensaio de tração para avaliação de chapas de aço para estampagem extra-profunda.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais Utilizados

2.1.1 Aço AISI 304A

Os aços inoxidáveis austeníticos são ligas Fe-Cr-Ni, contendo geralmente de 16% até 26% de cromo e de 6% até 22% de níquel. Esses aços são designados pelas séries 300 e 200, segundo o método de classificação da *American Iron and Steel Intitute* (AISI). Observa-se na tabela 1 a composição química deste aço e na Figura 1 a sua micrografia.

Tabela 1. Composição química do aço AISI 304A (% em peso)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Ti	N2 (ppm)	C	Si
0,04 1	1,20	0,41	0,02 8	0,00 27	18,1	8,02	0,061	0,00 4	429	0,00 57	0,00 4

De acordo com Chiaverini⁽⁷⁾ a maioria dos aços inoxidáveis austeníticos possui elevada ductilidade e sua capacidade de encruamento permite que sejam trabalhados a frio até atingirem valores elevados de limite de escoamento e resistência. Apresentando microestrutura predominantemente austenítica estes aços não são endurecíveis por tratamento térmico. A formação da martensita induzida por deformação contribui para com esse encruamento.



Figura 1. Aspectos típicos do aço AISI 304A: a) da microestrutura austenítica (ataque com Vilella); b) da microestrutura autenítica com formação de martensita. Ampliação: 100X

Conforme salienta Padilha e Guedes⁽⁸⁾ os aços inoxidáveis austeníticos são ligas com estrutura cristalina do tipo cúbica de face centrada (CFC) sendo conhecidos pela excelente característica de resistência à corrosão em diversos meios agressivos.

Estes aços apresentam também uma combinação de baixo limite de escoamento, alta resistência à tração e bom alongamento, oferecendo excelente condições para trabalho a frio, não sendo endurecidos por tratamento térmico, mas sua resistência à tração e dureza podem ser aumentados por encruamento, possuindo ampla faixa de propriedades mecânicas oferecendo assim boa ductilidade e resistência a altas e baixas temperaturas, além de boa conformabilidade e soldabilidade.

Os aços AISI 304A são utilizados para fins estruturais, equipamentos para indústria alimentícia, aeronáutica, ferroviária, petrolífera, química e petroquímica, papel e celulose, construção civil, dentre outros.

2.1.2 Aço AISI 409A

O outro aço utilizado no presente estudo é o aço AISI 409A (ferrítico), os aços inoxidáveis ferríticos são ligas Fe-Cr com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) e contêm de 11% a 30% de cromo e outros elementos de liga em

teor variável, apresentando menor resistência à corrosão, menor conformabilidade e menor tenacidade que os aços inoxidáveis austeníticos, como será visto *a priori*. Na composição química destes estes aços podem conter, dentre outros elementos de liga, a presença de molibdênio (Mo), silício (Si) e titânio (Ti), conforme se observa na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química do aço AISI 409A (% em peso)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	N2 (ppm)	Al	Nb
0,00 5	0,16	0,35	0,02 4	0,00 3	11,1	0,14	0,010	0,11 0	64	0,00 57	0,00 4

Os aços inoxidáveis ferríticos possuem o limite de escoamento menor que a dos aços austeníticos, entretanto, encruam muito mais lentamente que os austeníticos. A ductilidade e a tenacidade dos ferríticos são menores do que nos austeníticos.

E segundo Chiaverini⁽⁷⁾ a estrutura dos aços ferríticos, à temperatura ambiente, com qualquer velocidade de resfriamento, é sempre ferrítica sendo chamados de aços não endurecíveis, possuindo ainda boa resistência ao calor e à corrosão devido aos altos teores de cromo. O aço inox AISI 409 possui baixo teor de cromo (11%) e adição de titânio e nióbio como elementos estabilizadores da fase ferrítica. O Nb e o Ti endurecem a ferrita por solução sólida e formam carbonitretos, que melhora as propriedades mecânicas a altas temperaturas.

Os aços inoxidáveis ferríticos vêm, a partir de década de 1980, chamando a atenção da indústria em virtude do seu baixo custo e da sua maior resistência à formação de trincas devido à corrosão sob tensão em comparação com aços inoxidáveis austeníticos. Os aços inoxidáveis ferríticos não são temperáveis por via de tratamento térmico e possuem propriedades ferro-magnéticas.

Estes aços são designados pela série 4XX, segundo o método de classificação da *American Iron and Steel Intitute* (AISI), sendo utilizados em baixelas, fogões, geladeiras, pias, sistemas de exaustão de gases em motores de explosão, recheio de colunas de destilação, moedas, dentre outros.

Através da Figura 2 pode-se ver a microestrutura típica do aço inoxidável ferrítico AISI 409 estabilizado com Ti e Nb. Assim como no material anterior o ataque foi realizado com o reativo Vilella por um minuto. A amostra atacada possui espessura de 1,19 mm e o tamanho de grão é de 7/6. A micrografia está ampliada em 100 vezes.

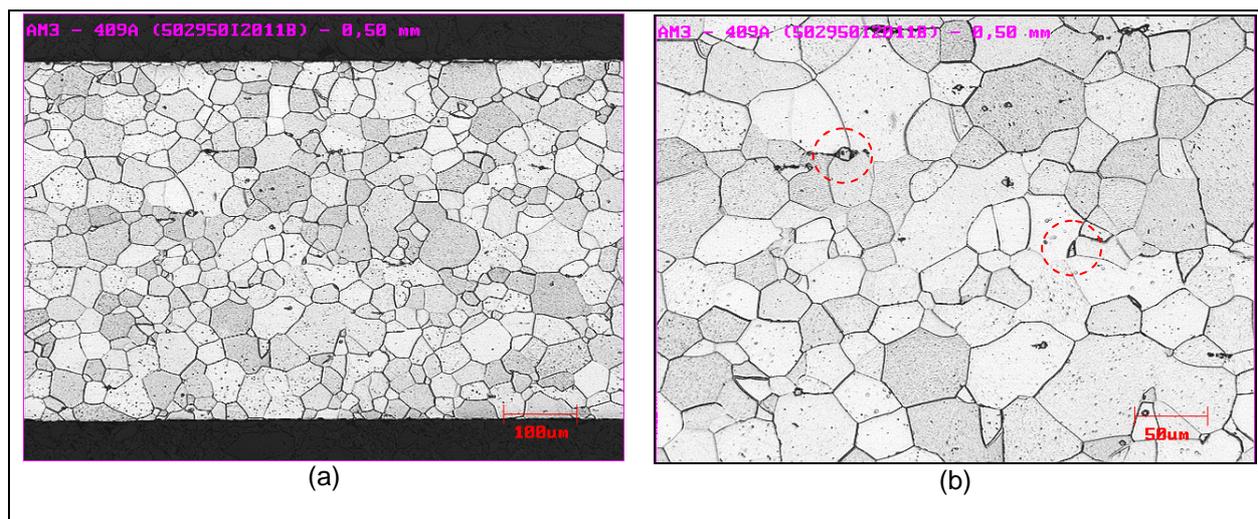


Figura 2. Aspectos típicos do aço AISI 409A: (a) da microestrutura ferrítica (ataque com Vilella); (b) dos carbonitretos de titânio (círculos em vermelho). Ampliação: 100X

2.2 Confeção dos Corpos de Prova

As chapas de aço foram fornecidas pela empresa ArcelorMittal Inox Brasil com as dimensões de 180x180 mm e espessura de 1,19 mm, sendo a amostra OA01815 referente ao aço 304A, corrida 840971F, e a amostra OA01816 referente ao aço 409A, corrida 707503L. Os corpos de prova (CP's) dos dois materiais foram confeccionados a partir das chapas fornecidas pela empresa supracitada segundo a norma ASTM E8,⁽⁹⁾ conforme ilustra a Figura 3.

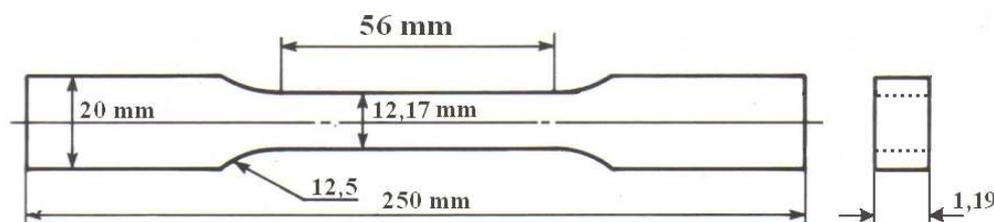


Figura 3. Dimensões do corpo de prova utilizado para ensaio de tração conforme a norma ASTM E8.⁽⁵⁾

Utilizou-se uma prensa de cisalhamento com geometrias definidas e padronizados segundo a referida norma para a confecção de todos os CP's. Conforme cita Chiaverini⁽⁷⁾ este processo de cisalhamento corresponde à obtenção de formas geométricas definidas, a partir de chapas submetidas à ação de uma ferramenta ou punção de corte aplicada por intermédio de uma prensa que, por sua vez, exerce pressão sobre a chapa metálica que fica apoiada numa matriz. Devido ao esforço de compressão se converter em esforço de cisalhamento, no instante que o punção penetra na matriz, ocorre o desprendimento brusco da peça, no formato desejado da chapa. Foram confeccionados um total de 18 CP's (Figura 4), sendo 9 para cada amostra do presente estudo, sendo 3 para cada direção, a 0° (L: direção paralela à direção de laminação), a 45° (S: direção oblíqua à direção de laminação) e a 90° (T: direção perpendicular à direção de laminação).

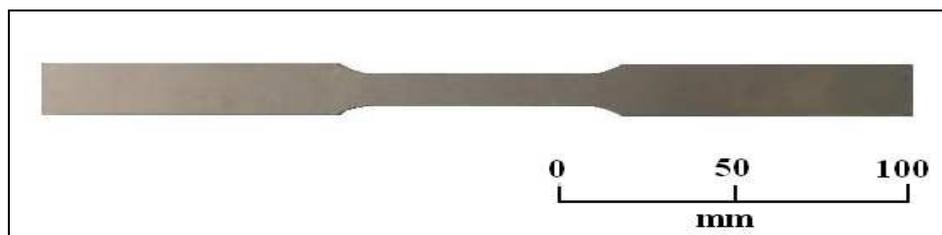


Figura 4. Corpo de prova confeccionado conforme a norma ASTM E8.

2.3 Ensaio de Tração

Foi utilizado uma máquina universal de ensaios de materiais da fabricante Instron. Entretanto, como foram utilizados CP's com pequenas dimensões no presente estudo, os mesmos foram ensaiados numa máquina do modelo 5882 da série 5880, com capacidade de 100 kN. Essa máquina utiliza sistemas de eletrônica para controle e aquisição de alto desempenho, além do *software Bluehill® 2*. Todos os ensaios foram realizados com a velocidade de 10 mm/min em temperatura ambiente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados para o Aço AISI 409A

São apresentados na Tabela 3 o limite de escoamento (L_E), o limite de resistência (L_R) e o alongamento total (Al) do aço AISI 409A determinados em ensaio de tração. Também são apresentados o valores do coeficiente de anisotropia normal (R), o valor médio do coeficiente de anisotropia (\bar{R}), o coeficiente de anisotropia planar (ΔR), o expoente de encruamento (n) e o coeficiente de resistência (K).

Tabela 3. Propriedades mecânicas do aço AISI 409A determinadas em ensaio de tração*

Direção	L_E (MPa)	L_R (MPa)	Al (%)	R	\bar{R}	ΔR	n	K (MPa)
0°(L)	232,0	382,33	42,00	1,724	-	-	0,284	296,80
45°(S)	252,33	412,66	27,23	0,964	-	-	0,282	363,89
90°(T)	231,33	386,66	42,20	2,217	-	-	0,276	293,52
Média**	241,9	398,57	34,66	1,4672	1,4672	0,958	0,281	329,52
σ^{***}	5,567	6,4998	4,723346	1,228718	-	-	0,0948	10,1535

*Os valores computados na tabela acima referem-se à média para três corpos de prova em três direções distintas (0°, 45° e 90°) com relação à direção de laminação. **Média = $(X_0 + 2X_{45} + X_{90})/4$, onde X é o valor de L_E , L_R , Al , R , n ou K . ***Desvio padrão (σ).

Os valores K e n apresentados na Tabela 3 foram calculados para cada direção de laminação (0°, 45° e 90°), através do ajuste das curvas obtidas pela equação (1) de Hollomon e Ludwik citado por Dieter.⁽¹⁰⁾

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1)$$

Analisando a Tabela 3, observa-se que a direção T (90°) é a mais recomendada para conformar este material, pois, foi a direção que apresentou um menor valor de



L_E e L_R e um maior A_I em comparação às outras direções, mesmo apresentando pouca variação na direção L (90°).

Através dos dados obtidos pelo ensaio de tração foi possível determinar o gráfico tensão x deformação de cada corpo de prova, conforme observa-se na Figura 5.

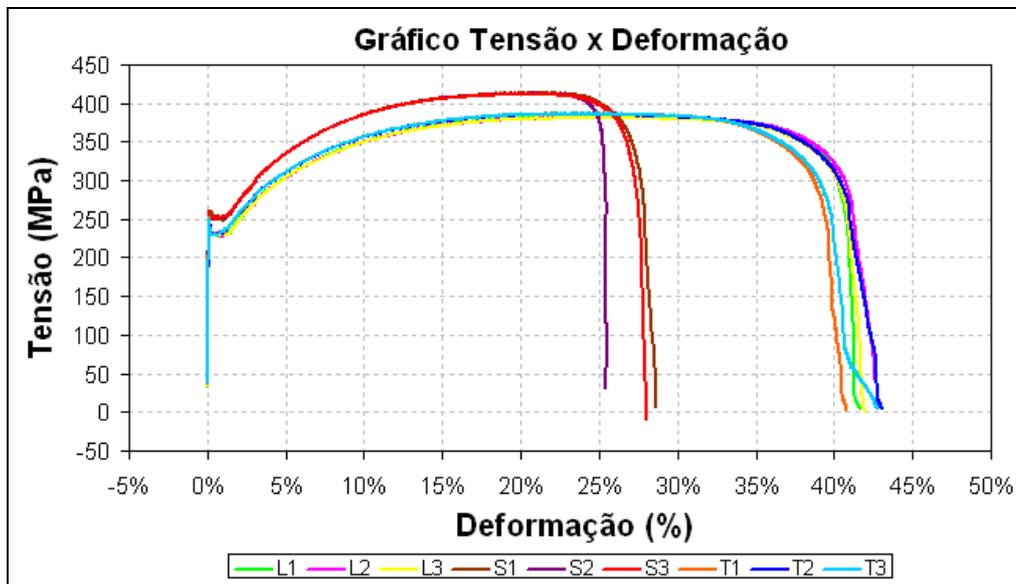


Figura 5. Gráfico tensão x deformação dos CP's ensaiados para o aço AISI 409A.

Percebe-se que o aço AISI 409A, nas direções L (0°) e T (90°) apresentou um alongamento total em torno de 40 a 45%, devido à variação das propriedades mecânicas, sendo assim possível conformar este material em quaisquer destas direções com um esforço menor.

Na direção S (45°) este alongamento total foi menor, em torno de 25 a 30%, apresentando ainda um maior limite de escoamento e resistência, ou seja, nesta direção o material se torna mais difícil de conformar, não sendo recomendado conformá-lo nesta direção.

Analisando todas as propriedades encontradas, percebe-se que este aço apresenta comportamento anisotrópico, ou seja, as propriedades mecânicas encontradas mostrou-se dependentes da direção de laminação.

Segundo Bresciani⁽¹¹⁾ e Kim⁽¹²⁾ o comportamento anisotrópico pode ser vantajoso ou desvantajoso de acordo com a aplicação desejada. Por exemplo, numa situação qualquer que seja no embutimento profundo de copos, a presença de anisotropia pode ser indesejável, pois leva à formação de "orelhas" nas bordas da peça embutida, ou por outro lado, pode ser necessária para garantir que o material apresente maior resistência na direção da espessura do que no plano da chapa, a fim de que não falhe devido à ruptura por estricção localizada.

3.2 Resultados para o Aço AISI 304A

São apresentados na tabela 4 o limite de escoamento (L_E), o limite de resistência (L_R) e o alongamento total (A_I) do aço AISI 304A determinados em ensaio de tração. Também são apresentados os valores do coeficiente de anisotropia normal (R), o valor médio do coeficiente de anisotropia (\bar{R}), o coeficiente de anisotropia planar ($\Delta\bar{R}$), o expoente de encruamento (n) e o coeficiente de resistência (K).

Tabela 4. Propriedades mecânicas do aço AISI 304A determinadas em ensaio de tração*

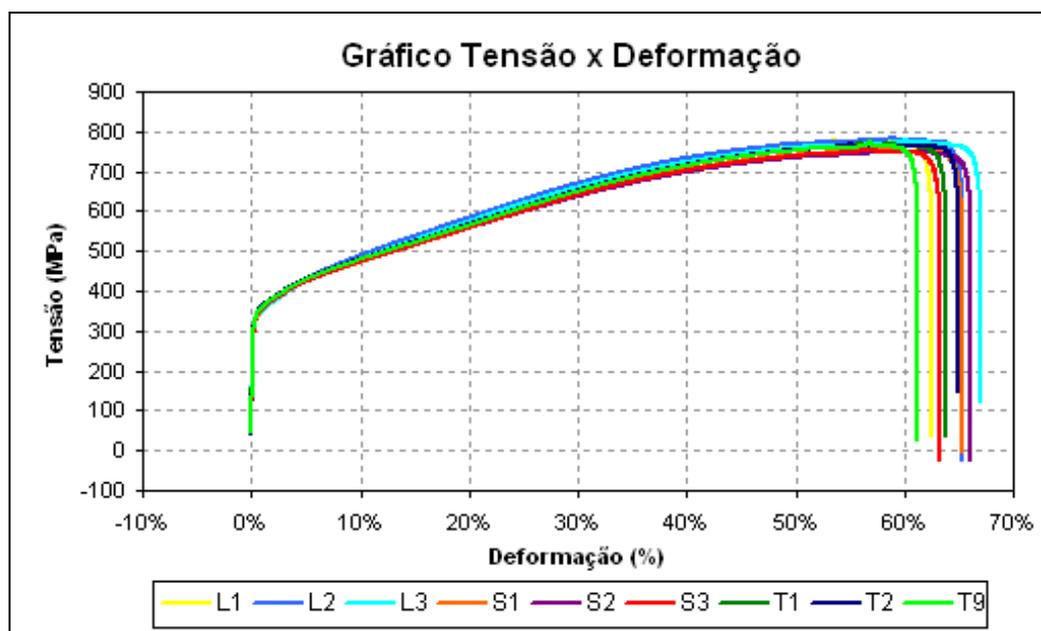
Direção	L_E (MPa)	L_R (MPa)	AI (%)	R	\bar{R}	ΔR	n	K (MPa)
0° (L)	322,33	781	64,86	0,868	-	-	0,271	362,45
45° (S)	320,0	755	64,83	1,057	-	-	0,247	356,00
90° (T)	325,33	772	63,27	0,907	-	-	0,246	364,10
Média**	321,91	765,75	64,44	0,972	0,972	-0,17	0,252	359,63
σ ***	2,3968	5,6789	1,4044	0,504232	-	-	0,1753	3,30340

*Os valores computados na tabela acima referem-se à média para três corpos de prova em três direções distintas (0°, 45° e 90°) com relação à direção de laminação. **Média = $(X_0 + 2X_{45} + X_{90})/4$, onde X é o valor de L_E , L_R , AI , R , n ou K . ***Desvio padrão (σ)

Analisando a tabela 4 observa-se que a direção S(45°) é a mais recomendada para conformar este material, mesmo apresentando pouca variação com relação à direção L(0°), pois, foi a direção que apresentou um menor L_E e L_R em relação às outras direções e um valor de AI muito próximo à direção L(0°).

Através dos dados obtidos no ensaio de tração foi possível determinar o gráfico tensão x deformação, conforme ilustra a figura 5, onde observa-se que o aço AISI 304A em todas as direções de laminação sofreu um alongamento total em torno de 60% a 70%, e que o limite de resistência (L_R) variou entre 755 MPa e 781 MPa. Ou seja, este aço possui melhor conformabilidade, pois apresenta maior alongamento total e uma maior resistência.

Analisando a Figura 5 percebe-se que o aço AISI 304A apresentou propriedades mecânicas semelhantes em todas as direções ensaiadas, ou seja, este aço apresentou comportamento próximo a de um material isotrópico, podendo então ser conformado em todas as direções obtendo-se um resultado mais uniforme e com poucas variações.


Figura 5. Gráfico tensão x deformação dos CP's ensaiados para o aço AISI 304A.



3.3 Comparação de Resultados entre os Aços AISI 304A e AISI 409A

Os valores do coeficiente de anisotropia (R) encontrados para os dois aços apontam uma considerável diferença nas características de estampabilidade. Observando-se a Figura 6, nota-se que para o aço AISI 409A o coeficiente de anisotropia mostrou-se bastante dependente da direção de laminação, entretanto, para o aço AISI 304A, o coeficiente de anisotropia apresentou pouca variação, ou seja, é um material menos anisotrópico do que o aço AISI 409A, possuindo maior uniformidade nas propriedades mecânicas, e ainda possui uma excelente ductilidade, propriedades necessárias à uma boa conformabilidade.

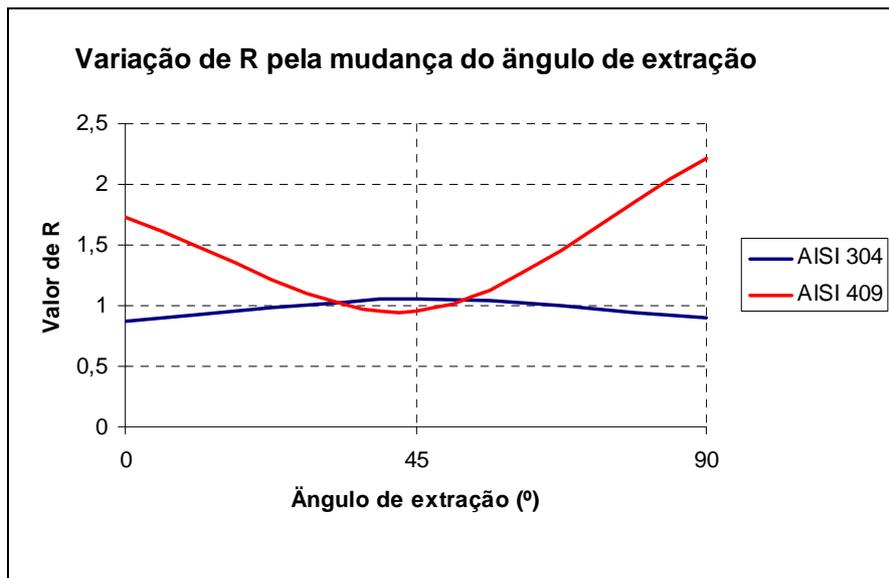


Figura 6. Gráfico da razão de deformação dos aços AISI 304A e 409A

4 CONCLUSÕES

Pode-se dizer que o aço AISI 409A, devido a uma maior variação do seu valor de R , apresenta uma maior resistência à diminuição de espessura do que o aço AISI 304A, principalmente nas direções a 0° e 90° , deformando-se mais no plano da chapa e menos na direção da espessura, o que traz uma nítida vantagem quanto à conformabilidade do material, isto se deve principalmente à formação de carbonitreto, que melhora as propriedades mecânicas, mas, de um outro lado, o aço AISI 304A possui melhor ductilidade, pois seu alongamento total é bem superior a do aço AISI 409A.

O coeficiente de encruamento (n) dos aços estudados apresentaram resultados próximos, exceto nas direções a 45° e 90° para o aço AISI 409A, que apresentou valores pouco superiores em relação ao aço AISI 304A. É importante ressaltar que quanto maior o valor de n maior o limite de instabilidade plástica, isto é, o material tem maior capacidade de diminuir a espessura sem que ocorra a instabilidade plástica, que se traduz no aumento da altura da peça conformada sem ocasionar fratura.

REFERÊNCIAS

- 1 HELMAN, H., CETLIN, P.R. **Fundamentos de Conformação Mecânica dos Metais**. Ed. Guanabara Dois S.A., RJ, 1983.
- 2 KEELER, S.P. **Sheet Metal Industries**, v 42 n°461, p. 683-691. 1965
- 3 GOODWIN, G. M. Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop. **La Metallurgia Italiana**, v 60, p. 767-774. 1968.
- 4 KEELER, S.P. **Circular Grid System - A Valuable Aid for Evaluating Sheet Metal Formability**. Sheet Metal Industries, 45. 1968
- 5 SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. 5ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1982. 304 p.
- 6 HOSFORD, W. F. and DUNCAN, J.L. **Sheet Metal Forming: A Review**. JOM, nov. 1999, 39p.
- 7 CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas**. 2ed, Vol. I, Makron Books. São Paulo, 1986.
- 8 PADILHA, A.F.; GUEDES, L.C. **Aços Inoxidáveis Austeníticos**, Hemus Editora Limitada, São Paulo, 170 p., 1994.
- 9 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM E8 - Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials**, 1998.
- 10 DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2ª edição, Rio de Janeiro. Guanabara Koogan S.A. 1981
- 11 BRESCIANI, E. **Conformação Plástica dos Metais**. Ed. da Unicamp, 4ª ed., São Paulo-SP, 1991.
- 12 KIM, Y. S.; SON, H. S., YANG, S. H. and LEE, S. R. **Prediction of Forming Limits for Voided Anisotropic Sheets Using Strain Gradient Dependent Yield Criterion**. Key Engineering Materials, vols. 233-236, p. 395-400. 2003.