

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ESTUDO DO EFEITO DAS CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO MECÂNICO NA TRANSFORMAÇÃO DE FASES DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304

Etienne Pereira de Andrade, andrade.etiene@hotmail.com¹

Elaine Carballo Siqueira Corrêa, elaine@deii.cefetmg.br¹

Maria Teresa Paulino Aguilar, teresa@ufmg.br²

Carolina Martins Abreu, abreu.carolinabr@gmail.com³

Wellington Lopes, wellingtonlopes@deii.cefetmg.br¹

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, Campus I, Belo Horizonte, Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, 30421-169, Belo Horizonte – MG, Brasil.

² Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção Civil, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, 31270-901 - Belo Horizonte, MG – Brasil

³ Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação - LRSS, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, 31270-901 - Belo Horizonte, MG – Brasil

Resumo: O intuito principal deste trabalho foi verificar os efeitos dos parâmetros de processamento mecânico (modo e quantidade de deformação), na transformação de fases e nas propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico AISI 304. Com relação aos ensaios, esses foram definidos de forma a simular os esforços mecânicos presentes em operações reais de conformação mecânica. Nesse caso, foram confeccionados corpos de prova de tração e de cisalhamento, os quais foram submetidos a diferentes rotas de processamento, monotônicas e combinadas: tração uniaxial; cisalhamento planar simples; tração combinada a cisalhamento; calandragem combinada a cisalhamento; calandragem combinada à tração e calandragem combinada à tração e cisalhamento. A quantidade de martensita formada durante as rotas de processamento mecânico foi avaliada a partir da técnica de difração de raios X (DRX). Os resultados indicaram que a transformação de fases do aço AISI 304 depende da quantidade e do modo de deformação, sendo que a cinética de transformação de fases percebida foi austenita (γ) $\rightarrow$ martensita ϵ $\rightarrow$ martensita α' , podendo haver um valor limite de deformação na qual esse fenômeno pode ser restringido.

Palavras-chave: Aço inoxidável austenítico; martensita; transformação de fases; deformação; encruamento.

1. INTRODUÇÃO

Para compreensão dos fenômenos que ocorrem durante a conformação pode-se fazer uso de ensaios destrutivos, como o de tração uniaxial e de cisalhamento. Busca-se simular, sob diferentes parâmetros, os esforços a que são submetidos os materiais conformados (Dieter, 1981; Reed-Hill, 1982). Para avaliar as modificações microestruturais, pode-se recorrer a técnicas de caracterização microestrutural, tais como: DRX (para avaliar a quantidade das fases induzidas por deformação) e microscopia óptica e de varredura por feixe de elétrons (para avaliar o material quanto à sua microestrutura - “homogeneidade”, fases presentes, grãos). Nesse contexto, materiais que experimentam transformação de fases por deformação plástica, como os aços inoxidáveis austeníticos, ganham destaque.

Este trabalho teve por objetivo avaliar a transformação de fases induzida por deformação plástica no aço inoxidável austenítico AISI 304, sob diferentes modos e quantidades de deformação. Fez-se uso de carregamentos monotônicos e combinados e de diferentes rotas de processamento. A fração volumétrica de martensita (ϵ e α') foi quantificada por meio da técnica de DRX e correlacionada aos aspectos mecânicos macroscópicos (curvas tensão-deformação efetivas).

2. MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizadas chapas de aço inoxidável austenítico AISI 304, no estado como recebido (laminado a frio) cuja composição química (% em peso) foi de 0,035C, 1,025Mn, 0,356Si, 0,038P, 0,001S, 18,090Cr, 8,038Ni e 0,038Mo.

Para o estudo da influência das condições de solicitação mecânica na transformação de fases do aço AISI 304 foram utilizadas as seguintes rotas de processamento mecânico: tração uniaxial; cisalhamento planar simples; calandragem combinada a cisalhamento; calandragem combinada à tração uniaxial; tração uniaxial combinada a cisalhamento e, por fim, calandragem combinada a tração uniaxial e cisalhamento com deformação efetiva variando de 5% a 40%.

2.1. Calandragem

A calandragem das chapas do aço AISI 304 foi feita em uma calandra mecânica Imag, com a utilização de cilindros de trabalho com diâmetro de 120mm. O material foi calandrado em ambas as faces, lubrificadas com uso de óleo lubrificante. Com base no “gap” inicial dos cilindros, dado como “zero” da calandra, para efeitos de calibração, as amostras passaram por quatro passes de calandra (sendo dois passes em cada face).

2.2. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração uniaxial foram conduzidos numa máquina universal de ensaios universais Instron® 5582 com extensômetro mecânico do tipo agulhas e sistema de aquisição de dados *Blue Hill 2*. Nesse ensaio foram usados corpos de prova com seção transversal retangular de acordo com a norma ASTM E8. A taxa de deformação inicial praticada nos ensaios foi de $0,001s^{-1}$. Os testes foram feitos também em amostras pré-deformadas na calandra para execução das rotas combinadas tração/cisalhamento e calandragem/tração/cisalhamento.

2.3. Ensaio de Cisalhamento

O ensaio de cisalhamento foi feito a partir da adaptação à máquina universal de ensaios Instron® 5582 de um dispositivo para a realização dessa técnica. Os corpos de prova possuíam a dimensão de 50mm x 15mm x 0,60mm (comprimento x largura x espessura), à exceção daqueles submetidos a processamento mecânico prévio (calandragem e tração, por exemplo), cuja dimensão variou em função da quantidade de deformação. A conversão de tensão e deformação cisalhante em tensão e deformação efetiva ou equivalente foi feita de acordo com o critério de Tresca (Dieter, 1981; Cetlin, Helman, 2005; Lopes, 2009).

2.4. Difração de Raios X (DRX)

Após a realização dos ensaios mecânicos, as amostras utilizadas foram decapadas em ácido clorídrico 37% P.A. – A.C.S (1190g) Synth®, por um tempo de 40 minutos (20 minutos por face), para que então fossem levadas para execução do ensaio de difração de raios-X (DRX) em um difratômetro Shimadzu® XRD – 7000 com alvo metálico de cobre, ângulo de varredura de 10° a 110° C, passo de $0,02s^{-1}$ e velocidade de $2^{\circ}/min$. Para a condução desse experimento não foi feita nenhuma operação de lixamento e/ou acabamento, com intuito de minimizar, como apontado por Zandrahimi (2011), o efeito de qualquer agente externo que pudesse contribuir para formação de martensita.

A Figura 1 apresenta os principais equipamentos utilizados para desenvolvimentos dos testes citados nesta seção.

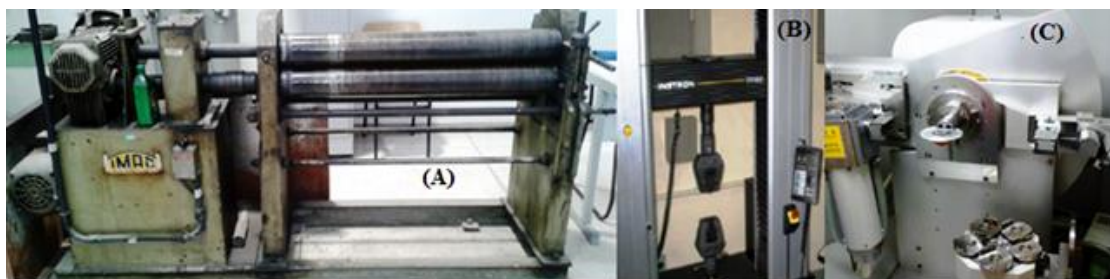


Figura 1. Principais equipamentos utilizados. (A) Calandra Imag, (B) máquina de ensaios universal Instron® 5582, (C) difratômetro Shimadzu® XRD – 7000.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização Mecânica Do Material Como Recebido

A caracterização mecânica do aço AISI 304 no estado como recebido exibiu os valores de tensão limite de escoamento (LE), tensão limite de resistência à tração (LRT) e alongamento uniforme (AU) iguais a $(240,00 \pm 5)$ MPa, $(668,65 \pm 5)$ MPa e 49,73%, respectivamente.

3.2. Caracterização Do Material Como Recebido

A Tabela 1 apresenta os resultados da análise semi quantitativa para quantificação de cada fase presente no material no estado como recebido. Confirmou-se a presença de microestrutura predominantemente austenítica. A leve presença de martensita é um indicador de histórico de processamento anterior (laminação para fabricação), de ruídos no ensaio, ou ainda, de tempo de decapagem insuficiente (Rocha, 2006).

Tabela 1. Análise semi quantitativa amostra AISI 304 como recebido

Percentual aproximado das fases	
Austenita (γ)	95,627%
Martensita α'	3,440%
Martensita ϵ	0,933%

3.3. Caracterização do material após diferentes rotas de processamento

As amostras deformadas em tração uniaxial foram submetidas a deformações efetivas de 5%, 15%, 30% e 40%. A Figura 2 apresenta os difratogramas correspondentes às amostras tracionadas uniaxialmente em rota monotônica.

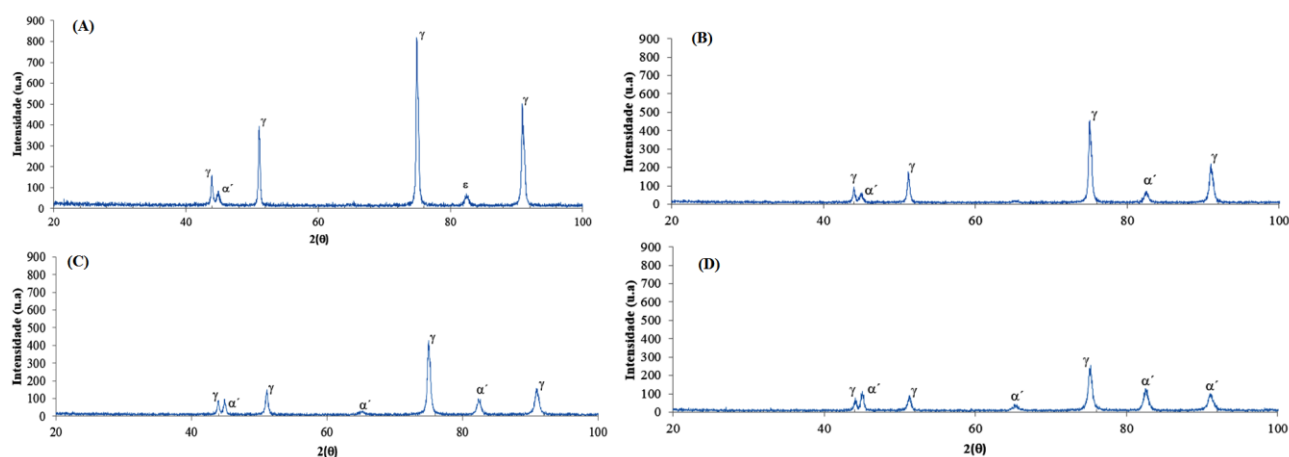


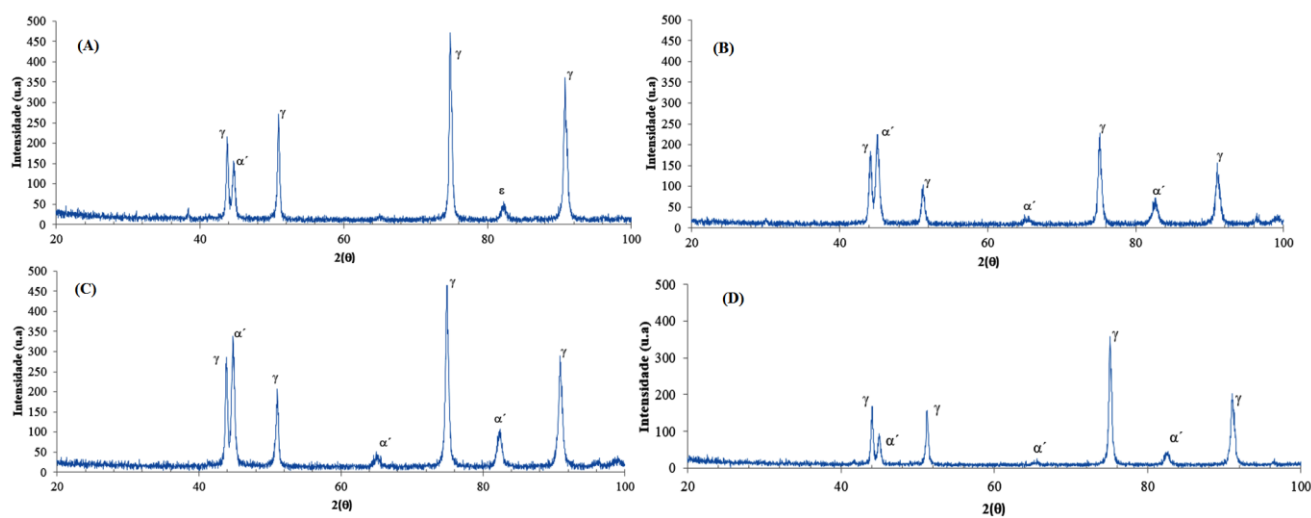
Figura 2. Difratogramas das amostras tracionadas uniaxialmente em rota monotônica sujeitas a deformações efetivas da ordem de 5% (A), 15% (B), 30% (C) e 40% (D)

Para valores de deformação efetiva da ordem de até 5% percebeu-se, como apresentado por Padilha; Guedes (1994), que há formação de martensita α' , mas tem-se destaque para a martensita ϵ . Para a amostra deformada em 15%, como apontado por Raman; Padmanabhan (1994), percebeu-se que com o aumento da deformação há a tendência de formação única de martensita α' . Estimava-se que o percentual de martensita formado, nas condições de realização do ensaio, fosse em torno de 10% (Padilha, Guedes, 1994). Quanto à amostra deformada em 30%, notou-se que com aumento da deformação imposta ao material, houve aumento do teor de martensita α . Esse fenômeno foi observado também por Corrêa et al., (2007). Essa relação, entretanto, não é linear. Para deformação efetiva de 40% percebeu-se que os picos característicos de martensita eram mais pronunciados. Ainda segundo Padilha, Guedes (1994), para essa condição esperava-se uma fração volumétrica dessa fase superior a 25%. A Tabela 2 apresenta os resultados da análise semi quantitativa para determinação do teor de cada fase presente nas amostras tracionadas, referentes aos difratogramas apresentados na Fig.7.

Tabela 2. Análise semi quantitativa das amostras de aço AISI 304 tracionadas uniaxialmente em rota monotônica, submetidas a diferentes valores de deformação efetiva

Amostras tracionadas uniaxialmente em rota monotônica					
Deformação efetiva	Percentual de fases presentes		Deformação efetiva	Percentual de fases presentes	
5%	Austenita (γ)	91,730%	30%	Austenita (γ)	80,732%
	Martensita ϵ	4,172%		Martensita ϵ	-
	Martensita α'	4,098%		Martensita α'	19,268%
15%	Austenita (γ)	87,267%	40%	Austenita (γ)	65,757%
	Martensita ϵ	-		Martensita ϵ	-
	Martensita α'	12,733%		Martensita α'	34,243%

As amostras deformadas em cisalhamento monotônico foram submetidas a deformações efetivas de 5%, 15%, 30% e 40%. A Figura 3 apresenta os difratogramas correspondentes às amostras cisalhadas monotonicamente.

**Figura 3. Difratogramas das amostras cisalhadas em rota monotônica sujeitas a deformações efetivas da ordem de 5% (A), 15% (B), 30% (C) e 40% (D)**

Verificou-se que, de maneira geral, seja o material deformado em tração ou em cisalhamento, quanto maior a quantidade de deformação, maior a fração volumétrica de martensita formada, tendo apenas a amostra cisalhada em 40% desviado desse comportamento, segundo o difratograma. Isso se deve provavelmente porque, devido ao alongamento do corpo de prova a região de estudo ficou muito reduzida em relação ao restante, sendo difícil a focalização específica da região cisalhada, por parte do equipamento de DRX.

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise semi quantitativa para determinação do teor de cada fase presente nas amostras cisalhadas, referentes aos difratogramas apresentados na Fig.3.

Tabela 3. Análise semi quantitativa das amostras de aço AISI 304 cisalhadas em rota monotônica, submetidas a diferentes valores de deformação efetiva

Amostras cisalhadas em rota monotônica					
Deformação efetiva	Percentual de fases presentes		Deformação efetiva	Percentual de fases presentes	
5%	Austenita (γ)	86,351%	30%	Austenita (γ)	69,897%
	Martensita ϵ	3,591%		Martensita ϵ	-
	Martensita α'	10,057%		Martensita α'	30,103%
15%	Austenita (γ)	66,085%	40%	Austenita (γ)	88,453%
	Martensita ϵ	-		Martensita ϵ	-
	Martensita α'	33,915%		Martensita α'	11,547%

Para deformação efetiva da ordem de 5% percebeu-se que ainda houve formação de martensita ϵ e que a quantidade de martensita α' formada foi consideravelmente superior em relação ao corpo de prova tracionado sob a mesma quantidade de deformação. Isso comprova o que é apontado por Jinlong, Hongyun (2014), os quais tratam da cinética de transformação de fases e da influência de diversos parâmetros nesse fenômeno, ressaltando o efeito do modo de deformação. Para deformação efetiva de 15% esperava-se incremento na fração volumétrica de martensita formada, o

que foi realmente constatado. Mas, a quantidade encontrada foi muito superior à expectativa, o que novamente confirma o proposto por Jinlong, Hongyun (2014). Para o corpo de prova cisalhado em 30% (deformação efetiva), constatou-se que provavelmente à medida que se chega a um valor limite de deformação, a transformação de fases acaba sendo limitada.

Observou-se que a quantidade de martensita formada é bem próxima à da amostra cisalhada em 15% (deformação efetiva). Quanto ao corpo de prova cuja deformação efetiva foi de 40%, notou-se uma transformação de fases menos intensificada. Não se sabe ao certo o que de fato ocorreu, uma vez que segundo Padilha; Guedes (1994), era de se esperar que o volume de martensita α' fosse maior. Os ensaios foram realizados em duplicata, tendo ambos apresentado resultado similar. Assim, pode-se atribuir o ocorrido tanto à cinética de transformação de fases quanto a limitações de equipamento e falhas no ensaio, sendo essa causa a mais provável.

A Figura 4 apresenta o gráfico comparativo entre as frações volumétricas de martensita formadas em função das deformações efetivas em tração uniaxial e em cisalhamento planar simples.

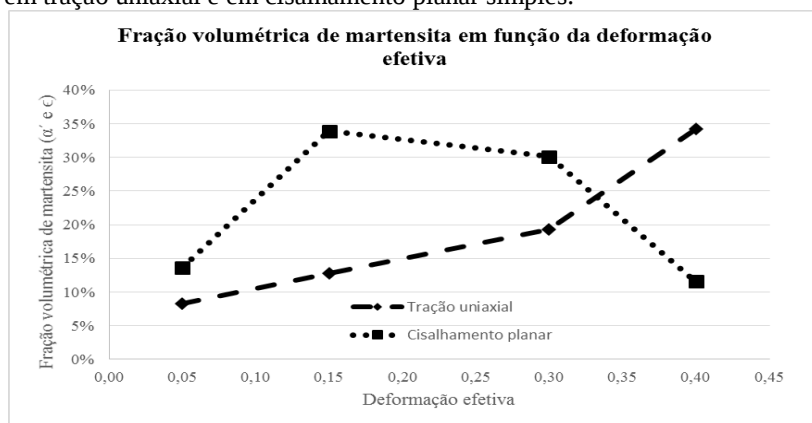


Figura 4. Gráfico comparativo entre as frações volumétricas de martensita (α' e ϵ) em função da deformação efetiva em tração uniaxial e em cisalhamento planar simples

O comportamento apresentado é típico do material, sendo exposto por Raman; Padmanabhan (1994), Padilha; Guedes (1994) e Tavares et al (2003), valendo ressaltar que esse último defende uma cinética de transformação de fases inversa à apresentada no presente estudo, sendo o constatado defendido também por Fang; Dahl (1991). Outra influência a ser considerada e que interfere na quantidade e no tipo de martensita formada é o modo de deformação, como apresentado por Bayerlein; Christ; Mughrabi (1988), o que foi confirmado mediante a diferença entre as curvas de fração volumétrica de martensita para os corpos de prova tracionados e cisalhados.

A deformação em calandragem foi mensurada em função da redução de espessura dos corpos de prova. O valor encontrado foi de 18% de deformação efetiva. Os corpos calandrados foram submetidos a diferentes deformações efetivas em cisalhamento (10%, 15% e 40%) e à uma deformação efetiva de 18% em tração uniaxial. A Figura 5 apresenta os difratogramas referentes a tais amostras.

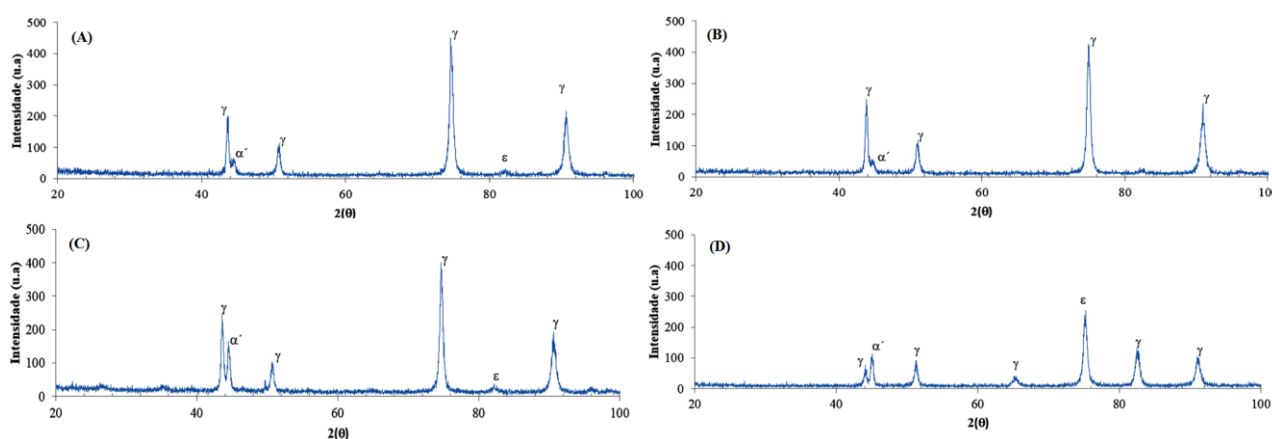


Figura 5. Difratogramas das amostras calandradas sujeitas a deformações efetivas da ordem de 10% em cisalhamento (A), 15% em cisalhamento (B), 40% em cisalhamento (C) e 18% em tração uniaxial (D)

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise semi quantitativa para determinação do teor de cada fase presente nas amostras deformadas, referentes aos difratogramas apresentados na Fig.5.

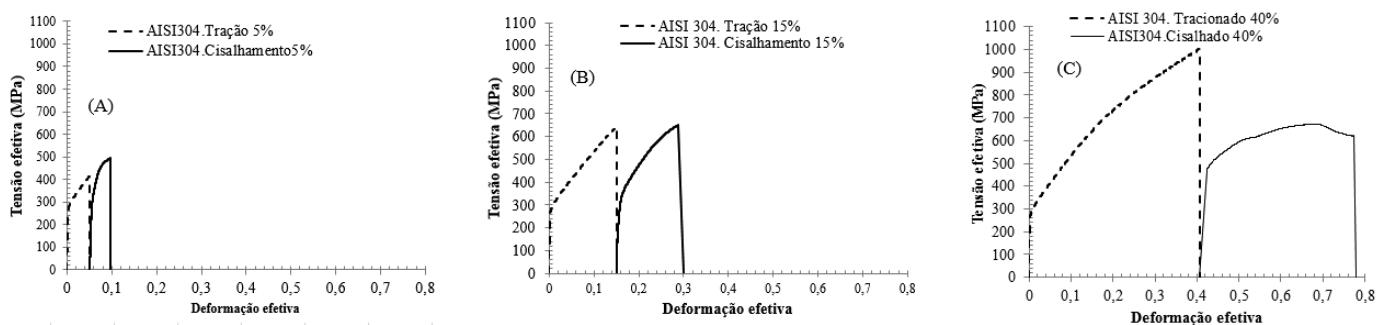
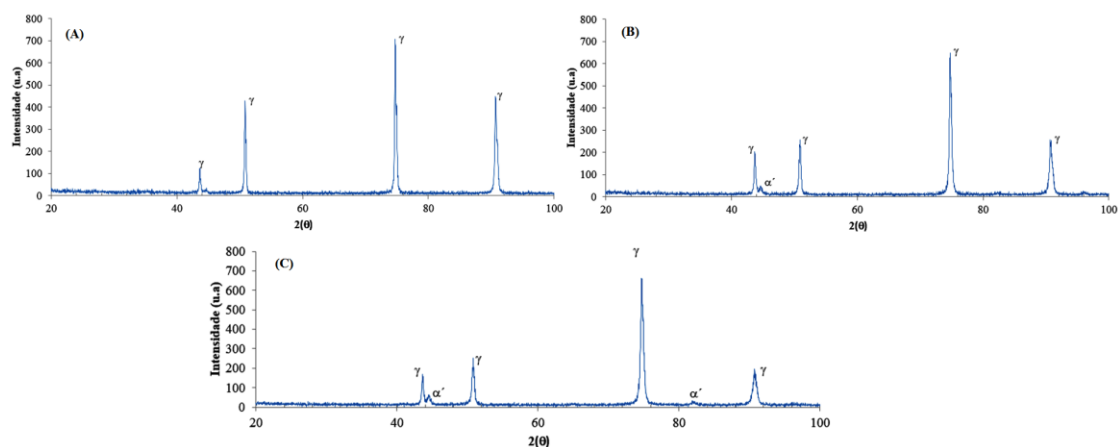
Tabela 4. Análise semi quantitativa das amostras de aço AISI 304 submetidas a diferentes rotas de processamento

Amostras previamente calandradas					
Deformação efetiva	Percentual de fases presentes		Deformação efetiva	Percentual de fases presentes	
18% em calandragem e 10% em cisalhamento planar simples	Austenita (γ)	94,871%	18% em calandragem e 40% em cisalhamento planar simples	Austenita (γ)	80,732%
	Martensita ε	1,086%		Martensita ε	-
	Martensita α´	4,043%		Martensita α´	19,268%
18% em calandragem e 15% em cisalhamento planar simples	Austenita (γ)	81,702%	18% em calandragem e 18% em tração uniaxial	Austenita (γ)	90,885%
	Martensita ε	1,183%		Martensita ε	-
	Martensita α´	17,115%		Martensita α´	9,115%

Para amostra cisalhada em 10% (deformação efetiva) notou-se que, mesmo o material tendo um histórico de deformação, por calandragem, da ordem de 18%, houve formação de martensita ϵ , confirmando a dependência desse fenômeno com o modo de deformação. Sendo a deformação efetiva total equivalente a cerca de 30%, esperava-se uma fração volumétrica de martensita superior a 15%. O teor de martensita encontrado foi inferior a 6%, indicando a necessidade de uma quantidade mínima de deformação para ocorrer a transformação de fase. Para a amostra cisalhada de 15% efetiva, embora não haja mais martensita ϵ , não houve presença pronunciada de martensita α' , conforme expectativa.

Para a amostra cisalhada de 40% constatou-se presença de martensita ϵ , porém bem discreta. Os picos de martensita α' mostraram-se mais pronunciados, porém esperava-se uma fração maior de martensita induzida por deformação, à medida que os corpos de prova fossem mais deformados. Já para a amostra tracionada de 18% o volume de martensita α' encontrado foi relativamente reduzido para quantidade de deformação imposta ao material, o que também foi característico da amostra.

A Figura 6 apresenta os gráficos de tensão efetiva por deformação efetiva referentes às amostras tracionadas e calandradas, enquanto a Figura 7 apresenta os difratogramas referentes a tais amostras.

**Figura 6. Gráfico Tensão efetiva (MPa) x Deformação efetiva para as amostras (A), tracionada 5% e cisalhada 5% (B), tracionada 15% e cisalhada 15% (C) e tracionada 40% e cisalhada 40%****Figura 7. Difratograma das amostras (A), tracionada 5% e cisalhada 5% (B), tracionada 15% e cisalhada 15% (C) e tracionada 40% e cisalhada 40%**

A Tabela 5 apresenta os resultados da análise semi quantitativa para determinação do teor de cada fase presente nas amostras deformadas, referentes aos difratogramas apresentados na Fig.13.

Tabela 5. Análise semi quantitativa das amostras de aço AISI 304 tracionadas e cisalhadas

Amostras tracionadas e cisalhadas					
Deformação efetiva	Percentual de fases presentes		Deformação efetiva	Percentual de fases presentes	
5% em tração uniaxial e 5% em cisalhamento planar simples	Austenita (γ)	100,000%	40% em tração uniaxial e 50% em cisalhamento planar simples	Austenita (γ)	82,885%
	Martensita ϵ	-		Martensita ϵ	-
	Martensita α'	-		Martensita α'	17,115%
15% em tração uniaxial e 15% em cisalhamento planar simples	Austenita (γ)	97,586%			
	Martensita ϵ	-			
	Martensita α'	2,414%			

Constatou-se, para o valor de deformação prévia de 5%, considerado baixo (LOPES, 2009), que o material apresenta endurecimento, conforme comprova a curva subsequente de cisalhamento. Fica claro que, para esse caso, o ensaio de DRX é inconclusivo, pois Padilha; Guedes (1994) aponta, que mesmo para valores de deformação efetiva inferiores a 5%, há formação de martensita, a qual não foi constatada nas amostras ensaiadas. Esperava-se, para os corpos de prova que foram tracionados e cisalhados 15% (deformações efetivas), um endurecimento mais pronunciado, devido à maior pré-deformação.

Ocorre, porém que o material exibiu comportamento inverso, apresentando leve amaciamento. Soma-se a isso também o fator da baixa fração de martensita formada, a qual não atingiu nem 3%, mesmo a deformação efetiva acumulada chegando a 30%. Isso pode ter ocorrido devido à rota imposta ou, ainda, devido às restrições do equipamento de cisalhamento.

Para o material, que já se encontrava deformado em 30% em tração, esperava-se encruamento acentuado, levando a considerável endurecimento, o qual seria constatado no ensaio de cisalhamento. Porém, conforme gráfico acima, notou-se grande amaciamento do material, o qual teve uma tensão efetiva em tração da ordem de 980 MPa, enquanto que em cisalhamento esse valor, para a mesma quantidade de deformação, não passou de 680 MPa. Novamente, a fração volumétrica de martensita é contraditória, como apresentado no difratograma da Figura 8, não passando de 6%.

A Figura 8 apresenta o gráfico tensão efetiva (MPa) X deformação efetiva para a amostra calandrada em 18%, tracionada em 18% e cisalhada em 10% (deformações efetivas). A Figura 9 apresenta o difratograma referente a tal amostra.

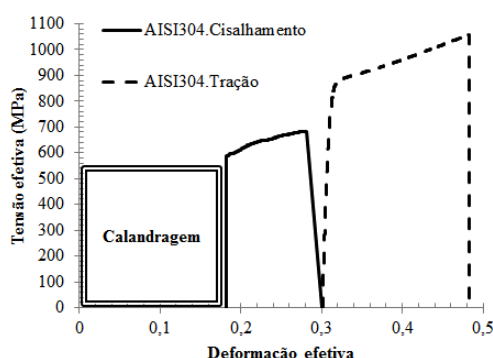


Figura8. Gráfico tensão efetiva (MPa) X deformação efetiva para a amostra pré-calandrada 18%, tracionado 18% e cisalhado 10% (deformações efetivas)

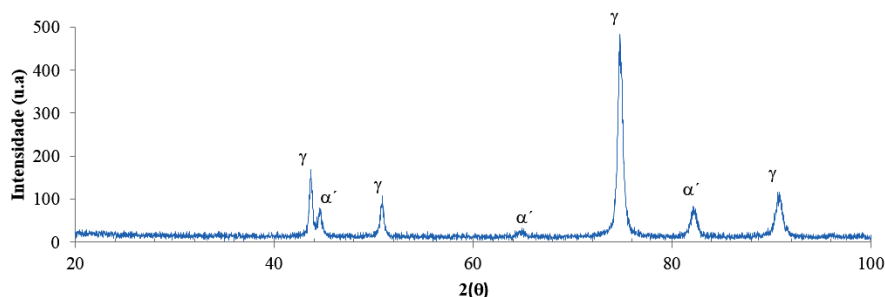


Figura9. Difratograma para a amostra pré-calandrada 18%, tracionado 18% e cisalhado 10% (deformações efetivas)

A Tabela 6 apresenta os resultados da análise semi quantitativa para determinação do teor de cada fase presente nas amostras tracionadas, referentes aos difratogramas apresentados na Fig.9.

Tabela 6. Análise semi quantitativa das amostras de aço AISI 304 calandradas, tracionadas e cisalhadas

Amostra calandrada, tracionada e cisalhada		
Deformação efetiva	Percentual de fases presentes	
18% em calandragem, 18% em tração uniaxial e 10% em cisalhamento planar simples	Austenita (γ)	84,404%
	Martensita ϵ	-
	Martensita α'	15,596%

Verificou-se que a curva relativa ao ensaio de cisalhamento, realizado posteriormente à tração uniaxial, encontra-se abaixo da curva relativa a esse ensaio. Notou-se novamente o fenômeno de amaciamento, ainda que o material tenha sido calandrado. Isso se deve provavelmente aos valores de deformação impostos aos materiais e à rota, a qual visou simular a complexidade dos esforços aos quais o material é submetido num processo de conformação como a laminação, por exemplo. A fração volumétrica de martensita gerada por deformação manteve-se próxima de 15%, o que pode estar relacionado à cinética e ao modo de deformação formulados por Tavares et al (2003).

4. CONCLUSÕES

Por meio do presente estudo pôde-se concluir que:

- I. O fenômeno de transformação martensítica induzida por deformação de fato ocorreu nas amostras avaliadas, ainda que o valor de deformação fosse baixo (inferior a 6%);
- II. A cinética de transformação martensítica percebida pode ser dada pela seguinte sequência: Austenita (γ) $\rightarrow$ Martensita $\epsilon \rightarrow$ Martensita α' , o que pôde ser comprovado com a realização dos ensaios de DRX;
- III. O endurecimento do material por encruamento, a partir de deformações prévias foi percebido para valores de deformação efetiva da ordem de até 6%, o que pode ser percebido por meio dos gráficos de tensão efetiva X deformação efetiva apresentados, nos quais para valores de deformação superiores a 5%, com processamento subsequente, nota-se “amaciamento” do material, o que pode abrir precedente para estudos posteriores;
- IV. Para as condições nas quais o material foi trabalhado, com o encruamento prévio gerado pela laminação, verificou-se que o melhor critério de escoamento para conversão de tensão cisalhante em tensão efetiva foi o de Tresca, cujo coeficiente é 2,0;
- V. Alguns ensaios de DRX mostraram-se ineficientes, o que foi constatado pelo ruído e pela presença pouco pronunciada de picos relativos às fases em estudo e também pela divergência nos casos nos quais houve rota combinada de processamento. Isso ocorreu provavelmente devido às dimensões das amostras, às limitações do equipamento ou mesmo devido ao método de decapagem realizado;
- VI. O número de variáveis envolvidas no processo de conformação, bem como a complexidade das mesmas, torna difícil a análise e simulação precisa dos esforços e do modo de deformação aos quais o material está submetido. No estudo realizado as limitações dos equipamentos utilizados e as dimensões reduzidas de algumas amostras dificultaram a análise mais acurada.
- VII. Ainda que os ensaios de DRX não tenham sido muito claros, pode-se afirmar que, para um mesmo modo de deformação, o aumento da quantidade de deformação acarreta aumento da fração volumétrica de martensita, no aço inoxidável AISI 304, podendo haver um valor limite ou exceções, quando o modo de deformação predominante é o cisalhamento planar.

5. REFERÊNCIAS

- Antunes, Augusto Eduardo Baptista; Antunes, Lidia Mikiko Doi. “Comportamento plástico do aço inoxidável austenítico em baixas temperaturas”. Revista da Escola de Minas, Ouro Preto, p. 141-147. v.60, n.1 jan-mar. 2007.
- Bayerlein, M.; Christ, H. J.; Mughrabi, H.. “Plasticity-induced martensite transformation during cyclic deformation of AISI 304L stainless steel”. Materials Science And Engineering A, Erlangen, v. 114, n., p.L11-L16, 15 jul. 1989.
- Corrêa, Elaine Carballo Siqueira; Aguilar, Maria Teresa Paulino; Cetlin, Paulo Roberto. “The influence of cyclic straining on the work hardening behavior of AISI 304 stainless steel bars in multiple-pass drawing”. Materials Chemistry And Physics. [s.l.], p. 95-101. 15 nov. 2007
- Cetlin, Paulo Roberto; Helman, Horacio. “Fundamentos da conformação: Mecânica dos metais”. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2005. 265 p.

- Dieter, George E.. “Metalurgia Mecânica”. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 660 p.
- Fang, X. F.; Dahl, W.. “Strain hardening and transformation mechanism of deformation-induced martensite transformation in metastable austenitic stainless steels”. *Materials Science And Engineering*, Aquisgrano, v. 141, n. 2, p.189-198, 07 ago. 1991.
- Jinlong, Ly; Hongyun, Luo. “Effects of strain and strain-induced α' -martensite on passive films in AISI 304 austenitic stainless steel”. *Materials Science And Engineering C*. Beijing, p. 484-490. jan. 2014.
- Lopes, W. “Estudo do encruamento dos aços AISI 304 e AISI 409 com uso da técnica de cisalhamento planar simples”. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. 186p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- Milad, M. et al. The effect of cold work on structure and properties of AISI 304 stainless steel. *Journal Of Materials Processing Technology*, Tripoli, p. 80-85. 18 jul. 2008.
- Padilha, A. F.; Guedes, L. C.. “Aços inoxidáveis austeníticos: Microestrutura e propriedades”. São Paulo: Hemus, 1994. 170 p.
- Raman, S. Ganesh Sundara; PADMANABHAN, K. A.. “Tensile deformation-induced martensitic transformation in AISI 304LN austenitic stainless steel”. *Journal Of Materials Science Letters*, Madras, p. 289-392. 01 mar. 1994.
- Reed-Hill, Robert E.. *Princípios de Metalurgia Física*. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 776 p.
- Rocha, M. R., 2006, “Estudo da conformabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos 304N e 304H e suas correlações com as microestruturas obtidas”, Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Tavares, S. S. M. et al. “Phase transformation induced by severe plastic deformation in the AISI 304L stainless steel”. *Materials Science And Engineering A*, Niterói, v. 258, n. 1-2, p.32-36, 15 out. 2003.
- Zandrahimi, Morteza et al. “The formation of martensite during wear of AISI 304 stainless steel”. *Wear*. Kerman, v. 9-10, n. 263, p. 674-678. abr. 2011.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

STUDY OF EFFECT OF MECHANICAL PROCESSING CONDITIONS ON THE PHASE TRANSFORMATION OF THE AISI 304

Etienne Pereira de Andrade, andrade.etiene@hotmail.com¹

Elaine Carballo Siqueira Corrêa, elaine@deii.cefetmg.br¹

Wellington Lopes, wellingtonlopes@deii.cefetmg.br¹

Maria Teresa Paulino Aguilar, teresa@ufmg.br²

Carolina Martins Abreu, abreu.carolinabr@gmail.com³

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, Campus I, Belo Horizonte, Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, 30421-169, Belo Horizonte – MG, Brasil.

² Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção Civil. Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, 31270-901 - Belo Horizonte, MG – Brasil

³ Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação - LRSS. Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, 31270-901 - Belo Horizonte, MG – Brasil

Abstract. *The main purpose of this study was to determine the effects of mechanical processing parameters (mode and amount of deformation), on the phase transformation and mechanical properties of AISI 304 austenitic stainless steel. The tests were defined to simulate the main mechanical stresses in the actual forming processes, such as the rolling. The mechanical tests used in this work were tensile and shearing in monotonic and combined routes: uniaxial tension; simple planar shearing and shearing/tensile, shearing/calendering; calendaring/tensile and calendaring combined with tensile and shearing tests. The volume fraction of the martensite formed during the mechanical routes was identified by the technique of X-ray diffraction (XRD). The results indicated that the amount and the mode of the deformation influence the martensitic transformation of the AISI 304 steel during the monotonic or combined routes of mechanical processing. Additionally, the transformation kinetics of AISI 304 was noticed austenite (γ) $\rightarrow$ martensite ϵ $\rightarrow$ martensite α' , and may be a strain limit value at which this phenomenon may be restricted.*

Keywords: *austenitic stainless steel; martensite; phase transformation; deformation; hardening*