

7. Resultados Experimentais

7.1. Introdução

Após implementação e avaliação das técnicas de controle de força e torque, elas foram utilizadas no controle da força e do torque de acordo com as trajetórias desejadas pelos modelos de plasticidade incremental. A seguir são apresentados os resultados obtidos na avaliação experimental do modelo de fluência cíclica ou *ratcheting* e no modelo de encruamento não-proporcional.

7.2. Resultados experimentais do modelo de fluência cíclica (*ratcheting*)

Foi avaliado experimentalmente o fenômeno de *ratcheting* tanto uniaxial quanto multiaxial. Foi estudado o fenômeno de *ratcheting* uniaxial para aço 1020 e para o alumínio 6351T6. Finalmente foi estudado o fenômeno de *ratcheting* multiaxial no alumínio 7075.

7.2.1. Determinação das propriedades do aço 1020 e alumínio 6351T6

Para determinar a resistência ao escoamento S_y e a resistência ruptura S_R foi realizado um teste de tração. A partir dos dados obtidos da curva $\sigma_x \times \epsilon_x$ foram determinados os coeficientes H, h da curva $\sigma_x \times \epsilon_x$ monotônica do modelo de encruamento da equação de Ramberg-Osgood.

Na Figura 7.1 apresenta-se a curva $\sigma_x \times \epsilon_x$ obtida no ensaio de tração tanto para o aço 1020 quanto para o alumínio 6351T6.

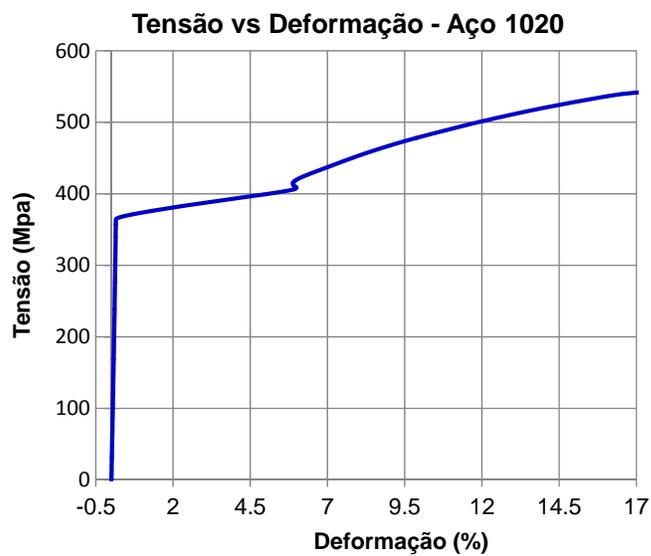
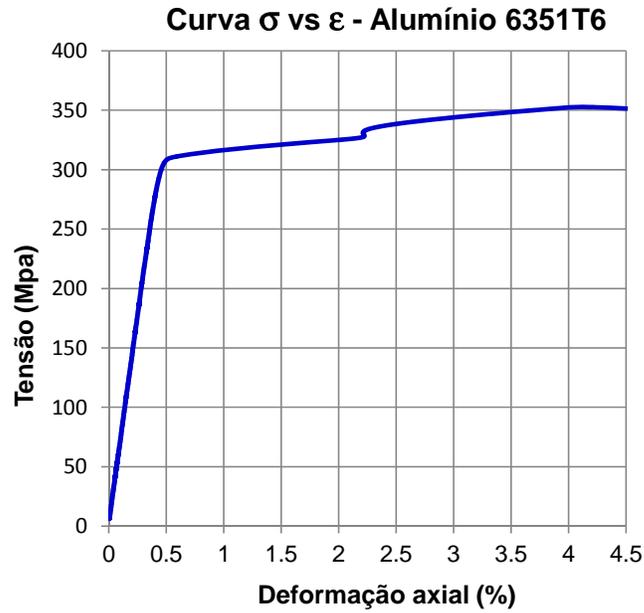


Figura 7.1 Curva σ_x x ϵ_x (a) Alumínio 6351T6 e (b) Aço 1020

A partir da curva σ_x x ϵ_x apresentada na Figura 7.1 a) foi determinada a resistência ao escoamento $S_y=310$ MPa, $E_{al}=69,6$ GPa e $S_R=352$ MPa para o alumínio 6351T6. Para o aço 1020 (vide figura 7.1 b), tem-se $S_y=365$ MPa, $E_{aço}=210$ GPa e $S_R=542$ MPa.

Os coeficientes de encruamento da equação de Ramberg-Osgood monotônico H e h são obtidos ajustando-se a uma reta os dados $\sigma \times \varepsilon_{pl}$ plotados em log-log, como se apresenta na Figura 7.2 para o Alumínio 6351T6.

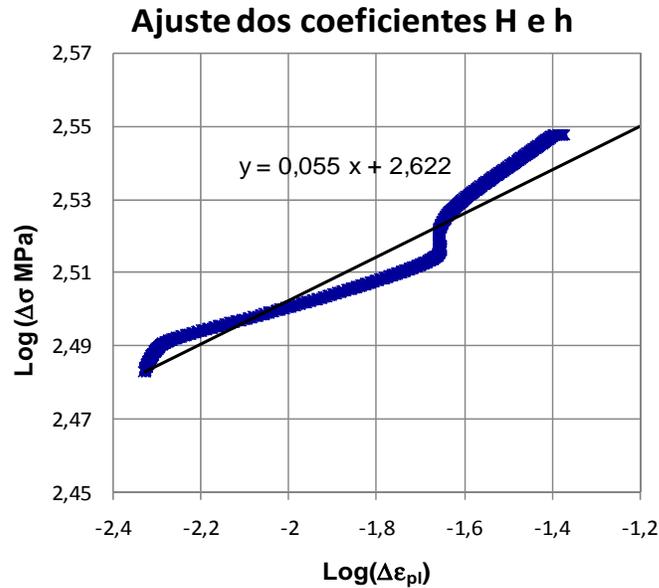


Figura 7.2 Ajuste do coeficiente H e do expoente h do Al-6351T6

A inclinação da reta ajusta e representa o expoente $h = 0,055$ e seu coeficiente linear $\log(H) = 2,622$. Portanto, tem-se $H = 420$ MPa. Na Figura 7.3 apresenta-se a curva $\sigma_x \times \varepsilon_x$, obtida no teste de tração e na curva monotônica $\sigma_x \times \varepsilon_x$, modelada pela equação de Ramberg-Osgood.

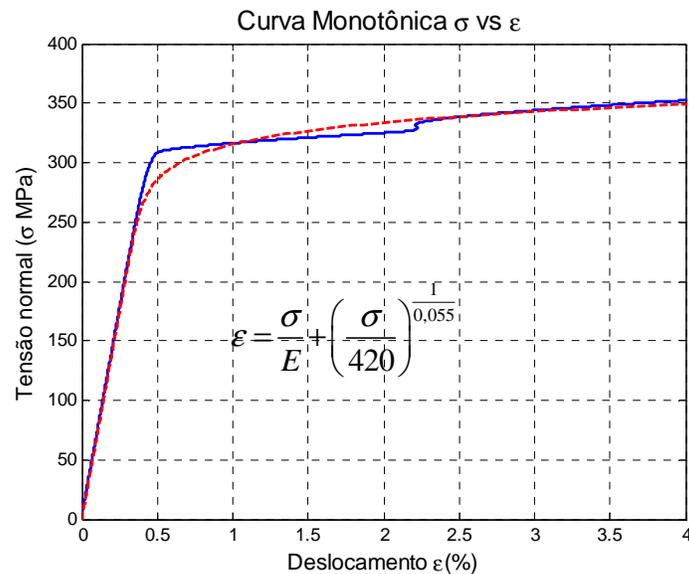
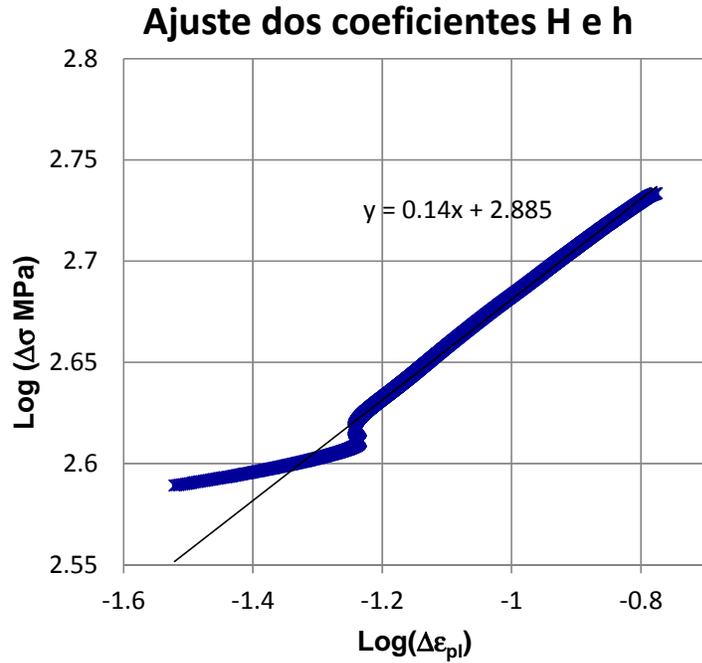
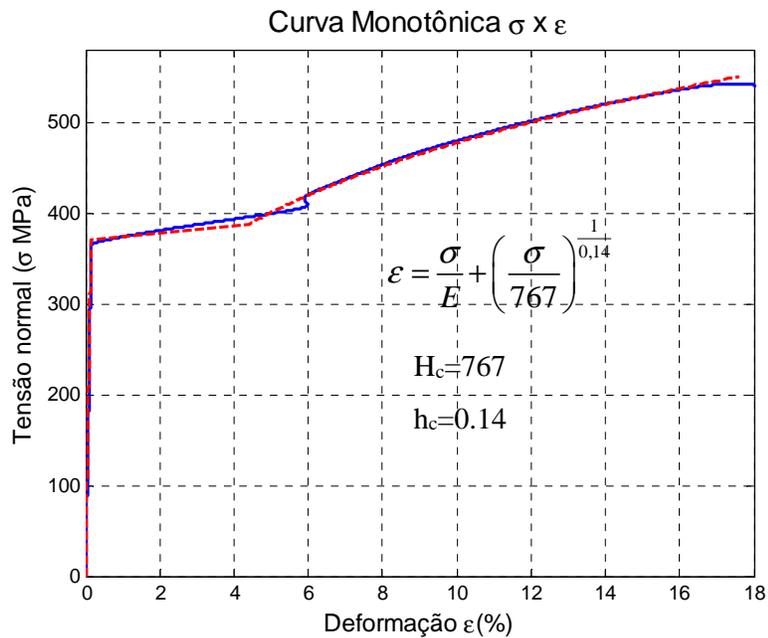


Figura 7.3 Curva monotônica do Al-6351T6

Na Figura 7.4 apresenta-se o ajuste dos parâmetros de encruamento H e h para os dados obtidos a partir da curva $\sigma_x \times \varepsilon_x$ para o aço 1020.



(a)



(b)

Figura 7.4 Curva monotônica do Aço 1020

A partir do ajuste apresentado na Figura 7.4 a) determinou-se o coeficiente de encruamento $H = 767$ MPa e, o expoente de encruamento $h = 0,14$.

7.2.2. Fluência cíclica (*Ratcheting*) uniaxial

Nesta seção apresenta-se o comportamento do aço 1020 e do alumínio 6351T6, submetido a um teste de carregamento cíclico com amplitude constante e média diferente de zero para observar "*ratcheting* uniaxial". Na literatura, muitos trabalhos têm mostrado que a maioria dos metais experimentam endurecimento ou amolecimento para um número de ciclos antes de estabilizar, e demonstraram que este comportamento tem uma forte influência na taxa de *ratcheting* sob carregamento cíclico, em controle de carga, com carregamento médio diferente de zero. Segundo Hassan e Kyriakides [46,47] recomendam submeter inicialmente o corpo de prova maciço a um ensaio ϵN , sob controle da deformação, a baixa frequência no mínimo por 12 ciclos, para garantir que estabilizou. Este procedimento é feito com a finalidade de minimizar efeitos do encruamento isotrópico no fenômeno de *ratcheting*. Os ensaios foram realizados em corpos de prova maciço com diâmetro de $\phi = 10$ mm e comprimento de $l = 125$ mm. Segundo esta metodologia, os corpos de prova foram inicialmente submetidos a um ensaio ϵN em controle de deformação ($\epsilon_a = \Delta\epsilon / 2 = 2\%$) até obter laços de histerese elastoplásticos estabilizados (vide Figura 7.5).

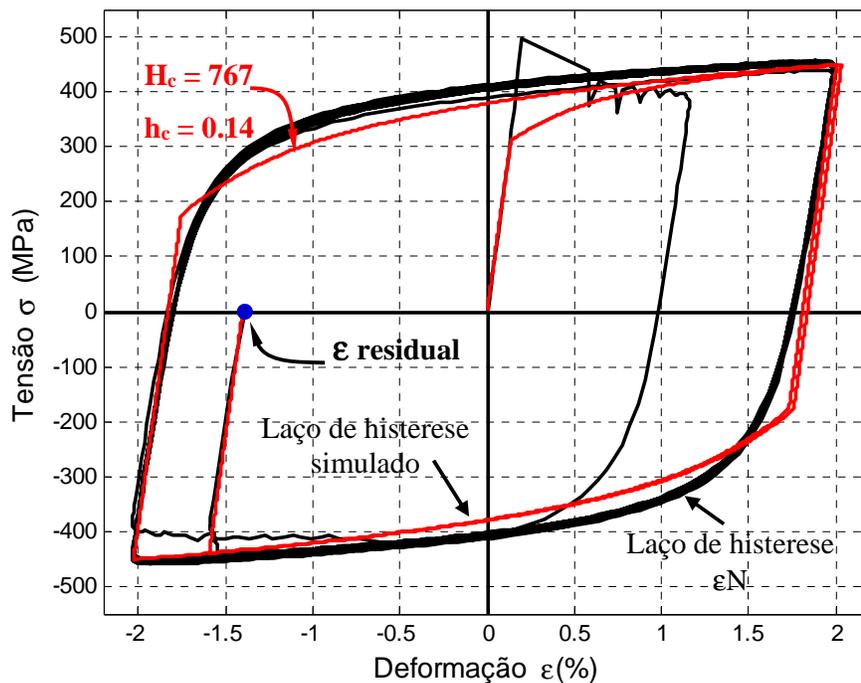


Figura 7.5 Laço estabilizado, sob o controle de deformação de $\Delta\epsilon = \pm 2\%$.

Na Figura 7.5 mostra-se o laço de histerese do aço 1020 estabilizado, após 20 ciclos, para uma amplitude de $\Delta\varepsilon = \pm 2\%$. A linha mais clara representa o laço de histerese simulado, e o ponto no eixo horizontal representa a deformação residual.

Posteriormente, o corpo de prova é submetido a um carregamento cíclico com amplitude $\sigma_a = 275$ MPa e uma carga média $\sigma_m = 75$ MPa, sob o controle de carga, que inicia com uma deformação negativa devido à deformação residual do ensaio anterior, como se apresenta na Figura 7.6.

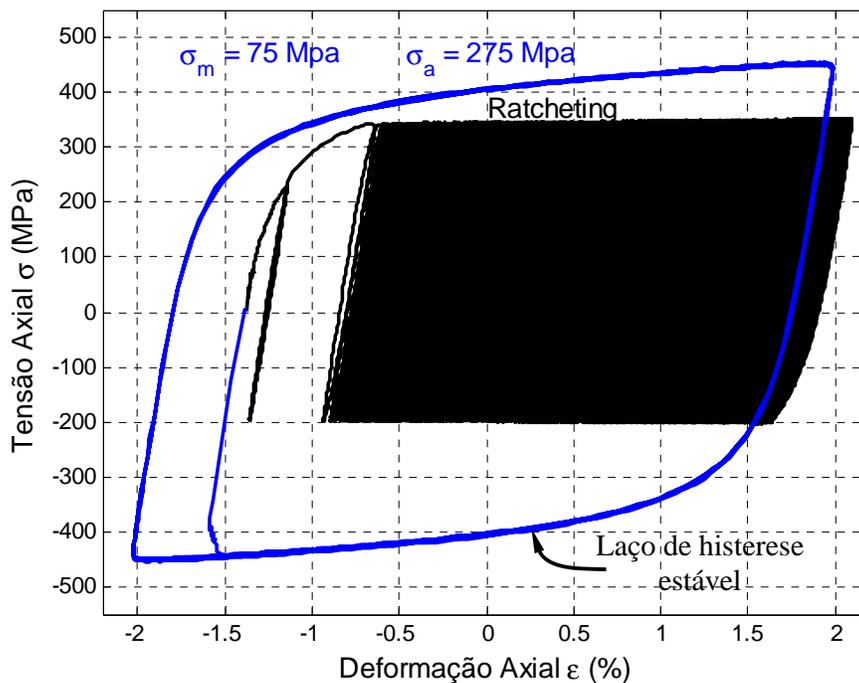


Figura 7.6 Condição inicial para o ensaio de ratcheting uniaxial

Na Figura 7.7 mostra-se o comportamento do fenômeno de fluência cíclica (ratcheting) do aço 1020 para 50 ciclos. O sistema de controle da INSTRON ajustou o valor do carregamento para manter constante a frequência do ensaio. A deformação de *ratcheting* aumenta a cada ciclo e, dependendo dos níveis de carga, pode-se incrementar exponencialmente, até levar à falha em um número relativamente baixo de ciclos.

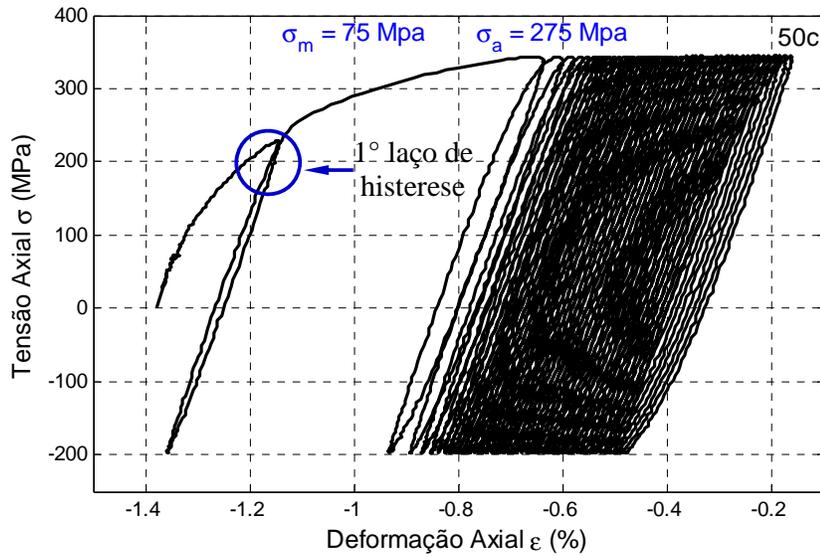


Figura 7.7 Comportamento de fluência cíclica (ratcheting) do aço 1020.

Na Figura 7.8 apresenta-se o comportamento do fenômeno de ratcheting do aço 1020 para 100 ciclos, onde a linha contínua representa a curva obtida pelo simulador, junto com os pontos obtidos experimentalmente. Mostra-se que o simulador modela razoavelmente bem o comportamento do ratcheting uniaxial para os 70 primeiros ciclos, adotando $H_c = 767$ Mpa, $h_c = 0,14$, e $b_c = 10$ no modelo de Jiang.

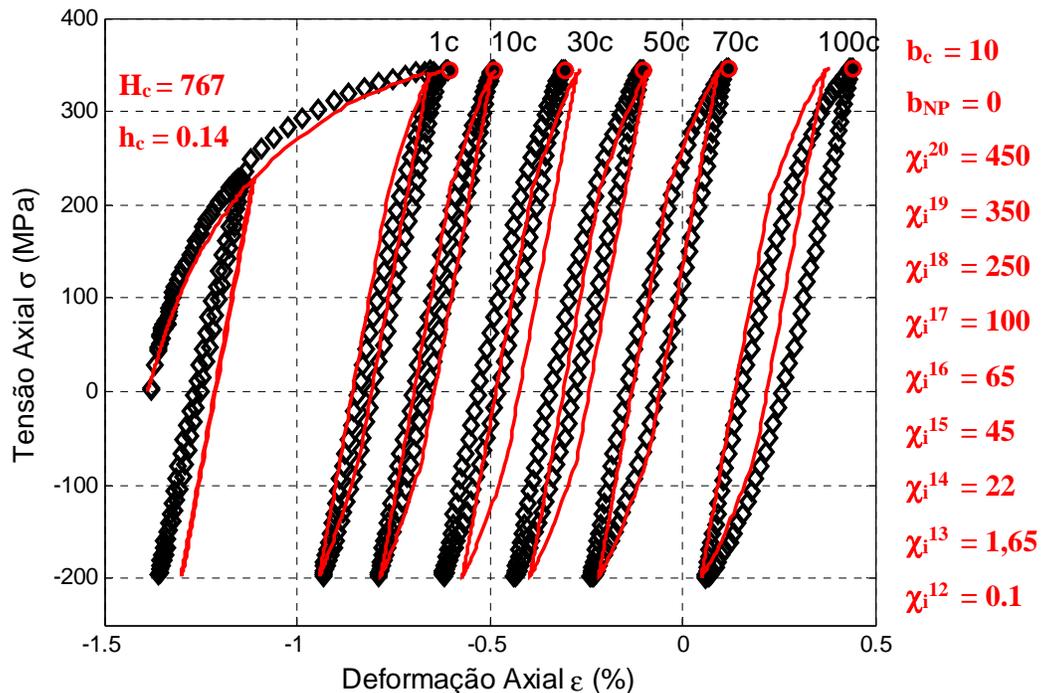


Figura 7.8 Laços de histerese gerados por ratcheting uniaxial em aço 1020.

Os coeficientes de ratcheting utilizados pelo simulador foram $\chi_i^j = [450, 350, 250, 100, 65, 45, 22, 1.65, 0.1, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$, ajustados levando-se em consideração as recomendações citadas por Jiang [48, 49], e utilizando $M=15$ superfícies de encruamento e escoamento.

Na Figura 7.9 mostra-se a taxa de deformação de ratcheting ε_r em função do número de ciclos. A deformação de *ratcheting* ε_r é definida como a média entre a deformação axial máxima e a deformação axial mínima [50] a cada ciclo. A linha contínua representa a taxa de deformação de ratcheting obtida pelo simulador, junto com os pontos obtidos experimentalmente.

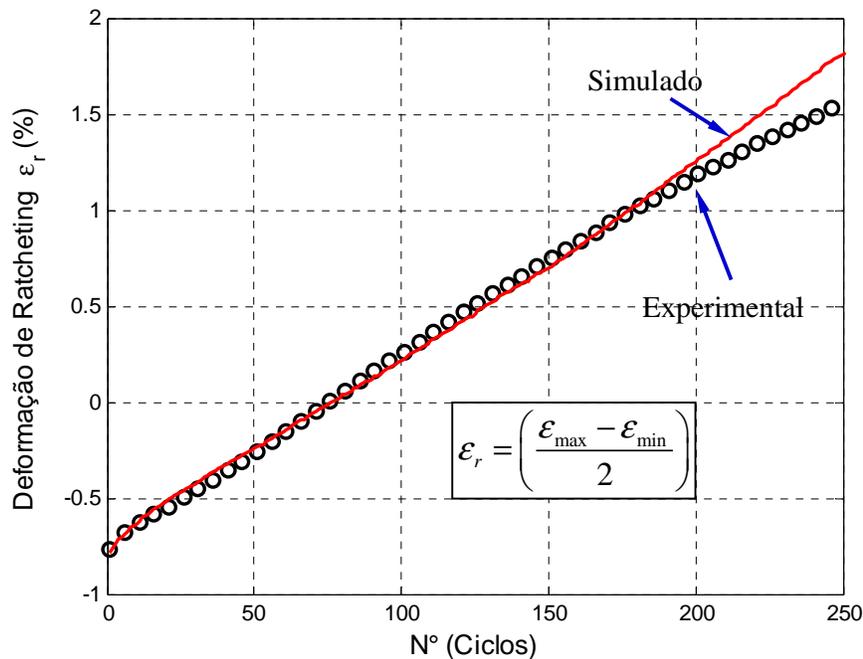


Figura 7.9 Deformação de ratcheting acumulada do aço 1020.

Na Figura 7.10 apresenta-se a taxa de variação da deformação de ratcheting ε_r' em função do número de ciclos, a qual após 250 ciclos convergiu para uma taxa de $\mu(\varepsilon_r') = 0,008 \%$. A linha escura representa a taxa de deformação de ratcheting experimental e a linha de clara a taxa de ratcheting simulada. Mostra-se que, após 200 ciclos, a taxa de variação da deformação de ratcheting simulado é maior que a experimental.

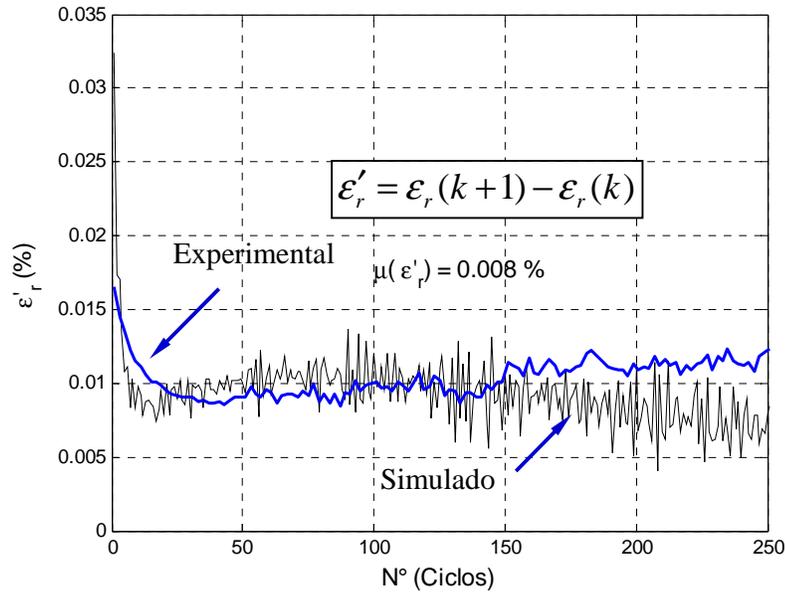


Figura 7.10 Taxa de deformação de ratcheting do aço 1020.

Um outro material utilizado para estudar o fenômeno de ratcheting uniaxial foi o alumínio 6351T6. O corpo de prova inicialmente também foi submetido a um ensaio ϵN , sob o controle da deformação ($\epsilon_a = \Delta\epsilon / 2 = 1\%$), até obter-se o laço de histerese estabilizado (vide Figura 7.11)

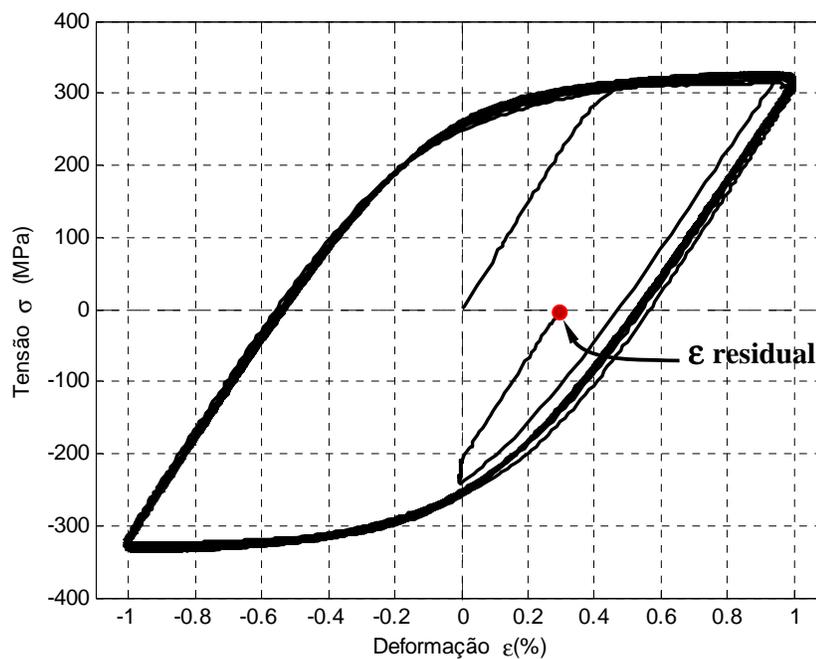


Figura 7.11 Laço de histerese estabilizado do Alumínio 6351T6

Na Figura 7.11, o ponto no eixo horizontal indica a tensão residual após obter o laço de histerese estabilizado no ensaio ϵN .

Em seguida, o corpo de prova de alumínio foi submetido a um carregamento cíclico, com amplitude de $\sigma_a = 263$ MPa e carga média $\sigma_m = 53$ MPa, sob controle de carga. Na Figura 7.12 apresenta-se a condição inicial para o ensaio ratcheting uniaxial do Alumínio 6351T6, onde os pontos representam o laço de histerese estabilizado e a linha contínua o laço de histerese gerado pelo carregamento aplicado durante o ensaio de ratcheting uniaxial. A deformação de ratcheting inicia a partir da deformação residual $\epsilon_{residual} \cong 0,3\%$ (vide Figura 7.12)

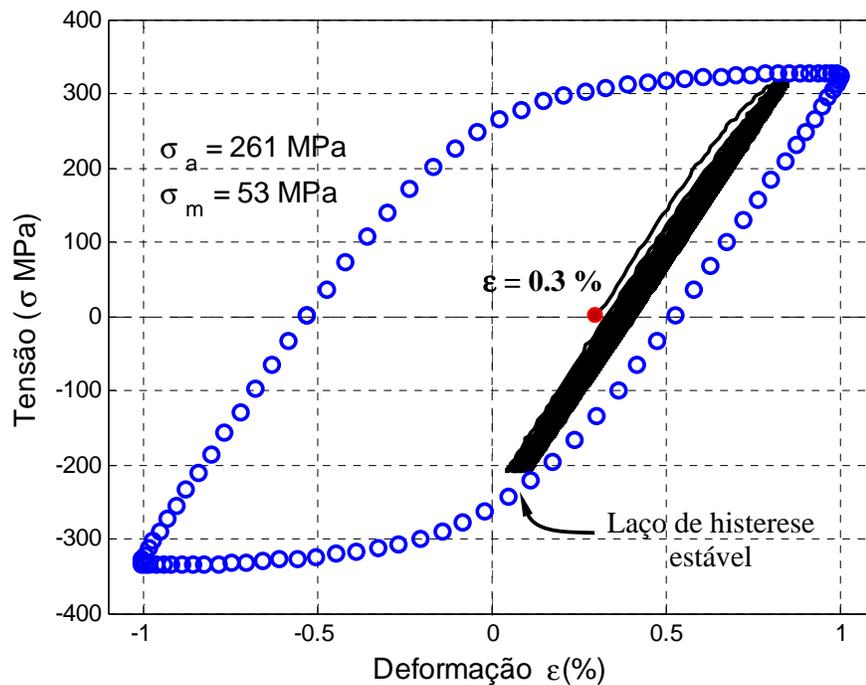


Figura 7.12 Condição inicial para o ensaio de ratcheting uniaxial do Al-6351T6

Na Figura 7.13, apresenta-se o comportamento da deformação de ratcheting nos primeiros 300 ciclos para o carregamento $\sigma = 53 \pm 261$ MPa aplicado. A deformação de ratcheting inicia a partir da $\epsilon = 0,3\%$ residual e aumenta a cada ciclo, até se estabelecer em uma deformação ratcheting $\epsilon_r = 0,475\%$

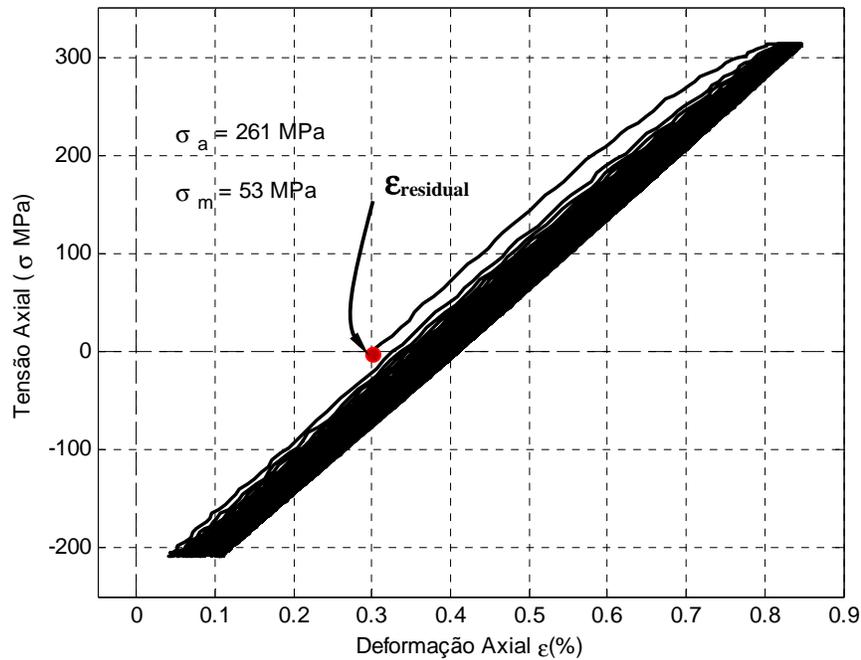


Figura 7.13 Ensaio de ratcheting uniaxial Al-6351T6 com $\sigma_a = 261$ MPa.

Na figura 7.14 apresenta-se a cada ciclo o incremento de deformação devido a ratcheting para o carregamento aplicado. Após 100 ciclos houve estabilização, sem gerar mais incremento de deformação.

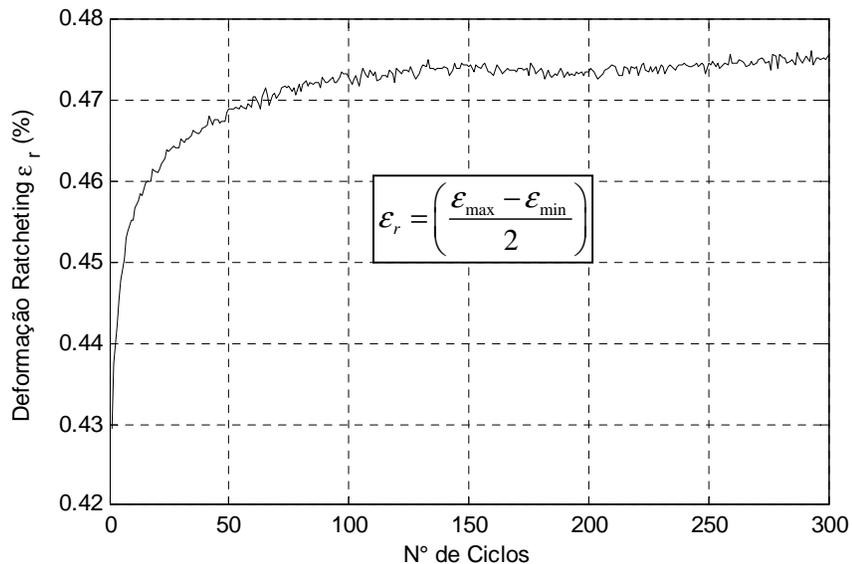


Figura 7.14 Deformação de ratcheting acumulada para o Al-6351T6

A Figura 7.15 apresenta-se a taxa de deformação de ratcheting para o carregamento aplicado, que após 100 ciclos convergiu para zero.

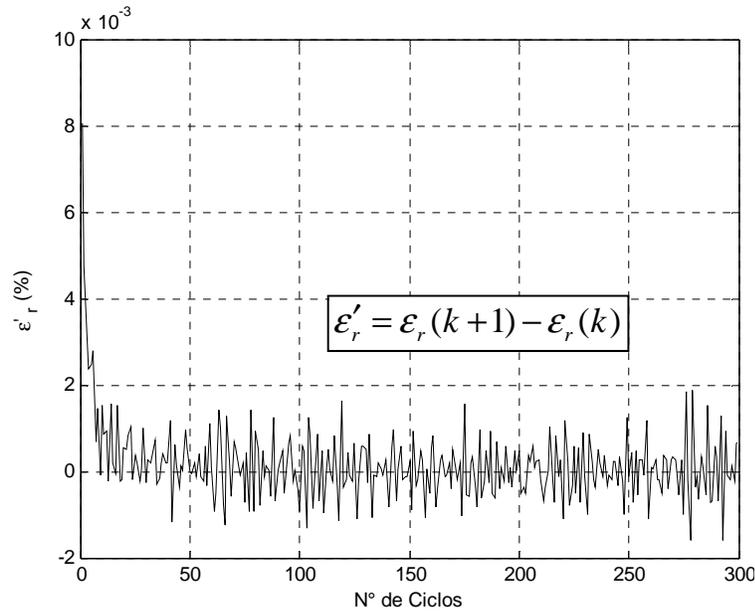


Figura 7.15 Taxa de deformação de ratcheting para $\sigma_a = 261$ MPa

Aumentou-se a amplitude do carregamento para $\sigma_a = 285$ MPa e o carregamento médio foi mantido constante. A Figura 7.16 mostra os laços de histerese durante o ensaio de ratcheting, onde pode-se observar que nos picos dos laços a deformação aumenta a cada ciclo.

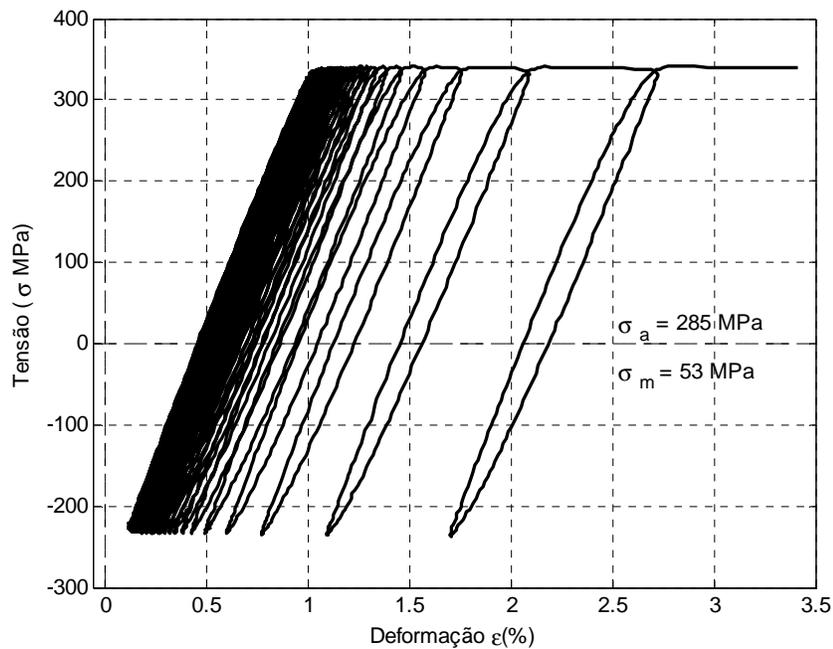


Figura 7.16 Ensaio de ratcheting uniaxial do Al-6351T6 com $\sigma_a = 285$ MPa

Na Figura 7.17 mostra-se o incremento da deformação de ratcheting para o

novo carregamento. A cada ciclo, a deformação de ratcheting acelera até fraturar o corpo de prova.

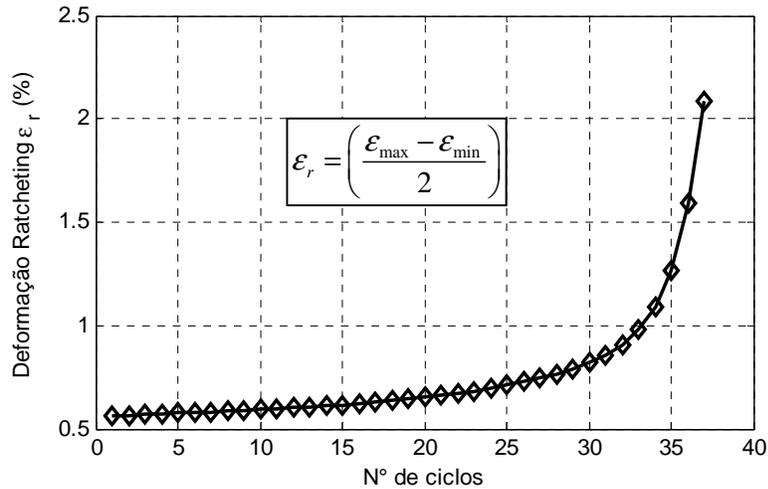


Figura 7.17 Deformação de ratcheting uniaxial acumulada

Na Figura 7.18, mostra-se a taxa de incremento da deformação de ratcheting ϵ_r' para o carregamento aplicado $\sigma = 53 \pm 285$ MPa, onde a taxa de deformação ϵ_r' aumenta após cada ciclo, até fraturar o corpo de prova.

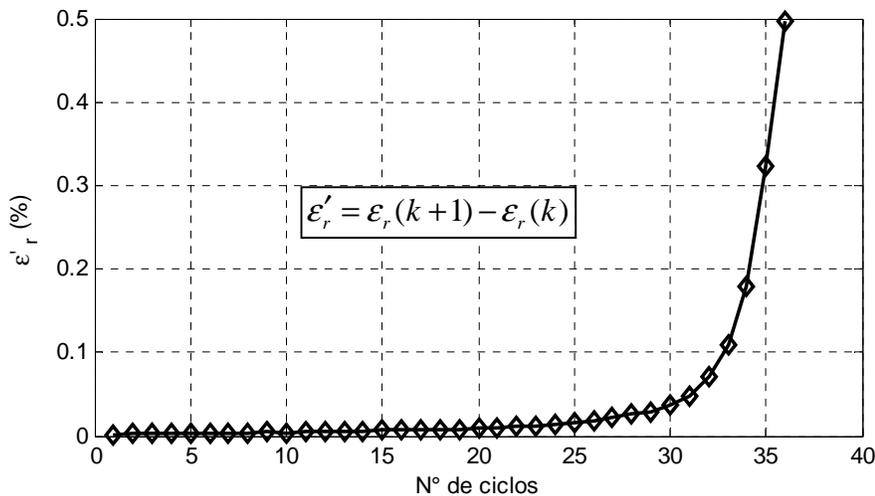


Figura 7.18 Taxa de incremento da deformação de ratcheting

7.2.3. Fluência cíclica (*Ratcheting*) multiaxial

Nesta seção apresenta-se o comportamento do alumínio 6351T6, submetido a um ensaio de ratcheting multiaxial, o qual consiste em submeter o corpo de prova a uma carga trativa constante (perto da resistência ao escoamento) e uma torção

cíclica com amplitude suficientemente grande para produzir deformação plástica a cada ciclo. Os ensaios foram realizados em corpos de prova tubulares com diâmetro externo $\phi_e = 10$ mm, diâmetro interno de $\phi_i = 8,4$ mm e comprimento $l = 140$ mm (vide Figura 7.19).

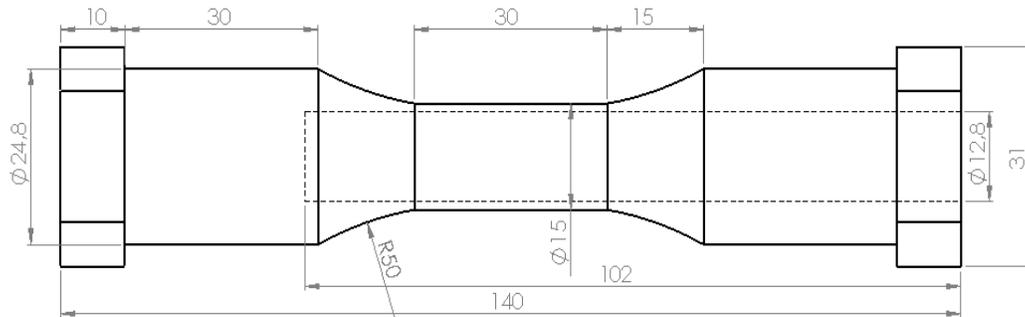


Figura 7.19 Corpo de prova Tubular ratcheting multiaxial

Inicialmente determinaram-se as propriedades do alumínio, a partir da curva $\sigma \times \varepsilon$ conforme se apresenta na Figura 7.20. Os ensaios de ratcheting multiaxial foram feitos na MTT e as deformações (ε_x , ε_y e γ_{xy}) foram medidas pelo módulo de correlação de imagens VIC-3D da *Correlated Solutions*.

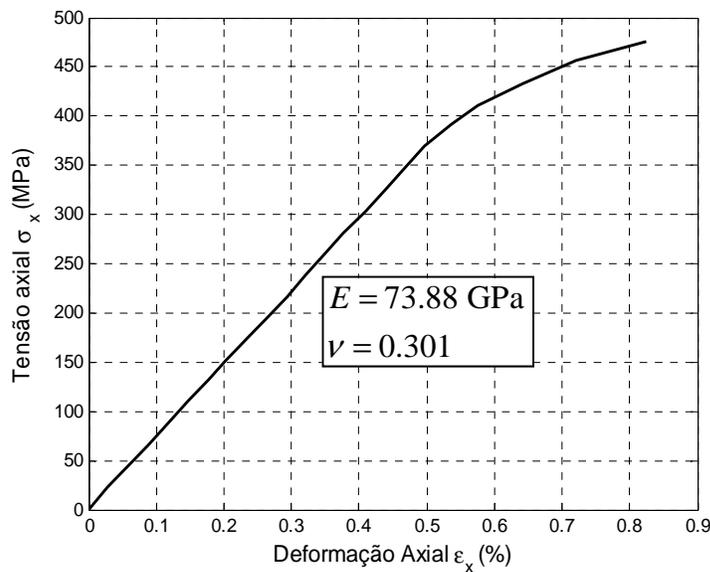


Figura 7.20 Determinação das propriedades do Alumínio 6351Tx

No primeiro ensaio, o corpo de prova foi submetido a uma tensão axial constante ($\sigma_x = 430$ MPa) e a um torçor de ± 10 N.m que gerou uma deformação cisalhante de $\gamma_{xy} = \pm 0,195$ % (vide Figura 7.21).

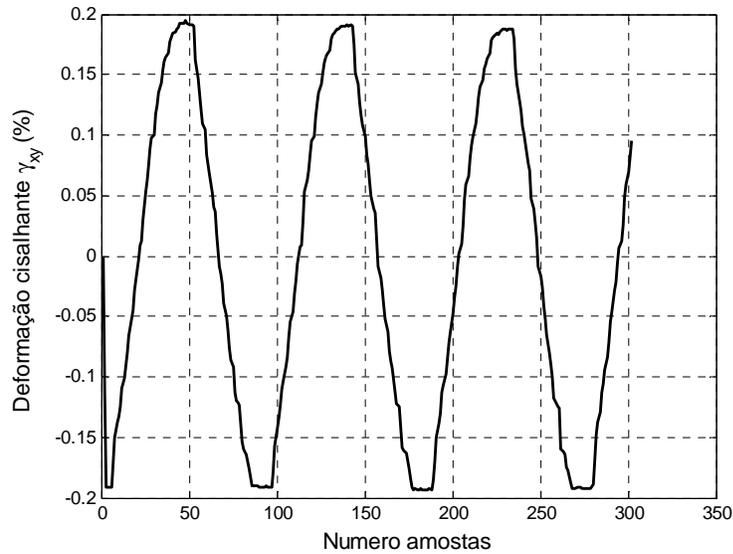


Figura 7.21 Deformação cisalhante gerada pelo Torçor cíclico

A carga axial ($\sigma_x = 430$ MPa) aplicada gerou uma deformação axial de ($\varepsilon_x = 0,61$ %) que foi mantida constante, ao longo do ensaio, sem sofrer incremento de deformação devido ao torçor cíclico, como apresenta-se na Figura 7.22.

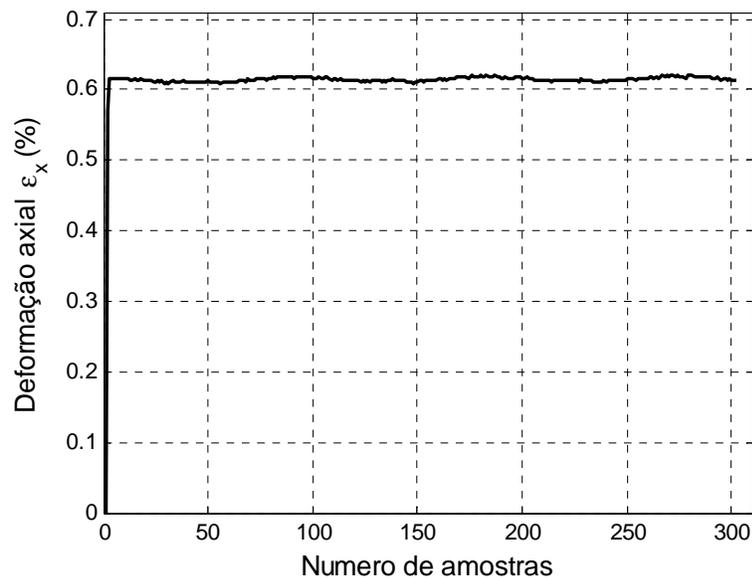


Figura 7.22 Comportamento da deformação axial - Ratcheting multiaxial

O momento torçor cíclico aplicado gerou uma deformação cisalhante de $\gamma_{xy} = \pm 0,195$ %, sem gerar aumento da deformação axial, devido ao ratcheting

multiaxial, como se apresenta na Figura 7.23.

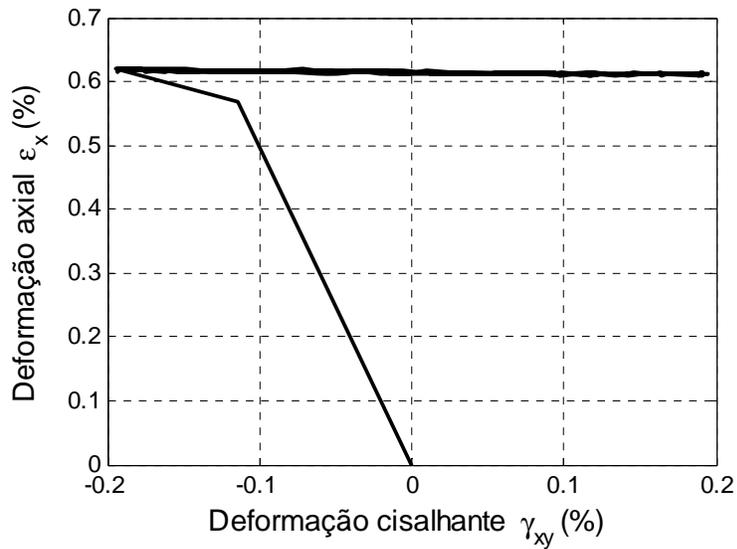


Figura 7.23 Incremento da deformação axial para $\sigma_x = 430$ MPa e $T = 10$ N.m

Após o primeiro ensaio e não se tendo nenhum aumento de deformação axial, foi incrementado o momento torçor para $T = \pm 20$ N.m, gerando uma deformação cisalhante de $\gamma_{xy} = \pm 0,4$ %, como apresenta-se na Figura 7.24.

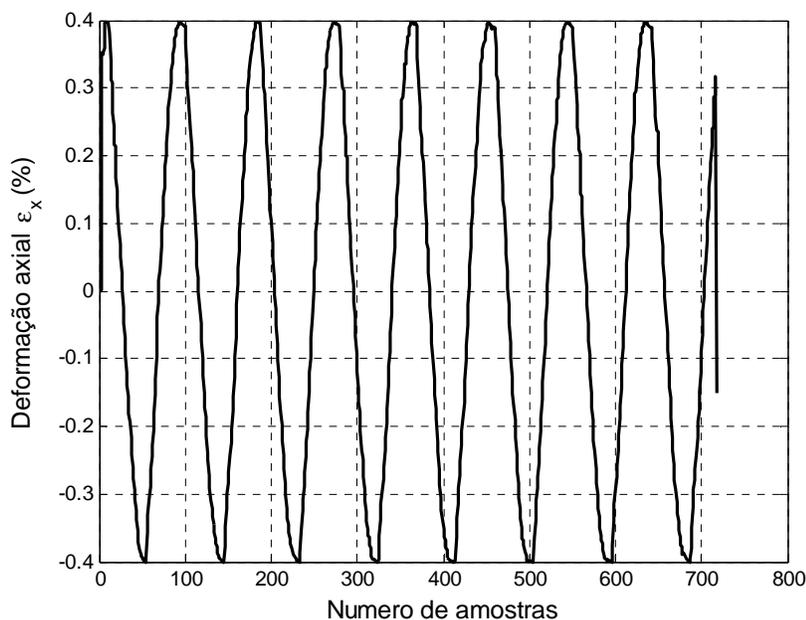


Figura 7.24 Deformação cisalhante gerado pelo $T = \pm 20$ N.m

Como esperado para esta maior carga, a deformação axial teve um incremento a cada ciclo nos picos e vales da tensão cisalhante aplicada (vide Figura 7.25).

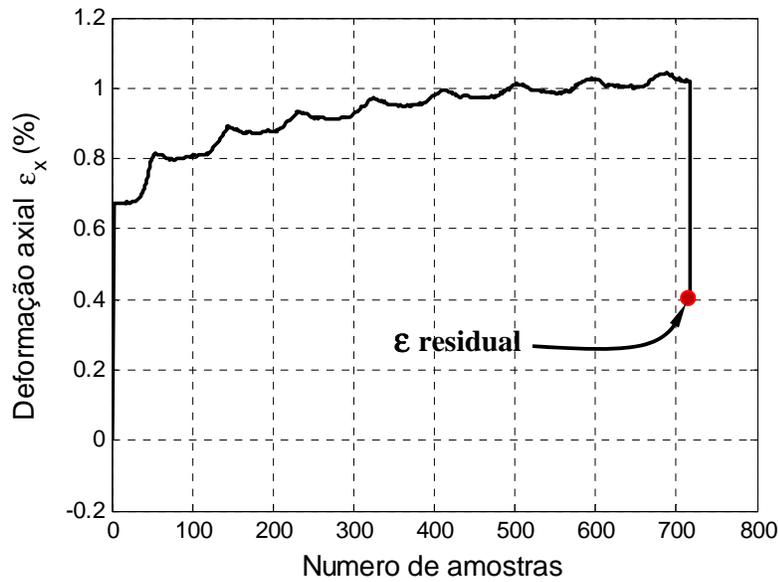


Figura 7.25 Incremento da deformação axial para $T = 20$ N.m

Após ter sido finalizado o ensaio, a deformação axial incrementou-se até $\varepsilon_x = 1,05$ %, e logo ao fazer-se o descarregamento da tensão axial, o corpo de prova manteve uma deformação axial residual de $\varepsilon_x = 0,4$ % (vide Figura 7.25). Na Figura 7.26 apresenta-se o incremento da deformação axial a cada ciclo nos picos e vales da deformação cisalhante.

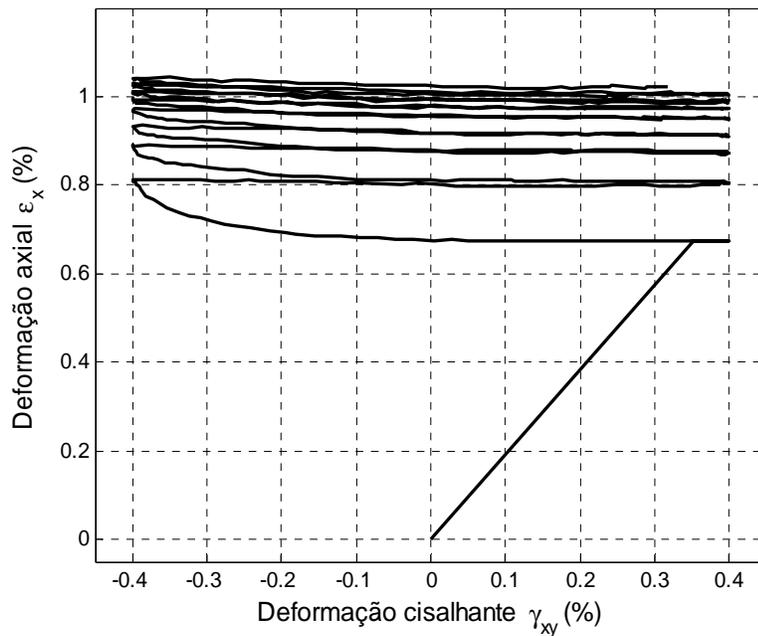


Figura 7.26 Incremento da deformação axial para $\sigma_x = 430$ MPa e $T = 20$ N.m

7.3. Resultados experimentais do modelo de encruamento não proporcional

Nesta seção, apresentam-se os resultados experimentais do modelo de encruamento cíclico não proporcional para o aço inox 316 e o alumínio 7075. Inicialmente foram realizados ensaios ϵN na máquina INSTRON-8501 para determinarem-se os parâmetros de encruamento cíclico do material. Posteriormente, foram realizados ensaios de encruamento não proporcional na MTT, que consistem em submeter-se o corpo de prova tubular com diâmetro externo $\phi_e = 14,9$ mm e diâmetro interno $\phi_i = 12,8$ mm a um carregamento cíclico de tração-torção 90° fora de fase.

7.3.1. Determinação das propriedades do material

Para se determinar a resistência ao escoamento S_Y e a resistência à ruptura S_R foi realizado um teste de tração. Assim, a partir dos dados $\sigma_x \times \epsilon_x$ determinam-se os coeficientes H, h da curva σ vs ϵ monotônica do modelo de encruamento da equação de Ramberg-Osgood.

7.3.2. Levantamento de propriedades Al-7075 e aço inox 316

A curva $\sigma\epsilon$ cíclica é obtida pela junção dos picos dos laços de histerese estabelecido para diversas gamas $\Delta\epsilon$ testados sob controle de deformação. Deste modo, ela pode ser também modelada pela equação de Ramberg-Osgood como

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \cdot \left(\frac{\Delta\sigma}{2 \cdot H_C} \right)^{1/h_c} \quad (6.17)$$

Os parâmetros de encruamento cíclico H_c e h_c da equação de Ramberg-Osgood, foram obtidos de maneira similar da curva σ vs ϵ , ajustando-se a uma reta os pontos $\Delta\sigma/2 \times \Delta\epsilon/2$ nos bicos dos laços de histerese em log-log.

Na Figura 7.27 apresenta-se o ajuste dos coeficientes de encruamento cíclico para o alumínio 7075, a partir dos laços de histerese para diversos $\Delta\epsilon$.

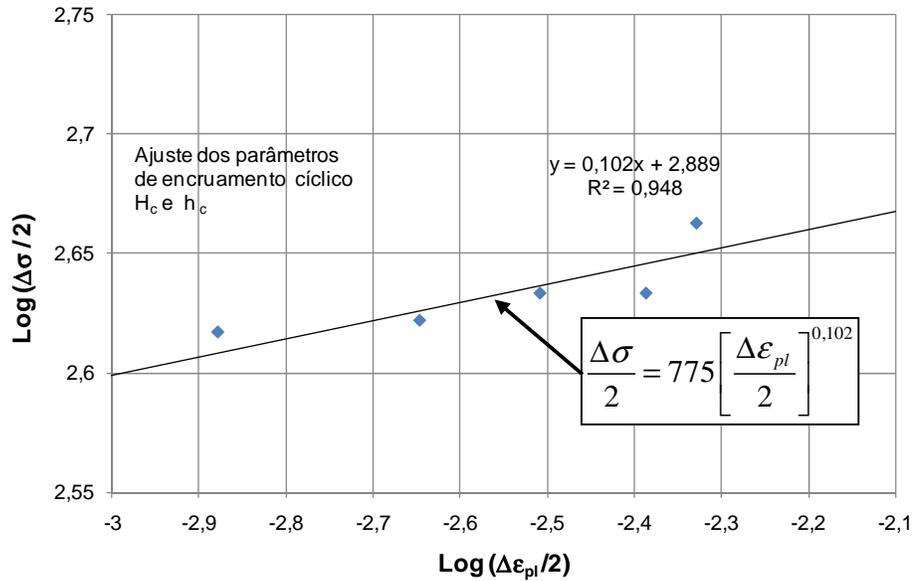


Figura 7.27 Ajuste dos parâmetros de encruamento cíclico do Al-7075

Na Figura 7.28, a linha mais clara representa a curva σ vs ε cíclica do alumínio 7075, obtida com os valores de H_c e h_c , ajustados a partir de dados experimentais. As linhas mais escuras representa os laços de histerese estáveis para as diferentes gamas $\Delta\varepsilon$.

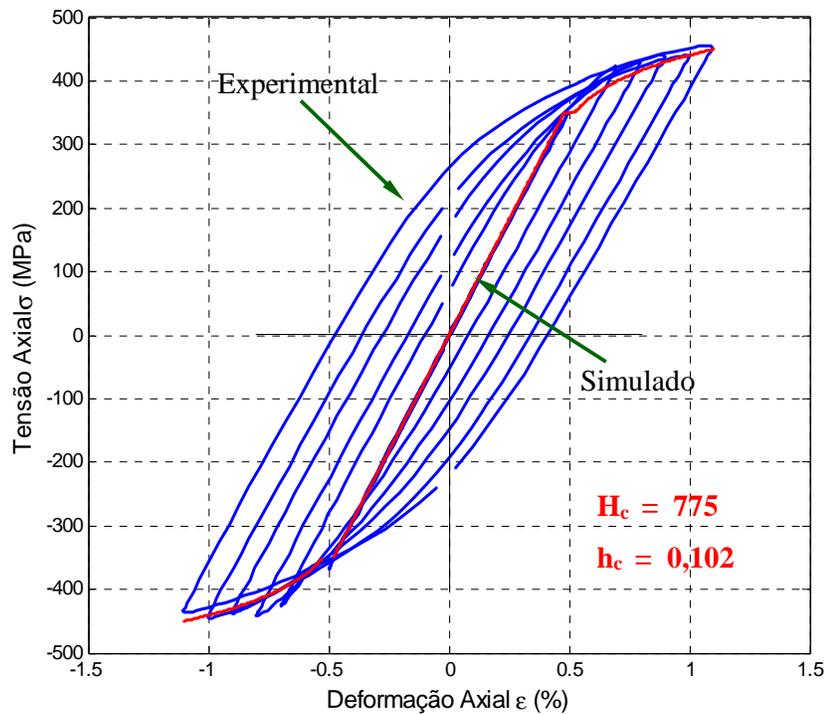


Figura 7.28 Curva $\sigma \times \varepsilon$ cíclica do Al-7075 ajustando os picos dos laços.

Na Figura 7.29, apresentam-se os laços $\Delta\sigma \times \Delta\varepsilon$ do Alumínio-7075, obtidos pelo modelo de Ramberg-Osgood (às vezes chamado de laços de Masing [51]) para diferentes valores de gamas $\Delta\varepsilon$ fixas e dado pelas linhas contínuas. Os pontos representam as curvas $\sigma \times \varepsilon$ obtidas experimentalmente para as mesmas gamas $\Delta\varepsilon$

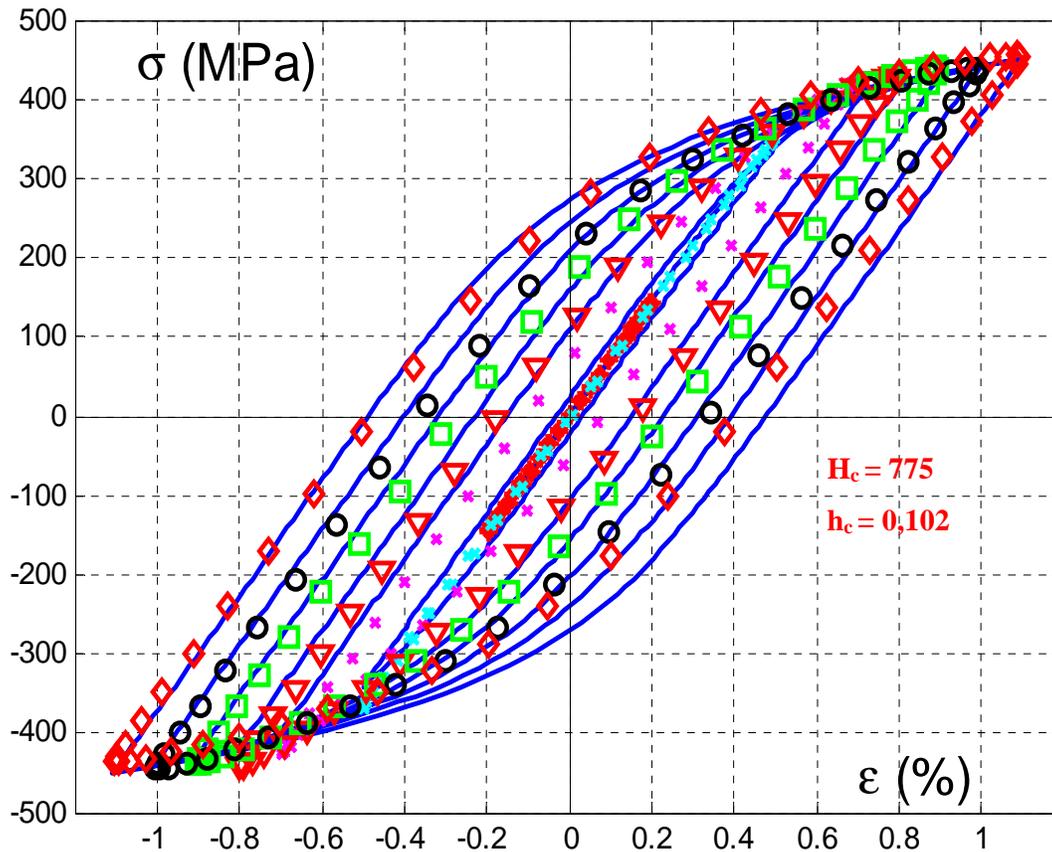


Figura 7.29 Laços estabilizados do Alumínio 7075.

O módulo de elasticidade E do Alumínio 7075 é obtido da inclinação da curva $\sigma \times \varepsilon$ na zona elástica. Já o coeficiente de Poisson ν é obtido pela relação $\nu = -\varepsilon_y / \varepsilon_x$. As deformações foram medidas através do equipamento de correlação de imagens VIC-3D da *Correlated Solutions*.

Na Figura 7.30 mostra-se a zona elástica da curva $\sigma \times \varepsilon$, a partir da qual determinam-se os valores de E e ν .

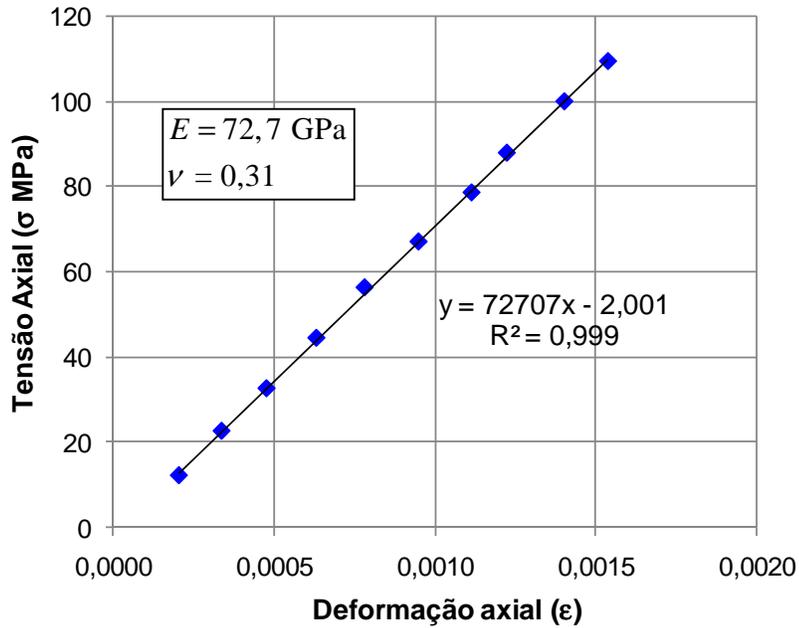


Figura 7.30 Determinação dos parâmetros E e ν do alumínio 7075.

Um outro material de interesse para o estudo de encruamento não proporcional é o Aço Inox 316. Seus parâmetros de encruamento cíclico H_c e h_c da equação de Ramberg-Osgood foram obtidos de maneira semelhante ao do alumínio 7075, ajustando-se os bicos dos laços de histerese estabelecidos e plotados em log-log a uma reta $\Delta\sigma/2 \times \Delta\epsilon/2$, como se mostra na Figura 7.31.

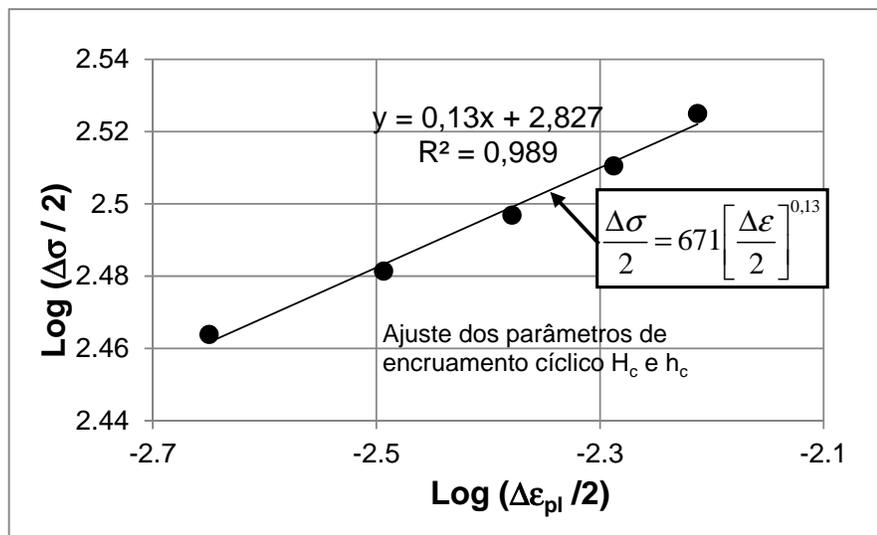


Figura 7.31 Ajuste dos parâmetros de encruamento cíclico do Aço Inox 316.

Na Figura 7.32 apresenta-se a curva $\sigma \times \varepsilon$ cíclica do aço inox 316 dada pela linha mais clara, e os laços de histerese estáveis para as diferentes gamas $\Delta\varepsilon$.

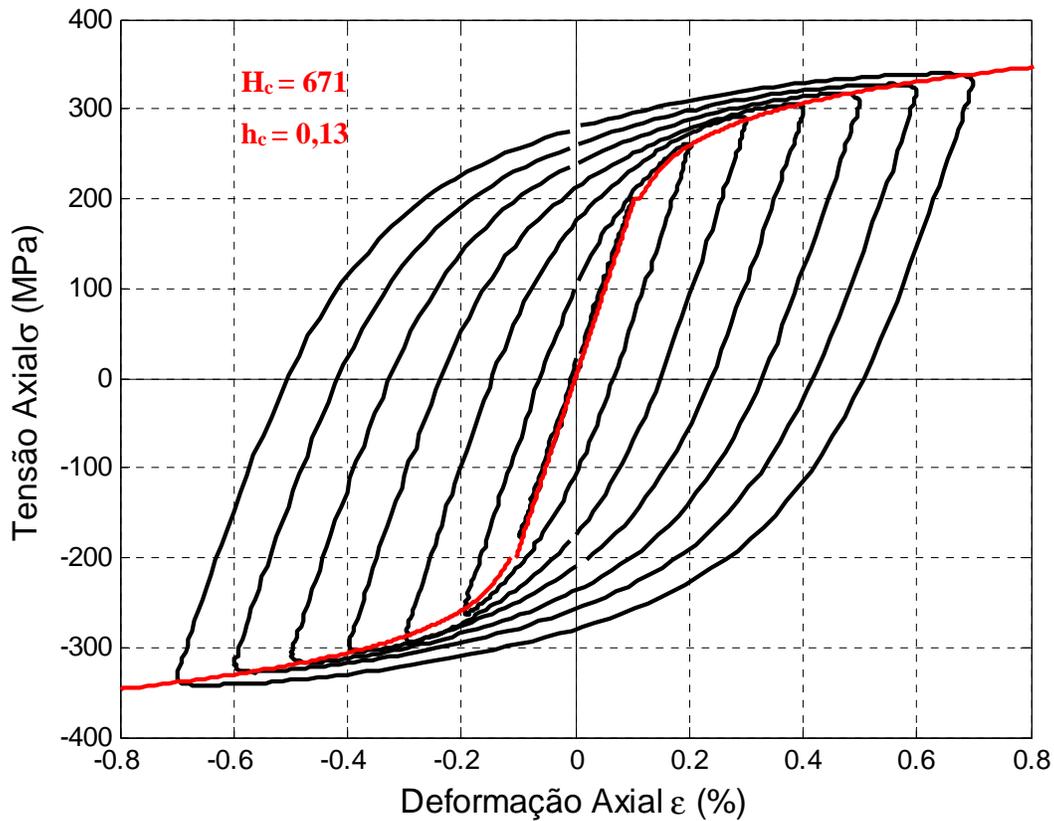


Figura 7.32 Curva $\sigma \times \varepsilon$ cíclica do Aço inox-316 ajustando os bicos dos laços.

Na Figura 7.33, apresentam-se os laços $\Delta\sigma \times \Delta\varepsilon$ do aço inox 316, obtidos com o modelo de Ramberg-Osgood para os diferentes valores de gama $\Delta\varepsilon$ (laços de Masing), e dados pelas linhas contínuas. Os pontos representam os laços de histerese estáveis obtidos experimentalmente para as mesmas gamas $\Delta\varepsilon$.

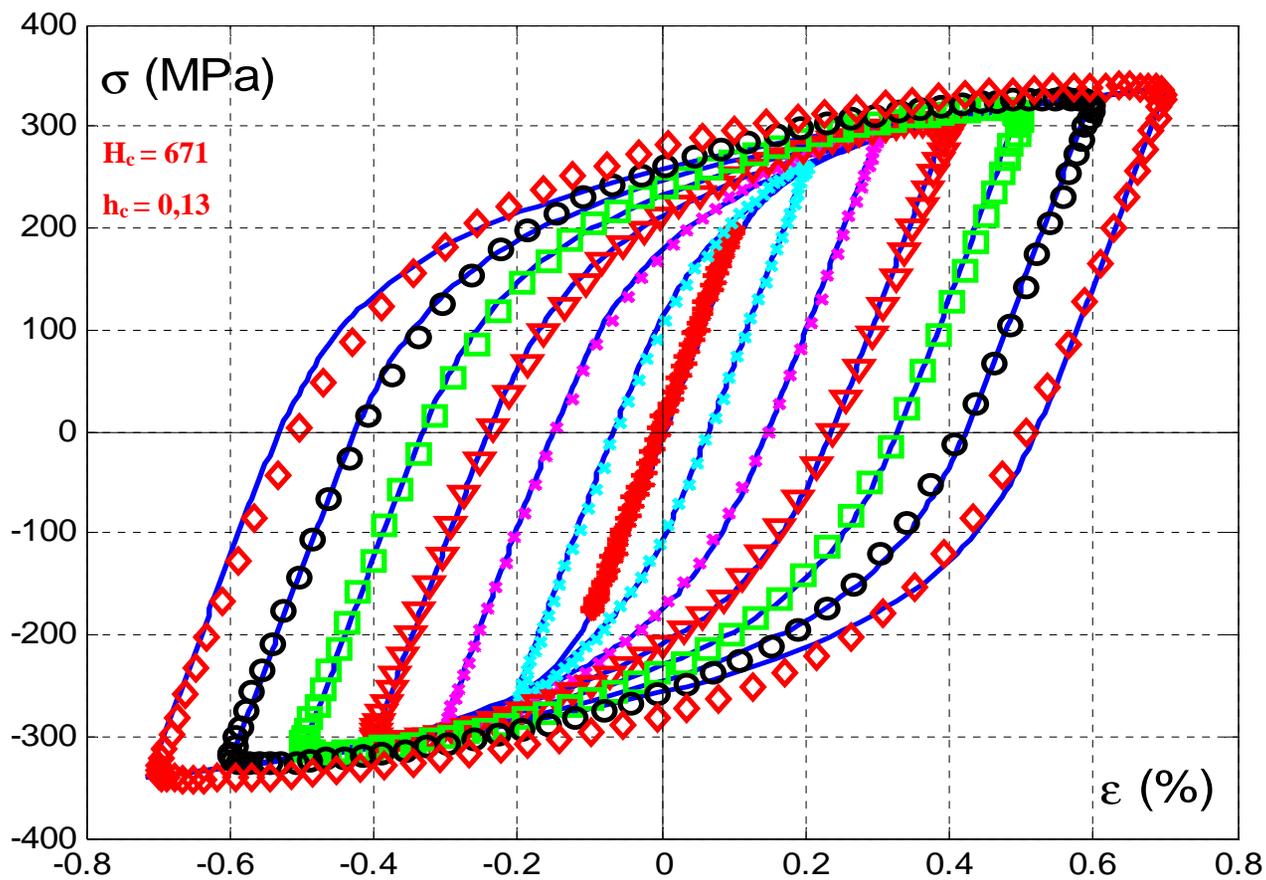


Figura 7.33 Laços estabilizados do Aço inox 316.

Finalmente, o módulo de elasticidade E é obtido a partir dos dados da zona elástica da curva $\sigma \times \varepsilon$ e com o coeficiente de Poisson ν obtido pela relação $\nu = -\varepsilon_y / \varepsilon_x$, onde as deformações foram medidas pelo módulo de correlação de imagens VIC-3D da *Correlated Solutions*. Na Figura 7.34 mostra-se a zona elástica da curva $\sigma \times \varepsilon$ para o aço inox-316.

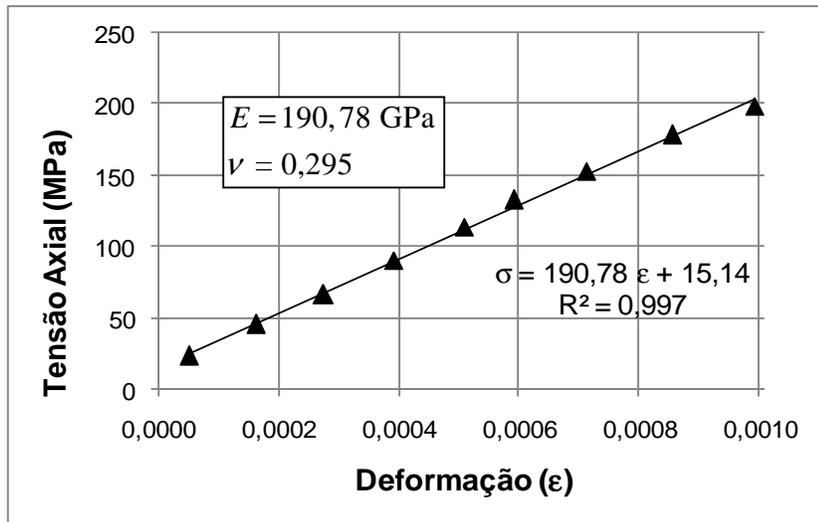


Figura 7.34 Determinação dos parâmetros E e ν do aço Inox-316.

Para se determinar S_Y e S_R , foi realizado um teste de tração. A partir dos dados $\sigma_x \times \varepsilon_x$ determinam-se os coeficientes H , h da curva $\sigma_x \times \varepsilon_x$ monotônica do modelo de encruamento da equação de Ramberg-Osgood.

7.3.3.

Encruamento não proporcional do Al-7075

Nesta seção, apresentam-se os resultados experimentais do ensaio de encruamento não-proporcional para o Alumínio 7075, que consiste em submeter o corpo de prova a uma carga trativa senoidal $\sigma(t) = \sigma_a \cdot \sin(\omega t)$ e a uma torção defasadas de 90° , $\tau(t) = \tau_a \cdot \cos(\omega t)$, onde $\tau_a = \sigma_a / \sqrt{3}$. Os ensaios de encruamento não-proporcional foram feitos sob controle da carga e torque aplicados ao corpo de prova. Suas deformações ε_x , ε_y e γ_{xy} foram medidos utilizando-se o módulo de correlação de imagens VIC-3D da *Correlated Solutions*. Estes ensaios foram desenvolvidos na MTT no Laboratório de Fadiga da PUC-Rio.

O ensaio de encruamento não proporcional foi feito num corpo de prova tubular com diâmetro interno $\phi_i = 12,8$ mm, diâmetro externo $\phi_e = 14,9$ mm e comprimento de $L_c = 140$ mm, como mostra a Figura 7.35.

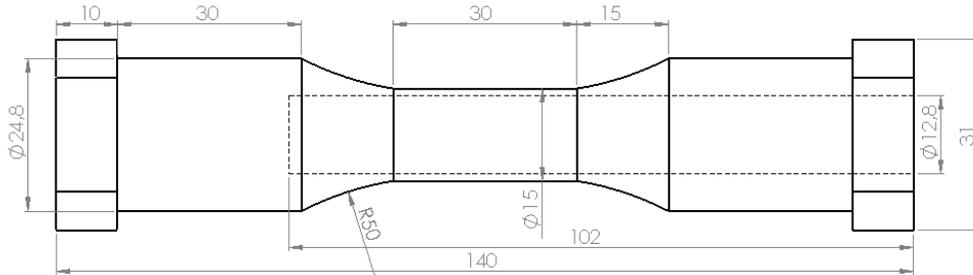
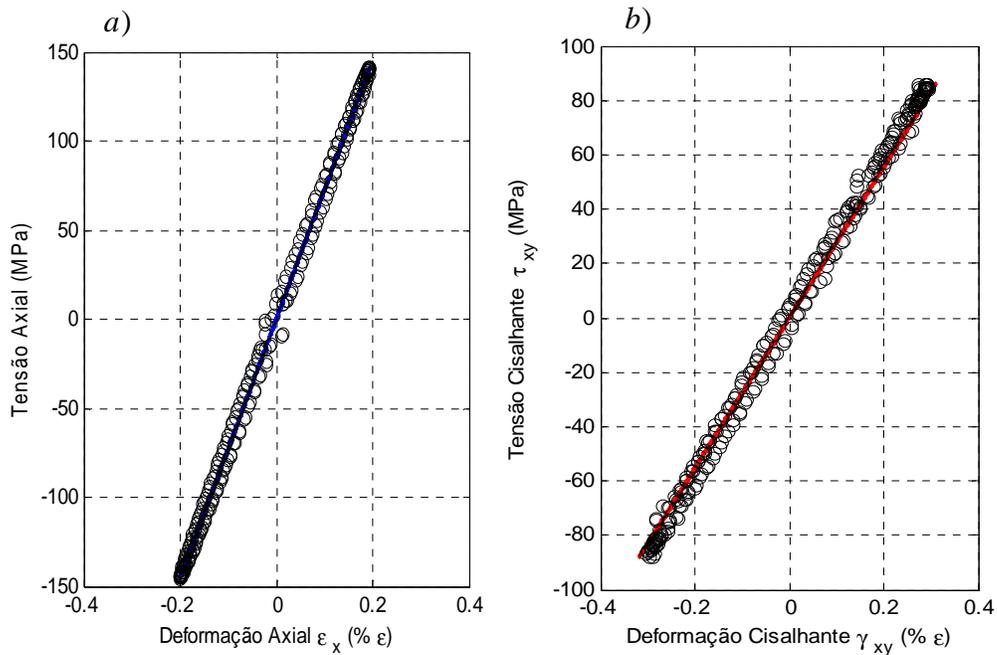


Figura 7.35 Forma e dimensões do corpo de prova - ensaio não proporcional.

No primeiro ensaio, o corpo de prova de alumínio 7075 é submetido a uma carga de tração $\sigma_x(t) = 146,5 \cdot \sin(\omega t)$ MPa capaz de gerar uma deformação axial $\epsilon_x = 0,2\%$ e uma tensão cisalhante $\tau_{xy}(t) = 84,5 \cdot \cos(\omega t)$ defasada 90° com fator de não-proporcionalidade $F_{NP} = 1$, que sempre gera encruamento não-proporcional.



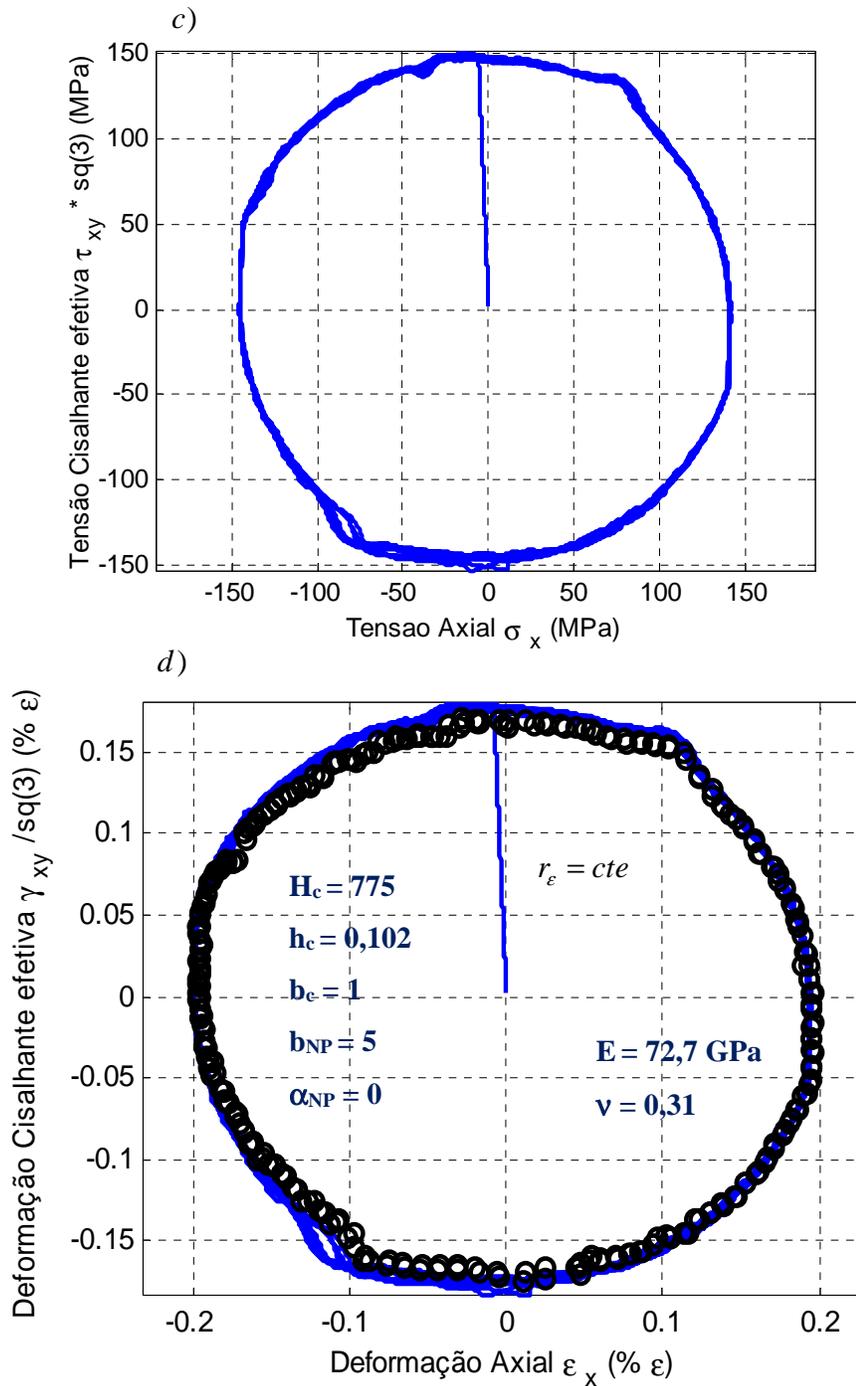
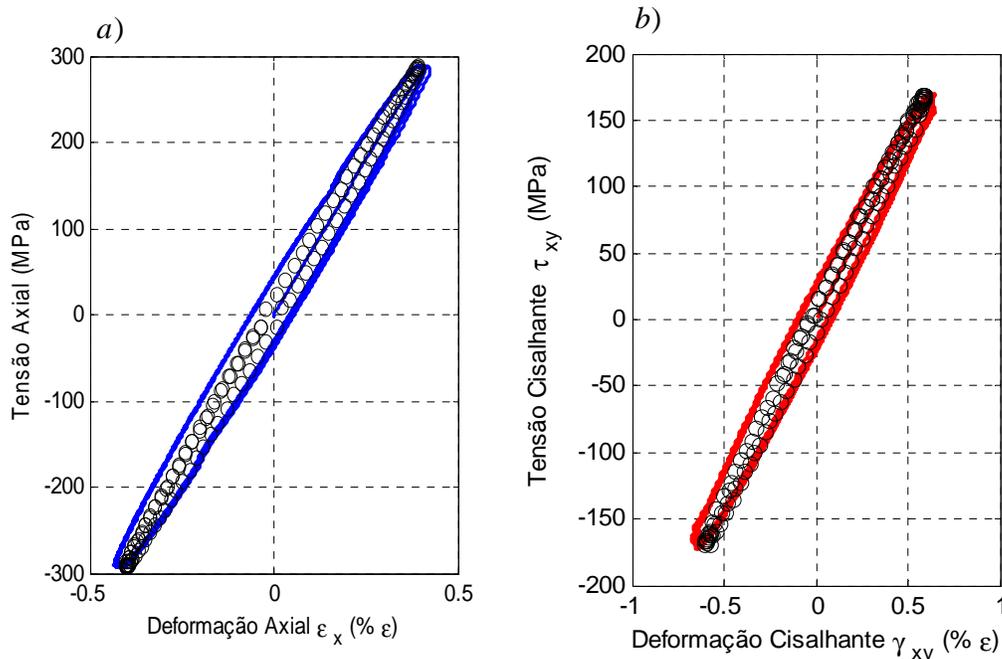


Figura 7.36 Ensaio EN do Al-7075 com $\epsilon_x = 0,2 \%$ a) laço histerese σ_x vs ϵ_x , b) laço histerese τ_{xy} vs γ_{xy} , c) trajetória das tensões σ_x vs $\tau_{xy} \cdot \sqrt{3}$, d) trajetória de deformação ϵ_x vs $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$.

Na Figura 7.36 a) apresenta-se a curva σ_x vs ϵ_x gerada pela carga axial. A linha sólida representa a curva obtida pelo simulador, e círculos representam a curva

tensão-deformação obtidos experimentalmente na MTT; na Figura 7.36 b) apresenta-se a curva τ_{xy} vs γ_{xy} gerada pelo momento torçor, onde a linha sólida representa a curva obtida pelo simulador e os círculos a curva obtida experimentalmente. Na Figura 7.36 c) apresenta-se a trajetória gerada pelas tensões aplicadas ao corpo de prova, com pequenas oscilações na curva obtida, devido às não-linearidades da MTT. Esta história de carregamentos será utilizada, posteriormente, no simulador com o objetivo de gerar a curva de deformação. Finalmente, na Figura 7.36 d) apresenta-se a trajetória de deformação ε_x vs $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$ onde a linha sólida representa a trajetória de deformação gerada pelo simulador e os círculos representam a trajetória obtida experimentalmente no ensaio. Pode-se observar que o ensaio de encruamento não-proporcional do alumínio 7075 para uma deformação de $\varepsilon_x = 0,2 \%$ não apresenta encruamento não-proporcional e mantém-se uma trajetória de deformação constante ao longo do ensaio.

Na figura 7.37 apresentam-se os resultados do ensaio de encruamento não-proporcional do alumínio 7075 para outro par de carregamento que gera uma deformação axial máxima de 0,4 %.



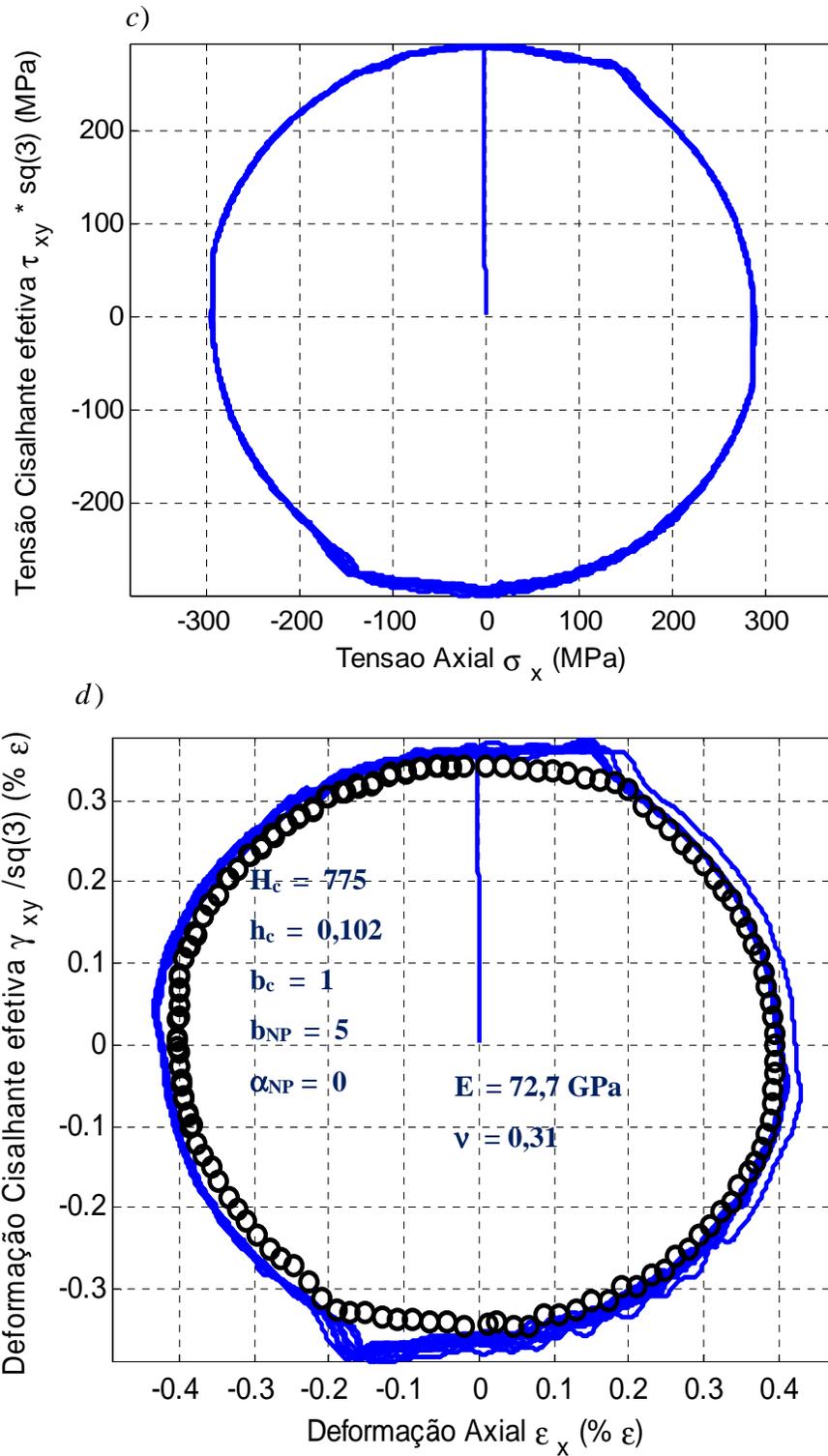


Figura 7.37 Ensaio EN do Al-7075 com $\epsilon_x = 0,4 \%$, a) laço histerese σ_x vs ϵ_x , b) laço histerese τ_{xy} vs γ_{xy} , c) trajetória das tensões σ_x vs $\tau_{xy} \cdot \sqrt{3}$, d) trajetória de deformação

$$\epsilon_x \text{ vs } \gamma_{xy} / \sqrt{3}.$$

Na Figura 7.38 apresenta-se a trajetória de deformação dos dois ensaios de encruamento NP apresentados anteriormente. Pode-se observar que nos dois ensaios a trajetória de deformação mantém-se constante e não apresenta encruamento NP. Isto se dá devido que as ligas de alumínio apresentam alta energia de empilhamento de falhas e discordâncias pouco espaçadas, nas quais as bandas de deslizamento cruzadas ocorrem de maneira natural mesmo sobre história de carregamento proporcional. Portanto, não apresenta diferença no encruamento NP.

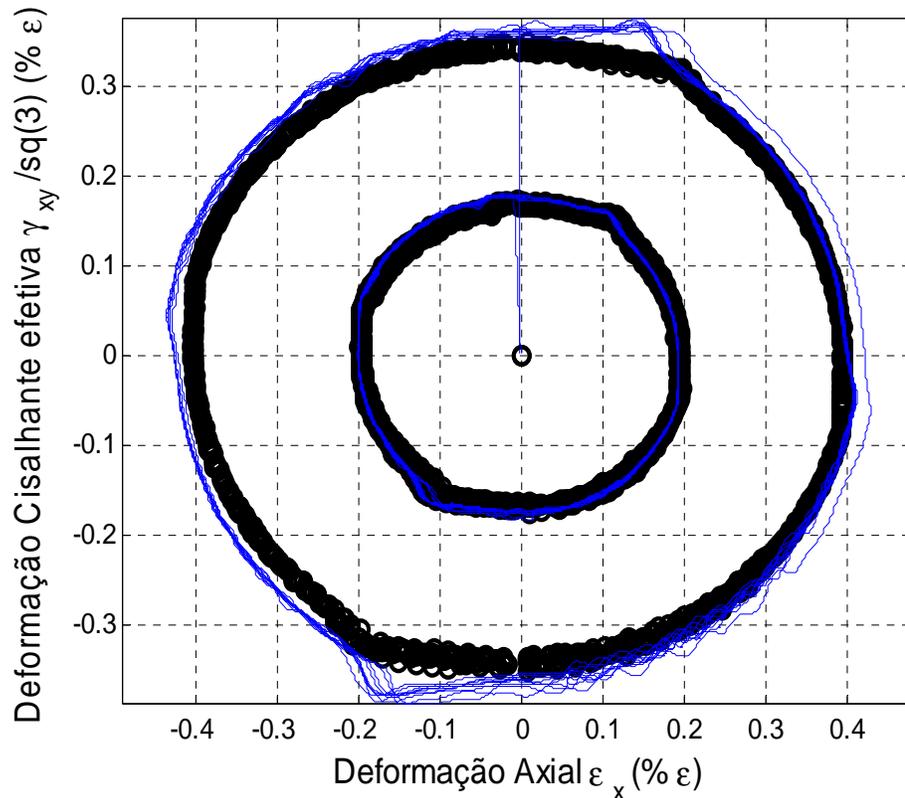


Figura 7.38 Trajetória de deformação ε_x vs $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$ no ensaio NP do alumínio 7075 para uma deformação de $\varepsilon_x = 0,2 \%$ e $\varepsilon_x = 0,4 \%$

7.3.4. Encruamento não-proporcional Aço Inox-316

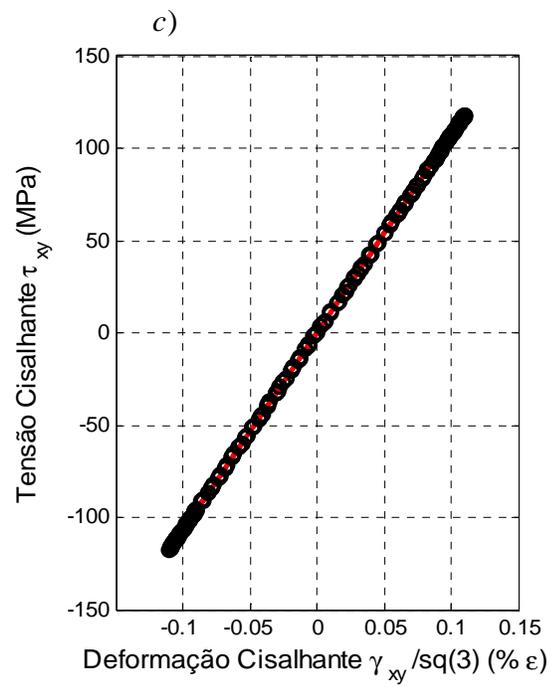
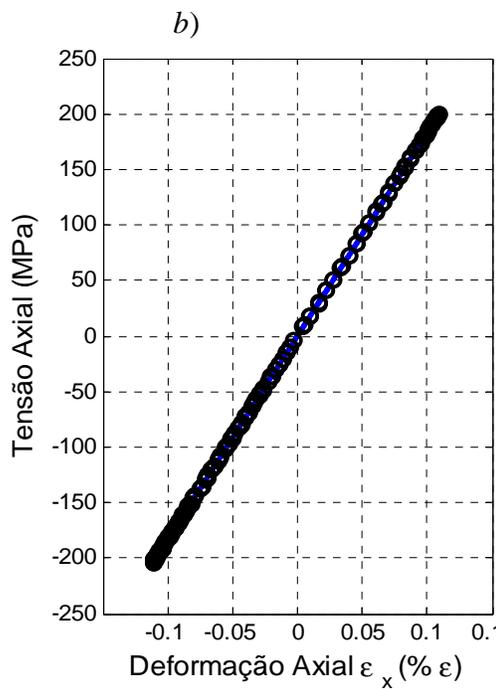
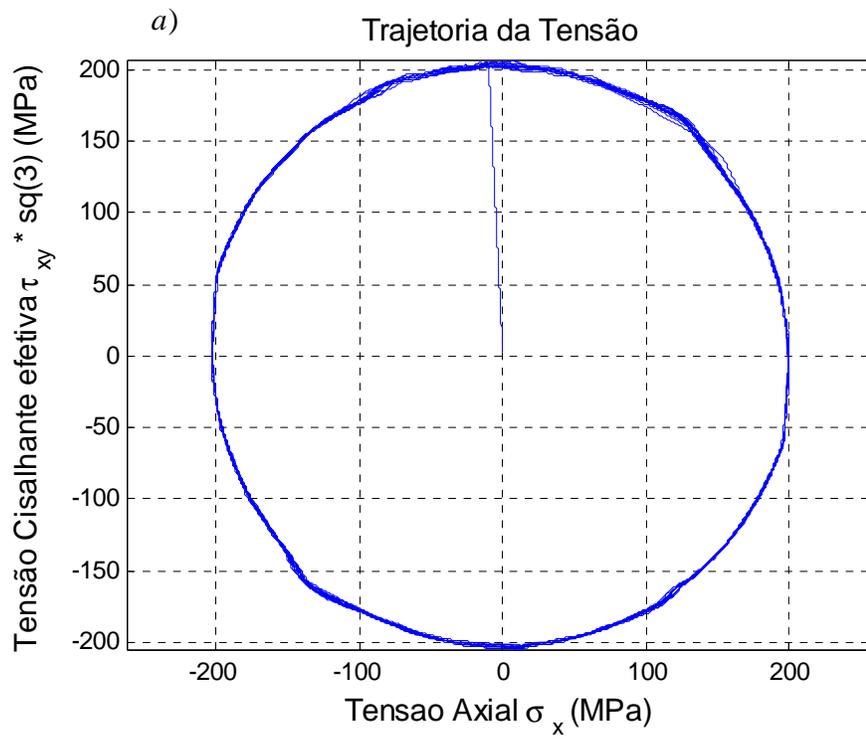
O outro material utilizado nos ensaios de encruamento não-proporcional foi o aço inox-316, que seguiu o mesmo procedimento do ensaio anterior, o corpo de prova tubular sendo submetido a uma história de carregamentos não proporcionais, sob controle de tensão. O corpo de prova tubular utilizado no ensaio tem diâmetro

interno de $\phi_i = 12,8$ mm, diâmetro externo de $\phi_e = 14,9$ mm e comprimento $L_c = 140$ mm (vide Figura 7.35). Suas deformações ε_x , ε_y e γ_{xy} geradas durante o ensaio foram medidas utilizando o módulo de correlação de imagens VIC-3D da *Correlated Solutions*.

As tensões axiais utilizadas no ensaio foram determinadas considerando-se a curva dos laços de histerese estabelecido do aço inox-316 e apresentados na Figura 7.33, tomando-se como referência uma deformação axial desejada. A tensão cisalhante determina-se a partir da tensão axial, definida como a tensão que produz a mesma tensão de Mises, que a tensão axial sob tração pura. Assim, para o primeiro ensaio escolheu-se uma tensão axial $\sigma_x(t) = 200.\sin(\omega t)$ MPa capaz de gerar uma deformação axial $\varepsilon_x = 0,1\%$ e uma tensão cisalhante $\tau_{xy}(t) = 115.\cos(\omega t)$ MPa, defasadas 90° , gerando-se uma história de carregamentos não proporcionais sobre o corpo de prova, conforme se apresenta na Figura 7.39 a).

Na Figura 7.39 b), apresenta-se a curva σ_x vs ε_x obtida no ensaio, onde a linha contínua representa a curva obtida no simulador e, os círculos representam a curva obtida experimentalmente, ao longo do ensaio. A deformação máxima obtida foi $\Delta\varepsilon_{\max} / 2 = 0,11\%$, com um comportamento linear elástico e sem encruamento. A Figura 7.39 c) apresenta a curva τ_{xy} vs $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$, a linha contínua representa a curva obtida no simulador e os círculos a curva obtida experimentalmente ao longo do ensaio. A deformação cisalhante máxima obtida foi de $\Delta\gamma_{xy} / 2 \cong 0,19\%$ e o comportamento foi linear elástico sem encruamento.

A Figura 7.39 d) apresenta a trajetória de deformação ε_x vs $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$ obtida ao longo do ensaio, onde a linha contínua representa a trajetória de deformação obtida no simulador para a história de carregamentos não-proporcionais e, os círculos representam a trajetória de deformação obtida experimentalmente no ensaio. Observa-se que a história de carregamentos não-proporcionais escolhidos no primeiro ensaio não gera encruamento no material.



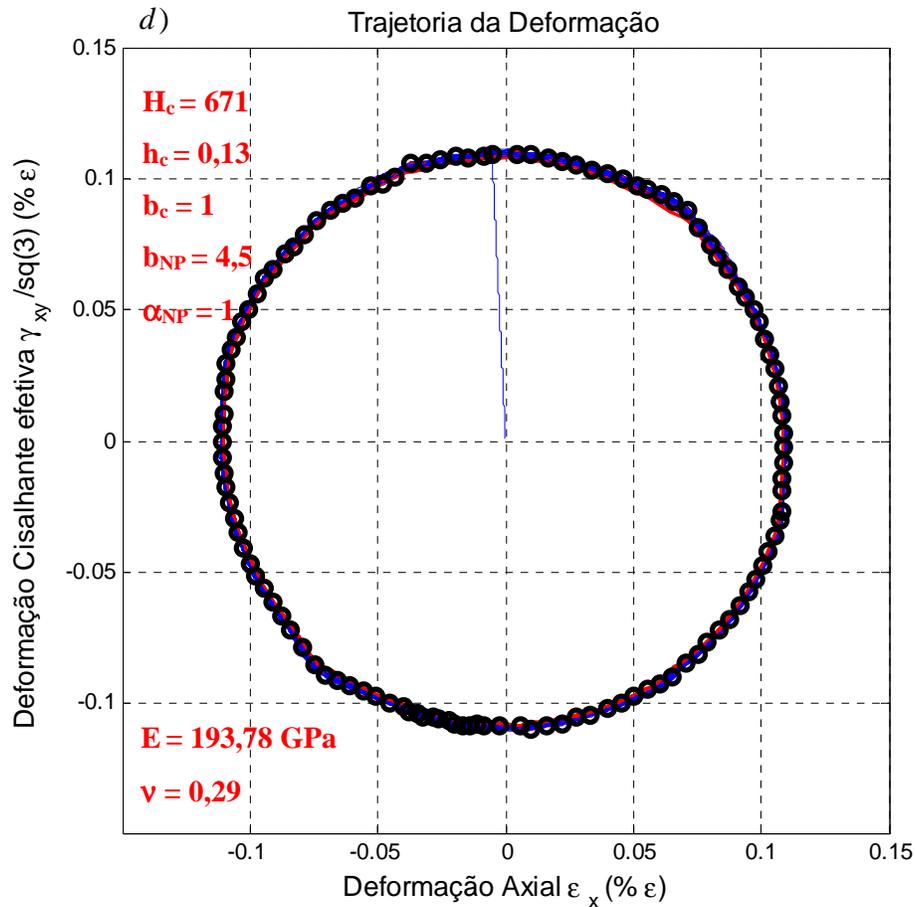


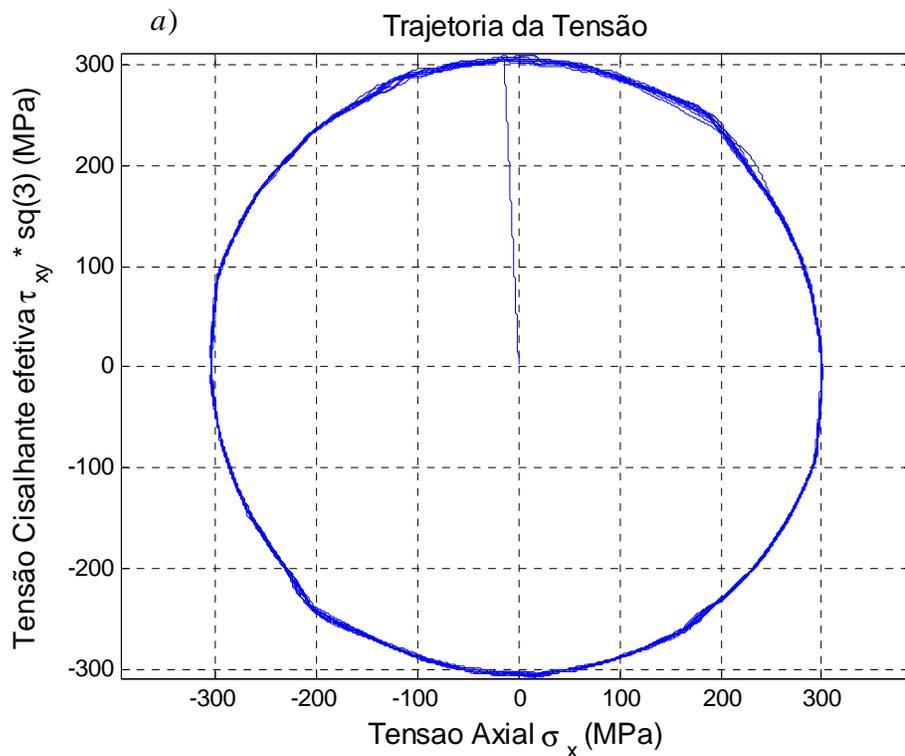
Figura 7.39 Ensaio EN do Inox-316 com $\epsilon_x = 0,1 \%$, a) trajetória das tensões σ_x vs $\tau_{xy} \cdot \sqrt{3}$, b) laço histerese σ_x vs ϵ_x , c) laço histerese τ_{xy} vs γ_{xy} , d) trajetória de deformação ϵ_x vs $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$.

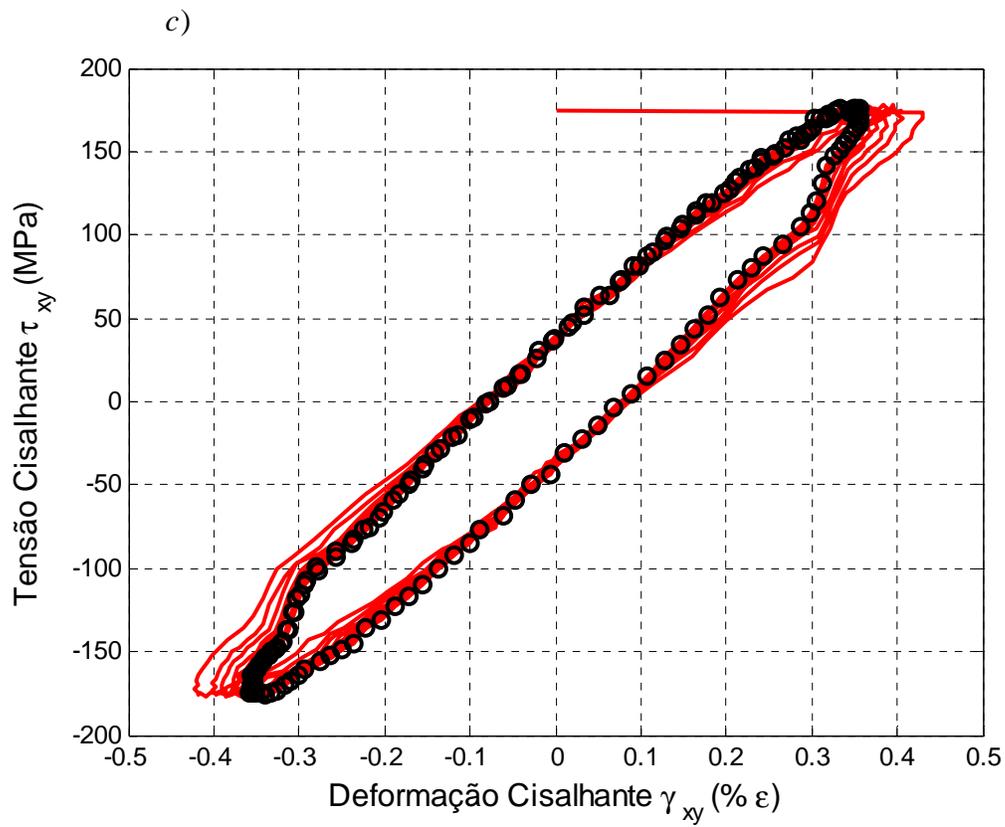
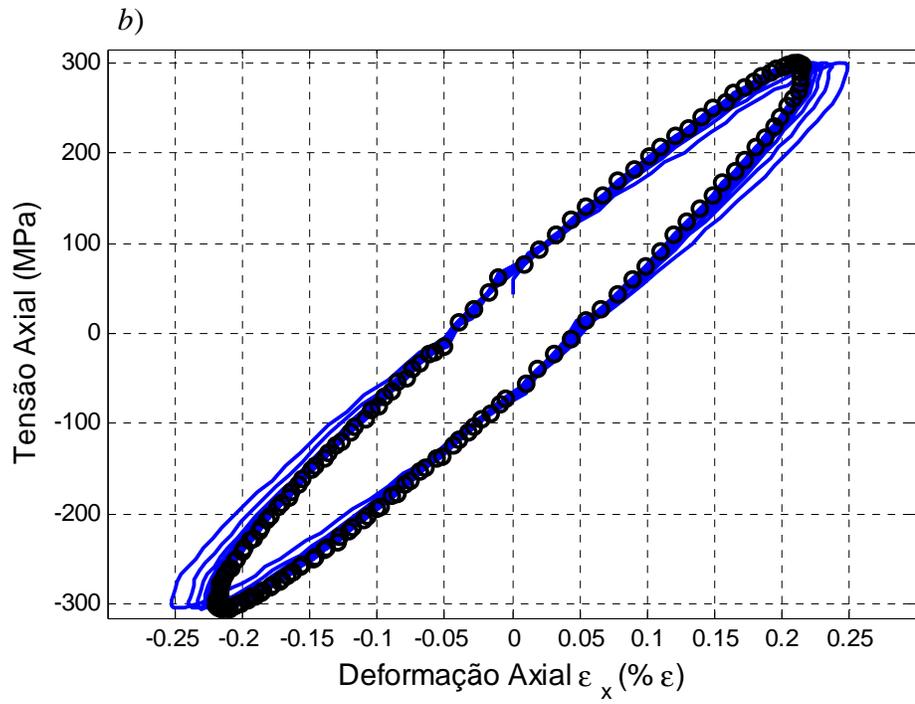
Para o segundo ensaio, escolheu-se outro par de carregamentos não-proporcionais para uma deformação axial $\epsilon_x = 0,25 \%$, considerando-se como referência os laços de histerese estabelecidos do aço inox-316 (vide Figura 7.33). Portanto, no segundo ensaio escolheu-se uma tensão axial de $\sigma_x(t) = 300 \cdot \sin(\omega t)$ MPa, capaz de gerar uma deformação axial $\epsilon_x = 0,25 \%$ e sua correspondente tensão cisalhante $\tau_{xy}(t) = 173 \cdot \cos(\omega t)$ MPa, defasadas 90° , gerando-se uma história de carregamentos não-proporcionais, como mostra a Figura 7.40 (a). Na Figura 7.40 (b) apresenta-se a curva σ_x vs ϵ_x obtida no ensaio para os novos carregamentos. Mostra-se que no primeiro ciclo foi gerada uma deformação axial máxima de

$\Delta\varepsilon_{\max} / 2 = 0,25 \%$ e, após 12 ciclos, estabeleceu-se para uma deformação axial de $\Delta\varepsilon / 2 = 0,215 \%$.

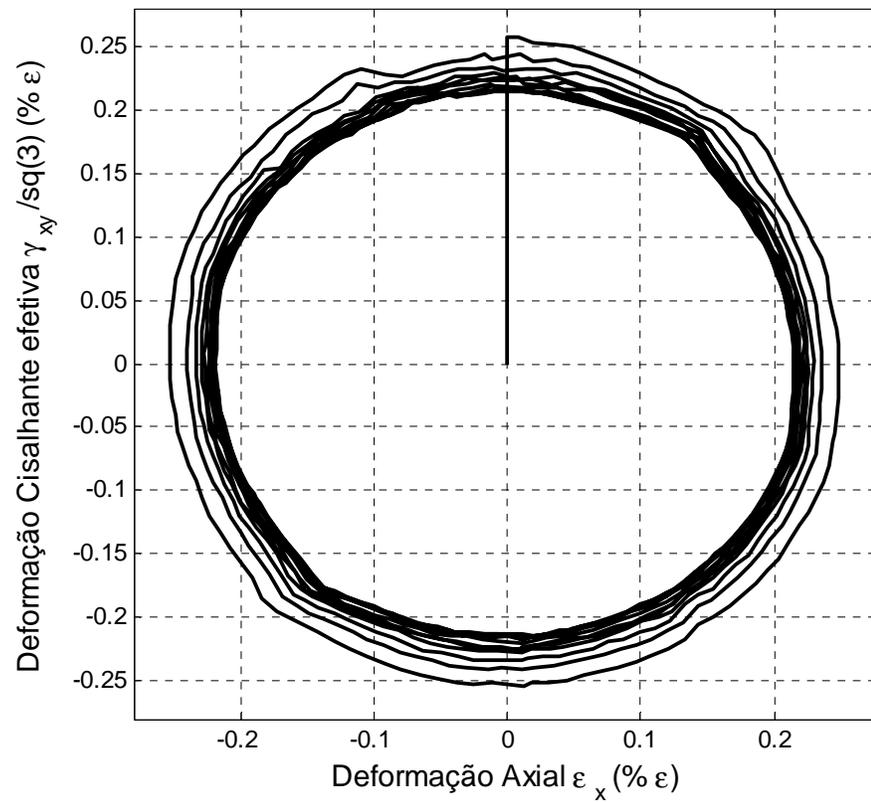
Já na Figura 7.40 (c) apresenta-se a curva τ_{xy} vs $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$. No primeiro ciclo, obteve-se uma deformação cisalhante máxima de $\Delta\gamma_{xy} / 2 = 0,434 \%$ e em seguida houve encruamento a cada ciclo. Após 12 ciclos estabilizou-se em uma deformação cisalhante de $\Delta\gamma_{xy} / 2 = 0,364 \%$.

Na Figura 7.40 d) apresenta-se a trajetória de deformação ε_x vs $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$ obtida experimentalmente na MTT. Na Figura 7.40 e) apresenta-se a trajetória da deformação obtida através do simulador para a história de carregamentos NP real obtida experimentalmente. Na Figura 7.40 f), a linha contínua representa a trajetória de deformação estabilizada obtida pelo simulador, e os círculos os obtidos experimentalmente no ensaio.

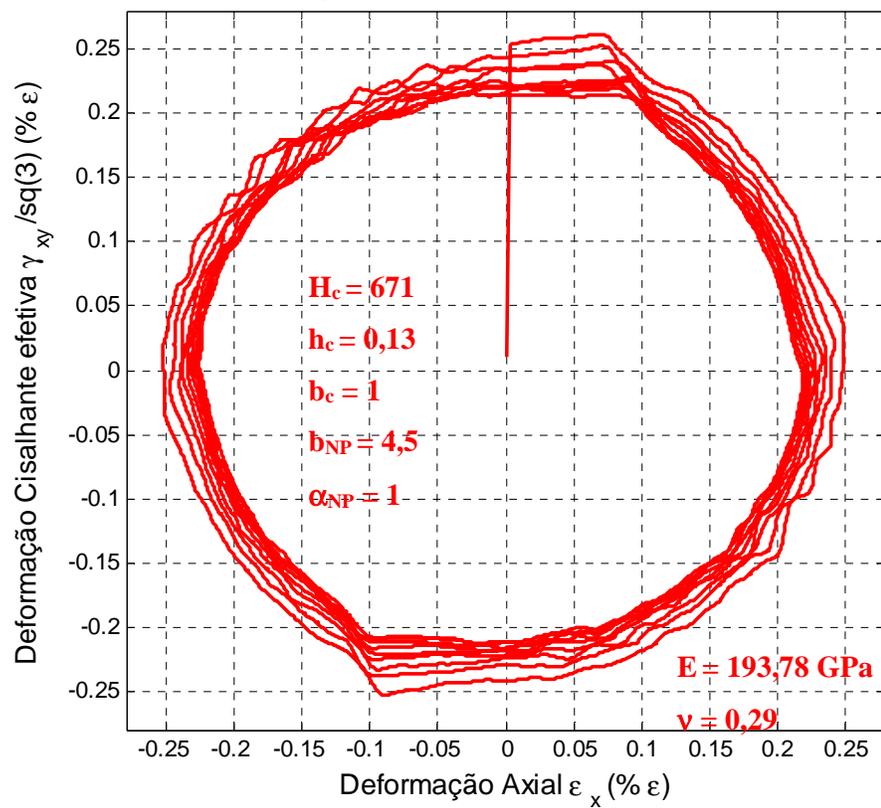




d) Trajetória da Deformação experimental



e) Trajetória da Deformação Simulado



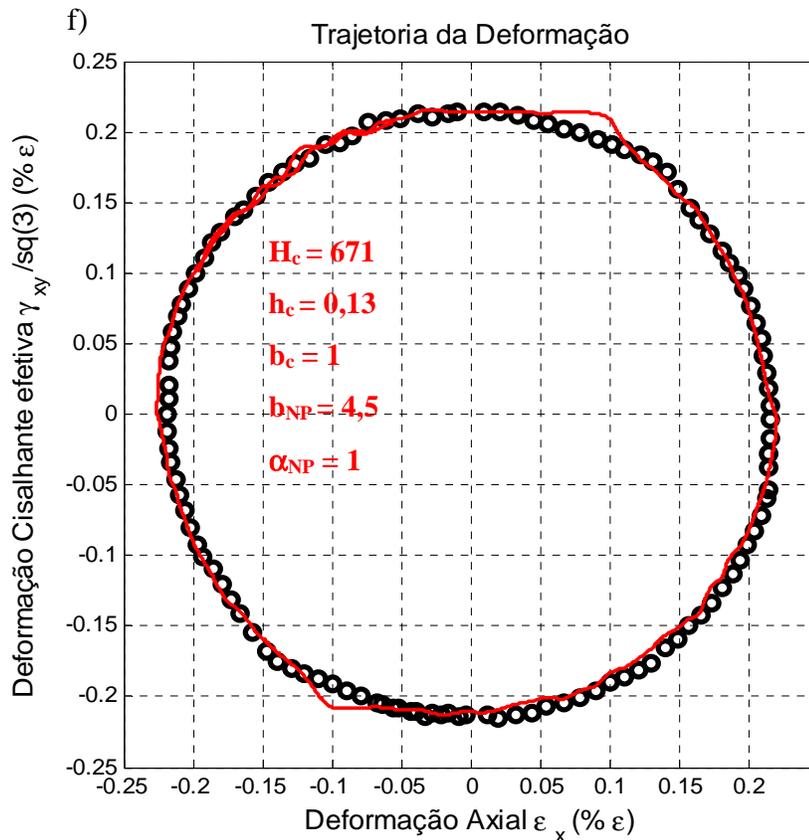


Figura 7.40 Ensaio EN do Inox-316 com $\epsilon_x = 0,25$ % , a) trajetória das tensões σ_x vs $\tau_{xy} \cdot \sqrt{3}$, b) laço histerese σ_x vs ϵ_x , c) laço histerese τ_{xy} vs γ_{xy} , d) trajetória de deformação experimental ϵ_x vs $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$, e) trajetória de deformação simulada ϵ_x vs $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$, f) trajetória de deformação estabilizada, experimental e simulada.

A partir das trajetórias estabilizadas, pode-se afirmar que o simulador modela razoavelmente o fenômeno de encruamento NP, já que ambas as curvas estabilizam-se numa deformação de $(\Delta\epsilon / 2 \cong 0,215$ %).

Na Figura 7.41 (a) apresenta-se o comportamento da deformação axial máxima $\Delta\epsilon_x / 2$ dos laços de histerese ao longo do ensaio. Por outro lado, na Figura 7.41 (b) apresenta-se o comportamento da deformação cisalhante máxima $\Delta\gamma_{xy} / 2$ ao longo do ensaio. Além disso, pode-se observar que o aço inox-316, submetido a uma história de carregamentos não-proporcionais que geram deformação plástica, apresenta o fenômeno de encruamento não-proporcional, e

após 12 ciclos estabiliza em uma deformação menor.

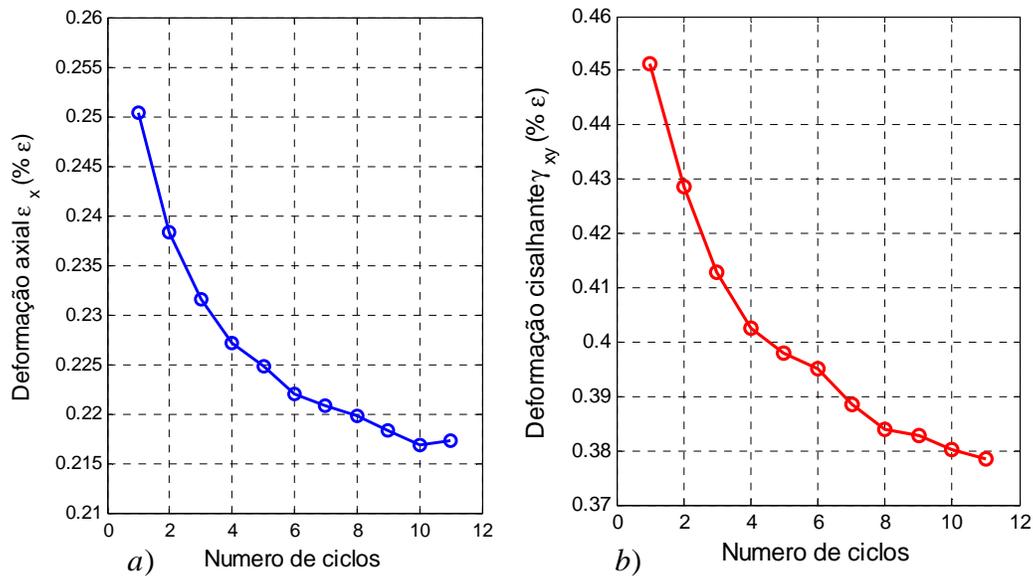


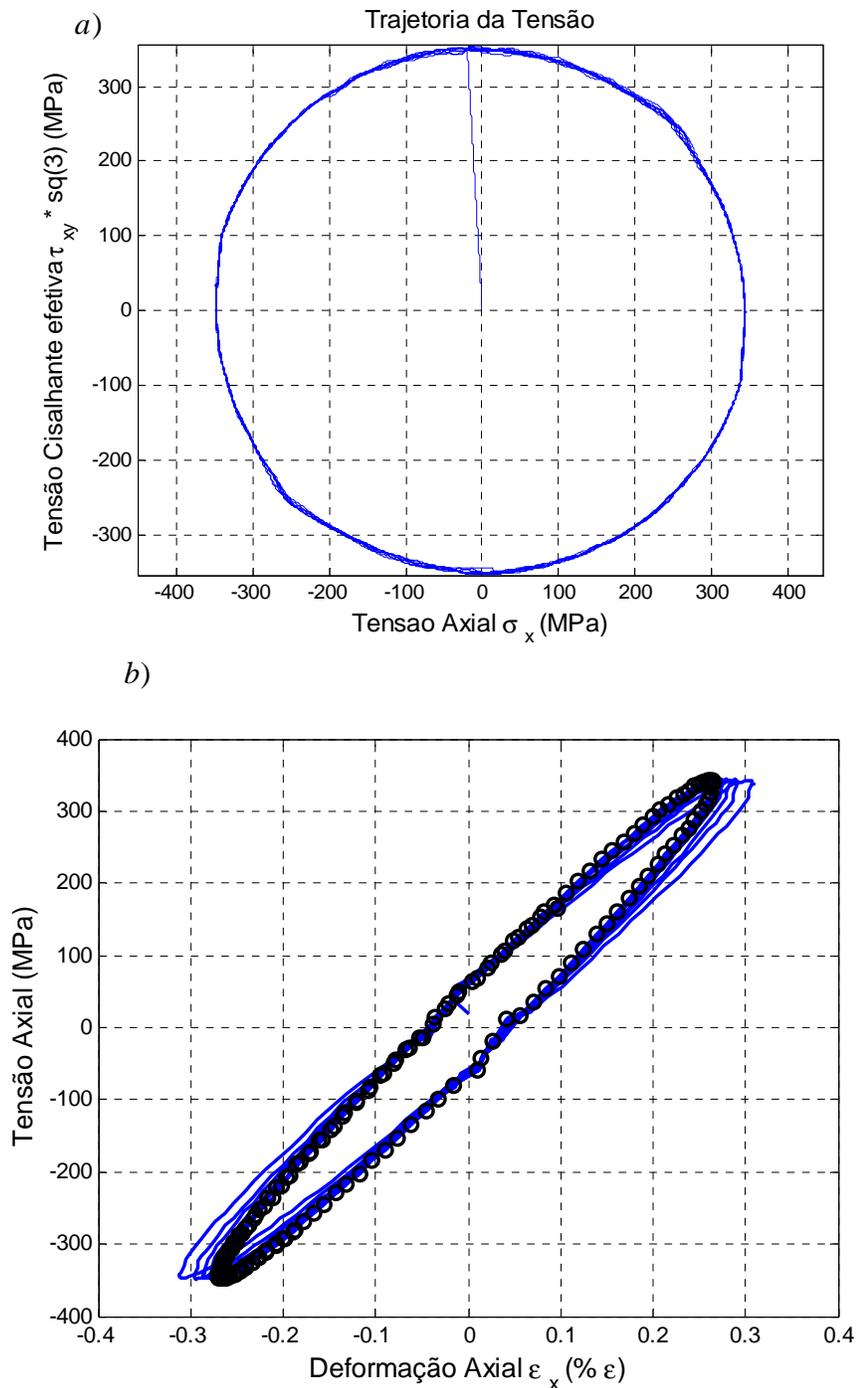
Figura 7.41 a) Encruamento NP da deformação axial ε_x e b) encruamento NP da deformação cisalhante $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$.

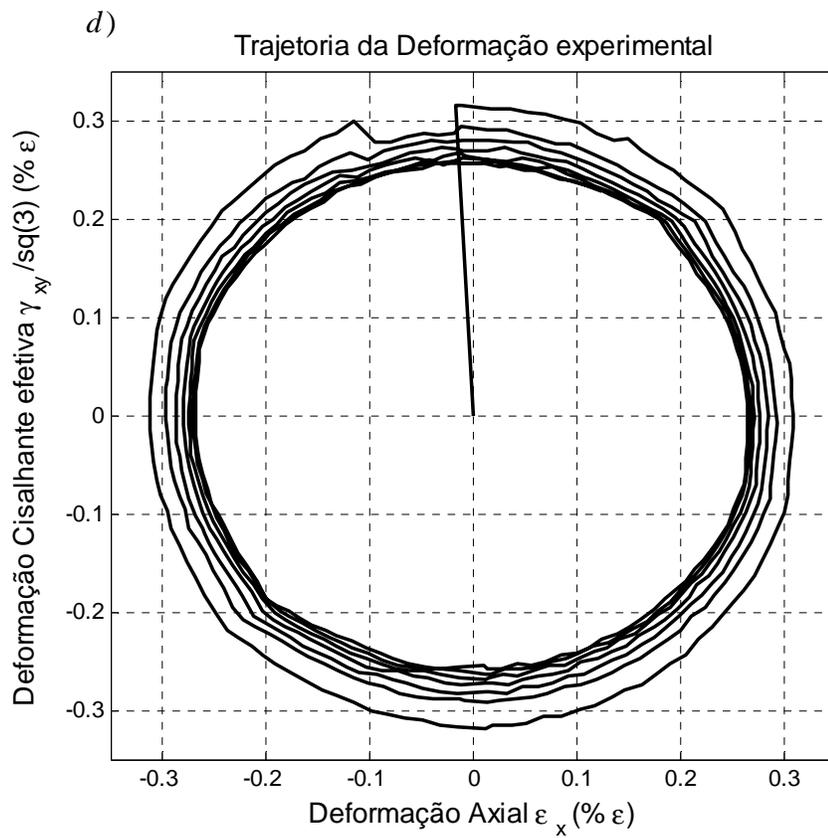
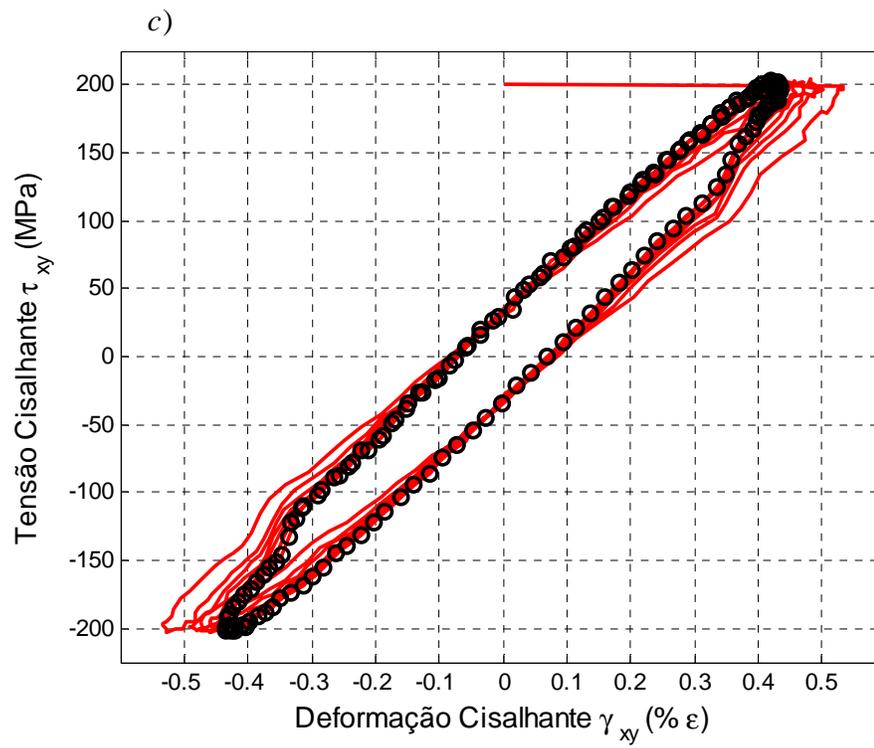
Para o terceiro ensaio, escolheu-se outro par de carregamentos NP, capaz de gerar uma deformação axial $\Delta\varepsilon_x / 2 \cong 0.31\%$. Assim, na Figura 7.42 a) apresenta-se a trajetória de tensão gerada pela tensão axial $\sigma_x(t) = 342.\sin(\omega t)$ MPa e a tensão cisalhante $\tau_{xy}(t) = 200.\cos(\omega t)$ MPa escolhida. Na Figura 7.42 (b) apresenta-se o laço de histerese σ_x vs ε_x sobre o controle de tensão obtida no ensaio. Mostra-se que no primeiro ciclo o corpo de prova experimentou uma deformação axial $\Delta\varepsilon_x / 2 \cong 0.31\%$, e foi encruando a cada ciclo até se estabilizar em $\Delta\varepsilon_x / 2 \cong 0.27\%$.

A Figura 7.42 (c) apresenta a curva τ_{xy} vs $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$. No primeiro ciclo obtém-se uma deformação cisalhante máxima de $\Delta\gamma_{xy} / 2 = 0.54\%$ que experimenta encruamento a cada ciclo, prosseguindo até 12 ciclos, onde se estabiliza em uma deformação cisalhante $\Delta\gamma_{xy} / 2 = 0.435\%$.

Na Figura 7.42 d) apresenta-se a trajetória de deformação ε_x vs $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$ obtida experimentalmente na MTT e a Figura 7.42 e) apresenta a trajetória de deformação ε_x vs $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$ obtida pelo simulador para a história NP medida no

ensaio. Na Figura 7.42 f) apresenta-se a trajetória de deformação ε_x vs $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$ estabilizada, onde a linha contínua representa a trajetória obtida pelo simulador e a obtida experimentalmente na MTT. Assim, as trajetórias de deformação, ao longo do ensaio, apresentaram o fenômeno de encruamento NP e convergem para uma deformação de $\Delta\varepsilon / 2 = 0,26 \%$.





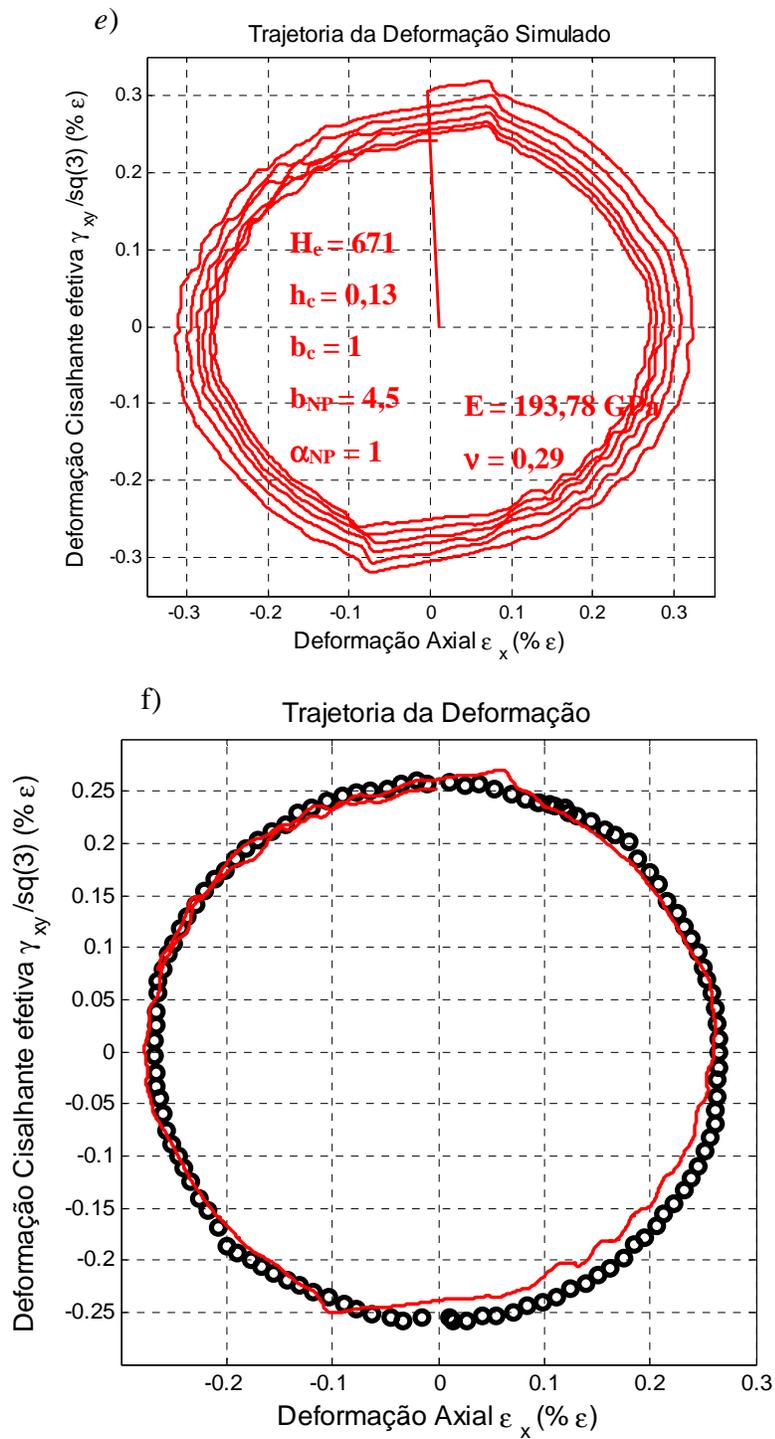


Figura 7.42 Ensaio EN do Incox-316 com $\epsilon_x = 0,31 \%$, a) trajetória das tensões σ_x vs $\tau_{xy} \cdot \sqrt{3}$, b) laço histerese σ_x vs ϵ_x , c) laço histerese τ_{xy} vs γ_{xy} , d) trajetória de deformação experimental ϵ_x vs $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$, e) trajetória de deformação simulada ϵ_x vs $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$, f) trajetória de deformação estabilizada experimental e simulado.

Trajetória da Deformação Estabilizado

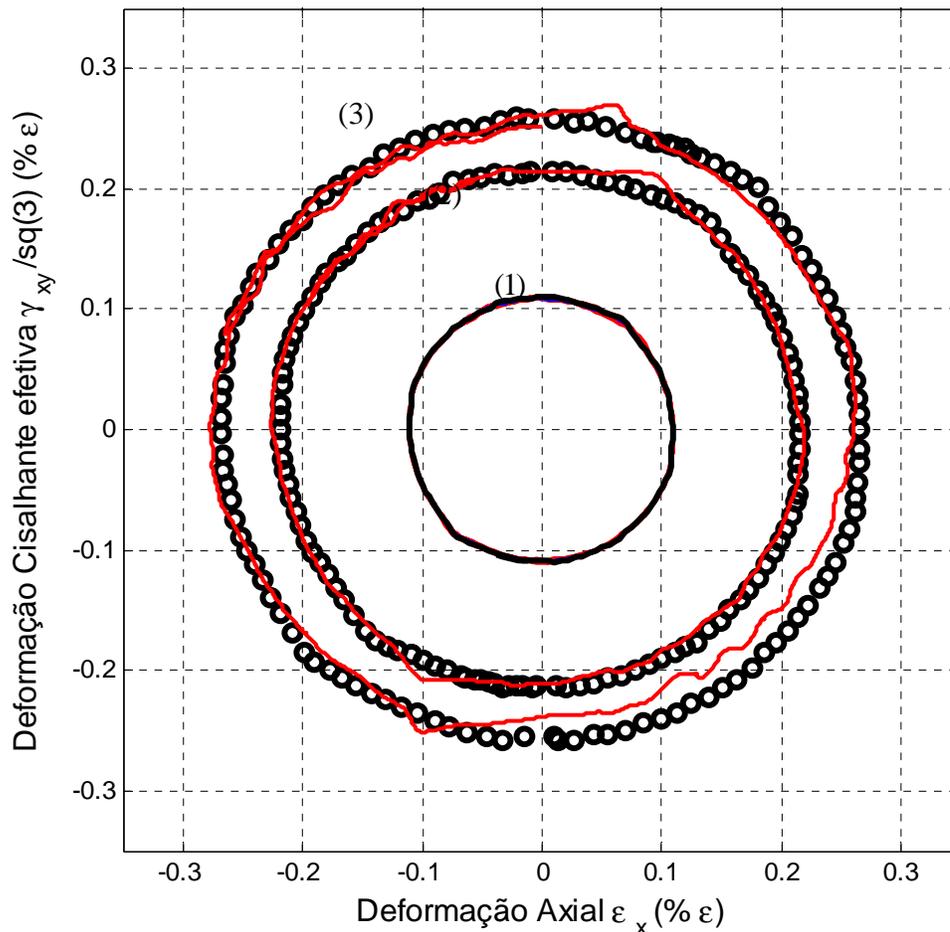


Figura 7.43 Trajetória de deformação ε_x vs $\gamma_{xy} / \sqrt{3}$ no ensaio de encruamento NP do Aço inox-316 com $\varepsilon_x = 0,1\%$, $\varepsilon_x = 0,25\%$ e $\varepsilon_x = 0,31\%$.

Na figura 7.43 mostram-se as trajetórias da deformação, estabilizadas para as histórias de encruamento NP, no ensaio de encruamento NP.

Na figura 7.44 mostra-se que no primeiro ensaio (1) o material não apresenta encruamento, entretanto, no segundo (2) e terceiro (3) ensaio o material apresenta encruamento NP. Isto acontece devido ao aço inox-316 apresentar encruamento NP, por sua baixa energia de empilhamento de falhas e discordâncias bem espaçadas, onde as bandas de deslizamento geradas pelas histórias proporcionais são sempre planas. Nestes materiais, os carregamentos NP geram bandas de deslizamento

cruzadas em diversas direções, gerando-se encruamento no material. Este fenômeno não ocorre para $\varepsilon_x = 0,1\%$ porque o comportamento ainda era linear elástico.

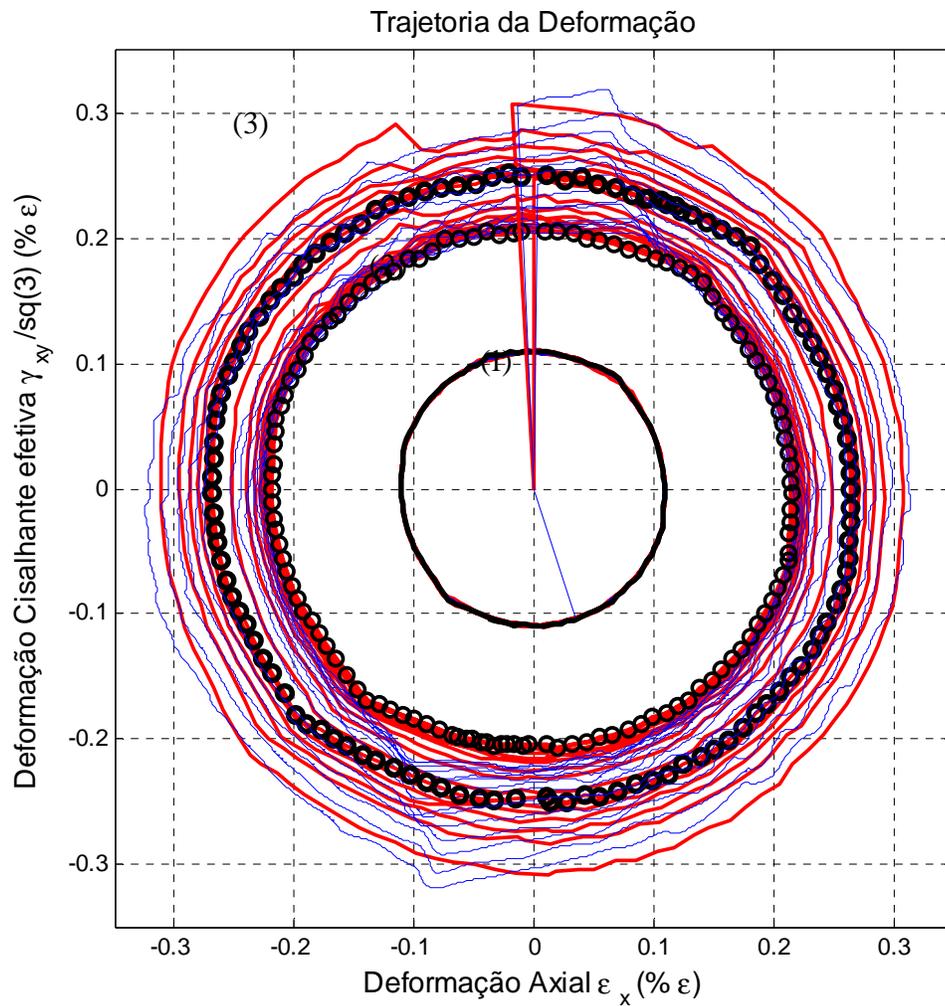


Figura 7.44 Trajetória de deformação ε_x vs $\gamma_{xy}/\sqrt{3}$ no ensaio de encruamento NP do

Aço inox-316 com $\varepsilon_x = 0,1\%$, $\varepsilon_x = 0,25\%$ e $\varepsilon_x = 0,31\%$