

Capítulo 1

Heterogeneidades de deformação: uma visão macroscópica

P. R. Cetlin, C. A. dos Santos, M. T. P. Aguiar

1. Introdução

2. A Deformação Macroscopicamente Homogênea

2.1 A tração pura

2.2 A compressão pura

3. Heterogeneidades Macroscópicas de Deformação Inerentes ao Tipo de Carregamento

3.1 A torção

3.2 O dobramento

4. Heterogeneidades Macroscópicas de Deformação Associadas à Formação de Estricções

5. Heterogeneidades Macroscópicas de Deformação Associadas ao Atrito Matriz/Material

6. Heterogeneidades Macroscópicas de Deformação Associadas à Geometria do Processo

7. Heterogeneidades Macroscópicas de Deformação Associadas à Geometria do Processo e ao Atrito Matriz/Material

1. INTRODUÇÃO

Boa parte da importância dos metais para o ser humano deriva-se de sua capacidade de sofrer deformação plástica através da aplicação de esforços. A obtenção de componentes com as mais variadas formas através desta técnica ocorre há mais de dois mil anos, progredindo desde os antigos ferreiros até as mais modernas forjarias, laminações, trefilarias, etc..

É importante lembrar que a deformação plástica não provoca somente a mudança de forma e de dimensões de componentes específicos, mas também importantes modificações nas propriedades dos materiais que estão sendo processados. No caso da deformação a frio, comumente ocorre um aumento na resistência mecânica (encruamento), acompanhado de queda na ductilidade e eventual aparecimento de trincas. Na deformação a quente, observam-se alterações microestruturais envolvendo processos de restauração estática e/ou dinâmica, precipitação, transformação de fases, etc.. Estes, pôr sua vez, correspondem a alterações nas propriedades dos produtos obtidos.

Do ponto de vista técnico, é importante quantificar o efeito da deformação plástica durante um processamento através do grau de deformação, sua velocidade, temperatura e história de deformação ("strain path"). Uma das dificuldades inerentes nessa quantificação é o grau de heterogeneidade dessas variáveis em um material durante o processamento. Essa heterogeneidade ocorre desde o nível macroscópico até o sub-microscópico. Isso traz profundas consequências sobre os resultados obtidos, especialmente do ponto de vista das propriedades finais atingidas.

O objetivo do presente trabalho é apresentar uma análise das heterogeneidades macroscópicas de deformação durante o processamento envolvendo a deformação plástica.

2. A DEFORMAÇÃO MACROSCOPICAMENTE HOMOGENEA

Inicialmente, apresentam-se duas situações onde, em princípio, poderia ser obtida deformação homogênea: a tração e a compressão puras.

2.1 - A tração pura

A Figura 1 ilustra a tração de um material no estado inicial recozido, que foi alongado plasticamente desde o comprimento inicial L_0 até o comprimento final L_F , mantendo sua forma prismática. Neste caso, a área da seção transversal da barra diminui de A_0 para A_F , mantendo-se o volume da peça constante. A deformação é macroscopicamente homogênea ao longo de todo o comprimento do material, atingindo um valor ϵ dado por:

$$\epsilon = \ln \frac{L_F}{L_0} = \ln \frac{A_0}{A_F} \quad (1)$$

Na tração homogênea, a deformação em qualquer ponto do material pode ser avaliada considerando-se as dimensões externas da peça antes e depois da tração. A equação 1 também fornece a deformação efetiva ou equivalente de von Mises (ϵ_e) [1].

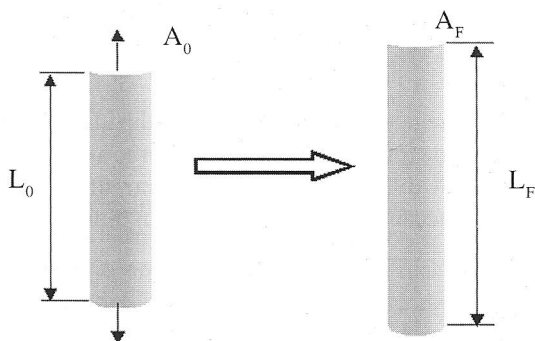


Figura 1: Dimensões iniciais e finais de uma barra cilíndrica submetida a tração pura.

2.2 - A compressão pura

Na compressão pura, o atrito entre as extremidades do material e as matrizes de compressão é nulo, como ilustrado na Figura 2.

A deformação na compressão mostrada na Figura 2 é essencialmente homogênea, desde que a relação L_0/D_0 seja menor que aproximadamente 1,5 (como será visto na seção 7). O cálculo da deformação é realizado através da equação 1, mas como o comprimento final é menor que o inicial, a deformação, neste caso, é negativa.

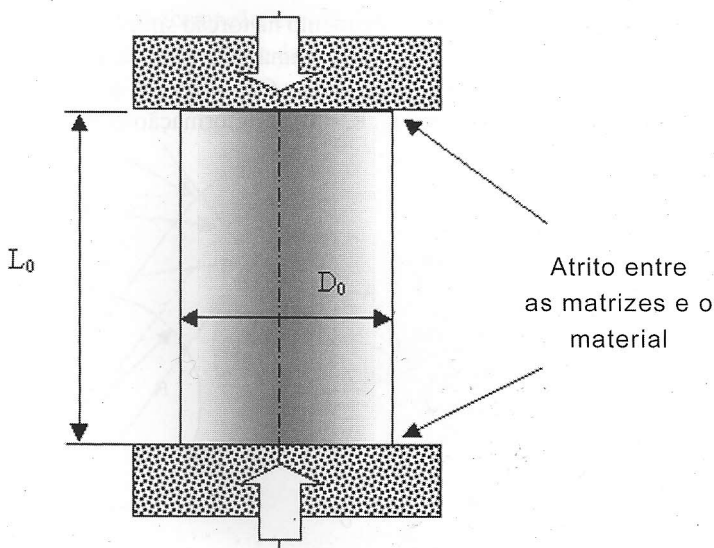


Figura 2: Compressão pura de uma barra cilíndrica.

3. HETEROGENEIDADES MACROSCÓPICAS DE DEFORMAÇÃO INERENTES AO TIPO DE CARREGAMENTO

Para alguns tipos de carregamento, a deformação induzida no material é inerentemente heterogênea. Esse é o caso da torção e da flexão, que serão analisados a seguir. Estas duas situações apresentam a vantagem de proporcionar um conhecimento exato da heterogeneidade de deformação, o que não se passa em muitos outros casos.

3.1 - A torção

A Figura 3 (a) mostra a torção de uma barra cilíndrica. A geratriz OB assume a posição OA após a torção, e a deformação na superfície pode ser calculada através do ângulo γ , dado por AB/L . A torção corresponde ao giro do raio da barra do ângulo θ , e a deformação de cisalhamento será dada pela expressão:

$$\frac{\gamma}{2} = \frac{AB}{2L} = \frac{R\theta}{2L} \quad (2)$$

Quando se consideram fibras mais internas da barra, ilustradas na Figura 3 (b) pelo material à distância "r" do centro da barra, a deformação será dada por

$$\frac{\gamma}{2} = \frac{r\theta}{2L} \quad (3)$$

Conclui-se que a deformação de cisalhamento na torção simples varia linearmente ao longo do raio da seção da barra. Ocorre assim uma heterogeneidade de deformação no material inerente ao tipo de carregamento utilizado. Considerando o estado de deformações vigente (deformações principais $\epsilon_1 = -\epsilon_3$, $\epsilon_2 = 0$), a deformação efetiva de von Mises na

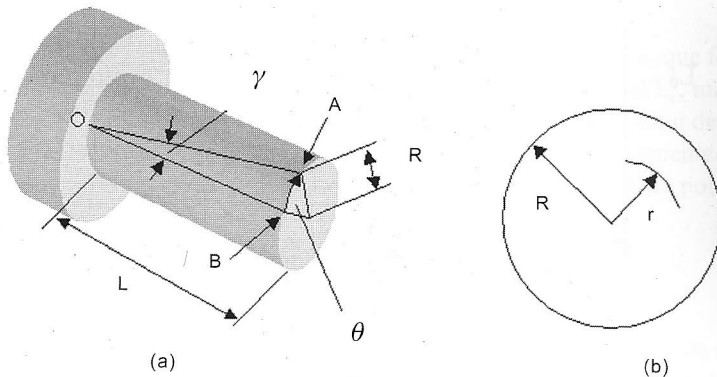


Figura 3: Parâmetros na deformação por torção.

torção é dada pela equação 4. Esta deformação também varia linearmente ao longo do raio da seção da barra.

$$\varepsilon_e = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} = \frac{r\theta}{\sqrt{3}L} \quad (4)$$

Foi admitido na exposição acima que o ângulo γ mostrado na Figura 3 (a) é constante ao longo do comprimento da barra cilíndrica. Se isso não ocorrer, a deformação variará não somente ao longo do raio do corpo sendo torcido, mas também ao longo de seu comprimento. A avaliação da deformação, neste caso, dependerá da medida experimental de γ ao longo da barra torcida.

Um caso bastante mais complexo que o apresentado acima é o da torção de barras com seções não circulares. A heterogeneidade de deformações é maior que a descrita acima, e bastante mais difícil de se avaliar analiticamente.

3.2 - O dobramento

A Figura 4 mostra o dobramento de uma barra de espessura L em torno de um cutelo de raio R , até um ângulo de abraçamento θ . A deformação linear na fibra externa da barra será positiva e dada por:

$$\varepsilon = \frac{AB - A'B'}{A'B'} = \frac{(R+L)\theta - (R+L/2)\theta}{(R+L/2)\theta} = \frac{L/2}{R+L/2} = \frac{1}{(2R+L)+1} \quad (5)$$

Observa-se que essa deformação cresce à medida que L aumenta e R diminui. A deformação varia linearmente ao longo da seção da barra, desde contrações na fibra interna

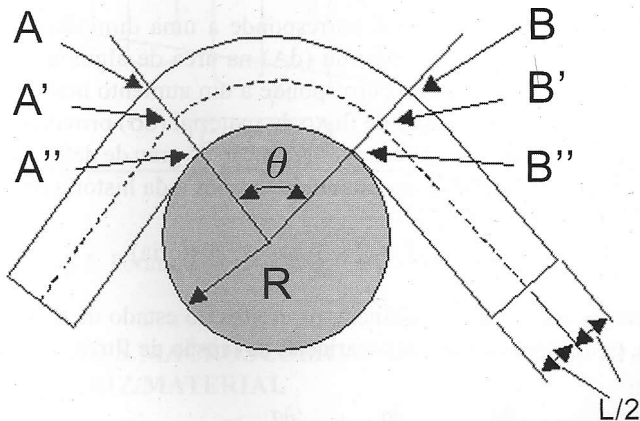


Figura 4: Parâmetros na deformação por dobramento.

até extensões na fibra externa. A deformação na fibra interna será negativa, mas em módulo idêntica à calculada através da equação 5.

No cálculo acima se admite que, para uma dada distância da fibra neutra, a deformação é constante ao longo de todo o arco correspondente ao ângulo de abraçamento θ . Isto não é estritamente verdade: observam-se deformações menores nos extremos da região dobrada que no seu centro. Outra heterogeneidade de deformação de importância é que o material fora da região dobrada não sofre deformações plásticas, a menos que se trate de operações de dobramento de todo o comprimento da barra, como, por exemplo, em operações de calandragem.

Um caso especial de dobramento pode estar associado à compressão axial de barras esbeltas. Caso a barra flambe elasticamente, a continuação da compressão implicará num dobramento da barra em alguma seção ao longo de seu comprimento.

4. HETEROGENEIDADES MACROSCÓPICAS DE DEFORMAÇÃO ASSOCIADAS À FORMAÇÃO DE ESTRICÇÕES

A diminuição da capacidade de encruamento de um metal submetido à tração pura leva à sua deformação em uma região localizada, com a formação de uma “estricção”. A situação está ilustrada na Figura 5, onde se observa que a estricção inicia-se no ponto de máxima carga (P) no ensaio. Ocorre assim uma notável heterogeneidade de deformação macroscópica no material, uma vez instalada a estricção. Uma operação industrial sujeita ao aparecimento de estricções é a conformação de chapas.

No momento da estricção $dP = d(\sigma \cdot A) = 0$, onde σ é a tensão de fluxo instantânea do material, e A é a área da seção transversal do material que está deformando. Essa equação pode ser desenvolvida da forma mostrada abaixo:

$$\sigma \cdot dA + A d\sigma = 0 \quad (6)$$

O primeiro termo da equação 6 corresponde a uma diminuição na capacidade de suportar carga, devido a um decréscimo (dA) na área de alguma seção transversal do corpo de prova. O segundo termo corresponde a um aumento nesta mesma capacidade, associada a um aumento na tensão de fluxo do material ($d\sigma$) provocado pelo decréscimo de área. A tensão de fluxo, por sua vez, é uma função do grau de deformação, da velocidade de deformação, da temperatura, do estado de tensões e da história de deformação:

$$\sigma = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, T, \text{Estado}, \text{Tensões}, \text{História}) \quad (7)$$

Desprezando, em primeira instância, os efeitos do estado de tensões e da história de deformação, pode-se escrever que a variação da tensão de fluxo será dada por [2] :

$$d\sigma = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}\right) d\epsilon + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}}\right) d\dot{\epsilon} + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T}\right) dT + \dots \quad (8)$$

O primeiro termo $(\partial\sigma/\partial\epsilon)$ descreve o efeito do encruamento, e é usualmente positivo. As estricções iniciam-se na tração pura quando este termo não consegue contrabalançar o efeito do amaciamento geométrico. O segundo termo $(\partial\sigma/\partial\dot{\epsilon})d\dot{\epsilon}$ é normalmente positivo e está relacionado com a sensibilidade da tensão de fluxo com a velocidade de deformação. Altos valores desta sensibilidade levam a estricções muito alongadas, provocando heterogeneidades de deformação suaves. O fenômeno é conhecido como “superplasticidade”. Finalmente, o terceiro termo $(\partial\sigma/\partial T)dT$ é normalmente negativo e contribui para uma maior instabilidade da deformação e formação facilitada de estricções. O termo é de especial importância nos casos de forte aquecimento localizado (deformação adiabática), que pode levar a catastróficas bandas de deformação.

Localizações de deformação semelhantes às da tração podem também ocorrer na compressão. Neste caso, há um endurecimento geométrico (ou seja, o termo σdA é positivo) e somente valores muito negativos da $Ad\sigma$ poderão tornar a deformação localizada. Quando isso se passa, certas seções transversais do corpo de prova sob compressão tendem a deformar-se preferencialmente, ficando assim com maior área da seção transversal que outras. Situações semelhantes podem, obviamente, ser observadas em outros tipos de solitação, como a torção, dobramento, etc..

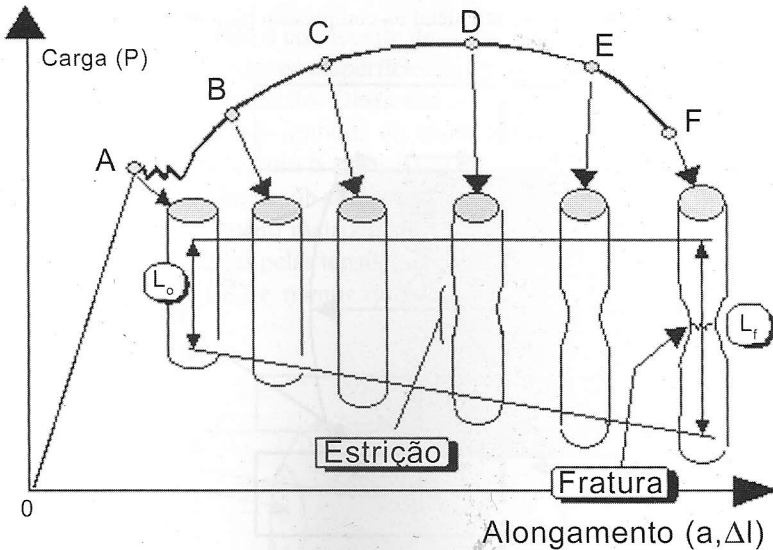


Figura 5: Formação de estricções num ensaio de tração.

5. HETEROGENEIDADES MACROSCÓPICAS DE DEFORMAÇÃO ASSOCIADAS AO ATRITO MATRIZ/MATERIAL

A Figura 6 ilustra a compressão de um cilindro de metal, desde os comprimentos e diâmetro iniciais L_0 e D_0 , respectivamente, até os comprimentos e diâmetro final L_f e D_f .

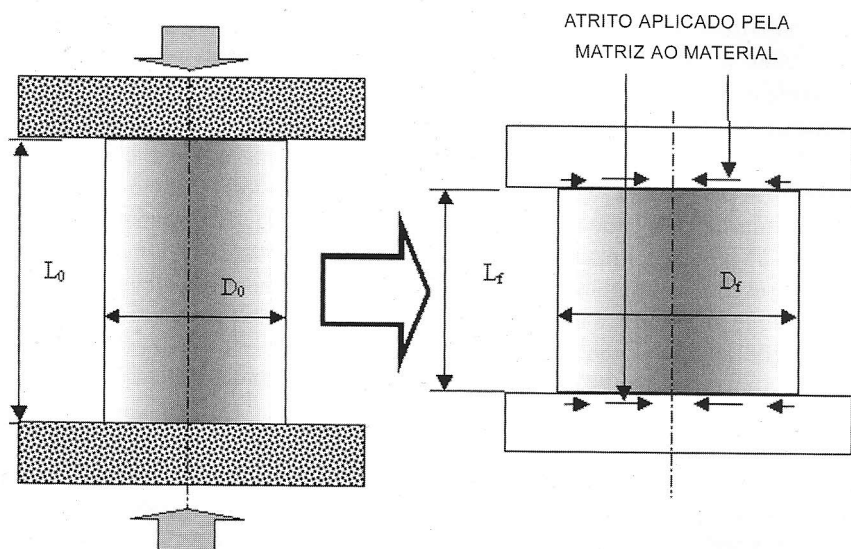


Figura 6: Atrito na interface ferramenta/metal na compressão pura de uma barra cilíndrica.

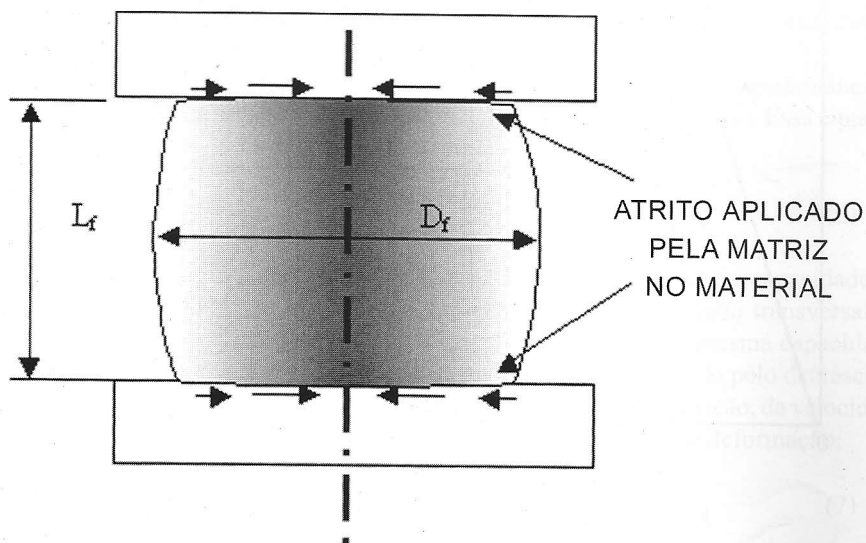


Figura 7: Barrilamento do corpo de prova cilíndrico provocado pelo atrito entre o material e a ferramenta.

A expansão lateral do cilindro introduz em sua superfície tensões de atrito, entre a matriz e o material, crescentes da borda para o eixo do cilindro, e que se opõem a esta expansão. Como consequência, a forma final do material é semelhante a um barril (ver Figura 7), e

Valores
descrescentes do
efeito das tensões
de atrito

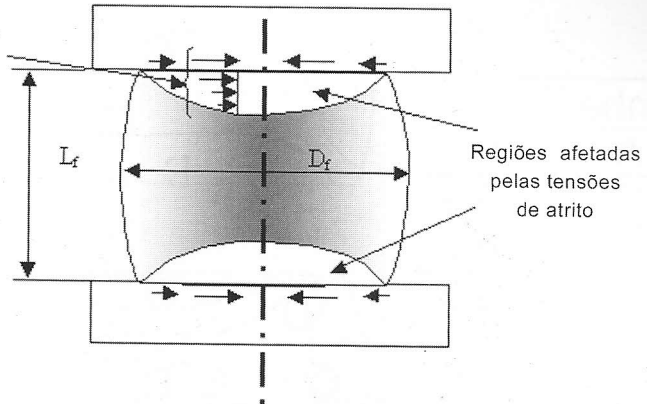


Figura 8: Regiões do corpo de prova cilíndrico afetadas pela presença do atrito entre o material e as matrizes.

não mais cilíndrica como no caso da ausência de atrito metal/ferramenta. O grau de barrilamento aumenta quando o coeficiente de atrito cresce.

O efeito de tensões aplicadas nas superfícies de sólidos não se propaga indefinidamente pôr todo o volume sob solicição. Desta forma, as tensões de atrito superficiais são sentidas até uma profundidade limitada do material que está sendo comprimido. Esta profundidade, porém, cresce com o valor da tensão aplicada na superfície. A Figura 8 ilustra as regiões de um cilindro sob compressão, onde se faz sentir a influência do atrito.

Uma conseqüência do atrito matriz/material é que o fluxo radial de material sofre restrições nas regiões afetadas pelas tensões de atrito. A deformação dentro destas regiões de fluxo restringido (RFR) é menor que fora das mesmas, estabelecendo-se uma

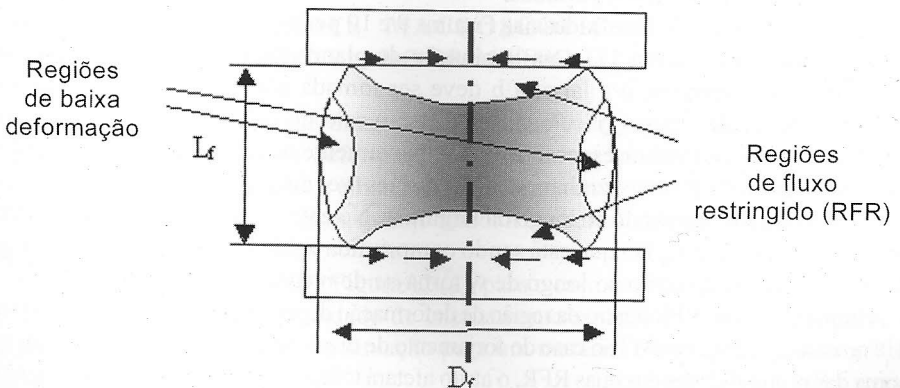


Figura 9: Regiões do corpo de prova cilíndrico comprimido onde se observam menores níveis de deformação.

Linha	ε
A	0,0
B	0,3
C	0,6
D	0,9

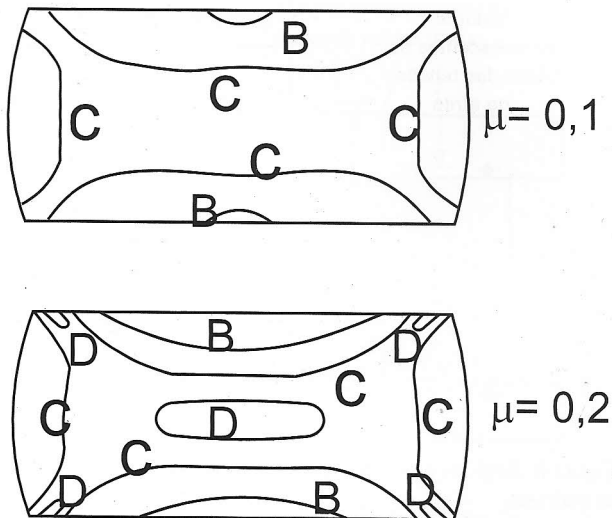


Figura 10: Distribuição de deformação em corpos de prova cilíndricos recalçados com coeficientes de atrito crescentes (simulação através do método dos elementos finitos, aço ABNT 1040).

heterogeneidade de deformação de difícil controle. As RFR são mais profundas à medida que o coeficiente de atrito matriz/material e o diâmetro do cilindro crescem.

Para barrilamentos mais pronunciados, as regiões perto da superfície de maior diâmetro passam a sofrer simultaneamente uma compressão provocada pelo movimento das matrizes e uma tração ligada à curvatura da superfície externa. Conseqüentemente, criam-se também nestes pontos outras regiões de deformação mais baixa, ilustradas na Figura 9. Trata-se de situação bastante complexa, onde a distribuição de deformação é difícil de prever. A Figura 10 mostra o resultado de análise de algumas situações através do método dos elementos finitos, para atritos variados.

Situações análogas às mostradas nas Figuras 9 e 10 podem também ser observadas no forjamento de tiras (Figura 11) e na laminação de planos. Neste caso, as matrizes são substituídas por cilindros, e a largura b deve ser tomada como a projeção do arco de contato no plano da chapa ($Q = \sqrt{R \Delta h}$ onde R é o raio do cilindro e Δh é a espessura inicial do material menos a espessura final). Novamente aqui se observam regiões de fluxo restringido (RFR) nas vizinhanças das matrizes (ver detalhe da Figura 11). O mesmo fenômeno pode ser observado ao longo da largura w . No entanto, à medida que w aumenta, o material adjacente à região que está sendo comprimida tende a limitar o alargamento do material, e o papel do atrito ao longo de w torna-se de menor importância.

A importância das RFR dentro da região de deformação depende da altura inicial do material (“ L ,” no caso de cilindros e “ t ” no caso do forjamento de tiras). Se essa dimensão for menor que a soma das profundidades das duas RFR, o atrito afetará toda a altura do cilindro ou a espessura da chapa, e a deformação tornar-se-á mais homogênea que para peças de maior espessura.

Deve-se lembrar a crescente importância tecnológica do controle da heterogeneidade

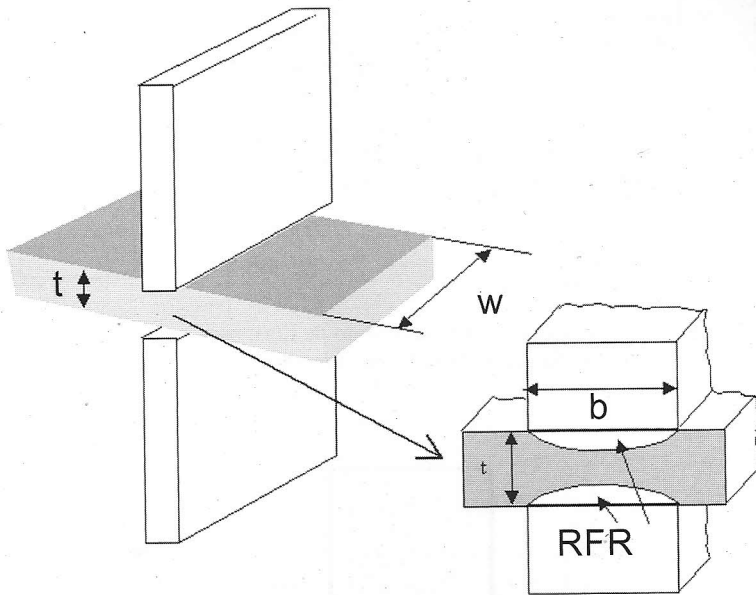


Figura 11: Distribuição de deformação no forjamento de tiras.

de deformação aqui apresentada no caso de laminação de chapas. A adoção da lubrificação durante a laminação a morno de aços livres de intersticiais (IF) na região ferrítica, leva a resultados excelentes do ponto de vista do coeficiente de anisotropia normal da chapa [3, 4]. Por outro lado, quando se deseja um acréscimo na deformação imposta durante a laminação, opta-se por maximizar o atrito cilindro material, de forma a afetar a temperatura de transformação de fase do material [5].

6. HETEROGENEIDADES MACROSCÓPICAS DE DEFORMAÇÃO ASSOCIADAS À GEOMETRIA DO PROCESSO

No caso do forjamento de tiras, além do estabelecimento das RFR, observa-se uma tendência do material sofrer deformação localizada em bandas aproximadamente a 45° com a direção de compressão e emanando dos cantos da matriz. De forma semelhante ao caso de estricções na tração pura, quanto maior a capacidade de encruamento do material mais difusas são essas bandas.

A situação está ilustrada na Figura 12 (a), para o caso onde se tem uma relação $t/b \approx 1$, um material com baixa capacidade de encruamento e atrito nulo (ou seja, ausência de RFR). A Figura 12 (b) ilustra a situação para um material com capacidade mais alta de encruamento.

Para $t/b \approx 1$, é geometricamente possível o desenvolvimento das bandas de deformação bem delineadas e em ângulos de cerca de 45° com a direção de compressão. Na Figura 13

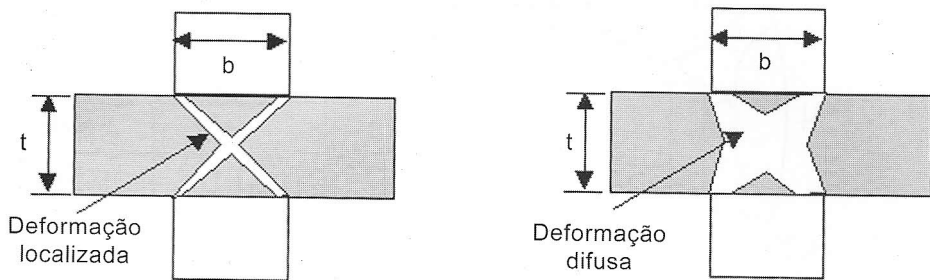


Figura 12: Distribuição de deformação no forjamento de tiras, para uma relação $t/b \approx 1$, para um material com (a) baixa, e (b) alta capacidade de encruamento, e atrito nulo.

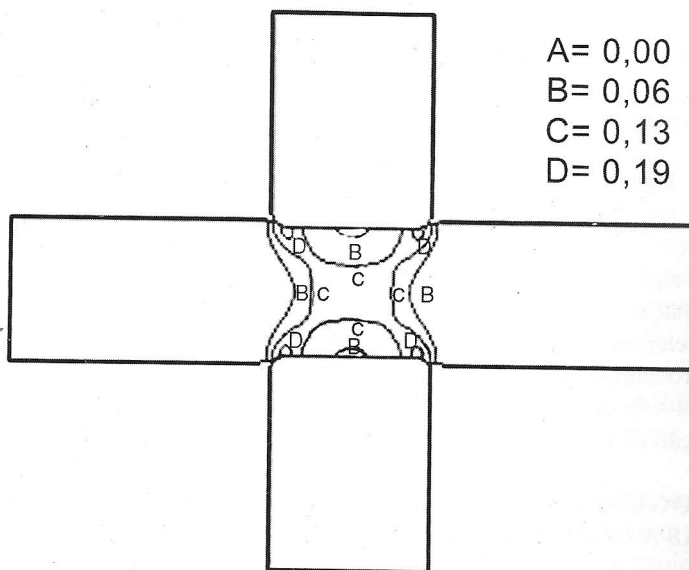


Figura 13: Distribuição de deformação, através de isolinhas, obtida na simulação do forjamento de tiras de aço 304, para a relação $t/b \gg 1$.

é possível identificar tal configuração, através da análise da distribuição de deformação (apresentada na forma de isolinhas) obtida como resultado da simulação, utilizando o método dos elementos finitos (FEM - Finite Element Method), do forjamento de tiras de aço 304. Na simulação foi considerado atrito nulo entre as ferramentas e o material. Nestas circunstâncias, não ocorre a presença das RFR.

As distribuições de deformação obtidas em simulações similares para diferentes valores de t/b (0,5; 2,5; 5 e 10) são mostradas na Figura 14.

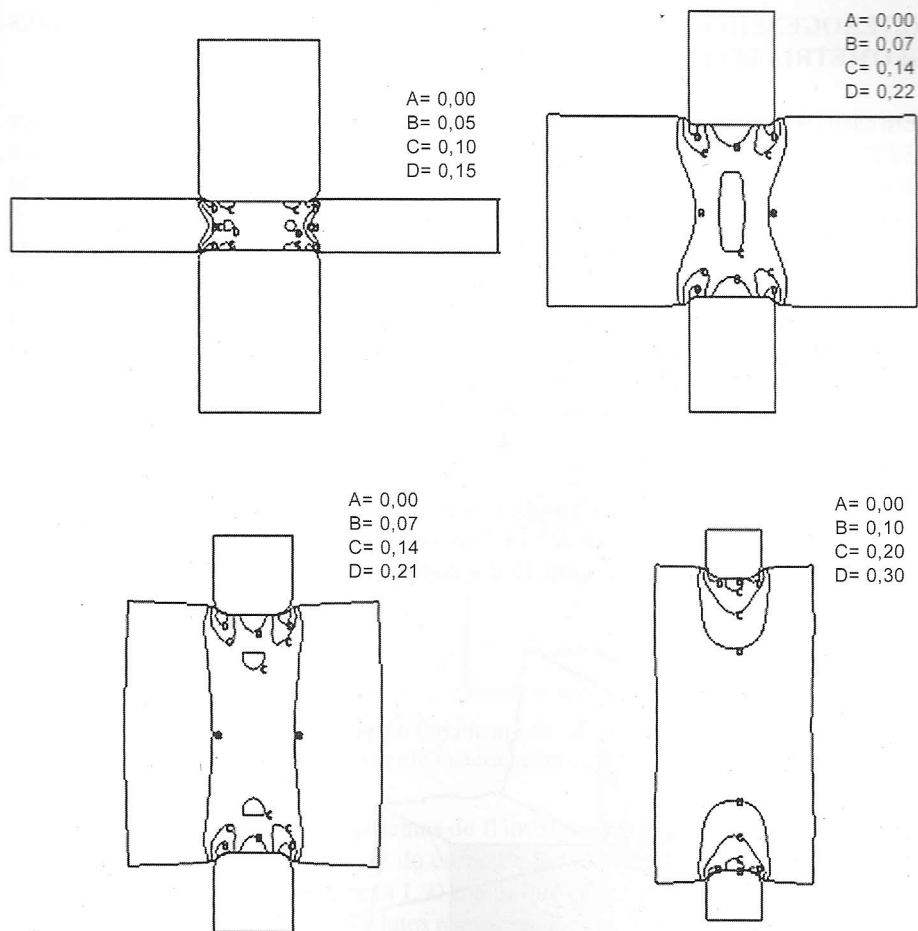


Figura 14: Distribuição de deformação, através de isolinhas, obtida na simulação do forjamento de tiras de aço 304 para a relação (a) $t/b \approx 0,5$; (b) $t/b \approx 2,5$; (c) $t/b \approx 5$; (d) $t/b \approx 10$.

Da mesma forma que no caso das tensões de atrito, as tensões de trabalho aplicadas na superfície de materiais sendo processados pôr compressão não se propagam indefinidamente ao longo da espessura do material. Observa-se que para t/b acima de cerca de 10, a deformação imposta pela matriz ao material não mais penetra ao longo de toda a espessura da peça. Nestas circunstâncias, o material será deformado somente superficialmente, situação que é tipicamente encontrada em ensaios de dureza. Deve-se lembrar que os resultados deste ensaio são válidos exclusivamente quando a relação $t/b \geq 10$. A heterogeneidade de deformação é muito alta nesse caso, uma vez que nenhuma deformação é observada ao longo da espessura t do material, exceto nas proximidades da matriz (ou do penetrador, no caso do ensaio de dureza).

7. HETEROGENEIDADES MACROSCÓPICAS DE DEFORMAÇÃO ASSOCIADAS À GEOMETRIA DO PROCESSO E AO ATRITO MATRIZ/MATERIAL

Em casos reais ocorrem simultaneamente os três fatos acima mencionados: a presença das RFR, a ocorrência das regiões de deformação localizada em maior ou menor grau, e finalmente, para alturas crescentes do material, o decréscimo de penetração da tensão externa de compressão. A Figura 15 ilustra um caso onde se tem uma relação $t/b \approx 4$, um atrito alto na interface matriz/material e um material com capacidade limitada de encruamento. A deformação logo abaixo das matrizes é baixa, devido à presença das RFR. As características de encruamento provocam uma tendência à deformação localizada, mas a geometria não permite que isso ocorra nos planos de máxima tensão de cisalhamento (a 45° com o eixo de compressão). Desta forma, a região de deformação fica distorcida. Finalmente, a tensão de compressão não penetra com a mesma intensidade ao longo de toda a altura do material, e como conseqüência, a deformação no centro da espessura é menor que mais perto da matriz.

A observação da Figura 15 revela de imediato a complexidade da heterogeneidade de deformação no caso de forjamento de tiras espessas.

Um caso semelhante ao da Figura 15 é a compressão de cilindros com alta relação

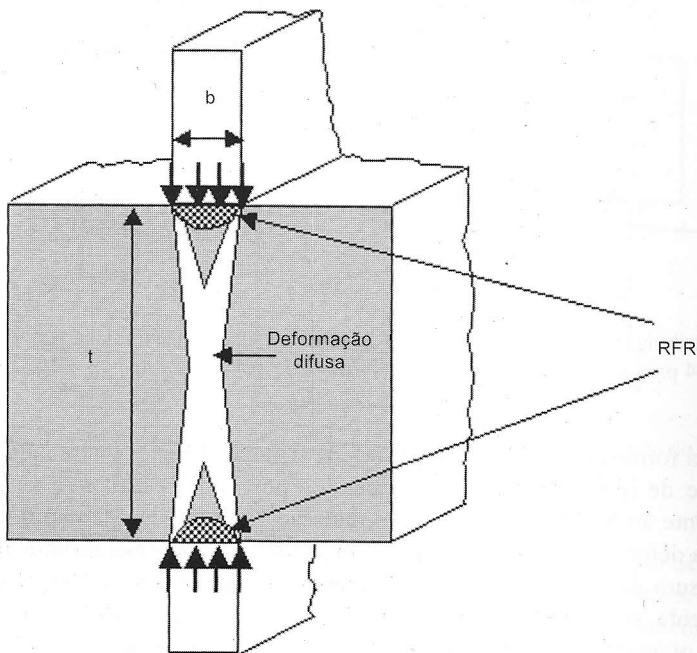


Figura 15: Distribuição de deformação no forjamento de tiras, para uma relação $t/b \approx 4$, na presença de atrito matriz/material e com um material com baixa capacidade de encruamento.

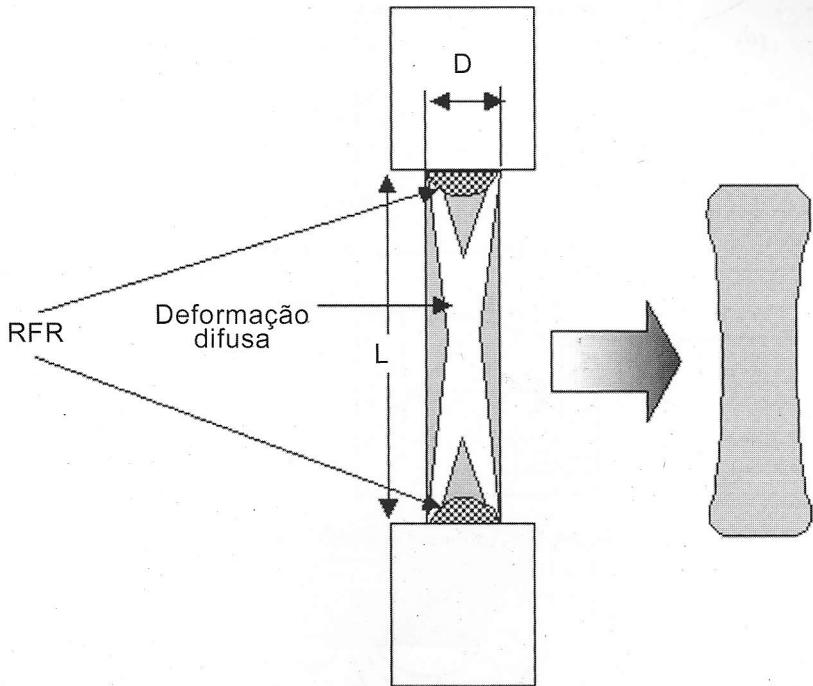


Figura 16: Distribuição de deformação no forjamento de cilindros, para uma relação $L/D \approx 4$, na presença de atrito matriz/material e com um material com capacidade limitada de encruamento.

L/D . Caso seja possível evitar problemas de flambagem, a deformação será maior perto das matrizes que no centro da altura do corpo de prova, como ilustrado na Figura 16. A forma da Figura 16 é observada para L/D maior que cerca de 1,5.

Na laminação de desbaste de produtos planos pode-se também observar formas externas convexas de blocos e placas (semelhantes ao barril da Figura 7) ou côncavas (semelhantes à mostrada na Figura 16). Para uma relação de largura/espessura iniciais igual a 1, a transição entre os dois tipos de comportamento passa-se para um valor da relação t/Q de aproximadamente 1,5, à semelhança do caso de cilindros [1, 7].

Um outro exemplo de heterogeneidade de deformação é aquele que pode ser observado na trefilação axissimétrica de metais, ilustrada na Figura 17. Neste caso, o atrito entre a fireira e o material se passa em uma só direção, e não há formação de RFR. No entanto, problemas de penetração das compressões aplicadas pela matriz e a tendência de deformação localizada permanecem, ocorrendo uma heterogeneidade crescente de deformação à medida que a relação t/Q aumenta. Essa relação cresce com semi-ângulos de fireira (α) crescentes e para reduções de área (r) decrescentes, como mostrado na equação 9 [8]. O fato está ilustrado na Figura 18, onde a distribuição de deformação foi levantada a partir da simulação numérica do fenômeno através do método dos elementos finitos.

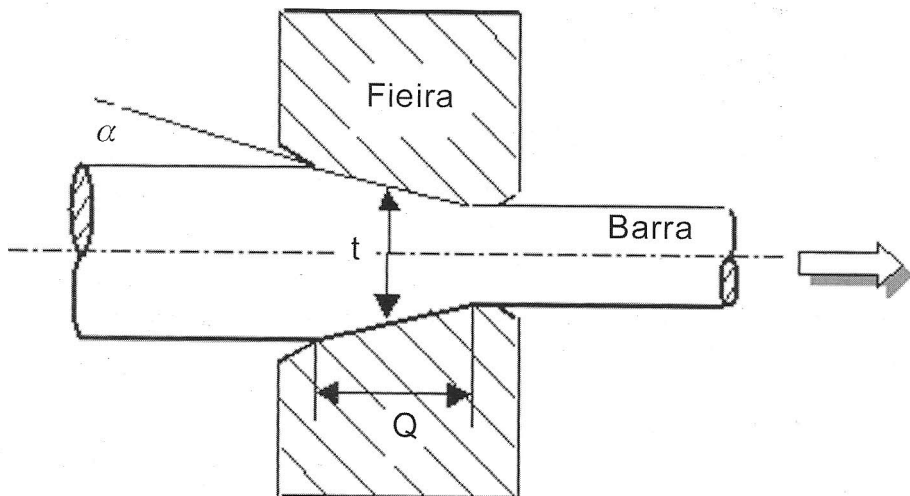


Figura 17: Trefilação axissimétrica de barras.

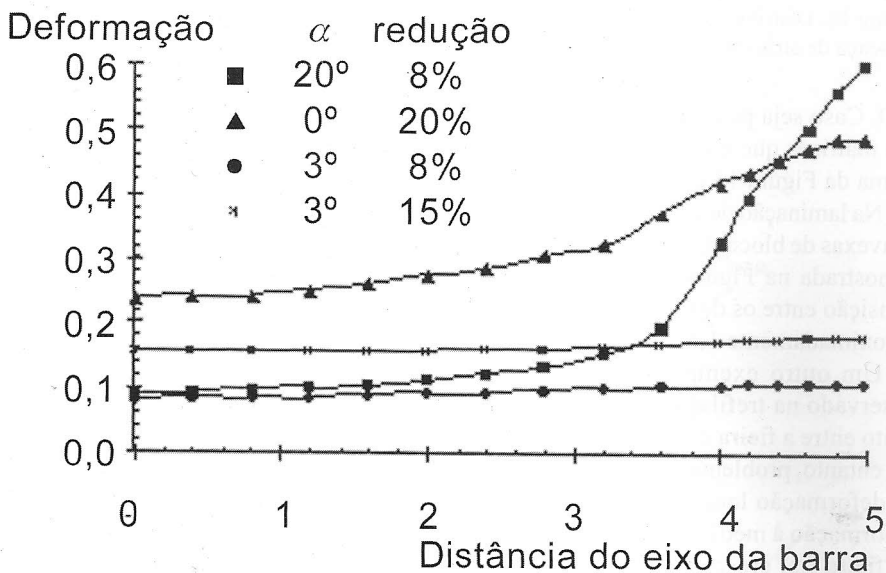


Figura 18: Variação da distribuição de deformação na seção transversal de barras trilhadas de diâmetro final 10 mm, aço inoxidável AISI 304 [9].

$$\frac{t}{Q} = \frac{\alpha(\text{rad})}{r} \left[1 + \sqrt{1-r} \right] \quad (9)$$

No caso de fabricação de peças de formato complexo, a heterogeneidade final de deformação depende não somente dos fatores vistos até aqui, mas também da forma inicial da peça e das matrizes. No momento, a única forma de prever a distribuição final de deformações nesses casos é através de métodos numéricos, tais como o Método dos Elementos Finitos (FEM - Finite Element Method). A Figura 19 mostra um exemplo do forjamento de uma pré-forma de engrenagem, realizada a 1215 °C, com um aço AISI 8620 [10]. A complexa distribuição de deformação efetiva obtida é mostrada através de isolinhas, para diferentes níveis desta grandeza.

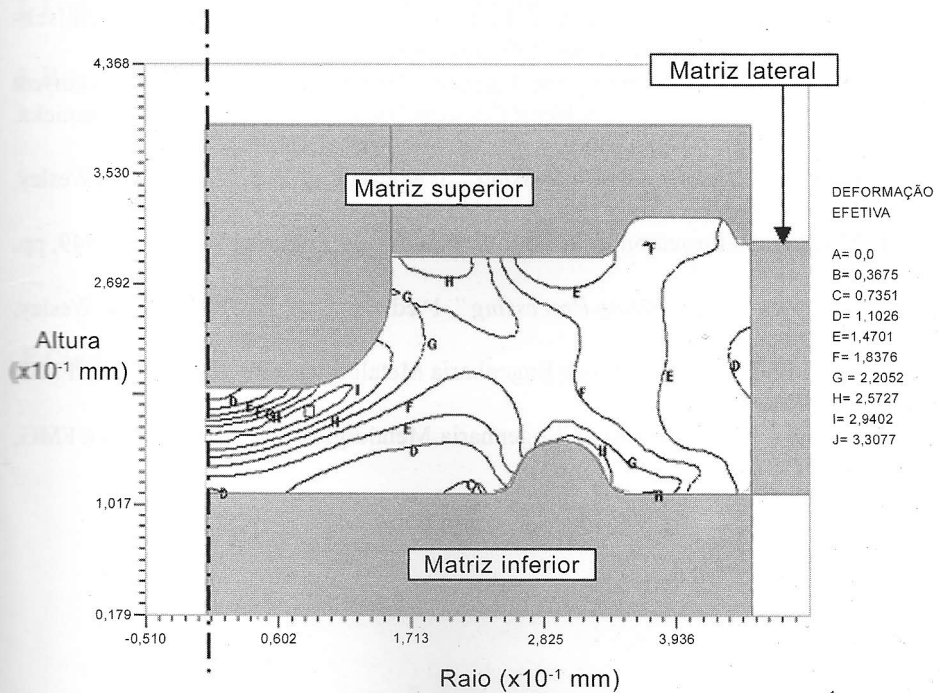


Figura 19: Distribuição de deformação em pré-forma de engrenagem forjada a alta temperatura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) e PRONEX - MCT (Programa de Núcleos de Excelência do Ministério de Ciência e Tecnologia) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Helman, P. R. Cetlin “*Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais*”, 2ª edição, Fundação Christiano Ottoni, Belo Horizonte (1986).
- [2] J. J. Jonas, S. L. Semiatin “*Formability & Workability of Metals – Plastic Instability & Flow Localization*”, American Society for Metals, Ohio (1984).
- [3] S. Matsuoka et alii. “Development of super deep drawable sheet steel by lubricant hot rolling in ferrite region” *Anais do International Symposium on Modern LC and ULC Sheet Steels for Cold Forming: Processing and Properties*, Institute of Ferrous Metallurgy, Rheinisch-Westphälischer Technische Hochschule (RWTH), Aachen, pp. 85-96 (1998).
- [4] R. Sebald et alii “Effect of friction on texture evolution in ferritic warm rolled IF steel” *Anais do International Symposium on Modern LC and ULC Sheet Steels for Cold Forming: Processing and Properties*, Institute of Ferrous Metallurgy, Rheinisch-Westphälischer Technische Hochschule (RWTH), Aachen, pp. 363-370 (1998).
- [5] P. D. Hodgson & M. R. Barnett “The thermomechanical processing of steels – current status and future trends” *Anais do Metal Forming 2000*, Akademia Gorniczno Hutnicka, Cracóvia, Polônia., pp. 21-28 (2000).
- [6] W. A. Backofen “*Deformation Processing*”, 1ª edição, Cap. 7, p. 135, Addison Wesley, USA (1972).
- [7] G. S. MICAN, Deformation in Rolling, Iron and Steel Engineer Yearbook, 1949, pp. 77-91.
- [8] W. A. Backofen “*Deformation Processing*”, 1ª edição, Cap. 5, p. 89, Addison Wesley, USA (1972).
- [9] E. C. S. Corrêa, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, *Comunicação Pessoal*.
- [10] C. A. Santos, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, *Comunicação Pessoal*.