

ESTADOS DE TENSÃO DE SEÇÕES CIRCULARES E INFLUÊNCIA DO ACABAMENTO SUPERFICIAL NA FORMAÇÃO DE TRINCAS¹

Oswaldo Abadia de Carvalho Filho²
 Washington Moraes²

Resumo

ABNT 1020 é um aço de baixo carbono, com grande aplicação na fabricação de componentes mecânicos devido ao seu baixo custo, usinabilidade, soldabilidade e suas propriedades mecânicas, das quais podemos citar tenacidade, ductilidade e razoável resistência mecânica. Estes fatores motivaram a análise do comportamento deste material quando submetido a um estado plano de deformação dentro do regime plástico. Os estudos se basearam na comparação dos estados de tensão obtidos através de uma simulação numérica realizada utilizando o software SNDP (Simulação Numérica de Deformação Plástica) V 1.0 desenvolvido pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC Minas, com os estados de tensão obtidos através de ensaios realizados com corpos de prova submetidos a esforços uniaxiais de compressão com matriz aberta. Os ensaios foram realizados considerando o atrito entre as superfícies de contato da matriz e corpos de prova, que foram confeccionados seção circular de 13,5 mm de diâmetro por 20,0mm de comprimento e acabamento superficial diferenciado onde foi observada a influência deste parâmetro na formação de trincas na superfície dos corpos de prova ensaiados.

Palavras-chave: Ensaio de compressão; Deformação plástica; Encruamento; Acabamento superficial.

ESTATE OF STRESS OF CIRCULAR SECTION AND INFLUENCE OF SURFACE FINISH IN THE FORMATION OF CRACKS

Abstract

ABNT is a low carbon steel, with wide application in the manufacture of mechanical components due to their low cost, machinability, weldability and mechanical properties, of which we mention toughness, ductility, reasonable mechanical strength. These factors motivated the analysis of the behavior of this material when subjected to a plane strain within the plastic regime. The studies were based on the comparison of stress states obtained from a numerical simulation performed using the software SNDP Numerical Simulation of Plastic Deformation V 1.0 developed by the Graduate Program in Mechanical Engineering from PUC Minas, with the stress states obtained through tests on specimens subjected to upsetting test. The tests were conducted considering the friction between the contact surfaces of contact form and specimen, which were made circular section of 13.5 mm diameter by 20.0 mm long and differentiated surface finish where we observed the influence of this parameter in training of cracks on the surface of the specimens tested.

Key words: Upsetting test; Plastic strain; Work hardening; Surface finish.

¹ Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, Aluno do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Na maioria dos projetos mecânicos e estruturais admite-se que os componentes mecânicos reproduzem um comportamento elástico, porém, em alguns projetos tem a necessidade de verificar como os componentes irão se comportar perante a uma deformação plástica, por exemplo, na estampagem e forjamento a frio de peças tem a necessidade de verificar o comportamento do material escoando e suas propriedades após o processo, evitando que os mesmos venham a fraturar em processos subsequentes ou em utilização.

O aço ABNT 1020 é uma importante matéria prima para construções de componentes estruturais, que são submetidos aos mais diversos tipos de solicitações. Por isso, é de grande relevância verificar e analisar o comportamento desse material em um escoamento plástico.

O objetivo do presente trabalho é comparar o estado de tensão obtido na compressão de um cilindro de aço 1020 com a simulação numérica utilizando elementos finitos e verificar o dano devido à diferença de acabamento superficial.

De acordo com Dieter,⁽¹⁾ a teoria da plasticidade estuda o comportamento dos materiais a níveis de deformação onde a Lei de Hooke não se aplica. A deformação plástica não é um processo reversível como a deformação elástica. Na plástica o material acumula deformações residuais e não existe uma constante facilmente mensurável como o módulo de elasticidade, já que o material ao sofrer deformações plásticas irá encruar.

A curva tensão-deformação obtida por um carregamento uniaxial, ensaio de tração, foi descrita por Dieter⁽¹⁾ como um interesse fundamental na plasticidade quando apresentada em termos de tensão verdadeira σ e deformação verdadeira ϵ . Na figura 1 esta mostrada a curva de tensão verdadeira versus deformação verdadeira, onde a Lei de Hooke é obedecida até um valor de tensão σ_0 , acima desse valor de tensão o material entra na região plástica.

De acordo com Dieter⁽¹⁾ se o material for deformado até o ponto A mostrado na Figura 1, quando a carga for retirada a deformação total decrescer de um valor σ/E , de ϵ_1 para ϵ_2 . Esse decréscimo é igual a deformação elástica do material.

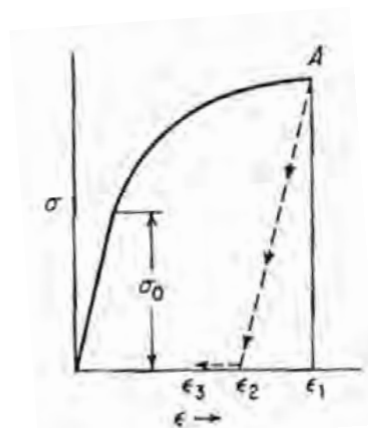


Figura 1. tensão verdadeira versus deformação verdadeira para um ensaio uniaxial de um material dúctil.⁽¹⁾

De acordo com Wagoner e Chenot,⁽²⁾ J.R. Hollomon descobriu em 1945 que as ligas ferrosas obedecem a uma relação matemática simples (Equação 1).

$$\sigma = k \cdot \epsilon^n \quad (1)$$

Onde:

- σ : tensão verdadeira;
- k : coeficiente de deformação;
- ε : deformação verdadeira;
- n : coeficiente de encruamento.

Baseando-se em um sistema de coordenadas cilíndricas z , θ , e ρ onde:

- z : representa a posição axial;
- Θ : representa a posição angular;
- ρ : representa a posição radial.

A deformação axial verdadeira ε_z pode ser calculada de acordo com a Equação 2.

$$\varepsilon_z = \ln\left(\frac{H_f}{H_0}\right) \quad (2)$$

Onde:

- H_0 : comprimento inicial;
- H_f : comprimento final.

A deformação angular verdadeira ε_θ pode ser calculada conforme Equação 3.

$$\varepsilon_\theta = \ln\left(\frac{D_f}{D_0}\right) \quad (3)$$

Onde:

- D_0 : diâmetro inicial;
- D_f : diâmetro final.

Conforme o critério de escoamento de Levy – Mises a tensão equivalente σ_{eq} pode ser escrita em função do segundo invariante J_2 , como mostrado na Equação 4.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3J_2} \quad (4)$$

Uma vez que a componente de tensão σ_ρ é zero, por se tratar de uma superfície livre temos:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_z \cdot \sigma_\theta} \quad (5)$$

Onde:

- σ_z : tensão axial;
- σ_θ : tensão angular.

2 METODOLOGIA

2.1 Método Experimental

Para obtenção de um estado de deformação plástica seis corpos de prova tagueados de CP1 a CP6 foram submetidos a um ensaio de compressão a frio em matriz aberta, realizado conforme descrito na norma ASTM E9.⁽³⁾

Os corpos de prova de aço SAE 1020 com dureza máxima de 260 HB foram confeccionados com as seguintes dimensões: 13,5 mm de diâmetro e 20 mm de comprimento. Nos mesmos foi marcada uma linha no meio do corpo de prova para avaliar o diâmetro ao longo do ensaio (Figura 2).

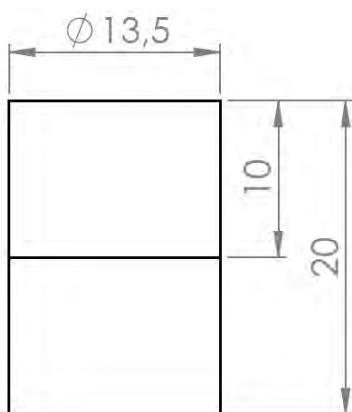


Figura 2. Dimensional dos corpos de prova.

Na Figura 3 esta mostrada os corpos de prova com as marcações efetuadas por um paquímetro traçador.



Figura 3. Corpos de prova e marcações efetuadas.

A fim de se avaliar o dano provocado aos corpos de prova ensaiados bem como o efeito do acabamento superficial os corpos de prova tiveram o acabamento de suas superfícies cilíndricas diferenciados, onde os corpos de prova CP1, CP2 e CP3 tiveram sua superfície cilíndrica apenas desbastada com os riscos da ferramenta de

desbaste bastante visíveis e os corpos de prova CP4, CP5 e CP6 tiveram sua superfície cilíndrica polida eliminando os riscos da ferramenta de desbaste. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal EMIC com capacidade de carga de 200 kN como mostrada na Figura 4.



Figura 4. Máquina EMIC utilizada para o ensaio de compressão.

Foi considerado um ciclo de carregamento onde cada corpo de prova foi submetido a um esforço axial crescente e monitorado em incrementos finitos até se alcançar 2 mm de deslocamento da matriz, onde neste ponto o carregamento foi totalmente retirado, permanecendo apenas uma deformação plástica no material, após isso foram feitas as medidas do diâmetro central e o comprimento do corpo de prova, em seguida colocou-se o corpo de prova na máquina aplicou o esforço axial até se alcançar 2 mm de deslocamento da matriz e fez novamente as medidas citadas acima, repetiu-se esse ciclo até se alcançar 10mm de deslocamento da matriz, quantificando 5 medidas ao total.

2.2 Método Numérico

Para a simulação numérica do processo de conformação em matriz aberta foi utilizada uma ferramenta computacional S NDP (Simulação Numérica de Deformação Plástica)⁽⁴⁾ baseada em elementos finitos desenvolvida pelo Programa de Pós

Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

Para a realização da simulação numérica o software SINDT teve seus parâmetros ajustados conforme Tabela 1

Tabela 1. Dados inseridos no programa de simulação computacional

Parâmetros	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Unidade
Limite de Deformação	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-
Velocidade da Ferramenta	-1	-1	-1	-1	-1	mm/s
Passo	100	100	100	100	100	-
Coeficiente de Atrito	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	-
Constante de Penalidade	10000	10000	10000	10000	10000	-

Os parâmetros K e n correspondem às propriedades do material, que foram ajustadas para cada ciclo de deformação conforme Tabela 3.

3 RESULTADOS

3.1 Resultados Analíticos

De acordo com a média dos valores obtidos através dos ensaios experimentais, Tabela 2, calculou-se os valores para K e n, como mostrados na Tabela 3.

Tabela 2. dados obtidos nas medições

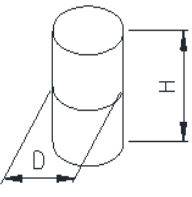
Corpo de Prova	Altura H (mm)	Diâmetro D (mm)
	20	13,50
	18	13,99
	16	14,44
	14	14,92
	12	15,38
	10	15,82

Tabela 3. Fatores para a equação de Hollomon

Fatores Para Equação de Hollomon					
Deformação	0 a 2 mm	2 a 4 mm	4 a 6 mm	6 a 8 mm	8 a 10 mm
K	6424,85	3955,02	3545,73	3491,58	3453,58
n	0,89	0,63	0,55	0,52	0,51

Com os valores de tensão e deformação obtidos no ensaio plotou-se o gráfico da tensão verdadeira versus a deformação verdadeira (Figura 5).

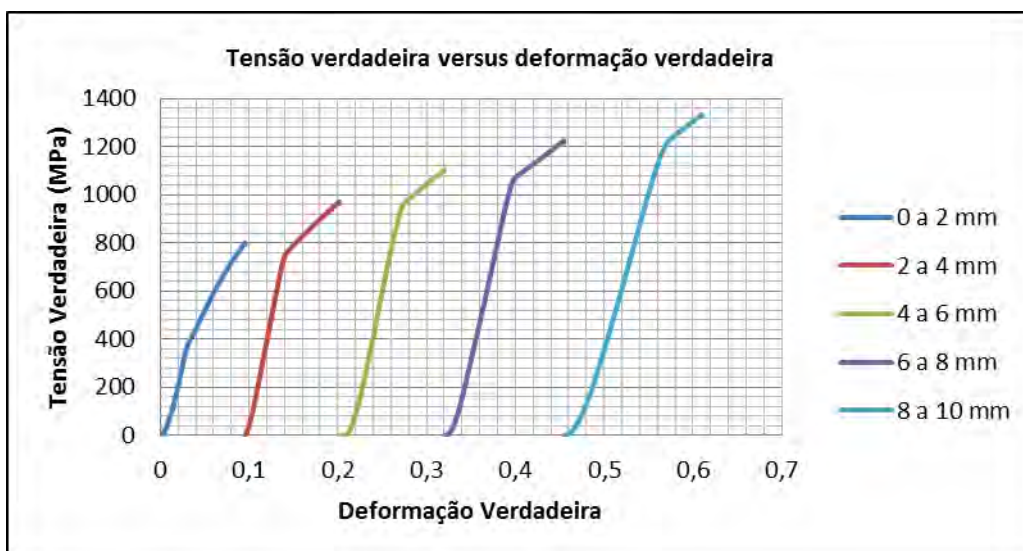


Figura 5. Gráfico de tensão verdadeira versus deformação verdadeira.

Tabela 4. Tensões e deformações calculadas, tensão equivalente

Tensões e Deformações					
H (mm)	ϵ_z	σ_z (Mpa)	ϵ_θ	σ_θ (Mpa)	σ_{eq} (Mpa)
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
18	0,105	865,451	0,029	329,637	1069,089
16	0,118	1029,593	0,038	462,151	1322,677
14	0,134	1171,402	0,033	540,447	1515,700
12	0,154	1308,360	0,028	531,976	1640,372
10	0,182	1441,003	0,031	578,268	1801,158

3.2 Resultados Numéricos

A partir do modelo e valores de entrada do programa obtiveram-se os resultados de tensão equivalente para cada deslocamento da matriz. Nas Figuras 6 a 10 estão mostrados respectivamente os resultados para os deslocamentos da ferramenta 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm e 10 mm.

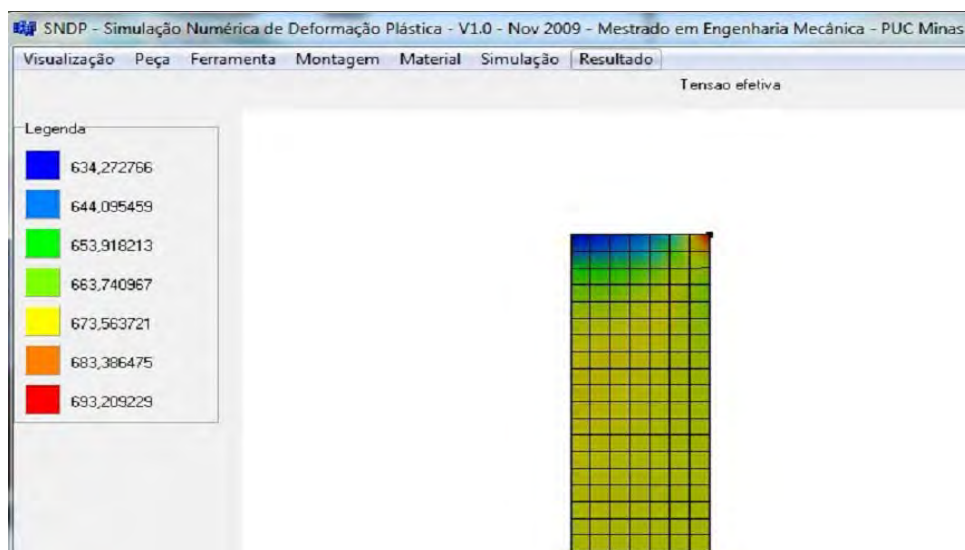


Figura 6. Deslocamento da ferramenta em 2 mm.

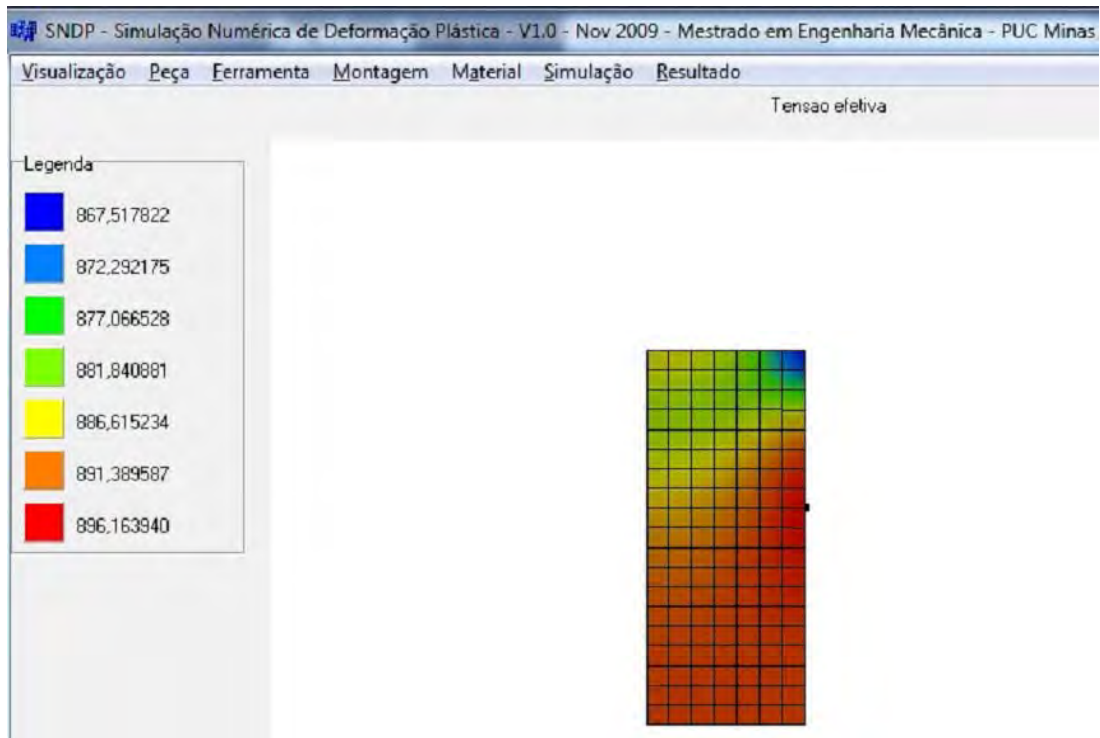


Figura 7. Deslocamento da ferramenta em 4 mm.

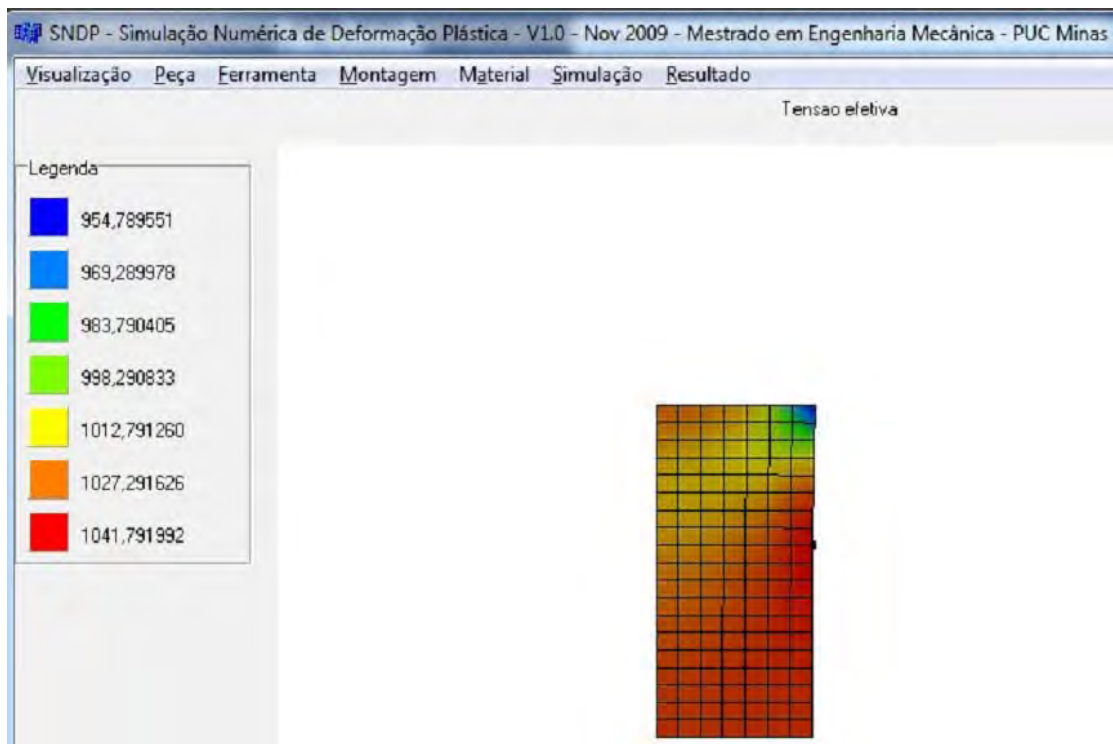


Figura 8. Deslocamento da ferramenta em 6 mm.

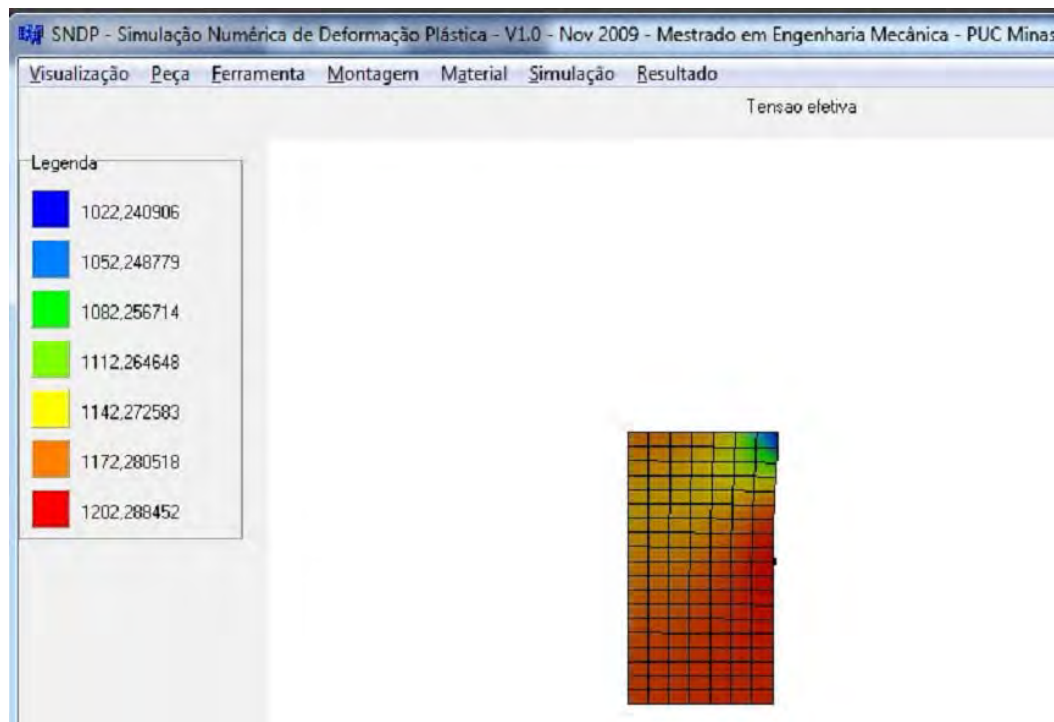


Figura 9. Deslocamento da ferramenta em 8 mm.

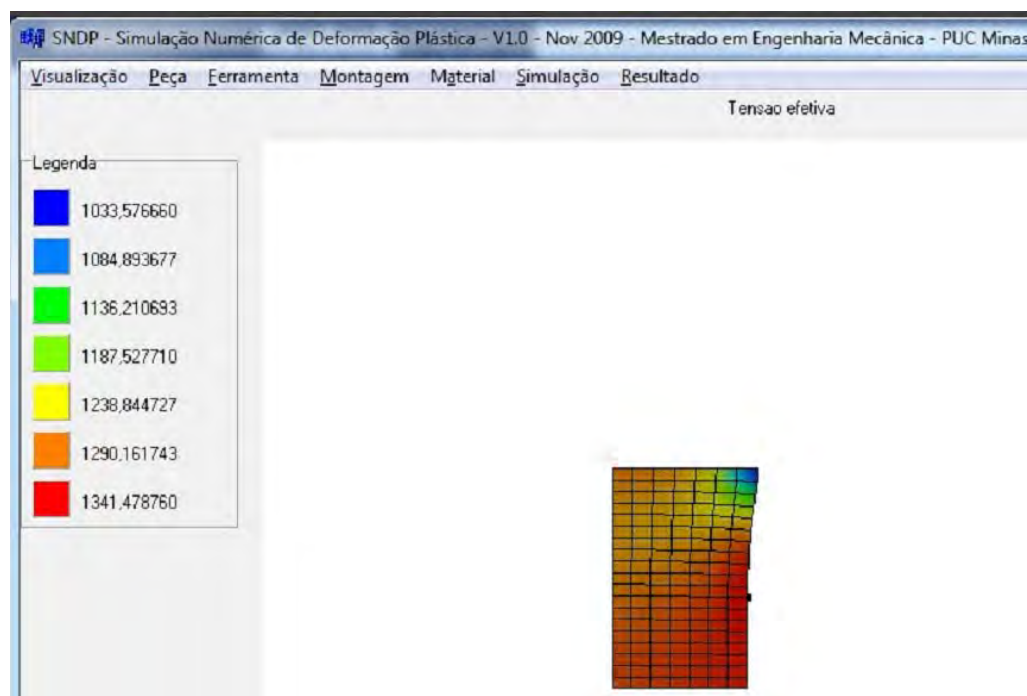


Figura 10. Deslocamento da ferramenta em 10 mm.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base no valor de K , mostrado na Tabela 3, percebe-se a diminuição do mesmo quando aumenta o deslocamento da matriz de conformação, isso acontece devido o material encruar a cada deslocamento da ferramenta, aumentando assim a força necessária para conformar e fragilizando o material.

A Figura 5 mostra também o efeito do encruamento no material, pois, quanto maior a deformação absorvida pelo material maior é a tensão necessária para conformar.

A tensão equivalente obtida analiticamente foi superior à calculada pelo programa SNDP, isso pode ter sido causado por intempéries do sistema ao fazer as medições, porém, os valores em ambos os casos aumentam devido ao encruamento do material.

Fazendo uma análise a olho nu, não foi possível verificar nenhuma diferença com relação ao dano causado ao material devido à diferença do acabamento superficial.

5 CONCLUSÃO

Após a análise e comparação dos resultados podemos perceber o efeito do encruamento do material que foi submetido a uma deformação plástica, através da diminuição do expoente de encruamento da equação de Hollomon e também a diminuição do coeficiente de resistência K tornando o material mais frágil ao fim de cada etapa do ensaio em questão.

Outro fator importante foi o alinhamento dos resultados obtidos entre os métodos práticos, analíticos e numéricos que apesar de uma certa diferença seguiram a mesma tendência.

Mais pesquisas são necessárias para avaliar se o acabamento superficial interfere na geração de trincas.

Agradecimentos

Os autores generosamente agradecem o apoio da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUCMINAS, juntamente com a sua equipe técnica.

REFERÊNCIAS

- 1 DIETER, G.E., 1976. *Mechanical Metallurgy*, 2 ed, Boston, McGraw Hill
- 2 Wagoner, R.H., Chenot, J.L., 1996, *Fundamentals of Metal Forming*
- 3 American Society for Testing and Materials, 1989, *ASTM E 9 – 89a: Standard Test Methods of Testing of Metallic Materials at Room Temperature*: Pensilvânia.
- 4 FIORAVANTE, A. OLIVEIRA, *Desenvolvimento de Ferramenta Computacional Usando Método de Elementos Finitos para Simulação Numérica do Processo de Conformação em Matriz Aberta: Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.*