



## **SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS A TRAÇÃO DO AÇO TRIP MC 700.**

**Carlos Eduardo dos Santos**

**Norberto Martins**

carlosetduardo@deii.cefetmg.br

norbertoengmec@gmail.com

Puc Minas

Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, 30535-901, Minas Gerais, Brasil

**Alysson Lucas Vieira**

alysson@pucminas.br

Puc Minas

**Pedro Américo Magalhães Junior**

paamjr@gmail.com

Puc Minas

**José Rubens Carneiro**

Joserub@pucminas.br

Puc Minas

**Caio Nelson Nogueira Nápoles**

caionapoles@gmail.com

Puc Minas

**Resumo:** A demanda de materiais com elevada resistência mecânica pela indústria automobilística, foi um marco decisivo para que os laboratórios de metalurgia pudessem investir em novos materiais. O objetivo deste trabalho é avaliar a Tensão de Escoamento ( $\sigma_e$ ) do aço MC 700 por meio de ensaios destrutivos a tração, no regime elástico para cálculo do Módulo de Elasticidade (E). Os corpos de prova em chapa com seção transversal de 12.5 x

3.0 mm foram submetidos a carregamento uniaxial em uma máquina universal de ensaios com velocidade constante de 2 mm/s. Os dados coletados serviram de base para a curva (tensão x deformação), permitindo extrair as propriedades mecânicas propostas. Com intuito de validar as propriedades do aço MC 700 fornecidos pelo fabricante, foi realizada uma análise para caracterização da composição química e perfil de dureza na seção transversal, verificando a homogeneidade da estrutura. Utilizando a modelagem computacional com o software ABAQUS, foi possível realizar uma simulação por meio da técnica de elementos finitos, que reproduz o ensaio graficamente a partir da curva tensão deformação verdadeira proveniente do ensaio físico. Os resultados simulados foram avaliados para apontar a confiabilidade da simulação computacional no cálculo de projetos estruturais, utilizando aço MC 700.

**Palavras chave:** Resistência mecânica, conformabilidade e Elementos finitos.

## **1 INTRODUÇÃO**

O uso de engenharia auxiliada por computador (CAE) na indústria de projetos, tem contribuído para redução de custos e a verificação de aplicação de novos materiais.

Há vários softwares comerciais que utilizam o método de elementos finitos para modelagem de esforços em componentes. Atualmente estes softwares estão sendo implantados nos programas dos cursos de resistência dos materiais, com introdução da técnica de elementos finitos. Isto tem proporcionado uma melhoria no capital intelectual que as universidades preparam para o mercado de trabalho, trazendo cada vez mais ambientes industriais com altas tecnologias em projeto, melhorando a qualidade dos produtos e incentivando o desenvolvimento de novos materiais que atendam as indústrias nas suas especificidades.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Aços de alta resistência**

Aços de alta resistência tem atraído interesse no meio industrial, por atender as propriedades mecânicas necessária, alcançando a qualificação de aços multifásicos, bifásicos, TRIP (transformação induzida pela deformação plástica), dentre outros. A combinação das propriedades mais interessantes é a alta resistência e ductilidade, capaz de se deformar nos processos de conformação. Estudos ganharam destaque ao substituir aços de alta resistência tradicionais por aços com estas características na fabricação de carrocerias de automóveis, sem perder resistência ao choque (De Coomam, 2004).

As microestruturas destes aços são complexas (B. Fu et al., 2014) são constituído por uma matriz ferrítica, e outras dispersas de bainita, martensita e austenita retida. A microestrutura dos aços considerados multifásicos ocorre devido a transformação cinética da austenita retida durante a deformação plástica (Chiang, J., 2011). A alta resistência aliado a ductilidade ocorre por dois efeitos, conhecido por TRIP e os efeitos compostos (Jacques PJ, 2004). A fase metaestável da austenita retida na temperatura ambiente é transformada em

martensita durante a deformação plástica, segundo B. Fu et al., (2014), este efeito dá origem ao aumento da taxa de endurecimento melhorando as propriedades mecânicas dos aços. O efeito composto ocorre em aços multifásicos, as fases macias e duras são responsáveis pela resistência e plasticidade, por meio do fluxo de tensão entre os constituintes durante a deformação (Muransky, 2008).

No caso de aços bifásicos a transformação da austenita em martensita, que é acompanhado por uma expansão de volume, segundo Dieter (1984) causa discordâncias em torno da matriz ferrítica. Essas são responsáveis pela elevada taxas de encruamento inicial e pelo comportamento de deformação contínua. Na laminação à quente de ligas, que contém cromo e/ou molibdênio, podem formar as microestruturas do aço bifásico. Ferrita poligonal é formada diretamente da laminação e a austenita remanescente se transforma em martensita durante o resfriamento do material (Matlock; Zia-Ebrahimi; Krauss, 1982).

As nomenclaturas destes aços consideram o limite de escoamento e a resistência a tração. As classificações dos números que compõem as siglas seguem ao padrão internacional, no caso de aços de alta resistência MC 700 e MC 960, possuem resistência ao escoamento na ordem de 700 e 960 Mpa respectivamente.

## 2.2 Modelagem da curva de plasticidade

Em teoria, o deslocamento a deformação plástica é controlada pela interação de deslocamento com outros obstáculos, em níveis moderados de tensão, a deformação é governada por deslocamento e recuperação dinâmica (Y. Shi et, al., 2007).

A curva tensão-deformação uniaxial típica de um metal policristalino tem o formato típico mostrado na Fig. 1, onde as letras do alfabeto romano indicam as tensões e deformações de engenharia  $S, e$ , enquanto as letras do alfabeto grego indicam as tensões e deformações verdadeiras  $\sigma, \epsilon$ . Quando uma tensão crescente é aplicada a uma amostra, a deformação decorrente é inicialmente elástica e as dimensões originais são restabelecidas em caso de descarregamento. No entanto, caso o limite de escoamento, marcado pelo ponto A, seja atingido, deformações plásticas são observadas, deixando de ser proporcionais à carga aplicada

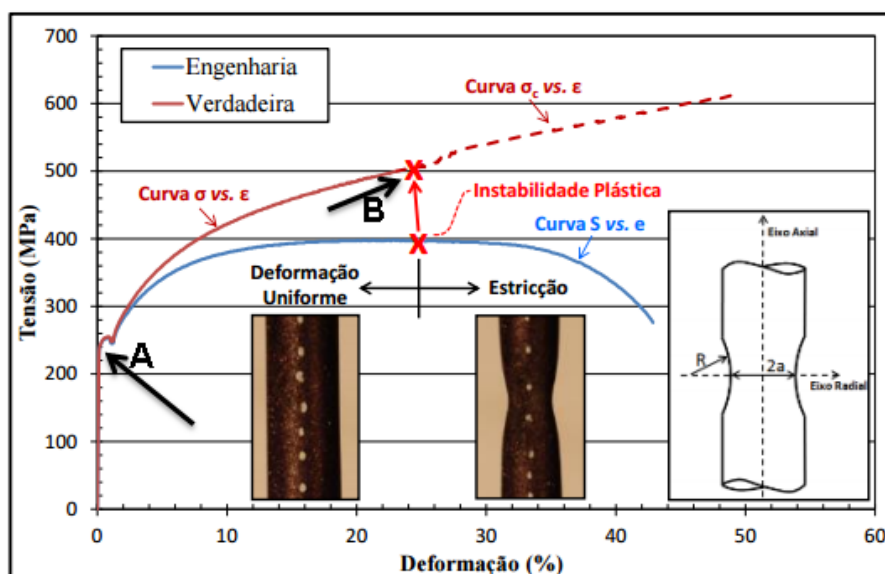


Figura 1. Curva tensão deformação de engenharia x verdadeira adaptada Nick, 2005.

Quando a tensão no material supera a tensão de limite de resistência do material, começa-se uma fase de formação de estricção, onde há uma rápida perda de resistência do material, até que ocorra o rompimento, ilustrado no ponto B na figura 1. Esta região é característica pelo estado triaxial de tensões.

Considerando tração pura, a relação entre deformações e tensão de engenharia e verdadeira são dadas pelas equações 1e 2.

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (1)$$

$$\sigma = s(1 + e) \quad (2)$$

Após o ponto B, é necessário realizar metodologia de correções teóricas extrapolando os valores de deformação. O estado plástico da curva é utilizado para a implementação da metodologia de elementos finitos utilizando o software *Abaqus*.

### 3 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido em uma sequencia operacional que foi dividido em 5 etapas:

Etapa I Preparação dos corpos de prova;

Etapa II Ensaio físico de tração;

Etapa III Metalografia e Microscopia

Etapa IV Realização das simulações no software *Abaqus*;

Etapa V Comparação de resultados.

#### 3.1 Preparação do corpo de prova

O material para preparação dos corpos de prova de tração do aço MC700, nome utilizado sigla no decorrer do trabalho. As amostras forma extraídas de uma chapa laminada com espessura de 2,5mm e submetido ao corte a laser cnc para obtenção das peças. A composição química da chapa e o desenho do corpo de prova estão ilustrados na Fig. 2.

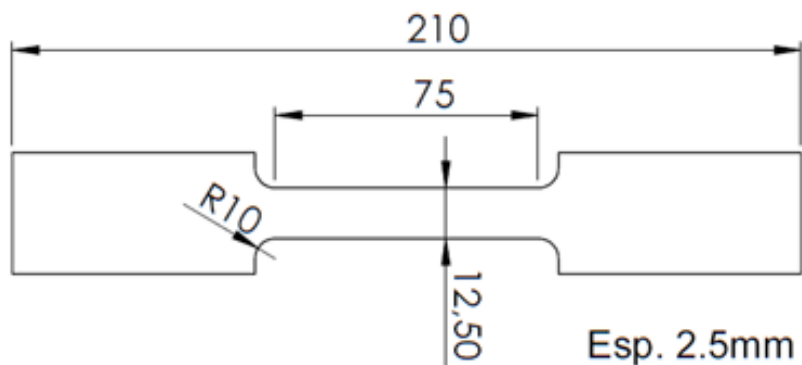


Figura 2. Pressure variation along the nozzle: experimental data

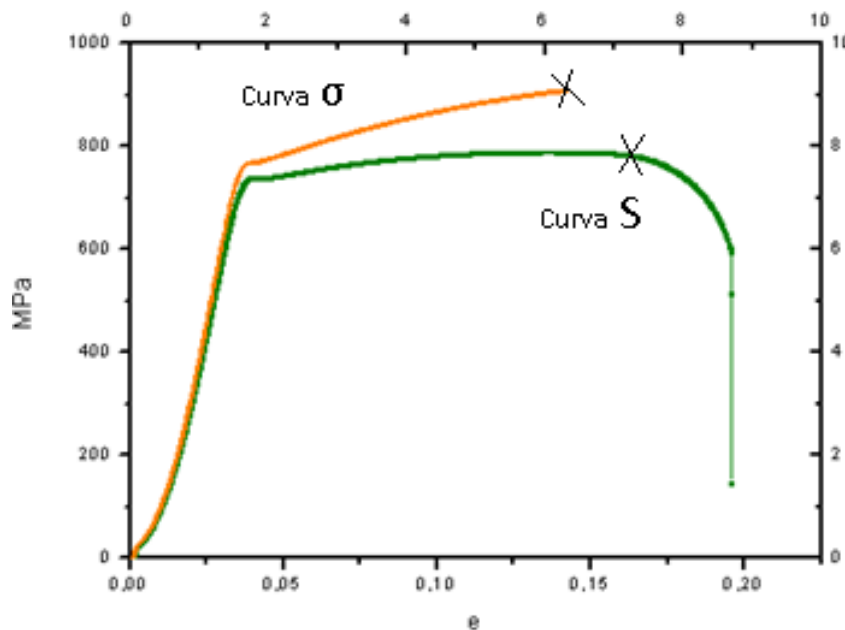
O aço de estudo é caracterizado pela alta resistência e alta conformabilidade, a composição química dos principais elementos do aço em estudo está na Tabela 1.

**Tabela 1. Composição química do aço MC700**

| Elemento | Simbologia | Valor (%) |
|----------|------------|-----------|
| Carbono  | C          | 0.061     |
| Manganês | Mn         | 1.65      |
| Cromo    | Cr         | 0.3       |
| Níquel   | Ni         | 0.3       |

### 3.2 Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado em uma máquina universal de ensaios da modelo EMIC DL20000. A configuração do ensaio foi feita por via do software Tesc, gerando um script de ensaio com registro de carga dinâmico e velocidade de ensaio de 2mm/mim. Foi realizado o ensaio em 3 corpos de prova, gerando uma curva média dos valores gerados. Após o ensaio os dados foram tratados no Excel, fazendo a transformação da curva de engenharia para a curva verdadeira. A Fig. 3 ilustra estas curvas plotadas no Origin.



**Figura 3. Curva Tensão deformação de engenharia e Verdadeira**

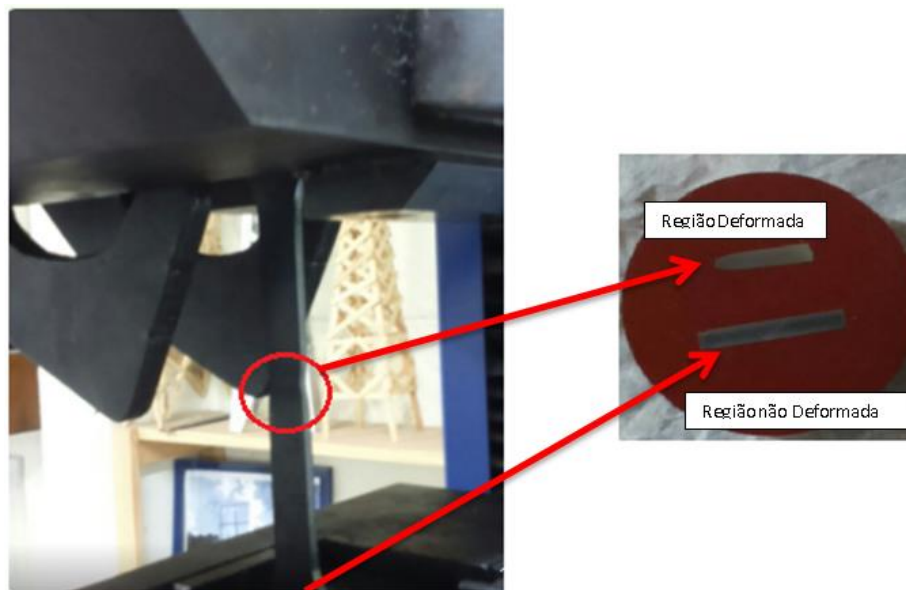
Utilizou-se a 0,002% da deformação considerando a tensão necessária para promover uma deformação permanente obtendo a tensão de escoamento deste material, sendo esta a principal para a utilização em projetos que não pode haver deformações permanentes, os valores do Módulo de Elasticidade (E), tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ), Tensão de ruptura verdadeira ( $\sigma_r$ ) e Alongamento (A) estão descritos na Tabela 2.

**Tabela 2. Parâmetros de resistência do aço MC700**

| Parâmetro            | Simbologia | Valor |
|----------------------|------------|-------|
| Mód. Elasticidade    | GPa        | 222   |
| Tensão de Escoamento | MPa        | 720   |
| Tensão de Ruptura    | MPa        | 900   |
| Alongamento(%)       | (%)        | 19,5  |

### 3.3 Metalografia e Microscopia Eletrônica de Varredura

Uma amostra foi cortada para realizar embutimento e verificar por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Conforme apresenta a Fig. 4, a região não deformada foi embutida juntamente com a região da fratura, com intuito de verificar como eram o comportamento do grão na região de deformação, visto que este material possui elevado alongamento e resistência, propriedade específica encontrada nos aços TRIP.



**Figura 4. Região da observação no MEV**

Estas regiões foram embutidas e realizadas um ataque com ácido Nital a 2% para revelação da microestrutura. A região não deformada apresentou grãos com matriz ferrítica e pouca martensita em alguns contornos, capaz de garantir a resistência mecânica do aço MC700. Foi realizado nos grãos a comprovação química pelo técnica de EDS, comprovando a matriz ferrítica, e manganês, . A imagem de MEV ilustrada pela Fig. 5a e 5b demonstra a alta deformação dos grão após a tração e diversos poros que surgem na interface da martensita com a ferrita.

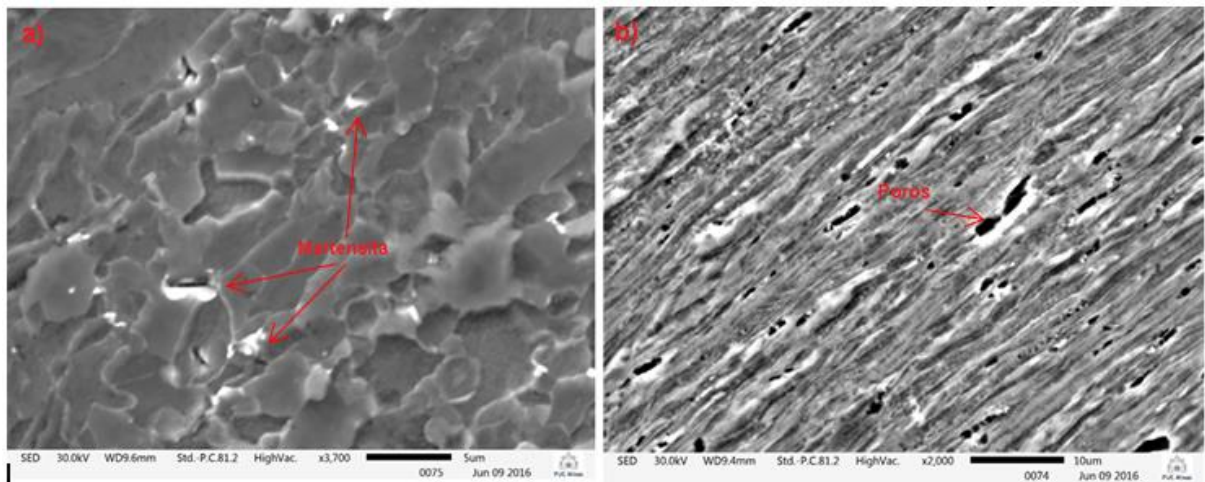


Figura 5. Imagens de MEV sendo: 5a) antes da deformação e 5b) depois da deformação

A região da estrição rompeu por fratura frágil, evidenciando o ganho de resistência mecânica pelo encruamento com a alta deformação plástica. Nesta região a matriz continua com predominância ferrítica com manganês presente. A Fig. 6 apresentam estes resultados.

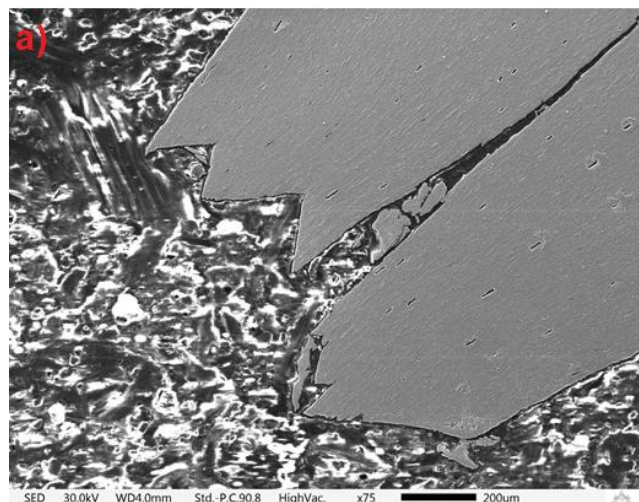


Figura 6. Região da fratura

### 3.4 Simulação no Abaqus

O Software *Abaqus* foi utilizado para simular a curva tensão x deformação verdadeira, os dados da região plástica do ensaio físico foi utilizado como base de dados para a simulação pelo método de elementos finitos. Aplicou-se um deslocamento 20mm com incremento de 0.01mm, sendo tracionado com um carregamento uniforme. A Fig. 7 demonstra o corpo de prova virtual após a deformação.

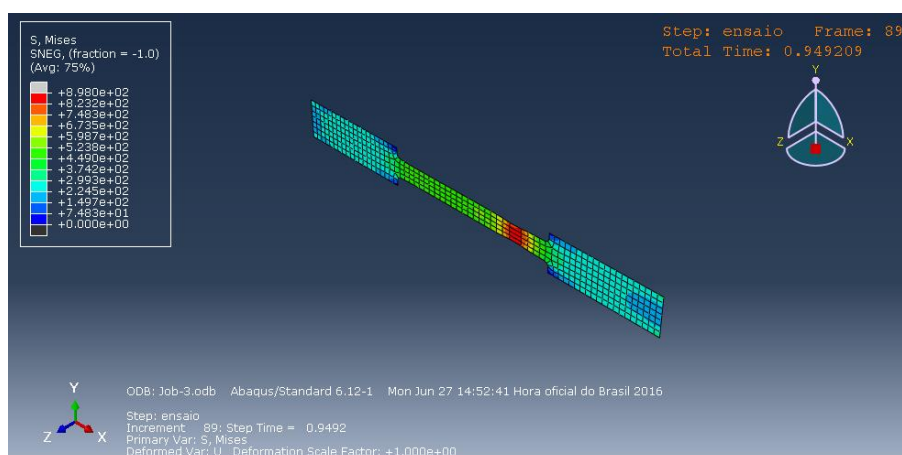


Figura 7. Corpo de prova virtual após a deformação

Os dados simulados foram compilados e gerou-se uma curva de tensão e deformação verdadeira simulada, sendo necessário interromper após alongamento percentual do ensaio físico que foi de 19,5%, uma vez que não foi simulado no *abaqus* a estricção e ruptura. O resultado gerado na simulação é baseado em força x tempo de ensaio com base nos incrementos de interações, assim é possível fazer uma correlação entre as curvas. A Fig. 8 ilustra a curva verdadeira de deformação simulada.

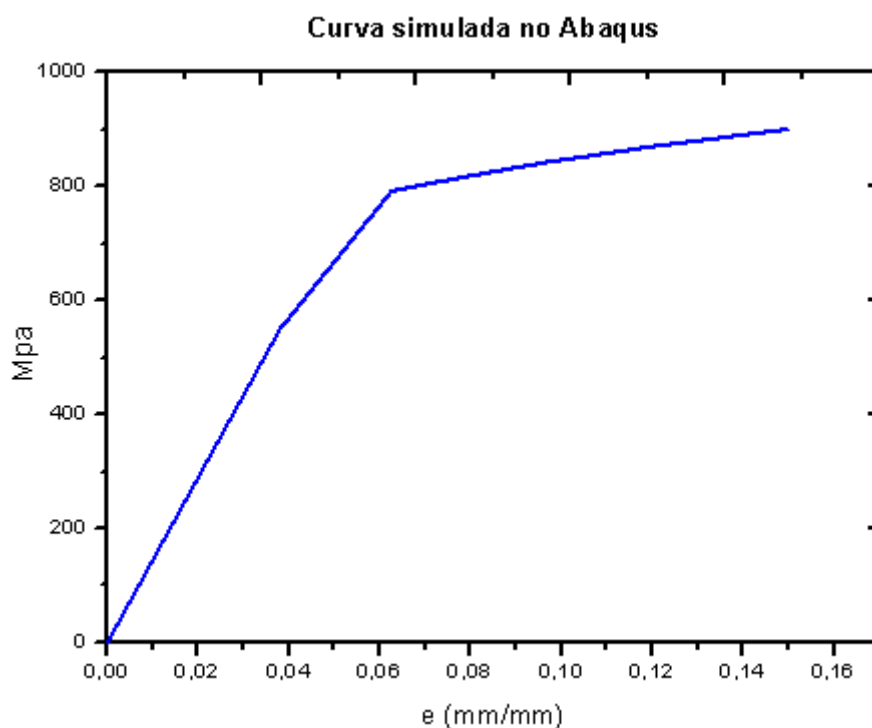


Figura 8. Curva tensão x deformação verdadeira simulada –Abaqus

### 3.5 Comparação dos resultados

Após as análises, os resultados foram comparados para verificar a validação da utilização da curva verdadeira simulada e obter respostas confiáveis de cálculos em projetos

utilizando o aço MC700 como elemento estrutural no *Abaqus*. As curvas geradas forma plotadas na Fig. 9.

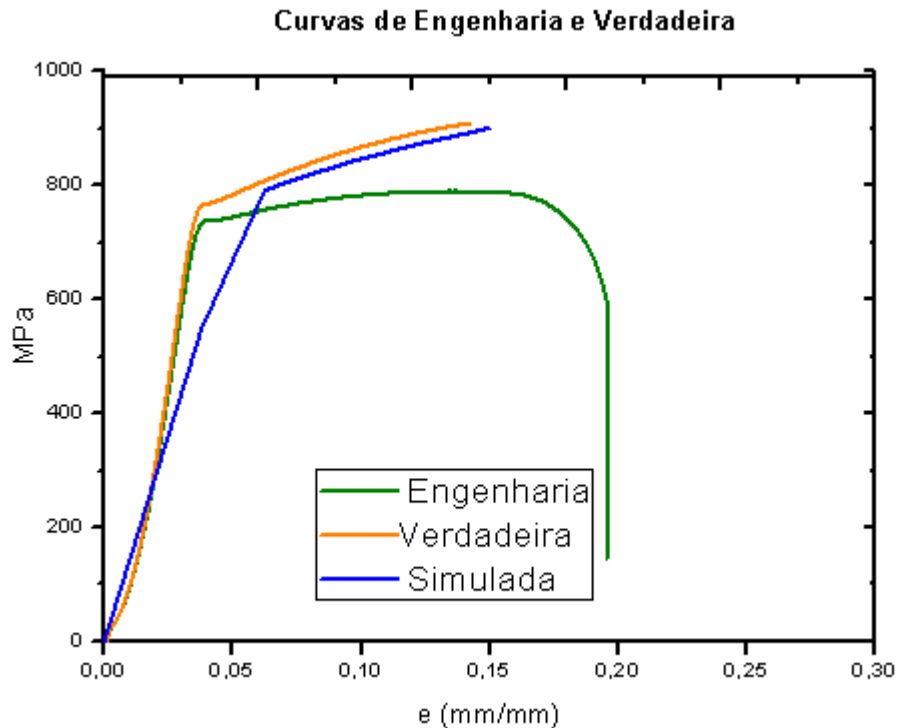


Figura 9. Sobreposição das curvas

## 4 CONCLUSÃO

A simulação numérica por elementos finitos utilizando o *Abaqus* mostrou-se eficiente e confiável quando comparamos com o ensaio físico, a curva seguiu de forma paralela no regime elástico, tendo valores um pouco menores favorecendo o limite de segurança. Assim os efeitos de falhas internas passa não ser preponderante no uso desta ferramenta. O Manganês presente neste aço contribui para o endurecimento por solução sólida, uma vez que as ilhas de martensita formadas nucleiam trincas que não são propagadas devidas nos grãos de ferrita, absorvendo a energia e dissipando para outra região do material.

O regime elástico simulado não possui similaridade com os dados ensaiados, apresentando maior ductilidade virtual em relação ao material real.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem, generosamente, à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## REFERENCIAS

B.Fu, W.Y. Yang, Y.D. Wang, L.F. Li, Z.Q. Sun, Y. Ren. 2014. *Micromechanical behavior of TRIP assisted multiphase steels studied with in situ high energy X-ray diffraction*. Acta Materialia v.76 - 342–354.

Chiang J, Lawrence B, Boyd, JD, Pilkey, AK, 2011. Effect of Microstructure on retained austenite stability and work hardening of TRIP steels. Mater. Sci. Eng; v.528:4516-4521.

DE Coomam, B. C.2004. Structure-Properties Relationship in TRIP Steels Containing Carbide-Free Bainite, Current Opinion in Solid State and Materials Science, v. 8, pp. 285–303.

Dieter, G.E. *Workability Testing Techniques*. Ohio: American Society for Metals, 1984.

Y.Shi, P. Hamstra, R. Mallory, S.R. MacEwen, P.D Wub. 2007. *Numerical simulation of the pressure ram forming process*. Journal of Materials Processing Technology 182 pág. 411–417.

Jacques PJ, 2004. *On the austenite retention in low alloy* . Current Opinion in Solid State and Materials Science,2004. 8(3--4): p. 259--265. 36

Nick, B.A, Donato, G.H, 2005. *Metodologia para determinação de curvas tensão deformação verdadeiras pós-estricção*. Centro Universitário da Fundação Educacional Inaciana (FEI), Projeto Pbic.

Matlock, D. K.; Zia-Ebrahimi, F.; Krauss, G, 1982. *Structure, Properties, and strain hardening of dual phase steels*. American Society of Metals, pp. 47-87.

Muransky O, Sittner P, Zrnl'k J, Oliver EC, 2008. Acta Materialia ;56:3367.