



XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS  
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING  
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

## **ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO TRIP 900 MC POR MEIO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EM COMPARAÇÃO COM ENSAIO DE TRAÇÃO.**

**Norberto Martins**

**Carlos Eduardo dos Santos**

norbertoengmec@gmail.com

carlooseduardo@deii.cefetmg.br

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

**Gilmar Cordeiro da Silva**

gilmarcord@gmail.com

Puc Minas

**Caio Nelson Nogueira Nápoles.**

caionapoles@gmail.com

Puc Minas

**Resumo:** *O objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades mecânicas do aço 900 MC, que possui elevada resistência mecânica e boa conformabilidade, utilizando ensaios destrutivos por meio de esforços a tração. Os corpos de prova foram submetidos a carregamento uniaxial em uma máquina universal de ensaios com capacidade de 200 kN e sistema de controle de carregamento. Os dados coletados foram plotados graficamente, utilizando o software Origin, permitindo extrair os valores de Resistência a Tração, Módulo de Elasticidade (E), Tensão de Escoamento ( $\sigma_{Esc}$ ) e Alongamento (A%) do aço proposto. Utilizando o Método de Elementos Finitos, o ensaio será reproduzido e coletado as informações simuladas das propriedades mecânicas. A realização desse trabalho se justifica, pois, com esta análise, é possível confrontar os resultados e verificar a validação pelo software comercial (ABAQUS), apontando a confiabilidade desta técnica para cálculo de projetos, uma vez que a microestrutura do material, as discordâncias e tamanho de grão não são levados em consideração nas simulações, que podem comprometer a precisão e a veracidade dos resultados. Estes aços possuem alta aplicabilidade em peças que requer conformabilidade e elevada resistência mecânica após algum tipo de tratamento micro estrutural ou superficial.*

**Palavras chave:** *Resistência Mecânica, Conformabilidade e Métodos de Elementos Finitos.*

## **1 INTRODUÇÃO**

Com a finalidade de atender um mercado globalizado, competitivo e cada vez mais exigente, especialmente a indústria automotiva, as siderurgias através de novos métodos e tecnologias, têm desenvolvidos produtos com ótimos parâmetros de conformabilidade, excelentes qualidades nas propriedades mecânicas, minimizando os custos de produção, fazendo com que nos vários segmentos da engenharia de materiais, outras forma e variedades de materiais estão sendo disponibilizados aos engenheiros (Bhadeshia, 2004). Dentre os materiais de engenharia disponíveis, o aço se destaca pela sua versatilidade, visto que pode ser empregado na fabricação de vários produtos de usos domésticos, e em equipamentos que exigem novas tecnologias com sofisticado suporte industrial para ser construídos e que possa atender a indústria naval, a aeroespacial, etc. É importante ressaltar, que o aço possui características próprias que lhe permite ser reciclado inúmeras vezes sem perder as suas propriedades originais (Rodríguez., Pesci., Rusinek., Arias., Zaera., Pedroche, 2010). Como exemplo de material para atender as necessidades acima mencionadas, pode-se citar os aços com efeitos TRIP (Transformation Induced Plasticity), que são novos tipos de materiais, que proporcionam ao aço, uma ótima combinação de conformabilidade, da taxa de deformação, da ductilidade, do coeficiente da taxa de encruamento e que fazem parte de uma nova série de aços avançados de alta resistência, (Advanced High Strength Steel-AHSS) (Bleck, 1992). Uma ferramenta de grande importância que vem evoluindo de qualidade nos últimos anos, são os softwares de modelagem e de simulação computacional, que estão sendo usados para prever o comportamento, as características geométricas e os parâmetros dos processos de fabricação, minimizando os custos, melhorando a produtividade e colocando no mercado de consumo, um produto de melhor qualidade. Desta forma, simulações numéricas computacionais permitem melhorar o processo e evitar construções de protótipos e teste desnecessários. Este trabalho visa comparar os resultados obtidos por processo de trefilação prático e simulado computacionalmente por meio do Método de Elementos Finitos (MEF), através do software comercial ABAQUS (Rodríguez., Pesci., Rusinek., Arias., Zaera., Pedroche, 2010).

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Aços Multifásicos**

Os aços multifásicos, considerando o aspecto microestrutural da matriz, são constituídos de ferrita, bainita, austenita retida e martensita, possuindo excelentes parâmetros, que lhes conferem resistência mecânica, tenacidade e conformabilidade. Sendo esta última, um potencial de qualidade para melhoria das propriedades mecânicas, quando a fração de austenita retida for alta (Bleck, 2002).

A partir da produção destes aços, que possuem qualidades como alta resistência mecânica, boa conformabilidade, e que foram desenvolvidas a partir dos aços multifásicos com a descoberta do efeito TRIP, fez com que o uso do aço na indústria automobilística voltasse a ter um aumento significativo na sua aplicabilidade, devido a diminuição nos pesos dos componentes estruturais, redução no volume da matéria prima, aumento da segurança nos veículos, queda no consumo de combustível, e conseqüentemente menor impacto ambiental (Lee et al., 2003).

### **2.2 Aço TRIP**

O efeito TRIP é considerado como a transformação da microestrutura, obtida durante o processo de deformação plástica em baixas temperaturas, considerando que a austenita retida durante o processo de laminação, através da transformação bainítica, transforma-se em martensita durante a conformação mecânica do metal na temperatura ambiente. Para a obtenção do efeito TRIP os aços devem ter uma fração volumétrica suficiente de austenita retida, que é obtida no resfriamento contínuo após um ciclo de tratamento termomecânico ou como parte do recozimento após a laminação a frio, de modo a obter uma microestrutura final multiconstituída (Gorni, 2008).

O Processo de obtenção dos aços assistidos pelo efeito TRIP nas indústrias siderúrgicas, podem ser obtidos através de duas rotas de trabalho, ou seja, laminados a quente e/ou a frio e recozidos (Speer, 2005; Kantovicki, 2005).

No processo de desenvolvimento de aços TRIP multifásicos laminados a quente, as propriedades mecânicas e microestruturais podem ter suas variáveis ajustadas durante a laminação, em parâmetros importantes como taxa de deformação, taxa de encruamento, grau de deformação, que são obtidos no produto final. (Bleck, 2002).

De acordo com Coelho (2008), durante o processo a chapa laminada a quente é totalmente austenitizada e durante o resfriamento controlado, obtém-se a bainita e a ferrita. Esse controle se faz necessário pois é preciso obter entre 50% e 60% de ferrita pró-eutetóide e que durante o bobinamento do produto, a temperatura de formação da bainita esteja na faixa de 400 a 500°C, para que se obtenha 40% de bainita entremeadas de 5 a 15% de austenita retida. (Bleck, 2002).

Em se tratando do processo de laminação à frio, é necessário que o estado inicial do aço TRIP apresente alta ductilidade em virtude da presença de uma microestrutura formada por ferrita e perlita, que se originou da alta temperatura, em torno de 700°C durante bobinamento. Após a laminação a frio, conforme (De Cooman, 2004), nos produtos laminados são

aplicados dois tipos de processos de tratamento térmicos, sendo que no primeiro o material é submetido tratamento de recozimento, que é realizado na temperatura intercrítica, na faixa de 780 a 880°C, seguido de um resfriamento rápido até atingir a temperatura entre 350 e 500°C, onde a maior parte da austenita se transforma em bainita, seguido de um resfriamento ao ar (Rodríguez., Pesci., Rusinek., Arias., Zaera., Pedroche, 2010).

Ao longo deste processo e enquanto a ferrita e bainita vão se formando, o carbono segregado destas fases se acumula na austenita (Gajda et al., 2007), aumentando sua estabilidade e favorecendo as condições que procuram evitar a transformação martensítica por resfriamento.

Através da Fig. 1 é possível comparar e analisar a posição do aço TRIP com vários outros tipos de aços avançados de alta resistência, levando em consideração o alongamento em relação ao limite de escoamento do material (Martins., Rizzo, 2007).

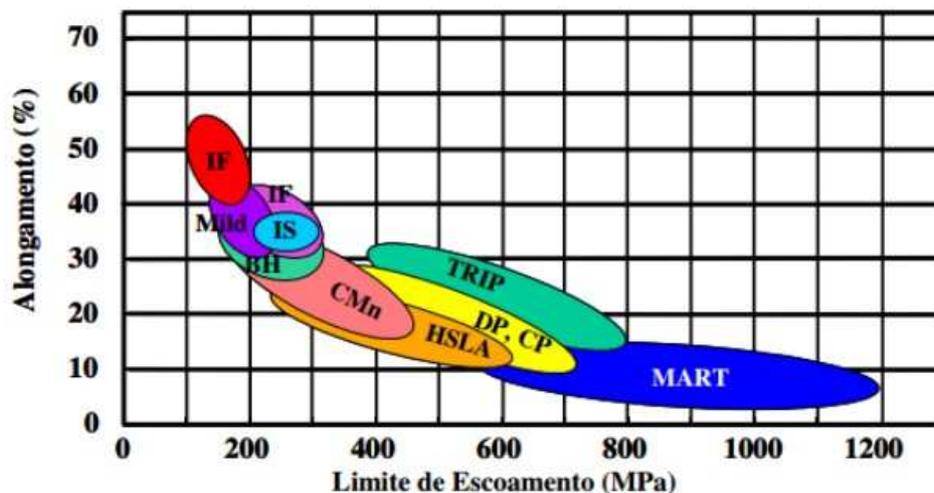


Figura 1. Gráfico comparativo do aço TRIP com outras categorias, quando o objetivo é verificar o alongamento versus Tensão de Resistência a tração.

Dentre as categorias dos Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS), os aços multifásicos devido as suas propriedades microestruturais, representam a mais recente solução para aplicações em peças com geometria complexa, as quais requerem de elevada resistência mecânica, ótima ductilidade, bem como um comportamento adequado nos ensaios de impacto (Crash-Test), que avaliam o desempenho da segurança dos veículos, quando a estrutura absorve maior energia durante a aplicação de cargas dinâmicas (Gorni, 2008).

Este trabalho se justifica, pois o seu objetivo foi alcançado e consistiu em avaliar as propriedades mecânicas do aço 900 MC, e através de ensaios uniaxial de tração, foi determinado o seu Limite de Resistência à Tração, a Tensão de Escoamento, o Alongamento e que o software comercial (ABAQUS), foi usado para comparar e validar os dados quantificados nos ensaios experimentais.

### 3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento metodológico dessa pesquisa, a proposta foi de adotar um padrão de trabalho uniforme, para que os resultados mensurados, adquirisse melhor qualidade. As etapas seguiram as seguintes rotas: Ensaio de tração, embutimento das amostras, estudo metalográfico e microscópio, simulação das curvas de fluxo e discussão dos resultados.

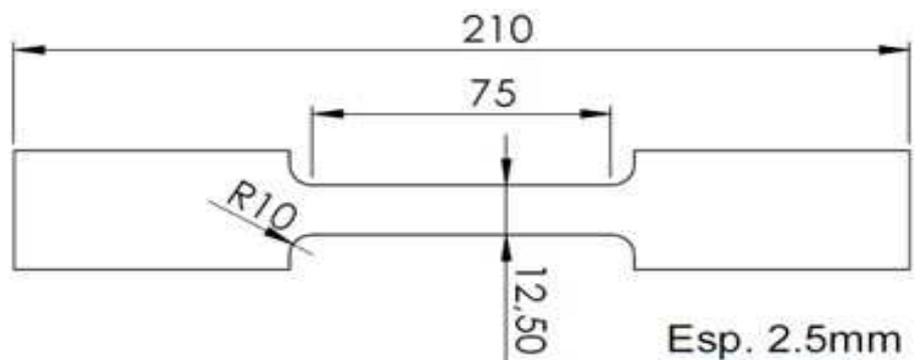
#### 3.1 Preparação dos corpos de prova

O material empregado nesse estudo, foi o aço 900 MC cuja a composição química, pode ser visto na tabela 1.

**Tabela 1. Composição química do aço TRIP 900 MC empregando (% em massa).**

Elemento	Simbologia	(%)
Carbono	C	0.082
Manganês	Mn	1.05
Silício	Si	0.18
Fósforo	P	0.011
Enxofre	S	0.002
Vanádio	V	0,013
Nióbio	Nb	0,001
Cromo	Cr	0.90
Níquel	Ni	0.12
Molibdênio	Mo	0.123
Titânio	Ti	0,26

Os corpos de prova para o ensaio de tração, foram usinados no sentido de laminação da chapa e conforme desenho da Fig. 2.



**Figura 2. Corpo de prova de tração**

Na Fig. 3, está plotado as curvas de fluxo do aço 900 MC, comparando as tensões e deformações de engenharia e verdadeira, que foram obtidas no ensaio de tração, que é amplamente usado para a obtenção de informações básicas sobre a resistência de materiais, que foi realizado na máquina universal de tração EMIC DL 20000, cujo os parâmetros de velocidade (2mm/min) e carga de 20Ton. Observando que todos os corpos de prova, foram tensionados uniaxialmente até a ruptura (Dieter, 1986).

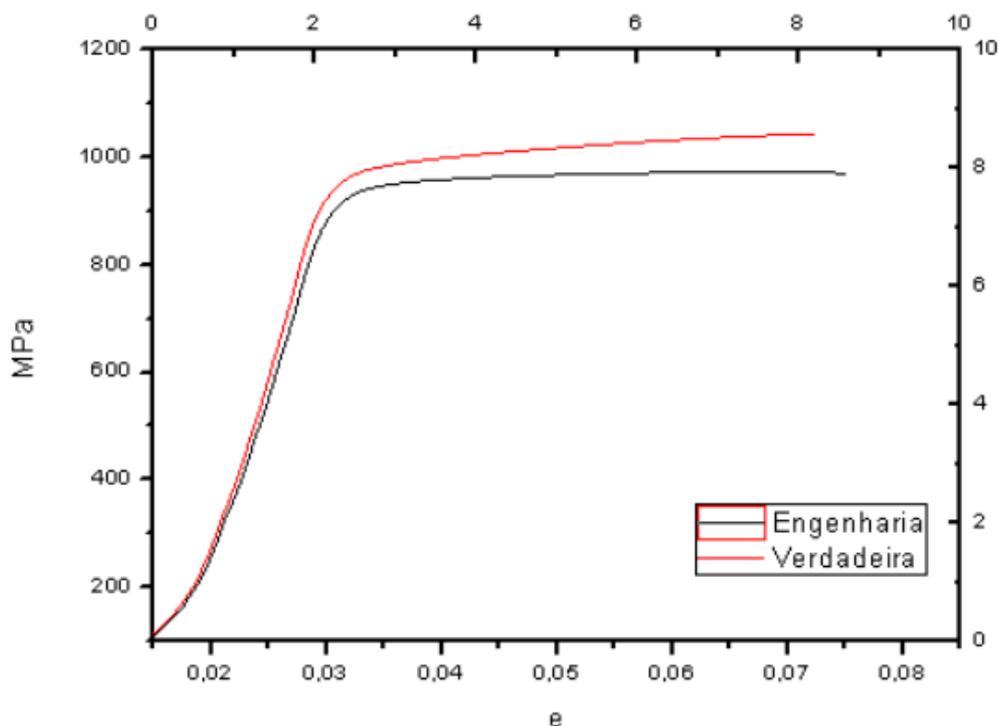


Figura 3. Curvas de Tensão X Deformação Verdadeira e de Engenharia.

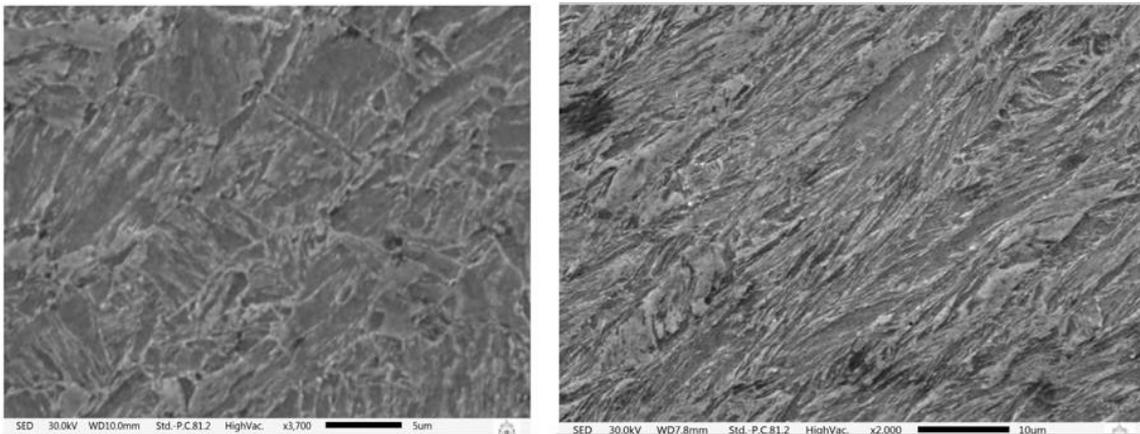
Na tabela 2 estão mensurados, os dados das propriedades mecânicas do aço 900 MC, obtidas no ensaio uniaxial de tração.

Tabela 2. Variáveis das propriedades mecânica do aço 900 MC.

Variáveis	Unidades	Valores
Tensão Limite Resistência	MPa	1050
Tensão de Escoamento	MPa	990
Módulo de Elasticidade	GPa	115
Ductilidade	(%)	14.4%

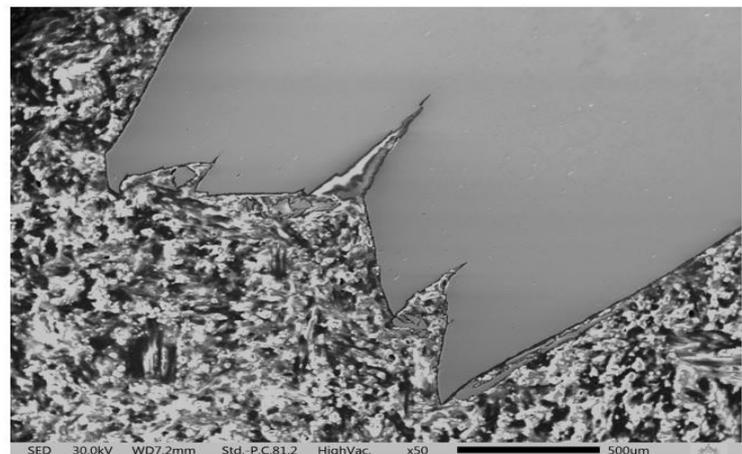
### **3.2 Análise Metalográfica e Microscópica**

Nas Fig. 4a e 4b estão respectivamente demonstradas a visualização das regiões não deformada e a deformada durante o ensaio de tração e de onde foram retiradas as amostras para realização dos estudos da microestrutura a serem analisadas e que é possível identificar na Fig. 4b, o alongamento dos grãos até a fratura. Houve uma preparação padronizada na metodologia de obtenção das amostras, visando a homogeneidade dos resultados, pois cada uma das etapas, embutimento, lixamento e polimento, devem ser realizados com muito cuidado e uniformidade, para que os resultados finais do trabalho não sejam comprometidos (Petzow, 2001).



**Figura 4. Visualização das amostras realizadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV): 4a) região não deformada, 4b) região pós ensaio de tração.**

Durante toda a realização dessa etapa do trabalho, procurou-se adotar uma padronização nos parâmetros utilizados para execução da pesquisa, tendo como finalidade, tornar os resultados coerentes e confiáveis. A Fig. 5 mostra a região de interesse (fratura), onde as amostras foram seccionadas e após todas etapas metalográficas, foram enviadas ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), para serem analisadas.



**Figura 5. Região da fratura do corpo de prova no ensaio de tração.**

### 3.3 Simulação no software Abaqus

O abaqus foi utilizado para simular a curva tensão x deformação verdadeira, com intuito de verificar a real comparação entre o MEF e o ensaio físico. A fig. 6 ilustra a região onde ocorre o início da estricção durante o ensaio simulado.

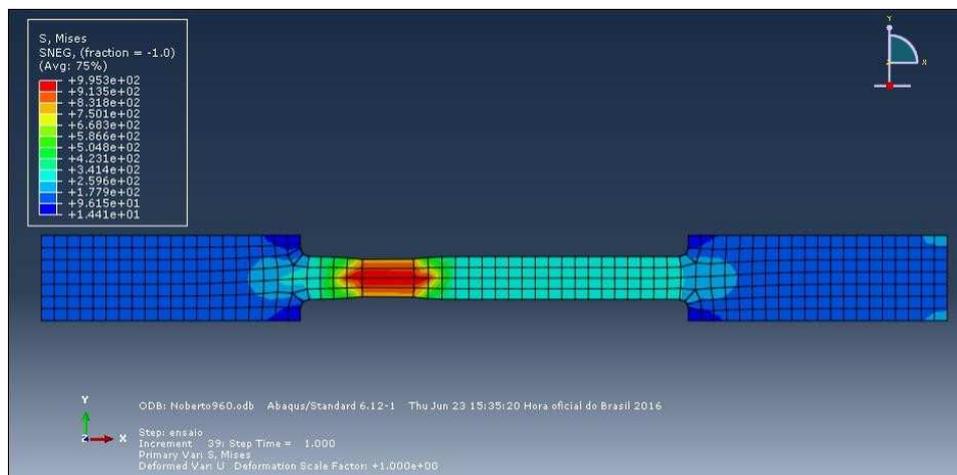


Figura 6. Região da fratura do corpo de prova no ensaio de tração.

A curva tensão deformação verdadeira plotada no Abaqus, é gerada por meio do módulo de elasticidade divulgado na literatura de 200 GPa para aços e coeficiente de Poisson de 0.27 a 0.30. A fig. 7 apresenta a curva simulada.

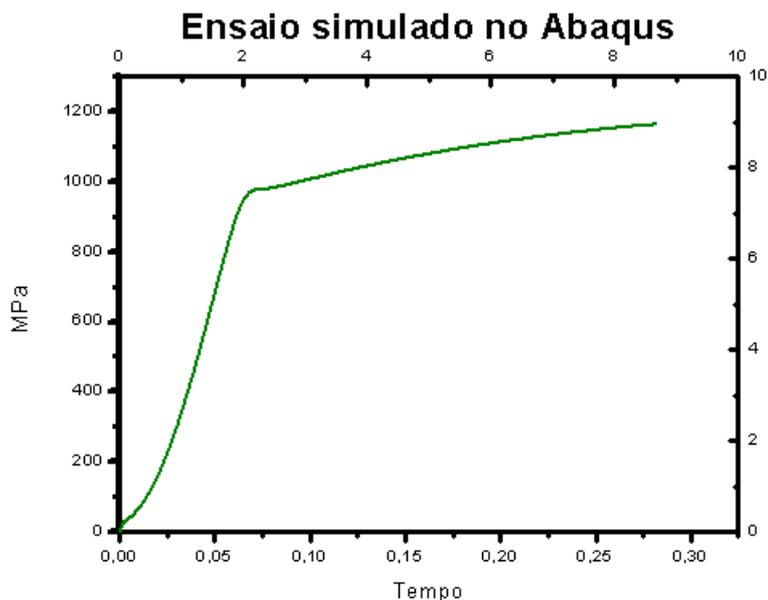


Figura 7. Curva simulada do Aço 900 MC

### 3.4 Comparação dos resultados

Através da fig. 8, é possível fazer uma análise e comparação entre os dados obtidos no ensaio de tração, com os resultados da simulação. Como proposto, o software Abaqus validou os dados físicos, apontando a confiabilidade desta técnica para cálculo de projetos, uma vez que a microestrutura do material, as discordâncias e tamanho de grão não são levados em consideração nas simulações, que podem comprometer a precisão e a veracidade dos resultados.

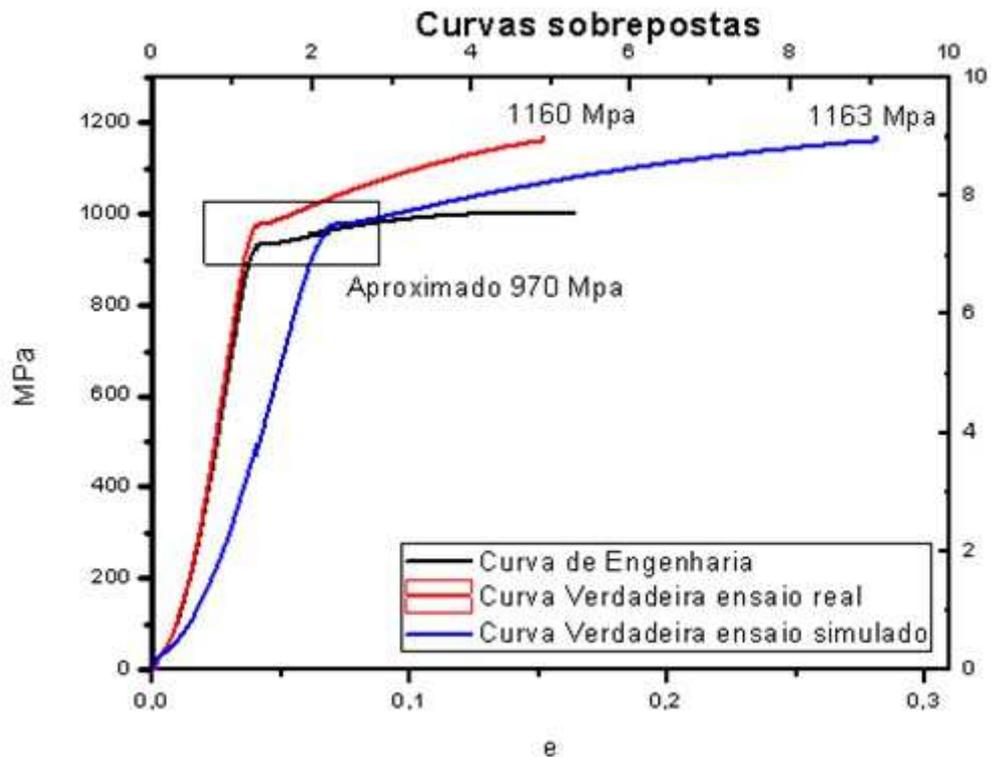


Figura 8. Sobreposição das curvas do ensaio físico e da simulada do Aço MC 960

## 4 CONCLUSÃO

Ao analisar os valores calculados e simulados, é possível concluir que os softwares de modelagem e de simulação numérica que estão sendo usados para prever o comportamento e os parâmetros geométricos dos processos de fabricação, se mostram ferramentas de alta confiabilidade e precisão na comparação com os dados provenientes de um ensaio físico de tração. A congruência dos resultados se mostraram satisfatório analisando o que foi proposto e o objetivo atingido.

## 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).

## REFERÊNCIAS

- Bhadeshia, H., 2004. *Bainite Transformations, Current Opinion in Solid State and Materials Science* 8, pp. 211.
- Bleck, W. 1996. *Cold-Rolled, High-Strength Sheet Steels for Auto Applications (Overview)*, Journal of Metals - JOM, New York, pp. 26-30.
- Bleck, W., 2002. *Using the TRIP Effect - The Dawn of a Promising New Group of Cold Formable Sheets. In: International Conference on TRIP-aided High Strength Ferrous Alloys, Ghent: GRIPS-Proceeding*, pp. 13-23.
- DE COOMAN, 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., 1986. *Metalurgia Mecânica*, ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro. pp. 282
- Gajda, B., LIS, A. K., 2007. *Journal of Achievement in Materials and Manufacturing Engineering*, v.20, Issues 1-2, pp. 439
- Gorni, A. A., 2008. *Aços Avançados de Alta Resistência, Microestrutura e Propriedades Mecânicas, Corte & Conformação de Metais*, São Paulo, pp. 26-57.
- Lee, C. G., 2003. *Effects of volume fraction and stability of retained austenite on formability in a 0.1C-1.5Si-1.5Mn-0.5Cu TRIP-aided cold-rolled steel sheet, Materials Science and Engineering A00*, pp. 1-8.
- Martins, A. R. F. A., Rizzo, Fernando., 2007. *Têmpera e Partição em Aços de Alta Resistência Contendo Ni, Modelagem Cinética, Microestrutura e Propriedades Mecânicas*, Tese de Doutorado, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, pp. 194.
- Petzow, G., 2001. *Metallographic Etching: Techniques for Metallography, Ceramography, Plastography*, 2.ed. Ohio, American Society for Metals, ASM International, pp. 240.
- Rodríguez, M. J. A., Pesci, R., Rusinek, A., Arias, A., Zaera, R., Pedroche, D. A., 2010. *Thermo-Mechanical Behaviour of TRIP 1000 Steel Sheets Subjected to Low Velocity Perforation by Conical Projectiles at Different Temperatures*, International Journal of Solids and Structures, v. 4, pp. 1268–1284.
- Speer, G. J., 2005. *Aços Avançados de Alta Resistência para Aplicações Automotivas, O Processo “Tempera e Partição” Promete Alta Resistência para Aplicações Automotivas.*, Metalurgia e Materiais, pp. 103-105.