

ENSAIOS DE TRAÇÃO E METALOGRAFIA: UM COMPARATIVO ENTRE CORPOS DE PROVA COM E SEM ENTALHE

Guilherme Cortelini da Rosa¹, Marcelo André Toso², Ronaldo Cesar Tremarin³

Resumo: Nenhum ensaio mecânico consegue prever com extrema fidelidade o comportamento mecânico de um material, tanto em etapa de produção como em etapa de utilização, no entanto o ensaio de tração é o que melhor representa a relação entre informações obtidas e complexidade do ensaio. Esse ensaio consiste em submeter um corpo de prova a uma carga axial que tenda a deformá-lo pelo alongamento até o momento em que se rompa. Através de um *software* é possível obter a curva *tensão x deformação* e dela os diversos dados sobre o material ensaiado. Nesse sentido, o presente trabalho objetiva verificar o comportamento do aço SAE 1020 quando submetido ao ensaio de tração com e sem entalhe, que é um concentrador de tensão, bem como realizar análise metalográfica dos diferentes corpos de prova. Verificaram-se formações de curvas distintas entre os diferentes corpos de prova, com aumento significativo nas tensões, tanto no escoamento quanto na ruptura, para os corpos de prova sob o efeito do entalhe.

Palavras-chave: Ensaio de tração. Fratura dúctil. Fratura frágil. Concentrador de tensão.

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que os materiais dúcteis, como o aço SAE 1020, apresentam grandes deformações quando submetidos a ensaio de tração. Essas deformações são verificadas por uma elevada alongação do corpo de prova e uma grande redução da área transversal ao carregamento, conforme Dieter (1988), quando submetidos ao ensaio de tração. Com base nisso, foram realizados ensaios de tração (tensão de engenharia x deformação de engenharia) em corpos de prova (CP) com e sem entalhe. Quando se submete um corpo de prova que contém concentradores de tensão (entalhe) aos mesmos testes realizados nos corpos de prova sem concentradores de tensão, os resultados de tensões e deformações mostram-se completamente distintos. Verificou-se aumento significativo nas tensões, tanto no escoamento quanto na ruptura, para os corpos de prova sob o efeito do entalhe.

Constatamos que a diminuição da ductilidade é devida à formação de um estado triaxial de tensões somadas a uma elevação das tensões atuantes na região do concentrador. Também verificou-se nos CPs sem entalhe uma deformação generalizada na superfície da fratura indicando a fratura dúctil. Já os que possuem entalhes não apresentaram deformações macroscópicas significantes, indicando uma fratura frágil. As alterações das microestruturas provocadas pelo entalhe foram estudadas a fim de determinarmos a sensibilidade ao entalhe quando comparado às condições iniciais de um CP sem entalhe. Como resultados da comparação é apresentada a Razão Entalhe-Resistência (*notch strength ratio, NSR*), percentual de estrição, alongamento total e aumento na tensão de escoamento. Por fim, foi realizada análise metalográfica, em que foram comparados os grãos do material para cada situação em que se diferem fratura dúctil e fratura frágil.

1 Mestre em Engenharia Mecânica. Professor da Univates. guilherme.rosa@univates.br

2 Mestre em Engenharia Mecânica. Professor da Univates. marcelo.toso@univates.br

3 Mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Professor/coordenador da Univates. ronaldokt@univates.br

2 METODOLOGIA

Foram realizados ensaios de tração e obtidas às curvas tensão x deformação de Engenharia em três tipos de corpos de prova utilizando como material o aço SAE 1020, representando um material que possui boa ductilidade. Os três tipos de corpos de prova utilizados são: um corpo de prova sem entalhe; um corpo de prova com entalhe de profundidade 1,5 mm no raio e um corpo de prova com entalhe de profundidade 3,0 mm no raio. Os corpos de prova e os ensaios de tração foram feitos de acordo com a norma ASTM E8M que normatiza ensaios de tração para materiais metálicos. Os entalhes foram feitos com ângulo de 60° e um raio de ponta tendendo a zero, devido ao valor recomendado para raio de ponta de entalhe ser de 0,0025cm. Ainda, segundo Dieter (1988), a profundidade do entalhe é tal que a área da seção reta na ponta do entalhe é a metade da área na seção não entalhada. A área da seção resistente à tração do CP sem entalhe é 113,1 mm². O CP com entalhe de 1,5mm representa uma redução de aproximadamente 50% com área igual a 63,6 mm². Para o CP com entalhe 3,0 mm, a redução da área representa aproximadamente 75% do valor inicial com 28,3 mm², conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Dimensões dos corpos de prova

	Diâmetro do CP (mm)	Área do CP (mm ²)	Entalhe (mm)	Área resistente (mm ²)
Corpo de prova sem entalhe	12,0	113,1	Sem entalhe	113,1
Corpo de prova com entalhe 1,5	12,0	113,1	1,5	63,6
Corpo de prova com entalhe 3,0	12,0	113,1	3,0	28,3

Os ensaios foram feitos em uma máquina de ensaios de tração hidráulica com capacidade de 100KN e uma precisão de obtenção dos dados de 0,001 para a carga e para o deslocamento (FIGURA 1), disponível na Univates. O *software* Panantec V. 3.2 conectado à máquina recebe os dados do ensaio e fornece o gráfico carga x deformação juntamente com os dados de carga e tensão de escoamento, carga e tensão de ruptura, alongamento percentual e estrição percentual da área resistente à tração do CP. O *software* da máquina também fornece uma lista dos pontos encontrados para cada instante de carga e deformação. Para cada tipo de CP foram feitas três repetições de ensaio e posteriormente a média dos valores fornecidos pelo *software*. Com base nesses dados foram feitos os gráficos de tensão x deformação de Engenharia para cada tipo de CP e um quarto corpo de prova com entalhe de 1,5mm de profundidade foi submetido à tração sem rompimento.

Figura 1: Máquina de ensaios de tração



Depois de ensaiados os corpos de prova, uma análise metalográfica foi feita para uma amostra de cada tipo de CP. As amostras foram retiradas de um dos lados rompidos dos CPs e usinadas até o centro no sentido longitudinal, para ser vista a microestrutura no sentido do alongamento. A usinagem foi feita em um centro de usinagem utilizando fluido de refrigeração para que sua microestrutura não sofresse alterações térmicas que influenciassem os resultados. Cada amostra usinada foi embutida em baquelite com posterior polimento e ataque químico com Nital 2%. Fotografias da microestrutura foram tiradas em um microscópio Ótico Neophot 21 / Zeiss com aumento de 625x, tornando visíveis as formas dos grãos antes e após as deformações. Também foram fotografadas as fraturas dos corpos de prova para posterior identificação da fratura dúctil e frágil.

Quando um corpo de prova está sujeito a um estado triaxial de tensões, como, por exemplo, um entalhe, ocorre uma redução de sua ductilidade, ou seja, ele não consegue mais absorver energia durante a deformação plástica, diferentemente de suas medidas com padrão liso. A resistência ao entalhe definida como a carga máxima dividida pela área original da seção transversal no entalhe, a razão entalhe-resistência (*NSR*) ou alta sensibilidade ao entalhe é a maneira mais comum de detectar a fragilização devido ao entalhe dado pela equação (1):

$$NSR = \frac{S_{ent}}{S_u} \quad (1)$$

Onde S_{ent} e S_e são a resistência à tração máxima para um corpo entalhado e um corpo sem entalhe, respectivamente. Quando o valor de *NSR* for menor que a unidade, o material está frágil devido ao entalhe. Segundo Megahed et al., (2001), citado anteriormente por Majima, Anzai e Nakazawa (1980), algumas conclusões sobre os efeitos do entalhe são obtidas:

1. para um raio de entalhe maior que um valor determinado pela ductilidade do material, o *NSR* aumenta com a diminuição do raio de entalhe;

2. o *NSR* aumenta com a profundidade do entalhe até aproximadamente metade do diâmetro;

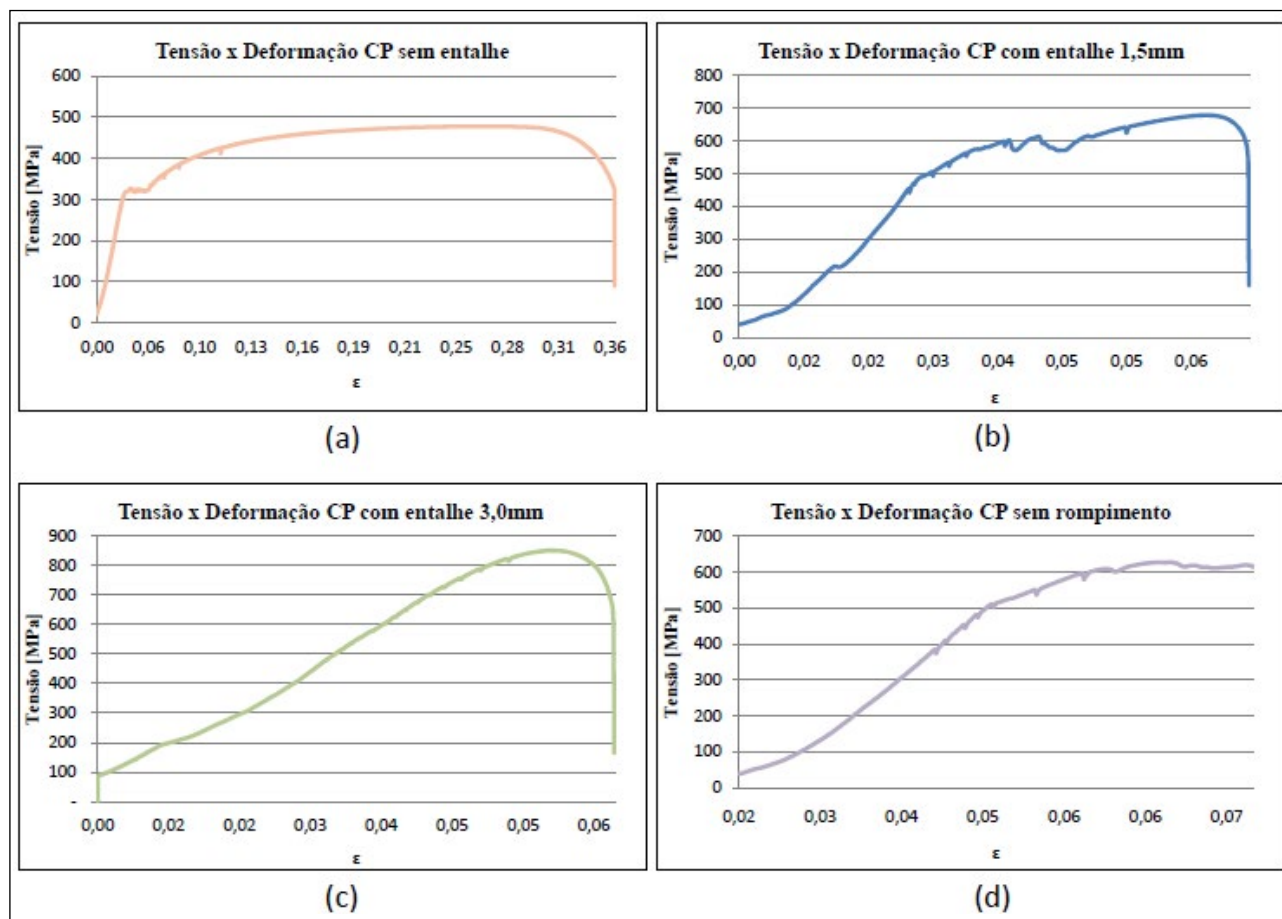
3. para materiais com baixa resistência, o *NSR* pode ser estimado como uma função da tensão triaxial média, η , e a razão da elongação local pela elongação total ($\delta L/\delta T$) na curva de engenharia tensão deformação para tração uniaxial;

4. o *NSR* de um entalhe circunferencial em um corpo de prova cilíndrico é maior que em um corpo de prova retangular que tem entalhes em lados opostos com o mesmo perfil de entalhe do corpo de prova cilíndrico. Isso indica que o *NSR* aumenta com a tensão triaxial na vizinhança da seção.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 2 podemos evidenciar as curvas tensão x deformação de Engenharia para cada tipo de CP e um quarto corpo de prova com entalhe de 1,5mm de profundidade submetido à tração até um nível de deformação plástica anterior e próxima ao ponto de ruptura (FIGURA 2d).

Figura 2: Curvas Tensão x Deformação de Engenharia



Legenda: a) Curva Tensão x Deformação CP sem entalhe. b) Curva Tensão x Deformação CP entalhe 1,5. c) Curva Tensão x Deformação CP entalhe 3,0. d) Curva Tensão x Deformação CP não rompido.

Como se pode notar na Figura 3, para o corpo de prova sem entalhe, há uma nítida formação de uma zona acentuada de estricção e se verifica o formato característico taça-cone de fratura dúctil,

como era o esperado. Nota-se na região central interior da superfície uma aparência irregular fibrosa, o que é indicativo de deformação plástica. Os corpos de prova com entalhe de 1,5mm (FIGURA 4) e entalhe 3,0mm (FIGURA 5) se comportaram de forma frágil em função da sensibilidade ao entalhe. Apresentaram ausência de qualquer deformação plástica e uma zona de estrição praticamente imperceptível à vista desarmada.

Figura 3. Fratura dúctil no CP sem entalhe

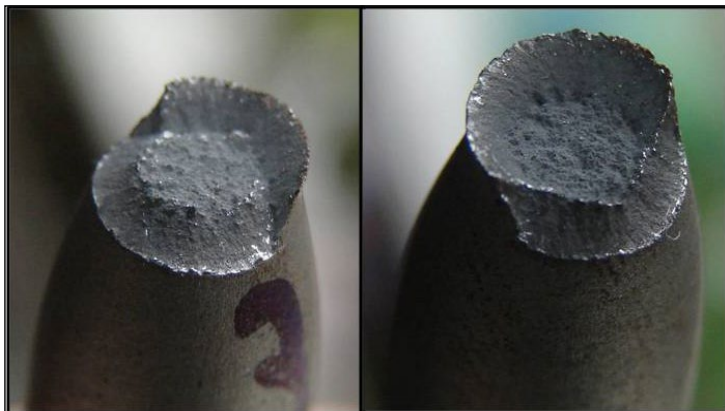


Figura 4. Fratura frágil no CP com entalhe de 1,5mm

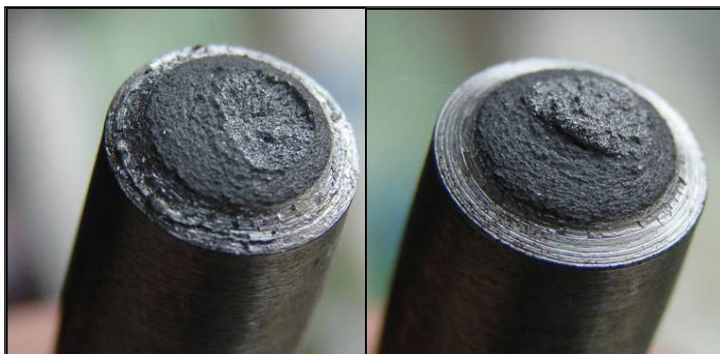
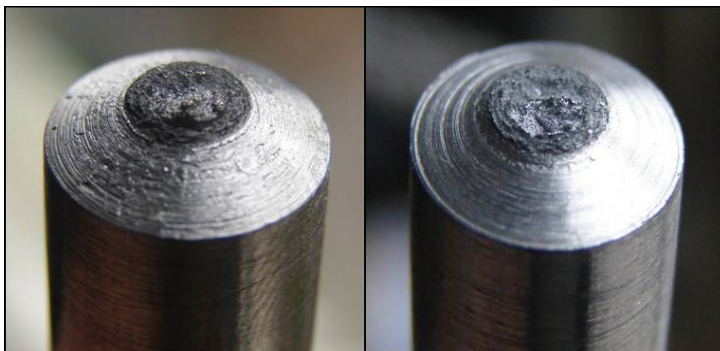


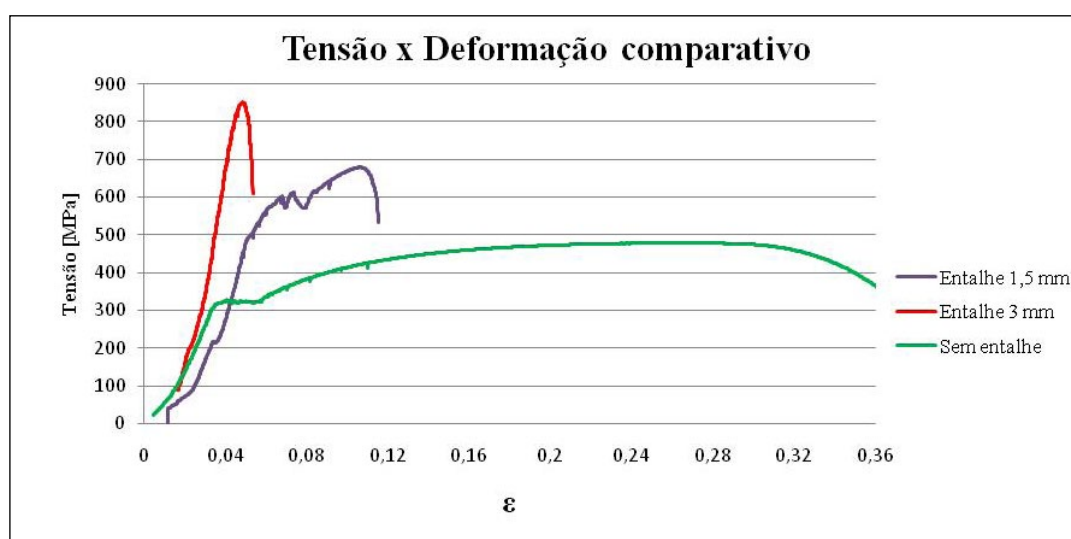
Figura 5. Fratura frágil no CP com entalhe de 3mm



A Figura 6 apresenta a curva tensão x deformação de engenharia comparativa entre os três corpos de prova. Nota-se, pela Tabela 2, que a tensão de escoamento para o CP com entalhe de 1,5mm foi 63,67% maior que a tensão de escoamento para o CP sem entalhe. Já a tensão de escoamento do CP com entalhe 3,0mm foi de 169,43% superior à tensão do primeiro. Conclui-se que o efeito do entalhe na tensão de escoamento não ocorre de forma linear quando esse entalhe é aumentado. Quanto mais representativo for o entalhe em relação às dimensões do CP, maior será o efeito causado pelo estado triaxial de tensões e maior será a restrição a deformações de alongamento e estricção no material.

A tensão de ruptura para o CP com entalhe 1,5mm foi 46% maior que para o CP sem entalhe. Já para o CP com entalhe 3,0mm foi 87% maior que o CP sem entalhe.

Figura 6. Comparativo das curvas Tensão x Deformação



Com as análises feitas nas tensões de escoamento e de ruptura nos diferentes corpos de prova, conclui-se que, com o efeito de entalhe, e quanto maior for esse efeito, mais se aproxima a tensão de escoamento da tensão de ruptura. Essa característica é verificada em materiais frágeis, reforçando a transição de fratura dúctil para frágil pelo efeito de entalhe.

Para a redução de área, o CP sem entalhe apresentou comportamento totalmente dúctil com quase 70% de estricção de área inicial. Já o CP com entalhe de 1,5mm teve redução de menos de 15% da área. E o CP com entalhe de 3,0mm apresentou uma redução na área inferior a 7%, confirmando a tendência de fratura frágil como efeito do concentrador de tensão.

O CP sem entalhe teve o maior alongamento, de 35,5%. O CP com entalhe de 1,5 obteve um alongamento de 6,79% e *NSR* de 1,46 considerando a tensão de ruptura do corpo sem entalhe, enquanto que o CP de entalhe 3,0mm obteve um alongamento inferior a 2% com *NSR* de 1,83 maior que o corpo entalhado com 1,5mm. Os dados obtidos confirmam que o *NSR* aumenta até a profundidade do entalhe onde o diâmetro resistente seja a metade do valor inicial. O *NRS* não foi menor do que a unidade, como esperado, devido ao material ensaiado não ser completamente dúctil. Pode-se observar também que a tensão de escoamento para o material entalhado com profundidade de 1,5mm, que representa uma área aproximadamente a metade da inicial, foi aumentada por um

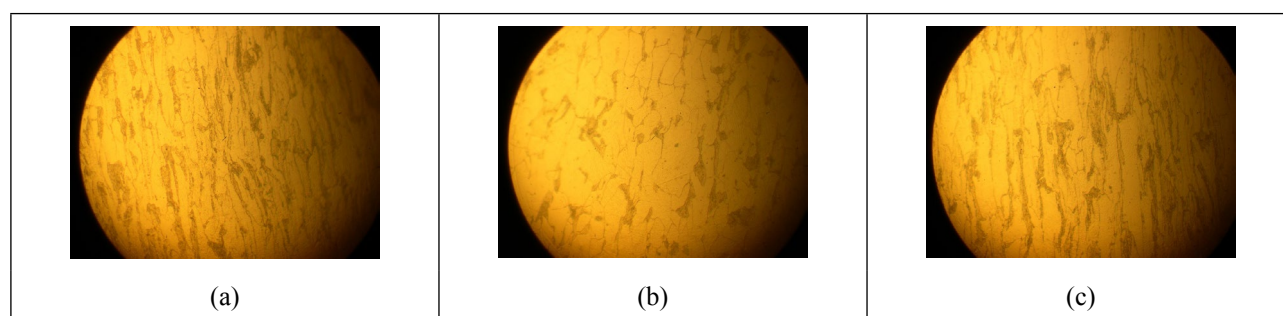
fator de 2,7 em relação ao corpo de prova inicial. Esse resultado confirma Dieter (1988), que cita que a tensão aumenta a um valor até, ou próximo, de 2,5 a tensão inicial depois de entalhado.

Tabela 2. Resultados obtidos

	Redução de área			Alongamento			Escoamento		Ruptura		NSR
	A_0 [mm ²]	A_f [mm ²]	Estricção[%]	L_0 [mm]	L_f [mm]	[%]	σ_{max} [MPa]	[%]	σ_{max} [MPa]	[%]	[adm]
Sem Entalhe	113,1	36,35	67,89	80	108,4	35,5	314,75	-	464,85	-	-
Entalhe 1,5 mm	63,62	54,2	14,96	81	86,5	6,79	515,16	63,67	678,74	46	1,46
Entalhe 3 mm	28,27	25,41	6,56	84	85,6	1,9	848,04	169,43	869,27	87	1,83

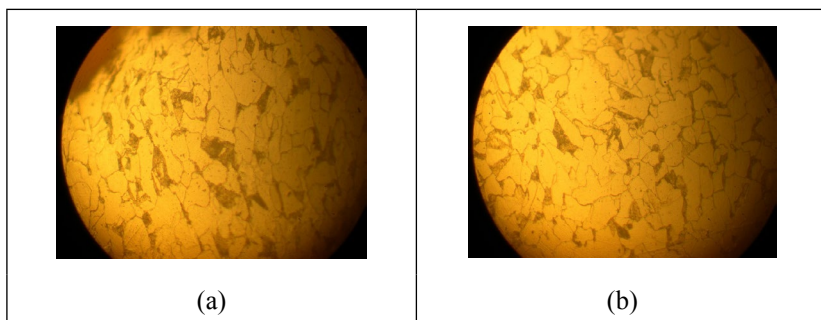
Verifica-se, no resultado da metalografia das amostras, que, na região de grande estricção dos CPs, temos um alongamento pronunciado dos contornos de grão (FIGURA 7a), corroborando com a previsão teórica (DIETER, 1988; CALLISTER 2008). Conforme as previsões teóricas, também obtiveram resultados positivos a respeito das características dos contornos de grão quando acontece num CP com entalhe (fratura frágil) (FIGURA 8a, 8b, FIGURA 9a e 9b), onde se nota que, para o CP com entalhe maior, a plastificação do material foi mais acentuada. Notamos no CP de controle (que foi tensionado até momentos antes da ruptura) que a deformação dos grãos fica cada vez mais acentuada conforme afastamos a análise em direção ao entalhe (FIGURA 9a, 9b, 9c e 9d). Na Figura 9a, observamos a região limite entre o material do corpo de prova e o entalhe, daí a forma curva da região à esquerda da imagem.

Figura 7. Metalografia da região da fratura do CP sem entalhe



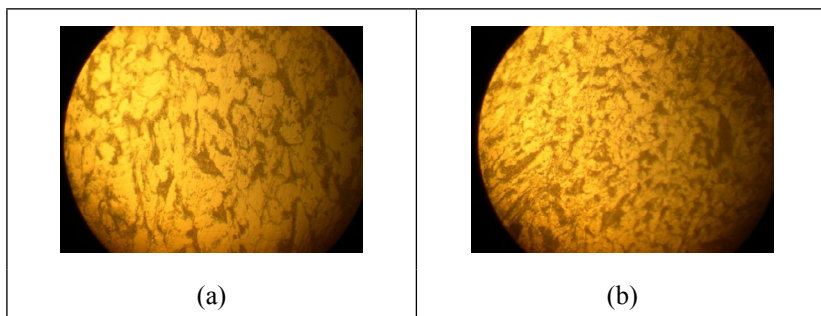
Legenda: Aumento de 625. a) Grãos deformados na região próxima à taça-cone. b) Grãos deformados no centro da fratura. c) Grãos em uma região longe da estricção.

Figura 8. Metalografia da região da fratura do CP com entalhe de 1,5 mm



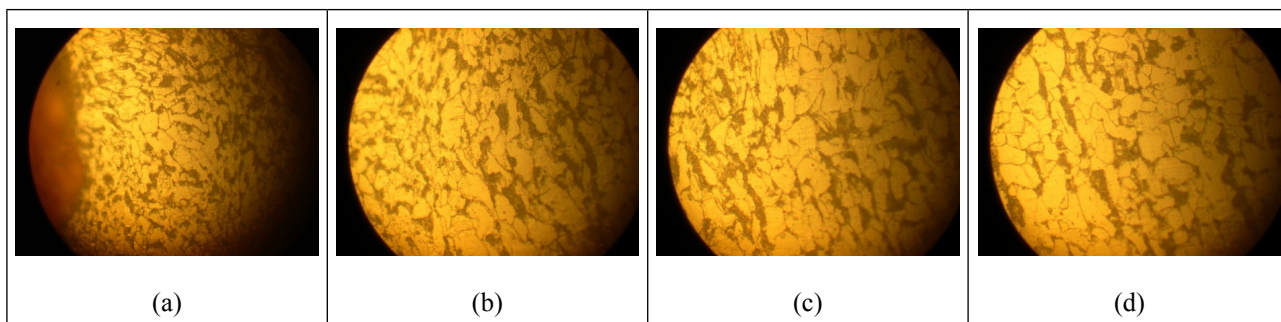
Legenda: Aumento de 625x. a) Grãos deformados na região próxima ao entalhe. b) Grãos deformados no centro da fratura.

Figura 9. Metalografia da região da fratura do CP com entalhe de 3,0 mm



Legenda: Aumento de 625x. a) Grãos deformados na região próxima ao entalhe. b) Grãos deformados no centro da fratura.

Figura 9. Metalografia da região da fratura do CP com entalhe de 1,5 mm não rompido



Legenda: Aumento de 625x. a) Grãos deformados na região próxima ao entalhe. d) Grãos deformados no centro da fratura. As imagens (b) e (c) são intermediárias entre o centro e a ponta do entalhe.

4 CONCLUSÃO

A partir da revisão literária e dos experimentos realizados comprovamos que ocorre aumento da tensão de ruptura nos corpos de prova entalhados em função do estado triaxial de tensões

($\sigma_x \neq 0, \sigma_y \neq 0, \sigma_z \neq 0$), onde a ductilidade é reduzida, ou seja, o corpo de prova não absorve mais energia durante a deformação plástica.

Há sensibilidade ao entalhe calculada pela razão entalhe-resistência, apesar de ter valor maior que a unidade, significando que o material não está totalmente frágil com este concentrador de tensão devido ao material não ser totalmente dúctil. A fratura que antes aconteceria de maneira dúctil agora acontece de maneira frágil. Podemos observar também que o *NSR* aumenta em função do aumento do entalhe.

A tensão de ruptura para o corpo de prova com entalhe de 3mm foi maior que a do corpo de prova com entalhe de 1,5mm e muito maior que a do corpo de prova sem entalhe, devido à redução de área. Já o alongamento e a redução de área durante os ensaios de tração tiveram ordem inversa em relação aos resultados anteriormente citados, caracterizando a transição da fratura que, no corpo de prova sem entalhe, acontece de maneira dúctil devido às características do material e agora acontece de maneira frágil devido ao concentrador de tensão.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM E8M. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. Estados Unidos: West Conshohocken.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. New York: McGraw-Hill, 1988.

MAJIMA T.; ANZAI M.; NAKAZAWA H. Notch Tensile Strength of Ductile Materials. **Bull. JSME**, 29, p. 4000-4004, 1980.

MEGAHED M. M.; ABD-ALLAH N. M.; ELEICHE A. M. Modeling of Notch Tensile Behavior of Martensitic Steels. **Journal of Materials Engineering and Performance**, Vol 12, p 61-67, 2003.

WILLIAM D. **Callister, Jr**: Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2008.