

5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões das Propriedades Mecânicas

As tabelas 20 e 21 comparam os valores das propriedades mecânicas alongamento real, A_R , ductilidade real e tenacidade real, U_T , e das supostas constantes coeficiente de encruamento, m , e constante plástica de resistência, K , entre o aço SAE 1020 pré-encruado e o aço SAE 1020 recozido, estudado por NOBREGA (2010).

As propriedades mecânicas do aço 1020 pré-encruado, em relação a sua taxa de deformação de referência (0,25%/s) tiveram uma relevante variação percentual, destacando um decréscimo na menor taxa de deformação (de - 21,6% na ductilidade real e A_R e de - 20,3% na U_T) e um acréscimo na maior taxa de deformação. (de + 25,0% na ductilidade real e A_R e de + 24,6% na U_T) Importante ressaltar que o aumento da ductilidade está relacionado com o aumento da taxa de deformação, o que não é um fato intuitivo, uma vez que no estudo de ZABOTKIN, O'TOOLE e TRABIA (2003), realizados com aço inoxidável 316 L, titânio grau de liga 7 e liga C 22, o aumento da taxa de deformação gerou um sutil decréscimo do alongamento total nos ensaios experimentais. Já o aço 1020 recozido, em relação a sua taxa de deformação de referência (0,1%/s), apresentou um decréscimo considerável na sua maior taxa de deformação. (de - 13,8% na ductilidade real e A_R) Neste aço as variações na tenacidade real não foram tão expressivas quando comparados com o aço 1020 pré-encruado. Já as constantes m e K , tanto no estudo do aço 1020 pré-encruado quanto do aço 1020 recozido, tiveram seus valores alterados significativamente em relação a taxa de deformação de referência. Para o aço 1020 pré-encruado, assim como no estudo de LAROUR (2010), os valores de m e K aumentam com o aumento da taxa de deformação. Para o aço 1020 recozido não foi possível perceber uma tendência definida.

$\dot{\epsilon}$ (%/s)	AÇO 1020 PRÉ-ENCRUADO					AÇO 1020 RECOZIDO				
	ϵ_{uts} (%)	m	A_R	K (MPa)	Ut (MPa)	ϵ_{uts} (%)	m	A_R	K (MPa)	Ut (MPa)
0,001	3,70	0,037	3,700	625,4	19,8	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
0,01	4,50	0,045	4,500	630,5	23,6	26,06	0,261	26,06	252,7	36,8
0,1	Xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	25,55	0,256	25,55	264,8	38,0
0,25	4,50	0,045	4,500	634,5	23,8	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
1	4,75	0,048	4,750	642,0	25,2	26,10	0,261	26,10	259,9	37,9
10	4,90	0,049	4,900	653,5	26,3	22,50	0,225	22,50	303,2	39,8
100	6,15	0,062	6,150	653,4	31,9	22,40	0,224	22,40	310,5	40,6
300	6,00	0,060	6,000	659,2	31,5	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx

Tabela 20. Comparação das propriedades mecânicas em função das taxas de deformação

$\dot{\epsilon}$ (%/s)	Varição de m	Varição de A_R	Varição de K (MPa)	Varição de Ut (MPa)	Varição de m	Varição de A_R	Varição de K (MPa)	Varição de Ut (MPa)
0,001	-21,6%	-21,6%	-1,5%	-20,3%	xxx	xxx	xxx	xxx
0,01	0,0%	0,0%	-0,6%	-0,6%	1,9%	1,9%	-4,8%	-3,3%
0,1	xxx	xxx	xxx	xxx	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
0,25	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	xxx	xxx	xxx	xxx
1	5,3%	5,3%	1,2%	5,7%	2,1%	2,1%	-1,9%	-0,3%
10	8,2%	8,2%	2,9%	9,8%	-13,6%	-13,6%	12,7%	4,5%
100	26,8%	26,8%	2,9%	25,5%	-13,8%	-13,8%	14,7%	6,4%
300	25,0%	25,0%	3,7%	24,6%	xxx	xxx	xxx	xxx

Tabela 21. Comparação da variação das propriedades mecânicas em função das taxas de deformação

5.2

Conclusões do Efeito da Taxa de Deformação nos valores de S_E e S_R

A tabela 7, novamente apresentada neste item, mostra uma variação percentuais dos valores de S_E e S_R do aço SAE 1020 pré-encruado obtidas variando $5\frac{1}{2}$ ordens de grandeza da taxa de deformação de referência (0,25%/s). É possível perceber o aumento dos valores de S_E e S_R , tanto na curva de engenharia quanto na curva real, na medida em que aumenta a taxa de deformação.

A modesta diminuição do valor de S_E (-1,9%) entre a taxa de deformação de referência e a menor taxa de deformação ensaiada, 0,001%/s, na curva de engenharia, não justifica, à princípio, maiores cuidados no dimensionamento mecânicos de projetos, desde que seja usado fatores de segurança ao escoamento “típicos”, por exemplo: $\phi_E = S_E / \sigma_{max} > 1.25$ (com S_E medida na taxa “normal” $\dot{\epsilon} \cong 2,5 \cdot 10^{-3} s^{-1}$). Entretanto, cabe ressaltar que na menor taxa de deformação ensaiada para o aço 1020 pré-encruado, o tempo de ensaio de tração correspondeu a 3700 segundos, aproximadamente um pouco mais de 1h de ensaio enquanto que na maior taxa de deformação o tempo foi de 0,02 segundos. Embora seja sutil o efeito da taxa de deformação nos valores de S_E e S_R tanto na curva de engenharia quanto na curva real para o aço 1020 pré-encruado é importante notar uma tendência de alteração destes valores na medida em que os ensaios são feitos em taxas de deformação cada vez mais distantes da taxa de referência. Diante disto, ensaios com taxas de deformação menor que a menor taxa ensaiada ou maior que a maior taxa ensaiada pode mostrar significativas variações percentuais nos valores de S_E e S_R quando comparada com a taxa de referência.

$\dot{\epsilon}$ (%/s)	Resultado do Aço 1020 Pré-encruado			
	Curva de Engenharia		Curva Real	
	Variação de S_E	Variação de S_R	Variação de S_E	Variação de S_R
0,001	-1,9%	-2,4%	-1,7%	-3,7%
0,01	-1,0%	-0,5%	-1,0%	-1,6%
0,25	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1	1,7%	1,7%	1,8%	1,7%
10	3,4%	3,6%	3,6%	3,8%
100	5,2%	5,8%	5,3%	7,0%
300	6,2%	6,5%	6,3%	7,5%

Tabela 7. Sensibilidade de S_E e S_R em função $\dot{\epsilon}$

A tabela 22 mostra que o aço 1020 recozido, estudado por NOBREGA (2010), na curva de real, sofre um maior efeito da taxa de deformação no valor de S_E quando comparados com o aço 1020 pré-encruado. O valor de 18,2% de aumento em relação a S_E na curva real entre a taxa de referência para o aço 1020 recozido (0,1%/s) e a maior taxa de deformação ensaiada (100%/s) é quase 3 vezes maior que o valor de S_E (6,3%) na curva real entre a taxa de referência para o aço 1020 pré-encruado (0,25%/s) e a maior taxa de deformação ensaiada (300%/s). Nota-se que o efeito da taxa de deformação nos valores de S_E na curva real para o aço 1020 recozido é maior que no aço 1020 pré-encruado, quando comparados os valores da variação percentual entre a taxa de referência e a menor e maior taxa de deformação ensaiada. Isto é traduzido pelos valores da tabela 25 para o aço 1020 recozido, que a partir da sua taxa de referência de 0,1%/s, o ensaio de tração realizado com uma ordem de grandeza abaixo da sua referência (0,1 / 0,01 = 10 vezes menor) provoca alteração percentual no valor de menos 3,0% do valor de S_E da taxa de referência. Para o ensaio de tração com três ordens de grandeza acima da referência (100 / 0,1 = 1000 vezes maior), a alteração percentual foi de 18,2% em relação ao valor de valor de S_E da taxa de referência. Esta mesma análise é feita para o aço 1020 pré-encruado mostrando que, variando 3 ordens de grandeza a menos no valor da taxa de deformação de referência (0,25/0,001 = 250 menor) e variando 3 ordens de grandeza a mais no valor da taxa de referência (300/0,25 = 1200 vezes maior), as alterações percentuais foram de -1,7% e 6,3%, respectivamente.

$\dot{\epsilon}$ (%/s)	Curva Real – Aço 1020 Pré-encruado		Curva Real – Aço 1020 Recozido estu- dado por NOBREGA (2010)	
	Varição de S_E	Varição de S_R	Varição de S_E	Varição de S_R
0,001	-1,7%	-3,7%	xxx	xxx
0,01	-1,0%	-1,6%	-3,0%	-2,5%
0,1	xxx	xxx	0,0%	0,0%
0,25	0,0%	0,0%	xxx	xxx
1	1,8%	1,7%	2,9%	0,5%
10	3,6%	3,8%	11,3%	0,8%
100	5,3%	7,0%	18,2%	2,7%
300	6,3%	7,5%	xxx	xxx

Tabela 22. Comparação da sensibilidade de S_E e S_R em função $\dot{\epsilon}$ dos aços 1020 recozido e pré-encruado

O efeito da taxa de deformação no aço 1020 recozido só não foi maior nos valores de S_R quando comparados com os valores do aço 1020 pré-encruado, após variar 3 ordens de grandeza acima do valor da taxa de referência. O aço 1020 pré-encruado, após variar 3 ordens de grandeza a mais no valor da taxa de referência ($300/0,25 = 1200$ vezes maior), teve um variação percentual no valor de 7,5% ao passo que o aço 1020 recozido, variando a mesma ordem de grandeza ($100/0,1 = 1000$ vezes maior) teve uma variação percentual no valor de 2,7%.

Todavia, também não se percebe uma diminuição considerável no valor da resistência ao escoamento ($S_E = - 3,0 \%$) para o aço 1020 recozido entre a taxa de deformação de referência e a menor taxa de deformação ensaiada. Da mesma forma que o aço 1020 pré-encruado, não justifica, à princípio, maiores cuidados no dimensionamento mecânicos utilizando o aço 1020 recozido em questão, quando utilizados fatores de segurança ao escoamento “típicos”, anteriormente comentado. Vale destacar que, para a menor taxa de deformação, o ensaio de tração do aço 1020 recozido ocorreu em 2606 segundos, aproximadamente 0,7 horas e na maior taxa de deformação o ensaio ocorreu em 0,22 segundos aproximadamente.

5.3 Conclusões dos Modelos Matemáticos.

É pertinente explicar os critérios para a avaliação do modelo matemático que melhor se adéqua aos resultados dos ensaios experimentais nas diversas taxas de deformação.

O fator R^2 , conhecido como coeficiente de determinação, determina o quão próximo o modelo matemático está em relação aos dados experimentais. Este fator foi determinado para cada modelo matemático em todas as taxas de deformação individualmente. Desta forma, não somente é possível avaliar o modelo matemático em cada taxa de deformação individualmente, mas também avaliar o comportamento no conjunto das taxas de deformação ensaiada.

No capítulo 4 foi mostrado o valor mínimo, máximo e médio do erro para cada taxa de deformação em cada modelo matemático proposto. Tão importante quanto analisar cada valor mínimo, máximo e médio do erro é analisar o maior valor médio do erro, definido aqui por Erro Médio. Este parâmetro indica em todas as taxas a maior discrepância média prevista pelo modelo matemático.

Os valores de S_E e S_R dos ensaios experimentais são comparados com os valores previstos para cada modelo matemático, onde além de se observar a diferença percentual é visto também a tendência crescente ou decrescente das diferenças percentuais para as taxas de deformação diferentes da taxa de referência.

O modelo matemático mais conservador é aquele que prevê valores de tensão abaixo dos valores obtidos experimentalmente em todas as taxas de deformação. Todavia, esta análise é feita para cada modelo matemático em cada taxa de deformação, avaliando a faixa da deformação em que o modelo matemático calcula um valor de tensão menor que o valor experimental.

Desta forma, não será visto como conservador o modelo matemático que apresenta tensões inferiores as experimentais em algumas taxas de deformação e sim aquele que em todas as taxas de deformação mantiver a maior facha de tensão calculada menor que a tensão experimental.

Patamar de encruamento é definido pela distância entre as curvas projetadas pelos modelos matemáticos quando submetidas a diferentes taxas de deformação. Em outras palavras, o patamar de encruamento mede a sensibilidade do modelo matemático a uma dada taxa de deformação. Isto é facilmente visível pelo conjunto das curvas projetadas de cada modelo matemático nas diversas taxas de deformação ensaiadas.

O critério do método iterativo está associado ao tempo operacional que o algoritmo de LM precisou para convergir e conseqüentemente calcular os valores das constantes dos modelos matemáticos. Também contou o grau de sensibilidade do chute inicial para os valores das constantes. Assim, quanto menos sensível é o chute inicial para os valores das constantes e mais rápido é a convergência da curva projetada pelo modelo matemático a um valor satisfatório, melhor é o método iterativo.

Diante do exposto neste item, a tabela 23 mostra os resultados dos modelos matemáticos nos critérios acima definidos.

Modelo mod	(R ²)	ERRO Médio	S _E	S _R	Modelo Conservador	Patamar de Encruamento	Método Iterativo
JC	>96,8%	0,8%	2,4%	4,3%	2º	2º	2º
Meyers	≥94,3%	2,0%	3,1%	3,9%	3º	3º	3º
ZA	>87,7%	4,3%	2,7%	6,5%	4º	4º	4º
CS	>98,8%	0,8%	-2,2%	3,3%	1º	1º	1º

Tabela 23. Desempenho em vários aspectos dos modelos matemáticos

O modelo de **CS** apresentou o melhor ajuste aos valores experimentais dos ensaios de tração ao conjunto das taxas de deformação ensaiadas. O seu pior ajuste foi de **98,8%** na taxa de deformação de **10⁻³ %/s** e o seu melhor ajuste foi de **99,7%** na taxa de deformação de **100 %/s**. Em seguida, vem o modelo de **JC**, que apresentou como seu pior ajuste o valor de **96,8%** na taxa de deformação de **10⁻² %/s** e o seu melhor ajuste foi no valor de **99,5%** na taxa de deformação de **100 %/s**.

Ter um menor valor de erro médio significa dizer que os valores calculados pelo modelo matemático são mais próximos dos valores experimentais. Assim, a equação de **CS** e **JC** foram àquelas que tiveram, em geral, o menor ERRO médio.

As colunas **S_E** e **S_R** correspondem às maiores diferenças percentuais dos valores de **S_E** e **S_R** entre os dados experimentais e os previstos nos diversos modelos matemáticos abrangendo todas as taxas de deformação ensaiadas. A equação de **CS** modificado prevê, entre todos os modelos matemáticos, as menores diferenças percentuais na maioria das taxas de deformação ensaiadas, ou seja, são os valores mais próximos dos valores experimentais de **S_E** em relação ao conjunto das taxas de deformação ensaiadas. Todavia, não existiu um modelo matemático que tivesse uma pequena diferença percentual de **S_R** em relação aos valores experimentais para todas as taxas de deformação. Vale destacar que os menores valores de erro percentual em relação aos valores experimentais de **S_E**, previsto pelo modelo de **CS**, são negativos, ou seja, este modelo matemático prevê valores de **S_E** menor que os dados experimentais, tornando-o conservador para previsão de **S_E** em projetos mecânicos. É possível notar ainda que, nas taxas de deformação abaixo da taxa de deformação de referência (0,25%/s), os valores dos erros percentuais negativos podem ter uma tendência crescente. Sendo assim, isto sugere que este modelo matemático seja utilizado para prevê valores de **S_E** em taxas de deformação menores que as ensaiadas.

A tabela 19 mostrar essas conclusões.

$\dot{\epsilon}$ (%/s)	Experimental		JC mod.		Meyers mod.		ZA mod		CS mod	
	S_E	S_R	S_E	S_R	S_E	S_R	S_E	S_R	S_E	S_R
0,001	581,0	655,0	3,4%	1,8%	5,2%	3,5%	5,1%	2,2%	-1,1%	1,8%
0,01	585,0	668,0	2,9%	1,0%	4,8%	2,0%	5,2%	0,2%	-0,2%	1,2%
0,25	591,0	679,0	2,4%	1,1%	3,8%	1,1%	4,2%	5,4%	-0,3%	1,5%
1,0	602,0	691,0	1,9%	4,3%	1,9%	3,9%	2,3%	6,5%	-0,5%	3,7%
10	613,0	706,0	0,9%	2,6%	1,6%	1,6%	2,2%	5,0%	-1,0%	2,5%
100	624,0	730,0	0,9%	2,8%	0,0%	1,2%	1,0%	5,1%	0,0%	2,0%
300	631,0	734,0	0,9%	2,7%	0,3%	0,6%	0,0%	4,3%	-0,5%	1,9%

Tabela 19. Diferença percentual entre de S_E e S_R dos modelos matemáticos e experimentais (%)

A tabela 23 mostra uma coluna que classifica os modelos matemáticos em modelo conservador. O modelo matemático que apresenta ERRO negativo, ou seja, região onde o modelo matemático prevê um valor de tensão menor do que o valor experimental na maior faixa de deformação (para todas as taxas de deformação) é o modelo mais conservador. A tabela 24 faz uma estratificação de todos os modelos matemáticos por taxas de deformação ensaiadas da faixa de deformação em que o modelo prevê um ERRO negativo. Os dados de análise estão contidos no Anexo A.

Desta forma, a equação de **CS** modificado é àquela que garante valores de ERRO negativo até **2,0%** de deformação para **todas as taxas de deformação** ensaiadas neste estudo, conforme a tabela 24. Esta faixa de deformação corresponde a interseção para todas as taxas de deformação em que o modelo matemático prevê valores conservadores.

Outros modelos (**Meyers, ZA e**) apresentaram valores maiores para algumas taxas de deformação específicas, mas que não foram validados, pois em outras taxas não tiveram ERRO negativo, conforme tabela 24 destaca em vermelho.

Modelo mod.	Taxa de deformação (%/s)	Início da Deformação com ERRO negativo	Término da Deformação com ERRO negativo	Diferença das deformações com ERRO negativo
JC	0,001	1,1%	2,4%	1,3%
	0,01	0,9%	3,0%	2,1%
	1	0,7%	4,3%	3,6%
	10	0,7%	4,3%	3,6%
	100	1,0%	4,2%	3,2%
	300	0,7%	4,2%	3,5%
Meyers	0,001	0,0%	0,0%	0,0%
	0,01	1,1%	2,4%	1,3%
	1	0,7%	4,2%	3,5%
	10	0,5%	5,0%	4,5%
	100	0,6%	5,3%	4,7%
	300	0,5%	5,6%	5,1%
ZA	0,001	0,0%	0,0%	0,0%
	0,01	0,0%	0,0%	0,0%
	1	0,7%	3,0%	2,3%
	10	0,6%	2,9%	2,4%
	100	1,1%	2,0%	0,9%
	300	0,6%	3,2%	2,6%
CS	0,001	0,4%	2,4%	2,0%
	0,01	0,3%	2,9%	2,6%
	1	0,3%	4,2%	3,9%
	10	0,3%	4,3%	4,0%
	100	0,4%	2,4%	2,0%
	300	0,5%	2,8%	2,3%

Tabela 24. Avaliação da região conservativa dos modelos matemáticos.

As Figuras 37 a 40 mostram o patamar de encruamento de cada modelo matemático sendo o modelo de **CS** aquele que prevê os maiores espaçamentos entre as curvas tensão real x deformação real.

Avaliando os modelos matemáticos no critério do método iterativo, a equação de **CS** foi o modelo matemático que teve a convergência mais rápida (poucas iterações), menor sensibilidade quanto ao chute inicial e maior facilidade de manuseio da equação no contexto do programa.

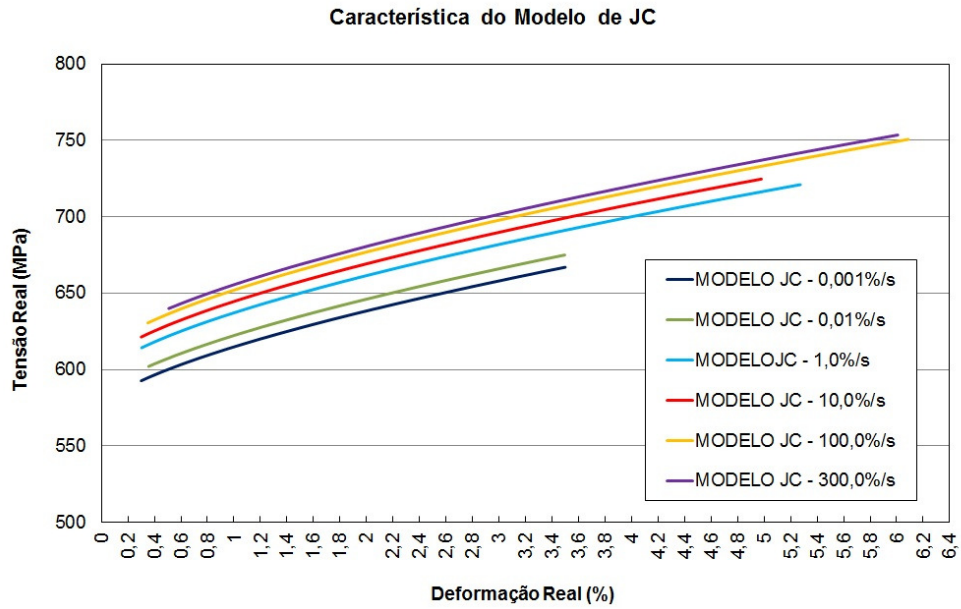


Figura 37. Patamar de encruamento de **JC**

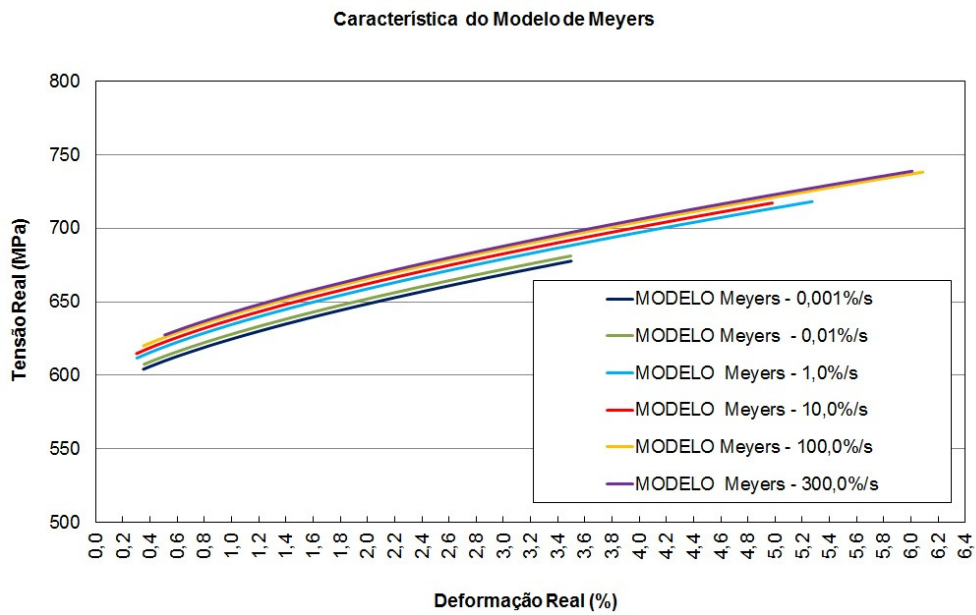


Figura 38. Patamar de encruamento de **MEYERS**

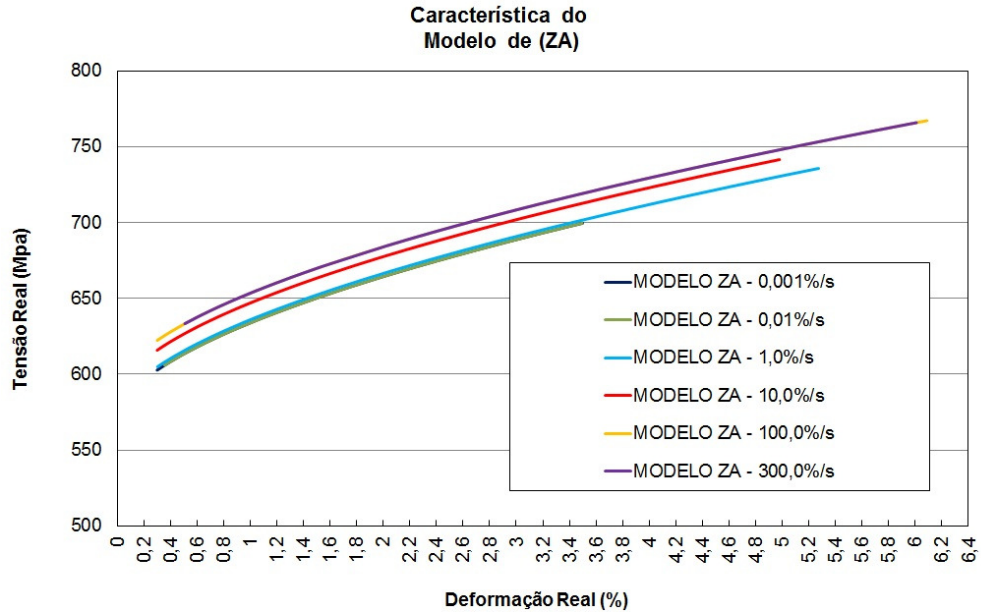


Figura 39. Patamar de encruamento de **ZA**.

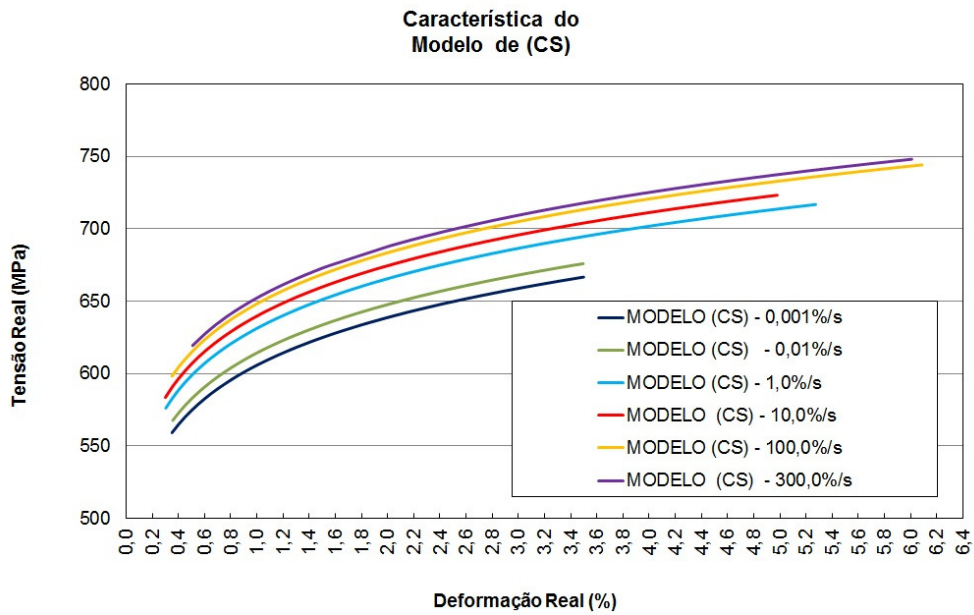


Figura 40. Patamar de encruamento de **CS**.

Por fim, dos aspectos que foram avaliados a equação de **CS** modificada foi a que apresentou o melhor desempenho segundo o conjunto de dados experimentais submetidos a diferentes taxas de deformação. Vale relembrar que o modelo matemático de **CS** estudado nesta dissertação é o mesmo modelo de CS modificado por LAROOUR em 2010. Tal modificação não alterou a relação de independência do modelo matemático com a variável temperatura, onde, neste aspecto, se manteve íntegro e original. Assim, tanto a equação de **CS**, modificada por LAROOUR, quanto os ensaios experimentais, não possuem qualquer relação da variável temperatura. Em relação aos demais modelos matemáticos, a diferença mais marcante é o fato das equações originais de **JC**, **Meyers** e **ZA** terem a temperatura como variável. Mesmo modificando esses modelos (extraíndo o termo temperatura) para adequação nesta dissertação, não foi verificado nenhum ajuste com a mesma versatilidade que o modelo de **CS**.

5.4

Considerações Finais Sobre o Efeito de Taxa de Deformação em Projeto Mecânico de Dutos.

Uma análise de integridade de projeto ou avaliação de adequação ao uso abrange diversas situações, onde uma, em especial, é pauta do estudo desta dissertação, que é a possível variação das propriedades mecânicas do material envolvida com o tempo. A análise deste tópico é direcionada ao efeito da taxa de deformação na propriedade mecânica de um material típico para projeto mecânico de dutos.

Estes materiais, para fins estruturais, fabricado em aço baixo carbono, devem apresentar alto módulo de elasticidade, suficientes resistência ao escoamento e resistência mecânica e comportamento plástico adequado, ou seja, alta tenacidade à fratura. Entre diversos materiais, o mais próximo em relação a S_E do material 1020 recozido, estudado por NOBREGA (2010), é o API 5L **X52**. O aço 1020 recozido apresenta valor de resistência ao escoamento de **338 MPa** e alongamento total de **22%**, na taxa de deformação típica de **0,1%/s** e o aço **X 52** apresenta uma mínima resistência ao escoamento, **SMYS**, no valor de **358MPa**, para um alongamento total na faixa de **19,5%** a **27%**.

Em solicitações estáticas de carregamento é usual utilizar algum critério de resistência contra o escoamento da estrutura em análise. O critério da máxima tensão cisalhante, conhecido com critério de TRESCA é mostrado pela equação 21 e o critério da máxima energia de distorção, conhecido com critério de MISES é mostrado pela equação 22, sendo σ_1 a tensão atuante na direção 1, σ_2 a tensão atuante na direção 2 e σ_3 a tensão atuante na direção 3 .

$$\sigma_{eq\ TRESCA} = (\sigma_1 - \sigma_3) = S_E \quad (21)$$

$$\sigma_{eq\ MISES} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_1\sigma_3 - \sigma_2\sigma_3} = S_E \quad (22)$$

Assim, o fator de segurança de TRESCA, Φ_{TRESCA} , e o fator de segurança de MISES, Φ_{MISES} , são calculados respectivamente pelas equações 23 e 24.

$$\phi_{Tresca} = \frac{SMYS}{\sigma_{eqTRESCA}} \quad (23)$$

$$\phi_{Mises} = \frac{SMYS}{\sigma_{eqMISES}} \quad (24)$$

Baseado na norma ASME B 31.4 (2006) a máxima pressão de operação, **MOP**, ou máxima pressão de operação admissível, **MAOP**, não pode exceder a pressão de projeto, **P_d**, que é calculada pela equação 21 abaixo. Vale ressaltar que a **P_d** é validada por um teste de pressão no mínimo igual a 1,25 x **P_d**.

$$P_d = \frac{2.t.SMYS}{D} . F . S . T \quad (25)$$

Onde **P_d** é a pressão de projeto do duto, **t** é a espessura do duto, **D** é o diâmetro externo do duto, **F** um fator conservativo referente ao número de construções, **S** um fator referente a classe do tubo e **T** é um fator referente a temperatura.

Assim sendo, considerando um duto de diâmetro **D** igual a 24", espessura de parede **t** igual a 7,3mm, de material API 5L X52, com **SMYS** igual a 358 MPa, sendo **S** um fator conservativo referente ao número de construções igual a 0,72, **E** um fator referente a classe do tubo igual a 1,0 e **T** é um fator referente a temperatura igual a 1,0, de acordo com a ASME B 31.8, calcula-se a **P_d** igual a 6,17MPa.

Admitindo que este duto opere enterrado, tem-se que; $\sigma_1 = P_d . D / 2.t$; $\sigma_2 = \mu P_d . D / 2.t$, sendo μ definido como coeficiente de Poisson igual a 0,3 e $\sigma_3 = P_d$. Desta forma, os valores de ϕ_{Tresca} e ϕ_{Mises} são 1,36 e 1,53, respectivamente.

Todavia, sabendo-se que as resistências mais baixas estão associadas aos carregamentos mais lentos, o que se pretende avaliar são os fatores de segurança de TRESCA e MISES numa condição de teste de pressão, ou seja, elevando o valor de **P_d** em 1,25 por, no mínimo, 4 horas.

Para isso, supõe-se que a equação de **JC**, sugerida por NOBREGA (2010) e ajustada para aço 1020 recozido, seja a equação que vai predizer o valor da resistência ao escoamento, **S_E**, do aço **X 52** para um período de ensaio de tração de 4 horas. Esta suposição não descarta o uso de modelos matemáticos que sejam ajustados utilizando corpos de prova do próprio material **X 52**, todavia é razoável supor a equação de **JC** ajustada para o aço 1020 recozido em função da semelhança entre estes aços, anteriormente comentado, e pelo fato do aço 1020 recozido ter apresentado maior sensibilidade ao efeito da taxa de deformação em relação ao aço 1020 pré-encruado. Vale destacar que esta equação de **JC** teve um fator de ajuste, **R²**, dá ordem de 99% para o aço carbono 1020 recozido e é mostrada na equação 26 com os valores calculados das suas variáveis.

$$\sigma = (1 + 324,90 \cdot e^{0,197}) \cdot \left(1 + 0,0125 \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{0,001} \right) \quad (26)$$

Considerando o aço **X52** com um alongamento total de **22%**, que é um valor estimado dentro da sua faixa de alongamento (**19,5% a 27%**) e sugerindo que ele tenha um comportamento semelhante ao aço carbono 1020 recozido, é possível calcular a taxa de deformação que corresponde a um ensaio de tração de 4 horas de duração, obtendo o valor de **0,0015%/s**.

Com o valor da taxa de deformação e a equação de **JC**, faz-se um gráfico tensão real versus deformação real com intuito de extrair o valor de **S_E** do material **X52** correspondendo a um ensaio de tração de 4 horas de duração. A figura 46 a diante mostra o gráfico e, conforme apresentado no capítulo 2, é obtido o valor **S_E** em **263,9 MPa** para a deformação real em 0,2%.

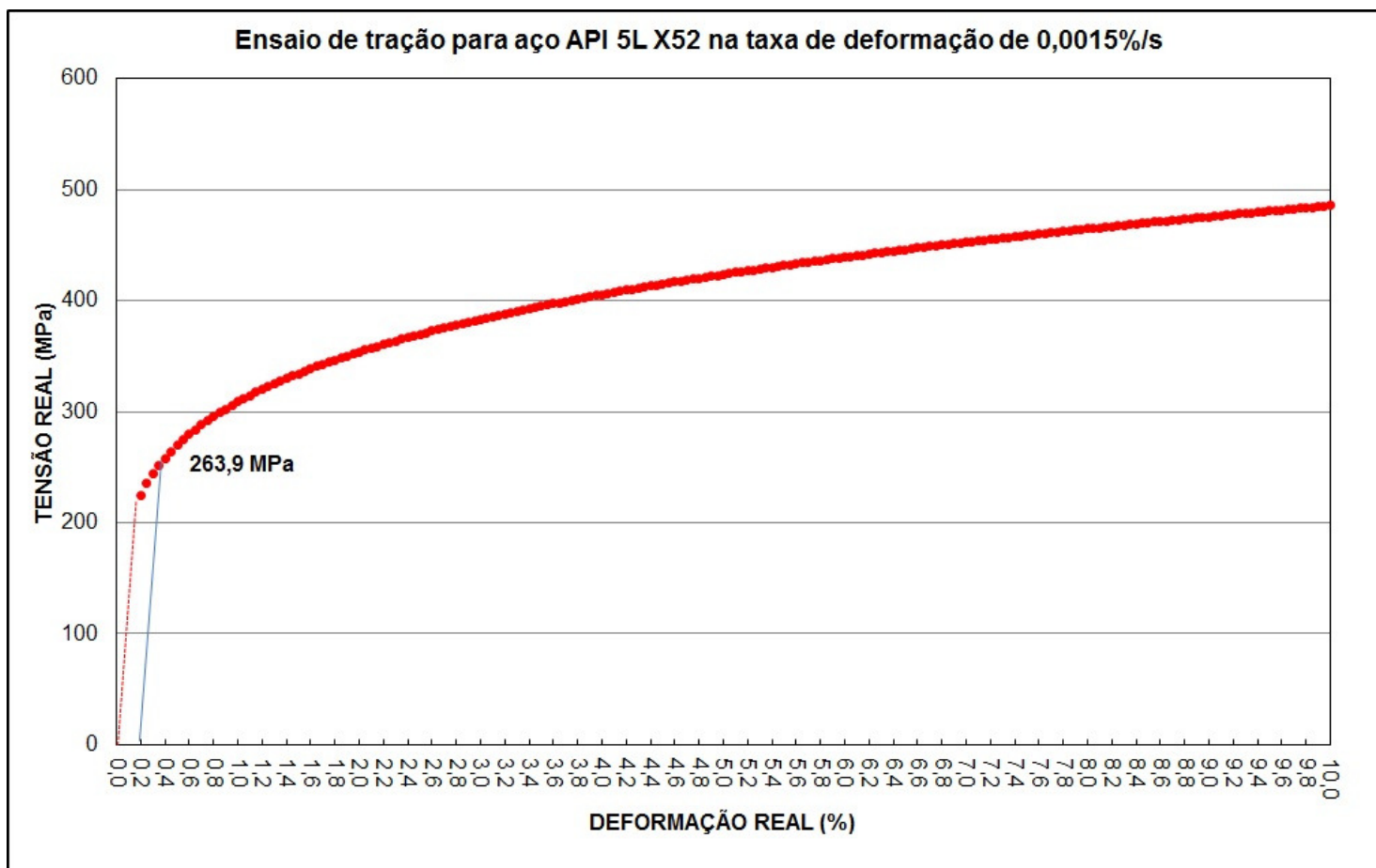


Figura 41. Valor de S_E para aço API 5L X52

Adotando este valor de S_E como um novo valor de **SMYS**, que deve ser usado no cálculo do fator de segurança, pois representa um **SMYS** menor que o original por causa do efeito da taxa de deformação na resistência ao escoamento do material. Com este novo valor de **SMYS**, obtido por uma simulação do que seria um ensaio de tração de 4 horas de duração, que representa às 4 horas de duração mínima de um teste de pressão, é possível avaliar uma queda de **26,3%** aproximadamente, em relação ao valor de S_E igual a **358MPa**, de um ensaio de tração convencional. Esta diminuição no valor de S_E , supostamente elevada (aproximadamente **26,3%**), pode impactar nos valores do ϕ_{Tresca} e ϕ_{Mises} . Antes de calculá-los nesta condição, determinam-se seus valores, admitindo o valor de **SMYS** original (**358MPa**) e constante, mesmo na condição de um teste de pressão de duração mínima de 4 horas. Os novos valores do ϕ_{Tresca} e ϕ_{Mises} são **1,08** e **1,22**, respectivamente. Estes valores representam uma queda de **20%** em relação aos valores das tensões calculadas com a pressão de projeto, P_d . Para o critério de TRESCA, o teste de pressão no duto mencionado estaria próximo do escoamento do seu material (falha estrutural), já que seu fator de segurança é próximo a **1,0**. No critério de MISES ainda há alguma resistência remanescente do material do duto considerado.

Supondo que durante o teste de pressão ocorra o efeito da taxa da deformação, causando uma diminuição no valor de **SMYS** original (**358MPa**) para **263,9MPa**, calcula-se os novos valores dos coeficientes de segurança, ϕ_{Tresca} e ϕ_{Mises} , iguais a **0,8** e **0,9** respectivamente. É importante observar que o efeito da taxa de deformação sob tensões altas geradas por cargas muito mais lentas ou bem mais rápidas do que as usuais nos testes de tração pode ser relevante quando associado ao critério de resistência ao escoamento. Neste exemplo demonstrado, a perda percentual do coeficiente de segurança, ϕ_{Tresca} e ϕ_{Mises} , foi de **26%** para ambos, em relação aos valores calculados para o **SMYS** original. Assim, o efeito da taxa de deformação associado a tensões altas foi decisivo para trazer os coeficientes de segurança de TRESCA e MISES a patamares que indicam uma falha estrutural, diferentemente se, apenas, for considerado tensões altas em peças mecânicas. A tabela 25 faz um resumo dos valores calculados das tensões e coeficientes de segurança.

SMYS	P_d	P_t	σ_1	σ_2	σ_3	Φ_{TRESCA}	Φ_{MISES}
358	6,17	xxx	257,76	77,32	-6,17	1,36	1,53
358	xxx	7,71	322,2	96,66	-7,71	1,08	1,22
263,9	xxx	7,71	322,2	96,66	-7,71	0,80	0,90

Tabela 25. Variação dos coeficientes de segurança de TRESCA e MISES

5.5 Sugestões para Trabalhos Futuros

Esta dissertação não esgota o assunto do efeito da taxa de deformação nas propriedades mecânicas do aço 1020. Assim, sugere-se continuar esta linha de pesquisa voltada para os seguintes temas:

1. Estudar o efeito da taxa de deformação em aços típicos de construção de dutos em taxas maiores e menores que as testadas neste estudo. Isto pode validar as suposições feitas nesta dissertação e trazer novas contribuições para a área de integridade estrutural de dutos.
2. Estudar o comportamento macroscópico e microscópico de aços submetidos a diferentes taxas de deformação. Isto poderá responder a razão das variações de algumas propriedades mecânicas em função da taxa de deformação, correlacionando o tipo de estrutura cristalográfica do material e o tempo disponível para o movimento de suas discordâncias.
3. Realizar o procedimento aqui estudado com o acréscimo da variável temperatura. Isto, além de certificar a qualidade dos ajustes dos modelos matemáticos originais, que serviram de referência para este estudo, trará uma contribuição importante para previsão de projetos associados a transição dúctil frágil e fluência do material.
4. Realizar ensaios por controle de deformação em diferentes taxas de deformação para diferentes materiais. Isto trará uma diversificação de resultados que pode beneficiar a área de projetos mecânicos.
5. Pesquisar o real efeito da taxa de deformação na propagação de defeitos e trincas através de ensaios típicos de tenacidade à fratura.