# 4 Resultados Experimentais

# 4.1 Introdução.

Este capítulo é dedicado a mostrar os resultados dos ensaios de tração por controle de deformação. Mostra ainda os resultados das equações apresentadas no capítulo 2, que são referentes a propriedades mecânicas do material ensaiado, bem como os ajustes obtidos pelo método de **LM** com os modelos matemáticos descritos no capítulo 3.

### 4.2 Resultados Gerais dos Ensaios de Tração por Controle de Deformação.

As resistências ao escoamento ( $S_E$ ) e resistência máxima ( $S_R$ ) medidas durante os testes nas várias taxas de deformação  $\dot{\epsilon}$  impostas no CPs estão listadas na Tabela 4.

	Curva de Engenharia		Curva	a Real
Ė	Se	Sr	SE	S <sub>R</sub>
(%/s)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
0,001	578	636	581	655
0,01	583	647	588	673
0,01	583	648	585	668
0,25	589	651	591	679
1	599	662	602	691
1	606	673	609	705
1	606	675	610	709
10	610	675	613	706
10	620	684	623	716
10	623	683	626	711
100	620	693	624	741
100	621	691	624	730
300	628	696	631	734

Tabela 4. Resistências ao escoamento e resistência máxima em função da taxa  $\dot{\epsilon}$ .

As curvas  $\sigma \times \epsilon$  de engenharia medidas nesses testes são mostradas na Figura 20 e as curvas  $\sigma \times \epsilon$  reais até a estricção são mostradas na Figura 21.



Figura 20. As 13 curvas  $\sigma \times \epsilon$  de engenharia medidas nas várias  $\dot{\epsilon}$ .



Figura 21: Detalhe da região plástica das curvas oxe reais (até a estricção).

Após análise das curvas experimentais dos ensaios de tração medidas com a mesma taxa de deformação, observou-se que a maior dispersão entre os valores ocorreu na taxa de 1,0%/s, mas com um valor bem abaixo dos 2,0% previsto pela norma ABNT 6152. Por isso, para as taxas repetidas na tabela 4, qualquer valor escolhido estaria de acordo com a norma ABNT 6152. Assim, através de uma escolha aleatória, a tabela 5 traz um único valor escolhido de resistência ao escoamento e resistência máxima nas curvas de engenharia e real em cada taxa de deformação ensaiada. Estes são os valores de referências para comparação com os valores calculados pelos modelos matemáticos apresentados no capítulo 3.

Importante ressaltar que, a partir da taxa de deformação de referência, o maior acréscimo de temperatura no CP durante o ensaio ocorreu na taxa de 300 %/s, com um acréscimo aproximado de 11<sup>o</sup> C. Está pequena variação justifica que os modelos matemáticos desconsiderem o fator temperatura como uma variável.

	Curva de E	Curva de Engenharia		a Real
έ (%/s)	S <sub>e</sub>	S <sub>r</sub>	S <sub>E</sub>	S <sub>R</sub>
0,001	578	636	581	655
0,01	583	648	585	668
0,25	589	651	591	679
1	599	662	602	691
10	610	675	613	706
100	621	691	624	730
300	628	696	631	734

Tabela 5. Resistências ao escoamento e resistência máxima validados em função È.

A tabela 6 mostra a sensibilidade de  $S_e$  e  $S_r$  em função  $\dot{\epsilon}$ . Para a curva de engenharia, o valor máximo da perda de resistência ao escoamento e resistência máxima foi de – 1,9% e -2,4%, respectivamente, quando comparados com a taxa de 0,001%/s (menor) e a taxa de referência, 0,25%/s. Ainda na curva de engenharia, o valor máximo do ganho de resistência ao escoamento e resistência máxima foi de 5,2% e 5,8%, respectivamente, quando comparados com a taxa de 300%/s (maior) e a taxa de referência. Da mesma forma, para a curva real, o valor máximo da perda de resistência ao escoamento e resistência máxima foi de -1,7% e de -3,7%, respectivamente e o valor máximo do ganho de resistência ao escoamento e resistência máxima foi de 6,3% e 7,5%, respectivamente.

	Resultado do Aço 1020 Pré-encruado					
	Curva de E	Engenharia	Curva	a Real		
έ (%/s)	Variação de <b>S</b> e	Variação de Variação de Variaçã S <sub>e</sub> S <sub>r</sub> S <sub>E</sub>		Variação de <b>S</b> <sub>R</sub>		
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 6. Sensibilidade de  $S_E e S_R$  em função  $\dot{\epsilon}$ 

### 4.2.1 Propriedades Mecânicas em Função do Efeito da Taxa de Deformação.

Conforme comentado no capítulo 2, a equação 8, conhecida como equação de HOLLOMON sugeri modelar o comportamento plástico uniforme do material na curva tensão real versus deformação real. Ainda fazendo referência a este mesmo capítulo, o coeficiente de encruamento, **m**, é numericamente igual a deformação na carga máxima, segundo Souza (1974). Desta forma, a tabela 7 mostra a variação do coeficiente de encruamento, **m**, o alongamento real, **A**<sub>R</sub>, e por conseqüência a ductilidade real, bem como a tenacidade real, **U**<sub>T</sub> e a constante plástica de resistência, **K** em relação a taxa de deformação.

Ė (%/S)	€ <sub>uts</sub> (%)	m	A <sub>R</sub>	K (MPa)	Ut (MPa)
0,001	3,70	0,037	3,70	625,4	19,8
0,01	4,50	0,045	4,50	630,5	23,6
0,25	4,50	0,045	4,50	634,5	23,8
1	4,75	0,048	4,75	642,0	25,2
10	4,90	0,049	4,90	653,5	26,3
100	6,15	0,062	6,15	653,4	31,9
300	6,00	0,060	6,00	659,2	31,5

Tabela 7. Propriedades Mecânicas em função das taxas de deformação.

A tabela 8 mostra que , quando comparado os valores das propriedades mecânicas calculados na taxa de referência com a menor taxa ensaiada, há uma perda de -21,6% no valor **m** e  $A_R$ . (por conseqüência, na ductilidade real). Para **K** e **Ut**, as perdas foram de -1,5% e -20,3%, respectivamente. Quando a comparação da taxa de deformação de referência para a taxa mais alta, há um ganho de 25%

ė (%/S)	<i>E</i> <sub>uts</sub> (%)	Variação de <b>m</b>	Variação de <b>A</b> <sub>R</sub>	Variação de <b>K</b> (MPa)	Variação de <b>Ut</b> (MPa)
0,001	3,70	-21,6%	-21,6%	-1,5%	-20,3%
0,01	4,50	0,0%	0,0%	-0,6%	-0,6%
0,25	4,50	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1	4,75	5,3%	5,3%	1,2%	5,7%
10	4,90	8,2%	8,2%	2,9%	9,8%
100	6,15	26,8%	26,8%	2,9%	25,5%
300	6,00	25,0%	25,0%	3,7%	24,6%

para **m** e  $A_R$  (ductilidade real) e para **K** e **Ut**, os ganhos foram de 3,7% e 24,6%.respectivamente.

Tabela 8. Variação das Propriedades Mecânicas em função das taxas de deformação.

#### 4.2.2 Valores das Propriedades Mecânicas S<sub>E</sub> e S<sub>R</sub> para os Aços 1020 Préencruado e Recozido.

A tabela 9 mostrar os valores de  $S_E$  e  $S_R$  nas taxas de deformação ensaiadas,  $\dot{\epsilon}$ , para o aço SAE 1020 pré-encruado e aço SAE 1020 recozido, estudado em NOBREGA (2010). Estes valores bem como as suas variações em relação a taxa de referência serão detalhadamente analisados no capítulo 5, todavia, as figuras 22 mostra uma maior sensibilidade em relação ao valores de  $S_E$  quando comparados com a taxa de referência, no aço SAE 1020 recozido.

Ė	Curva Real - Aço 1020 Pré-encruado		Curva Real - Aço 1020 Recozido		
(%/s)	SE	S <sub>R</sub>	SE	S <sub>R</sub>	
0,001	581	655	XXX	ххх	
0,01	585	668	328	591	
0,25	591	679	330	590	
1	602	691	348	609	
10	613	706	391	611	
100	624	730	413	623	
300	631	734	xxx	XXX	

Tabela 9. Comparação entre o Aço SAE 1020 Pré-encruado e Recozido.



Figura 22. Relação de S<sub>R</sub> dos aços 1020 pré-encruado e recozido com  $\dot{\epsilon}$ 

### 4.3 Considerações dos Modelos Matemáticos quanto ao Ajuste dos Resultados Experimentais.

A dispersão intrínseca dos ensaios pode ser avaliada comparando as curvas medidas em taxas iguais. Dos ensaios repetidos com a mesma taxa de deformação, a maior dispersão ocorreu com a taxa de 1,0%/s, mas com um valor bem abaixo dos 2,0% sugerido pela norma ABNT 6152. Isso confirma a qualidade do sistema experimental usado, e a propriedade da variação observada entre as curvas medidas nas várias taxas testadas. Em face disso, os ajustes dos modelos matemáticos às curvas experimentais foram realizados usando apenas uma das curvas medidas nas taxas  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ , 0.1, 1 e 3/s, para não dificultar a sua comparação gráfica. Com o resultado dos dados experimentais filtrados pelo programa Labview, faz-se novamente um novo filtro para otimizar os resultados do ajuste dos modelos aos dados experimentais, utilizando a teoria da função de penalidade, conforme MATIAS (2003). Assim sendo, extrai-se os pontos que geram maior dispersão nos resultados, chegando a valores ótimos de ajuste dos modelos matemáticos ao conjunto de dados experimentais para cada taxa de deformação. Em termos numéricos, da taxa mais lenta a mais rápida, a captura de dados variou da ordem de 2000 a 4500 pontos. O primeiro filtro reduz a faixa anterior para 80 pontos representativos em média, considerando todas as taxas ensaiadas.

O segundo filtro, através do Matlab, procura os pontos de maior erro entre os valores calculados pelos modelos matemáticos e dados experimentais, extraindo, no máximo, apenas 3 pontos de cada taxa de deformação, permitindo assim o melhor valor de ajuste dos modelos matemáticos. Foi atribuído ao algoritmo de LM um valor de parada de modulo igual a 10<sup>-6</sup>, que corresponde ao valor erro que o algoritmo admite como satisfatório, finalizando o calculo operacional das variáveis.

A seguir, serão mostrados os resultados dos diversos modelos matemáticos apenas para os pontos filtrados. O anexo A mostrará individualmente os gráficos de ajuste dos modelos e os gráficos de erro percentual considerando o conjunto dos dados experimentais para cada taxa de deformação aplicada neste estudo.

# 4.3.1 Resultados do Modelo de Johnson Cook.

A tabela 10 mostra o resultado do ajuste do modelo de **JC** modificado ao conjunto de dados experimentais para cada taxa de deformação. Observa-se que o modelo matemático consegue ter um satisfatório ajuste para cada taxa de deformação, todos acima de **96%.** Para todas as taxas de deformação testadas o maior erro médio que a equação de JC modificado apresentou foi de **0,8%**, um valor muito pequeno.

		ERRO (%)				
έ (%/s)	<b>R</b> <sup>2</sup> (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Média (%)		
0,001	97,1	-1,0	7,3	0,5		
0,01	96,8	-1,4	6,5	0,03		
1	99,0	-1,8	5,4	0,4		
10	99,0	-1,9	5,3	0,8		
100	99,5	-1,0	3,2	0,2		
300	97,1	-1,4	2,6	0,15		

Tabela 10. Resultado de **ERRO** e **R**<sup>2</sup> para **JC** modificado.

A tabela 11 compara o resultado de  $S_E$  e  $S_R$  obtidos dos ensaios experimentais com os valores segundo o modelo de JC modificado. Observa-se que as maiores diferenças percentuais entre  $S_E$  e  $S_R$  do modelo de JC modificado com os valores experimentais foram, 3,4% e 4,3% respectivamente. Valores não muito significativos.

ė	Experimental		JC r	JC mod.		JC mod.	
(%/s)	SE	S <sub>R</sub>	S <sub>E</sub>	S <sub>R</sub>	<b>S</b> <sub>E</sub> (%)	<b>S</b> <sub>R</sub> (%)	
0,001	581,0	655,0	600,5	666,9	3,4%	1,8%	
0,01	585,0	668,0	601,7	674,9	2,9%	1,0%	
0,25	591,0	679,0	605,4	686,3	2,4%	1,1%	
1	602,0	691,0	613,7	721,0	1,9%	4,3%	
10	613,0	706,0	618,8	724,7	0,9%	2,6%	
100	624,0	730,0	629,9	750,6	0,9%	1,3%	
300	631,0	734,0	636,4	753,5	0,9%	2,7%	

Tabela 11. Comparação de  $S_E$  e  $S_R$  de JC modificado com resultados experimentais.

A Figura 23 mostra o ajuste do modelo de **JC** modificada ao conjunto de dados experimentais para cada taxa de deformação. Observa-se que este modelo gera patamares de encruamento bem definidos de acordo com as taxas de deformação ensaiadas. As figuras 24 e 25 mostram graficamente qual é o erro percentual da resistência ao escoamento e resistência máxima quando comparados os valores obtidos pelo modelo de **JC** com os valores experimentais



Figura 24. Erro de S<sub>E</sub> para a equação de JC.



Figura 25. Erro de  $S_R$  para a equação de **JC**.

A equação 16 mostra o modelo de JC modificado otimizado

$$\sigma = \left[591.\left\{1+0.0705(\varepsilon - \varepsilon_{E})^{0.6606}\right\}\right] \left[1+0.0051\ln(\varepsilon/0.0025)\right]$$
(16)



Figura 23. Relação de JC modificado com dados experimentais

### 4.3.2 Resultados do Modelo de Meyers.

A tabela 12 mostra o resultado do ajuste do modelo de **Meyers** modificado ao conjunto de dados experimentais para cada taxa de deformação. Observa-se que o modelo matemático consegue ter um satisfatório ajuste para cada taxa de deformação, todos maior igual a **95%.** Para todas as taxas de deformação testadas o maior erro médio que a equação de **Meyers** modificado apresentou foi de **2,0** % (em módulo), um valor ainda pequeno, porém maior que o previsto no modelo de **JC** modificado.

		ERRO (%)				
έ (%/s)	<b>R</b> <sup>2</sup> (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Média (%)		
0,001	94,3	0,5	6,3	2,0		
0,01	96,0	-0,5	7,5	0,96		
1	98,8	-2,2	5,0	-0,8		
10	97,8	-2,9	4,2	-1,8		
100	98,7	-2,6	1,5	-1,4		
300	95,0	-3,3	0,6	-2,0		

Tabela 12. Resultado de **ERRO** e **R**<sup>2</sup> para **Meyers** modificado.

A tabela 13 compara o resultado de  $S_E$  e  $S_R$  obtidos dos ensaios experimentais com os valores segundo o modelo de Meyers modificado. Observa-se que as maiores diferenças percentuais entre  $S_E$  e  $S_R$  do modelo de Meyers modificado e os valores experimentais foram, 5,2% e 3,9 % respectivamente.

ċ	É Experimental		Meyers mod.		Meyers mod	
(%/s)	SE	S <sub>R</sub>	S <sub>E</sub>	S <sub>R</sub>	SE	S <sub>R</sub>
0,001	581,0	655,0	611,3	677,7	5,2%	3,5%
0,01	585,0	668,0	613,0	681,2	4,8%	2,0%
0,25	591,0	679,0	613,5	686,3	3,8%	1,1%
1	602,0	691,0	613,7	718,2	1,9%	3,9%
10	613,0	706,0	622,6	717,3	1,6%	1,6%
100	624,0	730,0	623,8	738,4	0,0%	1,2%
300	631,0	734,0	633,0	738,6	0,3%	0,6%

Tabela 13. Comparação de  $S_E$  e  $S_R$  de Meyers modificado com resultados

experimentais.

A Figura 26 mostra o ajuste do modelo de **Meyers** modificada ao conjunto de dados experimentais para cada taxa de deformação. Observa-se que este modelo gera patamares de encruamento discretos de acordo com as taxas de deformação ensaiadas. As Figuras 27 e 28 mostram graficamente qual é o erro percentual da resistência ao escoamento e resistência máxima quando comparados os valores obtidos pelo modelo de **Meyers** com os valores experimentais



Figura 27 Erro de **S**<sub>E</sub> para a equação de **Meyers**.



Figura 28 Erro de **S**<sub>R</sub> para a equação de **Meyers**.

A equação 17 mostra o modelo de Meyers modificado otimizado.

$$\sigma = \left[ S_{E_0} \cdot \left\{ 1 + 0.0705 (\varepsilon - \varepsilon_E)^{0.0661} \right\} \right] \left[ 1 + 0.0052 \log_{10} (\varepsilon / \varepsilon_0) \right]$$
(17)



Figura 26. Relação de Meyers modificado com dados experimentais

## 4.3.3 Resultados do Modelo de Zerilli-Armstrong.

A tabela 14 mostra o resultado do ajuste do modelo de ZA modificado ao conjunto de dados experimentais para cada taxa de deformação. Observa-se que o modelo matemático consegue ter um satisfatório ajuste para cada taxa de deformação, todos maior a 87 %. Para todas as taxas de deformação testadas o maior erro médio que a equação de ZA modificada apresentou foi de 4,3 % ,um valor ainda pequeno, porém bem maior que o previsto no modelo de JC e Meyers modificados.

		ERRO (%)				
έ (%/s)	<b>R</b> <sup>2</sup> (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Média (%)		
0,001	87,7	2,4	9,1	4,3		
0,01	92,7	0,9	7,2	2,6		
1	98,7	-1,5	3,8	0,4		
10	99,0	-1,0	4,4	0,5		
100	98,1	-0,2	5,6	1,5		
300	96,5	-1,3	4,3	0,6		

Tabela 14. Resultado de **ERRO** e **R**<sup>2</sup> para **ZA** modificado.

A tabela 15 compara o resultado de  $S_E$  e  $S_R$  obtidos dos ensaios experimentais com os valores segundo o modelo de ZA modificado. Observa-se que as maiores diferenças percentuais entre  $S_E$  e  $S_R$  do modelo de ZA modificado e os valores experimentais foram, 5,2% e 6,5 % respectivamente.

ż	Experi	Experimental		ZA mod.		nod.
(%/s)	SE	S <sub>R</sub>	S <sub>E</sub>	S <sub>R</sub>	SE	S <sub>R</sub>
0,001	581,0	655,0	610,8	669,6	5,1%	2,2%
0,01	585,0	668,0	615,5	669,5	5,2%	0,2%
0,25	591,0	679,0	616,0	715,8	4,2%	5,4%
1	602,0	691,0	616,1	735,6	2,3%	6,5%
10	613,0	706,0	626,6	741,5	2,2%	5,0%
100	624,0	730,0	630,5	767,1	1,0%	3,5%
300	631,0	734,0	630,7	765,8	-0,05%	4,3%

Tabela 15. Comparação de S<sub>E</sub> e S<sub>R</sub> de ZA modificado com resultados experimentais.

A Figura 29 a seguir mostra o ajuste do modelo de **ZA** modificada ao conjunto de dados experimentais para cada taxa de deformação. Observa-se que este modelo gera patamares de encruamento discretos de acordo com as taxas de deformação ensaiadas. As Figuras 30 e 31 mostram graficamente qual é o erro percentual da resistência ao escoamento e resistência máxima quando comparados os valores obtidos pelo modelo de **ZA** com os valores experimentais.



Figura 30. Erro de **S**<sub>E</sub> para a equação de **ZA**.



Figura 31 Erro de **S**<sub>R</sub> para a equação de **ZA**.

A equação 18 mostra o modelo de ZA modificado otimizado

$$\sigma = S_{E_0} + 62,4325.(\varepsilon - \varepsilon_E)^{0.5743} - 19,5795.\exp(\varepsilon/\varepsilon_0)$$
(18)



Figura 29 . Relação de ZA modificado com dados experimentais

# 4.3.4 Resultados do Modelo de Cowper-Symonds.

A tabela 16 mostra o resultado do ajuste do modelo de **CS** modificado ao conjunto de dados experimentais para cada taxa de deformação. Observa-se que o modelo matemático consegue ter um satisfatório ajuste para cada taxa de deformação, todos maior a **98 %**. De forma geral, o maior erro médio que a equação de **CS** modificado apresentou foi de **-0,8 %**, um valor muito pequeno e,em módulo, coincidente com o previsto pelo modelo de **JC** modificado.

		ERRO (%)					
έ (%/s)	<b>R</b> <sup>2</sup> (%)	Minimo (%)	Máximo (%)	Média (%)			
0,001	98,8	-2,2	1,8	-0,4			
0,01	99	-1,7	1,5	-0,5			
1	99,4	-2,0	1,1	-0,6			
10	99,3	-3,0	0,9	-0,8			
100	99,7	-2,1	1,9	0,3			
300	99	-1,8	1,9	0,1			

Tabela 16. Resultado de ERRO e R<sup>2</sup> para CS modificado

A tabela 17 compara o resultado de  $S_E$  e  $S_R$  obtidos dos ensaios experimentais com os valores segundo o modelo de CS modificado. Observa-se que as maiores diferenças percentuais entre  $S_E$  e  $S_R$  do modelo de CS modificado e os valores experimentais foram, -1,1% e 3,7% respectivamente. Valores não muito significativos.

ė	Experi	mental	CS	mod	CS mod		
(%/s)	S <sub>E</sub>	S <sub>R</sub>	S <sub>E</sub>	S <sub>R</sub>	S <sub>E</sub>	S <sub>R</sub>	
0,001	581,0	655,0	574,7	666,7	-1,1%	1,8%	
0,01	585,0	668,0	583,7	676,0	-0,2%	1,2%	
0,25	591,0	679,0	589,2	689,1	-0,3%	1,5%	
1	602,0	691,0	599,0	716,8	-0,5%	3,7%	
10	613,0	706,0	607,0	723,3	-1,0%	2,5%	
100	624,0	730,0	623,8	744,3	0,0%	2,0%	
300	631,0	734,0	627,9	748,0	-0,5%	1,9%	

Tabela 17. Comparação de  $\boldsymbol{S}_{E}$  e  $\boldsymbol{S}_{R}$  de  $\boldsymbol{N}\boldsymbol{G}$  modificado com resultados experimentais

A Figura 32 mostra o ajuste do modelo de **CS** modificado ao conjunto de dados experimentais para cada taxa de deformação. As figuras 33 e 34 abaixo mostram graficamente qual é o erro percentual da resistência ao escoamento e resistência máxima quando comparados os valores obtidos pelo modelo de **CS** com os valores experimentais.



Figura 33 Erro de S<sub>E</sub> para a equação de CS.



Figura 34 Erro de **S**<sub>R</sub> para a equação de **CS**.

A equação 20 mostra o modelo de CS modificado otimizado

$$\boldsymbol{\sigma} = \left[1,0596 + S_{E} \cdot \varepsilon^{0.0764}\right] \left[1 + \ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_{0})^{1/170}\right]$$
(20)



Figura 32. Relação de CS modificado com dados experimentais

# 4.3.5 Comparação dos Resultados dos Modelos Matemáticos.

As tabelas 18 e 19 reúnem todos os valores de  $S_E$  e  $S_R$  previsto pelos modelos matemáticos que concomitantemente com as figuras 35 e 36 avaliam a dispersão percentual dos resultados dos modelos matemáticos ao conjunto de dados experimentais.

ċ	Experimental		JC mod.		Meyers mod.		ZA mod		NG mod		CS mod	
<b>e</b> (%/s)	SE	SR	SE	SR	SE	SR	SE	SR	SE	SR	SE	SR
0,001	581,0	655,0	600,5	666,9	611,3	677,7	610,8	669,6	606,3	696,8	574,7	666,7
0,01	585,0	668,0	601,7	674,9	613,0	681,2	615,5	669,5	608,1	697,9	583,7	676,0
0,25	591,0	679,0	605,4	686,3	613,5	686,3	616,0	715,8	609,3	699,6	589,2	689,1
1,0	602,0	691,0	613,7	721,0	613,7	718,2	616,1	735,6	610,0	726,7	599	716,8
10	613,0	706,0	618,8	724,7	622,6	717,3	626,6	741,5	614,5	724,0	607	723,3
100	624,0	730,0	629,9	750,6	623,8	738,4	630,5	767,1	622,4	738,9	623,8	744,3
300	631,0	734,0	636,4	753,5	633,0	738,6	630,7	765,8	623,8	738,6	627,9	748,0

Tabela 18. Reunião de  $S_E$  e  $S_R$  para os modelos matemáticos (MPa).

ė	Experimental		JC mod.		Meyers mod.		ZA mod		NG mod		CS mod	
<b>e</b> (%/s)	SE	SR	SE	SR	SE	SR	SE	SR	SE	SR	SE	SR
0,001	581,0	655,0	3,4%	1,8%	5,2%	3,5%	5,1%	2,2%	4,4%	6,4%	-1,1%	1,8%
0,01	585,0	668,0	2,9%	1,0%	4,8%	2,0%	5,2%	0,2%	3,9%	4,5%	-0,2%	1,2%
0,25	591,0	679,0	2,4%	1,1%	3,8%	1,1%	4,2%	5,4%	3,1%	3,0%	-0,3%	1,5%
1,0	602,0	691,0	1,9%	4,3%	1,9%	3,9%	2,3%	6,5%	1,3%	5,2%	-0,5%	3,7%
10	613,0	706,0	0,9%	2,6%	1,6%	1,6%	2,2%	5,0%	0,2%	2,5%	-1,0%	2,5%
100	624,0	730,0	0,9%	2,8%	0,0%	1,2%	1,0%	5,1%	-0,3%	1,2%	0,0%	2,0%
300	631,0	734,0	0,9%	2,7%	0,3%	0,6%	0,0%	4,3%	-1,1%	0,6%	-0,5%	1,9%

Tabela 19. Diferença percentual entre de S<sub>E</sub> e S<sub>R</sub> dos modelos matemáticos e experimentais (%).

O modelo de **CS** modificado apresentou o menor valor de erro para a maioria das as taxas de deformação, exceto na taxa de **10%/s**, onde o modelo de **NG** pontualmente obteve um valor de erro de **0,2%** contra **-1,0%** do modelo de **CS** e na taxa de **300%/s**, onde o modelo de **ZA** obteve um valor de erro praticamente **nulo** contra **-0,5%/s** do modelo de **CS**. A Figura 35 mostra os valores de erro percentual de  $S_E$  para cada modelo matemático em todas as  $\dot{\varepsilon}$ .



Figura 35. Erro percentual de S<sub>E</sub> para os modelos matemáticos.



Figura 36. Erro percentual de **S**<sub>R</sub> para os modelos matemáticos

Quanto ao erro percentual de  $S_R$  para os modelos matemáticos não existiu um modelo que se destaca num baixo percentual de dispersão ao longo de todas as taxas de deformação ensaiadas, conforme pode ser visto na Figura 32.

O apêndice A mostra o artigo técnico apresentado no 65º Congresso da ABM – Internacional ocorrido em julho de 2010 que apresentou os primeiros resultados do efeito da taxa de deformação no aço 1020 pré encruado, logo após uma primeira avaliação dos resultados utilizando o algoritmo de LM.