

3

Resultados dos Ensaios de Tração

3.1

Introdução

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios de tração monitorados e controlados por estratégias de controle distintas, para investigar a influência da taxa de deformação no comportamento mecânico de alguns materiais estruturais, na faixa de $d\varepsilon/dt = 10^{-3}$ -10/s. A sistemática experimental usada neste trabalho incluiu duas etapas, a saber:

- Estudo semi-qualitativo
- Estudo quantitativo:

No estudo semi-qualitativo buscou-se analisar qual material seria mais sensível à taxa de deformação, para realçar a influência das estratégias de controle do ensaio de tração na obtenção de seus parâmetros. No estudo quantitativo foram medidos os dados do material mais sensível, o aço AISI 1020.

Os materiais selecionados para o estudo semi-qualitativo foram: aço AISI 1020, aço AISI 4340, aço inox 304, latão e alumínio, cuja análise química é mostrada no Anexo I. Os corpos de prova (CP) foram fabricados no laboratório de Comando Numérico Computadorizado (CNC) do CEFET-RJ. Os ensaios de tração iniciais foram feitos no Instituto Tecnológico da PUC-Rio (ITUC-PUC-Rio) em máquina servo hidráulica Instron Modelo 8504 de 5MN, ilustrada na Fig. 31.



Figura 31– Máquina servo hidráulica Instron 8504 de 500kN.

Primeiro o *clip gage* foi posicionado na região útil do corpo de prova conforme a norma ASTM, tanto para os ensaios com estratégia de controle de velocidade, quanto para os sob controle de deformação. Alguns CPs, em ambos os casos, foram desconsiderados devido a rompimento fora desta região, erros na execução do ensaio (especialmente em taxas de deformações altas), erros de armazenagem de dados (dados corrompidos), etc. A Fig. 32 abaixo ilustra o rompimento dos corpos de prova em regiões dentro e fora da área útil.

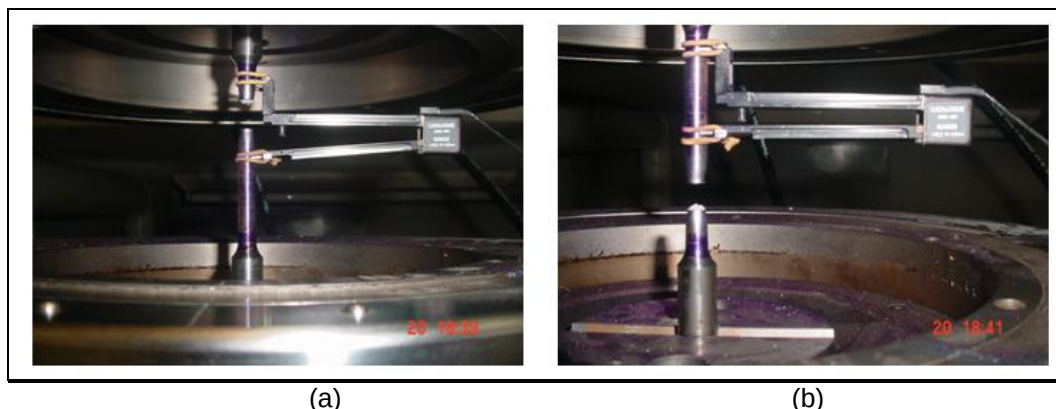


Figura 32 – Corpo de prova de aço AISI 1020, com o clip-gage montado (a) entre a região da fratura, e (b) fora da região da fratura.

3.2 Estratégias de Controle do Ensaio de Tração

Em todos os materiais em estudo foram usadas duas estratégias de controle, vide Fig. 33.

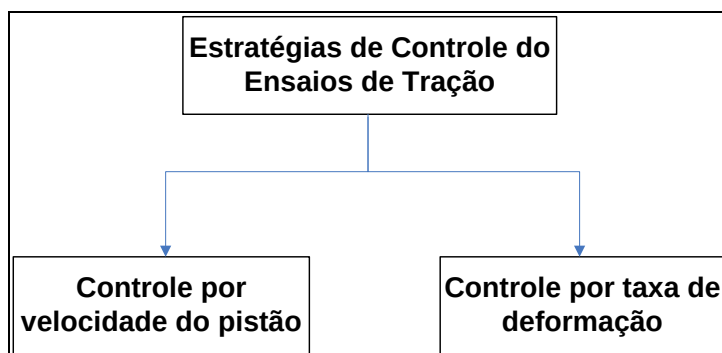


Figura 33 – Estratégias de controle dos ensaios de tração

Assim, os CPs foram testados numa máquina servo-hidráulica computadorizada sob: (i) taxa de deformação fixa (em s^{-1}), usando um *clip gage* montado no CP para medir sua deformação; e (ii) velocidade do pistão fixa (em m/s), controlando através do LVDT nele montado. O esquema do sistema de controle das máquinas de tração servo-hidráulicas é apresentado na Fig. 34. A partir dos dados de entrada do programa utilizado, o sinal de comando entra em uma porta lógica onde é comparado com o sinal da retro-alimentação gerando assim um sinal de erro, que é usado para atuar a servo-válvula que controla o fluxo do fluido hidráulico no atuador. O sinal de controle pode ser gerado pelo *clip gage* montado no CP ou pelo LVDT fixado entre o pistão e a estrutura da máquina.

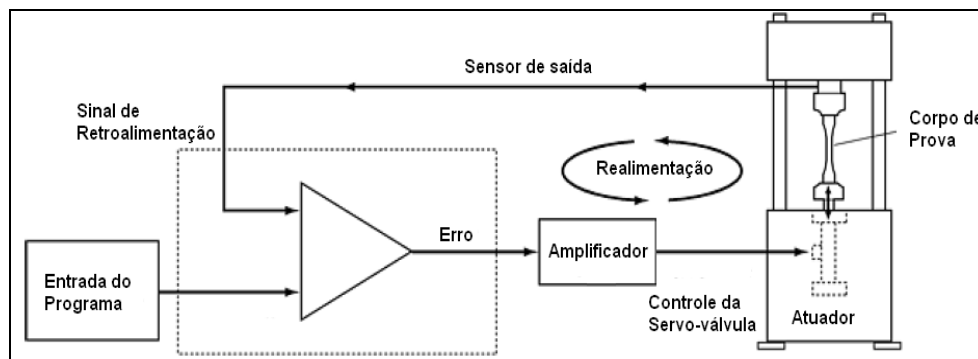


Figura 34 - Esquema básico de controle de uma máquina servo-hidráulica.

O sistema de aquisição de dados desenvolvido para este trabalho é constituído de uma placa AD de captura e de dois programas, escritos na linguagem *Lab-view*, para o estudo quantitativo. A placa lê e digitaliza os sinais do *clip-gage* e da célula de carga e os envia para o primeiro programa, que faz uma plotagem em tempo real dos dados medidos ao longo do ensaio, ilustrado na Fig. 35, e os armazena num arquivo apropriado. O segundo programa faz a análise e a filtragem desses dados, para retirar os ruídos da leitura, gerando curvas σ - ϵ de engenharia e real como as mostradas adiante. (HOLMAN,1994).

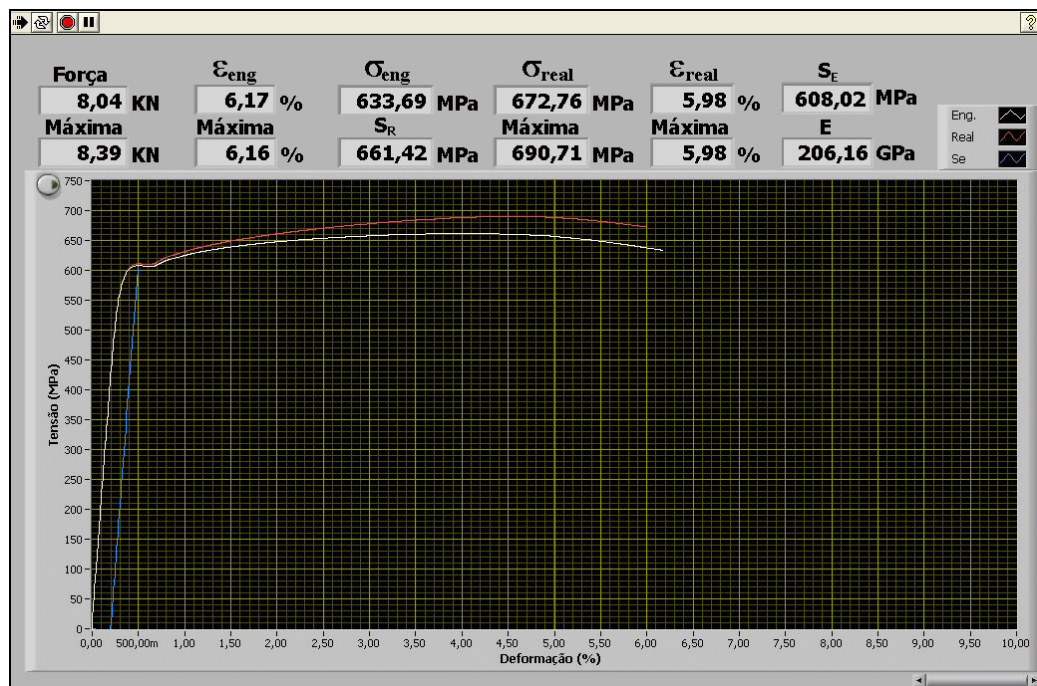


Figura 35 - Tela de acompanhamento dos ensaios de tração em tempo real.

3.3.1

Estudo Semi-Qualitativo

No estudo semi-qualitativo, as taxas de deformação são divididas em alta, média e baixa. A seguir são ilustrados os dados obtidos controlando a taxa de deformação, e a qualidade do ajuste obtido pelo método dos mínimos quadrados (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2003). Para a aquisição dos dados foi usado o programa *Blue Hill*, que gera um arquivo em formato csv, trabalhável em *Excel*. Entretanto devido à necessidade da manipulação de elevada quantidade de dados, também foi empregado o programa *Mathcad R13* e criado uma rotina específica para o tratamento dos dados deste trabalho.

3.3.2

Liga de alumínio

Na Fig. 36 é possível observar o excelente controle de deformação obtido durante a realização dos ensaios selecionados, ficando todos os resultados válidos com R^2 acima de 0,98.

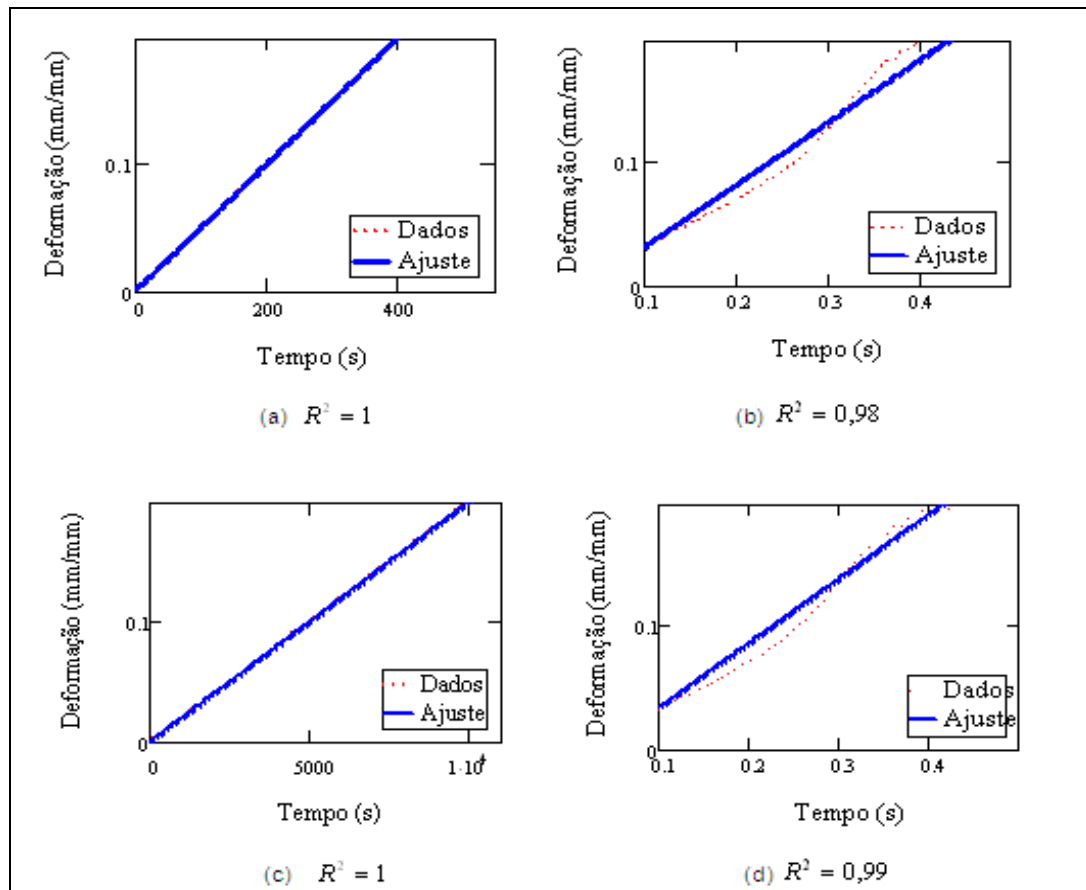


Figura 36 – Controle da taxa de deformação para os casos: (a) taxa média; (b) taxa alta; (c) taxa baixa e (d) taxa alta

A seguir é apresentado o diagrama tensão *versus* deformação convencional, juntamente com a determinação da tensão de escoamento a 0,2%, vide Fig. 37.

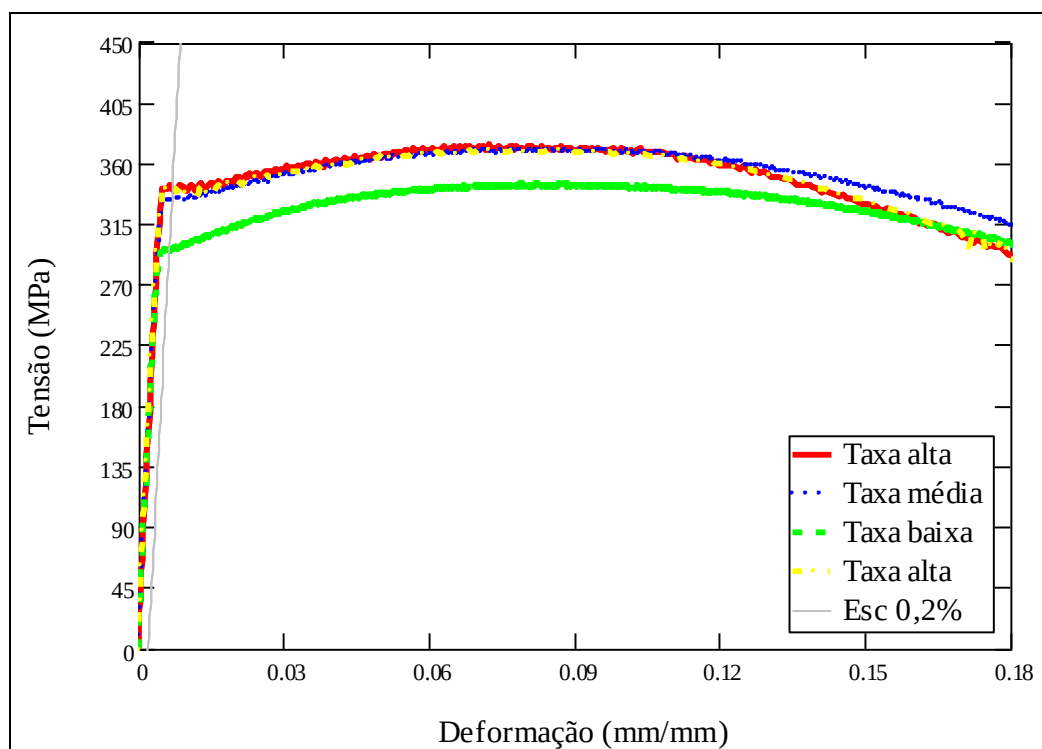


Figura 37 – Curva σ - ϵ (convencional) para o alumínio

A Fig. 38 apresenta dados obtidos controlando a velocidade de deformação, e a qualidade no ajuste obtido.

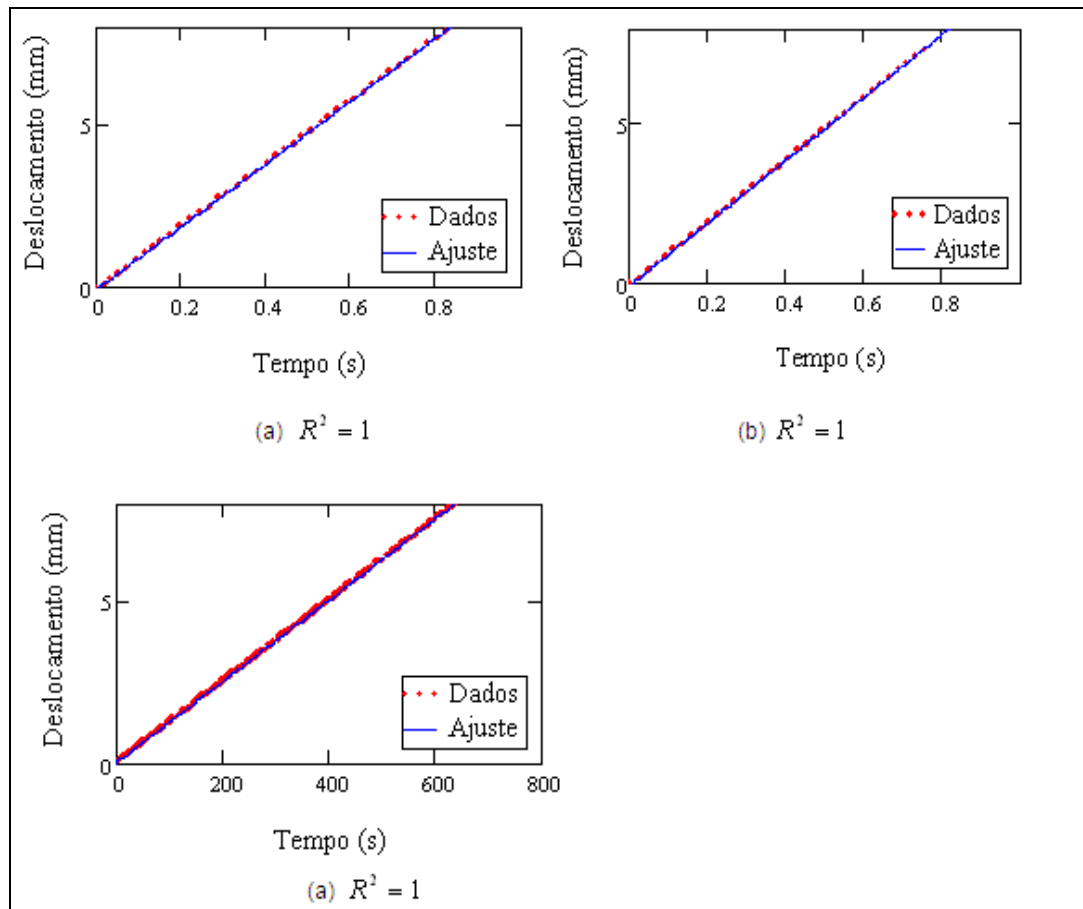


Figura 38 – Controle da taxa de velocidade de deformação para os casos: (a) velocidade alta; (b) velocidade alta e (c) velocidade média.

A Fig. 39 apresenta o diagrama tensão versus deformação considerando o controle de velocidade, tanto em condições de velocidade alta e média, não apresentando variações significativas nas propriedades mecânicas ao longo do diagrama.

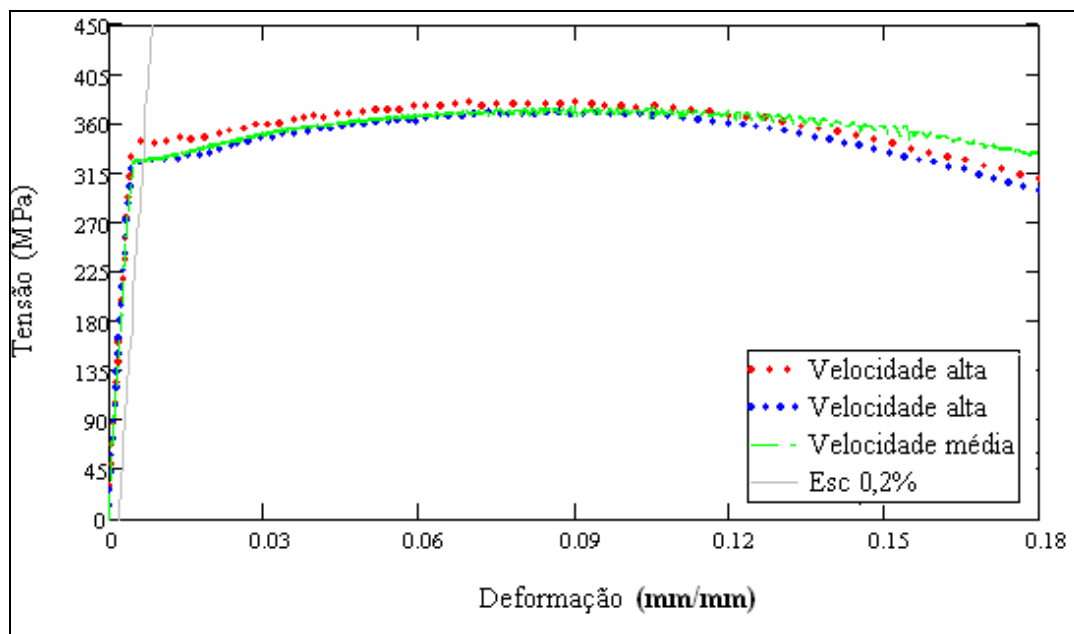


Figura 39 – Curva σ - ϵ (convencional) para alumínio

Foi realizada uma comparação geral entre todos os resultados obtidos, tanto aqueles feitos com controle de taxa de deformação, quanto àqueles realizados com controle de velocidade, em condições equivalentes. O módulo de elasticidade (E) praticamente não variou em função da taxa de deformação, possuindo valor médio de 69 GPa, em todos os tipos de ensaios feitos, conforme esperado (Ashby e Jones, 2007). Em relação à resistência ao escoamento, considerando o valor de deformação de referência 0,2%, obtém uma variação máxima de 15% para esta propriedade. A resistência a tração apresentou uma variação de apenas de 20%.

3.3.3 Aço AISI 1020

O aço 1020 foi submetido a taxas de deformações controladas, bem como velocidade de deformações. Foram selecionados somente os resultados com excelentes controles executados, sendo estes superiores a $R^2 = 0,98$, conforme ilustrado na Fig. 40.

A Fig. 41 apresenta as variações das propriedades mecânicas em função das taxas de deformações em estudo no diagrama σ - ϵ convencional, mostrando assim a influência desta variável.

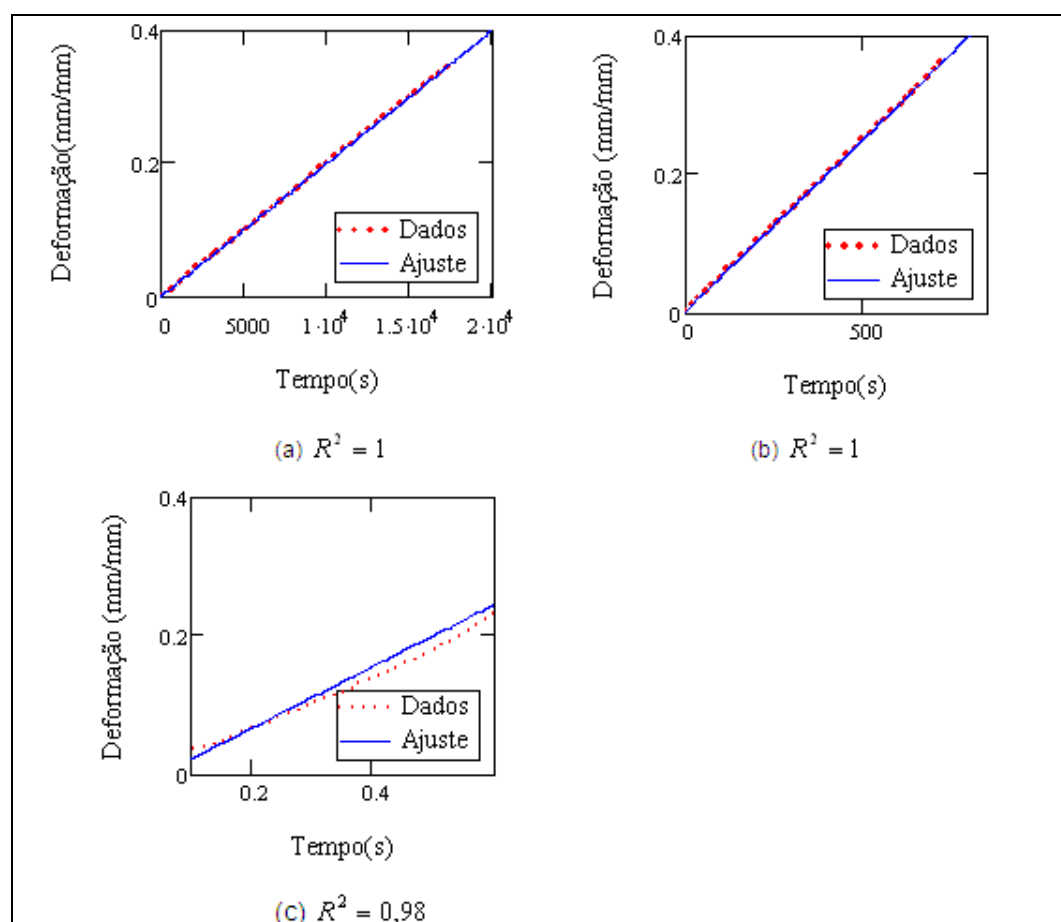


Figura 40 – Controle da σ - ϵ para os casos: (a) taxa baixa; (b) taxa média e (c) taxa baixa.

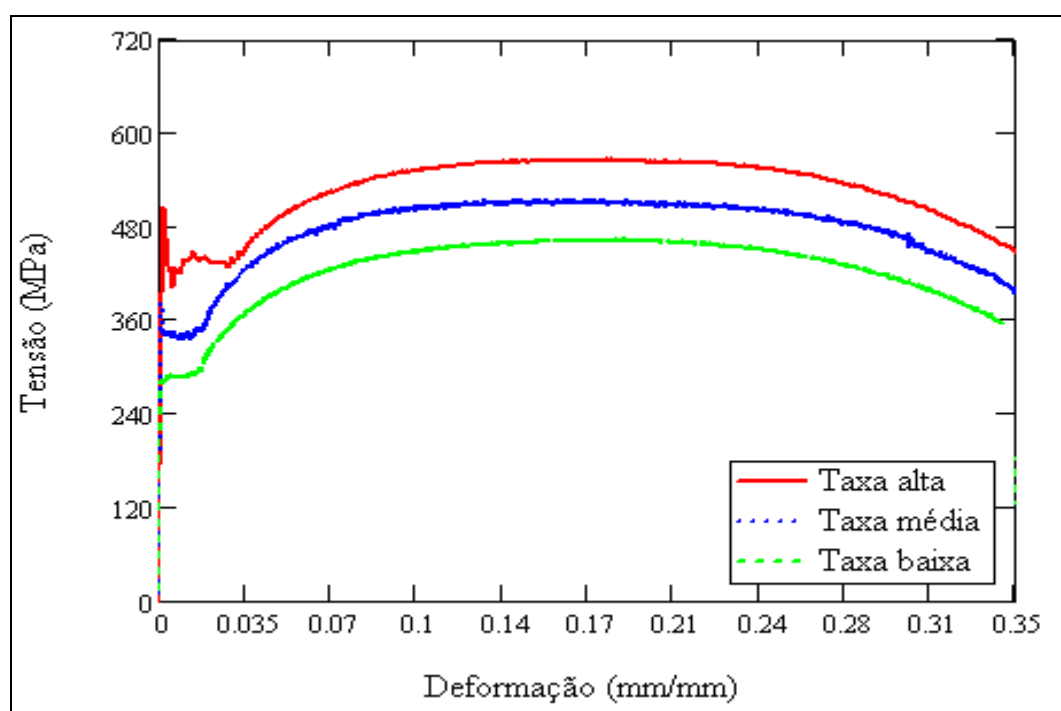


Figura 41 – Curva σ - ϵ (convencional) para o aço AISI 1020

Os ensaios realizados com controle de velocidade de deformação estão ilustrados na Fig. 42, mostrando a ótima qualidade de ajuste obtido, todos com $R^2 = 1$.

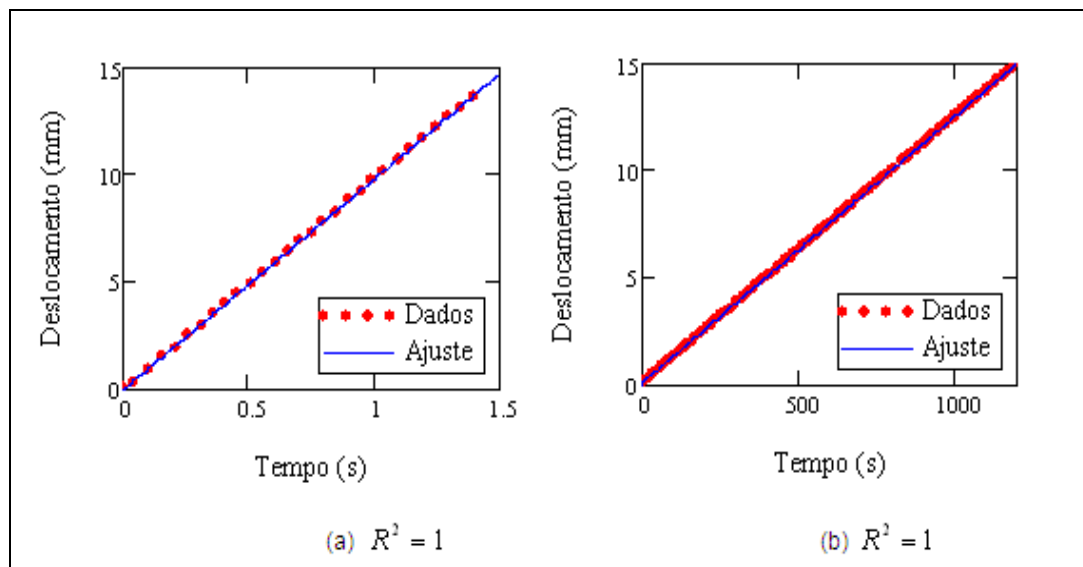


Figura 42 – Controle da velocidade de deslocamento para os casos: (a) velocidade alta e (b) velocidade média.

O Diagrama σ - ϵ convencional do aço 1020 é apresentado na Fig. 43, mostrando a influência da velocidade de deformação nas propriedades mecânicas deste material.

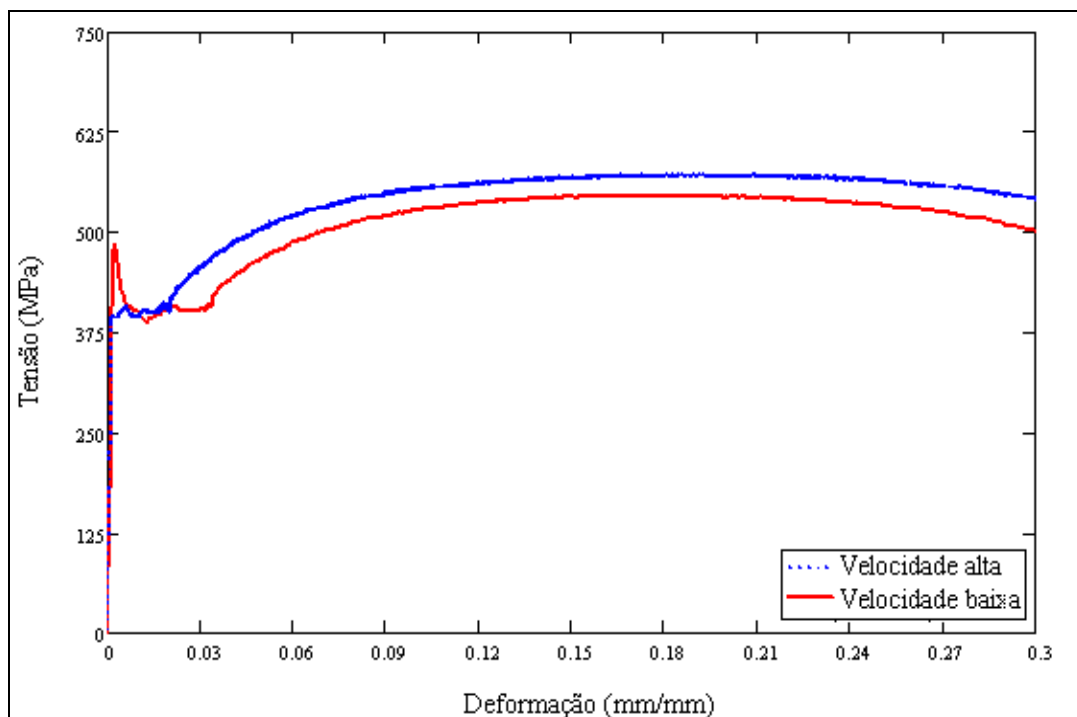


Figura 43– Curva σ - ϵ (convencional) para o aço AISI 1020

3.4.1 Aço AISI 4340

A Fig. 44 ilustra o ajuste de dados do ensaio de tração realizado com controle de taxa de deformação para o aço 4340, apresentando qualidade do ajuste superior a R^2 de 0,99.

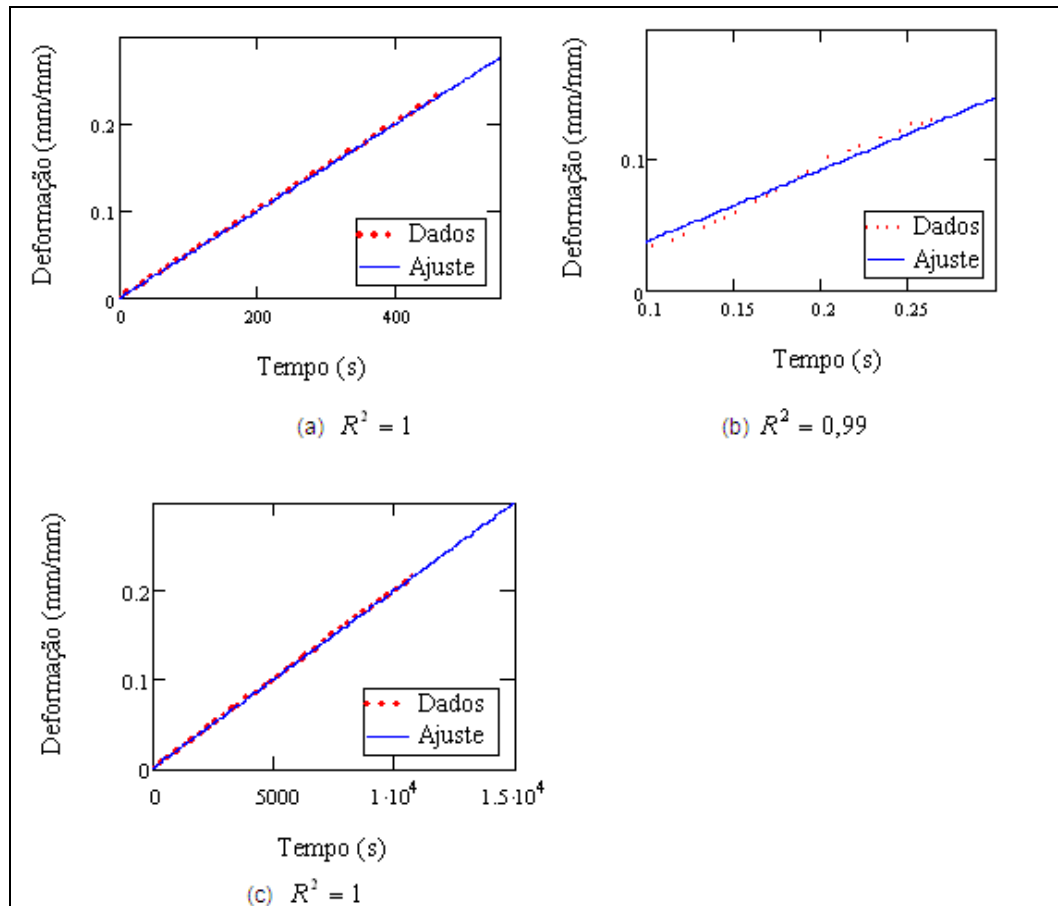


Figura 44 – Controle da taxa de deformação para os casos: (a) taxa média; (b) taxa alta e (c) taxa baixa.

As variações das propriedades mecânicas do aço 4340 em função da taxa de deformação são apresentadas na Fig. 45.. Existe redução da ductilidade do material para o caso da taxa de deformação mais alta.

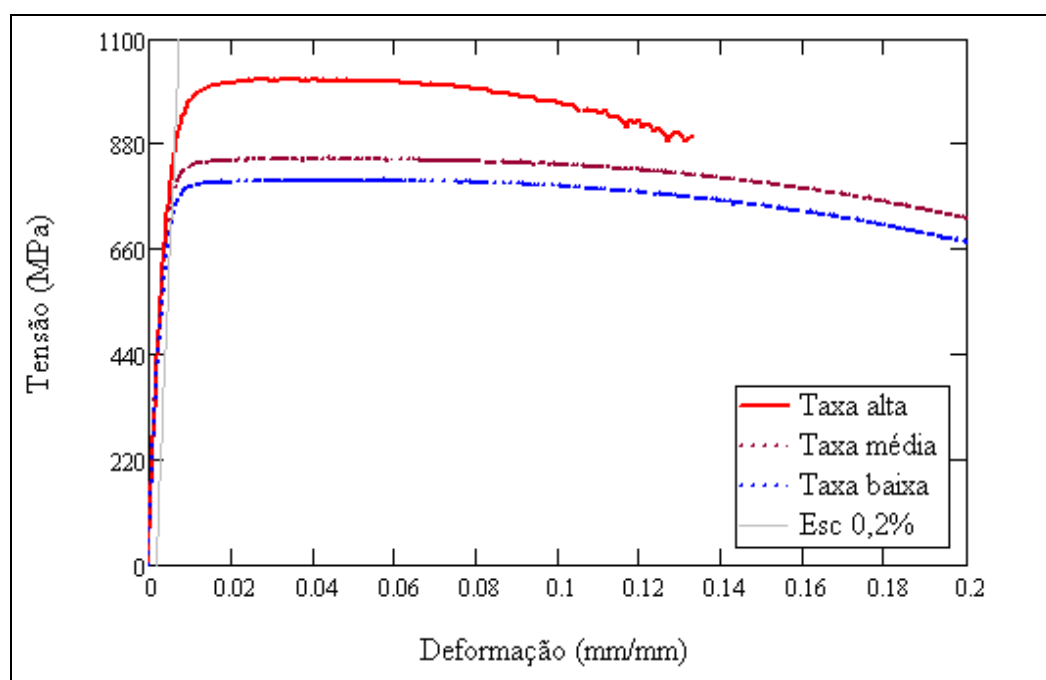


Figura 45 – Curva σ - ϵ (convencional) para o aço AISI 4340

O controle de velocidade de deformação está apresentado na Fig. 46, sendo obtido um ajuste com $R^2=1$.

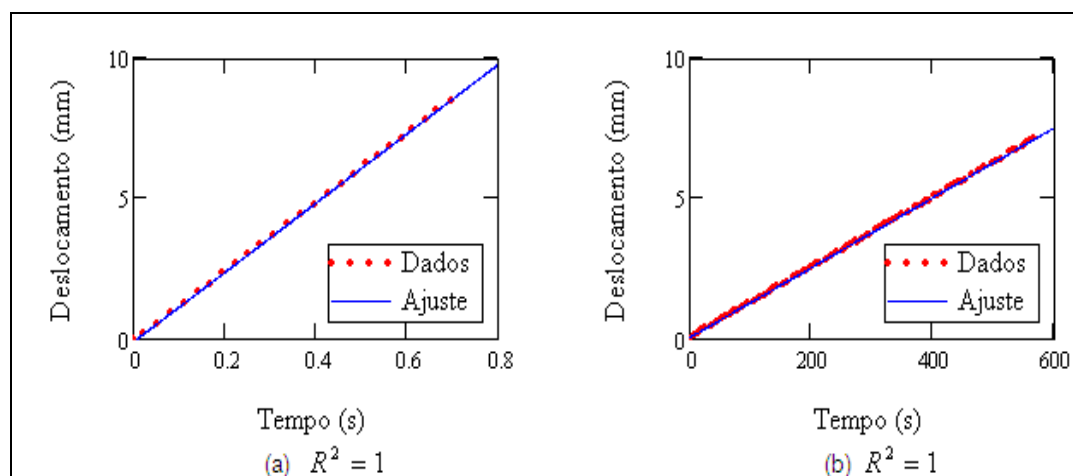


Figura 46 – Controle da velocidade de deslocamento para os casos: (a) velocidade alta e (b) velocidade média.

A Fig. 47 apresenta a pouca influência da variação da velocidade de deformação nas propriedades mecânicas do aço 4340.

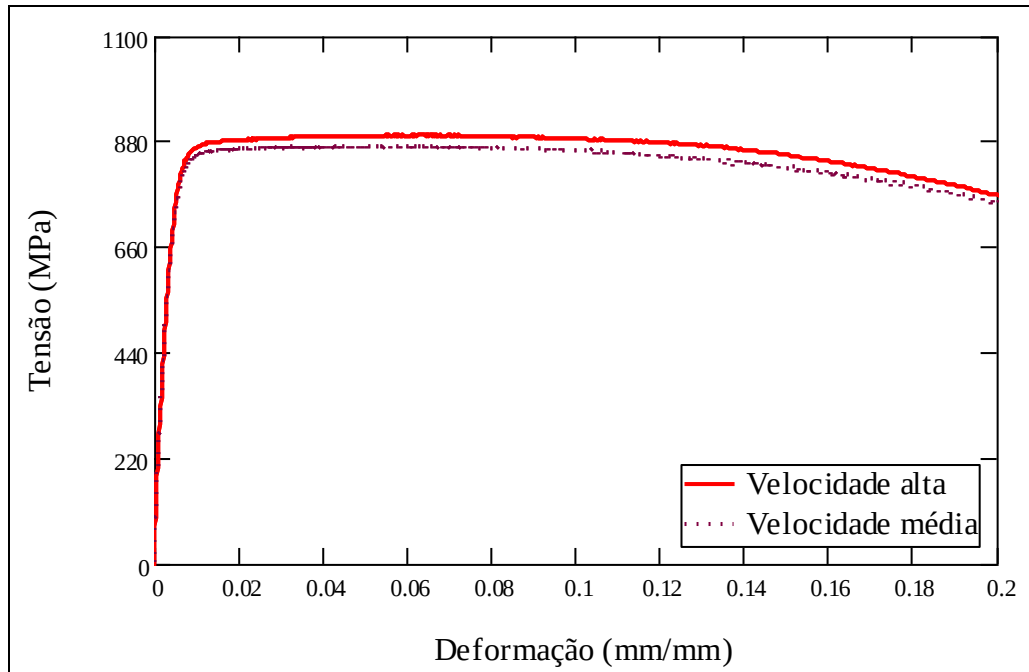


Figura 47 – Curva σ - ϵ (convencional) para o aço AISI 4340

3.3.5 Aço inox 304

Os ensaios realizados com controle de taxa de deformação para o caso do aço inox apresentaram boa qualidade na manutenção da taxa durante a realização do ensaio, possuindo desta maneira, valores superiores da $R^2 = 0,99$, conforme Fig.48.

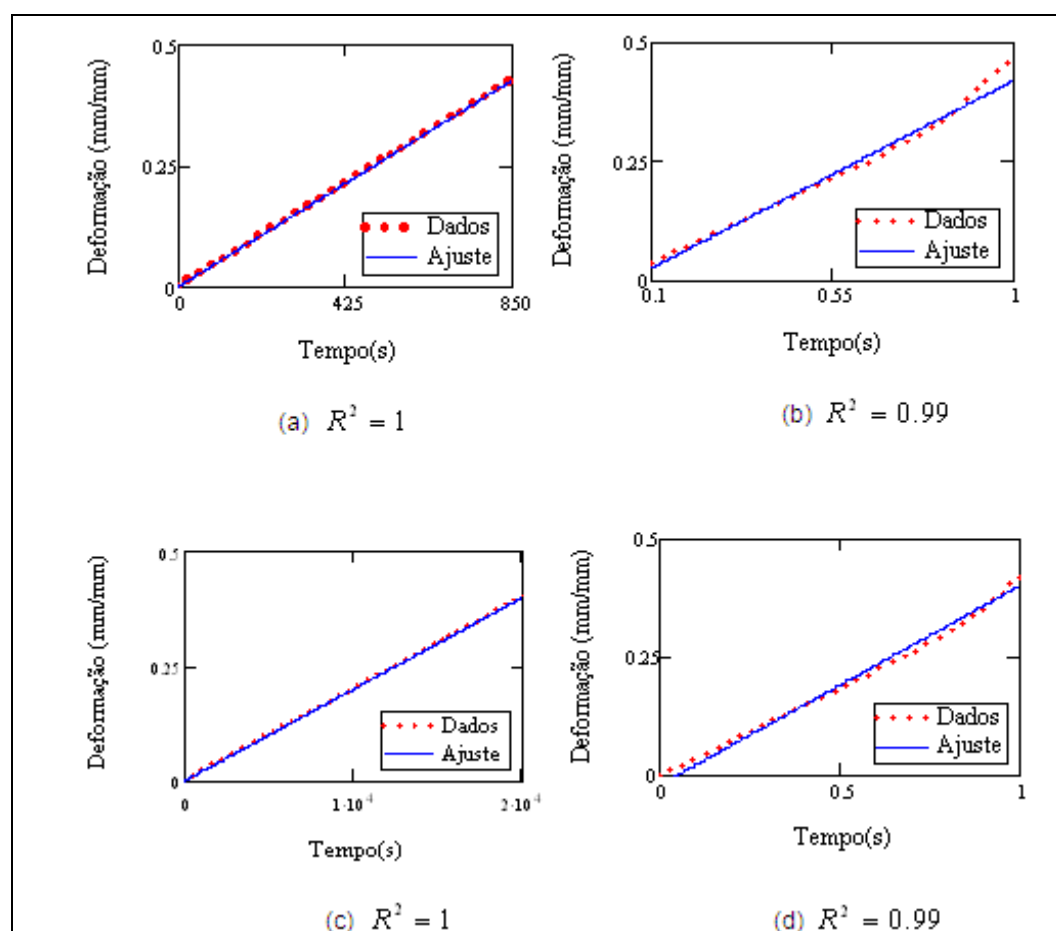


Figura 48 – Controle da taxa de deformação para os casos: (a) taxa média; (b) taxa alta, (c) taxa baixa e (d) taxa alta.

A Fig. 49 apresenta o diagrama tensão *versus* deformação convencional. Nota-se a variação das propriedades mecânicas.

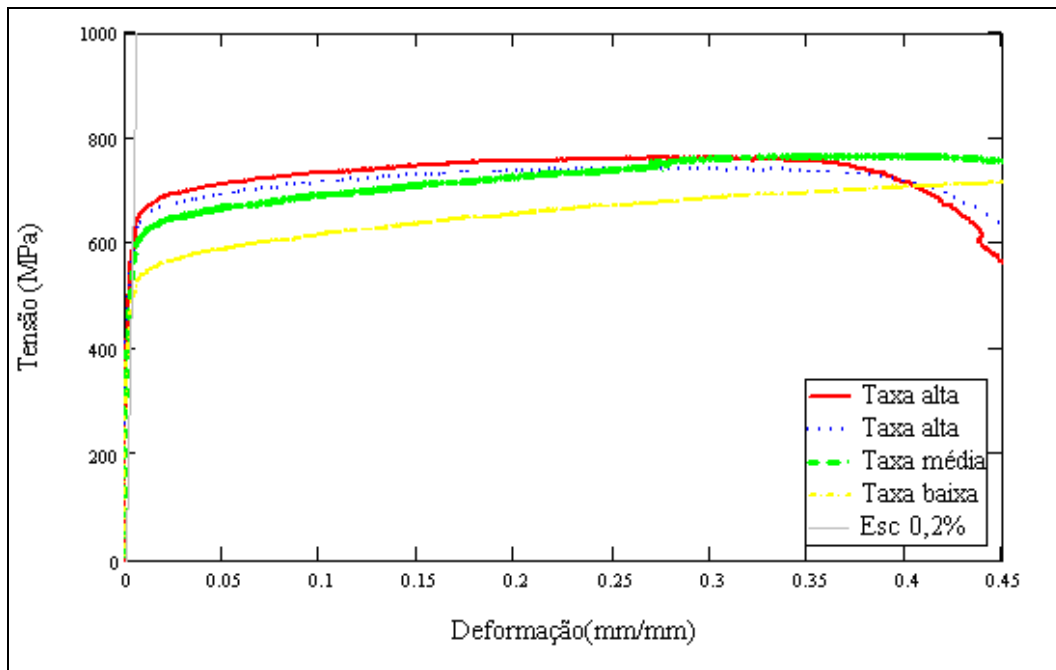


Figura 49 – Curva σ - ϵ (convencional) para o aço inox 304

Na estratégia de controle de velocidade de deformação foi possível o estabelecimento de um controle com $R^2=1$, conforme apresentado na Fig. 50.

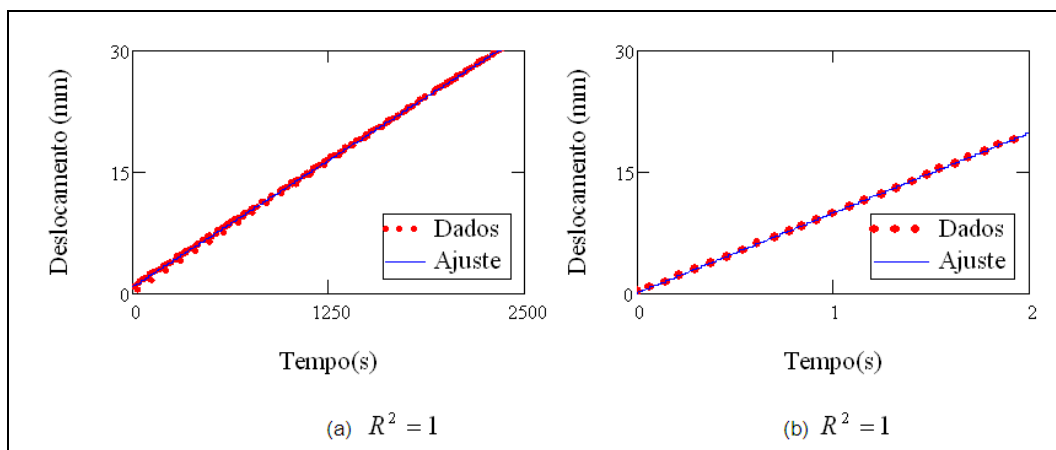


Figura 50 – Controle da velocidade de deformação para os casos: (a) velocidade média e (b) velocidade alta.

Os resultados dos ensaios de tração com controle de velocidade são ilustrados na Fig. 51.

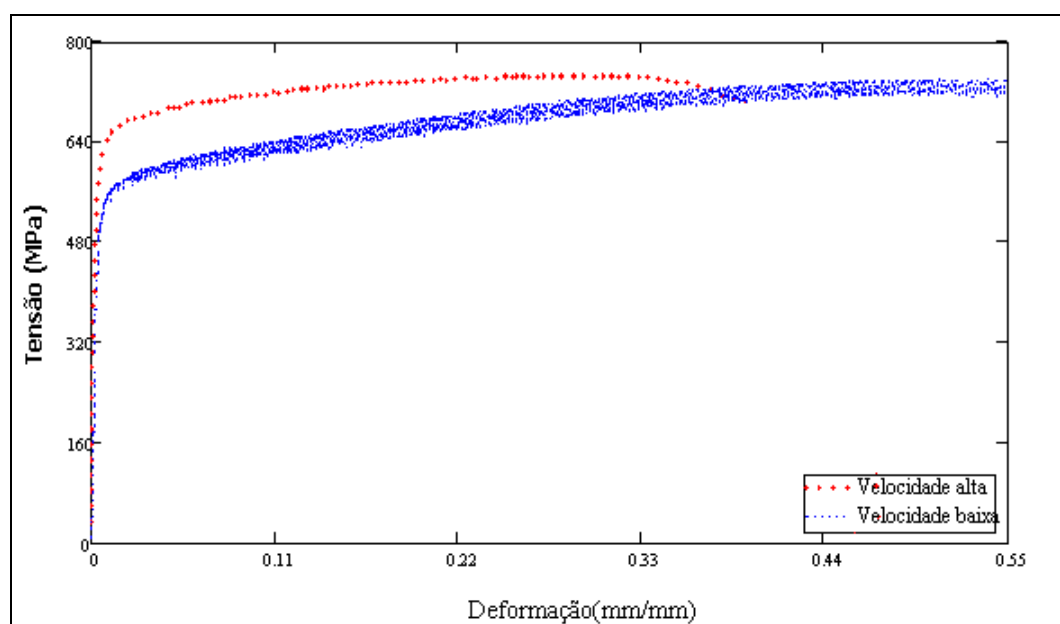


Figura 51 – Curva σ - ϵ (convencional) para o aço inox 304

3.3.6 Latão

No caso do latão, foi conseguida uma qualidade do ajuste igual ou superior a $R^2=0,99$, conforme ilustrado na Fig. 52.

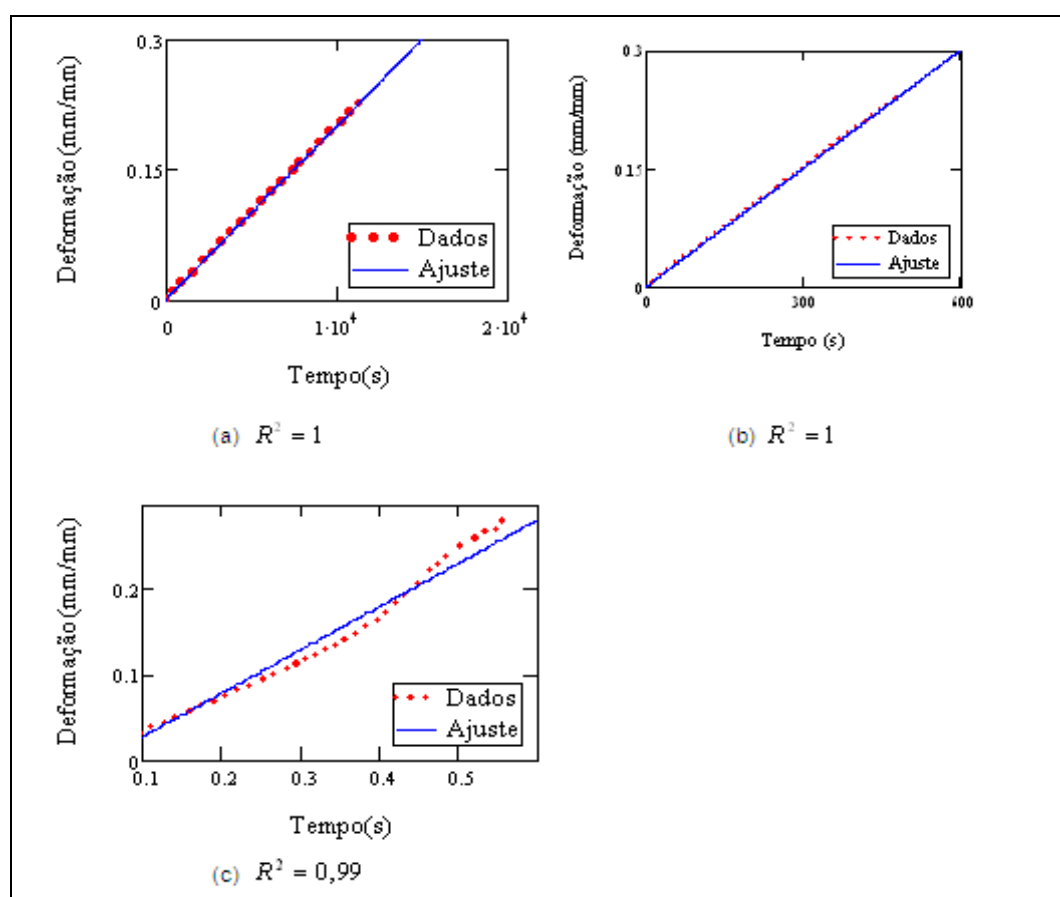


Figura 52 – Controle da taxa de deformação para os casos: (a) taxa média; (b) taxa média e (c) taxa alta.

A Fig. 53 apresenta o comportamento mecânico do latão para diferentes taxas de deformação, sendo notória a invariabilidade dos resultados em função deste parâmetro.

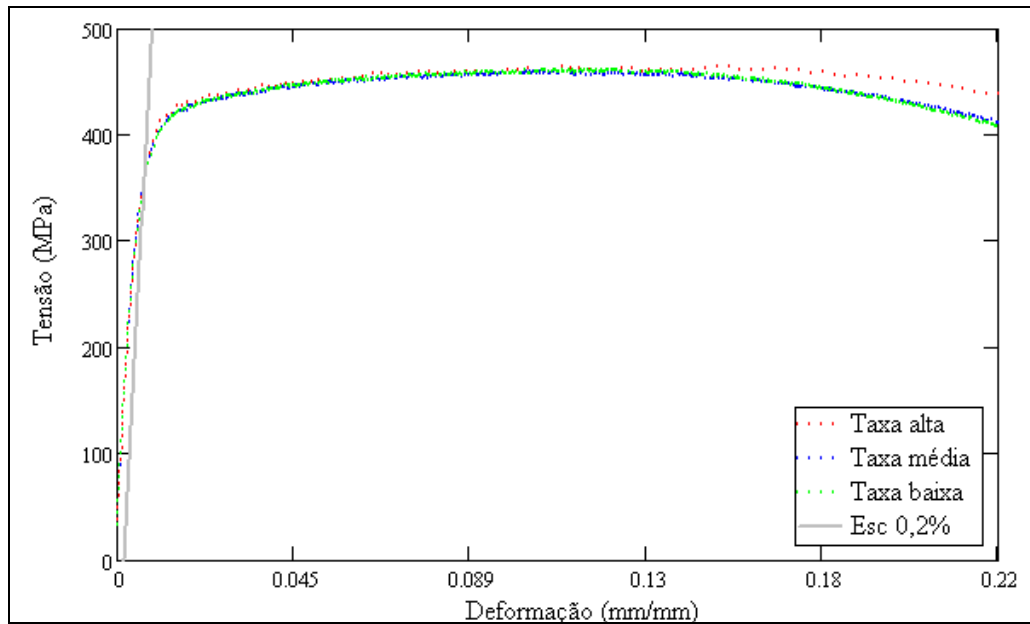


Figura 53 – Curva σ - ϵ (convencional) para o latão

Para a estratégia de controle de velocidade, obteve-se uma qualidade no ajuste dos dados de $R^2=1$, conforme Fig. 54.

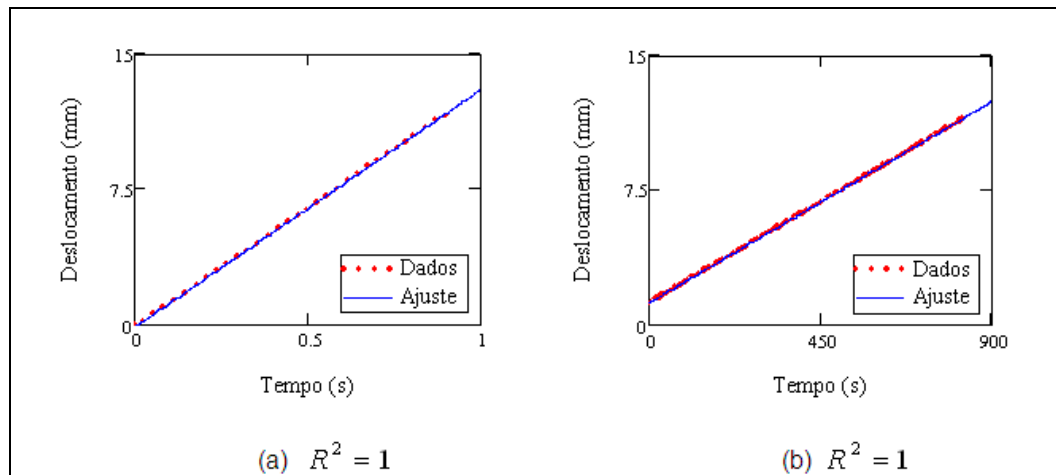


Figura 54 – Controle da velocidade de deformação para os casos: (a) velocidade alta e (b) velocidade média.

A Fig. 55 apresenta a boa concordância dos resultados, mesmo com velocidades de deformação variadas para o caso deste material.

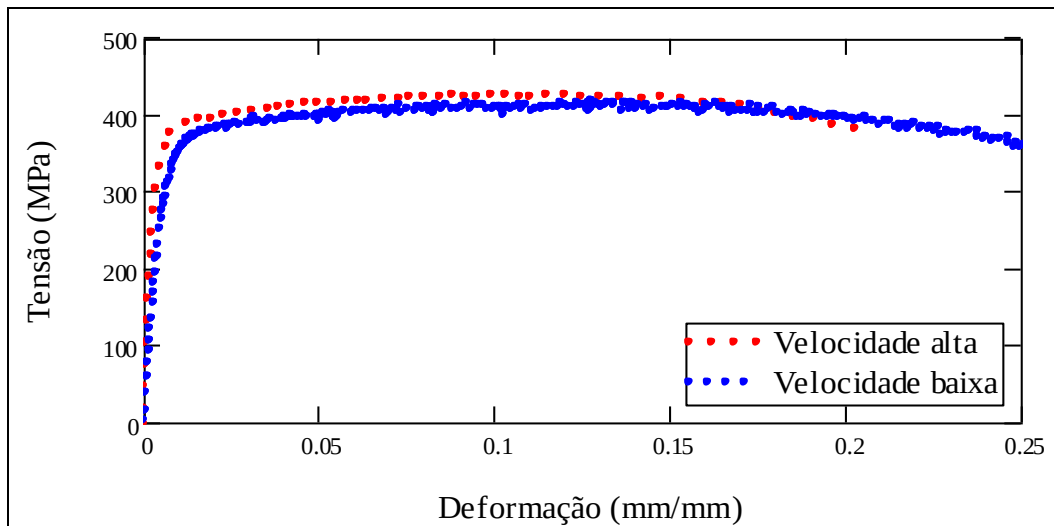


Figura 55 – Curva σ - ϵ (convencional) para o latão.

3.4

Estudo Quantitativo

3.4.1

Geometria do Corpo de Prova

Neste estudo quantitativo o material selecionado foi o aço AISI 1020 por apresentar maior sensibilidade à taxa de deformação no aumento da resistência do material, dentre os materiais em estudo e nas faixas de taxa de deformação empregadas. Foram confeccionados corpos de provas com dimensões específicas para se obter as maiores taxas de deformações em funções dos equipamentos de teste. Os CPs foram confeccionados geometricamente a partir dos critérios estabelecidos pela norma ASTM E 08-M. Segue abaixo indicado, na Fig. 56 os corpos de prova segundo a norma ASTM citada.

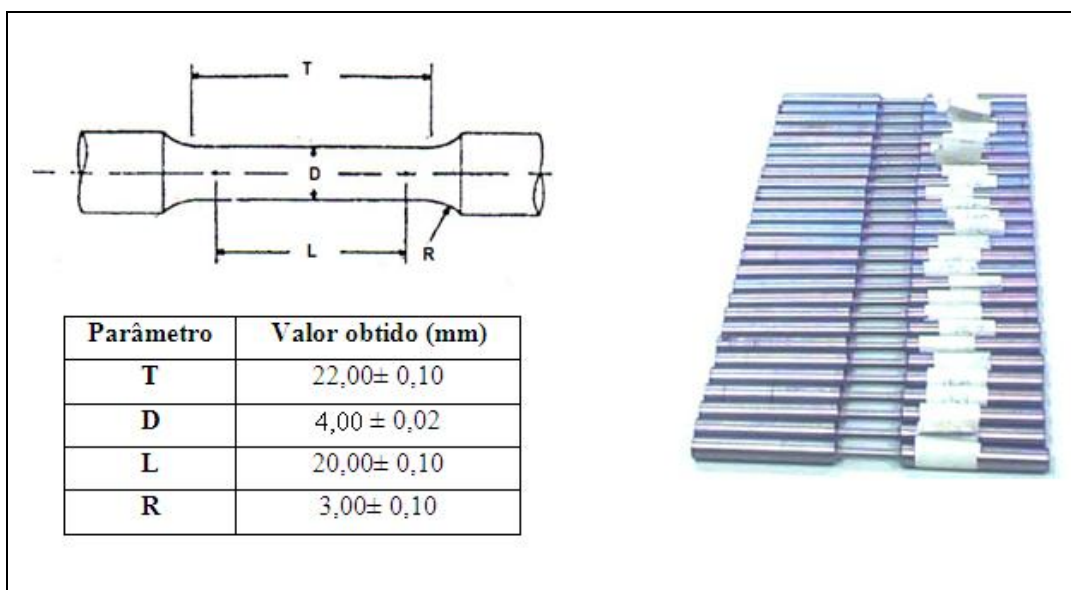


Figura 56 – Corpos de prova segundo a norma ASTM E08-M.

Especificamente nesta etapa do trabalho foram utilizados 48 CPs, sendo 4 CPs para a estratégia de controle para cada taxa de deformação, no total de 6 taxas, com um total parcial de 24 CPs. Este procedimento foi repetido para a estratégia de controle por velocidade do pistão, com um total parcial também de 24 CPs. Assim foram utilizados 48 CPs.

3.4.2

Caracterização do Material.

A análise química do aço AISI 1020, é listada na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição do aço AISI 1020 testado

C	S	Mn	Si	P
0,225	0,022	0,489	0,143	0,023

Também foi realizado o ensaio de micrografia para se determinar a microestrutura do aço em questão, conforme Fig. 57.



Figura 57 – Microestrutura de ferrita e perlita, com tamanho de grão ferrítico nº 9,0

Ressalta-se a importância desta avaliação microestrutural, pois a tensão de escoamento está associada ao tamanho do grão da amostra. A equação de Hall-Petch (54) relaciona o tamanho do grão com a resistência ao escoamento. (Fig. 58). Além desta, existem outras expressões similares a (56) na literatura.

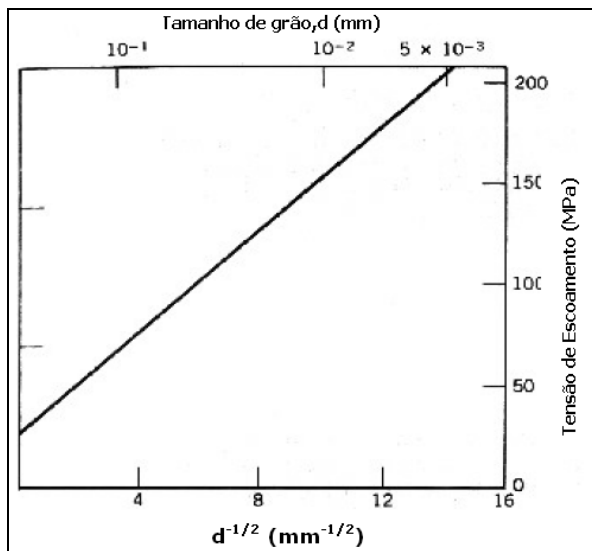


Figura 58 – Resistência ao escoamento em função do tamanho de grão

$$\sigma = \sigma_o + k.d^{-1/2} \quad (56)$$

na qual σ é a resistência ao escoamento, σ_o é a tensão de fricção resistindo ao movimento das discordâncias, k é a constante do material e d é o tamanho de grão.

3.4.3 Avaliação Estatística

Conforme descrito no Capítulo 2, foram empregadas ferramentas estatísticas para a determinação do número de corpos de prova necessários, a fim de garantir a confiabilidade desejada.

3.4.3.1 Determinação do número de corpos de prova.

A determinação do número de amostras (número de corpos de prova) deve ser feita a priori. Para isto é necessário o emprego da expressão (57) para estimar esta quantidade.

$$N = \left(\frac{Z_{\alpha/2} S}{\Omega} \right)^2 \quad (57)$$

Sendo N o número de corpos de prova necessários, $Z_{\alpha/2}$ o valor crítico que corresponde ao grau de confiança desejado, S o Desvio-padrão populacional da variável e Ω é a margem de erro.

O valor crítico adotado foi àquele correspondente ao grau de confiança de 95%. Em relação ao valor esperado do desvio-padrão proveniente da execução dos experimentos, foi adotado um valor conservativo de 10%, juntamente com a margem de erro.

3.4.4

Estratégia de Controle por Taxa de Deformação.

A estratégia de controle por taxa de deformação ($d\epsilon/dt$) consiste na medição direta sob o CP por meio de um *clip gage*. Além de serem plotados as figuras referentes da $d\epsilon/dt$, também foram mostrados os valores de V/L_0 , denominado de taxa estimada. Em todos os casos de taxa são empregadas 4 CP's idênticos a fim de garantir a validade estatística dos resultados, conforme equação (57).

3.4.4.1

Caso 1 – Taxa de 0,01%/s

Os resultados de controle da máquina de tração, para a taxa nominal de 0,01%/s estão apresentados na Fig. 59. Para $d\epsilon/dt$ tem-se o valor de 0,008917%/s enquanto para V/L_0 tem-se 0,0167%/s, o que mostra uma estimativa maior do valor da taxa do que realmente acontece.

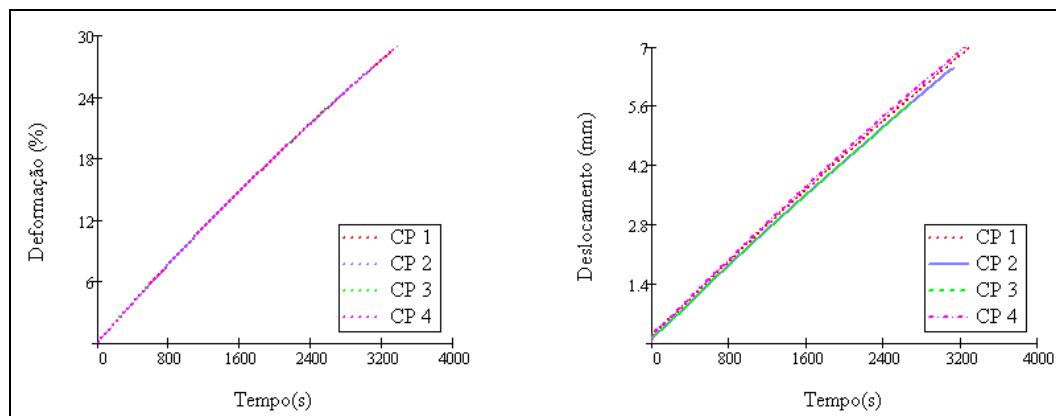


Figura 59 – Valores de obtidos de $d\epsilon/dt$ e V/L_0

3.4.4.2

Caso 2 – Taxa de 0,1%/s.

A Fig. 60 os resultados de $d\epsilon/dt = 0,0900\%/s$ e $V/L_0 = 0,1071\%/s$, com mais uma vez o valor estimado da taxa superior ao medido.

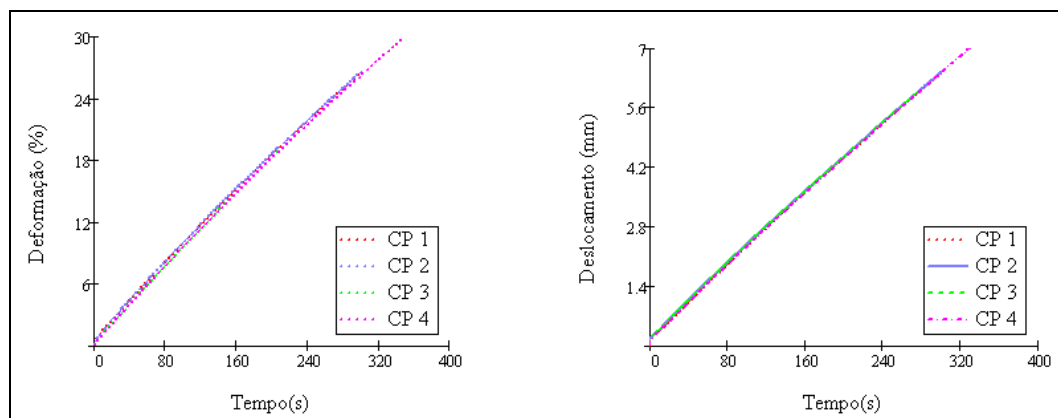


Figura 60 – Valores de obtidos de $d\epsilon/dt$ e V/L_0

3.4.4.3

Caso 3 – Taxa de 1%/s

Os valores de $d\epsilon/dt = 0,896 \text{ %/s}$ e $V/L_0 = 1,060\text{/s}$ estão apresentados na Fig. 61. O valor estimado por V/L_0 é também superior a $d\epsilon/dt$.

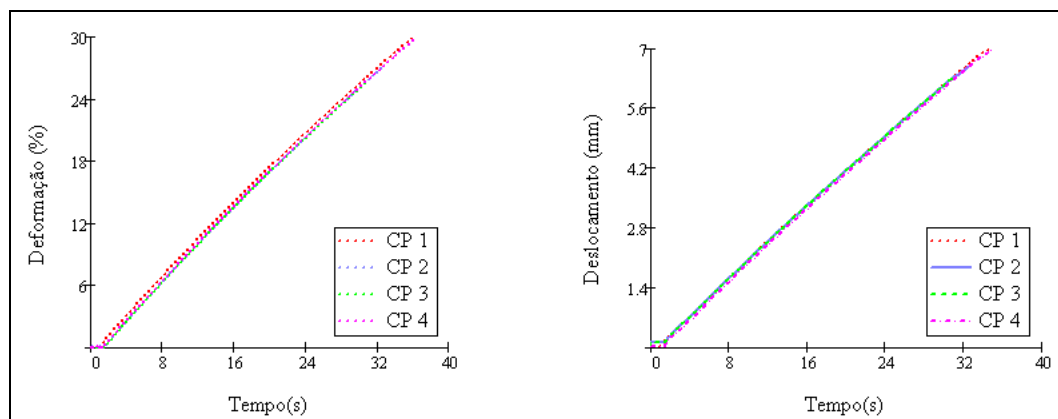


Figura 61 – Valores de obtidos de $d\epsilon/dt$ e V/L_0

3.4.4.4

Caso 4 – Taxa de 10%/s.

Na Fig. 62 são apresentados os valores de $d\epsilon/dt = 9,06\text{/s}$ e $V/L_0 = 10,83\text{/s}$. Ressalta-se que as retas são paralelas em ambos os casos, apesar de não possuírem a mesma origem, por uma pequena diferença na deformação, possuindo a mesma inclinação. Mais uma vez o valor estimado por V/L_0 se mostra superior ao medido.

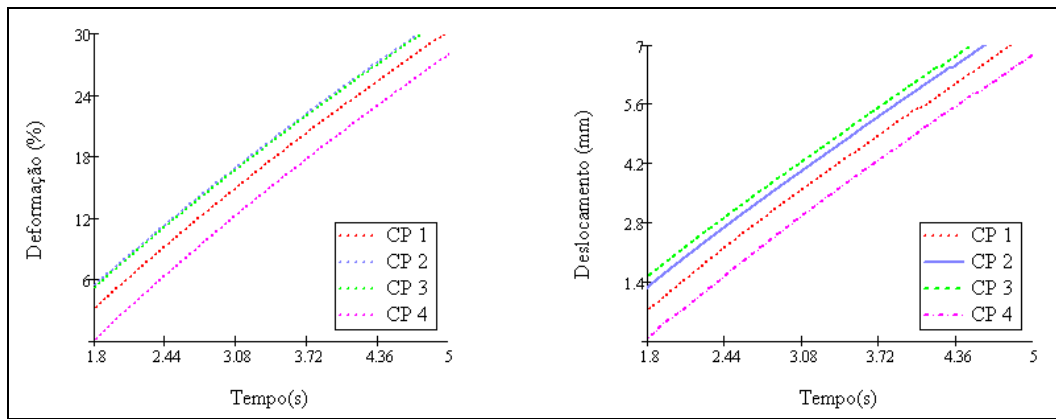


Figura 62 – Valores de obtidos de $d\epsilon/dt$ e V/L_0

3.4.4.5

Caso 5 – Taxa de 100%/s.

Os valores de $d\epsilon/dt = 93,13\%/s$ e $V/L_0 = 110,63\%/s$ são ilustrados pela Fig. 63, sendo o valor estimado superior ao valor medido de taxa de deformação.

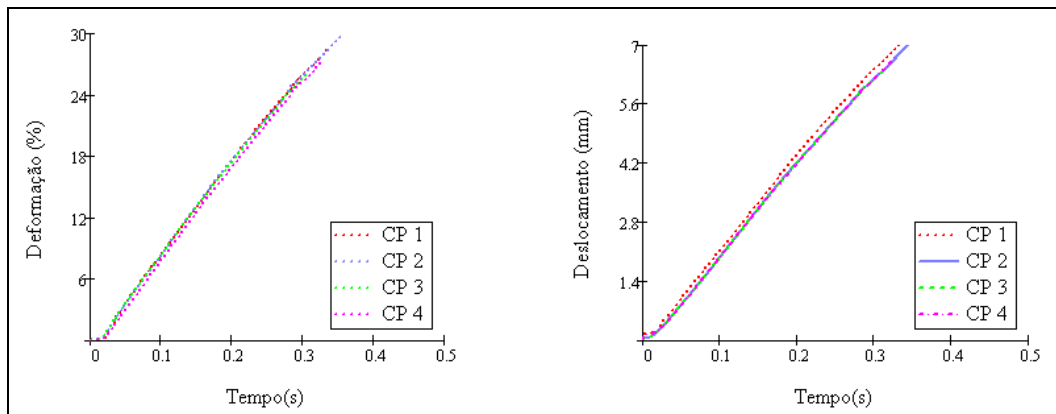


Figura 63 – Valores de obtidos de $d\epsilon/dt$ e V/L_0

3.4.4.6

Caso 6 – Taxa de 1000%/s.

Este valor de taxa de deformação encontra-se no limite operacional da máquina de teste empregada. Os valores obtidos são: $d\epsilon/dt = 513\%/s$ e $V/L_0 = 697\%/s$, sendo o valor estimado maior que o medido para determinação do valor da taxa de deformação. (Fig. 64)

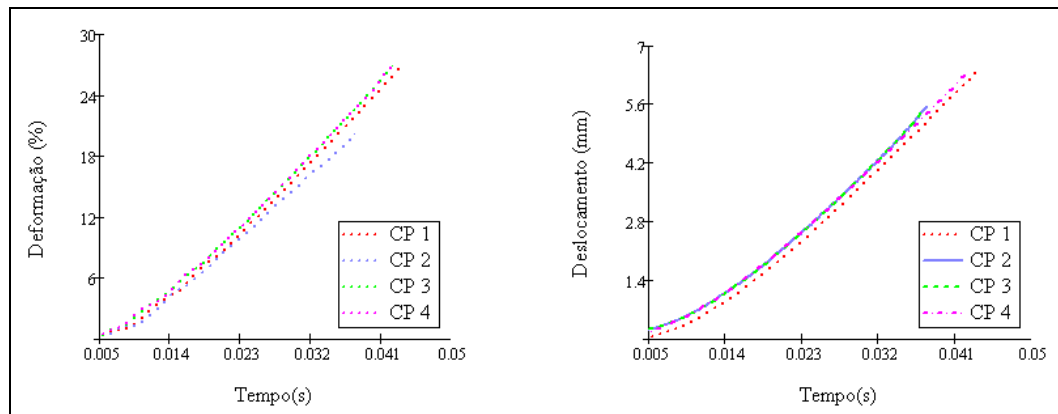


Figura 64 – Valores de obtidos de $d\epsilon/dt$ e V/L_0

3.4.4.7

Diagrama Tensão versus Deformação Real.

A curva σ - ϵ real está apresentada na Fig. 65, para o faixa de 0,01 a 1000% de taxa de deformação nominal. Observa-se claramente o aumento do valor da resistência ao escoamento e da também da resistência mecânica do CP. Em relação ao módulo de elasticidade não foram observadas alterações.

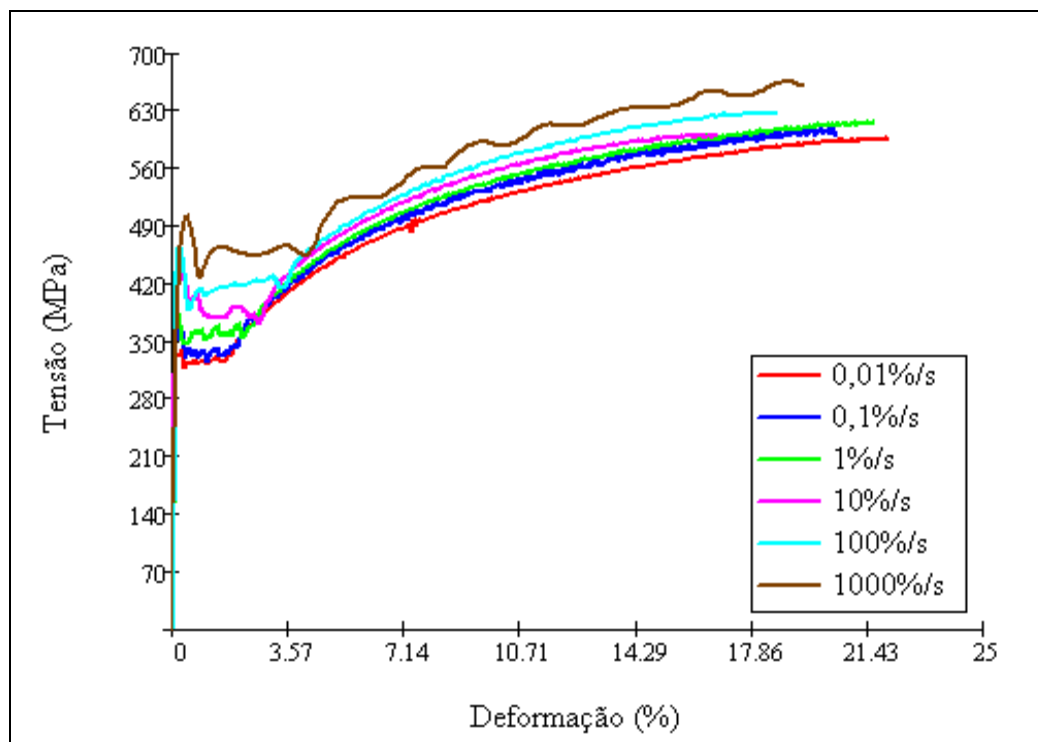


Figura 65 – Curvas σ - ϵ

3.4.5

Estratégia de Controle por Velocidade do Pistão.

Esta estratégia de controle mantém constante a velocidade do pistão durante todo ensaio, conseqüentemente a relação V/L_0 também será constante. Em todos os casos foram monitorados os valores de $d\varepsilon/dt$.

3.4.5.1

Caso 1 – Velocidade de 0,002 mm/s.

A Fig. 66 ilustra os resultados de $d\varepsilon/dt = 0,008298\%/s$ e $V/L_0 = 0,009850\%/s$. Os valores de taxa estimada V/L_0 também se mostram superiores ao valor de $d\varepsilon/dt$.

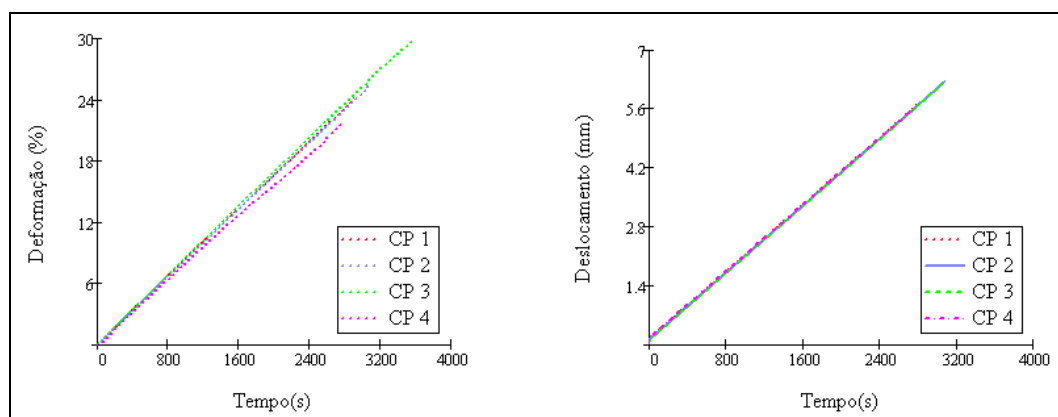


Figura 66 – Valores de obtidos de $d\varepsilon/dt$ e V/L_0

3.4.5.2

Caso 2 – Velocidade de 0,02 mm/s

Os valores de $d\varepsilon/dt = 0,0837\%/s$ e $V/L_0 = 0,0995\%/s$ estão mostrados na Fig.67. Assim mais uma vez o valor estimado é superior ao medido.

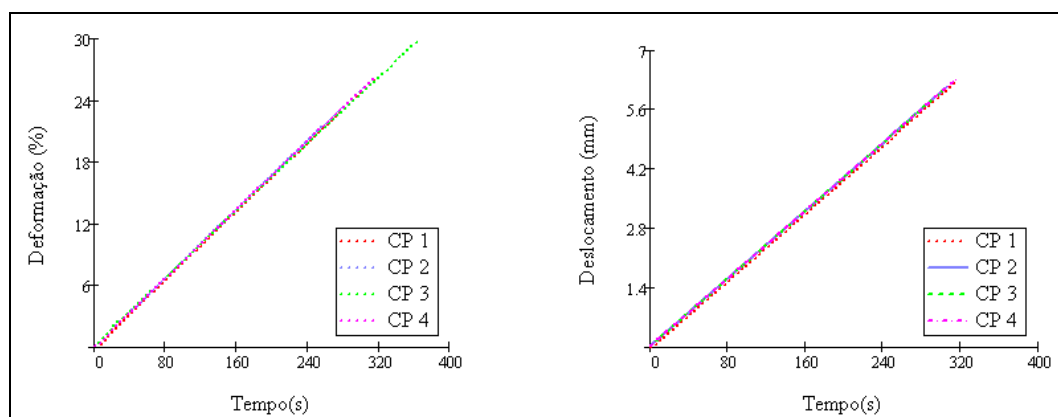


Figura 67 – Valores de obtidos de $d\varepsilon/dt$ e V/L_0

3.4.5.3

Caso 3 – Velocidade de 0,2 mm/s.

Na Fig. 68 estão apresentados os valores de $d\varepsilon/dt = 0,833\%/s$ e $V/L_0 = 0,999\%/s$. Consta-se que o valor de V/L_0 superior ao $d\varepsilon/dt$.

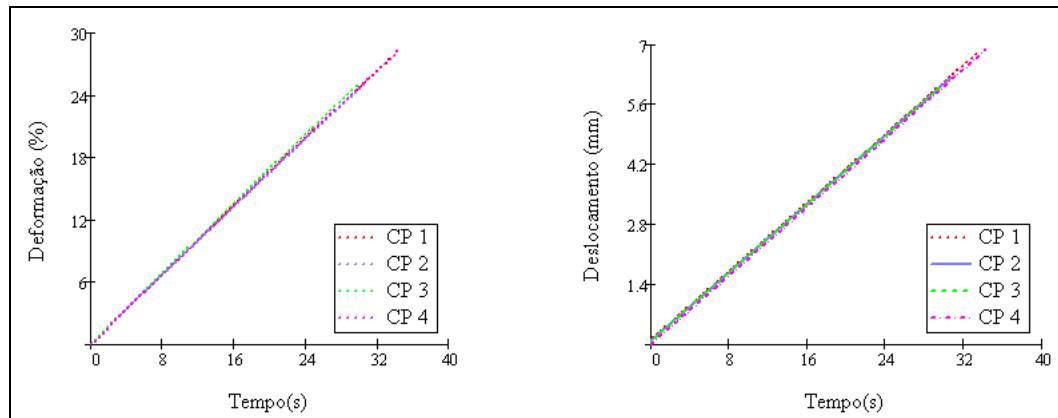


Figura 68 – Valores de obtidos de $d\varepsilon/dt$ e V/L_0

3.4.5.3

Caso 3 – Velocidade de 2 mm/s.

A Fig. 69 apresenta os valores de $d\varepsilon/dt = 8,29\%/s$ e $V/L_0 = 10,03\%/s$, sendo novamente superior o valor estimado.

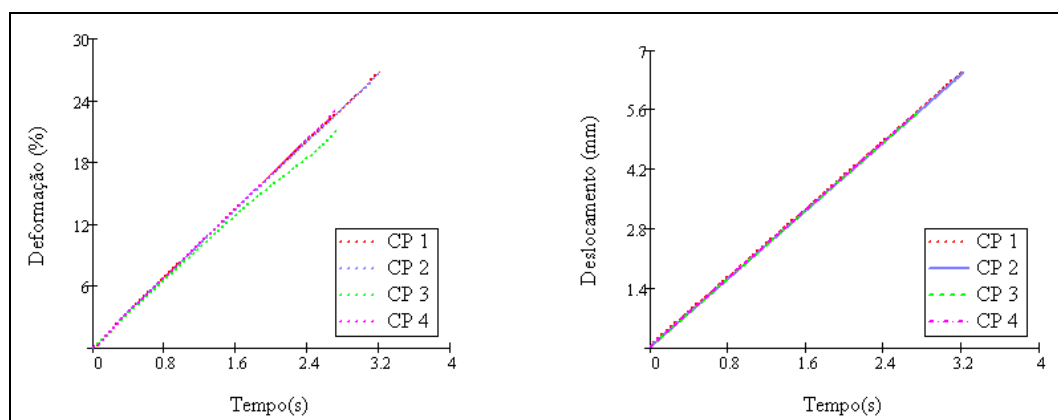


Figura 69 – Valores de obtidos de $d\varepsilon/dt$ e V/L_0

3.4.5.5

Caso 5 – Velocidade de 20 mm/s.

Os valores de $d\varepsilon/dt = 86,05\%/s$ e $V/L_0 = 102,36\%/s$ são ilustrados na Fig. 70, com os valores estimados superiores ao medido.

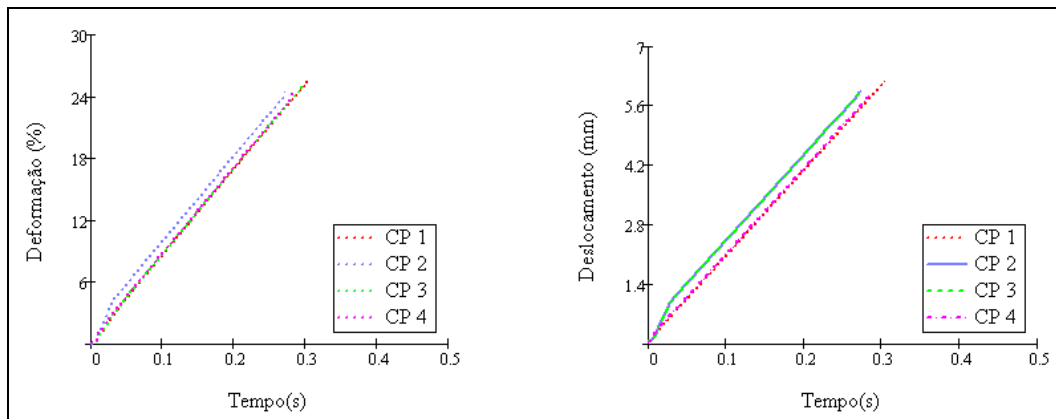


Figura 70 – Valores de obtidos de $d\epsilon/dt$ e V/L_0

3.4.5.6

Caso 6 – Velocidade de 200 mm/s.

A condição imposta neste ensaio mostra-se no limite operacional da máquina de teste. Os valores obtidos são: $d\epsilon/dt = 817\%/s$ e $V/L_0 = 997\%/s$, sendo mais uma vez os valores estimados por V/L_0 superiores a $d\epsilon/dt$. (Fig.71)

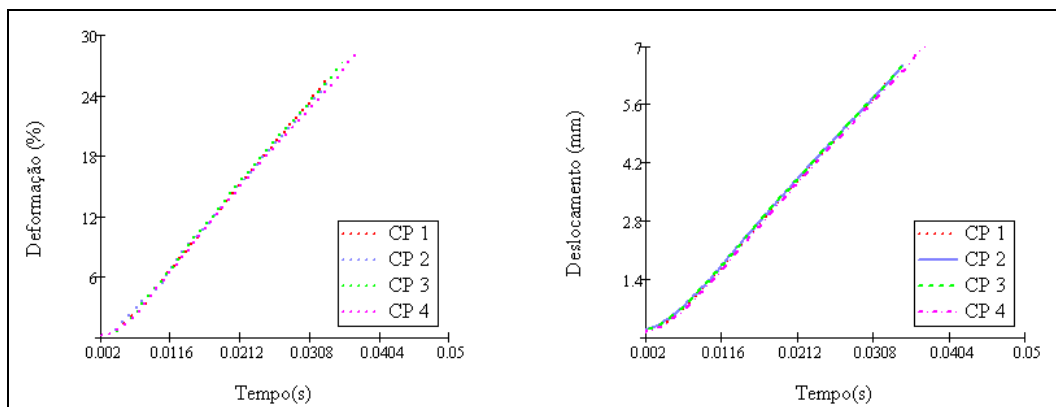


Figura 71 – Valores de obtidos de $d\epsilon/dt$ e V/L_0

3.4.5.7

Diagrama Tensão versus Deformação Real.

O diagrama σ - ϵ da Fig. 72 apresenta os resultados para a estratégia de controle por velocidade do pistão. A resistência ao escoamento e a resistência mecânica são maiores para taxas maiores.

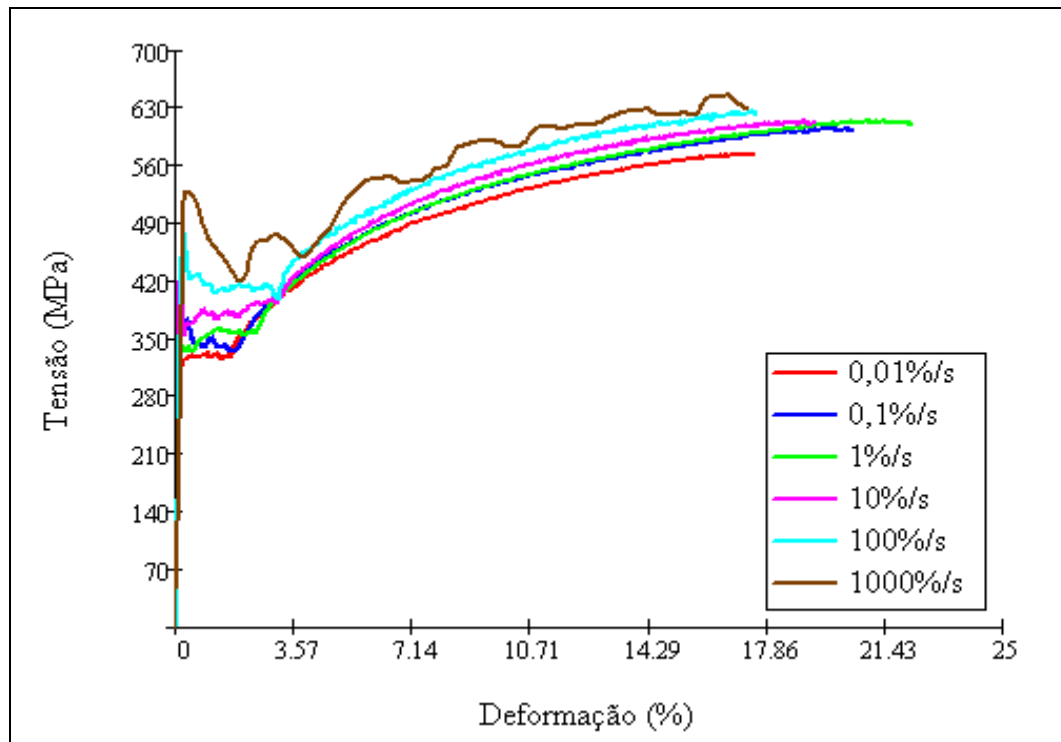


Figura 72 – Curvas σ - ϵ

As tabelas 10 a 15 mostram por taxa de deformação, os valores obtidos de:

- Taxa de deformação medida: são os valores medidos pelo *clip gage* diretamente no CP e representado por $d\epsilon/dt$.
- R^2 : coeficiente de determinação, que indica a qualidade do ajuste dos dados experimentais.
- Taxa de deformação estimada: são os valores obtidos pela equação V/L_0 .
- Erro: valor percentual expresso pela diferença dos valores das estratégias de controle, em relação ao $d\epsilon/dt$, para quantificar a diferença entre as expressões $d\epsilon/dt$ e V/L_0 .
- Resistência ao Escoamento e Resistência Mecânica: valor medido das propriedades mecânicas.
- Módulo de Elasticidade: valor que não apresentou variação.
- Deformação máxima: valor atingido de deformação medido no momento da ruptura.
- $\bar{X}, \sigma, n$: indicam respectivamente a média, desvio-padrão e número de CPs necessários, conforme descrito no Capítulo 2.

3.5

Avaliação dos Resultados dos Ensaios de Tração

Tabela 10 – Resultados para a Taxa 1 – 0,01 %/s

Estratégias de Controle	Taxa de deformação medida (%/s) - $\frac{d\varepsilon}{dt}$	R ²	Taxa de deformação estimada (%/s) - $\frac{V}{L_0}$	R ²	Erro (%)	Resistência ao escoamento (MPa)		Resistência (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima (%)
Por taxa de deformação	0,00851	0,9993	0,01037	0,9997	20,6	340	X = 328	595	X = 591	210	27,6
	0,00865	0,9994	0,01027	0,9997	18,7	325	$\sigma = 8,52$	595	$\sigma = 4,7$	210	26,2
	0,00881	0,9995	0,01072	0,9997	21,4	320	n = 2,8	585	n = 0,8	210	23,0
	0,00856	0,9992	0,01059	0,9995	22,7	330		590		210	27,4
Por velocidade do pistão	0,008314	0,9996	0,00997	0,9999	20,0	315	X = 320	550	X = 572	210	18,8
	0,008258	0,9999	0,00998	0,9999	20,8	317	$\sigma = 5,7$	575	$\sigma = 9,7$	210	23,0
	0,008408	0,9999	0,01004	0,9999	19,4	320	n = 1,2	580	n = 3,6	210	24,4
	0,007803	0,9997	0,00993	0,9999	27,7	328		577		210	25,2
Variação média e máxima (%)	-	-	-	-	21,4	2,5 / 7,9		3,4 / 8,1		-	-

Tabela 11 – Resultados para a Taxa 2 – 0,1 %/s

Estratégias de Controle	Taxa de deformação medida (%/s) - $\frac{d\varepsilon}{dt}$	R ²	Taxa de deformação estimada (%/s) - $\frac{V}{L_0}$	R ²	Erro (%)	Resistência ao escoamento (MPa)		Resistência (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima (%)
Por taxa de deformação	0,08680	0,9994	0,104630	0,9997	20,4	350	X = 338	608	X = 606	210	25,5
	0,08701	0,9993	0,103917	0,9997	19,7	340	$\sigma = 8,51$	602	$\sigma = 10,1$	210	25,5
	0,08794	0,9994	0,105956	0,9995	20,4	335	n = 2,7	595	n = 3,9	210	22,0
	0,08545	0,9992	0,103280	0,9997	21,0	330		619		210	29,2
Por velocidade do pistão	0,0835	0,9997	0,09972	0,9999	19,5	335	X = 342	600	X = 596	210	24,6
	0,0840	0,9999	0,09981	0,9999	18,1	340	$\sigma = 6,4$	600	$\sigma = 7,5$	210	25,4
	0,0816	0,9999	0,09988	0,9999	22,3	345	n = 1,5	600	n = 2,9	210	25,6
	0,0838	0,9999	0,09990	0,9999	19,1	350		585		210	27,5
Variação média e máxima (%)	-	-	-	-	20,1	1,1 / 6,0		1,6 / 5,8		-	-

Tabela 12 – Resultados para a Taxa 3 – 1 %/s

Estratégias de Controle	Taxa de deformação medida (%/s) - $\frac{d\varepsilon}{dt}$	R ²	Taxa de deformação estimada (%/s) - $\frac{V}{L_0}$	R ²	Erro (%)	Resistência ao escoamento (MPa)		Resistência (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima (%)
Por taxa de deformação	0,8512	0,9992	1,0269	0,9996	20,6	338	X = 348	612	X = 609	210	24,5
	0,8692	0,9994	1,0376	0,9996	19,3	342	$\sigma = 9,9$	612	$\sigma = 7,6$	210	25,0
	0,8746	0,9994	1,0396	0,9996	18,9	352	n = 3,7	615	n = 2,2	210	27,0
	0,8248	0,9973	0,9986	0,9980	21,1	360		598		210	28,0
Por velocidade do pistão	0,8269	0,9999	1,003	0,9999	21,3	335	X = 350	619	X = 610	210	24,0
	0,8217	0,9999	1,001	0,9999	21,8	350	$\sigma = 9,8$	612	$\sigma = 7,8$	210	24,8
	0,8418	0,9999	1,002	0,9999	19,6	355	n = 3,6	612	n = 2,3	210	26,8
	0,8281	0,9999	1,003	0,9999	21,3	365		600		210	27,4
Variação média e máxima (%)	-	-	-	-	20,4	0,5 / 7,6		0,1 / 3,5		-	-

Tabela 13 – Resultados para a Taxa 4 – 10 %/s

Estratégias de Controle	Taxa de deformação medida (%/s) - $\frac{d\varepsilon}{dt}$	R ²	Taxa de deformação estimada (%/s) - $\frac{V}{L_0}$	R ²	Erro (%)	Resistência ao escoamento (MPa)		Resistência (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima (%)
Por taxa de deformação	8,27	0,9987	10,19	0,9995	23,3	380	X = 381	600	X = 611	210	20,3
	7,44	0,9908	9,34	0,9933	25,5	375	$\sigma = 6,3$	310	$\sigma = 8,8$	210	22,0
	8,25	0,9988	10,31	0,9961	22,8	390	n = 1,5	617	n = 2,9	210	23,5
	8,25	0,9988	10,31	0,9994	22,9	380		620		210	24,3
Por velocidade do pistão	8,326	0,9999	10,02	0,9999	20,3	368	X = 377	610	X = 601	210	19,8
	8,309	0,9999	10,01	0,9999	20,5	380	$\sigma = 10,1$	610	$\sigma = 9,9$	210	21,0
	7,669	0,9993	10,02	0,9993	30,7	390	n = 3,9	597	n = 3,7	210	24,6
	8,466	0,9996	10,03	0,9999	18,8	370		590		210	24,6
Variação média e máxima (%)	-	-	-	-	23,1	1,0 / 5,9		1,6 / 3,8		-	-

Tabela 14– Resultados para a Taxa 5 – 100 %/s

Estratégias de Controle	Taxa de deformação medida (%/s) - $\frac{d\varepsilon}{dt}$	R ²	Taxa de deformação estimada (%/s) - $\frac{V}{L_0}$	R ²	Erro (%)	Resistência ao escoamento (MPa)		Resistência (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima (%)
Por taxa de deformação	88,90	0,9989	108,0	0,9992	21,3	405	X = 413	632	X = 623	210	21,7
	85,89	0,9985	104,1	0,9993	21,2	412	$\sigma = 6,7$	626	$\sigma = 7,0$	210	22,5
	89,65	0,9994	106,7	0,9995	19,0	418	n = 1,7	620	n = 1,8	210	22,3
	88,92	0,9993	106,9	0,9994	20,8	420		616		210	23,4
Por velocidade do pistão	84,20	0,9999	100,7	0,9999	19,5	390	X = 421	627	X = 623	210	22,8
	85,80	0,9982	103,6	0,9999	20,6	420	$\sigma = 9,9$	620	$\sigma = 3,5$	210	23,0
	84,40	0,9998	100,9	0,9999	19,4	410	n = 3,7	625	n = 0,4	210	24,0
	84,30	0,9948	100,9	0,9999	19,6	420		620		210	24,2
Variação média e máxima (%)	-	-	-	20,1	-	1,9 / 7,6		0 / 1,9		-	-

Tabela 15– Resultados para a Taxa 6 – 1000 %/s

Estratégias de Controle	Taxa de deformação medida (%/s) - $\frac{d\varepsilon}{dt}$	R ²	Taxa de deformação estimada (%/s) - $\frac{V}{L_0}$	R ²	Erro (%)	Resistência ao escoamento (MPa)		Resistência (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima (%)
Por taxa de deformação	677,6	0,9912	805,6	0,9889	18,8	445	X = 448	640	X = 652	210	26,0
	587,6	0,9877	751,2	0,9836	28,5	437	$\sigma = 9,2$	650	$\sigma = 9,0$	210	25,0
	676,3	0,9909	807,9	0,9895	19,4	460	n = 3,5	655	n = 3,1	210	24,8
	675,4	0,9907	790,8	0,9888	17,1	450		660		210	18,6
Por velocidade do pistão	839,2	0,9971	1006,1	0,9972	20,0	425	X = 442	660	X = 658	210	23,0
	828,3	0,9979	1004,8	0,9976	21,3	435	$\sigma = 10,1$	665	$\sigma = 6,2$	210	24,5
	839,9	0,9978	1003,4	0,9974	19,4	450	n = 3,9	650	n = 1,4	210	25,5
	821,0	0,9979	1004,1	0,9978	22,2	460		660		210	25,8
Variação média e máxima (%)	-	-	-	-	20,8	1,3 / 8,2		0,9 / 3,9		-	-

A Fig. 73 ilustra a correlação entre $d\varepsilon/dt$ e V/L_o para as condições de teste realizados, destacando-se: garras empregadas, materiais da máquina de teste e do CP, conforme mencionado no Capítulo 2.

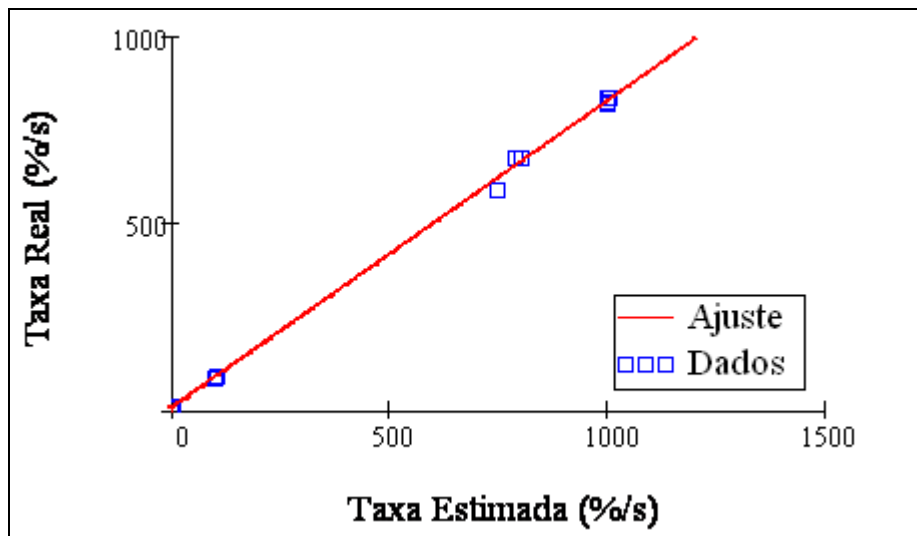


Figura 73 – Correlação entre $d\varepsilon/dt$ e V/L_o

A equação (58) apresenta uma forma de correção dos valores estimados por V/L_o e os valores de $d\varepsilon/dt$.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = 0,829 \left(\frac{V}{L_o} \right) - 7,502 \cdot 10^{-3} \quad (58)$$

$$R^2 = 0,9997$$

Reforça a idéia mais uma vez, que a expressão (58) não deve ser empregada para corrigir de modo geral as tabelas de propriedades de mecânicas, sendo válido, contudo para a máquina de ensaio empregada, garras e o CP.

Além disto, o procedimento estatístico para determinação do número de corpos de prova, relacionado a confiabilidade exigida, combinado com outra ferramenta que foi o teste de hipótese permitiu concluir que mesmo havendo diferenças numéricas e de procedimento entre as estratégias os resultados se mostram estatisticamente equivalente, ou seja, independentemente da escolha da estratégia de controle adotada, os resultados de propriedades mecânicas podem ser empregadas indistintamente.

Foram empregados um total de 48 CPs, sendo 24 para cada estratégia de controle do ensaio, com 4 CPs para cada taxa de deformação, conforme previsto no capítulo 2 e pelas tabelas 10 a 15. Assim, tem-se para o caso da propriedade mecânica resistência ao escoamento (RE): $\bar{S}_1 = \sum S_1 / N_1 = 7,52$ e $\bar{S}_2 = \sum S_2 / N_2 = 8,33$. Pela equação (49): $S(ER) = \{[(4-1) \cdot (7,52)^2 + (4-1) \cdot (8,33)^2] / (4+4-2)\}^{0,5} = 7,93$. Assim por (48): $t_{cal}(RE) = 4,33 / (7,93 / \sqrt{(1/4) + (1/4)}) = 0,772$.

De modo análogo tem-se, conforme previsto no capítulo 2 e pelas tabelas 10 a 15, para a resistência a tração (RT): $\bar{S}_1 = \sum S_1 / N_1 = 7,47$ e $\bar{S}_2 = \sum S_2 / N_2 = 7,11$ e assim $S(RT) = \{[(4-1) \cdot (7,83)^2 + (4-1) \cdot (7,11)^2] / (4+4-2)\}^{0,5} = 7,47$. Assim por (48): $t_{cal}(RT) = 7,66 / (7,47 / \sqrt{(1/4) + (1/4)}) = 1,449$.

Empregando o teste de hipótese descrito no capítulo 2, tem-se $t_{tab} = 2,224$, isto é, para $GL = 4+4-2 = 6$ e grau de confiança de 95%. Portanto como $t_{cal} < t_{tab}$ o resultados das propriedades mecânicas obtidas por diferentes estratégias de controle mostram-se equivalentes do ponto de vista estatístico.

Ressalta-se mais uma vez que as propriedades mecânicas obtidas por diferentes estratégias de controle se mostravam iguais, contudo sem uma comprovação, seja experimental ou numérica. Contudo para outras faixas de taxas de deformação e tipos de materiais torna-se necessário utilizar o procedimento executado neste trabalho.