

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

PARÂMETROS MECÂNICOS NO ENFARDAMENTO
DO PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Evaldo Luiz Palermo

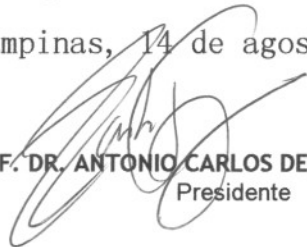
Campinas – São Paulo

Agosto / 98

PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado defendida por **EVALDO LUIZ PALERMO**, aprovada pela Comissão Julgadora em 27 de agosto de 1998.

Campinas, 14 de agosto de 2006.



PROF. DR. ANTONIO CARLOS DE OLIVEIRA FERRAZ
Presidente

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

PARÂMETROS MECÂNICOS NO ENFARDAMENTO
DO PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Dissertação apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Eng. Agrícola, Feagri, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Eng. Agrícola.

Evaldo Luiz Palermo

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de O. Ferraz

Campinas – São Paulo

Agosto / 98

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

P174p Palermo, Evaldo Luiz
Parâmetros mecânicos no enfardamento do palhiço da
cana-de-açúcar / Evaldo Luiz Palermo. --Campinas, SP:
[s.n.], 1998.

Orientador: Antonio Carlos de Oliveira Ferraz.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Energia da
biomassa. 3. Agricultura e energia. 4. Pressão. 5.
Recursos naturais renováveis. 6. Produtos agrícolas –
Transporte. I. Feraz, Antonio Carlos de Oliveira. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Mechanical parameters in bailing sugar cane straw

Palavras-chave em Inglês: Alternate energy sources, Biomass energy,
Agriculture and energy, Pressure, Resources,
renewable natural, Farm produce - Transportation

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Tomaz Caetano Cannavam Ripoli, Inácio Maria Dal
Fabbro.

Data da defesa: 27/08/1998.

Aos meus pais Roberto e Ignês

À minha noiva Cristiane

Aos meus irmãos Mauro e Helder

Aos meus amigos

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Antonio Carlos de O. Ferraz pela orientação, apoio e amizade no decorrer deste trabalho.

Aos membros do Comitê de Orientação Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro e Prof. Dr. Oscar A. Braunbeck pelas sugestões prestadas no desenvolvimento da tese.

Ao Prof. Dr. Néelson Luis Cappelli e ao Eng^o. Cláudio K. Umezu pelo integral apoio no desenvolvimento da instrumentação utilizada na tese.

Aos membros do Dep. de Máquinas Agrícolas da FEAGRI, pelo apoio e amizade.

Ao CNPQ pela concessão da bolsa de estudos no período de realização da tese.

À empresa Nogueira pelo empréstimo da enfardadora AP 41N utilizada no experimento.

À Faculdade de Eng. Mecânica da Unicamp, pela permissão de utilizar a máquina de ensaios MTS.

Ao Centro de Tecnologia da Unicamp pelo empréstimo do dispositivo multiplicador de força que permitiu a calibração da biela.

Resumo

O palhiço da cana-de-açúcar, em função da sua produção em grande escala, e a atual situação energética do Brasil, tem sido considerada como uma importante fonte alternativa para minimizar a crise energética. Todavia se conhece pouco das suas propriedades mecânicas e dos parâmetros de enfardamento os quais podem melhorar a eficiência das operações de manuseio da palha.

O trabalho foi elaborado com a finalidade de estudar o comportamento mecânico do palhiço da cana-de-açúcar em ensaios de compressão e relaxação, realizados em laboratório com a máquina de ensaio MTS empregando taxas de deformação de 10 mm/s, 20 mm/s, 30 mm/s, 40 mm/s e 43 mm/s. E, em campo, através da utilização da enfardadora prismática Nogueira AP 41N, devidamente instrumentada para registrar o sinal da força atuante na biela e a rotação da manivela de acionamento.

A partir dos ensaios de compressão foram analisadas as curvas pressão versus densidade aparente, bem como uma avaliação do consumo energético e análise das curvas de relaxação em função das condições de ensaio adotadas.

No ensaio com a enfardadora foi determinada a força axial média atuante na biela de 800 kgf, obtendo fardos com densidade média de 250 kg/m³.

O grau de umidade apresentou influência na relação pressão x densidade, bem como na energia específica necessária para compactar as amostras. O aumento do grau de umidade diminui a pressão necessária para acondicionar o palhiço no interior do cilindro de compactação e, em consequência, diminui a energia específica consumida para compactar o material.

Sumário

	página
Resumo.....	v
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas.....	xii
1 Introdução.....	1
2 Objetivos.....	3
3 Revisão Bibliográfica.....	4
3.1 Caracterização do comportamento mecânico do palhiço.....	4
3.2 Parâmetros que influenciam no adensamento do palhiço.....	8
3.2.1 Grau de umidade do material.....	9
3.2.2 Pressão aplicada.....	13
3.2.3 Tempo de retenção da carga aplicada.....	16
3.2.4 Velocidade de aplicação da carga (taxa de deformação).....	17
4 Material e Métodos.....	19
4.1 Características do Palhiço.....	19
4.2 Material de laboratório utilizado nos ensaios de compressão e relaxação.....	19
4.3 Preparo de palhiço os ensaios de compressão e relaxação.....	20
4.3.1 Picagem.....	20
4.3.2 Umidificação do Palhiço.....	20
4.4 Características do Cilindro e Êmbolo.....	21
4.5 Ensaio de compressão e relaxação.....	22
4.5.1 Ensaio de compressão.....	23
4.5.2 Relaxação.....	25

4.6 Material utilizado no ensaio com a enfardadora.....	25
4.7 Ensaio com a enfardadora.....	26
5 Resultados e Discussão.....	29
5.1 Umidificação do palhiço da cana-de-açúcar.....	29
5.2 Estudo da relação pressão aplicada x densidade aparente.....	29
5.3 Análise da energia específica no ensaio de compressão.....	48
5.4 Análise das curvas de relaxação.....	55
5.5 Resultado do ensaio com a enfardadora.....	73
5.5.1 Determinação da Curva de Calibração da Biela.....	73
5.5.2 Determinação da densidade média dos Fardos.....	73
6 Conclusões.....	76
7 Recomendações Para Trabalhos Futuros.....	78
8 Referências Bibliográficas.....	79
9 Anexos.....	82
10 Abstract.....	103

Lista de Figuras

	página
Figura 1. Modelo de Maxwell: associação da mola e amortecedor em série.....	5
Figura 2. Fluido de Maxwell submetido a um <i>creep test</i>	6
Figura 3. Modelo de Kelvin: associação da mola e amortecedor, em paralelo.....	6
Figura 4. Sólido de Kelvin submetido a um <i>creep test</i>	7
Figura 5. Modelo generalizado de Maxwell.....	8
Figura 6. Efeito do grau de umidade na densidade e durabilidade dos minifardos...	9
Figura 7. Efeito do grau de umidade na densidade dos fardos para as pressões: 1 - 150 Mpa; 2 - 50 Mpa e 3 - 10 Mpa.....	10
Figura 8. Efeito do grau de umidade na durabilidade dos fardos de palha de trigo.....	11
Figura 9. Variação da tensão de relaxação da alfafa para dois graus de umidade.....	12
Figura 10. Efeito do gradiente de pressão aplicado na densidade e durabilidade de minifardos de feno.....	13
Figura 11. Efeito do tempo de retenção da carga aplicada na densidade e na durabilidade dos minifardos de feno.....	16
Figura 12. Efeito da taxa de deformação na densidade e durabilidade dos minifardos de feno.....	18
Figura 13. Palhiço de cana-de-açúcar acondicionada no interior do cilindro.....	22
Figura 14. Máquina Universal de ensaios MTS.....	23
Figura 15. Êmbolo com superfície superior alinhada com o cilindro.....	24
Figura 16. Enfardadora Nogueira AP 41N utilizada no ensaio.....	26

Figura 17. Detalhe da instalação do sensor de rotação no chassi.....	27
Figura 18. Curvas Pressão x Densidade para taxa de deformação de 10 mm/s....	36
Figura 19. Curvas Pressão x Densidade para taxa de deformação de 20 mm/s....	37
Figura 20. Curvas Pressão x Densidade para taxa de deformação de 30 mm/s....	38
Figura 21. Curvas Pressão x Densidade para taxa de deformação de 40 mm/s....	39
Figura 22. Curvas Pressão x Densidade para taxa de deformação de 43 mm/s....	40
Figura 23. Curvas Pressão x Densidade para grau de umidade 5,66%.....	41
Figura 24. Curvas Pressão x Densidade para grau de umidade 10,37%.....	42
Figura 25. Curvas Pressão x Densidade para grau de umidade 26,50%.....	43
Figura 26. Curvas Pressão x Densidade para grau de umidade 57,40%.....	44
Figura 27. Influência do Grau de Umidade no Coeficiente a	46
Figura 28. Influência do Grau de Umidade no Coeficiente b	47
Figura 29. Variação da Energia Específica em função do Grau de Umidade (%)..	54
Figura 30. Curvas de Relaxação para taxa de deformação 10 mm/s.....	57
Figura 31. Curvas de Relaxação para taxa de deformação 20 mm/s.....	58
Figura 32. Curvas de Relaxação para taxa de deformação 30 mm/s.....	59
Figura 33. Curvas de Relaxação para taxa de deformação 40 mm/s.....	60
Figura 34. Curvas de Relaxação para taxa de deformação 43 mm/s.....	61
Figura 35. Curvas de Relaxação para grau de umidade 5,66%.....	62
Figura 36. Curvas de Relaxação para grau de umidade 10,37%.....	63
Figura 37. Curvas de Relaxação para grau de umidade 26,50%.....	64
Figura 38. Curvas de Relaxação para grau de umidade 57,40%.....	65
Figura 39. Variação do Coeficiente b no Ensaio de Relaxação.....	72
Figura 40. Variação da Força Atuante na Biela da Enfardadora.....	75

Figura 41. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 10 mm/s e grau de umidade 5,66%.....	83
Figura 42. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 10 mm/s e grau de umidade 10,37%.....	84
Figura 43. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 10 mm/s e grau de umidade 26,50%.....	85
Figura 44. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 10 mm/s e grau de umidade 57,40%.....	86
Figura 45. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 20 mm/s e grau de umidade 5,66%.....	87
Figura 46. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 20 mm/s e grau de umidade 10,37%.....	88
Figura 47. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 20 mm/s e grau de umidade 26,50%.....	89
Figura 48. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 20 mm/s e grau de umidade 57,40%.....	90
Figura 49. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 30 mm/s e grau de umidade 5,66%.....	91
Figura 50. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 30 mm/s e grau de umidade 10,37%.....	92
Figura 51. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 30 mm/s e grau de umidade 26,50%.....	93
Figura 52. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 30 mm/s e grau de umidade 57,40%.....	94

Figura 53. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 40 mm/s e grau de umidade 5,66%.....	95
Figura 54. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 40 mm/s e grau de umidade 10,37%.....	96
Figura 55. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 40 mm/s e grau de umidade 26,50%.....	97
Figura 56. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 40 mm/s e grau de umidade 57,40%.....	98
Figura 57. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 43 mm/s e grau de umidade 5,66%.....	99
Figura 58. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 43 mm/s e grau de umidade 10,37%.....	100
Figura 59. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 43 mm/s e grau de umidade 26,50%.....	101
Figura 60. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 43 mm/s e grau de umidade 57,40%.....	102

Lista de Tabelas

página

Tabela 1. Valor médio de teor de umidade (base seca) para as parcelas de palhiço de cana-de-açúcar.....	29
Tabela 2. Valores do Ajuste para a Curva Pressão x Densidade para taxa de deformação de 10 mm/s.....	30
Tabela 3. Valores do Ajuste para a Curva Pressão x Densidade para taxa de deformação de 20 mm/s.....	31
Tabela 4. Valores do Ajuste para a Curva Pressão x Densidade para taxa de deformação de 30 mm/s.....	32
Tabela 5. Valores do Ajuste para a Curva Pressão x Densidade para taxa de deformação de 40 mm/s.....	33
Tabela 6. Valores do Ajuste para a Curva Pressão x Densidade para taxa de deformação de 43 mm/s.....	34
Tabela 7. Energia específica utilizada no ensaio de compressão para taxa de deformação de 10 mm/s.....	49
Tabela 8. Energia específica utilizada no ensaio de compressão para taxa de deformação de 20 mm/s.....	50
Tabela 9. Energia específica utilizada no ensaio de compressão para taxa de deformação de 30 mm/s.....	51
Tabela 10. Energia específica utilizada no ensaio de compressão para taxa de deformação de 40 mm/s.....	52
Tabela 11. Energia específica utilizada no ensaio de compressão para taxa de deformação de 43 mm/s.....	53

Tabela 12. Valores do ajuste para os coeficientes a e b no ensaio de relaxação para taxa de deformação de 10 mm/s.....	67
Tabela 13. Valores do ajuste para os coeficientes a e b no ensaio de relaxação para taxa de deformação de 20 mm/s.....	68
Tabela 14. Valores do ajuste para os coeficientes a e b no ensaio de relaxação para taxa de deformação de 30 mm/s.....	69
Tabela 15. Valores do ajuste para os coeficientes a e b no ensaio de relaxação para taxa de deformação de 40 mm/s.....	70
Tabela 16. Valores do ajuste para os coeficientes a e b no ensaio de relaxação para taxa de deformação de 43 mm/s.....	71
Tabela 17. Determinação das densidades médias dos fardos.....	73

1 Introdução

A atual situação energética pela qual o país atravessa e os constantes riscos de blackout têm promovido a elaboração de estudos científicos voltados à questão energética. Dentre as possíveis formas de atacar o problema pode-se destacar: a redução do consumo energético, o aumento da capacidade de geração, o aumento da eficiência no transporte de energia ou mesmo a utilização de fontes alternativas de energia, dentre as quais a queima de resíduos agrícolas.

Molina Junior et al (1991) considera o palhiço da cana-de-açúcar um resíduo agrícola com grande potencialidade na geração de energia, no Brasil há uma produção estimada de 75 milhões de toneladas que fica depositada no campo após a colheita.

Contudo, o aproveitamento do palhiço em grande escala envolve uma série de operações agrícolas constituídas das seguintes etapas: recolhimento, enfardamento, transporte, estocagem, homogeneização e queima.

Por outro lado, a agricultura nacional atravessa, nos dias atuais, um dos momentos mais críticos de sua história.

Seja pela situação econômica que o país atravessa, pela concorrência externa, ela, até por uma questão de sobrevivência, está sendo obrigada a se adequar à realidade econômica presente.

A questão fundamental, no momento, é à busca de maior rentabilidade econômica implicando numa reavaliação completa de todo o processo produtivo, bem como, nos possíveis meios de se equacionar a questão. A aplicação de recursos tecnológicos é, sem dúvida, o meio mais eficaz na busca dessa rentabilidade.

Fundamentado na redução dos custos de produção, o setor sucro-alcooleiro é hoje uma das áreas da agricultura brasileira que tem se preocupado na aplicação de

tecnologia no seu processo de produção. Um bom exemplo disso é o aumento considerável das áreas colhidas da cana-de-açúcar através de máquinas colhedoras.

Não só por fatores econômicos, mas também por exigência legal, as usinas se vêem obrigadas a aumentar suas respectivas áreas de colheita mecanizada, no intuito de minimizar as áreas que realizam a colheita com uma prévia queima.

A colheita mecanizada da cana crua, além de reduzir o desperdício energético no processo da queima, a emissão de monóxido de carbono na atmosfera, e o consumo de oxigênio possui ainda a vantagem de oferecer uma cobertura vegetal da área colhida, promovendo, assim, maior retenção da água no solo, minimizando a compactação provocada pelo tráfego de veículos sobre a área colhida. Deve-se destacar, também, que o excesso de cobertura vegetal seca proporciona um aumento no risco de incêndio acidental ou não, no campo.

Uma importante alternativa para solucionar os problemas mencionados é o acondicionamento do palhiço em fardos, de parte dessa cobertura vegetal, tendo com finalidade principal sua utilização como combustível ou mesmo como alimento animal.

Molina Junior et al (1991) menciona que a vantagem do acondicionamento em fardos está na redução do volume do material, promovendo assim uma redução dos custos de transporte e armazenamento do material.

Em virtude da necessidade de se trabalhar com este resíduo ser recente, não há no mercado máquinas acondicionadoras, isto é, enfardadoras que atendam os requisitos de produção e eficiência, e que leve em consideração as propriedades físicas do palhiço de cana-de-açúcar.

Há, portanto, a necessidade de se estudar esse resíduo determinando a influência dos principais parâmetros no processo de conformação desse material viscoelástico, estabelecendo, então, parâmetros de projeto de uma enfardadora.

Assim sendo, espera-se que o presente trabalho contribua, efetivamente, para que o palhiço de cana-de-açúcar torne-se uma importante alternativa energética economicamente viável, através da queima direta para a geração de vapor.

2 Objetivos

Os objetivos gerais do presente trabalho foram:

Determinar as relações entre as pressões e a densidade aparente na compressão do palhiço, bem como estabelecer os possíveis níveis de adensamento, levando-se em consideração a energia consumida no processo de compressão.

Por sua vez, objetivos específicos foram:

- Determinar no processo de compressão a influência dos parâmetros:
 - Grau de umidade do material;
 - Variação da taxa de deformação;
- Obter curvas de relaxação do palhiço para os ensaios realizados em laboratório em função dos parâmetros avaliados.
- Determinação de um modelo (ajuste de curvas) que relacione a pressão aplicada com a densidade aparente material “in natura”, para o material acondicionado no cilindro de compressão.
- Medir a força aplicada na biela do mecanismo de compressão de uma enfardadora comercial de fardos prismáticos.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Caracterização do comportamento mecânico do palhiço

Molina Jr. (1991) caracteriza o palhiço compondo-se de palha, folhas verdes, ponteiros e colmos, com predominância em massa de colmos.

De acordo com Mohsenin (1970) os tecidos vegetais, quando submetidos a uma carga, apresentam, além da relação tensão-deformação, uma característica viscosa, ou seja, a questão tempo de aplicação de carga passa a ser um fator importante no processo.

Mase (1970) menciona que os materiais elásticos diferem dos viscoelásticos nas características de deformação. Um material elástico apresenta uma deformação dependente apenas da carga aplicada, neles a tensão (σ) é dada por:

$$\sigma_{ij} = f(E, \nu, K, G, \varepsilon_{ij}) \quad (1)$$

onde:

σ_{ij} = Tensor de tensões;

E = Módulo de elasticidade longitudinal (Módulo de Young);

ν = Módulo de Poison;

K = Módulo de compressão (“Bulk”);

G = Módulo de elasticidade Transversal (“Shear”);

ε_{ij} = Tensor de deformação específica.

Deve-se destacar que, para a aplicação da teoria mecânica dos meios contínuos, considera-se um material ideal, ou seja: uniforme, homogêneo e isotrópico.

Mase (1970), Flügge (1975) e Christiansen (1982) mencionam que os materiais viscoelásticos além de variarem com a carga aplicada, também dependem da taxa de aplicação dessa carga. Em consequência, estes materiais não mais terão constantes, e sim funções viscoelásticas, lineares ou não, dependentes do tempo: $E(t)$, $\nu(t)$, $K(t)$ e $G(t)$.

Uma das maneiras se de analisar o relacionamento viscoelástico dos materiais é através da utilização dos modelos analógicos existentes. Tais modelos são representados pela associação de molas (elementos elásticos) e amortecedores (elementos viscosos) e tem como objetivo comparar o comportamento mecânico do material com um modelo que melhor se ajuste.

Os dois principais modelos analógicos são o de Maxwell e Kelvin. O primeiro é representado pela associação da mola e amortecedor em série, conforme ilustra a figura 1.

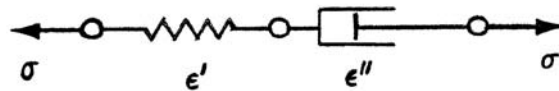


Figura 1. Modelo de Maxwell: associação da mola e amortecedor em série (Flügge, 1975).

Tendo a seguinte equação constitutiva:

$$\frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{F} = \ddot{\epsilon} + \dot{\epsilon} = \dot{\epsilon} \quad (2)$$

De acordo com o modelo de Maxwell e tendo-se apenas carregamento e a aplicação de uma carga constante (σ_0) por um tempo infinito, a deformação ϵ crescerá também tendendo ao infinito com uma razão constante, como se fosse um fluido daí o termo *fluido de Maxwell*, conforme ilustra a figura 2.

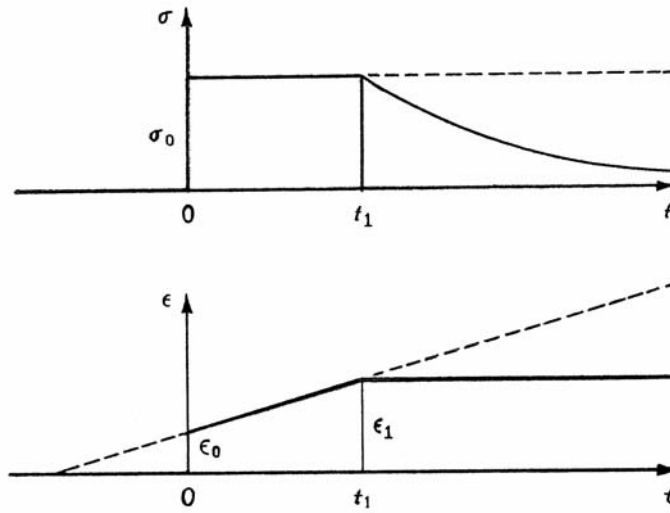


Figura 2. Fluido de Maxwell submetido a um *creep test* (Flügge, 1975).

Por sua vez, modelo de Kelvin é representado pela associação de mola e amortecedor em paralelo, conforme ilustra a figura 3.

Com a seguinte equação constitutiva:

$$\sigma = \sigma' + \sigma'' = E\varepsilon + F \dot{\varepsilon} \quad (3)$$

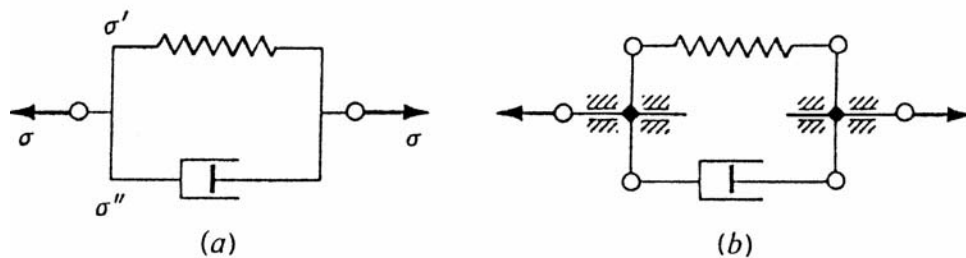


Figura 3. Modelo de Kelvin: associação da mola e amortecedor, em paralelo (Flügge, 1975).

O Modelo quando submetido a um carregamento (σ_0) apresenta uma deformação com comportamento assintótico em decorrência da ação do amortecedor, conforme ilustra a figura 4.

No instante em que se inicia a relaxação, ou seja, etapa onde cessa a deformação há um decaimento da tensão (σ) do material, tendendo a um valor residual próximo a zero quando o tempo tende ao infinito.

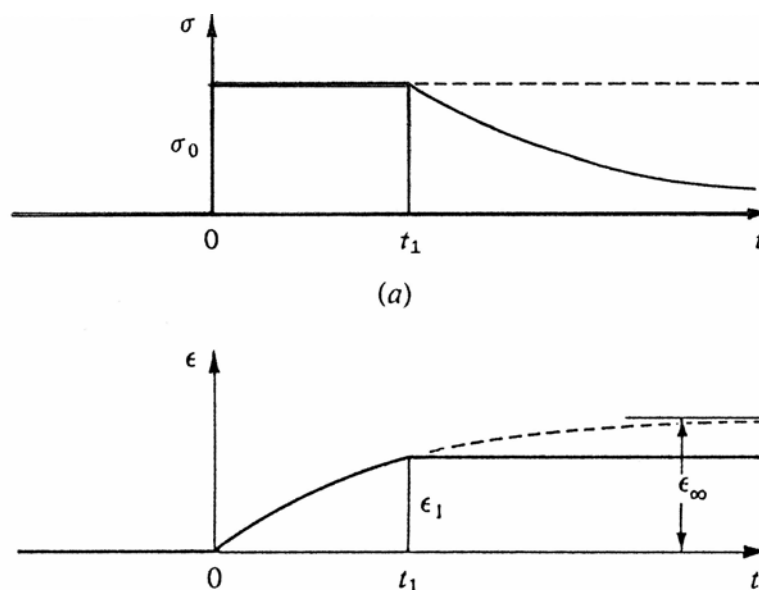


Figura 4. Sólido de Kelvin submetido a um *creep test* (Flügge, 1975).

Chen et al (1972) em estudos realizados com os modelos analógicos, citam que o comportamento viscoelástico dos materiais agrícolas pode ser representado pelo modelo generalizado de Maxwell, esquematicamente, ilustrado na figura 5.

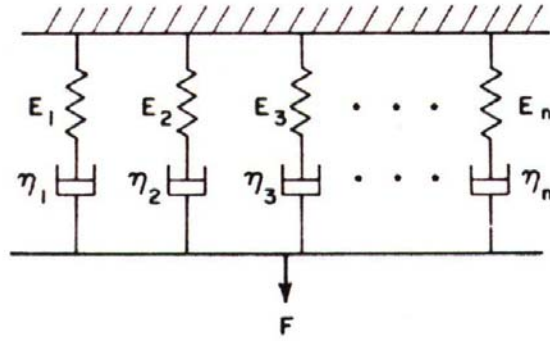


Figura 5. Modelo generalizado de Maxwell (Flügge, 1975).

Em um ensaio de relaxação o comportamento viscoelástico baseado no modelo generalizado de Maxwell é representado pela equação:

$$\sigma(t) = K \varepsilon_0 \sum_{i=1}^n E_i e^{-(E_i / \eta_i)t} \quad (4)$$

Onde K representa um fator de forma do material; ε_0 deformação específica; E_i parâmetro elástico; η_i parâmetro viscoso do material e t a variável tempo. Sendo a determinação dos parâmetros viscoso e elástico obtido através da resolução de um sistema de equações não lineares.

Existem muitos modelos analógicos, que, na realidade, são criados a partir da associação dos modelos de Maxwell e Kelvin. Podendo-se, então, comparar o comportamento mecânico de um material viscoelástico com as mais diversas combinações desses modelos. Do ponto de vista didático os modelos analógicos são uma importante ferramenta para compreender o comportamento mecânico dos materiais viscoelásticos.

3.2 Parâmetros que influenciam no adensamento do palhiço

Os tecidos vegetais submetidos à compressão apresentam um comportamento mecânico de difícil caracterização quanto aos seus parâmetros viscoelásticos. Vários trabalhos tem sido realizados no intuito de caracterizar, o mais

próximo da realidade, o comportamento mecânico desses tecidos. Para tanto, parâmetros importantes no processo de adensamento têm sido estudados, tais como: grau de umidade do material, pressão aplicada e seu tempo de retenção e velocidade da aplicação da carga.

3.2.1 Grau de umidade do material

Srivastava et al (1981) em experimento com compressão de minifardos de feno observaram que o grau de umidade em torno de 10 a 12% é o que promove maior adensamento do produto e, em consequência, maior durabilidade dos mesmos. Com valores superiores a 12% de umidade a densidade e a durabilidade final do produto se reduz, conforme ilustra a figura 6.

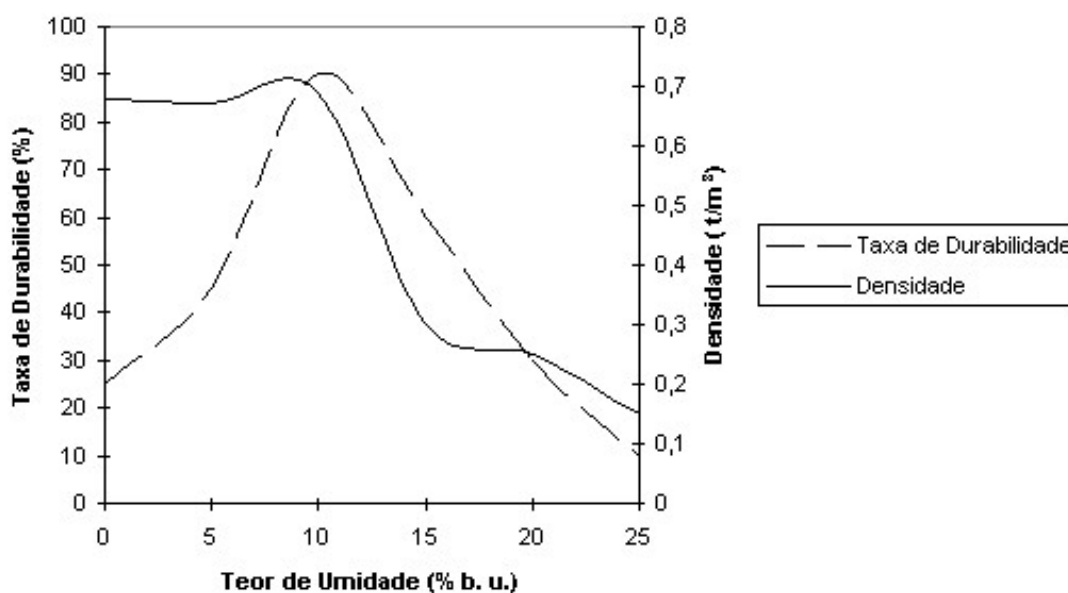


Figura 6. Efeito do grau de umidade na densidade e durabilidade dos minifardos (Srivastava et al, 1981).

O'Dogherty et al (1984) em estudos com a palha do trigo mencionam que não é possível fazer fardos estáveis com a palha apresentando um grau de umidade superior a 35 %, devido a alta taxa de expansão desse material após a remoção do

molde de ensaio. Os autores ainda determinaram uma relação entre a densidade final do fardo (após a expansão), com o grau de umidade do material:

$$\gamma r = a * \exp(-c * m_w) \quad (5)$$

onde: a e c são constantes empíricas, m_w é o grau de umidade (%) em base úmida e γr é a densidade final, considerando a relaxação. De acordo com a equação a densidade do fardo decresce, exponencialmente, com o aumento do grau de umidade. Ainda, de acordo com os autores, o efeito da pressão na densidade dos fardos é altamente dependente do grau de umidade do material. O aumento da densidade para uma dada faixa de pressão tem um pequeno efeito para altos graus de umidade, conforme ilustra a figura 7.

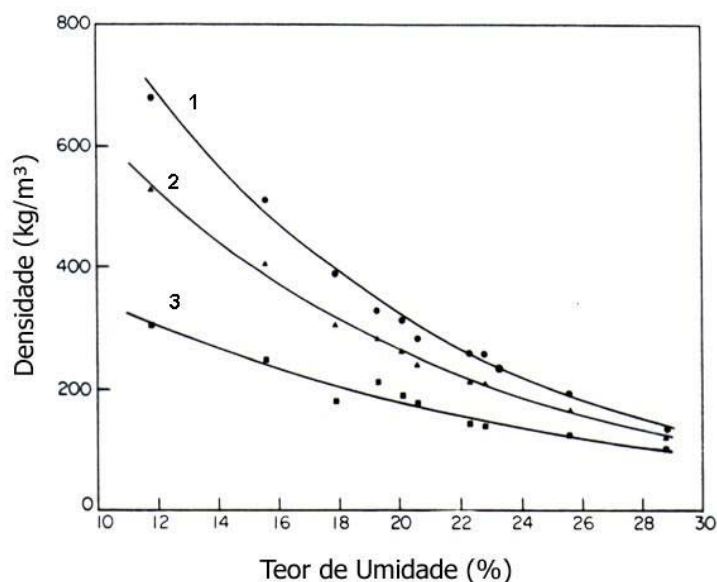


Figura 7. Efeito do grau de umidade na densidade dos fardos para as pressões: 1 - 150 Mpa; 2 - 50 Mpa e 3 - 10 Mpa (O'Dogherty et al, 1984).

Esses mesmos autores mencionam que a máxima durabilidade dos fardos ocorreu na faixa de grau de umidade de 13 a 17 % (base úmida). A durabilidade

decrece rapidamente quando o grau de umidade é superior a 20 %, conforme ilustra a figura 8.

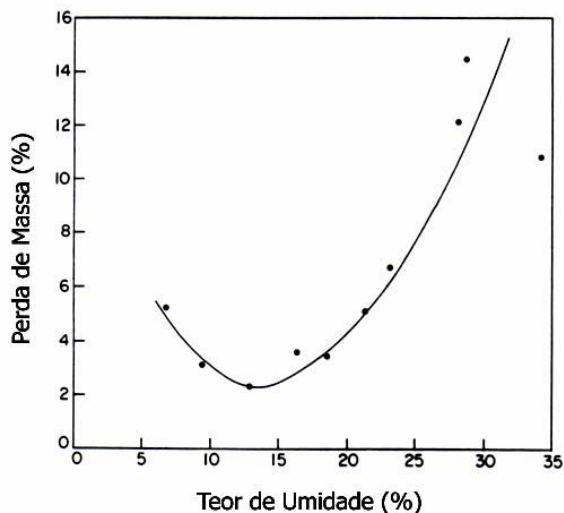


Figura 8. Efeito do grau de umidade na durabilidade dos fardos de palha de trigo (O'Dogherty et al, 1984).

Segundo Mohsenin (1976) o grau de umidade apresenta grande influência na estabilidade dos fardos em virtude desse grau provocar um aumento na expansão axial do fardo, diminuindo, em consequência, a densidade final do material. De acordo com a figura 9, observa-se que um fardo com grau de umidade maior apresenta tensão de relaxação ('strees relaxation') superior, em comparação a um fardo com grau de umidade menor.

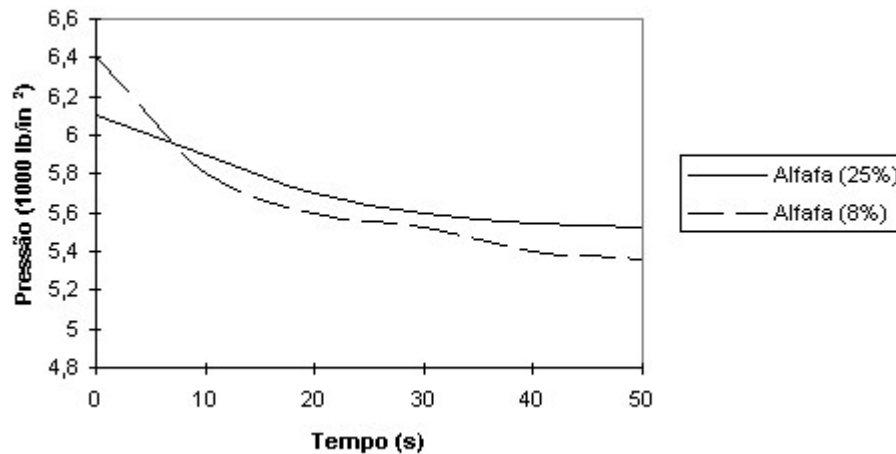


Figura 9. Variação da tensão de relaxação da alfafa para dois graus de umidade (Mohsenin, 1976).

Fardos com graus de umidade menores apresentam menor expansão, ocorrendo, predominantemente, na direção axial. Independente do grau de umidade do fardo, a expansão radial após a compressão, é da ordem de 2 a 5 %, podendo ser desprezada.

Bellinger (1961) e Mohsenin (1976) mencionam o aumento do requerimento energético no processo de compressão à medida que o material apresenta menor grau de umidade.

Segundo os trabalhos mencionados anteriormente, nota-se perfeitamente que o grau de umidade apresenta grande influência no processo de adensamento dos tecidos vegetais. Parece ser de senso comum que o aumento desse grau facilita o processo de compressão (diminuindo o consumo energético), porém, promove maior expansão do material, diminuindo a estabilidade e durabilidade do fardo.

Torna-se necessário, então, determinar o ponto ótimo, ou seja, o valor do grau de umidade que minimize o requerimento energético no processo de compressão, bem como mantenha a estabilidade e a durabilidade aos níveis desejados para o palhiço.

3.2.2- Pressão aplicada

Srivastava et al (1981) observaram que o aumento da pressão promove aumento da densidade e da durabilidade do minifardo de feno. Entretanto, a influência desse parâmetro não é linear, ou seja, para altas pressões aplicadas o aumento da densidade, como também a durabilidade do fardo passa a ser menos significativo, conforme ilustra a figura 10.

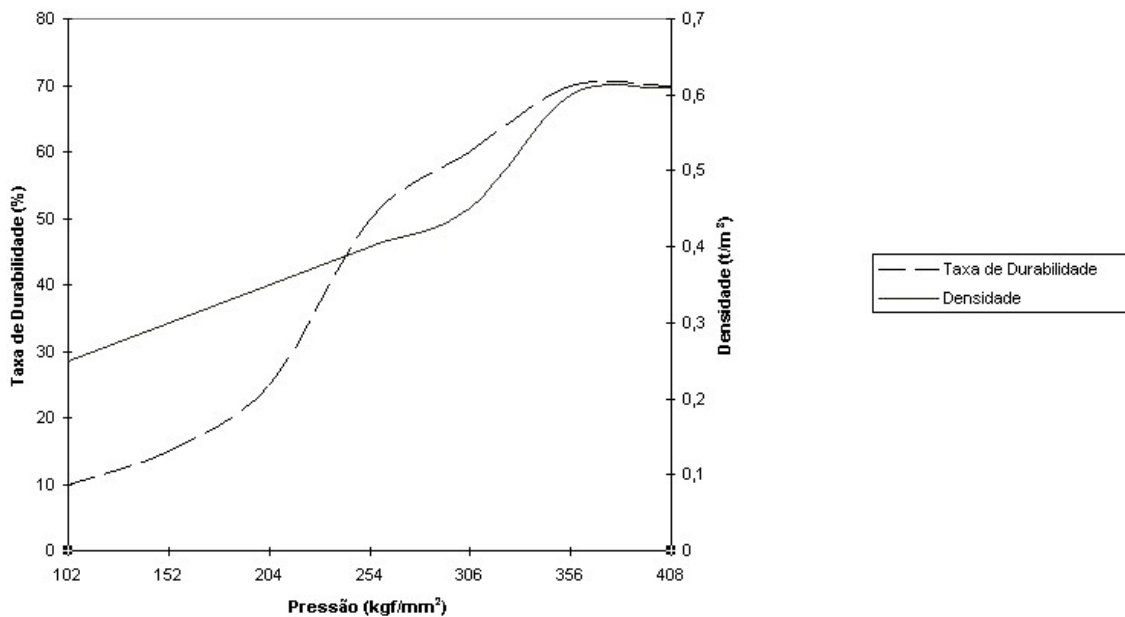


Figura 10. Efeito do gradiente de pressão aplicado na densidade e durabilidade de minifardos de feno (Srivastava et al, 1981).

Vários autores, citados por O'Dogherty (1989), mencionam o modelo clássico que relaciona a pressão com a densidade aparente, representada através da expressão:

$$P = a\gamma^b \quad (6)$$

onde: P representa a pressão aplicada, γ a densidade aparente e a e b são constantes empíricas.

Faborode et al (1986) encontraram um modelo para relacionar a pressão aplicada com a densidade do fardo:

$$P = (a\gamma_0/b)[e^{(b(r-1))}-1] \quad (7)$$

onde: a e b são constantes empíricas, γ_0 é a densidade inicial do produto antes da compressão e r é a razão de compressão γ/γ_0 . Os autores ainda mencionam pressões de 30 a 35 MPa necessárias para produzir fardos com 500 a 600 kg/m³, para palha de trigo com grau de umidade de 8.3 %.

O'Dogherty et al (1984) estudaram a influência da pressão na densidade final do fardo, até o limite de 74 MPa, utilizando corpos de prova de 50 mm de diâmetro. Foi observado que a pressão aumenta exponencialmente com o aumento da densidade do produto. Contudo, para proporcionar melhor ajuste aos seus resultados, os autores propõem separar a relação em dois intervalos:

$$P = c_1 \gamma^m \quad (\text{para } \gamma < 400 \text{ kg/m}^3) \quad (8)$$

$$P = c_2 (\ln \gamma)^n \quad (\text{para } \gamma > 400 \text{ kg/m}^3) \quad (9)$$

onde: c_1 , c_2 , m e n são constantes empíricas. Em relação ao experimento efetuado foi encontrado um bom ajuste quando $m = 2.0$ e $n = 3.9$.

Os mesmos autores em seus resultados encontraram um valor de $\gamma_c = 410 \text{ kg/m}^3$, próximo ao valor de 400 kg/m^3 , que é o valor da densidade quando a pressão começa a crescer rapidamente com o aumento da densidade. Os autores citam, ainda, que a aplicação de cargas repetitivas não apresentou alteração significativa na densidade final, houve um aumento de 4% com proporcional aumento para a energia específica.

Faborode et al (1986) introduziram o número de Cauchy, um parâmetro adimensional equivalente à razão entre a força inercial responsável pela energia

cinética do material e a força elástica para vencer a resistência a compressão, obtendo uma expressão para o número de Cauchy (N_c):

$$N_c = (v^2 r/a) e^{(-b(r-1))} \quad (10)$$

onde: v é a taxa de deformação ou velocidade de compressão, e a e b são as constantes da equação (3). O número de Cauchy apresenta um valor máximo quando $\gamma = \gamma_0/b$, definindo então a densidade crítica (γ_c), ou seja, o valor de densidade que limita as duas etapas de compressão.

O'Dogherty (1989) cita que a pressão requerida para formar fardo com densidade final, (considerando a relaxação), de 250 a 300 kg/m³ está na faixa de 11 a 34 MPa. A aplicação de pressão de até 150 MPa resulta numa densidade final da palha de aproximadamente 600 kg/m³, para uma faixa de grau de umidade de 14 a 16% (b.u.).

Em relação ao efeito da pressão aplicada no processo de adensamento do palhiço, deve-se avaliar este parâmetro com critério. Muito embora o palhiço de cana-de-açúcar seja um tecido vegetal análogo a outros tecidos vegetais mencionados. Não se deve esperar que para os mesmos níveis de pressões citados, obtenham-se fardos com estabilidade suficiente para resistir ao manuseio pelo qual o material é submetido.

Em nossos trabalhos preliminares com a palhiço de cana, com o objetivo de estimar os níveis de carga a serem utilizados no experimento, foi aplicada uma pressão de compressão de 18.84 MPa em corpos de prova com diâmetro interno de 52 mm. Mesmo assim, os minifardos não apresentaram estabilidade para resistir ao manuseio.

3.2.3 Tempo de retenção da carga aplicada

Srivastava et al (1981) verificaram que, variando-se o tempo de retenção variando de 0 até 8 segundos, houve aumento da densidade aparente dos minifardos de feno. Com isso demonstra-se que o tempo de retenção é necessário para que haja uma acomodação do material. A durabilidade do minifardo, no entanto, não sofreu alteração, conforme ilustra a figura 11.

Segundo O'Dogherty (1989) o tempo de retenção é um parâmetro importante na compressão de tecidos vegetais apresentando influência na tensão de relaxação, bem como, na densidade final do material. O autor menciona que para tempos de retenção da ordem de 5 a 10 segundos há um aumento na densidade final de 5 a 10 %, mencionando ainda, a necessidade de se realizar estudos para verificar o efeito do tempo de residência na faixa de 0,1 a 1 segundo.

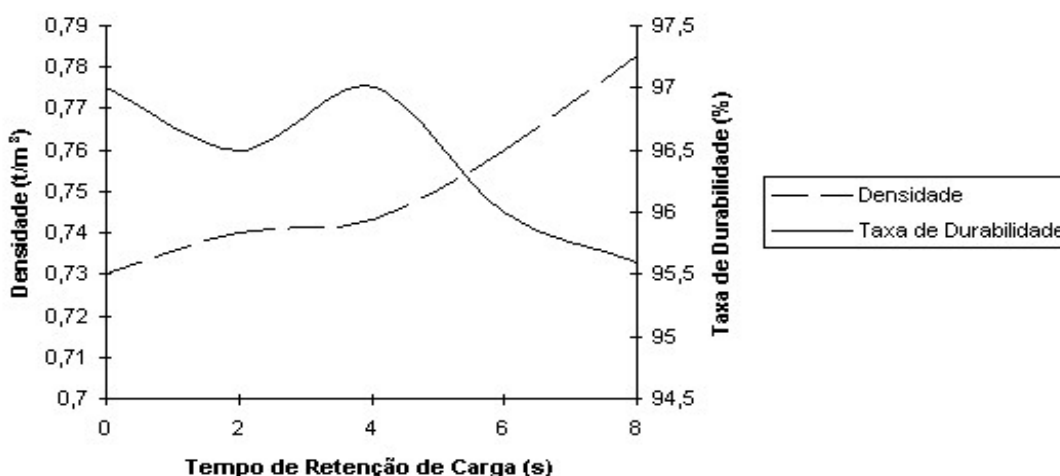


Figura 11. Efeito do tempo de retenção da carga aplicada na densidade e na durabilidade dos minifardos de feno (Srivastava et al, 1981).

Brun et al (1959), Butler et al (1959), Pickard et al (1961) e Reece (1966) mencionam que o aumento do tempo de retenção na faixa de 1 a 20 segundos proporciona um aumento na densidade final e durabilidade.

Mohsenin (1976) cita que o aumento do tempo de retenção também proporciona um aumento na densidade final, contudo, em termos práticos, o tempo

de retenção deve ser estudado levando-se em consideração a capacidade de produção das enfardadoras, sendo necessário encontrar um tempo de retenção “ótimo” que combine uma alta capacidade de produção de fardos e um nível de durabilidade e estabilidade aceitável para os mesmos.

Em trabalhos realizados pela Copersucar (Palermo, 1993)¹ no enfardamento do palhiço de cana foi necessário amarrar os fardos para que os mesmos tivessem estabilidade. Assim sendo, no processo de enfardamento com amarração, o parâmetro tempo de retenção passa a não ter influência no processo de adensamento da palha de cana-de-açúcar.

Molina Jr. (1991) obteve fardos cilíndricos de palhiço de cana-de-açúcar com densidade de 250 kg/m³.

3.2.4 Velocidade de aplicação da carga (taxa de deformação)

Srivastava et al (1981) verificaram que a taxa de deformação de 40 a 80 mm/min é a que promove maior aumento da densidade do minifardo. Acima dessa faixa, o aumento da taxa de deformação, praticamente, não alterou o valor da densidade. A durabilidade obteve maior valor com a taxa de deformação de 40 mm/min; com taxa de deformação superior a durabilidade passa a diminuir, conforme mostrado na figura 12.

¹ PALERMO, E. Informação obtida durante estágio realizado no Centro de Tecnologia da Copersucar, Piracicaba. 1993.

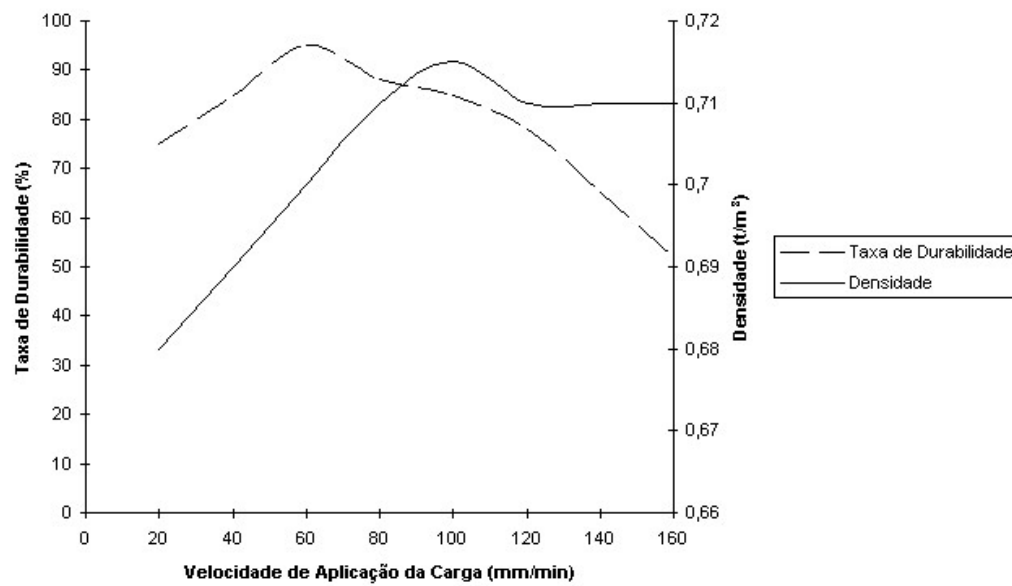


Figura 12. Efeito da taxa de deformação na densidade e durabilidade dos minifardos de feno (Srivastava et al ,1981).

4 Material e Métodos

Neste capítulo são apresentados o material utilizado e a descrição do procedimento metodológico para os ensaios de compressão e relaxação, realizados em laboratório, e para o ensaio com a enfardadora comercial.

4.1 Características do Palhiço

O palhiço foi obtido na fazenda Santa Genebra, Campinas, São Paulo, originário da variedade SP79-1011, de 2^o corte, com presença de palha, folhas verdes, ponteiros e colmos.

4.2 Material de laboratório utilizado nos ensaios de compressão e relaxação

A seguir será descrita a relação de materiais utilizada nos ensaios de compressão e relaxação em laboratório:

- Máquina universal de ensaios (MTS)

Sistema de Acionamento Hidráulico;

Sistema de digital de controle;

Sistema de aquisição de dados;

Capacidade de Carga de 10 t;

- Conjunto cilindro/êmbolo

Com as seguintes dimensões:

Cilindro: $d_i = 92,20 \text{ mm}$

$d_e = 100,20 \text{ mm}$

$h = 163,00 \text{ mm}$

- Êmbolo: $d = 90,00 \text{ mm}$

$h = 200,0 \text{ mm}$

- Balança eletrônica

Capacidade Máxima de 1000 g;

Precisão de 0,01 g;

Estufa elétrica;

4.3 Preparo de palhiço os ensaios de compressão e relaxação

4.3.1 Picagem

Para a execução dos ensaios em laboratório o palhiço de cana-de-açúcar foi picado com comprimento de corte nominal de 40 mm, sendo o maior tamanho de corte possível de se realizar com a ensiladora.

Em princípio, a picagem é uma ação que descaracteriza o comportamento mecânico do palhiço alterando o do comprimento das fibras, sabe-se que quanto maior for o comprimento das fibras maior será o entrelaçamento, O'Dogherty (1989). Todavia, a picagem é uma operação necessária para permitir o manuseio e o acondicionamento do material no interior do cilindro utilizado nos ensaios.

4.3.2 Umidificação do Palhiço

Conforme foi mencionado anteriormente, o grau de umidade apresenta uma grande influência no comportamento mecânico de um tecido vegetal. Para tanto foi estabelecida uma metodologia de preparo do material para avaliar a influência do grau de umidade.

Logo após a picagem, o material foi separado em quatro parcelas distintas identificadas pelas letras A, B, C e D todas inicialmente apresentando a mesma umidade, e em quantidade suficiente para a realização dos ensaios.

Três das quatro parcelas foram acondicionadas em sacos plásticos para adição de água através de um pulverizador manual. Cada saco recebeu quantidades distintas de água para obtenção do palhiço a distintos graus de umidade. O material foi

revolvido oito vezes, ao longo de dois dias, a fim de homogeneizar a umidade. O objetivo desta metodologia não foi obter um grau de umidade previamente definido, mas um gradiente de umidade das parcelas. À parcela restante, também acondicionada em saco plástico, não foi adicionada água.

Para a determinação do grau de umidade foram retiradas cinco amostras de cada parcela, medindo-se suas respectivas massas e em seguida colocadas em estufa durante 24 horas e temperatura de 102 °C, sendo determinada pela expressão:

$$U_{bs} (\%) = (M_u - M_s) / M_s \quad (11)$$

onde: M_u = Massa úmida antes de secar na estufa.

M_s = Massa seca após a retirada da estufa.

4.4 Características do Cilindro e Êmbolo

Confeccionou-se um cilindro e êmbolo (Figura 13), em aço, para os ensaios de compressão e relaxação. O cilindro possui diâmetro interno de 92,2 mm e altura de 163,0 mm e espessura de parede de 4,0 mm. O êmbolo foi confeccionado com 90 mm de diâmetro com folga de 2,2 mm, para evitar interferência com a parede interna do cilindro na compressão. Dessa forma a força resultante medida é composta pela força de resistência à deformação do próprio palhiço e pela força de atrito devido à interação do palhiço com a parede do cilindro. O cilindro é vazado facilitando a remoção do palhiço comprimido.



Figura 13. Palhiço de cana-de-açúcar acondicionada no interior do cilindro.

4.5 Ensaio de compressão e relaxação

O procedimento metodológico adotado para realizar os ensaios de compressão e relaxação na máquina de ensaios MTS (Machine Test Standard), conforme ilustra a figura 14, é descrito a seguir:



Figura 14. Máquina Universal de ensaios MTS.

4.5.1 Ensaio de compressão

Na execução do ensaio de compressão o palhiço de cana-de-açúcar já previamente picado e com o grau de umidade pré-estabelecidos, foi acondicionado no interior do cilindro de compressão preenchendo por completo o volume interno do cilindro com 980, 93 cm³.

Em seguida o êmbolo foi posicionado sobre o palhiço acondicionado mantendo-se a mesma posição de referência do êmbolo em relação ao cilindro. Constantemente foi necessário adicionar ou remover pequena parcela de palha a

fim de obter-se a posição de referência desejada, ou seja, o alinhamento entre as superfícies superiores do êmbolo e cilindro, conforme ilustra a figura 15.



Figura 15. Êmbolo com superfície superior alinhada com o cilindro.

Foi estabelecido que a densidade final da palha acondicionada no cilindro deveria estar num intervalo de variação de 300 a 400 kg/m³. Assim sendo, foi determinado o curso do êmbolo em função da densidade final desejada. Foi então escolhido o curso de 100 mm.

O ensaio de compressão foi realizado utilizando taxa de aquisição de 10 pontos por segundo, em esquema fatorial com dois fatores; o grau de umidade e a taxa de deformação, respectivamente, com quatro e cinco níveis de variações e cinco repetições para cada condição de ensaio. Já a taxa de deformação variou nos seguintes níveis: 10 mm/s, 20 mm/s, 30 mm/s, 40 mm/s e 43mm/s. Totalizando, portanto, 100 determinações.

4.5.2 Relaxação

O ensaio de relaxação foi realizado na seqüência do ensaio de compressão, ou seja, o este último compreende a fase em que a amostra é comprimida até o êmbolo atingir o fim de seu curso. Nesta etapa o sinal de força que a amostra exerce sobre o êmbolo é registrado durante 15 segundos, representando assim a curva de relaxação (ou acomodação) do material.

A taxa de aquisição no ensaio de relaxação foi de 10 pontos por segundo.

A análise teve como objetivo avaliar o efeito dos tratamentos utilizados nas curvas de relaxação.

A teoria em geral considera a curva de relaxação com um decaimento exponencial da forma:

$$P = a * e(-bt) \quad (12)$$

onde : P é a pressão ou tensão de relaxação, t a variável tempo e a e b constantes empíricas que representam o decaimento da função.

Inicialmente, foi feito um ajuste de curvas para as curvas de relaxação obtidas nos ensaios, determinando-se assim os coeficientes a e b .

Em seguida foi analisada a equação em comparação com as curvas obtidas no ensaio, ou seja, verificar se realmente as curvas de relaxação apresentavam um decaimento atenuado como o proposto pela teoria.

4.6 Material utilizado no ensaio com a enfardadora

- Enfardadora prismática Nogueira modelo AP 41N
- Trator Massey Ferguson 235
- Sensor de presença indutiva
- Amplificador de instrumentação marca Sodimex
- Cartão de aquisição de dados (PCMCIA) marca National Instruments modelo DAQ Card 700 com 16 Canais
- Notebook marca Digimac modelo TS 300 AS

- Programa computacional Matlab

4.7 Ensaio com a enfardadora

Para a realização do ensaio com a enfardadora, o palhiço de cana-de-açúcar não recebeu nenhum processamento prévio, o material foi recolhido no campo e enfardado com a finalidade de caracterizar, do modo mais real possível o palhiço de cana depositada no campo.

A enfardadora utilizada no ensaio foi do tipo prismática, modelo AP 41N da empresa Nogueira S. A. Máquinas Agrícolas, conforme ilustra a figura 16, formando fardos com comprimento regulado variando de 0,50 m a 1,0 m e largura e altura com as dimensões 0,40 m e 0,30 m, respectivamente.



Figura 16. Enfardadora Nogueira AP 41N utilizada no ensaio.

Basicamente o ensaio foi formulado através de um sistema de instrumentação instalado na máquina. O objetivo do sistema de instrumentação foi o de registrar o sinal da força atuante na biela na formação dos fardos, bem como sua variação ao longo do ciclo de funcionamento da enfardadora, e também registrar o sinal de rotação da manivela.

Com o objetivo da instrumentação estabelecido, o sistema foi definido através da instalação de um sensor de rotação fixo no chassi da máquina, conforme ilustra a figura 17, e colagem de um extensômetro na biela.

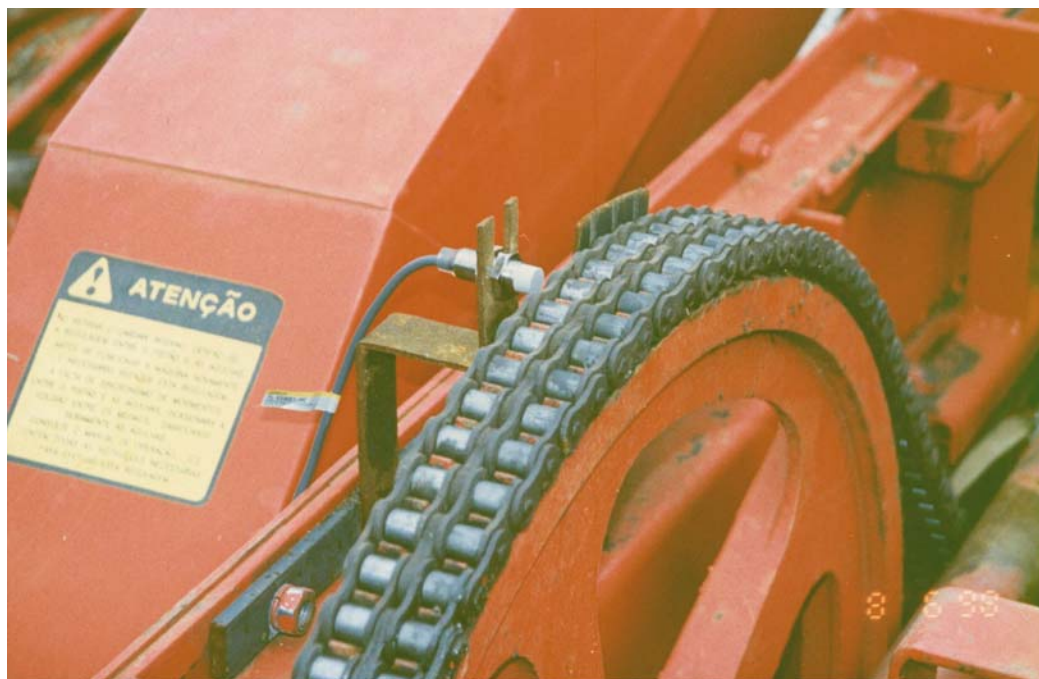


Figura 17. Detalhe da instalação do sensor de rotação no chassi.

A etapa mais crítica de todo o sistema de instrumentação está relacionada à calibração da biela, pois se trata de uma peça esbelta com aproximadamente 1,20 m e que é submetida a grandes esforços. A solução encontrada para a calibração da biela foi à utilização de um dispositivo multiplicador de força por meio de um braço articulado.

O dispositivo possui massa de, aproximadamente, 1.000 kg e permite multiplicar a ação de uma força em 8 vezes.

A seguir, a biela foi instalada na enfardadora e juntamente com o sensor de rotação fixado no chassi da enfardadora, o implemento foi colocado em operação sendo os sinais elétricos do sensor e do extensômetro armazenados por um sistema de aquisição de dados constituído basicamente por uma placa de aquisição de dados padrão PCMCIA e um microcomputador notebook.

A taxa de aquisição adotada foi de 100 pontos por segundo, pois a biela trabalha com rotação nominal de 110 rpm.

Para o tratamento do sinal de força e eliminação de ruídos elétricos no sistema de aquisição, foi utilizado o programa computacional Matlab com a aplicação de filtro passa-baixo Butterworth nas frequências de corte 5 e 20 Hz.

Durante o ensaio foram feitos 12 fardos com comprimento variando de 0,50 m a 0,68 m e seção retangular de 0,30 m x 0,40 m, de acordo com especificação do equipamento. A palha de cana-de-açúcar utilizada apresentou umidade média de 56 %, para a obtenção do grau de umidade foi empregada a mesma metodologia do ensaio de laboratório com a utilização de cinco amostras da palha, determinando a densidade média dos fardos.

5 Resultados e Discussão

5.1 Umidificação do palhiço da cana-de-açúcar

Através da metodologia exposta no item 4.3.2 foi obtido o valor médio dos graus de umidade para as quatro parcelas distintas de palhiço, conforme tabela 1 abaixo:

Tabela 1. Valor médio de teor de umidade (base seca) para as parcelas de palhiço de cana-de-açúcar.

Parcelas	Grau de Umidade
A	5,66 %
B	10,37%
C	26,50%
D	57,50%

5.2 Estudo da relação pressão aplicada x densidade aparente

De acordo com a teoria clássica a relação pressão x densidade é representada pela função exponencial

$$P = a\gamma^b \quad (13)$$

onde: P é a pressão aplicada, γ é a densidade aparente e a e b constantes empíricas.

Através do ensaio de compressão foram obtidas as curvas pressão x densidade, para todas as condições dos ensaios e nas cinco repetições. A relação pressão x densidade foi linearizada e aplicado um ajuste de curva, obtendo-se os valores dos coeficientes a e b , determinando as médias dos coeficientes, conforme tabelas 2 a 6, a seguir:

Tabela 2. Valores do Ajuste para a Curva Pressão x Densidade para taxa de deformação de 10 mm/s.

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef.ln(a)	Coef. r	Coef. a
5,66 %	1	3,9168	10,0902	0,9603	24105,9733
5,66 %	2	4,3263	10,8434	0,9469	51196,1579
5,66 %	3	3,8166	9,9745	0,9633	21471,6754
5,66 %	4	4,0142	10,2544	0,9559	28407,2930
5,66 %	5	4,0601	10,3642	0,9504	31704,4926
Valores Médios		4,0268	10,3053	0,9554	31377,1184

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef.ln(a)	Coef. r	Coef. a
10,37 %	1	3,2962	9,0423	0,9557	8453,5920
10,37 %	2	3,5312	9,3261	0,9572	11226,886
10,37 %	3	3,3858	8,9735	0,9598	7890,8817
10,37 %	4	3,3567	8,7992	0,9667	6628,6733
10,37 %	5	3,5302	9,1851	0,9647	9750,6507
Valores Médios		3,4200	9,0652	0,9608	8790,1367

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef.ln(a)	Coef. r	Coef. a
26,50 %	1	3,3416	7,8142	0,9825	2475,5503
26,50 %	2	3,5304	8,2633	0,9793	3878,866
26,50 %	3	3,2934	8,1643	0,9854	3513,3042
26,50 %	4	3,4834	8,2781	0,9680	3936,556
26,50 %	5	3,7115	8,8707	0,9815	7120,3456
Valores Médios		3,4721	8,2781	0,9786	4184,9244

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef.ln(a)	Coef. r	Coef. a
57,40 %	1	2,9801	6,5094	0,9756	671,4462
57,40 %	2	3,2360	6,8183	0,9636	914,4229
57,40 %	3	3,2598	6,9066	0,9602	998,8165
57,40 %	4	3,4226	7,1981	0,9502	1336,8897
57,40 %	5	2,9045	6,5846	0,9723	723,8421
Valores Médios		3,1606	6,8034	0,9644	929,0835

Tabela 3. Valores do Ajuste para a Curva Pressão x Densidade para taxa de deformação de 20 mm/s.

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef.ln(a)	Coef. r	Coef. a
5,66 %	1	4,1550	10,4947	0,9615	36124,6922
5,66 %	2	3,5476	9,6027	0,9651	14804,0690
5,66 %	3	3,7519	9,9109	0,9714	20147,9100
5,66 %	4	3,9245	10,1790	0,9651	26344,0659
5,66 %	5	3,8099	9,9612	0,9715	21188,2101
Valores Médios		3,8378	10,0297	0,9669	23721,7894

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef.ln(a)	Coef. r	Coef. a
10,37 %	1	3,6146	9,4196	0,9744	12327,6885
10,37 %	2	3,3402	8,8736	0,9789	7141,0407
10,37 %	3	3,4048	8,9576	0,9743	7766,9534
10,37 %	4	3,5788	9,4810	0,9721	13108,5013
10,37 %	5	3,2339	8,6607	0,9802	5771,3057
Valores Médios		3,4345	9,0785	0,9760	9223,0979

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef.ln(a)	Coef. r	Coef. a
26,50 %	1	3,6095	8,293	0,9576	3995,7322
26,50 %	2	3,2630	7,7522	0,9857	2326,7743
26,50 %	3	3,0872	7,5774	0,9826	1953,5338
26,50 %	4	3,2833	8,1782	0,9903	3562,3751
26,50 %	5	3,1107	7,6062	0,9786	2010,6894
Valores Médios		3,2707	7,8814	0,9790	2769,8210

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef.ln(a)	Coef. r	Coef. a
57,40 %	1	3,3270	7,2935	0,9809	1470,6792
57,40 %	2	2,9196	6,8371	0,9877	931,8022
57,40 %	3	3,0310	6,9290	0,9882	1021,5075
57,40 %	4	3,0133	6,8843	0,9916	976,8295
57,40 %	5	3,2220	7,1756	0,9834	1307,2053
Valores Médios		3,1026	7,0239	0,9864	1141,6047

Tabela 4. Valores do Ajuste para a Curva Pressão x Densidade para taxa de deformação de 30 mm/s.

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef.ln(a)	Coef. r	Coef. a
5,66 %	1	3,6258	9,5975	0,9649	14728,0354
5,66 %	2	3,3764	9,3871	0,9709	11933,3891
5,66 %	3	3,5423	9,6242	0,9685	15126,3633
5,66 %	4	3,7642	10,0209	0,9557	22491,3973
5,66 %	5	3,4794	9,5314	0,9704	13786,4358
Valores Médios		3,5576	9,6322	0,9661	15613,1242

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef.ln(a)	Coef. r	Coef. a
10,37 %	1	3,4689	8,8384	0,9684	6894,2023
10,37 %	2	3,0711	8,4027	0,9813	4459,1407
10,37 %	3	3,1812	8,5019	0,9697	4924,3258
10,37 %	4	3,2255	8,5690	0,9804	5265,9934
10,37 %	5	3,4827	8,9647	0,9700	7821,8505
Valores Médios		3,2859	8,6553	0,9740	5873,1025

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef.ln(a)	Coef. r	Coef. a
26,50 %	1	3,1133	7,6849	0,9689	2175,2463
26,50 %	2	3,0735	7,6602	0,9823	2122,2300
26,50 %	3	2,7677	7,5491	0,9808	1898,9498
26,50 %	4	2,9510	7,2384	0,9739	1391,8502
26,50 %	5	3,1646	7,7390	0,9831	2296,1905
Valores Médios		3,0140	7,5743	0,9778	1976,8934

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef.ln(a)	Coef. r	Coef. a
57,40 %	1	2,8198	6,8497	0,9862	943,5707
57,40 %	2	2,8912	6,7906	0,9902	889,4123
57,40 %	3	2,8879	6,7564	0,9902	859,5061
57,40 %	4	2,7603	6,5654	0,9909	710,1058
57,40 %	5	2,7411	6,7472	0,9914	851,6603
Valores Médios		2,8201	6,7419	0,9898	850,8510

Tabela 5. Valores do Ajuste para a Curva Pressão x Densidade para taxa de deformação de 40 mm/s.

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef.ln(a)	Coef. r	Coef. a
5,66 %	1	3,1203	9,0122	0,9810	8202,6467
5,66 %	2	3,3389	9,3813	0,9705	11864,8068
5,66 %	3	3,2816	9,0203	0,9760	8269,2381
5,66 %	4	3,3440	9,3280	0,9751	11248,4446
5,66 %	5	3,3421	9,1652	0,9746	9558,3714
Valores Médios		3,2854	9,1814	0,9754	9828,7015

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef.ln(a)	Coef. r	Coef. a
10,37 %	1	3,3658	8,9257	0,9658	7522,6094
10,37 %	2	3,1114	8,4723	0,9709	4780,482
10,37 %	3	3,2378	8,6390	0,9743	5647,5938
10,37 %	4	3,1510	8,5846	0,9693	5348,8364
10,37 %	5	3,1840	8,6095	0,9668	5483,7469
Valores Médios		3,2100	8,6462	0,9694	5756,6537

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef.ln(a)	Coef. r	Coef. a
26,50 %	1	2,9137	7,7950	0,9768	2428,3343
26,50 %	2	2,7497	7,1866	0,9787	1321,5365
26,50 %	3	3,0863	7,7500	0,9736	2321,5375
26,50 %	4	3,2273	7,6353	0,9790	2069,9116
26,50 %	5	2,8078	7,6969	0,9833	2201,6637
Valores Médios		2,9570	7,6128	0,9783	2068,5967

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef.ln(a)	Coef. r	Coef. a
57,40 %	1	2,5367	6,3598	0,9887	578,139
57,40 %	2	2,8885	6,7336	0,9885	840,1615
57,40 %	3	2,7579	6,6077	0,9892	740,7795
57,40 %	4	2,6940	6,7729	0,9871	873,8559
57,40 %	5	2,7189	6,5117	0,9826	672,9597
Valores Médios		2,7192	6,5971	0,9872	741,1791

Tabela 6. Valores do Ajuste para a Curva Pressão x Densidade para taxa de deformação de 43 mm/s.

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. $\ln(a)$	Coef. r	Coef. a
5,66 %	1	2,9782	8,7236	0,9789	6146,1365
5,66 %	2	2,9964	8,8028	0,9812	6653,1541
5,66 %	3	3,1993	9,0037	0,9802	8133,3673
5,66 %	4	3,0028	8,8291	0,9888	6830,2145
5,66 %	5	3,2207	9,0715	0,9831	8703,6490
Valores Médios		3,0795	8,8861	0,9824	7293,3043

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. $\ln(a)$	Coef. r	Coef. a
10,37 %	1	3,0067	8,1936	0,9824	3617,6423
10,37 %	2	3,2524	8,8150	0,9612	6734,5872
10,37 %	3	3,1770	8,8755	0,9673	7154,4836
10,37 %	4	2,8630	8,2910	0,9748	3987,9293
10,37 %	5	2,9804	8,3602	0,9682	4273,5034
Valores Médios		3,0559	8,5071	0,9708	5153,6292

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. $\ln(a)$	Coef. r	Coef. a
26,50 %	1	2,8783	7,8666	0,9713	2608,5964
26,50 %	2	2,5765	7,1563	0,9803	1282,1662
26,50 %	3	2,8789	7,5240	0,9771	1851,9404
26,50 %	4	2,9524	7,7329	0,9740	2282,3245
26,50 %	5	2,7725	7,4166	0,9772	1663,3813
Valores Médios		2,8117	7,5393	0,9760	1937,6818

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. $\ln(a)$	Coef. r	Coef. a
57,40 %	1	3,1543	7,2835	0,9878	1456,0601
57,40 %	2	2,7812	6,7742	0,9934	875,0179
57,40 %	3	3,0770	7,2212	0,9931	1368,1572
57,40 %	4	2,7896	6,8046	0,9953	901,9770
57,40 %	5	2,7721	6,7842	0,9918	883,7310
Valores Médios		2,9148	6,9735	0,9923	1096,9886

A partir das médias dos coeficientes obtidas foram obtidos os gráficos da relação pressão aplicada x densidade aparente, procurando-se avaliar o comportamento das curvas em função dos tratamentos aplicados, apresentados nas figuras 18 a 26.

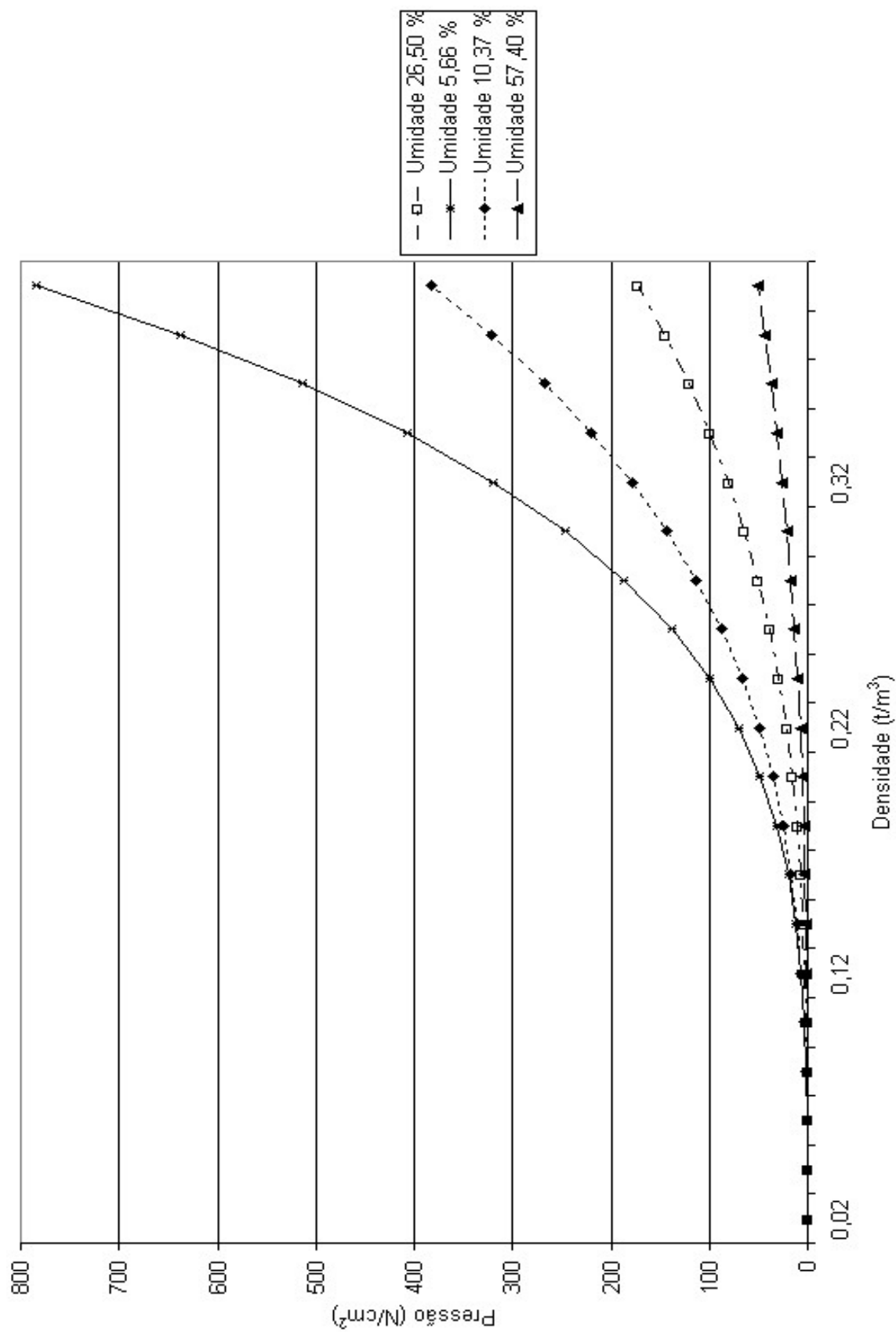


Figura 18. Curvas Pressão x Densidade para taxa de deformação de 10 mm/s.

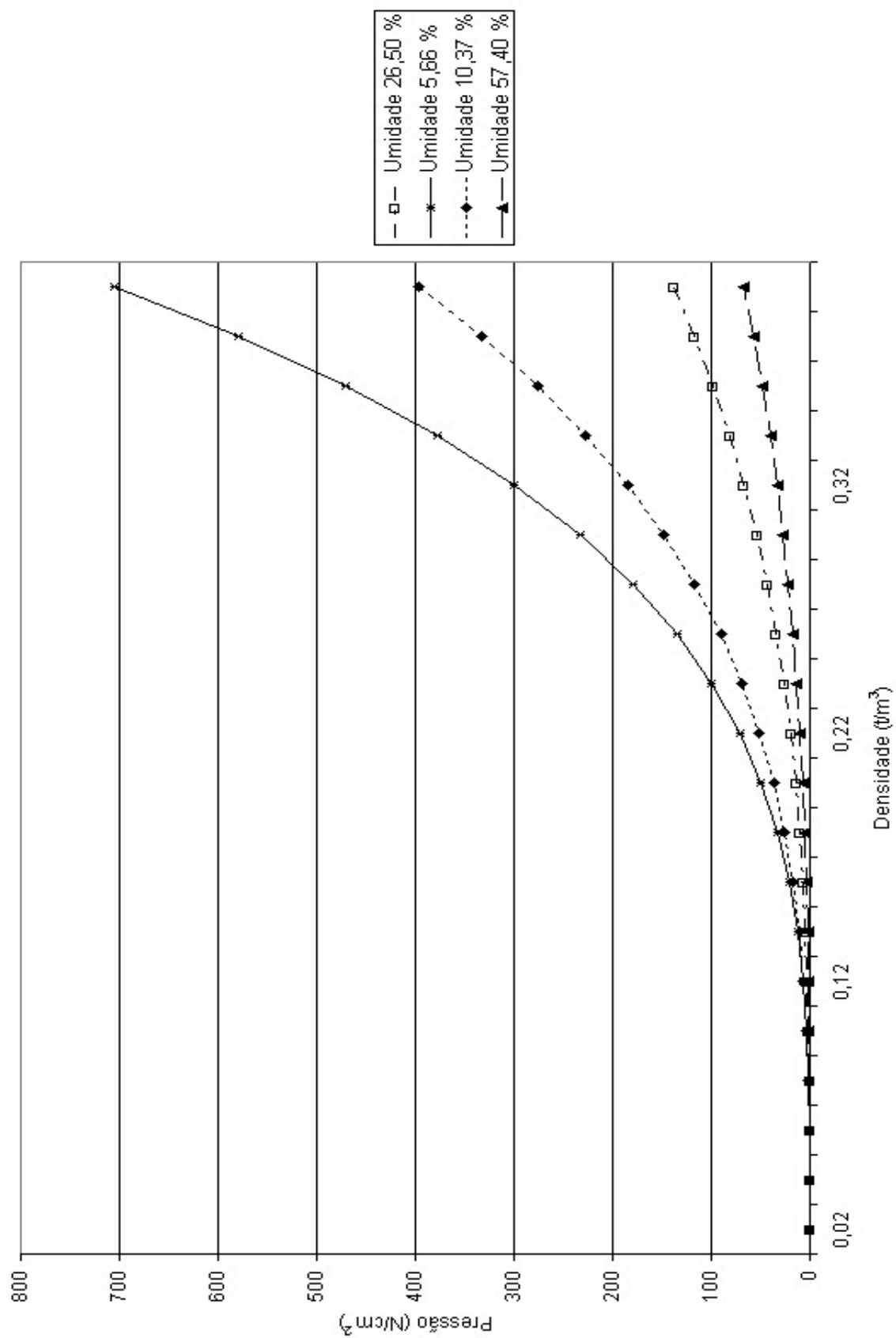


Figura 19. Curvas Pressão x Densidade para taxa de deformação de 20 mm/s.

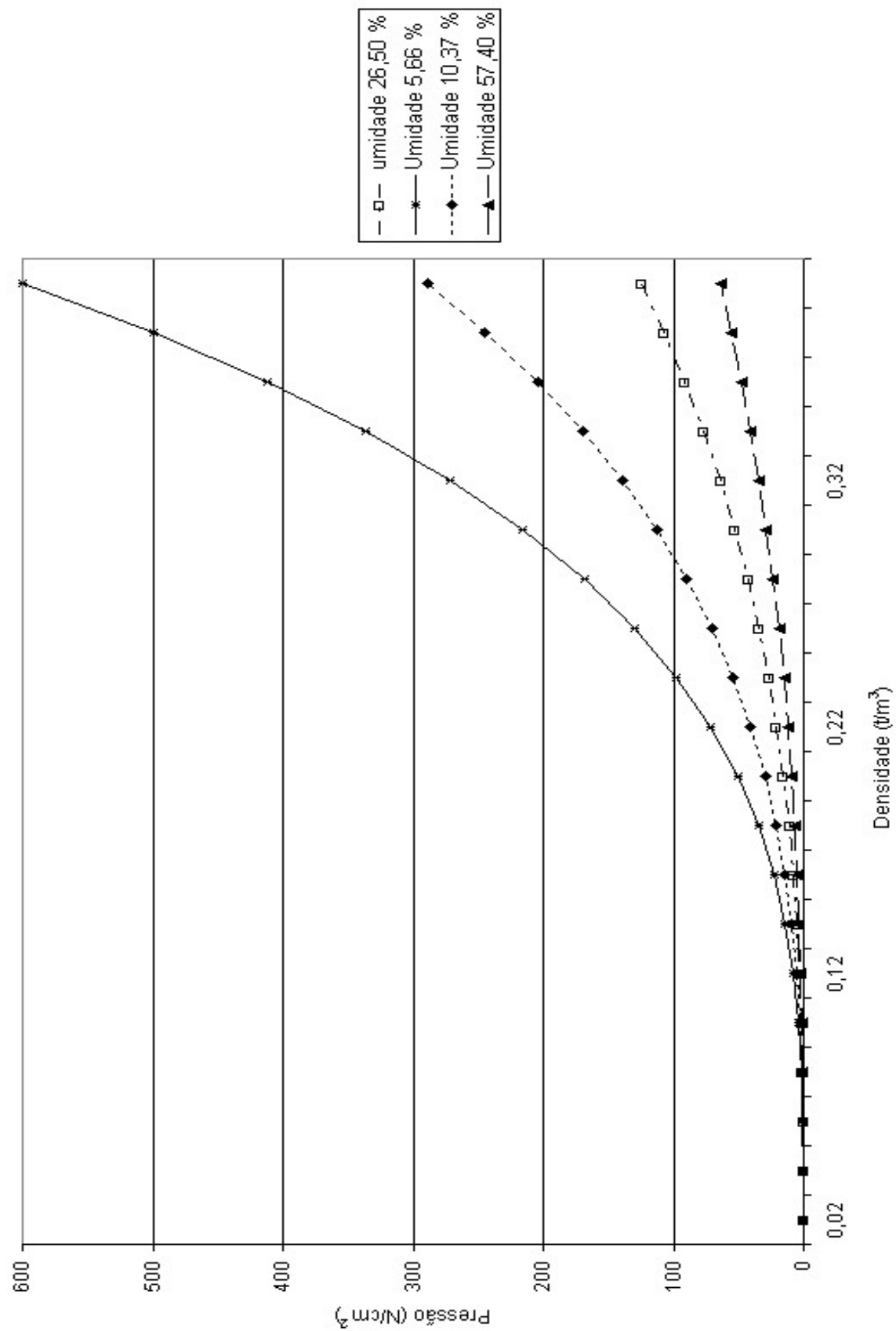


Figura 20. Curvas Pressão x Densidade para taxa de deformação de 30 mm/s.

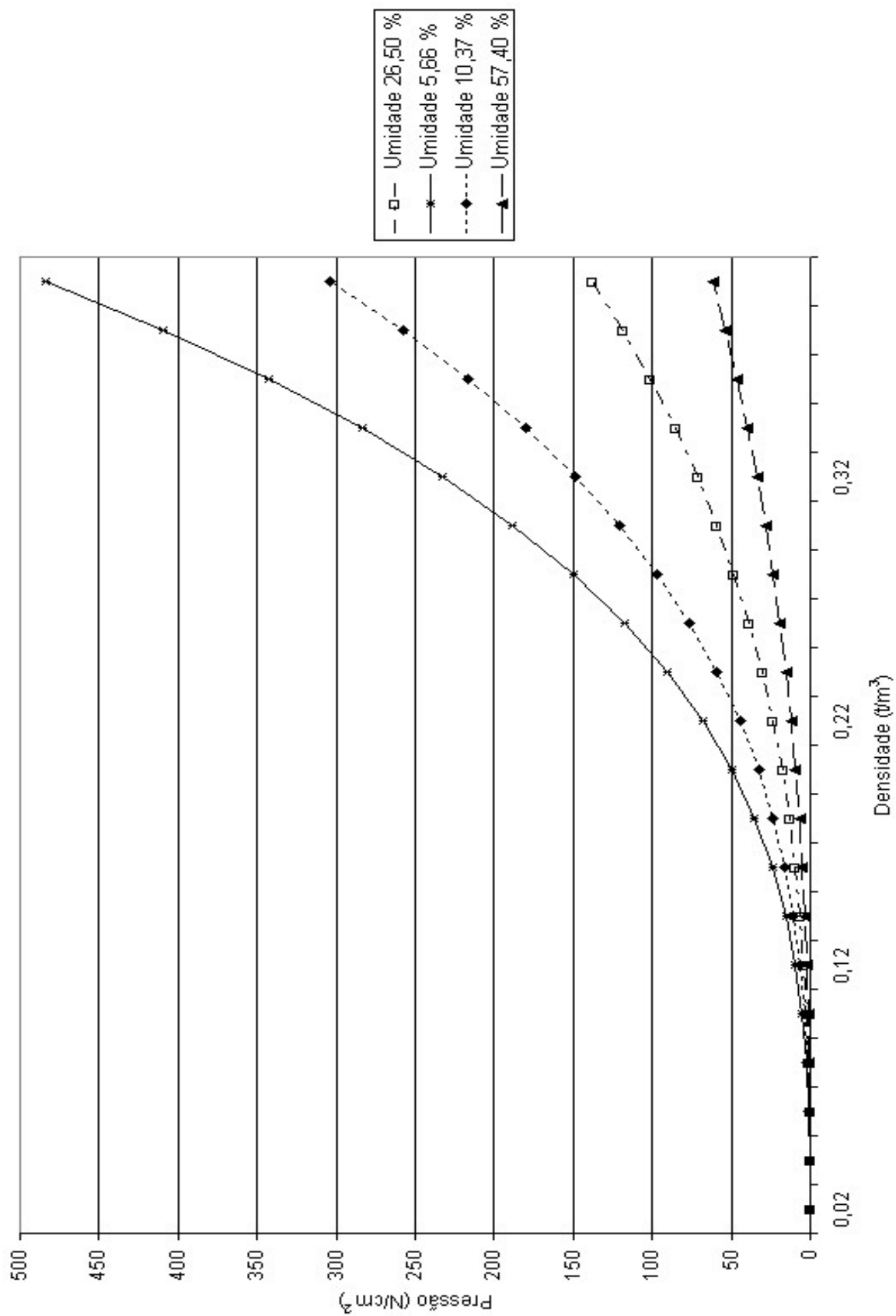


Figura 21. Curvas Pressão x Densidade para taxa de deformação 40 mm/s.

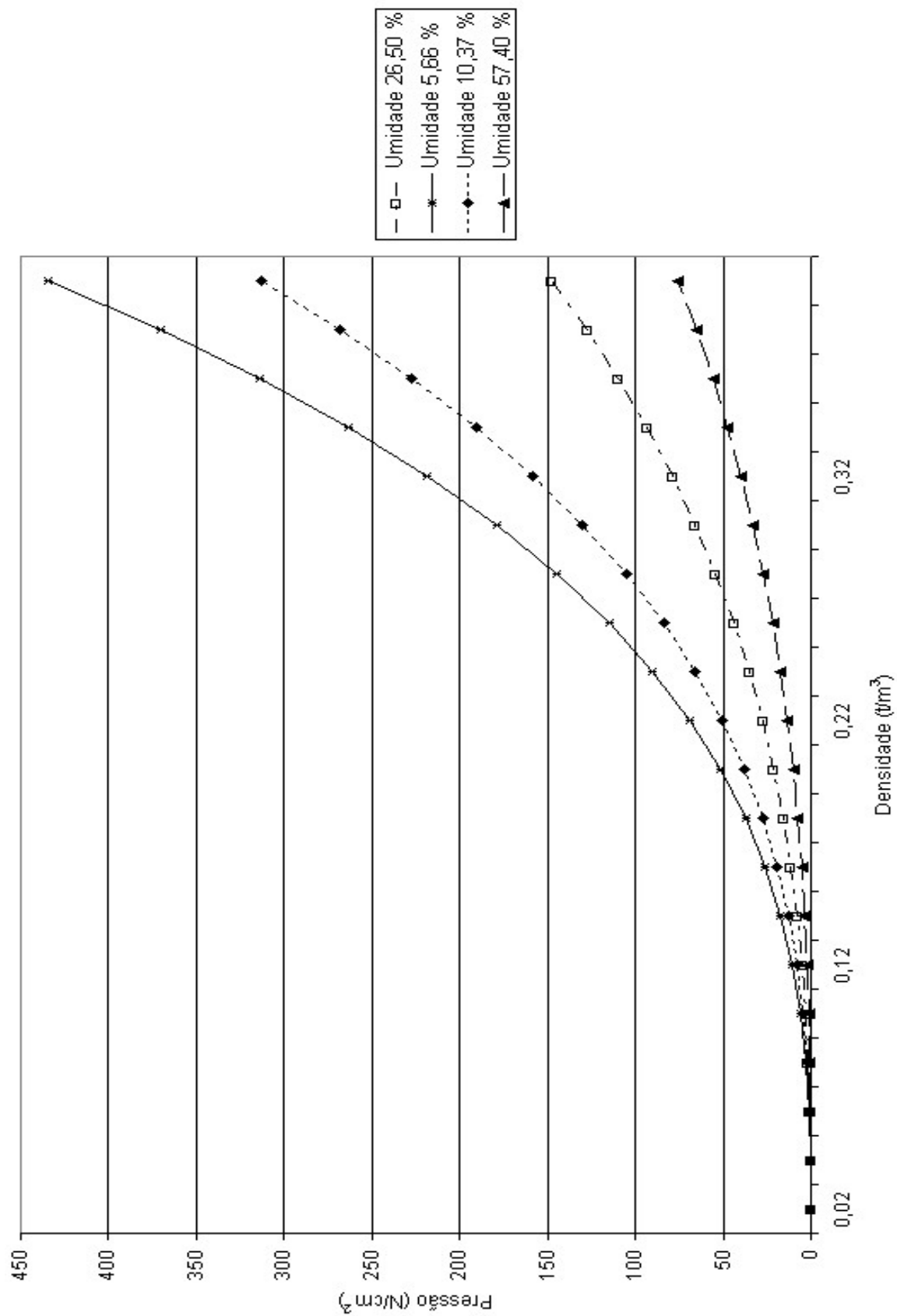


Figura 22 - Curvas Pressão x Densidade para taxa de deformação 43 mm/s.

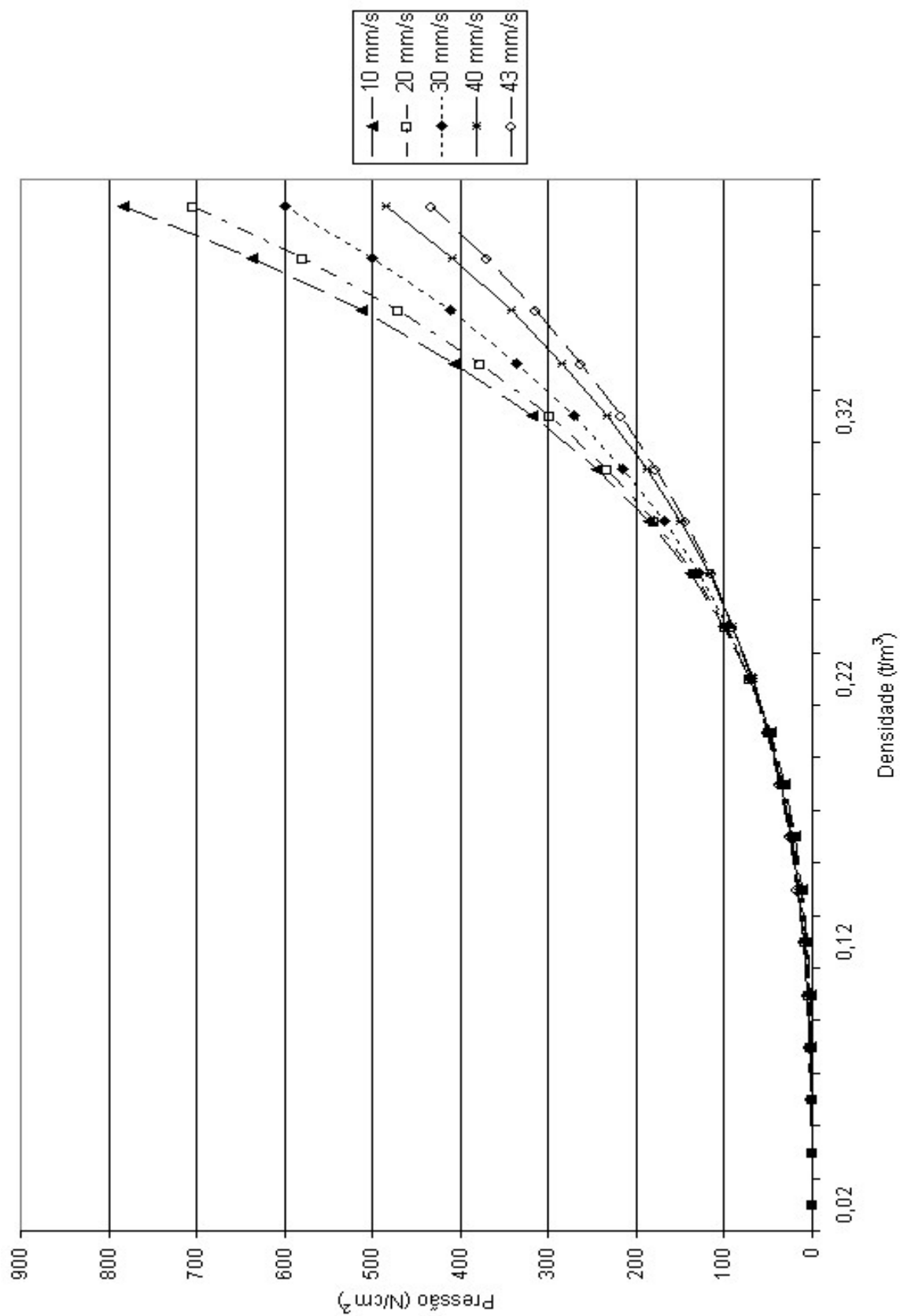


Figura 23. Curvas Pressão x Densidade para grau de umidade 5,66%.

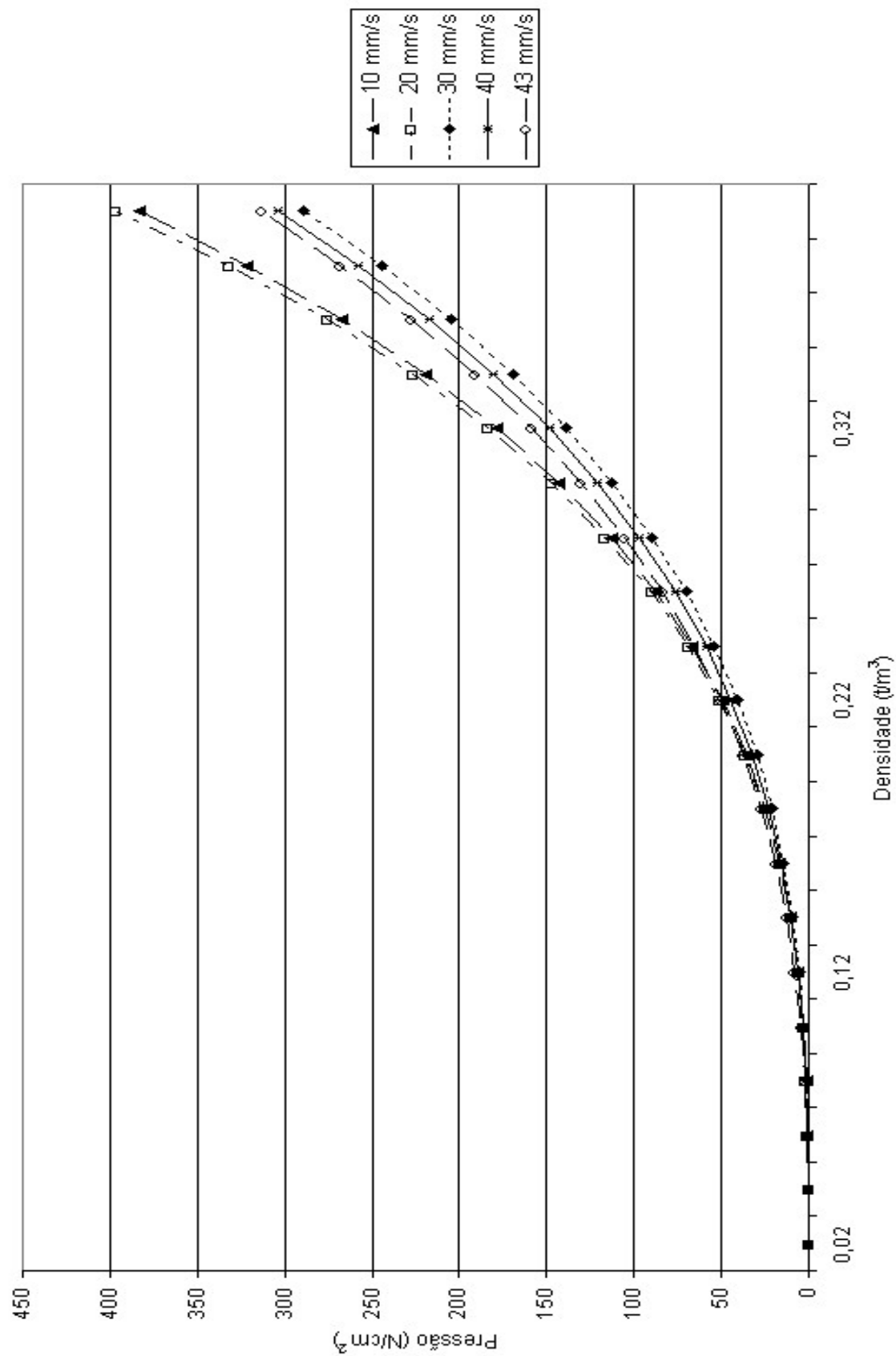


Figura 24. Curvas Pressão x Densidade para grau de umidade 10,37 %.

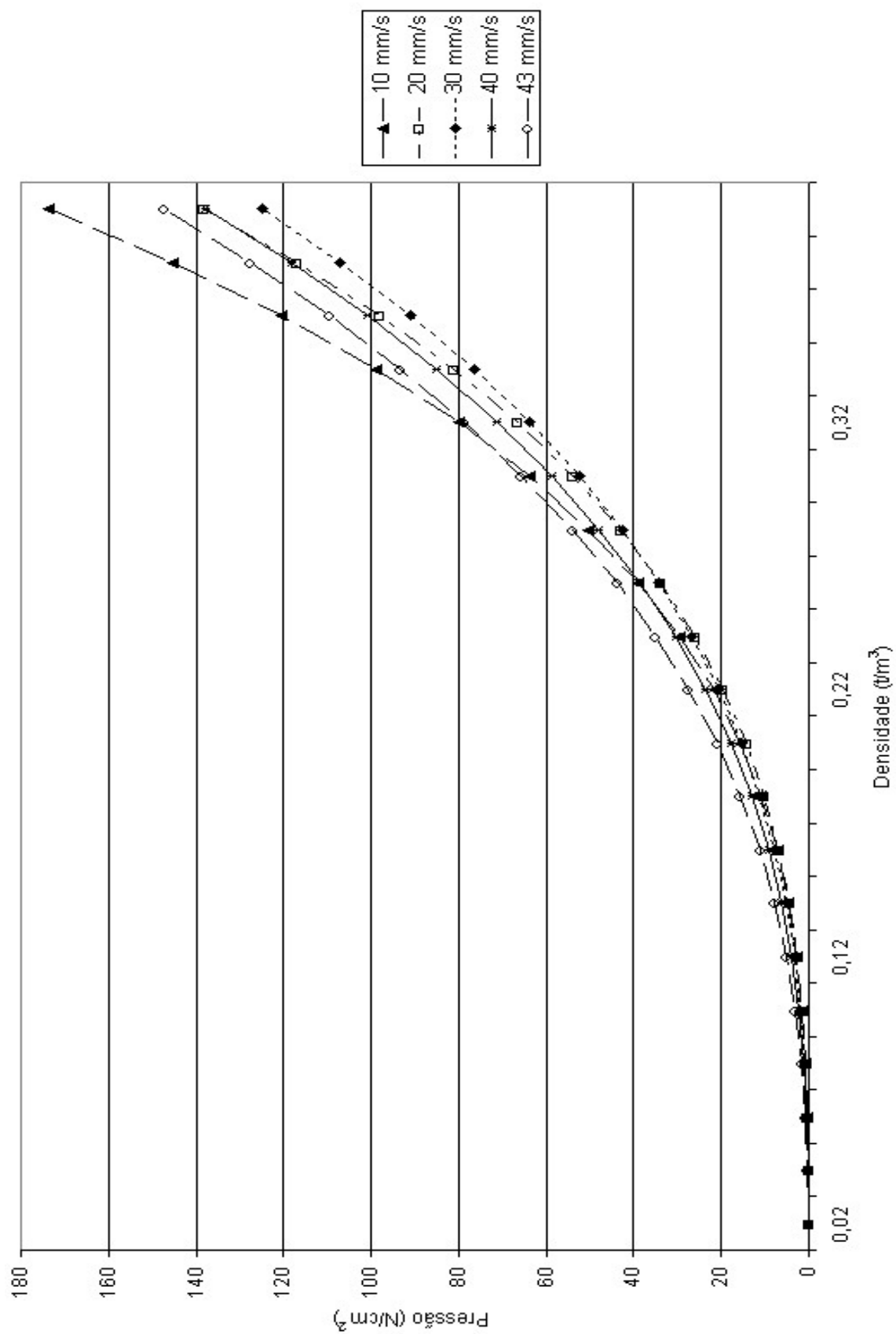


Figura 25. Curvas Pressão x Densidade para grau de umidade 26,50%.

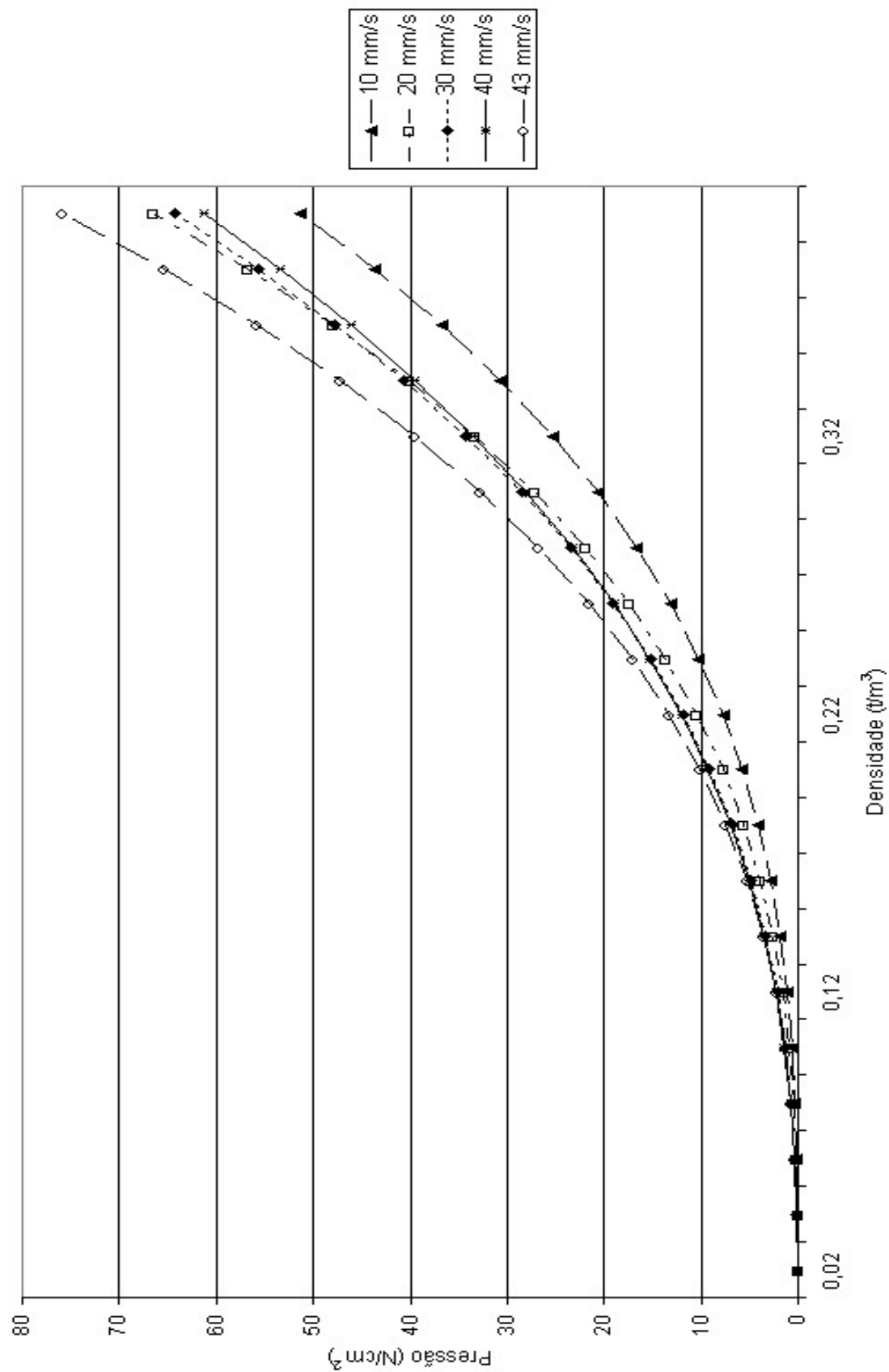


Figura 26. Curvas Pressão x Densidade para grau de umidade 57,40 %.

A análise comprova a influência do grau de umidade para todas as taxas de deformação, confirmando assim a influência informada pela teoria. Contudo, quando se faz a mesma análise em relação à taxa de deformação, não se observa influência evidente, principalmente, para valores de densidade menores que $0,30 \text{ t/m}^3$.

O aspecto interessante aqui é o de verificar como ocorre a influência do grau de umidade nos coeficientes da relação pressão aplicada x densidade aparente.

Para ambos os coeficientes a e b foi elaborado um gráfico representando a variação do coeficiente em função da condição de ensaio aplicada, conforme ilustra os gráficos a seguir, figuras 27 e 28.

Em relação ao coeficiente a , o grau de umidade apresenta maior influência a baixas umidades, conforme ilustra o ponto 5,66 % do gráfico para as taxas de deformação utilizadas, entretanto à medida que aumenta o grau de umidade, observa-se a pouca influência no coeficiente a , conforme ilustra o ponto 57,40 %.

A análise para o coeficiente b demonstra que a influência do grau de umidade não é evidente como para o coeficiente a . Independente da taxa de deformação o aumento do grau de umidade provoca um pequeno decréscimo no valor do coeficiente b .

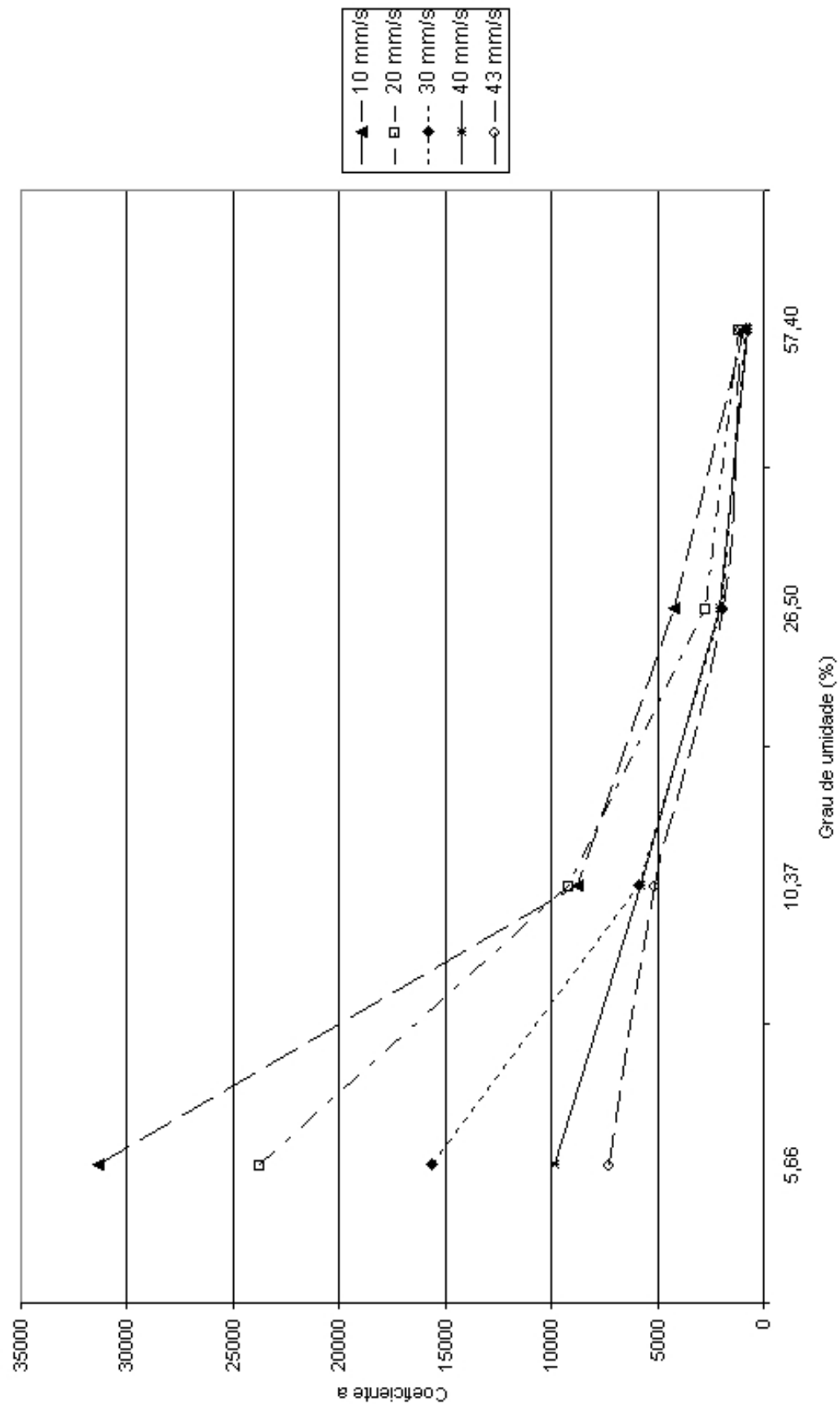


Figura 27. Influência do Grau de Umidade no Coeficiente a .

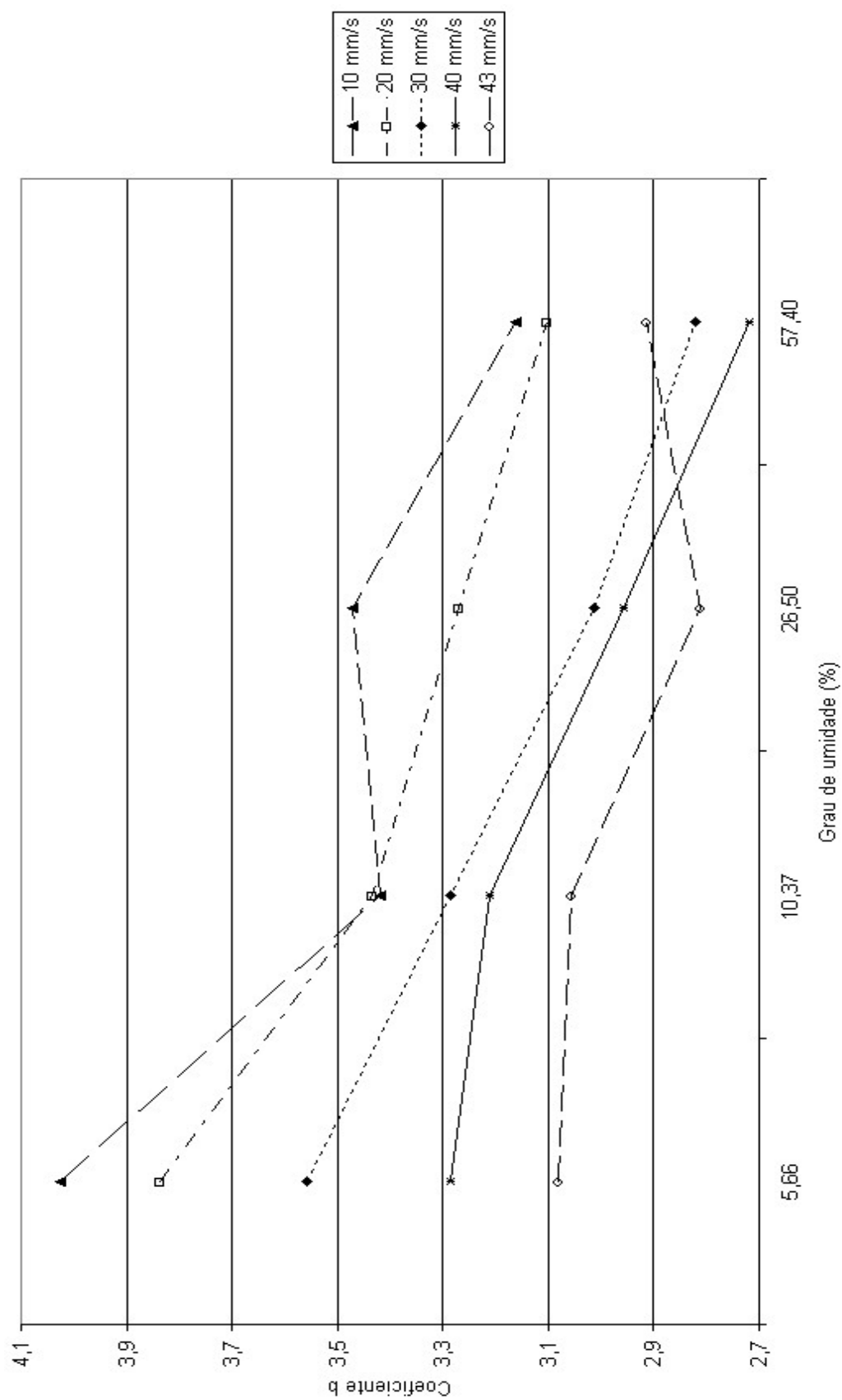


Figura 28. Influência do Grau de Umidade no Coeficiente *b*.

Deve-se destacar que a máquina de ensaios MTS estava regulada para atingir a velocidade de 50 mm/s, sua máxima taxa de deformação ou velocidade de deslocamento do êmbolo. Entretanto, em termos reais a máxima taxa de deformação alcançada foi de 43 mm/s. Este se deve ao fato de que a máquina de ensaios é um equipamento hidráulico e a bomba de acionamento não alcança vazão suficiente para deslocar o êmbolo na velocidade desejada.

Um importante diferencial neste trabalho está relacionado às taxas de deformação utilizadas. Em trabalhos análogos realizados anteriormente por outros pesquisadores, as taxas empregadas estavam limitadas a valores próximos a 100 mm/min, em virtude das limitações técnicas das máquinas de ensaios utilizadas.

5.3 Análise da energia específica no ensaio de compressão

Foi analisada a energia específica utilizada no ensaio de compressão nas vinte condições de tratamento, conforme tabelas 7 a 11, representada pela figura 29.

Tabela 7. Energia específica utilizada no ensaio de compressão para taxa de deformação de 10 mm/s.

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
5,66 %	1	0,16	0,09	1,79
5,66 %	2	0,12	0,08	1,53
5,66 %	3	0,15	0,08	1,77
5,66 %	4	0,14	0,08	1,63
5,66 %	5	0,14	0,08	1,65
Valores Médios		0,14	0,08	1,68

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
10,37 %	1	0,13	0,08	1,56
10,37 %	2	0,10	0,08	1,26
10,37 %	3	0,12	0,09	1,38
10,37 %	4	0,17	0,10	1,69
10,37 %	5	0,12	0,09	1,36
Valores Médios		0,13	0,09	1,45

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
26,50 %	1	0,13	0,12	1,09
26,50 %	2	0,10	0,11	0,97
26,50 %	3	0,13	0,11	1,22
26,50 %	4	0,13	0,11	1,18
26,50 %	5	0,11	0,10	1,13
Valores Médios		0,12	0,11	1,12

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
57,40 %	1	0,13	0,16	0,80
57,40 %	2	0,15	0,17	0,92
57,40 %	3	0,16	0,17	0,98
57,40 %	4	0,15	0,16	0,96
57,40 %	5	0,16	0,16	0,99
Valores Médios		0,15	0,16	0,93

Tabela 8. Energia específica utilizada no ensaio de compressão para taxa de deformação de 20 mm/s.

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
5,66 %	1	0,16	0,08	1,85
5,66 %	2	0,12	0,09	1,32
5,66 %	3	0,15	0,09	1,74
5,66 %	4	0,14	0,09	1,61
5,66 %	5	0,14	0,09	1,58
Valores Médios		0,14	0,09	1,62

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
10,37 %	1	0,12	0,08	1,41
10,37 %	2	0,17	0,09	1,75
10,37 %	3	0,16	0,09	1,66
10,37 %	4	0,14	0,09	1,68
10,37 %	5	0,17	0,10	1,73
Valores Médios		0,15	0,09	1,65

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
26,50 %	1	0,14	0,12	1,19
26,50 %	2	0,15	0,12	1,18
26,50 %	3	0,19	0,13	1,42
26,50 %	4	0,14	0,11	1,30
26,50 %	5	0,16	0,13	1,30
Valores Médios		0,16	0,12	1,28

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
57,40 %	1	0,10	0,13	0,77
57,40 %	2	0,13	0,14	0,95
57,40 %	3	0,12	0,14	0,87
57,40 %	4	0,12	0,14	0,89
57,40 %	5	0,12	0,14	0,88
Valores Médios		0,12	0,14	0,87

Tabela 9. Energia específica utilizada no ensaio de compressão para taxa de deformação de 30 mm/s.

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
5,66 %	1	0,18	0,09	1,99
5,66 %	2	0,20	0,09	2,33
5,66 %	3	0,19	0,09	2,21
5,66 %	4	0,15	0,08	1,83
5,66 %	5	0,23	0,09	2,51
Valores Médios		0,19	0,09	2,17

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
10,37 %	1	0,16	0,10	1,60
10,37 %	2	0,16	0,09	1,68
10,37 %	3	0,18	0,10	1,81
10,37 %	4	0,15	0,09	1,56
10,37 %	5	0,16	0,10	1,63
Valores Médios		0,16	0,10	1,66

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
26,50 %	1	0,18	0,12	1,41
26,50 %	2	0,16	0,12	1,35
26,50 %	3	0,20	0,12	1,72
26,50 %	4	0,17	0,13	1,25
26,50 %	5	0,14	0,12	1,18
Valores Médios		0,17	0,12	1,38

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
57,40 %	1	0,16	0,14	1,13
57,40 %	2	0,12	0,13	0,87
57,40 %	3	0,15	0,15	1,01
57,40 %	4	0,17	0,15	1,07
57,40 %	5	0,20	0,15	1,28
Valores Médios		0,16	0,15	1,07

Tabela 10. Energia específica utilizada no ensaio de compressão para taxa de deformação de 40 mm/s.

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
5,66 %	1	0,20	0,08	2,39
5,66 %	2	0,17	0,08	2,12
5,66 %	3	0,20	0,09	2,20
5,66 %	4	0,20	0,09	2,34
5,66 %	5	0,18	0,09	2,10
Valores Médios		0,19	0,09	2,23

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
10,37 %	1	0,12	0,08	1,44
10,37 %	2	0,17	0,09	1,79
10,37 %	3	0,17	0,10	1,79
10,37 %	4	0,19	0,10	1,98
10,37 %	5	0,25	0,11	2,33
Valores Médios		0,18	0,10	1,87

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
26,50 %	1	0,17	0,11	1,56
26,50 %	2	0,18	0,13	1,42
26,50 %	3	0,13	0,11	1,20
26,50 %	4	0,12	0,12	1,03
26,50 %	5	0,17	0,11	1,62
Valores Médios		0,15	0,11	1,37

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
57,40 %	1	0,18	0,16	1,16
57,40 %	2	0,13	0,14	0,92
57,40 %	3	0,17	0,15	1,11
57,40 %	4	0,14	0,13	1,08
57,40 %	5	0,14	0,15	0,97
Valores Médios		0,15	0,15	1,05

Tabela 11. Energia específica utilizada no ensaio de compressão para taxa de deformação de 43 mm/s.

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
5,66 %	1	0,21	0,09	2,46
5,66 %	2	0,22	0,09	2,59
5,66 %	3	0,19	0,08	2,18
5,66 %	4	0,19	0,08	2,36
5,66 %	5	0,20	0,09	2,32
Valores Médios		0,20	0,09	2,38

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
10,37 %	1	0,21	0,10	2,02
10,37 %	2	0,23	0,10	2,36
10,37 %	3	0,23	0,09	2,43
10,37 %	4	0,28	0,10	2,67
10,37 %	5	0,29	0,11	2,65
Valores Médios		0,25	0,10	2,43

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
26,50 %	1	0,13	0,09	1,43
26,50 %	2	0,20	0,12	1,66
26,50 %	3	0,15	0,11	1,39
26,50 %	4	0,19	0,11	1,64
26,50 %	5	0,19	0,12	1,64
Valores Médios		0,17	0,11	1,55

Umidade	Amostra	Energia (kJ)	Massa (kg)	Energia Específica (kJ/kg)
57,40 %	1	0,10	0,12	0,85
57,40 %	2	0,14	0,14	1,04
57,40 %	3	0,13	0,13	1,03
57,40 %	4	0,18	0,15	1,19
57,40 %	5	0,23	0,16	1,48
Valores Médios		0,16	0,14	1,12

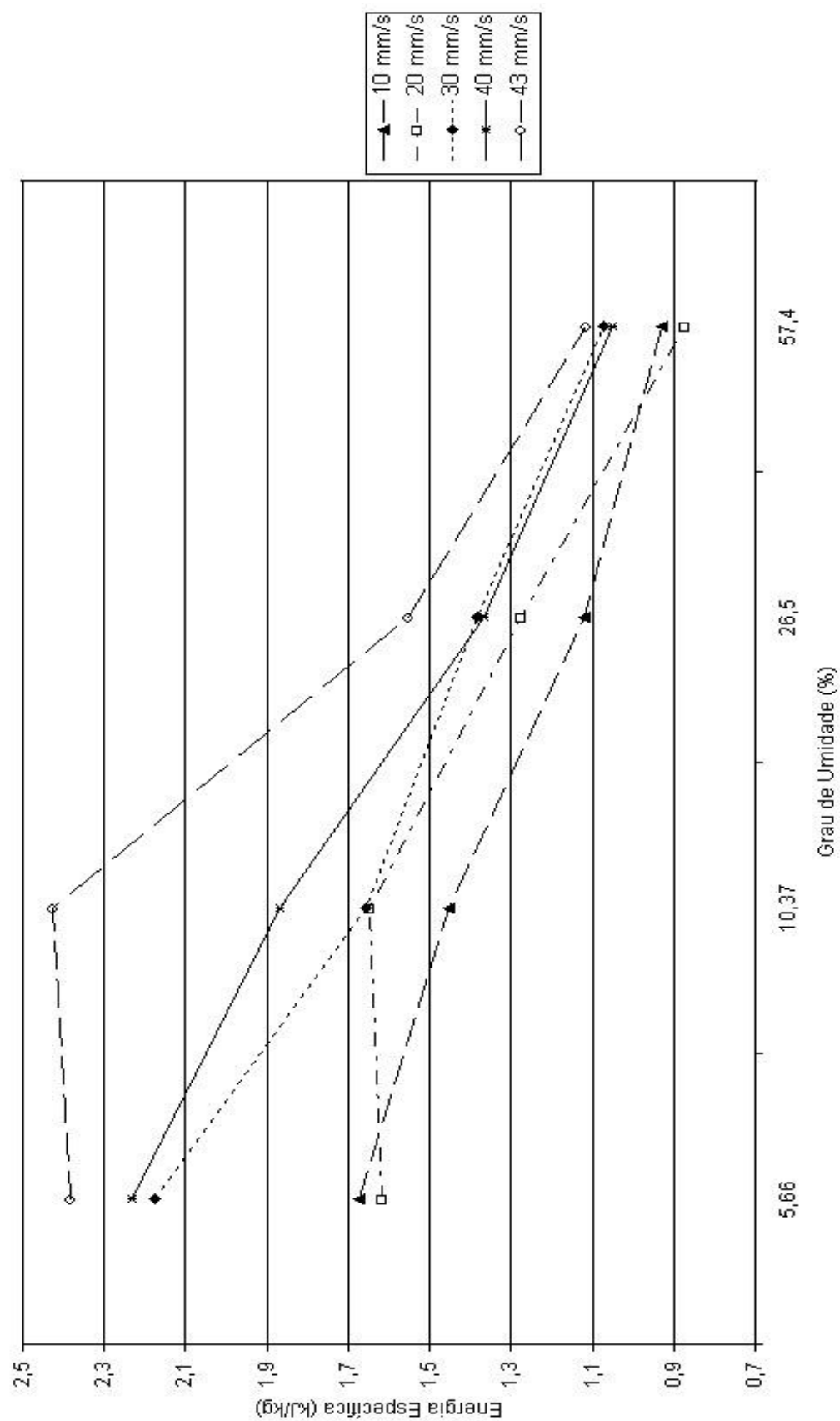


Figura 29. Variação da Energia Específica em função do Grau de Umidade (%).

Observa-se inicialmente que o aumento do grau de umidade promove redução da energia específica. Nota-se ainda, que à medida que ocorre o aumento do grau de umidade a diminui a influência da taxa de deformação. Em relação à taxa de deformação haverá maior consumo energético a medida que se eleva a taxa de deformação.

O aumento do grau de umidade promove redução da energia específica utilizada no processo de enfardamento, contudo, quando o enfoque é o transporte ou mesmo a durabilidade dos fardos o aumento do grau de umidade é um fator indesejável.

Em qualquer processo de conformação de material agrícola, um aspecto muito importante relacionado à eficiência da operação é a energia específica utilizada. O enfardamento, uma operação que promove o aumento da concentração de energia em função do aumento da concentração da massa, contudo, possui um custo que é representado pela energia específica, ou energia “gasta” por unidade de massa. Logo, para que o processo de enfardamento torne-se mais eficiente é necessário reduzir esse custo.

5.4 Análise das curvas de relaxação

Através de análise de resíduos foi observado que as curvas de relaxação do ensaio, em comparação com as curvas ajustadas pelo modelo proposto apresentavam erro médio de 10%, analisado ponto a ponto. Os maiores erros do ajuste ocorreram no instante inicial da relaxação decrescendo com o tempo.

Propôs-se então, um modelo de curva para melhor ajuste dos dados:

$$P = a e^{(-bt)} \quad (14)$$

onde, os parâmetros são os mesmos do modelo anterior (equação 12), contudo, com duplo decaimento. A análise de resíduos desse modelo em relação às curvas de relaxação experimentais apresentaram erros da ordem de 3 a 4%, sendo ainda, a fase inicial da curva que apresentava maiores erros, 6% em média.

Esse modelo proposto para representar a curva de relaxação foi adotado para as análises neste trabalho.

São apresentadas no anexo as figuras de 41 a 60 que ilustram as curvas de relaxação obtidas, curvas médias e a curva do modelo proposto.

Em relação à influência dos parâmetros grau de umidade e taxa de deformação nas curvas de relaxação é representado conforme ilustram as figuras 30 a 38.

Nos gráficos das curvas de relaxação observa-se que não é evidente o efeito dos parâmetros na relaxação da palha de cana-de-açúcar.

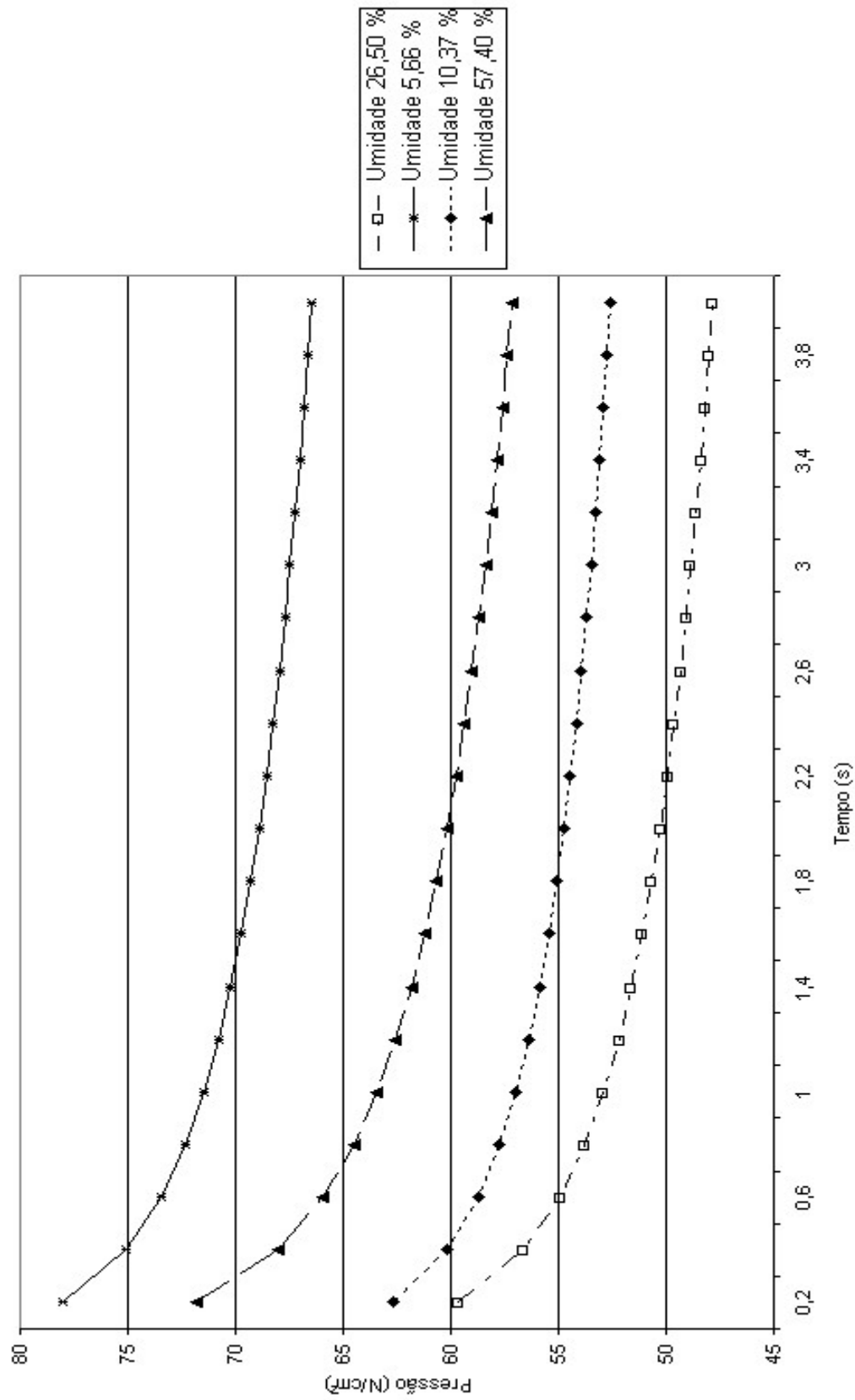


Figura 30. Curvas de Relaxação para taxa de deformação 10 mm/s.

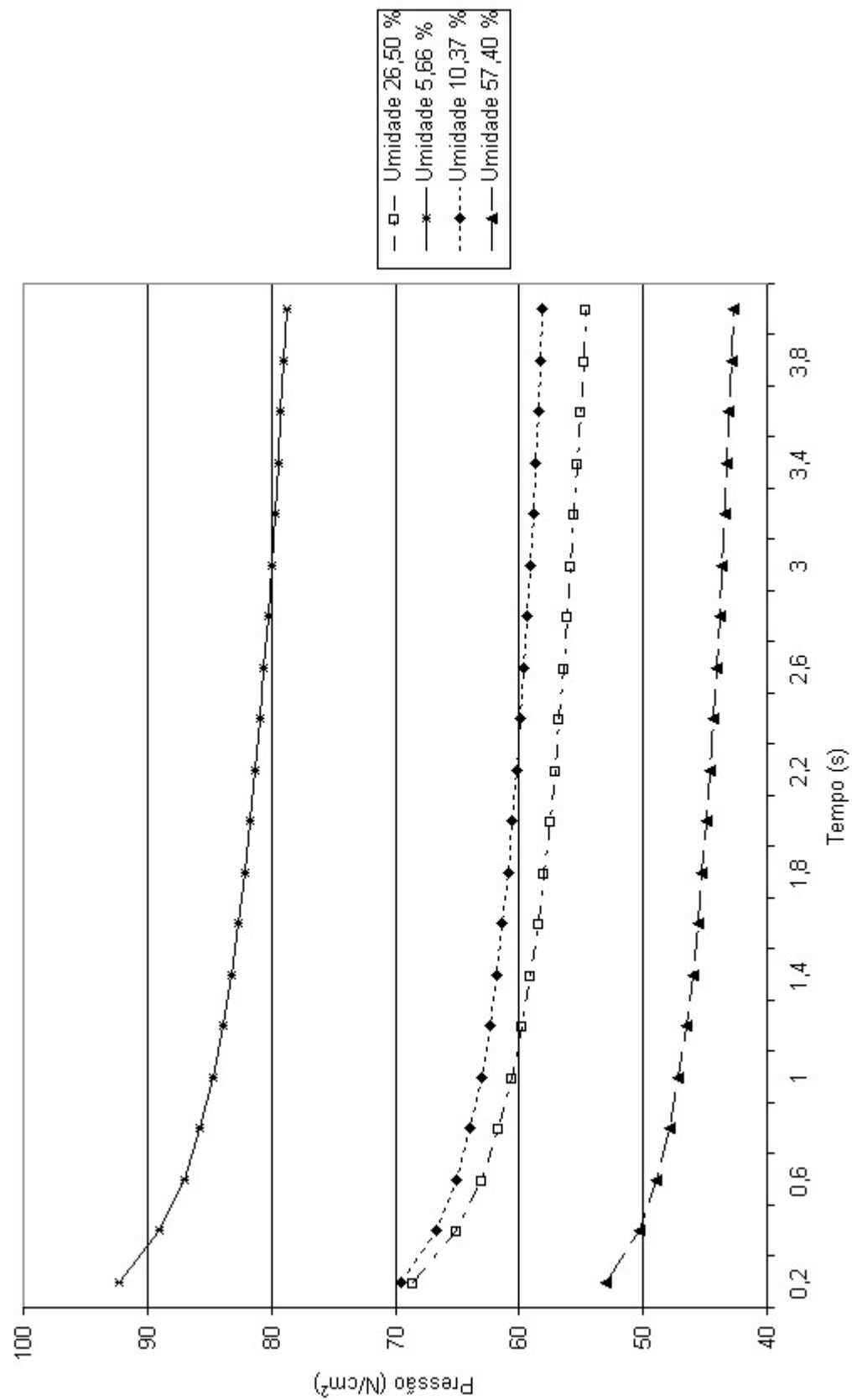


Figura 31. Curvas de Relaxação para taxa de deformação 20 mm/s.

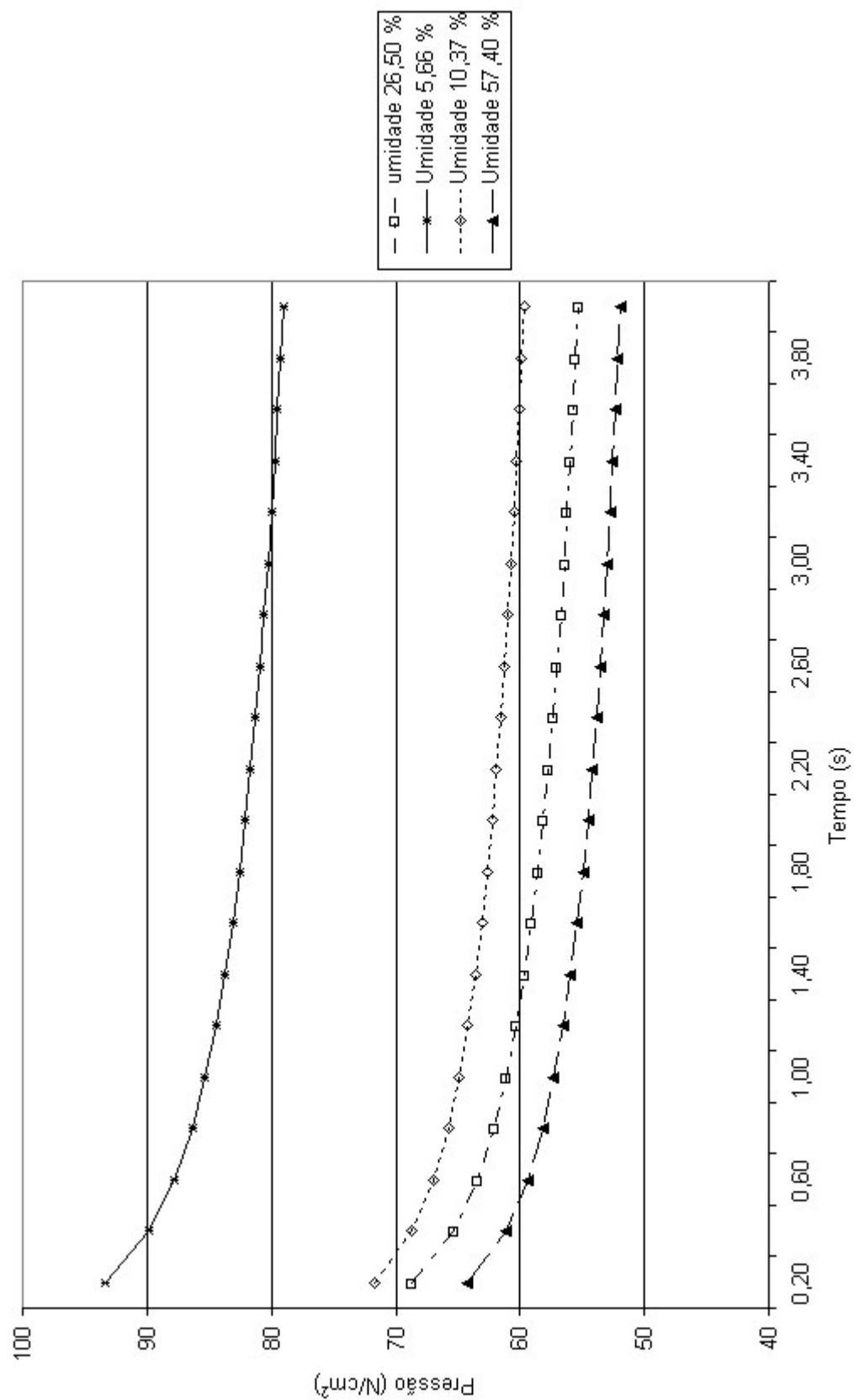


Figura 32. Curvas de Relaxação para taxa de deformação 30 mm/s.

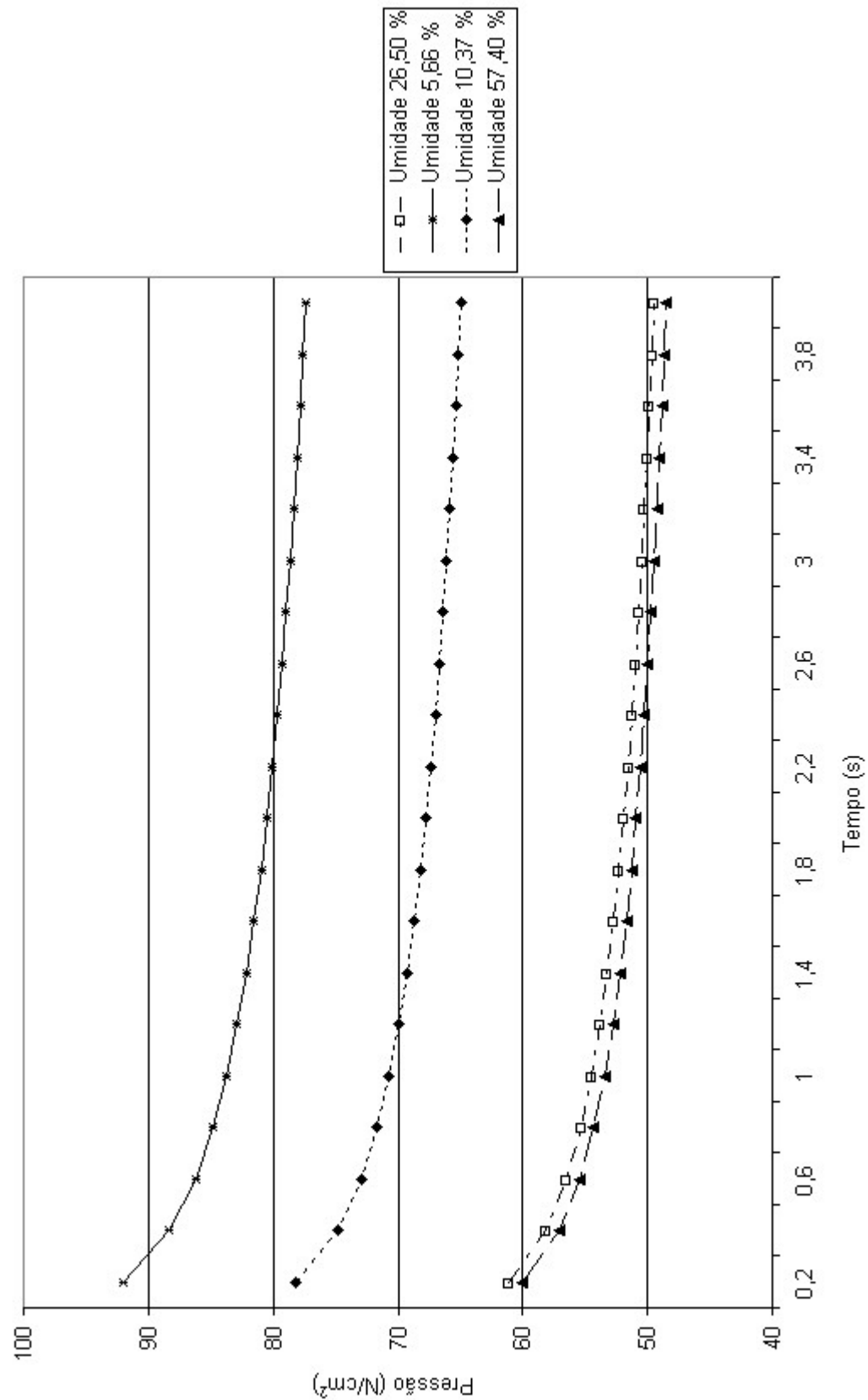


Figura 33. Curvas de Relaxação para taxa de deformação 40 mm/s.

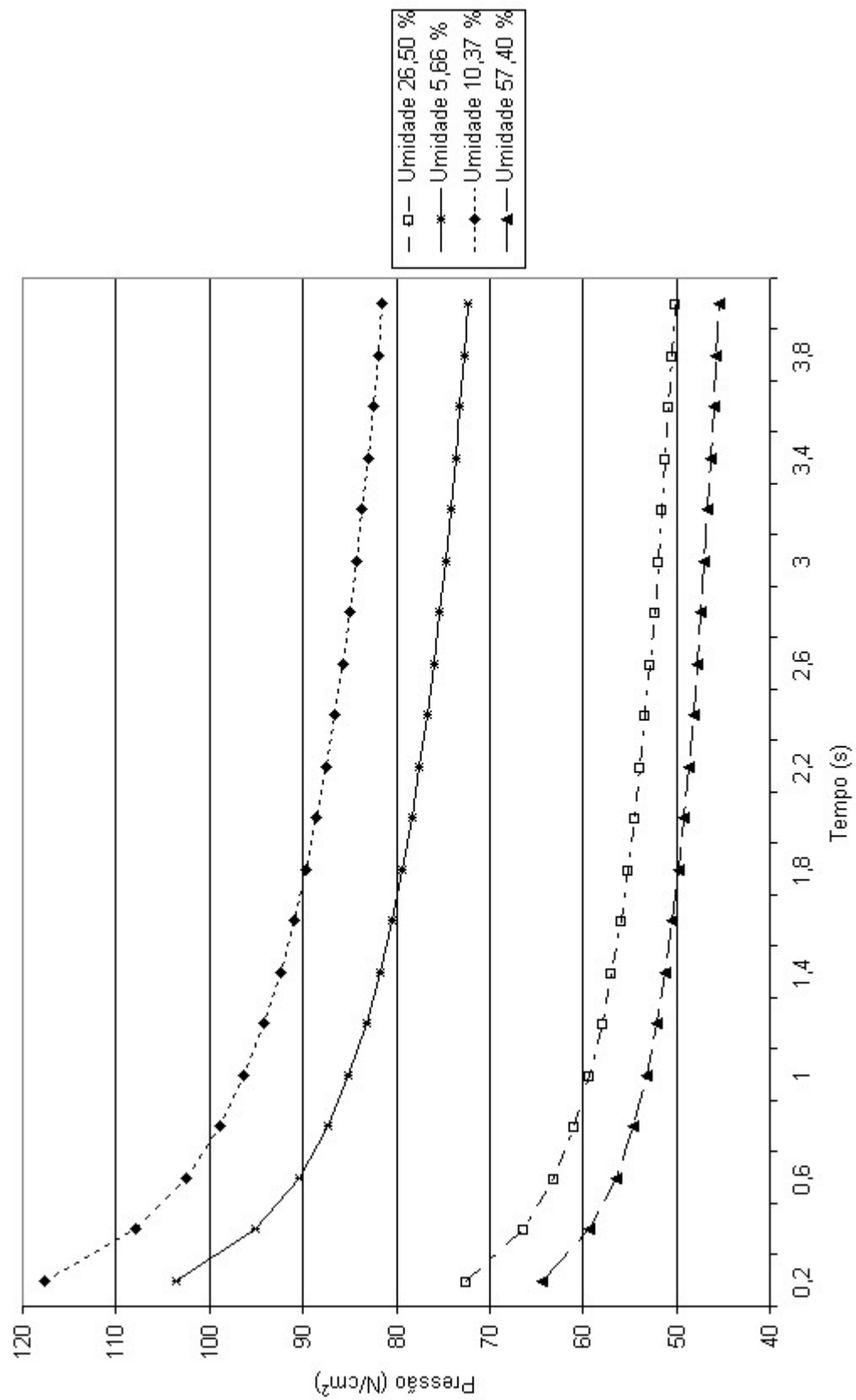


Figura 34. Curvas de Relaxação para taxa de deformação 43 mm/s.

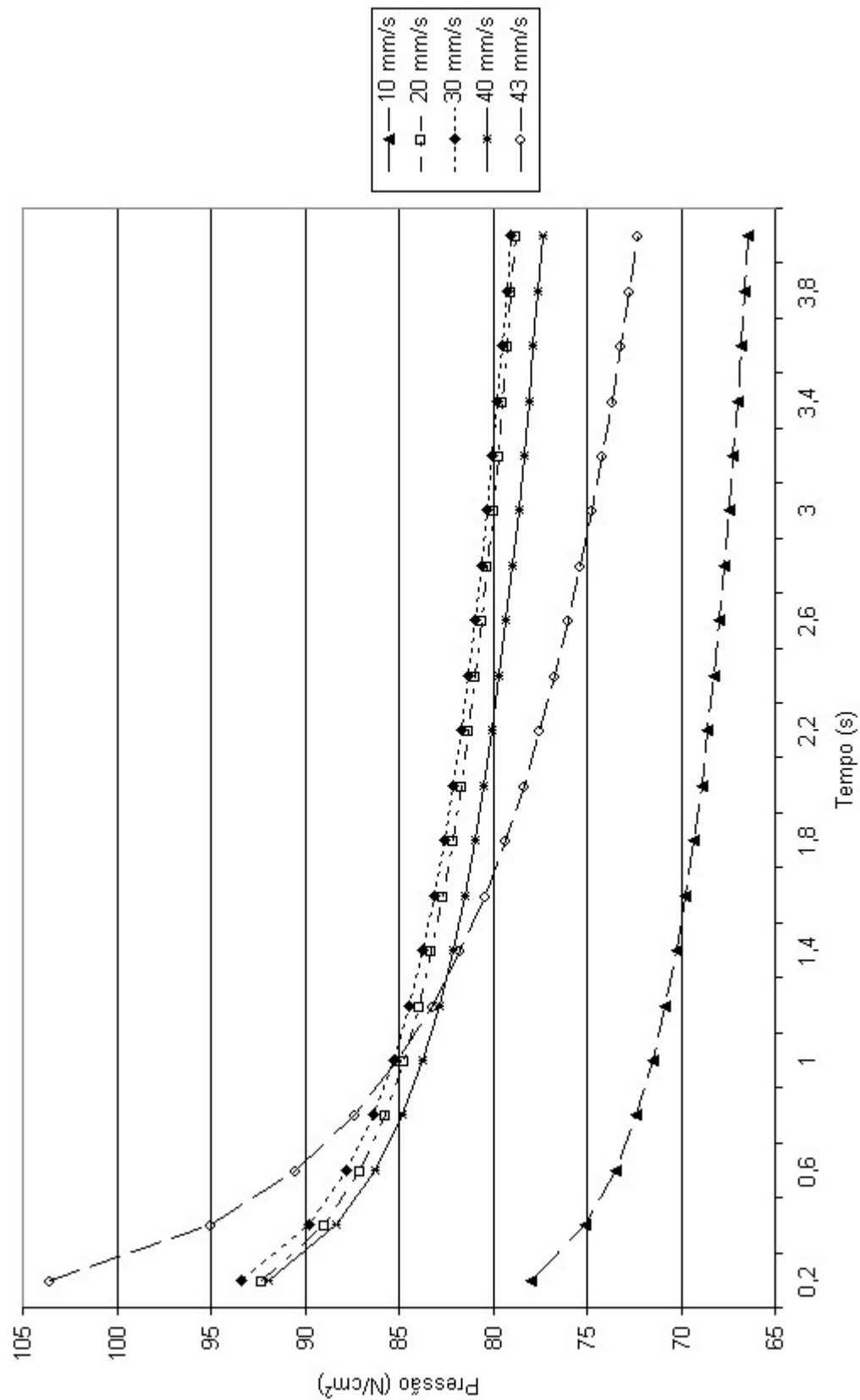


Figura 35. Curvas de Relaxação para grau de umidade 5,66%.

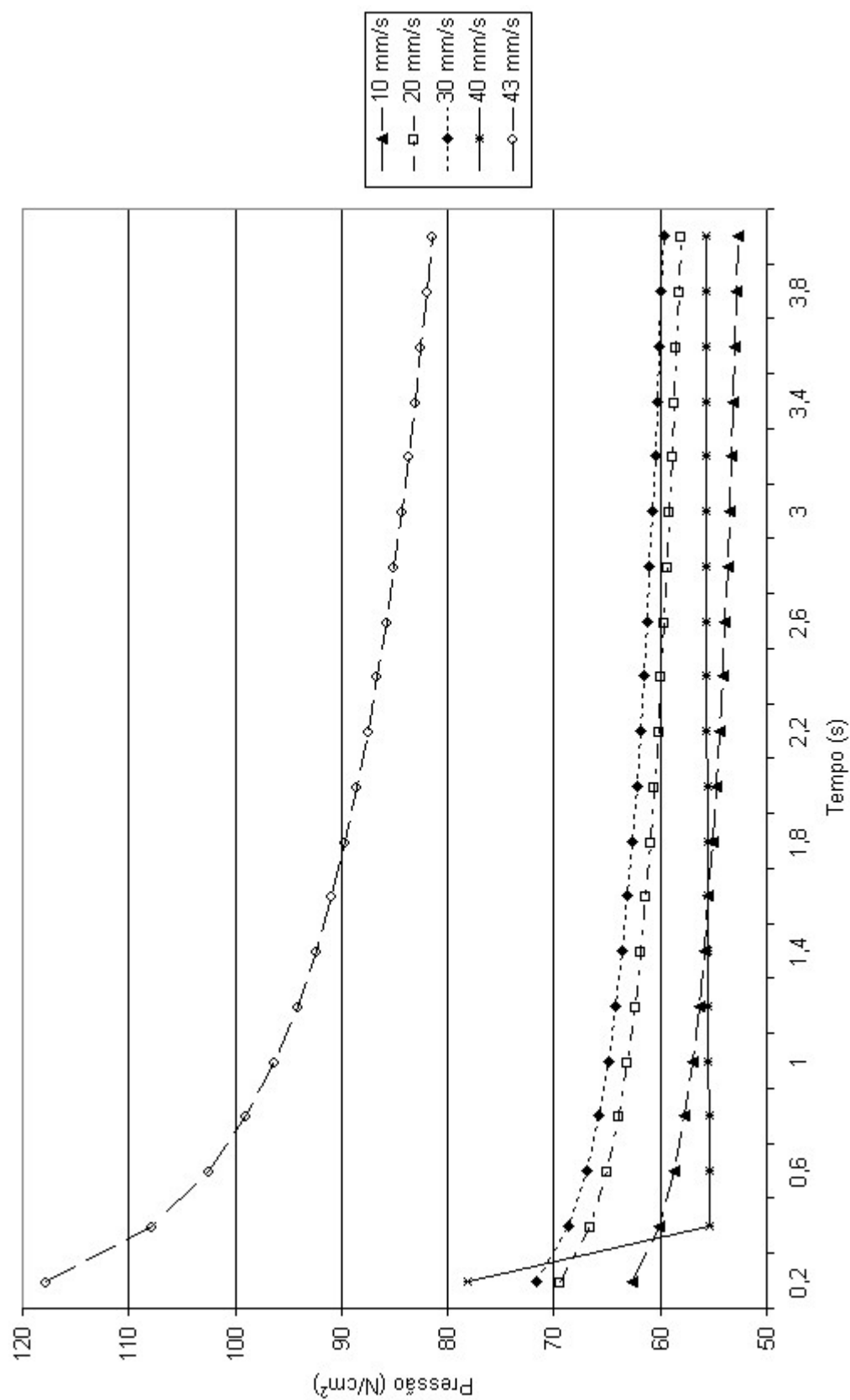


Figura 36. Curvas de Relaxação para grau de umidade 10,37%.

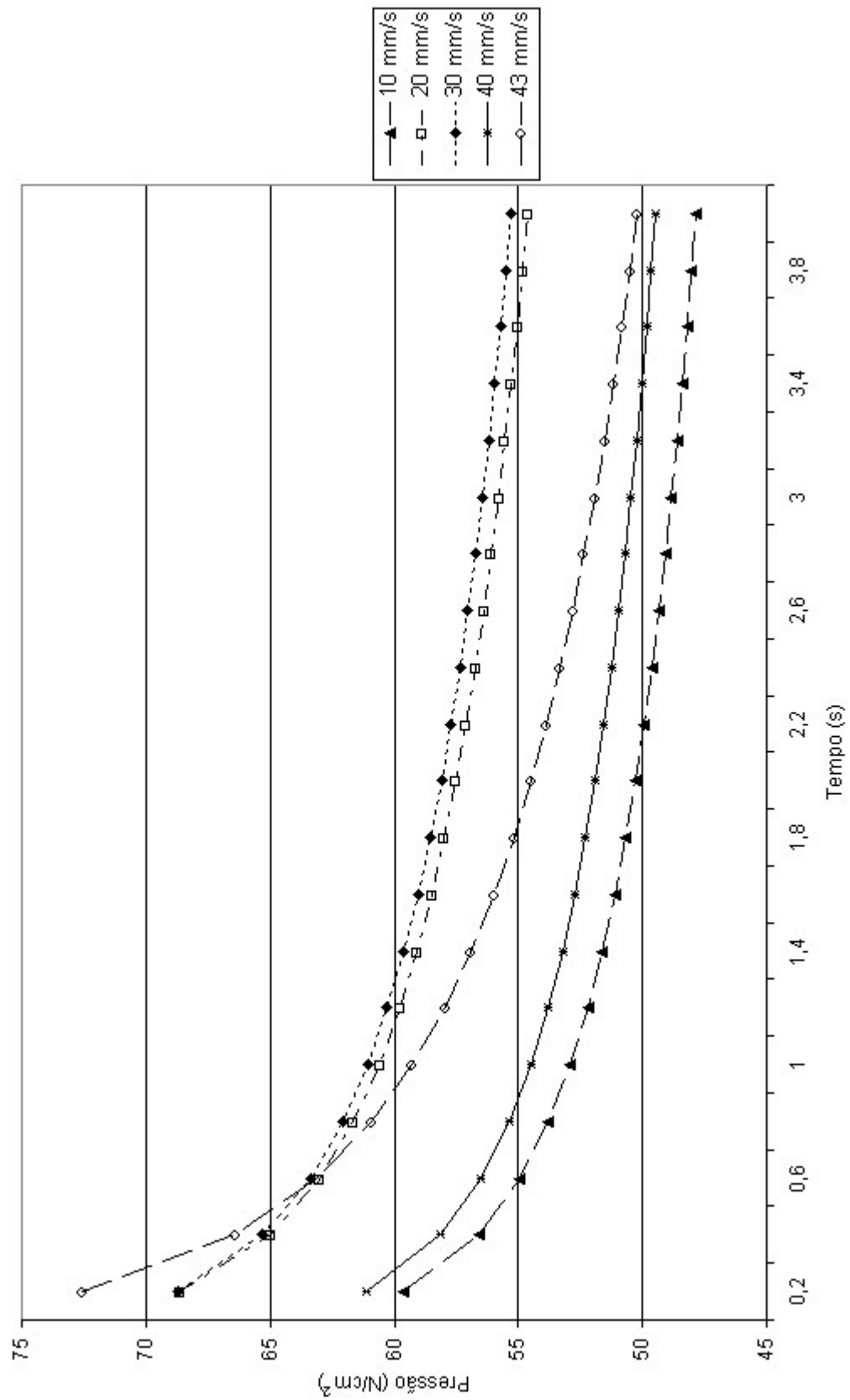


Figura 37. Curvas de Relaxação para grau de umidade 26,50%.

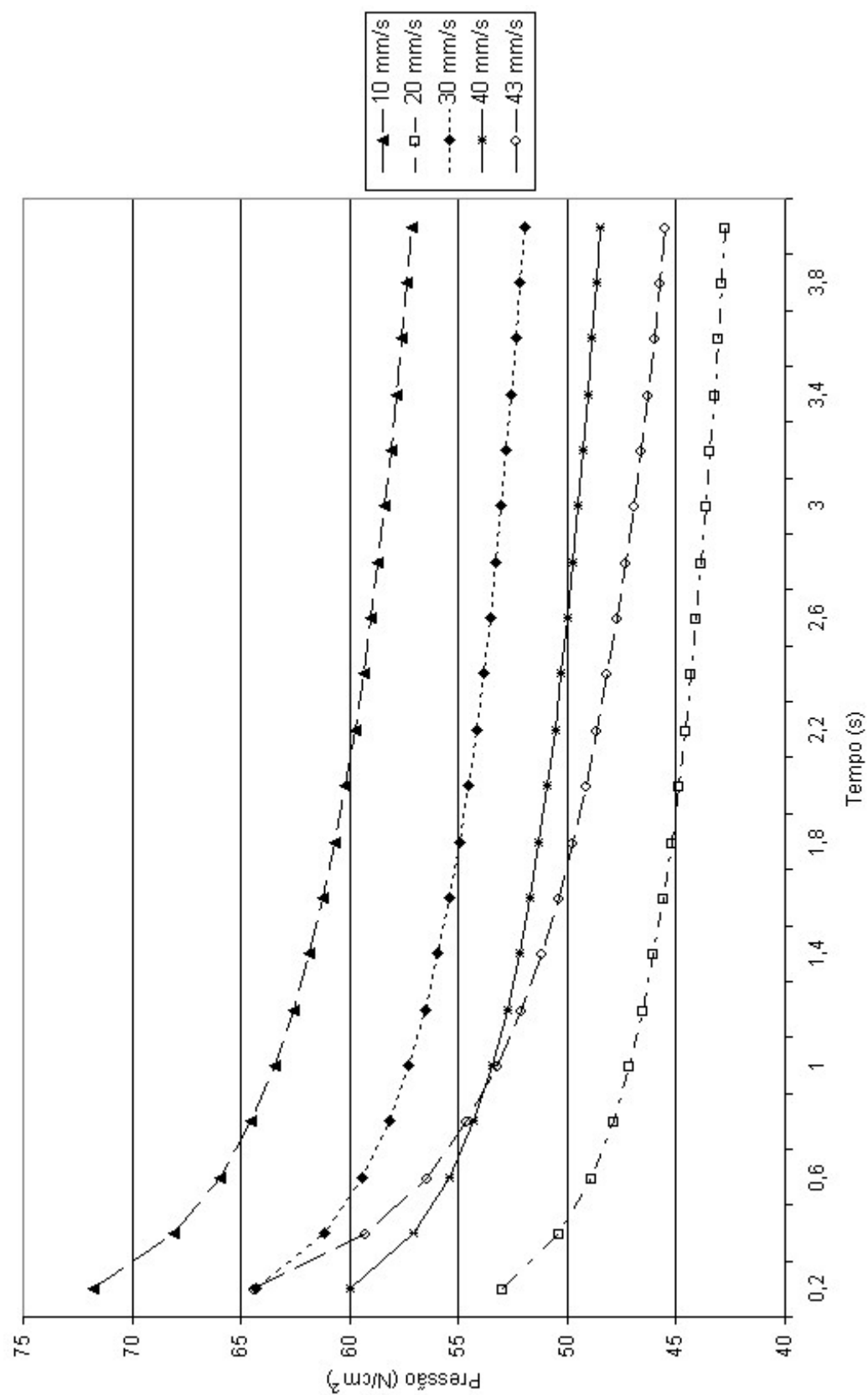


Figura 38. Curvas de Relaxação para grau de umidade 57,40%.

Um aspecto importante a ser destacado é a origem, ou instante onde se inicia a relaxação.

Em uma curva de relaxação a tensão inicial é um valor associado à sollicitação que o material sofreu anteriormente. O fator importante na análise da curva de relaxação não é o valor da tensão inicial, mas sim como ocorre o decaimento da tensão, em outras palavras, o valor do coeficiente b do modelo.

Assim sendo, o valor do coeficiente b foi determinado para os tratamentos realizados, conforme tabelas 12 a 16 e ilustrado na figura 39.

Observa-se pela figura 39 que independente da taxa de deformação o aumento do grau de umidade promove um aumento, em módulo, do coeficiente b , representando assim, um aumento no decaimento da curva de relaxação. Em relação à taxa de deformação, nota-se de modo evidente que as taxas de deformação de 10, 20, 30 e 40 mm/s não promovem nenhum efeito na variação do coeficiente b , e que somente a taxa de 43 mm/s é a que promove um maior decaimento na curva de relaxação.

Tabela 12. Valores do ajuste para os coeficientes a e b no ensaio de relaxação para taxa de deformação de 10 mm/s.

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
5,66 %	1	-0,0129	77,3632
5,66 %	2	-0,0128	65,2096
5,66 %	3	-0,0121	76,0826
5,66 %	4	-0,0123	69,0695
5,66 %	5	-0,0125	69,7905
Valores Médios		-0,0125	71,5031

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
10,37 %	1	-0,0146	55,5689
10,37 %	2	-0,0141	47,9523
10,37 %	3	-0,0141	54,6259
10,37 %	4	-0,0148	73,3158
10,37 %	5	-0,0142	53,5109
Valores Médios		-0,0144	56,9948

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
26,50 %	1	-0,0191	56,0061
26,50 %	2	-0,0186	45,0735
26,50 %	3	-0,018	55,8771
26,50 %	4	-0,0181	56,1573
26,50 %	5	-0,0185	51,3861
Valores Médios		-0,0185	52,9000

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
57,40 %	1	-0,0183	53,2651
57,40 %	2	-0,0180	63,4126
57,40 %	3	-0,0181	69,6211
57,40 %	4	-0,0187	64,6297
57,40 %	5	-0,0185	66,2391
Valores Médios		-0,0183	63,4335

Tabela 13. Valores do ajuste para os coeficientes a e b no ensaio de relaxação para taxa de deformação de 20 mm/s.

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
5,66 %	1	-0,0116	71,1074
5,66 %	2	-0,0116	108,4719
5,66 %	3	-0,012	81,2882
5,66 %	4	-0,0119	78,0125
5,66 %	5	-0,0122	84,8204
Valores Médios		-0,0119	84,7401

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
10,37 %	1	-0,0142	51,4279
10,37 %	2	-0,0143	69,1135
10,37 %	3	-0,0143	65,7065
10,37 %	4	-0,0142	61,7505
10,37 %	5	-0,0152	67,358
Valores Médios		-0,0144	63,0713

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
26,50 %	1	-0,0188	56,1099
26,50 %	2	-0,0182	58,1886
26,50 %	3	-0,0188	70,4467
26,50 %	4	-0,0182	56,8353
26,50 %	5	-0,0183	61,4258
Valores Médios		-0,0185	60,6013

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
57,40 %	1	-0,0189	40,4682
57,40 %	2	-0,0182	50,9138
57,40 %	3	-0,0186	46,1185
57,40 %	4	-0,0185	49,3817
57,40 %	5	-0,0181	48,8118
Valores Médios		-0,0185	47,1388

Tabela 14. Valores do ajuste para os coeficientes a e b no ensaio de relaxação para taxa de deformação de 30 mm/s.

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
5,66 %	1	-0,0129	81,9665
5,66 %	2	-0,0114	90,6984
5,66 %	3	-0,0122	86,6714
5,66 %	4	-0,0131	66,659
5,66 %	5	-0,013	100,56
Valores Médios		-0,0125	85,3111

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
10,37 %	1	-0,0145	65,4683
10,37 %	2	-0,0142	63,123
10,37 %	3	-0,0146	71,4018
10,37 %	4	-0,0146	59,0993
10,37 %	5	-0,0152	65,4612
Valores Médios		-0,0146	64,9107

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
26,50 %	1	-0,0178	66,0583
26,50 %	2	-0,0178	60,5199
26,50 %	3	-0,0176	69,0191
26,50 %	4	-0,0171	59,22
26,50 %	5	-0,0179	50,5505
Valores Médios		-0,0176	61,0736

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
57,40 %	1	-0,0174	57,0567
57,40 %	2	-0,0177	42,8572
57,40 %	3	-0,0175	56,1976
57,40 %	4	-0,0173	59,9607
57,40 %	5	-0,0177	70,3163
Valores Médios		-0,0175	57,2777

Tabela 15. Valores do ajuste para os coeficientes a e b no ensaio de relaxação para taxa de deformação de 40 mm/s.

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
5,66 %	1	-0,0127	87,7355
5,66 %	2	-0,0123	73,5501
5,66 %	3	-0,0129	88,5933
5,66 %	4	-0,0134	87,7356
5,66 %	5	-0,0136	81,1066
Valores Médios		-0,0130	83,7442

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
10,37 %	1	-0,0149	49,3804
10,37 %	2	-0,0145	65,7943
10,37 %	3	-0,0138	68,8092
10,37 %	4	-0,0150	76,1625
10,37 %	5	-0,0145	93,3454
Valores Médios		-0,0145	70,6984

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
26,50 %	1	-0,0173	57,345
26,50 %	2	-0,0176	60,3869
26,50 %	3	-0,018	47,4645
26,50 %	4	-0,0177	46,9685
26,50 %	5	-0,0176	60,226
Valores Médios		-0,0176	54,4782

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
57,40 %	1	-0,0189	61,2775
57,40 %	2	-0,0175	48,3152
57,40 %	3	-0,018	58,8357
57,40 %	4	-0,0169	49,0775
57,40 %	5	-0,0179	49,7721
Valores Médios		-0,0178	53,4556

Tabela 16. Valores do ajuste para os coeficientes a e b no ensaio de relaxação para taxa de deformação de 43 mm/s.

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
5,66 %	1	-0,026	88,3627
5,66 %	2	-0,0286	90,3669
5,66 %	3	-0,0265	78,5242
5,66 %	4	-0,0269	83,1261
5,66 %	5	-0,0267	84,9419
Valores Médios		-0,0269	85,0644

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
10,37 %	1	-0,027	82,3682
10,37 %	2	-0,0269	93,7179
10,37 %	3	-0,0282	89,7369
10,37 %	4	-0,0268	104,5571
10,37 %	5	-0,0253	110,9032
Valores Médios		-0,0268	96,2567

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
26,50 %	1	-0,0278	45,4498
26,50 %	2	-0,0291	65,6585
26,50 %	3	-0,03	54,034
26,50 %	4	-0,0313	65,6365
26,50 %	5	-0,0318	65,5642
Valores Médios		-0,0300	59,2686

Umidade	Amostra	Coef. b	Coef. a
57,40 %	1	-0,029	36,9088
57,40 %	2	-0,0282	49,8442
57,40 %	3	-0,0305	47,9464
57,40 %	4	-0,0295	60,0516
57,40 %	5	-0,0283	71,3015
Valores Médios		-0,0291	53,2105

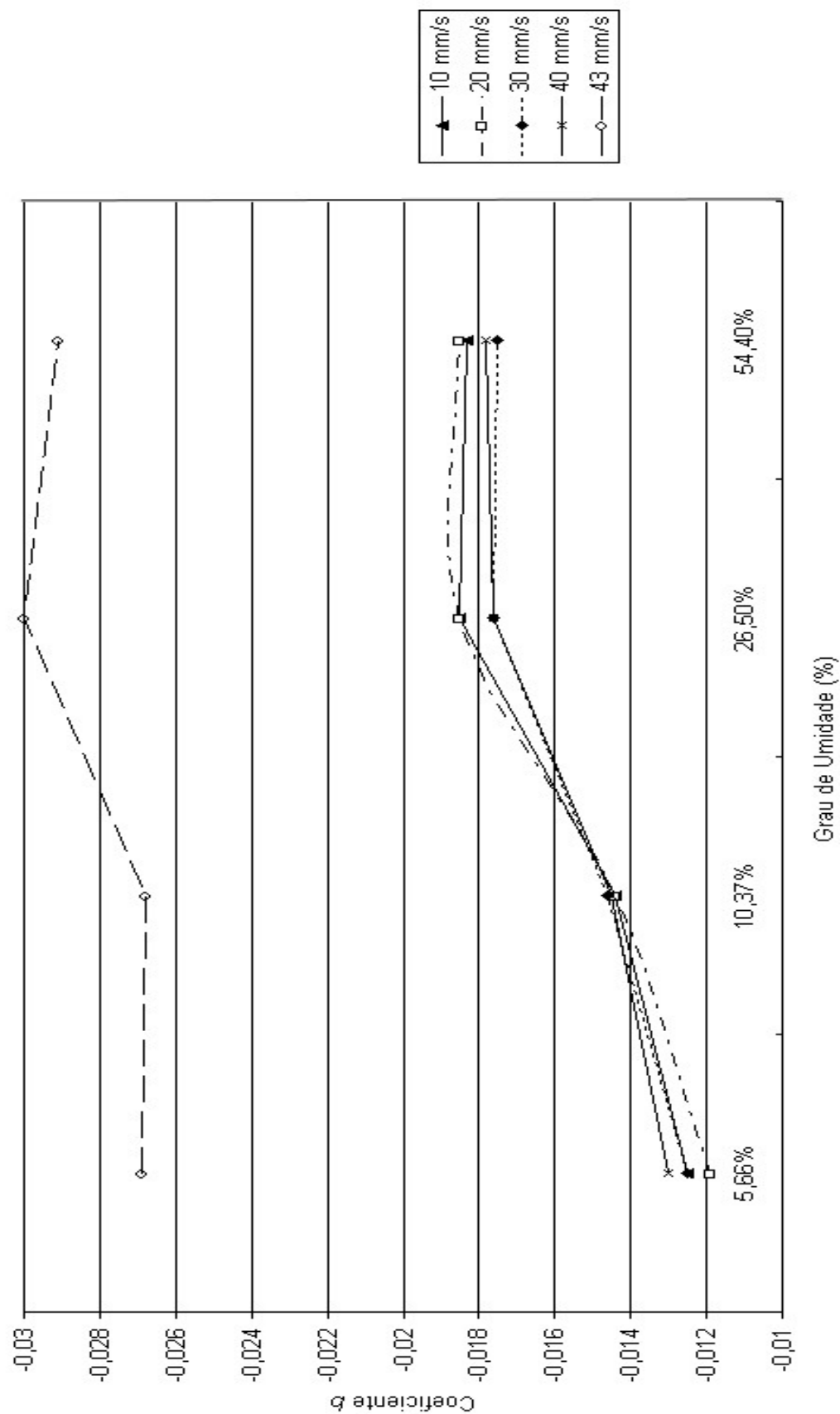


Figura 39. Variação do Coeficiente b no Ensaio de Relaxação.

5.5 Resultado do ensaio com a enfardadora

5.5.1 Determinação da Curva de Calibração da Biela

A calibração foi realizada obtendo-se a curva a seguir:

$$Y = 5,172 * X \quad (15)$$

onde: Y= massa em (kg)

X= tensão em (mV)

5.5.2 Determinação da densidade média dos Fardos

Os resultados das densidades médias dos fardos obtidas das amostras são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Determinação das densidades médias dos fardos.

Fardo Nº	Massa (kg)	Comprimento (m)	Seção (m ²) Transversal	Volume (m ³)	Densidade (t/m ³)
1	14,70	0,50	0,30 X 0,40	0,0600	0,2450
2	14,20	0,50	0,30 X 0,40	0,0600	0,2367
3	17,10	0,55	0,30 X 0,40	0,0660	0,2591
4	14,20	0,50	0,30 X 0,40	0,0600	0,2367
5	16,60	0,58	0,30 X 0,40	0,0696	0,2385
6	21,00	0,68	0,30 X 0,40	0,0816	0,2574
7	20,50	0,62	0,30 X 0,40	0,0744	0,2755
8	15,60	0,51	0,30 X 0,40	0,0612	0,2549
9	15,20	0,55	0,30 X 0,40	0,0660	0,2303
10	14,60	0,50	0,30 X 0,40	0,0600	0,2433
11	16,90	0,55	0,30 X 0,40	0,0660	0,2561
12	20,80	0,66	0,30 X 0,40	0,0792	0,2626
				Média	0,2477

O ensaio com a enfardadora alcançou os objetivos desejados, ou seja, foi possível registrar o sinal de força axial exercida na biela da enfardadora durante a operação, confirmando-se a rotação de 110 rpm, conforme indica o fabricante.

A figura 40 mostra que a variação da força exercida na biela ocorre de forma cíclica com altos valores de compressão, normalmente acima de 800 kgf.

A curva em azul representa o sinal de força sem qualquer tratamento para a eliminação dos ruídos elétricos presentes no sistema de aquisição de dados, a curva em amarelo mostra o sinal de força já filtrado com um filtro passa-baixo do tipo butterworth com frequência de corte de 20 Hz, analogamente, em vermelho o mesmo sinal de força foi filtrado com frequência de corte de 5 Hz. Nos sinais filtrados observa-se claramente a ocorrência da atenuação do sinal, todavia, a variação cíclica da força é bem definida. Para fins do cálculo da energia do processo é recomendável que se utilize a curva sem a filtragem, pois o ruído elétrico presente apresenta média nula.

O sinal de pulso proveniente do sensor de deslocamento acoplado ao chassi do implemento mostra que o implemento em condição de operação normal não apresenta variação da rotação de trabalho.

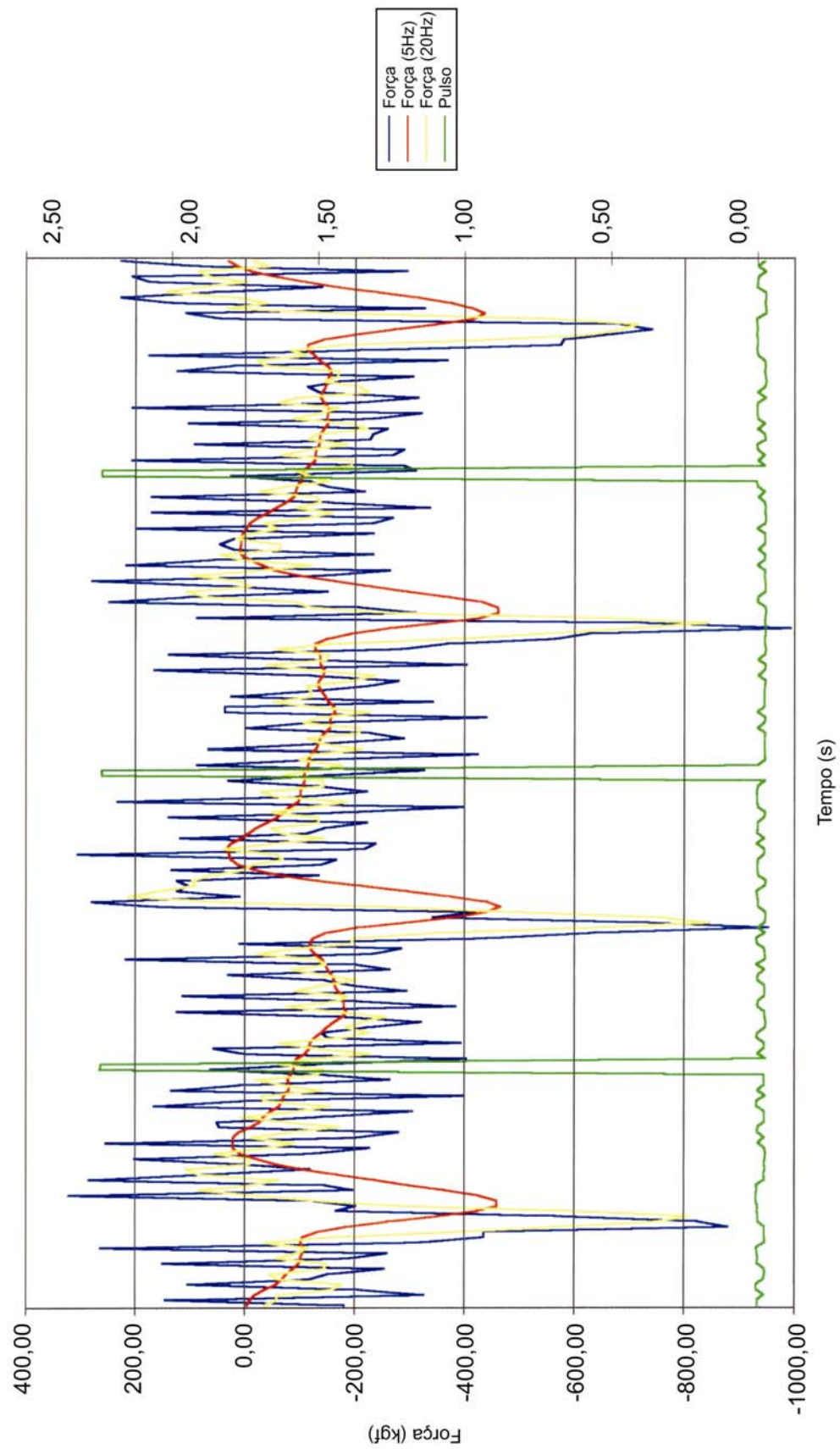


Figura 40. Variação da Força Atuante na Biela da Enfardadora

6 Conclusões

Um avanço caracterizado no trabalho foi a utilização de corpos de prova com dimensões superiores aos utilizados em trabalhos anteriores executados por outros autores, normalmente, em função das limitações técnicas das máquinas de ensaio, era necessária realizar os ensaios mecânicos com corpos de prova de diâmetro de aproximadamente 50 mm. Outro aspecto importante está relacionado às altas taxas de deformação conseguidas com o MTS, os trabalhos publicados mencionam taxas de 80 a 100 mm/min . Obviamente, como se pretende caracterizar um material mais próximo a realidade é necessário também que o material seja solicitado de modo mais dinâmico, ou seja, próximo aos implementos acondicionadores.

Na relação pressão aplicada x densidade aparente analisada no ensaio de compressão, observou-se claramente o efeito do grau de umidade combinado com a taxa de deformação. Para baixos graus de umidade o aumento da taxa de deformação promove um relevante aumento na pressão de trabalho e em consequência na energia específica utilizada, entretanto, para altos graus de umidade o aumento da taxa de deformação não implica de modo evidente no aumento da pressão e a energia.

Em relação ao processo de conformação do material, ou enfardamento, o aumento da umidade promove a compressão do material de modo mais fácil, gasta-se menos energia. Porém, em relação à durabilidade do fardo o aumento do grau de umidade promove uma diminuição da durabilidade do fardo e em relação ao transporte de fardo, evidentemente, é indicado o transporte de material com menor umidade.

A análise do ensaio de relaxação demonstrou que o modelo proposto corresponde adequadamente aos ensaios realizados. Foi observado que o aumento

da umidade promove o aumento do decaimento da função de relaxação. Já o aumento da taxa de deformação de 10 para 40 mm/s não influenciou no comportamento da função, somente para a taxa de 43 mm/s é que houve um aumento no decaimento da função.

O ensaio com a enfardadora foi uma contribuição importante para um melhor entendimento do comportamento mecânico da palha no processo de enfardamento, bem como uma relevante base de dados para um possível desenvolvimento de um protótipo mais eficiente. A escolha do sistema de aquisição de dados, assim como a instalação e metodologia de calibração demonstraram ser amplamente satisfatório.

7 Recomendações Para Trabalhos Futuros

Na execução deste trabalho pôde-se observar a necessidade de novos estudos relacionados ao assunto.

Trabalhar com corpos de prova com diferentes diâmetros e com seção retangular.

Estabelecer uma metodologia de preparo do material com diferentes tamanhos de corte.

Realizar o ensaio com a enfardadora para diferentes graus de umidade.

Idealizar um projeto de instrumentação para uma enfardadora cilíndrica.

Realizar uma análise econômica do processo de enfardamento para utilização do palhiço de cana-de-açúcar como fonte energética.

8 Referências Bibliográficas

1. BELLINGER, P. L., McCOLLY, H. F. Energy Requeriments for Forming Hay Pellets. **Agricultural. Engineering**, v.42, p. 180-181, 244-247, 1961.
2. BRUN, H. D., ZIMMERMAN, A., NIEDERMEIER, R. P., Development in Pelleting Forage Crops. **Agricultural. Engineering**, v.40, n.4, p. 204- 207, 1959.
3. BUTLER, J. L., COLLY, H. F., Strain Gages Determine Pressure-Displacement Relationships. **Agricultural. Engineering**, v.40, n. 6, p. 343-344, 1959.
4. CHEN, P.,FRIDLEY Analytical Method for Determining Viscoelastic Constants of Agricultural Materials. **Transactions of ASAE**, p. 1103-1106, 1972.
5. CRISTIANSEN, R. M. **Theory of Viscoelasticity - an introduction**. New York: Academic Press, 1982. 364p.
6. FAVORODE, M. O., O'CALLAGHAN, J. R. Theorical Analysis of the Compression of Fibrous Agricultural Materials. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.35, n.3, p. 175-191, 1986.
7. FLÜGGE, W. **Viscoelasticity**. New York: Springer-Verlag, 1975. 194p.
8. MASE, G. E. **Theory and Problems of Continuum Mechanics**. New York: Mcgraw-Hill, 1970. 221p.

9. MOHSENIN, N. N. **Physical Properties of Plant and Animal Materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1970.
10. MOHSENIN, N. N., ZASKE, J. Stress Relaxation and Energy Requeriments in Compaction of Unconsolidated Materials. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.21, n.2, p. 193-205, 1976.
11. MOLINA Jr, W.F. **Enfardamento de Resíduo de Colheita de Cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): Avaliação dos Desempenhos Operacional e Econômico**. Piracicaba: ESALQ, USP, 1991. Tese (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
12. NEALE, M. A., Research and Develoement for on-farm Straw Packaging Machines. Straw: a valuable material. **In Proceedings of International Conference**, Cambridge, Out. 1987.
13. O'DOGHERTY, M. J., WHEELER, J. A. A Compression of Straw to High Densities in Closed Cylindrical Dies. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.29, n.1, p. 61-72, 1984.
14. O'DOGHERTY, M. J. A Review of the Mechanical Behaviour of Straw when Compressed to High Densities. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.44, p. 241-265, 1989.
15. PICKARD, G. E., ROLL, W. M., Fundamentals of Hay Wafering. **Transactions of ASAE** v. 4, n. 1, p. 65-71, 1961.
16. REECE, F. N., Temperature, Pressure, and Time Relationships in Forming Dense Hay Wafers. **Transactions of ASAE** v. 9, n. 6, p. 749-751, 1966.

17. ROCHA, J. V. **Comportamento Mecânico de Minifardos de Feno de Soja Perene Submetido a Ensaio de Relaxação.** Campinas: FEAGRI, UNICAMP, 1988. Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.
18. SRIVASTAVA, A. C., BILANSKI, W. K., GRAHAN, V. A. A Feasibility of Production Large Size Hay Wafers. **Canadian Agricultural Engineering**, v.23, n.2, p. 109-112, 1981.

9 Anexos

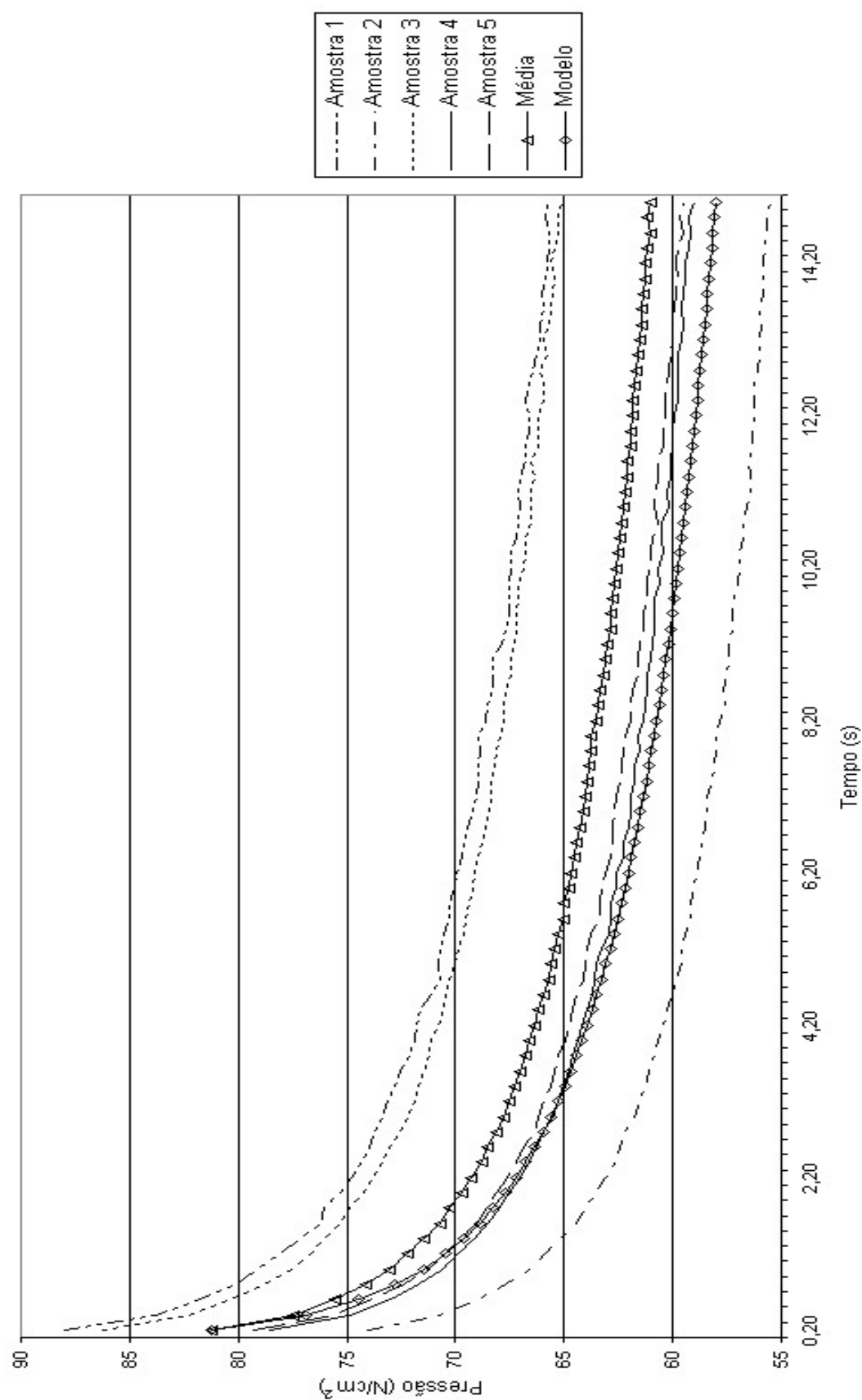


Figura 41. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 10 mm/s e grau de umidade 5,66%.

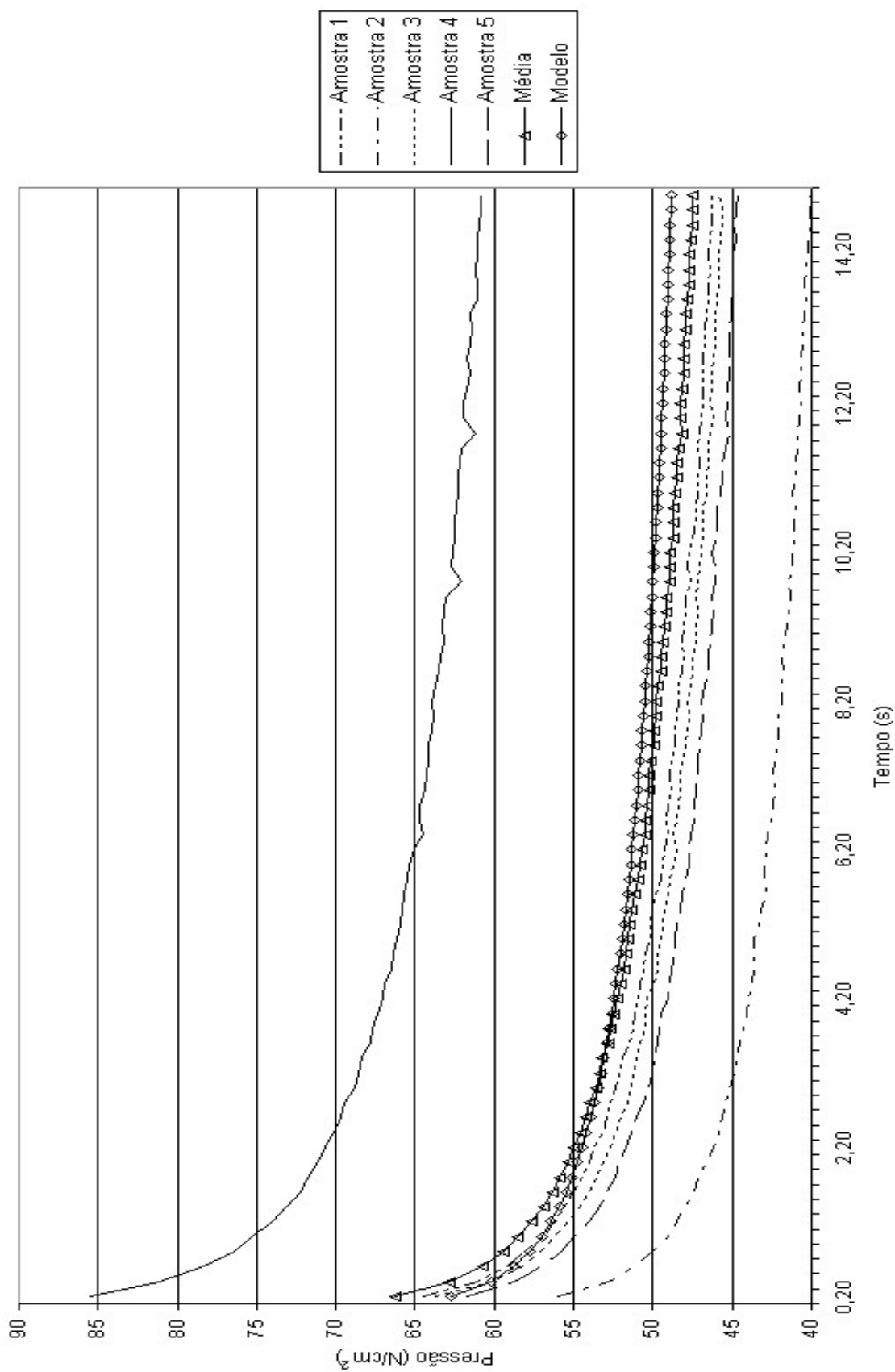


Figura 42. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 10 mm/s e grau de umidade 10,37%.

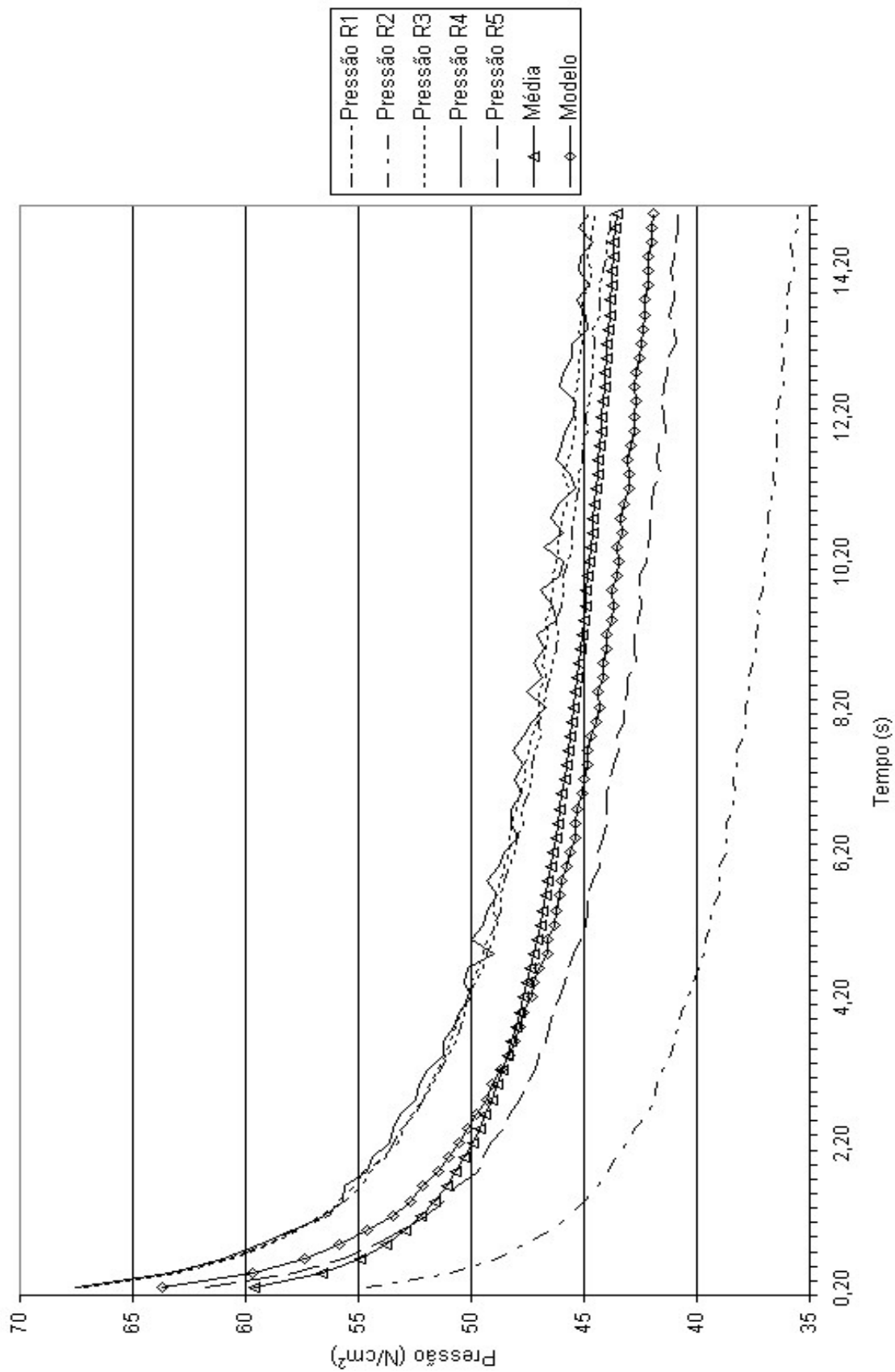


Figura 43. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 10 mm/s e grau de umidade 26,50%.

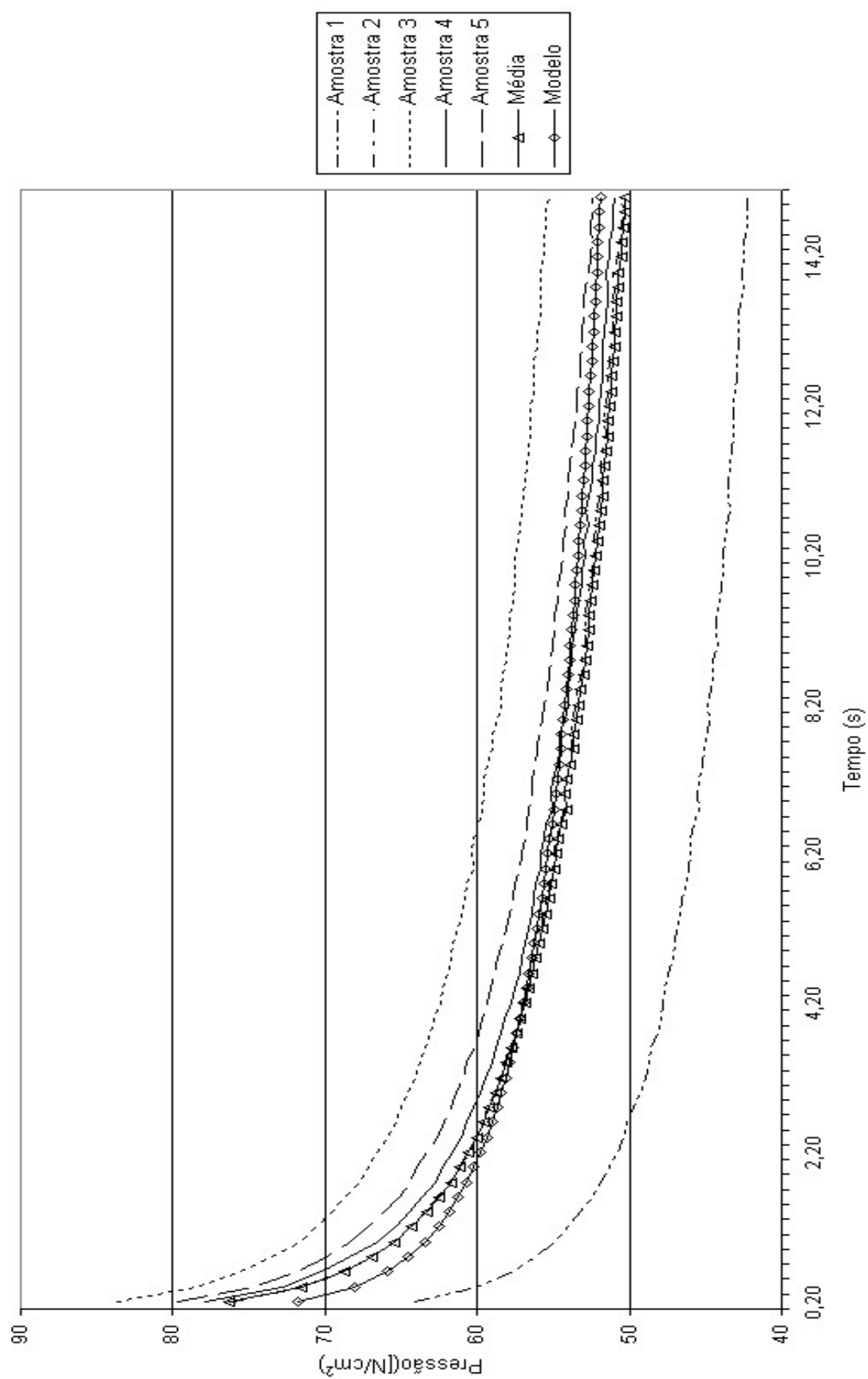


Figura 44. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 10 mm/s e grau de umidade 57,40%.

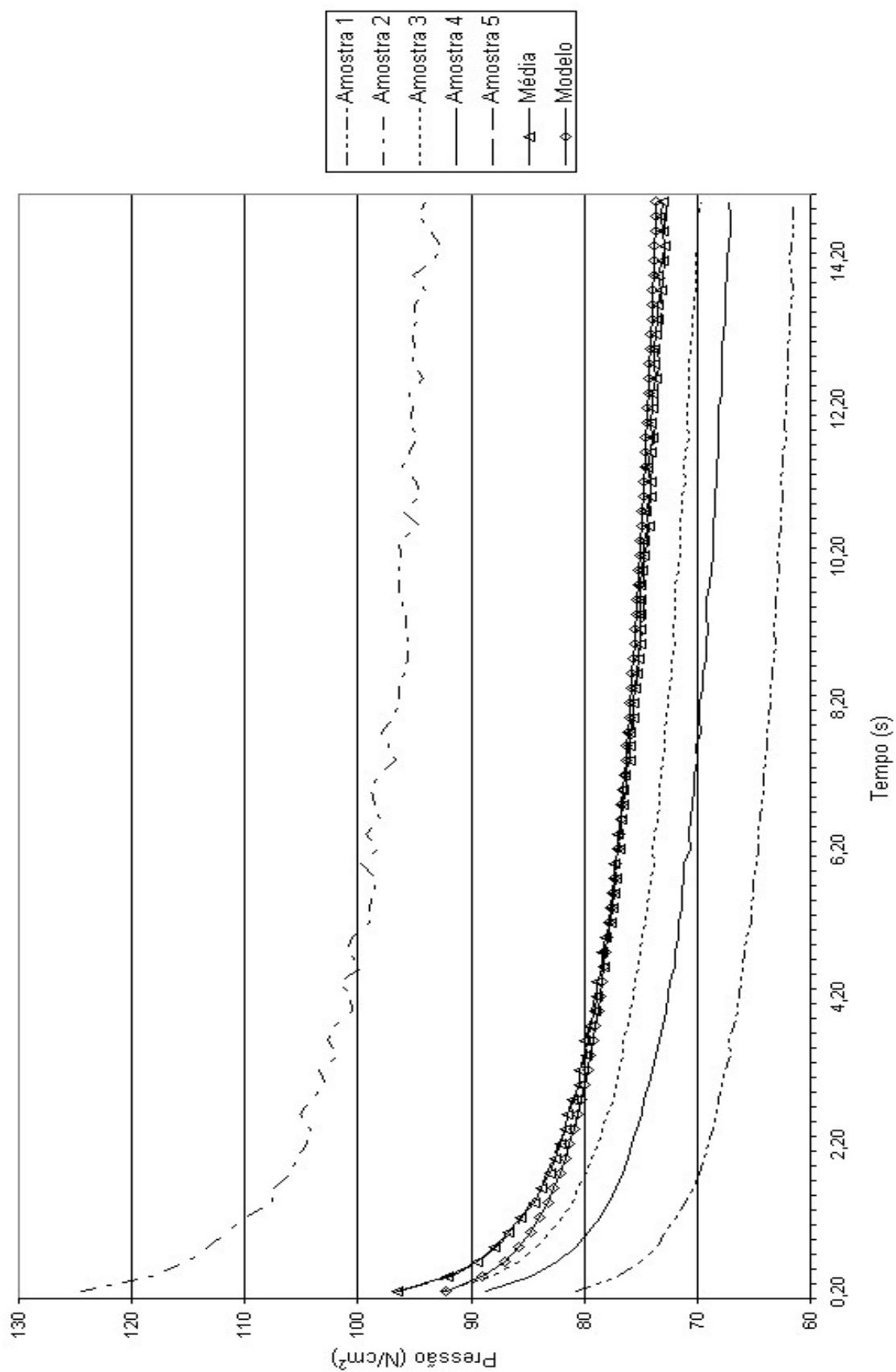


Figura 45. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 20 mm/s e grau de umidade 5,66%.

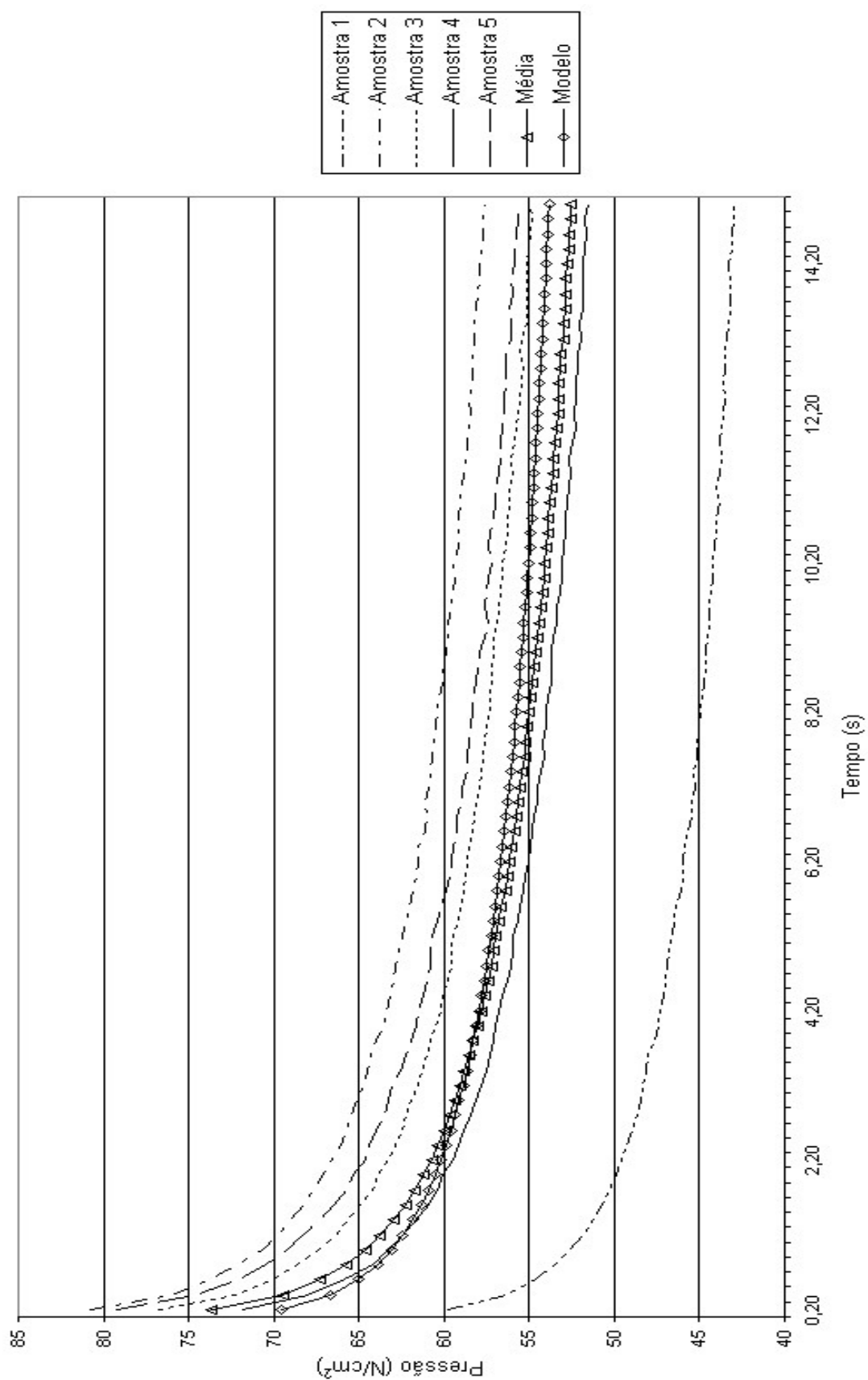


Figura 46. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 20 mm/s e grau de umidade 10,37%.

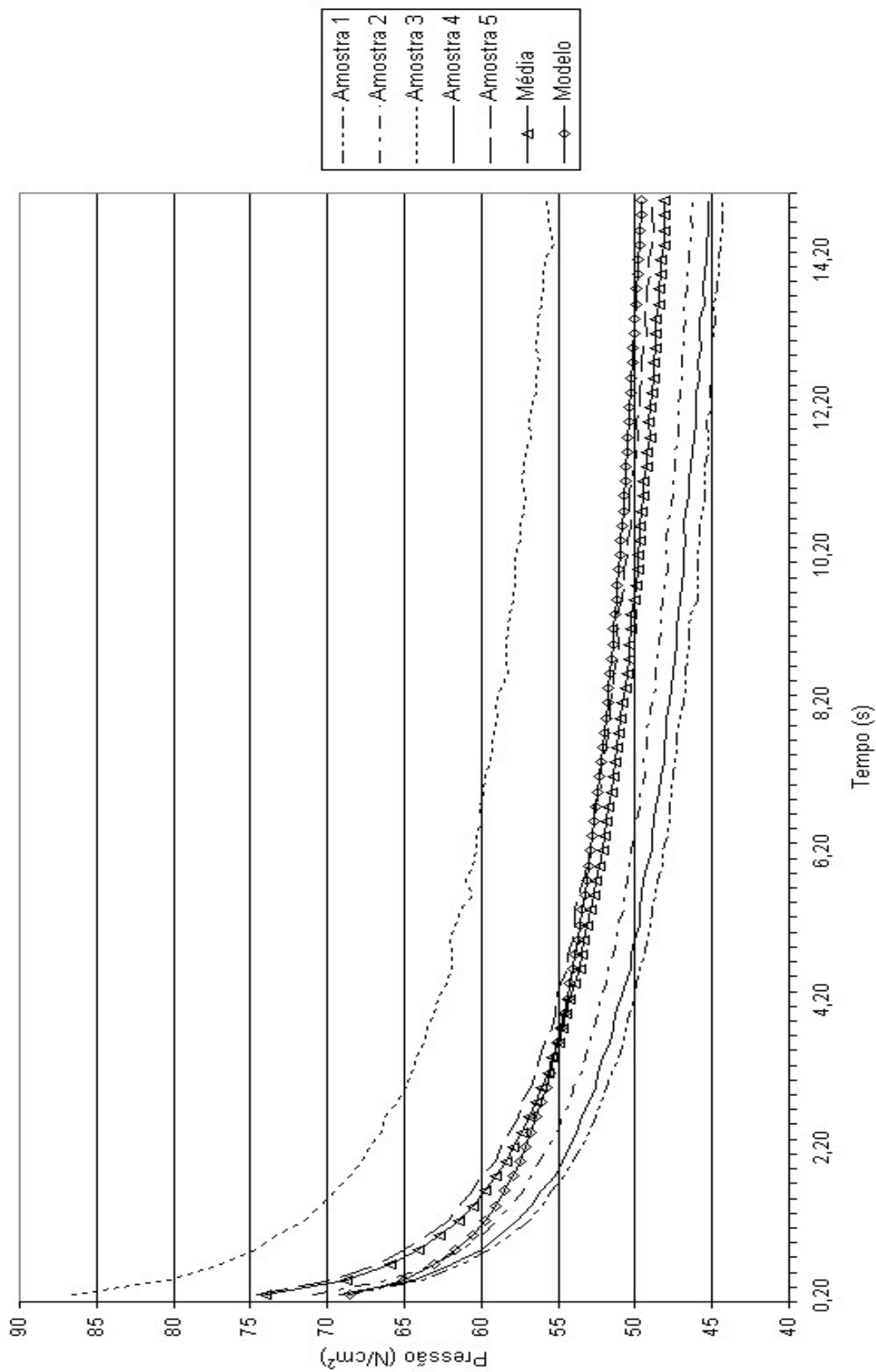


Figura 47. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 20 mm/s e grau de umidade 26,50%.

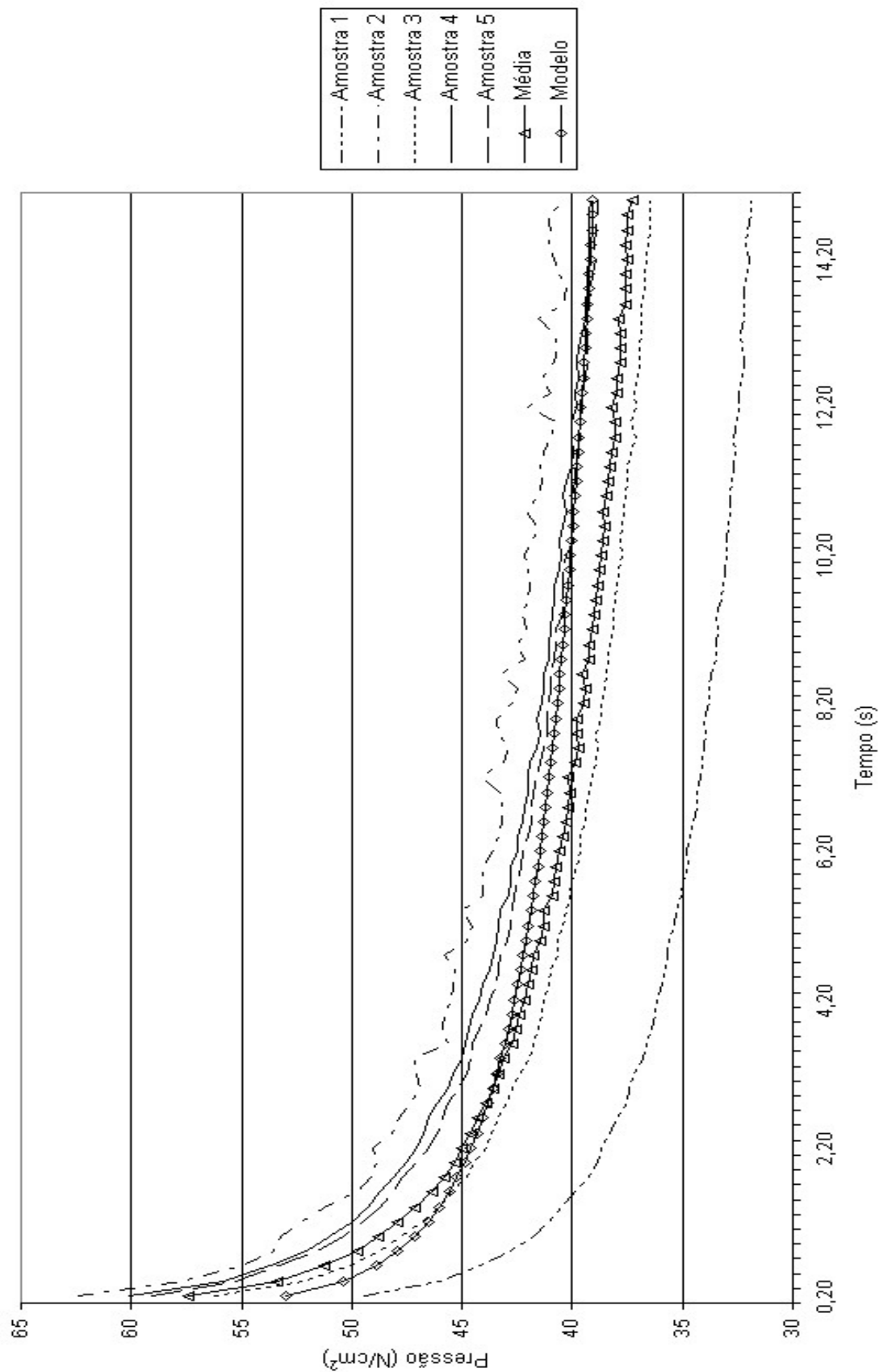


Figura 48. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 20 mm/s e grau de umidade 57,40%.

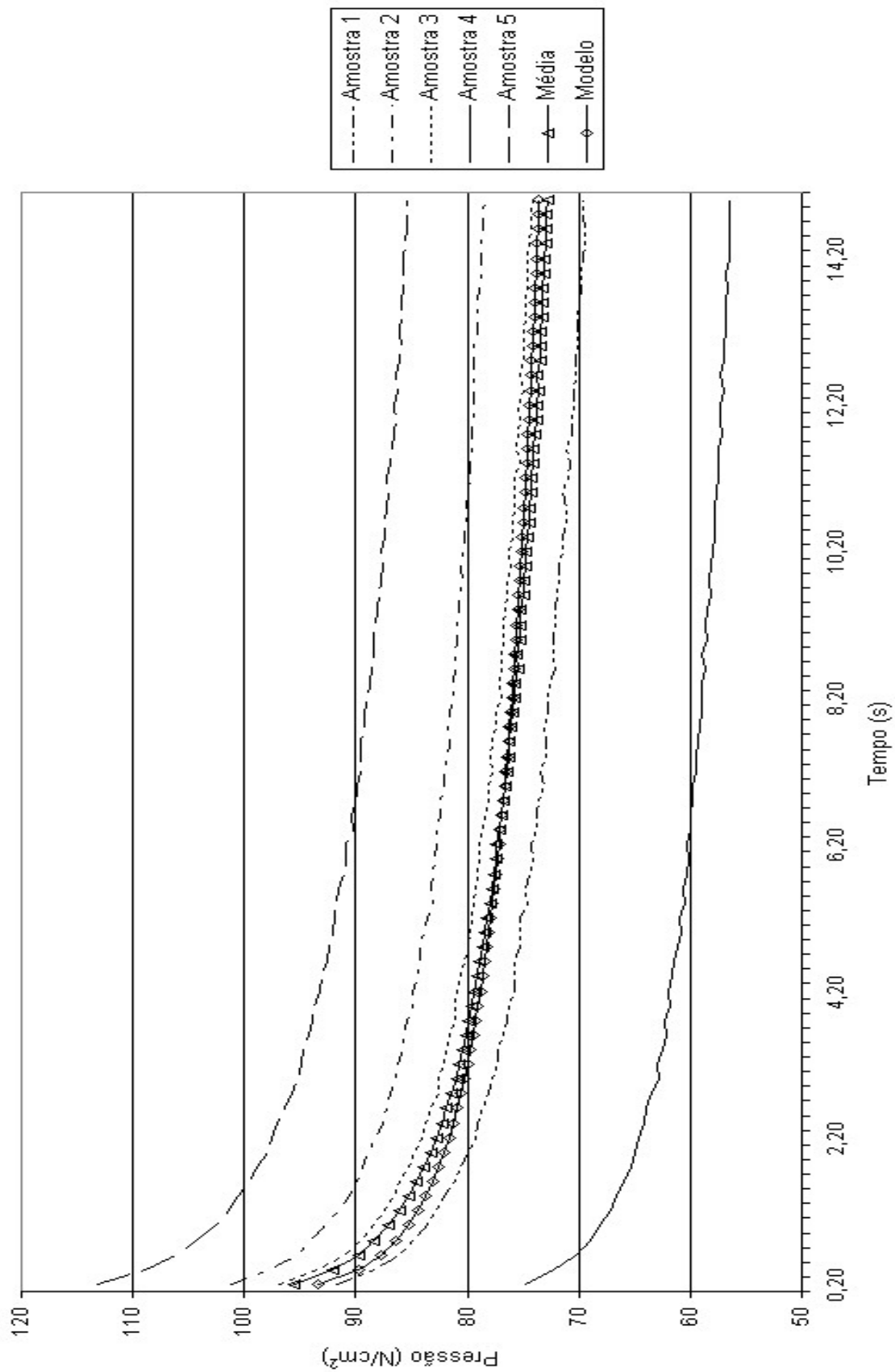


Figura 49. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 30 mm/s e grau de umidade 5,66%.

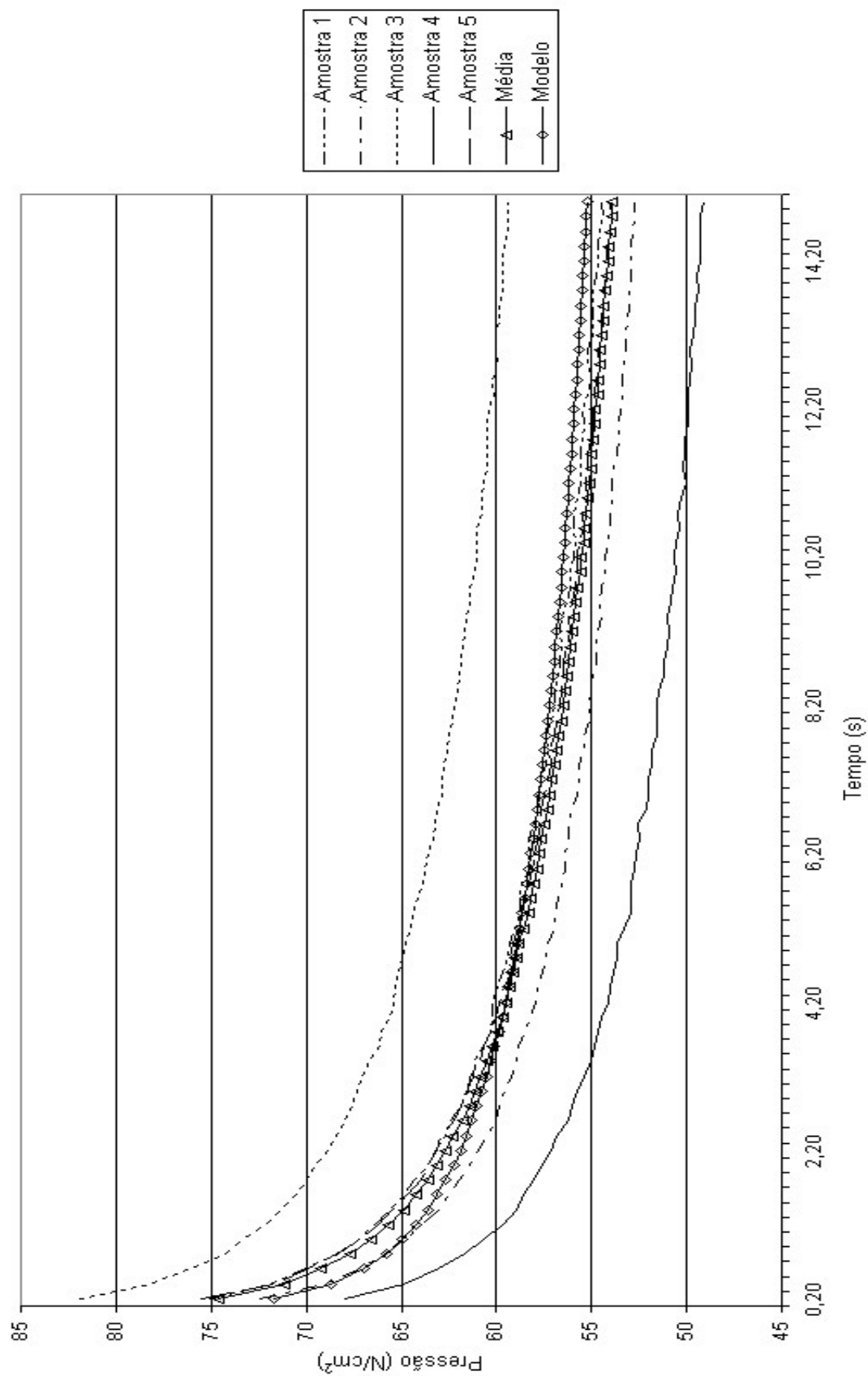


Figura 50. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 30 mm/s e grau de umidade 10,37%.

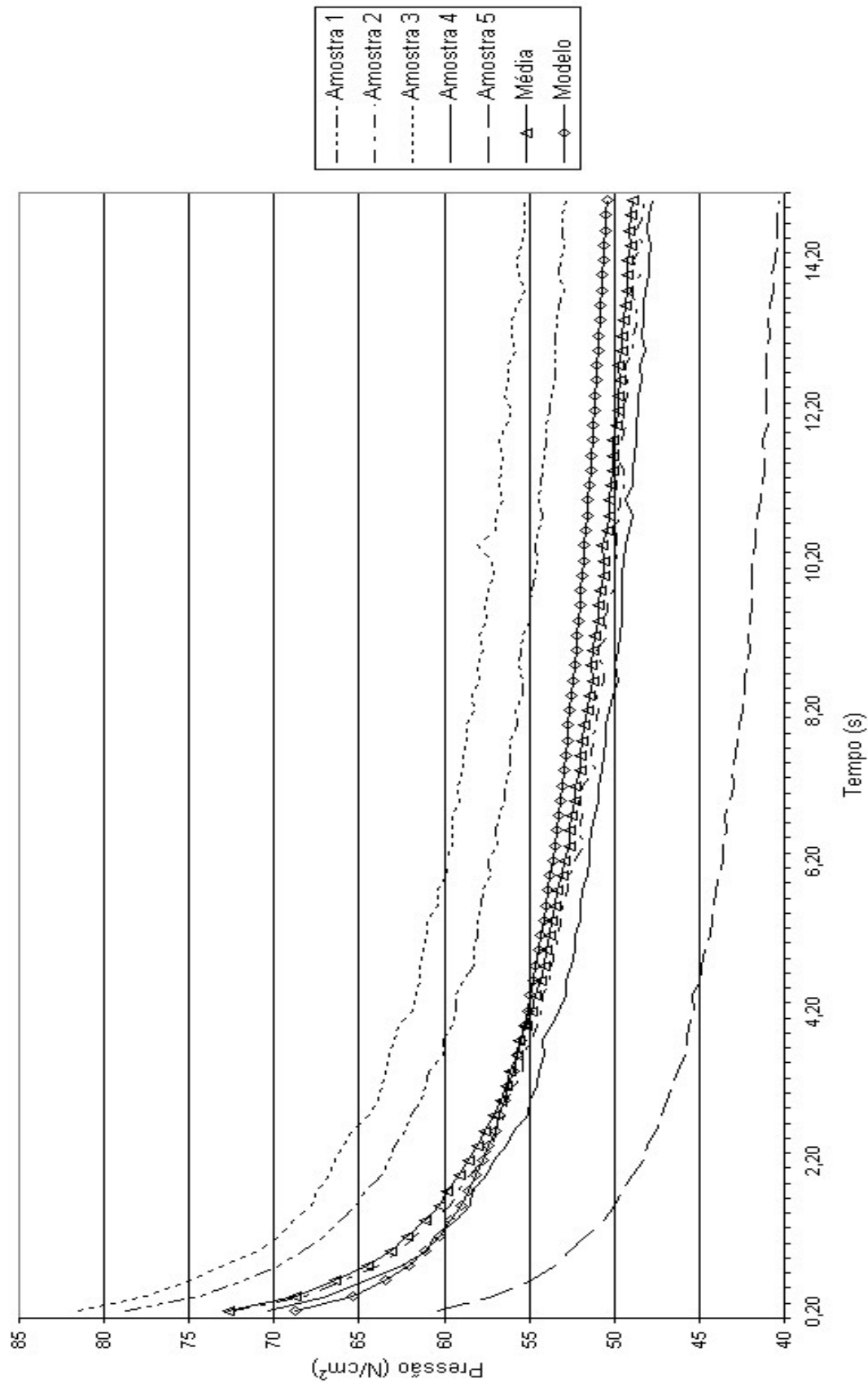


Figura 51. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 30 mm/s e grau de umidade 26,50%.

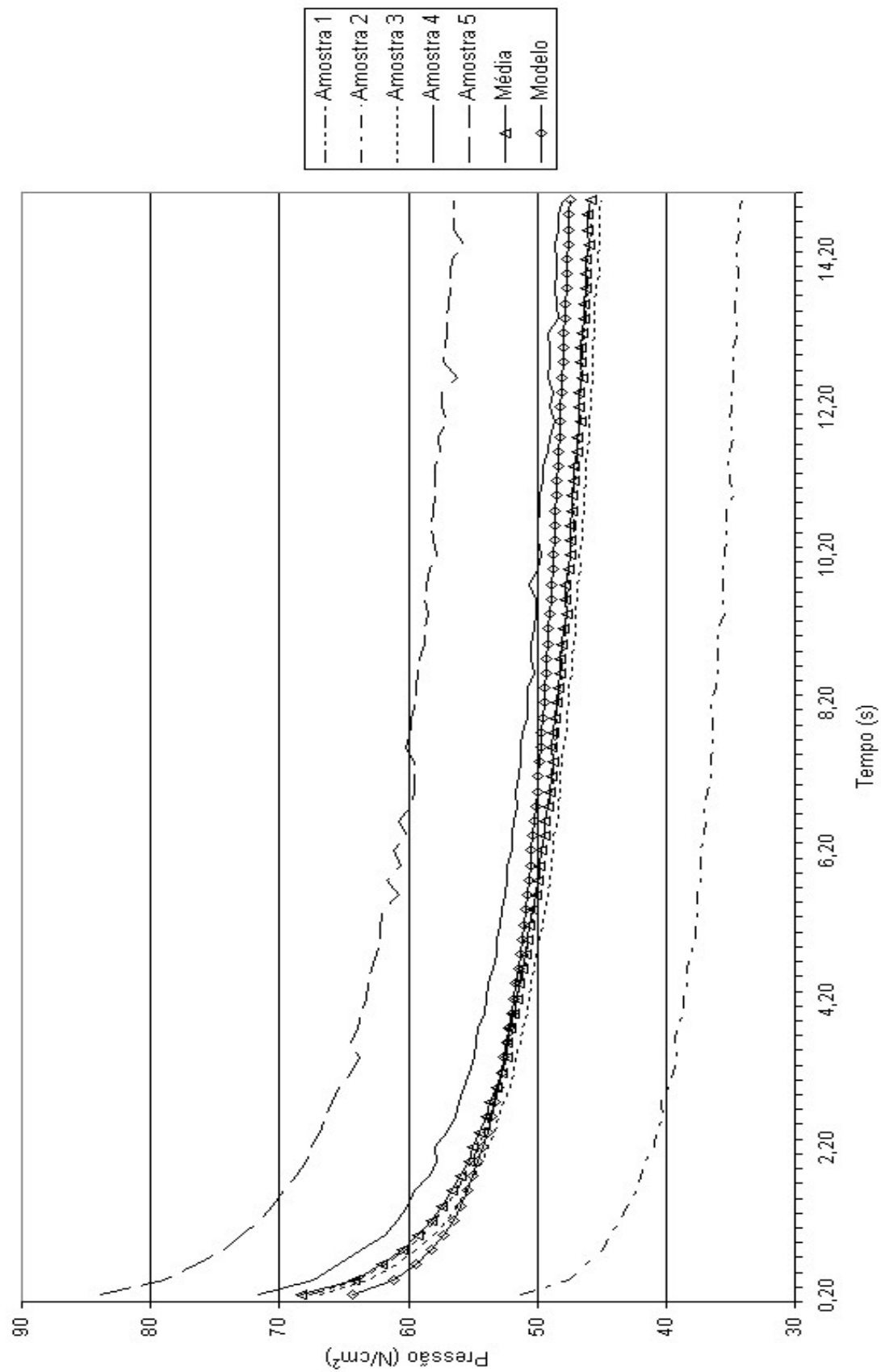


Figura 52. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 30 mm/s e grau de umidade 57,40%.

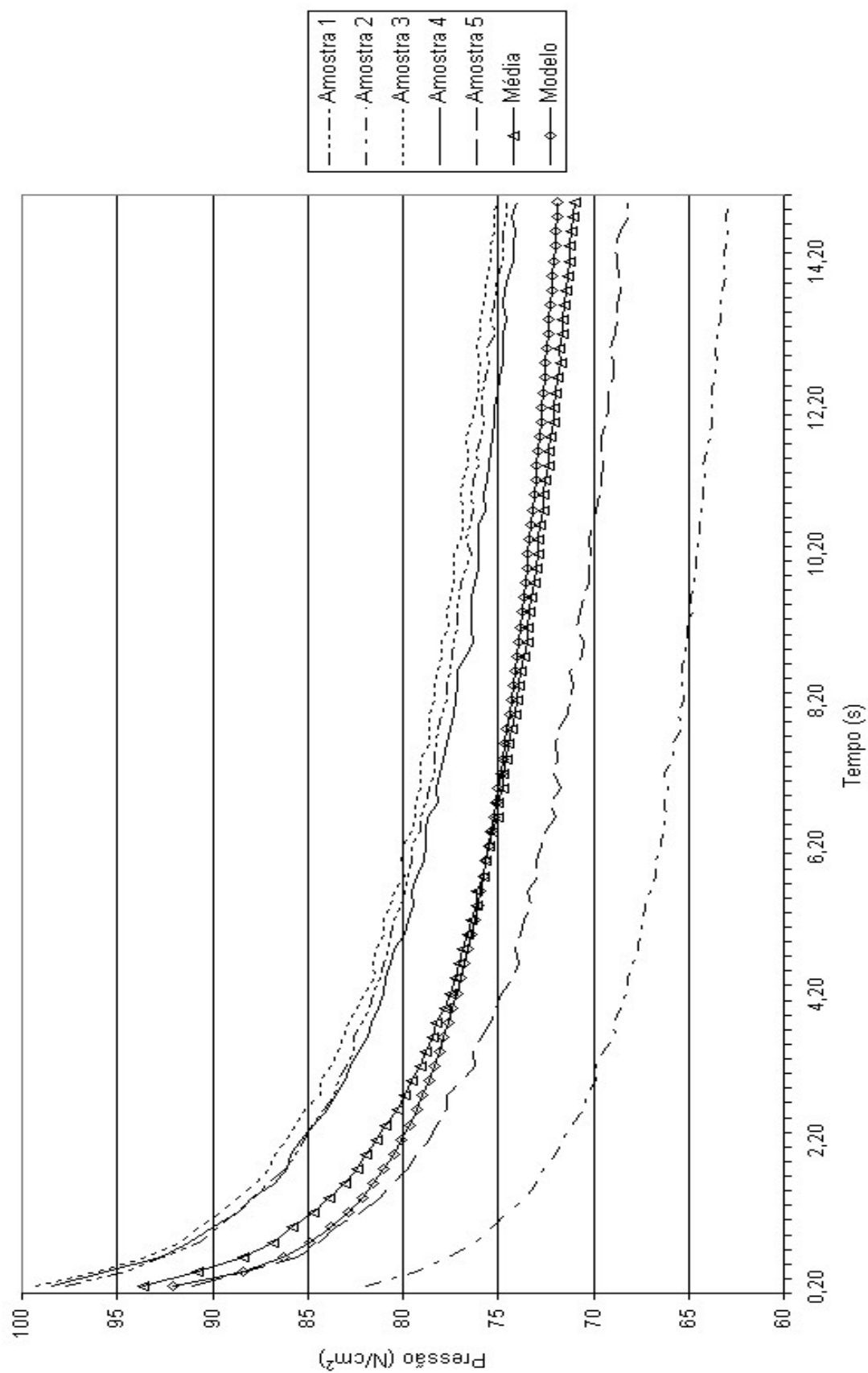


Figura 53. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 40 mm/s e grau de umidade 5,66%.

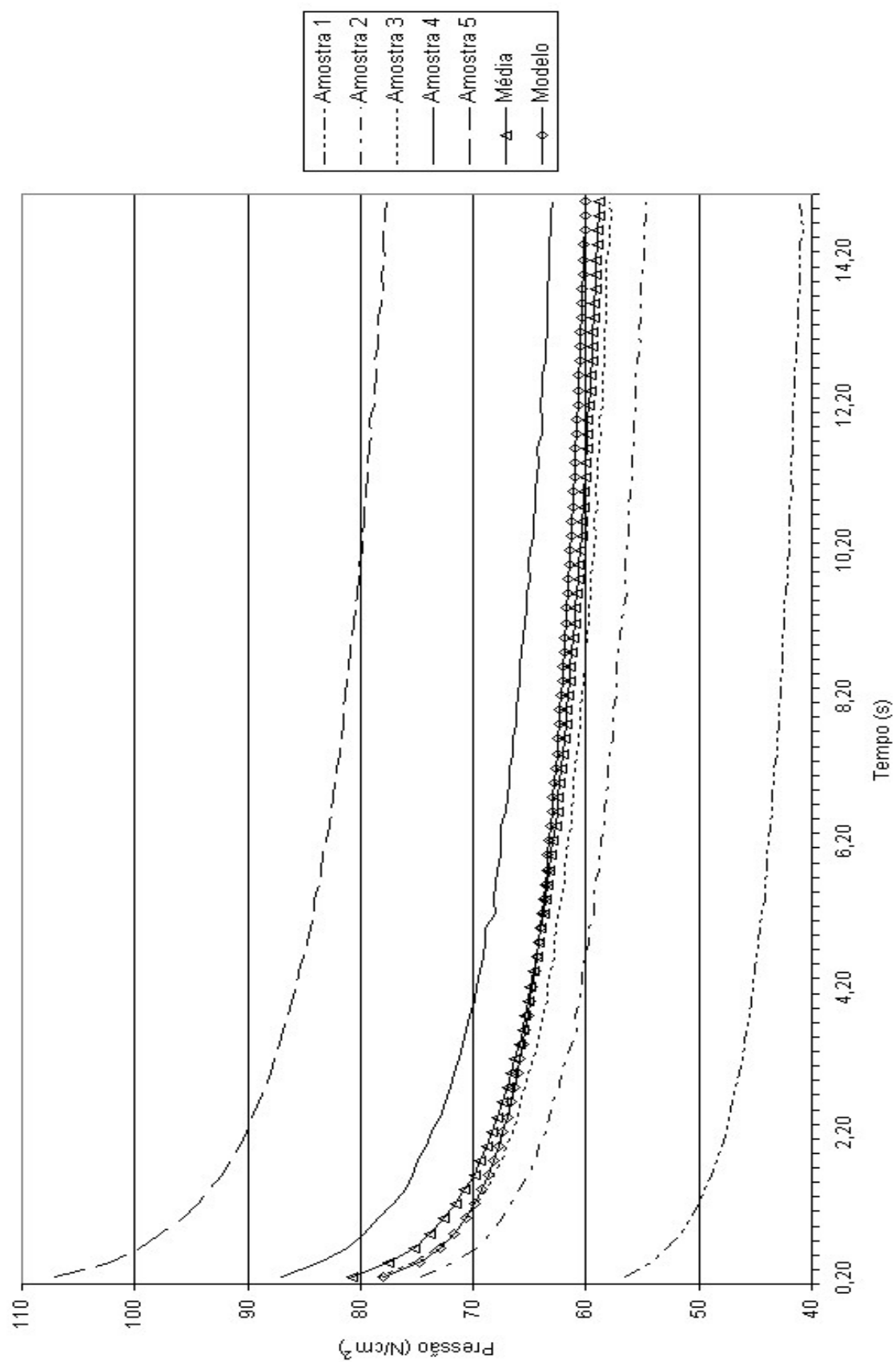


Figura 54. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 40 mm/s e grau de umidade 10,37%.

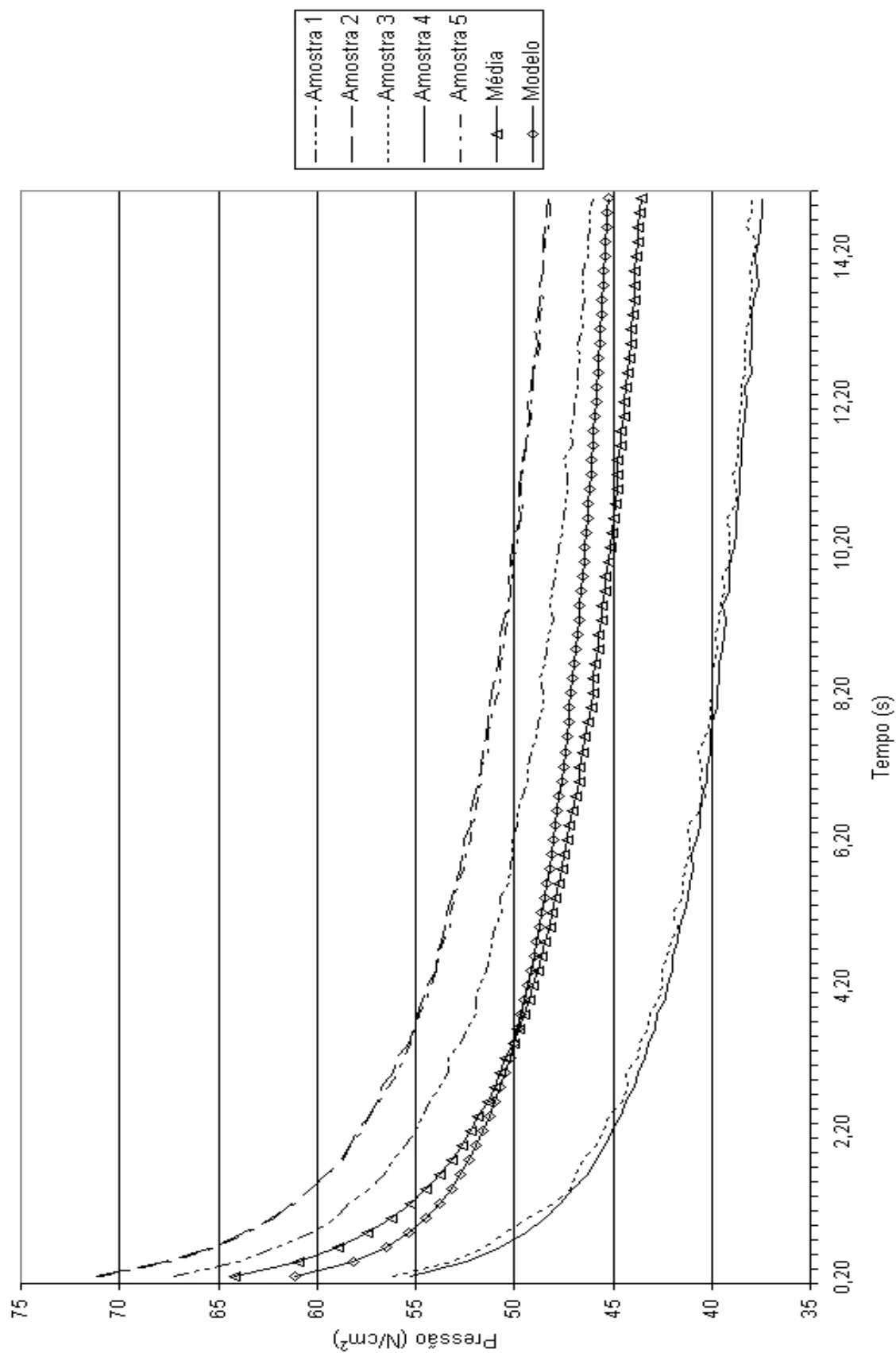


Figura 55. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 40 mm/s e grau de umidade 26,50%.

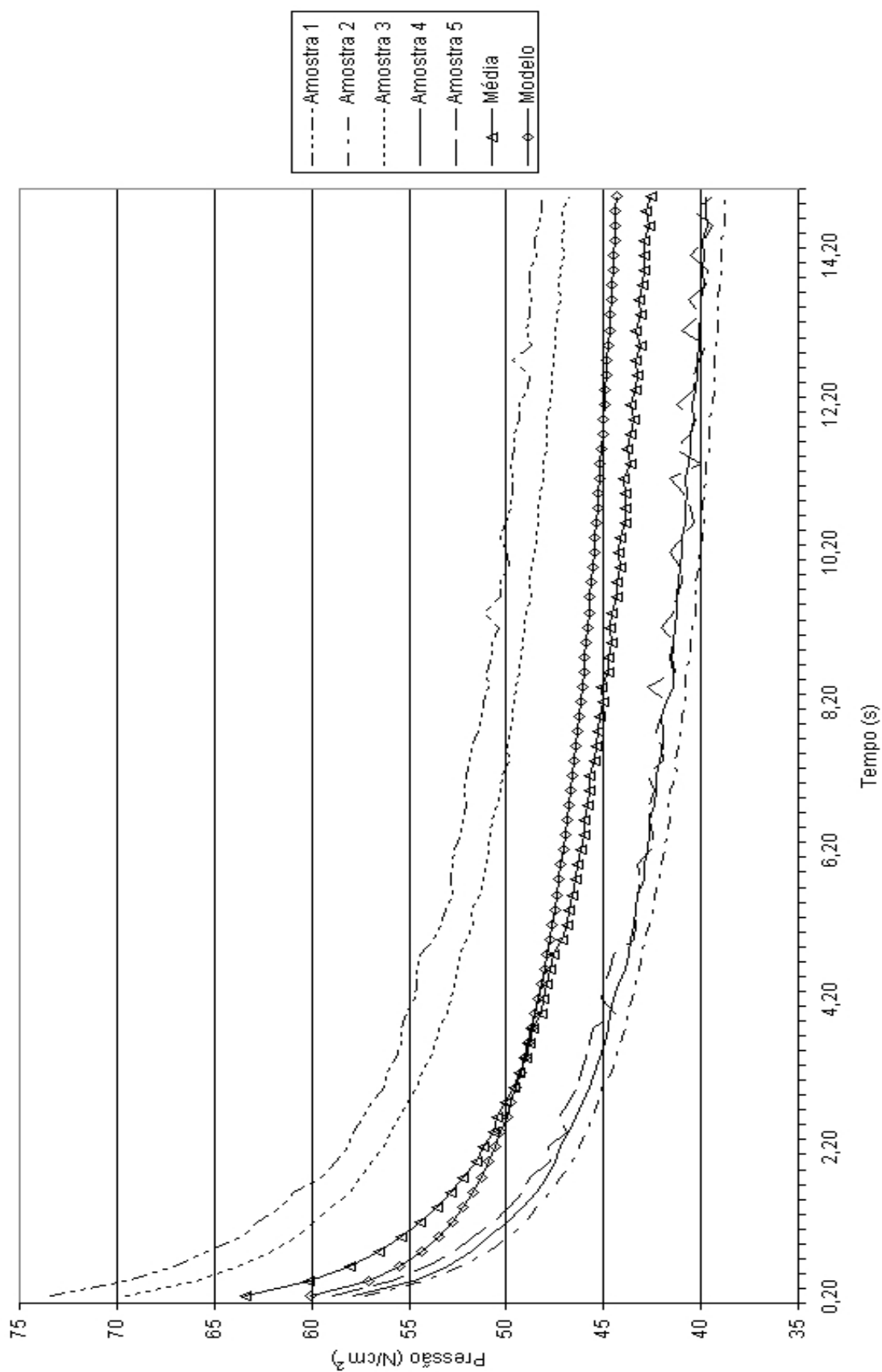


Figura 56. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 40 mm/s e grau de umidade 57,40%.

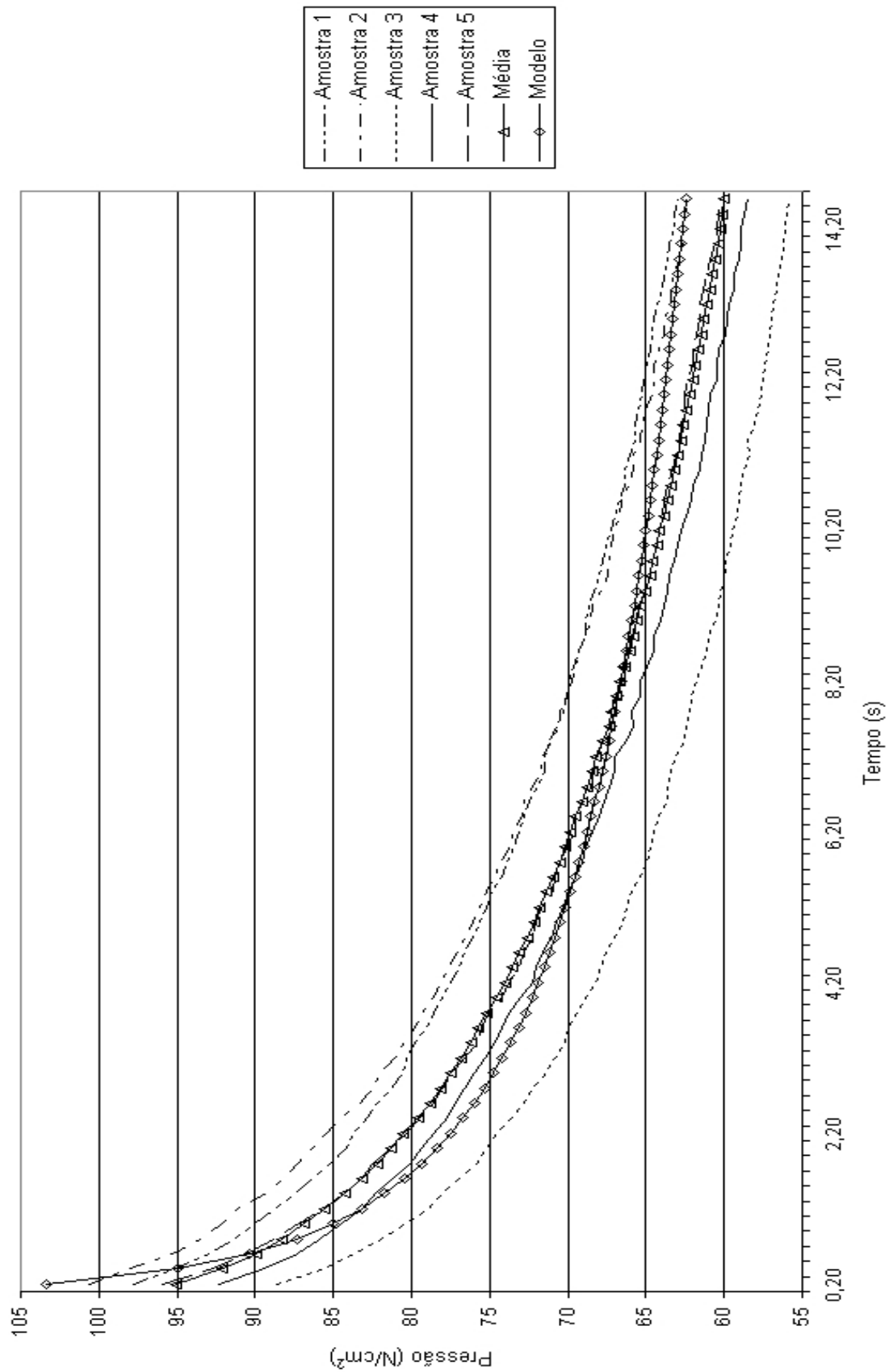


Figura 57. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 43 mm/s e grau de umidade 5,66%.

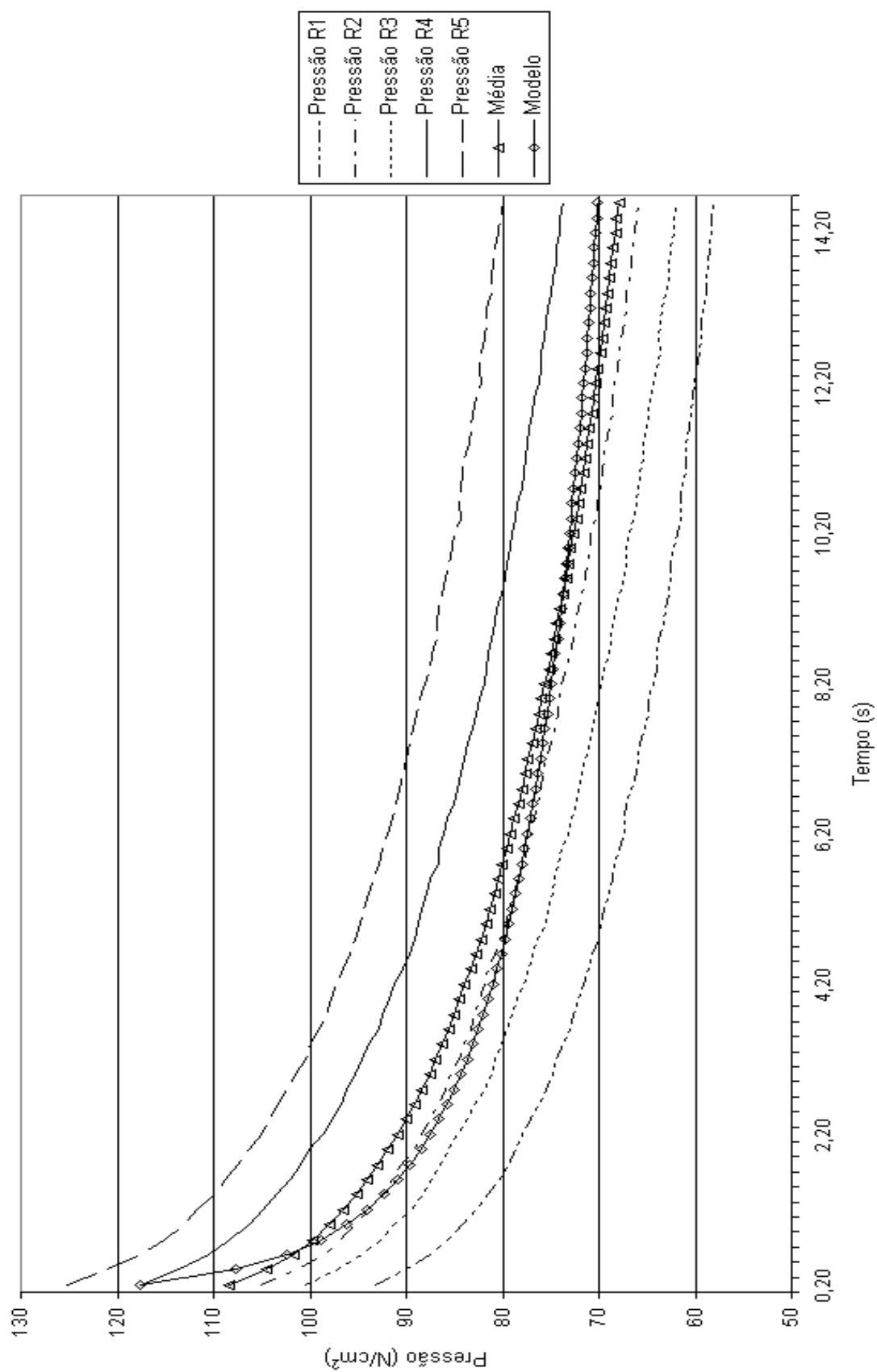


Figura 58. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 43 mm/s e grau de umidade 10,37 %.

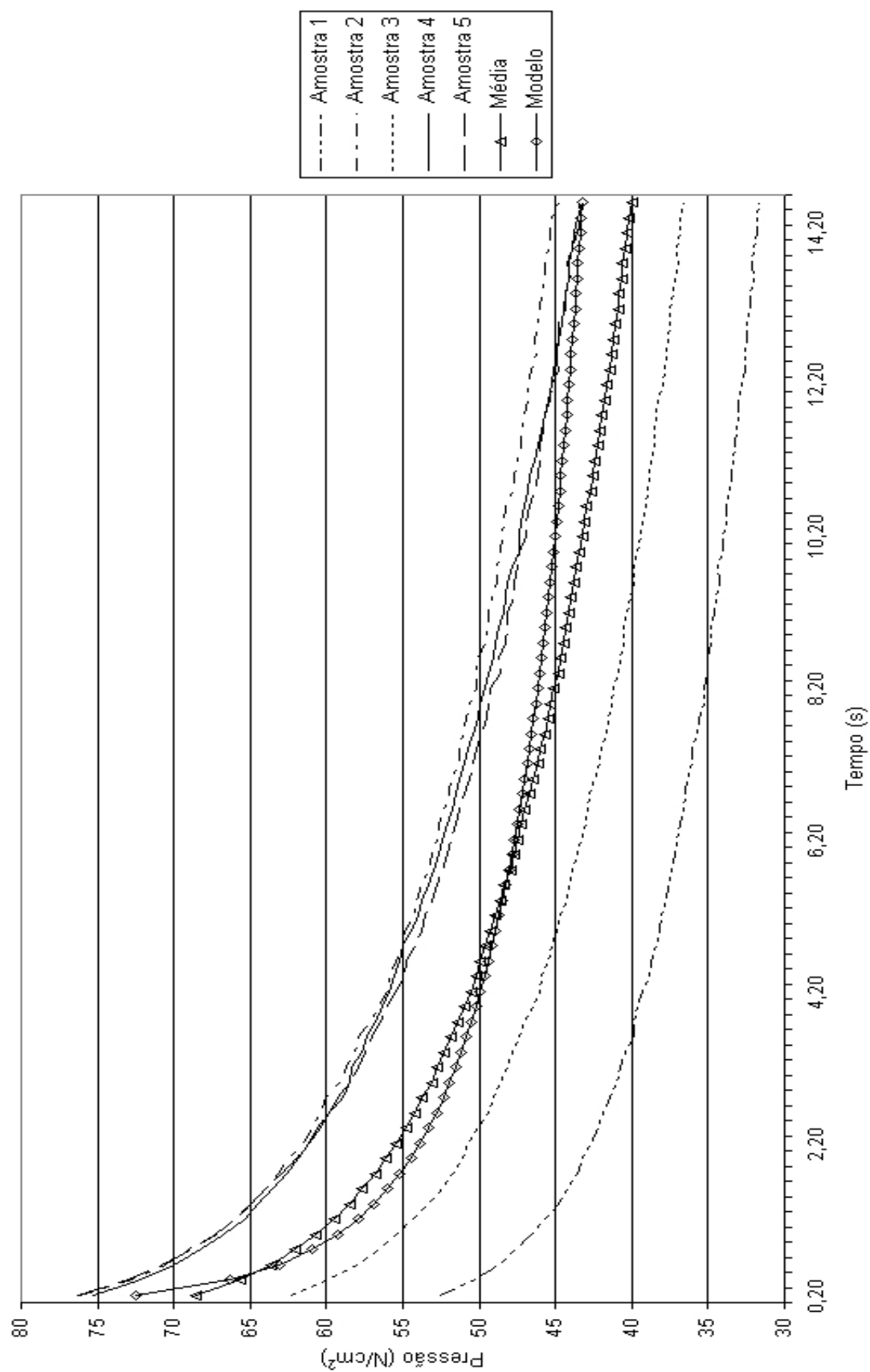


Figura 59. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 43 mm/s e grau de umidade 26,50%.

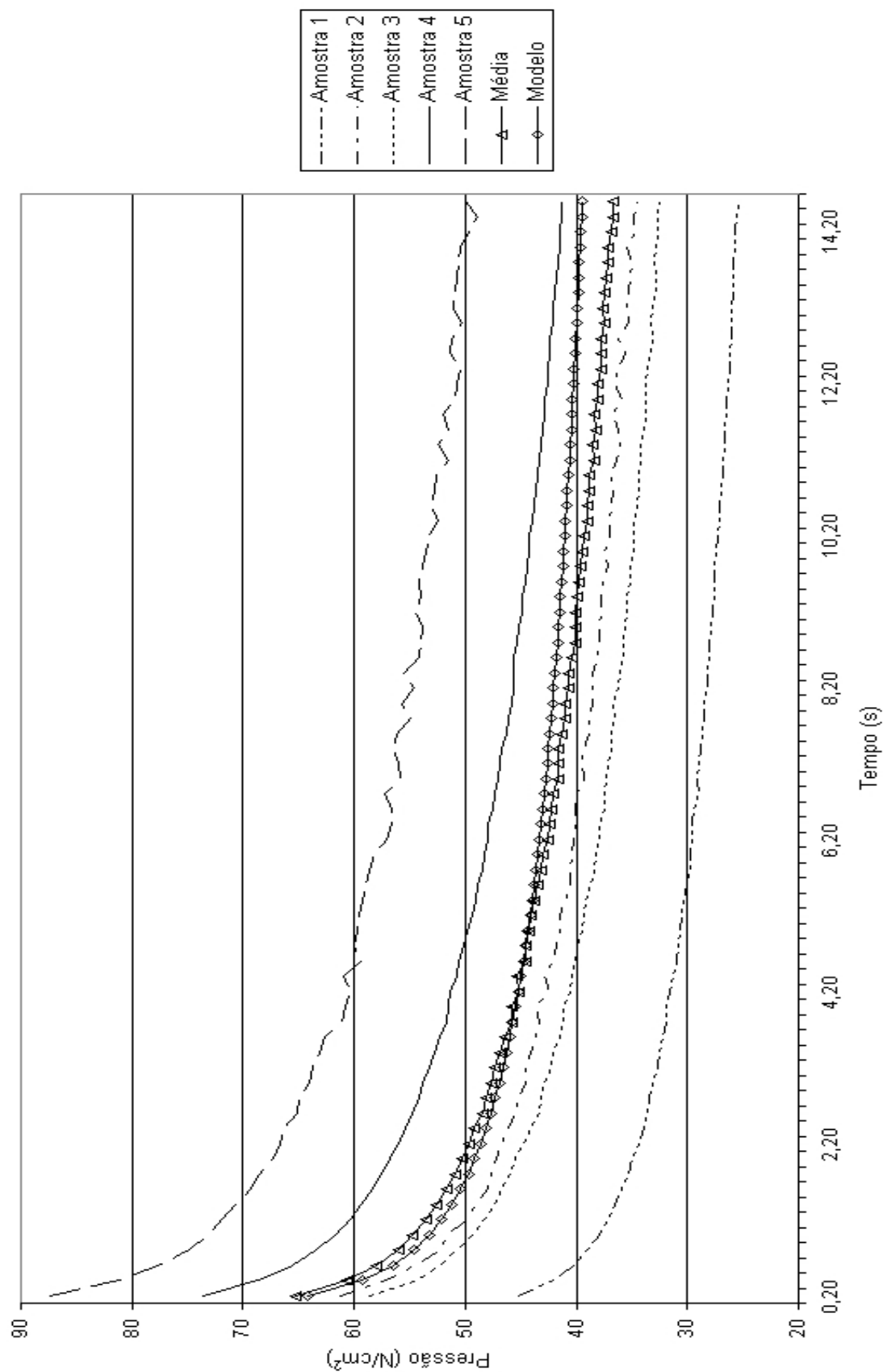


Figura 60. Curvas de Relaxação para taxa de deformação de 43 mm/s e grau de umidade 57,40%.

10 Abstract

Mostly because of its large scale production in Brazil, sugar cane straw has been considered an important alternative biomass source to cope with present energy shortage. However very little is know about its mechanical properties and baling parameters witch would improve straw handling operations.

In this investigation mechanical parameters of the straw were obtained in laboratory conditions using compression and relaxation tests at several strain rates such as 10 mm/s, 20 mm/s, 30 mm/s, 40 mm/s and 43 mm/s. Field tests were performed using a commercial rectangular baler (Nogueira AP 41N), properly instrumented to register cranck force and drive wheel rotation speed.

From the compression tests results the pressure-density curves were plotted and analysed. Energy comsumption and relaxation curves were also obtained for several moisture levels and strain rate conditions.

The mean value obtaind during field tests with the commercial baler for the crank force was 800 kgf which produced bales with mean density of 250 kg/m³.

Moisture content influenced the pressure-density relations as well as the specifc energy needed to compress the samples. Higher moisture content reduces compression force and consequently the total energy needed in the compression process.