

## 4 Resultados dos Testes e Comentários

Neste capítulo apresentam-se, os resultados obtidos nos testes realizados. Foram realizados ensaios estáticos, experimental e numérico, e ensaio dinâmico, com a estrutura em “U”, conforme descritos no Capítulo 3.

Vale ressaltar que os impactos sobre a estrutura “U” foram proporcionados pela queda da massa da *Drop Weight*. As alturas de queda (h) da massa adotadas para o carregamento dinâmico foram 0,7m, 1m e 1,5m. Neste experimento foi possível medir a variação da deformação no tempo sofrida pela estrutura através dos extensômetros ligados ao sistema de aquisição de dados e também as deflexões sofridas pelas estruturas com o impacto.

As simulações dos impactos sobre a estrutura “U” foram simulados pelo método dos elementos finitos utilizando o programa Ansys LS-Dyna e as mesmas alturas de queda. A rotina utilizada para a simulação encontra-se no Apêndice A. Nesta simulação foi possível obter a variação da força no tempo aplicada à estrutura, através da 2.<sup>a</sup> Lei de Newton, além de parâmetros como deformação e deslocamento (deflexão).

### 4.1 Teste n.º1 (h = 0,7m)

Com esta altura, a velocidade de impacto da massa sobre a estrutura é  $V_0 = \sqrt{2gh} = 3,7\text{m/s} = 13,32\text{ km/h}$ . Conforme mencionado esta altura produz um carregamento dinâmico com taxa de deformação de  $1066\text{ s}^{-1}$ . Após receber o impacto, a estrutura assume a seguinte configuração, mostrada na Figura 64.



Figura 64 – Estrutura em “U” após impacto a 13,32km/h. Fonte: Nuclep S/A

Na Figura 65 se tem a variação da deformação da estrutura em função do tempo.

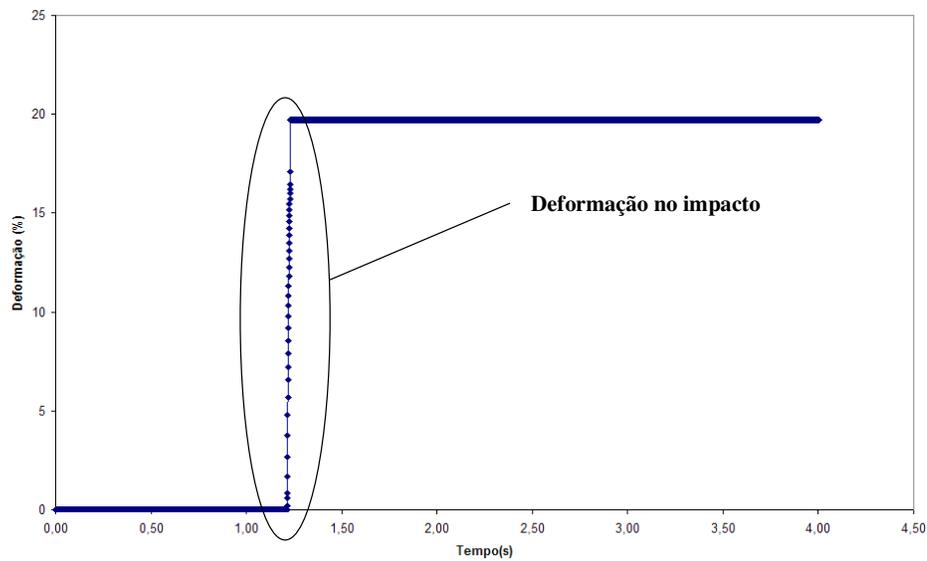


Figura 65 – Gráfico deformação x tempo da estrutura impactada a 13,32 km/h obtido experimentalmente.

A deformação da estrutura pode ser analisada pela ampliação do detalhe indicado na figura anterior. Neste detalhe se pode verificar que uma colisão ocorre a uma taxa de deformação praticamente constante, já que foi possível o ajuste de uma equação linear a curva do gráfico, com qualidade de ajuste de 96%. Vide Figura 66.

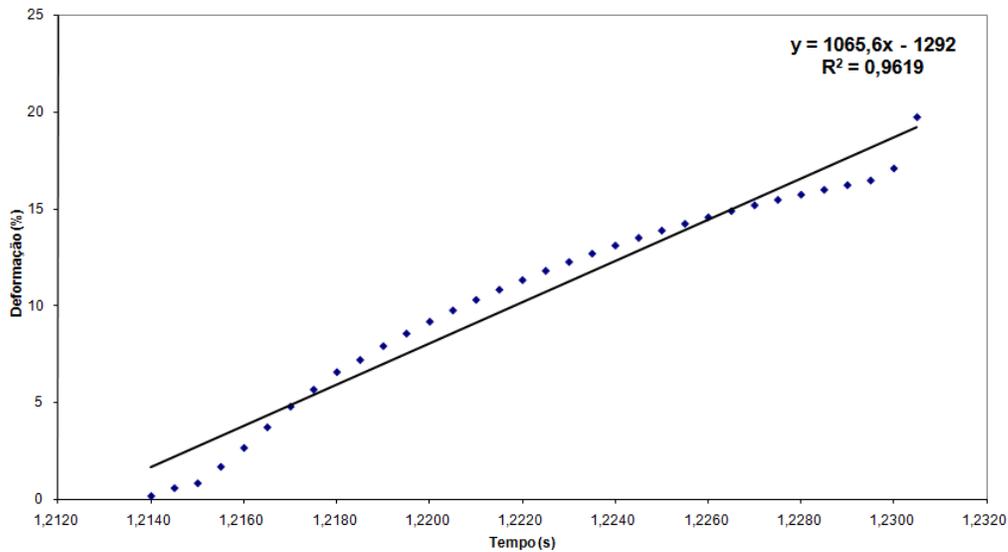


Figura 66 – Ajuste da curva com qualidade de 96% para obtenção da taxa de deformação experimental. Fonte: Programa Microsoft Excel.

Na etapa de pós processamento da análise numérica do impacto pelo LS-dyna, ao escolher um nó pertencente ao cutelo da massa de queda, é possível obter valores de resposta como, por exemplo, a variação da aceleração no tempo imposta à estrutura conforme ilustra a Figura 67. A partir do comentário acima se obtém o valor da aceleração no momento do impacto igual a  $186,84 \text{ m/s}^2$ .

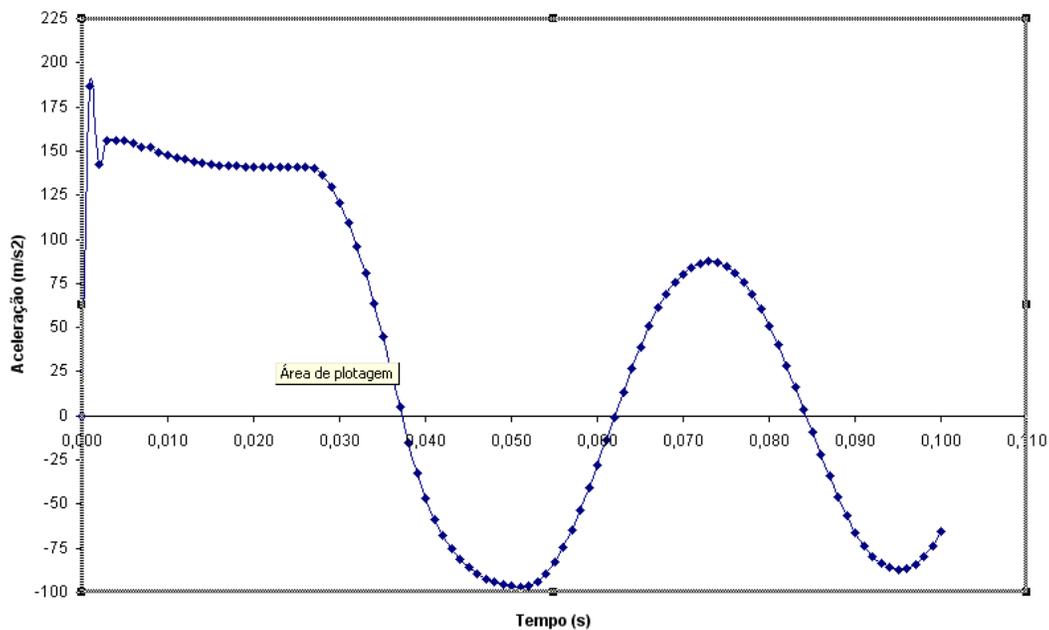


Figura 67 – Gráfico da aceleração em função do tempo obtido numericamente. Fonte: Programa Microsoft Excel.

A partir do valor da aceleração no momento do impacto, se determina o valor da força aplicada através da equação da 2.ª Lei de Newton:

$$F = m \times \frac{dv}{dt}$$

na qual,

m= massa da máquina por queda de peso [kg];

$\frac{dv}{dt}$  = variação da velocidade em função do tempo (aceleração) [m/s<sup>2</sup>]; e

F = Força de impacto [N].

Sendo assim a força de impacto é F = 8183,59N.

A variação da deformação no tempo também foi obtida e está representada na Figura 68.

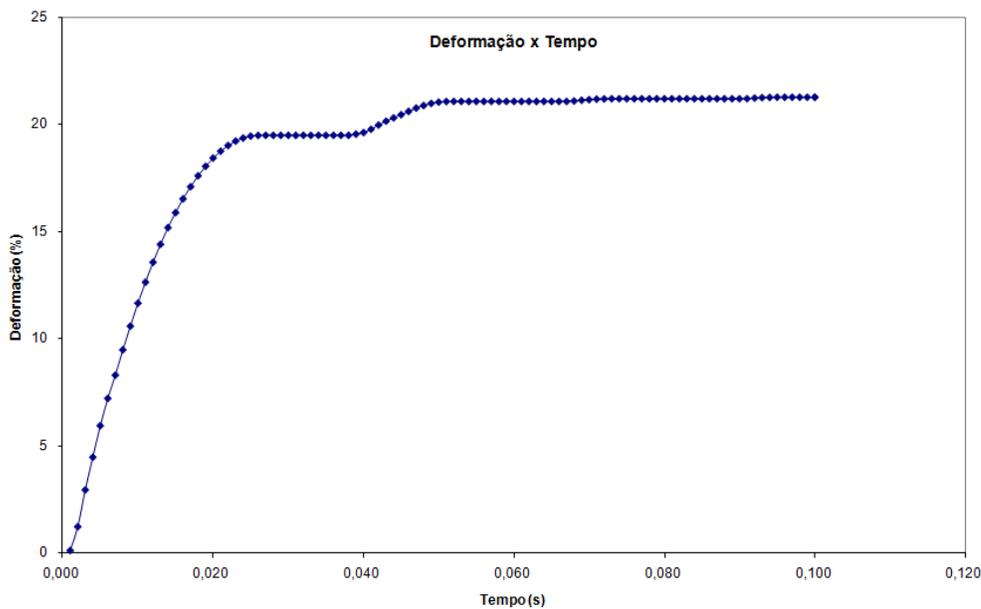


Figura 68 – Perfil da deformação em função do tempo obtido numericamente. Fonte: Programa Microsoft Excel.

Com o tratamento dos dados de deformação no tempo obtidos na simulação, pôde-se também obter a taxa de deformação do impacto aplicado na estrutura. A Figura 69 apresenta o ajuste da curva da deformação por uma

equação linear, onde se verifica que a taxa de deformação obtida na simulação foi de aproximadamente  $1008 \text{ s}^{-1}$ .

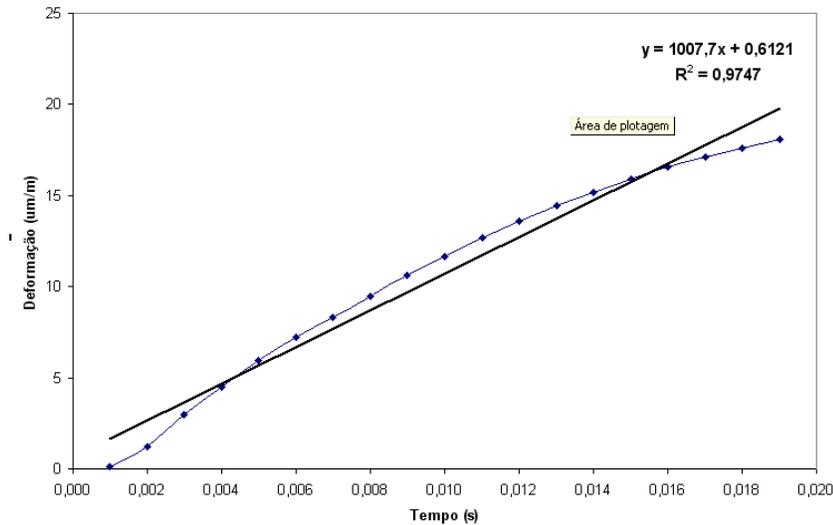


Figura 69 – Ajuste da curva numérica deformação x tempo com qualidade de 97%.  
Fonte: Programa Microsoft Excel.

A fim de verificar a qualidade dos resultados obtidos, segue um comparativo entre a forma das estruturas obtidas experimentalmente e numericamente após o recebimento do carregamento dinâmico imposto pela queda livre da massa da *Drop Weight*, conforme Figura 70.

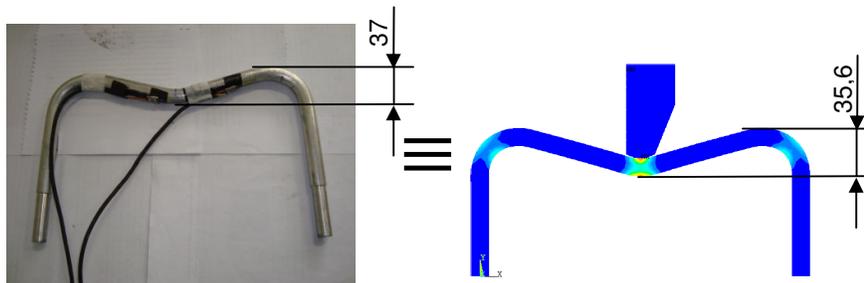


Figura 70 – Estruturas deformadas experimentalmente e numericamente. Velocidade de impacto de  $3,7 \text{ m/s}$  ( $13,32 \text{ km/h}$ ).

A partir da forma das estruturas deformadas verifica-se que os resultados apresentaram uma boa concordância.

## 4.2 Teste n.º2 (h = 1,0 m)

A velocidade de impacto da massa sobre a estrutura nesta altura foi de  $V_0 = 4,4 \text{ m/s} = 15,84 \text{ km/h}$ . A taxa de deformação obtida neste impacto foi de  $1487 \text{ s}^{-1}$ . Na Figura 71 encontra-se o estado deformado da estrutura após o impacto da massa.



Figura 71 – Estrutura em “U” após impacto a 15,84 km/h. Fonte: Nuclep S/A

Na Figura 72 verifica-se o gráfico da deformação no tempo para esta condição de impacto. O ajuste da curva do gráfico correspondente ao impacto com uma equação linear obteve uma qualidade de 98%, conforme Figura 73.

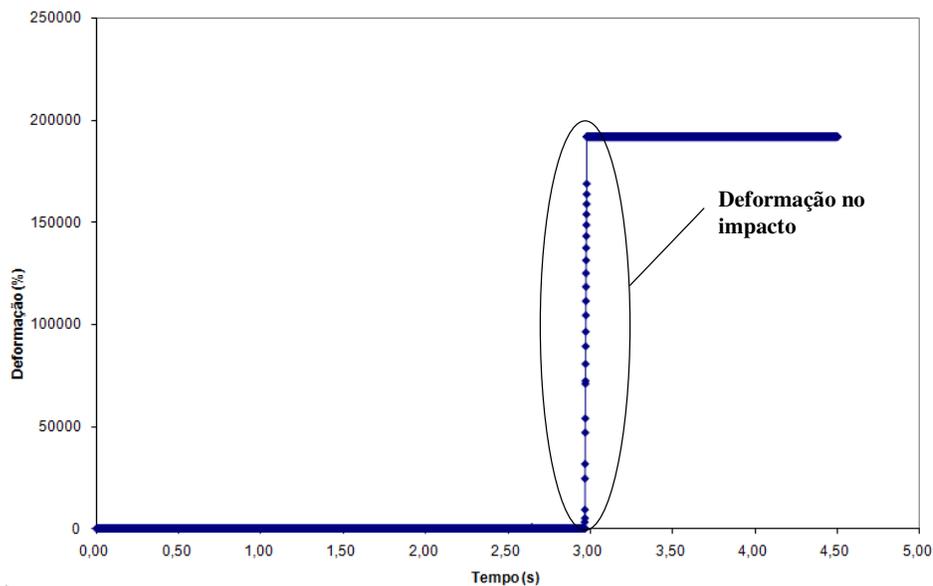


Figura 72 – Gráfico deformação x tempo da estrutura impactada a 15,84 km/h obtido experimentalmente. Fonte: Programa Microsoft Excel.

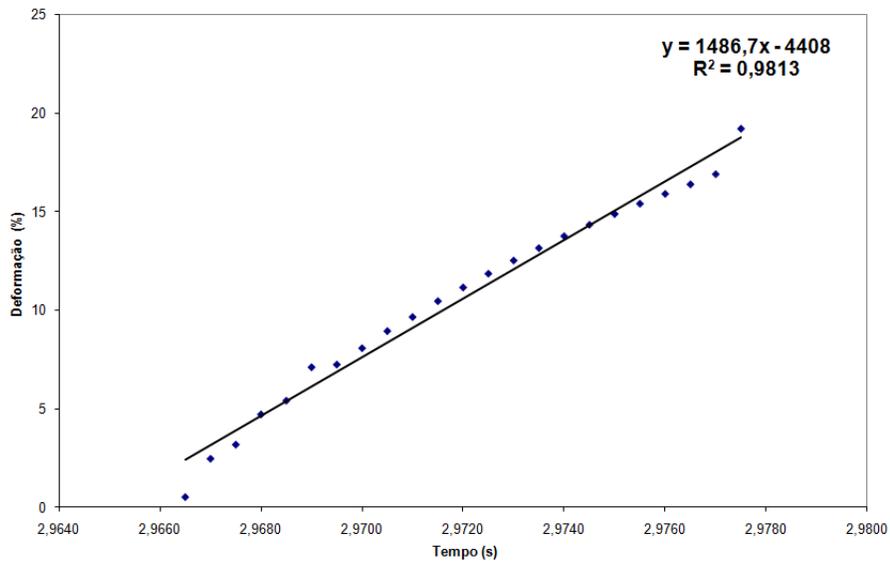


Figura 73 – Ajuste da curva experimental Deformação x tempo com qualidade de 98%.  
Fonte: Programa Microsoft Excel.

Na etapa de pós processamento escolhendo-se um nó pertencente ao cutelo da massa de impacto se obtém a variação da aceleração no tempo, conforme mostra o gráfico da Figura 74. A partir do gráfico abaixo se verifica que a aceleração no momento do impacto foi de  $208,03 \text{ m/s}^2$ .

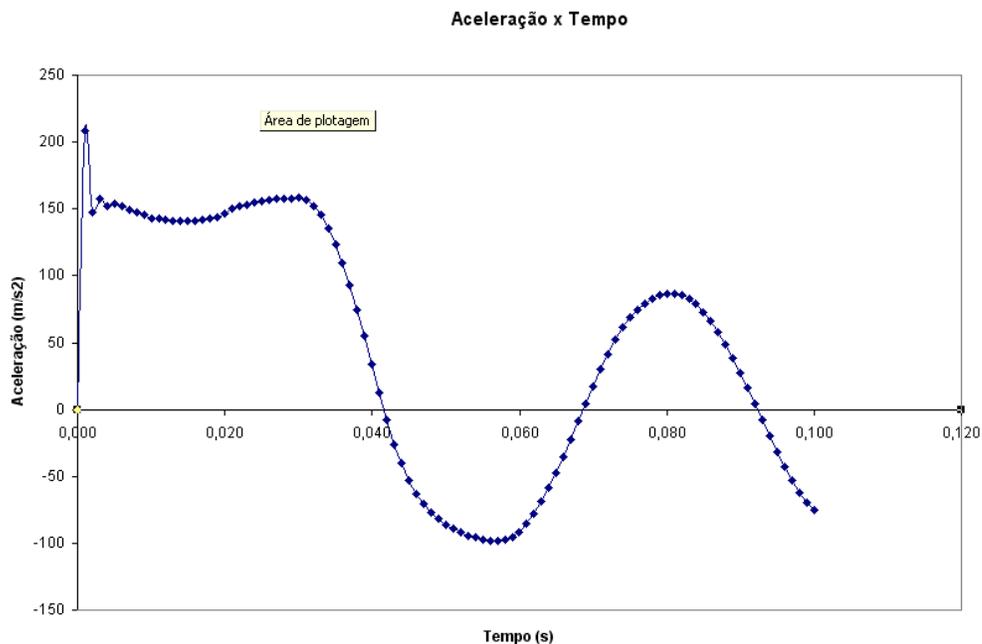


Figura 74 – Gráfico da aceleração em função do tempo obtido numericamente. Fonte: Programa Microsoft Excel.

A partir do valor da aceleração e pela 2.<sup>a</sup> Lei de Newton tem-se a força de impacto igual a 9111,71N. A variação da deformação no tempo também foi obtida e está representada na Figura 75.

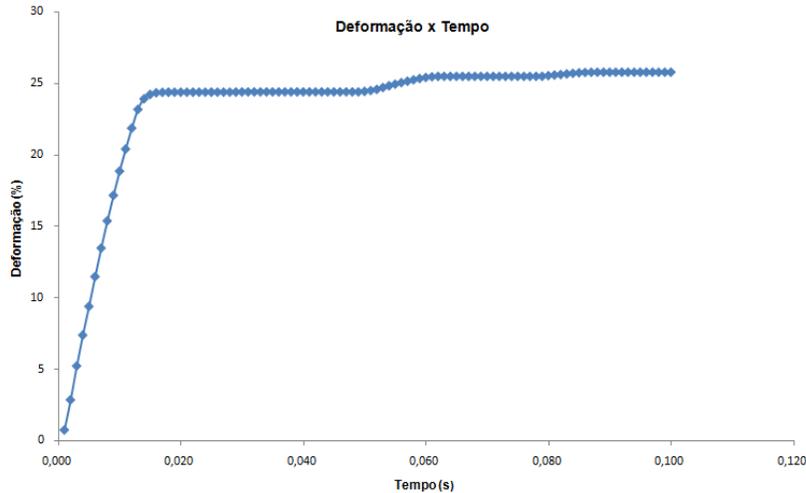


Figura 75 – Perfil da deformação em função do tempo obtido numericamente. Fonte: Programa Microsoft Excel.

A taxa de deformação ( $\dot{\varepsilon}$ ) deste impacto foi de aproximadamente  $1467 \text{ s}^{-1}$  com uma qualidade de ajuste da curva de 99%, conforme Figura 76.

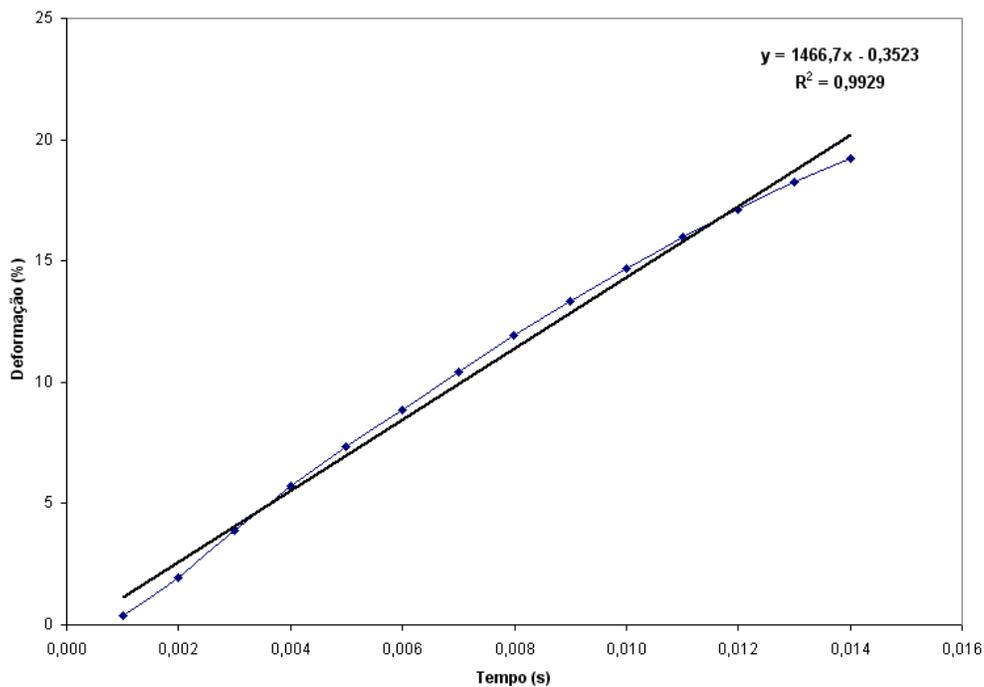


Figura 76 – Ajuste da curva numérica de deformação x tempo com qualidade de 99%. Fonte: Programa Microsoft Excel.

A Figura 77 mostra a comparação entre a forma deformada experimental e a numérica assim como as deflexões sofridas pelas estruturas.

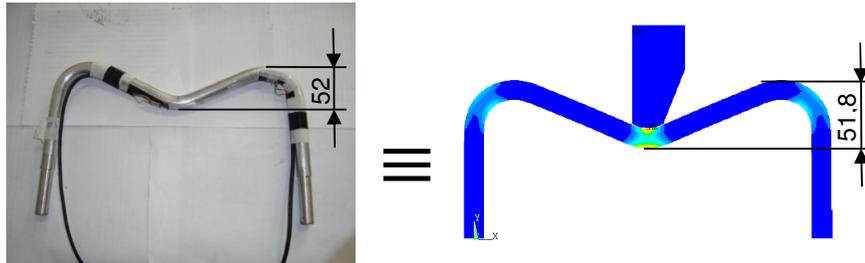


Figura 77 – Estruturas deformadas experimentalmente e numericamente. Velocidade de impacto de 4,4 m/s (15,84 km/h).

### 4.3 Teste n.º3 (h = 1,5 m)

Nestas condições de teste a velocidade de impacto é  $V_0 = 5,4 \text{ m/s} = 19,44 \text{ km/h}$ . A taxa de deformação obtida neste impacto foi de  $1515 \text{ s}^{-1}$ . Na Figura 78 encontra-se o estado deformado da estrutura após o impacto da massa.



Figura 78 – Estrutura em “U” após impacto a 19,44 km/h. Fonte: Nuclep S/A.

Na Figura 79 verifica-se o gráfico da deformação no tempo para esta condição de teste de impacto. O ajuste da curva do gráfico correspondente ao impacto com uma equação linear obteve uma qualidade de 98%, conforme Figura 80.

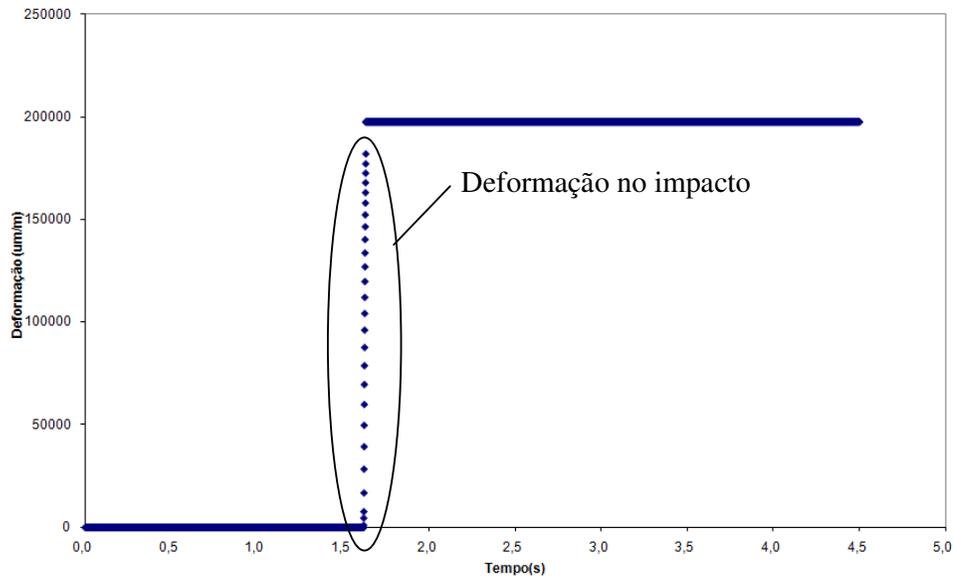


Figura 79 – Gráfico deformação x tempo da estrutura impactada a 19,44 km/h. Fonte: Programa Microsoft Excel

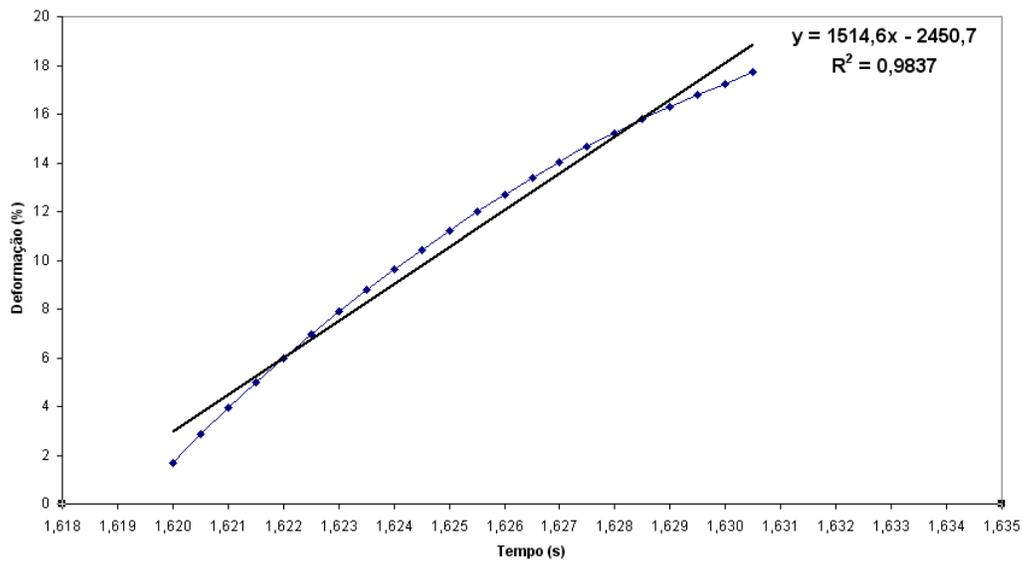


Figura 80 – Ajuste da curva experimental deformação x tempo com qualidade de 98%. Fonte: Programa Microsoft Excel.

A partir de um nó pertencente ao cutelo da massa de impacto, escolhido arbitrariamente durante a etapa de pós processamento, se obtém a variação da aceleração no tempo. Pelo gráfico da Figura 81 se obtém o valor da aceleração no momento do impacto igual a  $223,79 \text{ m/s}^2$ .

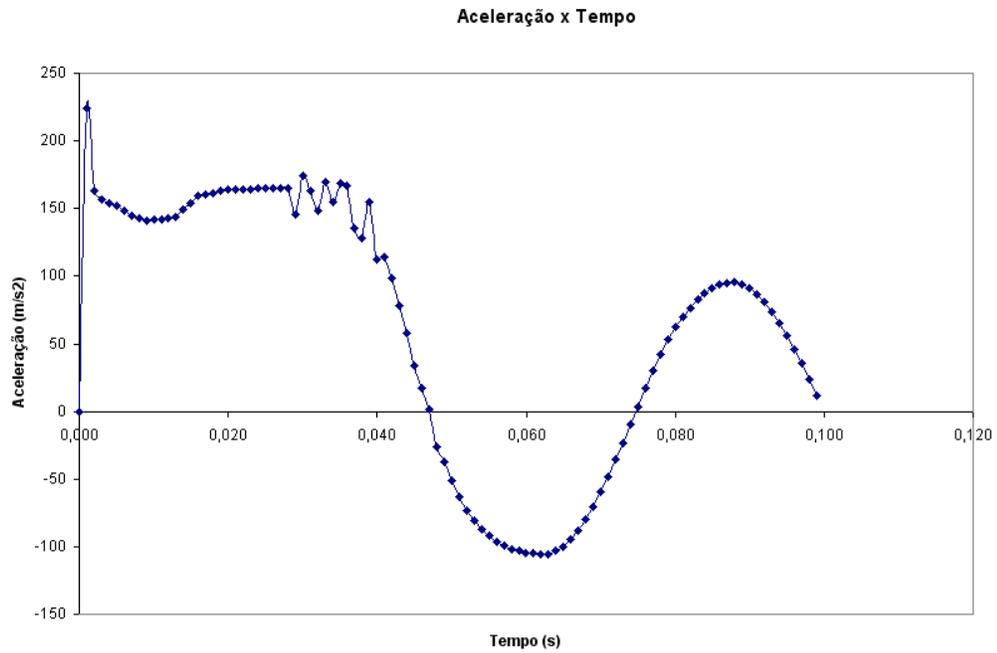


Figura 81 – Gráfico da aceleração em função do tempo obtido numericamente. Fonte: Programa Microsoft Excel.

A partir do valor da aceleração e pela 2.<sup>a</sup> Lei de Newton tem-se a força de impacto igual a 9802N. A variação da deformação no tempo também foi obtida e está representada na Figura 82.

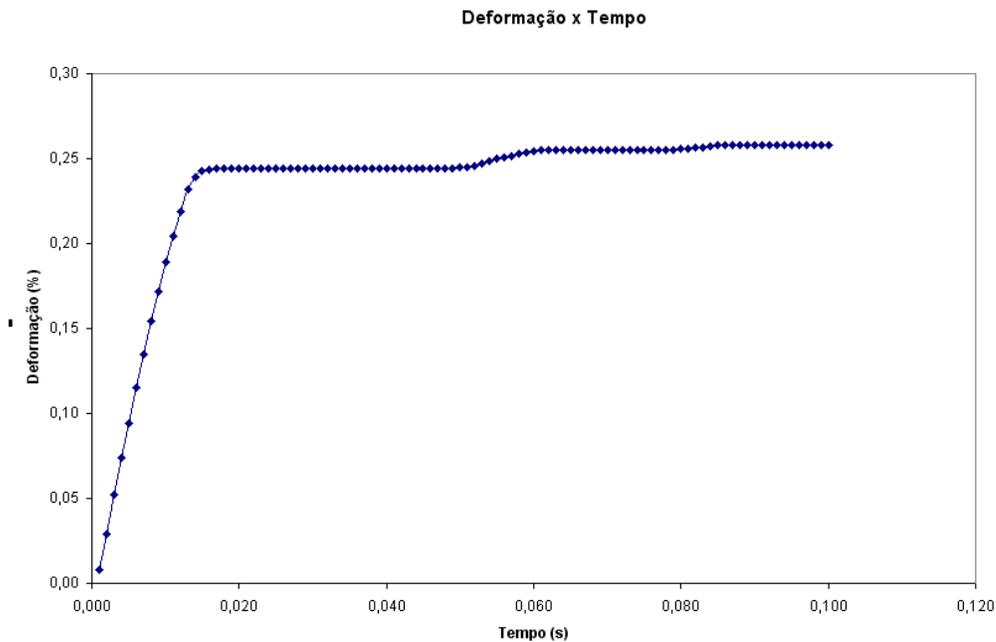


Figura 82 – Perfil da deformação em função do tempo obtido numericamente. Fonte: Programa Microsoft Excel.

A taxa de deformação ( $\dot{\epsilon}$ ) deste impacto, obtida pela análise do LS-Dyna, foi de aproximadamente  $1568 \text{ s}^{-1}$ , conforme Figura 83.

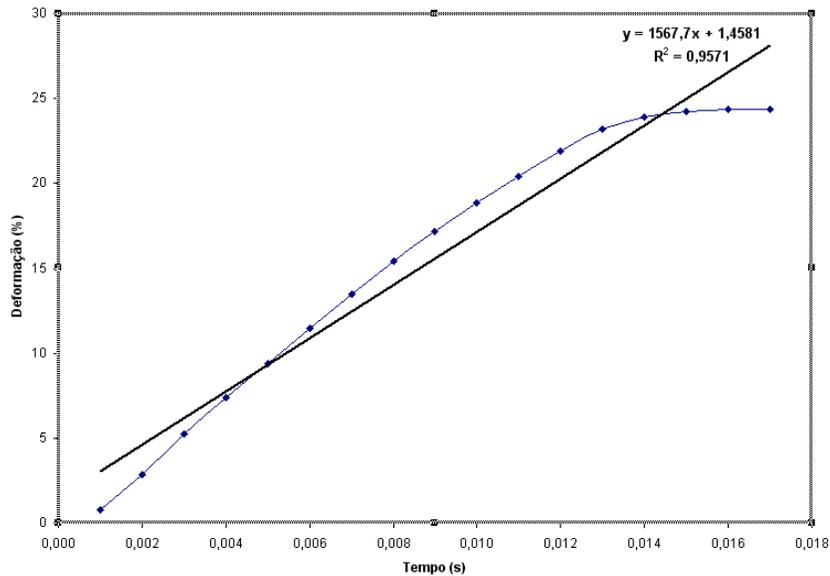


Figura 83 – Ajuste da curva numérica deformação x tempo com qualidade de 95%.  
Fonte: Programa Microsoft Excel.

A Figura 84 mostra a comparação entre a forma deformada experimental e a numérica.

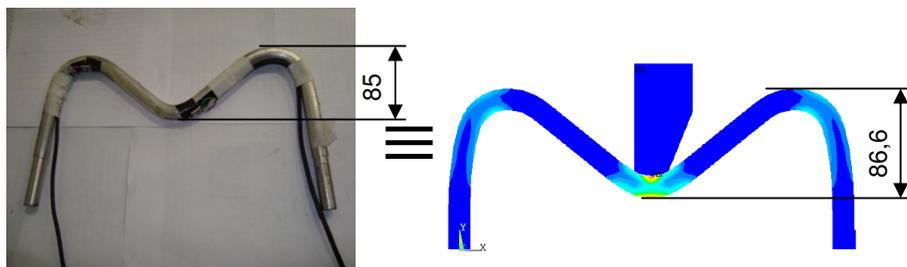


Figura 84 – Estruturas deformadas experimentalmente e numericamente. Velocidade de impacto de  $5,4 \text{ m/s}$  ( $19,44 \text{ km/h}$ ).

Para uma melhor visualização seguem os parâmetros do impacto comentados anteriormente, obtidos a partir do experimento e das simulações por elementos finitos.

As deflexões experimentais sofridas nas porções centrais das estruturas com o impacto estão relacionadas na Tabela 11.

Altura h (m)	Veloc. de Impacto $V_0$ (m/s)	Deflexões y (mm)
0,7	3,7	37
1,0	4,4	52
1,5	5,4	85

Tabela 11 – Deslocamento vertical experimental dos pontos médios das estruturas em função da velocidade de impacto.

Com a Tabela 11 se conclui que quanto maior a velocidade de impacto maior a deflexão sofrida pela estrutura. Em relação à colisão de um veículo com um objeto rígido como, por exemplo, uma árvore verifica-se que a severidade das lesões em seus ocupantes aumenta aproximadamente linear com o aumento da velocidade, devido à maior penetração da estrutura do veículo no compartimento reservado aos passageiros.

Por comparação pode se verificar que as deflexões obtidas numericamente apresentaram um percentual de erro pequeno em relação às deflexões experimentais. Desta forma, as análises numéricas e experimentais apresentaram boa concordância. Na Tabela 12 encontram-se os referidos resultados.

Altura h (m)	Deflexão Experimental (mm)	Deflexão Numérica (mm)	Erro (%)
0,7	37	35,6	3,7
1,0	52	51,8	0,3
1,5	85	86,6	1,9

Tabela 12 – Comparação entre as deflexões verticais, experimental e numérica, dos pontos médios das estruturas em “U”.

Como mencionado anteriormente a força de impacto não foi obtida diretamente pela análise por elementos finitos. Esta foi obtida a partir da aceleração no momento do impacto e pela 2.<sup>a</sup> Lei de Newton. Seguem na Tabela 13 os parâmetros mencionados.

Altura h (m)	Aceleração (m/s <sup>2</sup> )	Força (N)
0,7	186,84	8153,59
1,0	208,03	9117,71
1,5	223,79	9802,0

Tabela 13 – Parâmetros de aceleração e força obtidos pela simulação por elementos finitos.

Comparando-se as taxas de deformação ( $\dot{\epsilon}$ ) obtidas por elementos finitos com as obtida experimentalmente, verifica-se que as simulações apresentaram uma boa concordância, já que os percentuais de erro em relação ao resultado experimental são pequenos. A Tabela 14 ilustra o comentário acima.

Altura h (m)	( $\dot{\epsilon}$ ) Experimental (s <sup>-1</sup> )	( $\dot{\epsilon}$ ) Numérica (s <sup>-1</sup> )	Erro (%)
0,7	1065,6	1007,7	5,4
1,0	1486,7	1466,7	1,3
1,5	1514,7	1567,7	3,5

Tabela 14 – Comparação entre as taxas de deformação, experimental e numérica, dos pontos médios das estruturas em “U”.

#### 4.4 Influência da Taxa de Deformação nos Fatores de Escala da Análise por Similaridade

Já foi mencionado no item 3.1 que o comportamento mecânico de alguns materiais como, por exemplo, o aço é alterado quando este é submetido a altas taxas de deformação. O material usado para confecção da estrutura “U” deste trabalho (alumino 6051-T6), ao contrário do aço, apresenta pouca sensibilidade ao aumento da taxa de deformação (Smerd, *et al.*, 2005).

Nas análises por similaridade de situações de impacto se deve utilizar o fator de escala associada à alta taxa de deformação em questão.

Com a equação constitutiva de Cowper-Symonds desejou-se verificar a variação dos fatores de escala corrigidos e compará-los com os obtidos a partir da taxa de deformação associada a carregamento estático. Na Tabela 15 se encontra os fatores de escala corrigidos para cinco taxas de deformação diferentes, considerando um fator de escala geométrico ( $\lambda_i$ ) igual um quinto.

Taxa de Deformação (s <sup>-1</sup> )	Fatores de Escala Corrigidos					
	$\lambda_{\sigma d}$	$\lambda_v$	$\lambda_A$	$\lambda_T$	$\lambda_{\dot{\epsilon}}$	$\lambda_{Ei}$
0,0004	1,008	1,003	5,035	0,199	5,015	0,201
1065,6	1,193	1,092	5,965	0,183	5,460	0,239
1486,7	1,203	1,097	6,015	0,182	5,485	0,241
1514,6	1,203	1,097	6,015	0,182	5,485	0,241
3000	1,224	1,106	6,120	0,181	5,530	0,245
Erro (%)	19,3	9,4	19,5	9,0	9,4	19,9

Tabela 15 – Fatores de escala corrigidos para estrutura de alumínio.

Como se pode verificar os fatores de escala obtidos a partir da taxa de deformação de carregamento estático (0,0004s<sup>-1</sup>) são bastantes diferentes dos obtidos com altas taxas de deformação.

Comparando os fatores de escala na faixa de taxa de deformação associada a carregamento de dinâmica alta, não se percebe alterações significativas mesmo para taxas suficientemente altas. Pode-se verificar o comentário acima através dos seguintes passos:

- 1) Adota-se uma taxa de deformação de carregamento dinâmico obtida no ensaio com a máquina de queda de peso para ser utilizada como referência;
- 2) Escolhe-se uma taxa de deformação aleatória, maior que a taxa de referência, e compara-se com a taxa de referência.

Seguem na Tabela 16 os fatores de escala corrigidos junto com o erro envolvido considerando-se a taxa de deformação de referência.

Taxa de Deformação (s <sup>-1</sup> )	Fatores de Escala Corrigidos					
	$\lambda_{\sigma d}$	$\lambda_v$	$\lambda_A$	$\lambda_T$	$\lambda_{\dot{\epsilon}}$	$\lambda_{Ei}$
1514,6 (Referência)	1,203	1,097	6,015	0,182	5,485	0,241
5000	1,240	1,113	6,20	0,179	5,565	0,248
Erro (%)	3,1	1,6	3,1	1,6	1,5	2,9

Tabela 16 – Comparação entre fatores de escala de altas taxas de deformação.

Pela Tabela 16, verifica-se que os valores dos fatores de escala corrigidos são bem próximos para as taxas de deformação escolhidas, confirmando assim o a pouca sensibilidade do alumínio em situações com altas taxas de deformação.

#### **4.5 Análise de Similaridade Para Determinação da Taxa de Deformação Imposta ao Protótipo**

Como mencionado no item 2.7 do Capítulo 2, a similaridade é uma ferramenta bastante utilizada na análise de sistemas de interesse, onde através da observação de modelos em escala reduzida se compreende melhor o comportamento do protótipo. O modelo em estudo é semelhante ao pára-choque de um veículo de passeio e o experimento realizado simula uma colisão de um objeto rígido com uma estrutura deformável, representando, por exemplo, a colisão de um veículo com um poste ou um tronco de árvore.

A análise de similaridade desenvolvida neste trabalho tem como objetivo prever o comportamento que o protótipo apresentaria com o carregamento aplicado sobre o modelo (estrutura “U”) através do impacto gerado pela máquina *Drop Weight*. Como foi verificado nos itens 4.1, 4.2 e 4.3 todos os testes de impacto realizados com as estruturas em “U” foram classificados como de dinâmica baixa, pois apresentaram taxa de deformação maior que  $1000 \text{ s}^{-1}$ . Com a análise por similaridade deseja-se verificar se o carregamento aplicado na estrutura “U” é suficiente para causar um carregamento dinâmico no protótipo.

Neste trabalho, o veículo Corsa Classic da General Motors® foi considerado protótipo. A partir das dimensões deste se construiu um modelo em escala aproximadamente cinco vezes menor. As dimensões consideradas para o pára-choque frontal do protótipo e do modelo são respectivamente, 1500 mm e 282 mm.

Para se ter uma informação preliminar sobre o comportamento do protótipo decidiu-se efetuar a análise através da taxa de deformação imposta ao modelo no ensaio de impacto realizado com a maior altura de queda, ou seja, igual a 1,5m.

O ensaio de impacto realizado com uma altura de 1,5 m impôs ao modelo uma taxa de deformação de  $1514,6 \text{ s}^{-1}$ , conforme mencionado no item 4.3. Considerando um fator de escala geométrico de  $\lambda_l=1/5$  e utilizando os fatores de escala corrigidos apresentados na Tabela 14, tem-se para o protótipo:

$$\lambda_{\varepsilon} = \frac{\dot{\varepsilon}_m}{\dot{\varepsilon}_p}$$

$$5,485 = \frac{1514,6}{\dot{\varepsilon}_p}$$

$$\dot{\varepsilon}_p = 276,13 \text{ s}^{-1}$$

Segundo Tabela 2 mencionada no item 2.1 a taxa de deformação verificada no protótipo é correspondente a um ensaio de dinâmica baixa. Segundo Meyers (1994) para que o carregamento submetido ao protótipo seja de dinâmica alta, este deve ter taxa de deformação a partir de  $1000 \text{ s}^{-1}$ . Desta forma, a taxa de deformação mínima ( $\dot{\varepsilon}_{m_m}$ ) no modelo (estrutura “U”) deve ser:

$$\lambda_{\varepsilon} = \frac{\dot{\varepsilon}_{m_m}}{\dot{\varepsilon}_p}$$

$$5,485 = \frac{\dot{\varepsilon}_{m_m}}{1000}$$

$$\dot{\varepsilon}_{m_m} = 5485 \text{ s}^{-1}$$

A taxa de deformação do modelo necessária para que protótipo apresente um carregamento de dinâmica alta é bastante elevada. Comparando-se com a taxa de deformação obtida para a altura de queda de 1,5m ( $1514,6 \text{ s}^{-1}$ ) conclui-se que esta é aproximadamente quatro vezes maior e por motivos relacionados a limitações da máquina de ensaio *Drop Weight*, que possui altura máxima de queda igual a 2,10 m, não é possível efetuar este ensaio com taxa de deformação com o modelo em escala adotado.

Para se obter taxas de deformação dinâmicas no modelo que após serem estendidas para o protótipo ainda permaneçam classificadas como dinâmicas pode-se recorrer a uma das seguintes alternativas:

- 1) Alterar a escala geométrica do modelo;

- 2) Modificar o material do modelo, assim como suas características de rigidez;
- 3) Alterar a forma de aplicação do carregamento dinâmico através de um novo dispositivo de ensaio de impacto;

Adotando-se a alternativa para obtenção do novo fator de escala geométrico, consideram-se as seguintes hipóteses:

1. Não há nenhuma alteração em relação às características do material, ou seja, deve-se continuar usando a equação constitutiva de Cowper-Symonds;
2. A massa da *Drop Weight* permanece inalterada; e
3. Existe a possibilidade de impacto a taxas de deformação maiores que a mínima especificada para o modelo.

O novo fator de escala geométrico para a estrutura em “U” é dado por:

$$\lambda_l^{1/p} = \frac{\left( \dot{\varepsilon}_{m_n} \right)^{1/p}}{\left[ \lambda_{\sigma l} \times \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_{m_n}}{D} \right)^{1/p} \right] - 1 \right] \times D^{1/p}}$$

$$\lambda_l = \left( \frac{\left( \dot{\varepsilon}_{m_n} \right)^{1/p}}{\left[ \lambda_{\sigma l} \times \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_{m_n}}{D} \right)^{1/p} \right] - 1 \right] \times D^{1/p}} \right)^{1/p}$$

na qual D e p são constantes constitutivas do alumínio e valem, respectivamente, 6500 e 4. Desta forma se obtém:

$$\lambda_l^{1/p} = \frac{\left(\dot{\varepsilon}_{m_n}\right)^{1/p}}{\left[\lambda_{cal} \times \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{m_n}}{D}\right)^{1/p}\right] - 1\right] \times D^{1/p}}$$

$$\lambda_l = \left( \frac{(5485)^{1/4}}{\left[1,203 \times \left[1 + \left(\frac{5485}{6500}\right)^{1/4}\right] - 1\right] \times 6500^{1/4}} \right)^{1/4}$$

$$\lambda_l = 0,25$$

Desta forma, para que o protótipo seja submetido a um carregamento com taxa de deformação de dinâmica alta, o modelo deve ter fator de escala geométrica igual a um quarto.

Com o exposto acima se verifica que se no modelo o carregamento aplicado é de dinâmica alta, após análise pelas leis de similaridade com os fatores de escala corrigidos, este pode ser classificado como de dinâmica baixa para o protótipo e isto não corresponde a situações de impacto veicular.

Para que se conheça o comportamento de uma estrutura (protótipo) submetida a carregamento com altas taxas de deformação deve-se conhecer qual taxa de deformação deve ser aplicada no modelo de modo a garantir que após a extensão dos resultados para o protótipo ainda se tenha carregamento dinâmico associado à alta taxa de deformação.

Como mencionado anteriormente, uma das formas se ter carregamentos dinâmicos no modelo e no protótipo é alterar a escala geométrica do modelo, desde que não se altere o material da estrutura e se conheça a taxa de deformação a ser imposta no modelo.

#### 4.6 Análise da Absorção de Energia pela Estrutura “U”

Conforme mencionado no item 2.4 do Capítulo 2, a energia absorvida pela

estrutura no impacto é resultante do trabalho produzido pela força aplicada pela massa da máquina por queda de peso.

Segundo o princípio de conservação de energia, a energia cinética ( $E_c$ ) incidente na estrutura no momento do impacto é oriunda da conversão da energia potencial gravitacional ( $E_p$ ) da massa da máquina por queda de peso. Para abordar a questão de absorção de energia decidiu-se efetuar a análise com o ensaio de impacto realizado a uma altura de 0,7m.

A energia cinética da massa da máquina de teste na iminência do impacto se dá por:

$$E_c = E_p$$

$$E_c = m \times g \times h$$

na qual,

$m$  = massa do impactador da Drop Weight [kg];

$g$  = aceleração da gravidade = [m/s<sup>2</sup>];

$h$  = altura de teste [m].

Sendo assim a energia cinética incidente sobre a estrutura “U” é 331,67 J.

Com o impacto esta energia cinética é convertida em outras formas de energia. Segundo Kang e Kim (2000) o balanço de energia total do impacto pode ser definido por:

$$E_i = E_{reb} + E_{abs}$$

na qual,

$E_i$  = energia total do impacto [J];

$E_{reb}$  = energia de rebote [J];

$E_{abs}$  = energia absorvida [J].

A parcela da energia absorvida pode ser dividida em duas partes: uma relativa à parte absorvida pela estrutura de teste e outra que é absorvida pela máquina de ensaio. A energia de rebote é referente ao movimento de retorno do impactador (quique) imediatamente após o impacto.

Desta forma a energia absorvida pela estrutura na forma de energia de deformação é igual à variação da energia cinética e ao trabalho realizado pela

massa de impacto.

A partir das simulações por elementos finitos foram obtidos os valores da força atuante e dos deslocamentos causados. Com estes dados se tem o gráfico força x deslocamento para cálculo do trabalho realizado (energia absorvida).

Segue na Figura 85 o gráfico força (F) x deslocamento (s) do ensaio de impacto com altura de 0,7m.

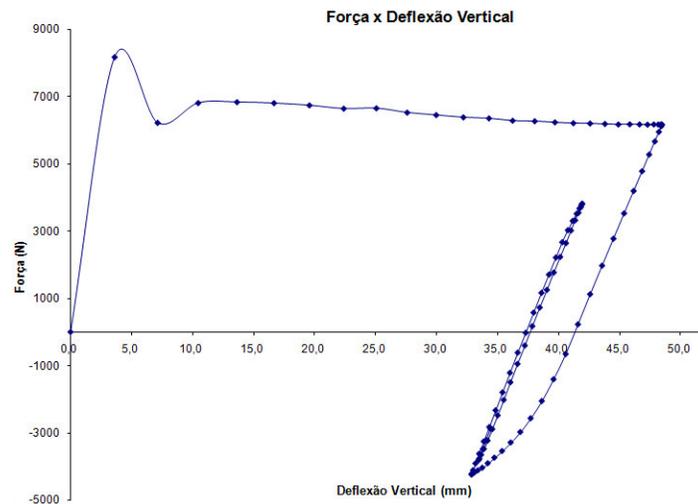


Figura 85 – Gráfico da força em função do deslocamento (deflexão vertical). Fonte: Programa Microsoft Excel.

De acordo com Meriam e Kraige (2004), o trabalho realizado por uma força se dá pela integral definida da força em relação a um deslocamento. Esta integral definida é representada geometricamente pela área sob a curva do gráfico F x s. Sendo assim,

$$W = E_d = \int F ds$$

Para resolver a integral acima, é necessário conhecer a função que relaciona a variável força (F) e o deslocamento (s). Como a função não é conhecida, a energia de deformação absorvida foi calculada, de forma aproximada, a partir de ajustes do gráfico a uma equação linear.

Com os ajustes se obtém a função e juntamente com os valores das deflexões verticais obtidos numericamente é possível realizar a integração. Abaixo segue as etapas realizadas, no programa Excel, para obtenção da área abaixo do gráfico F x d.

1.Divisão do gráfico em trechos lineares do gráfico de modo a obter

- melhor qualidade no ajuste;
2. Seleção da curva associada aos trechos lineares para obtenção de novo gráfico;
  3. Selecionar a curva e adicionar linha de tendência juntamente com a equação de ajuste e valor do  $R^2$ .

As Figuras 86 e 87 ilustram o procedimento adotado para determinação da área abaixo da curva do gráfico F x d.

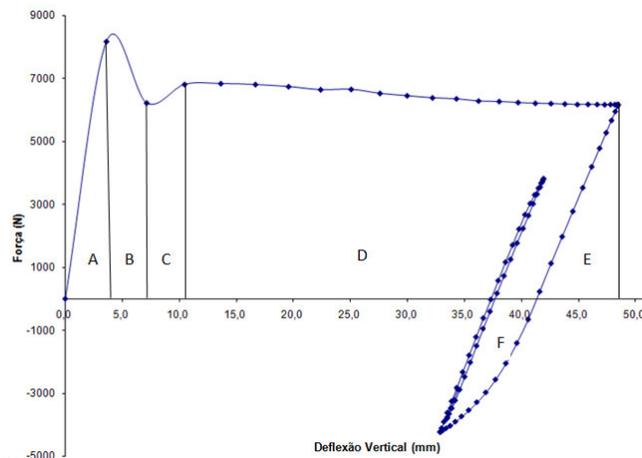


Figura 86 – Gráfico da força em função do deslocamento dividido em seis partes.

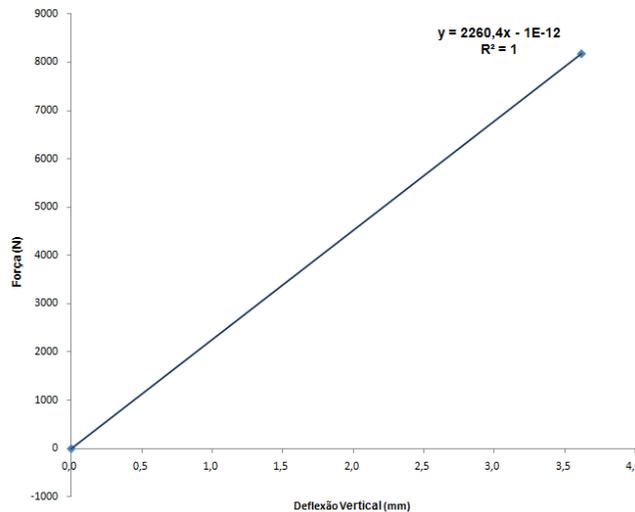


Figura 87 – Ajuste da curva do gráfico F x d referente ao trecho A com qualidade de 100%. Fonte: Programa Microsoft Excel

A partir das etapas listadas acima se tem as seis equações de ajuste referente aos trechos de área mostrados no gráfico F x d. Sendo assim se tem as

seguintes equações:

$$A = 2260,4s + 1 \times 10^{-12}; B = -556,22s + 10197; C = 177,82s + 4959,2;$$

$$D = -20,224s + 7093,6; E = 868,69s - 35873; F = 467,13s - 19823.$$

Como já comentado anteriormente o valor aproximado da energia absorvida será conhecido através do valor da área sob o gráfico F x d. Com o procedimento adotado a área total do gráfico F x d é dado pela soma das integrais das equações acima nos seus respectivos limites de integração (deflexões verticais). Então:

$$E_d = \int_0^{3,62} (2260,4s - 1 \times 10^{-12}) ds + \int_{3,62}^{7,14} (-556,22s + 10197) ds + \int_{7,14}^{10,46} (177,82s + 4959,2) ds$$

$$+ \int_{10,46}^{48,16} (-20,224s + 7093,6) ds + \int_{48,16}^{41,58} (868,69s - 35873) ds - \int_{41,58}^{32,87} (467,13s - 19823) ds$$

Assim, se tem uma estimativa da energia absorvida pela estrutura “U” com a deformação causada pelo impacto da massa da máquina por queda de peso.

$$E_d = 265300N.mm$$

$$E_d = 265,3J$$

Pelo resultado obtido se conclui que a maior parte da energia cinética incidente na estrutura é absorvida sob a forma de energia de deformação. A outra parte da energia cinética, o que corresponde a aproximadamente 20%, é absorvida pelo próprio sistema de teste.