

7

Referências Bibliográficas

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.2R: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**, Michigan, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 3039/D 3039 M, 2006 – **Standard test method for tensile properties of polymer matrix composites materials**. EUA.

ARAÚJO, A.C.N. **Estudo Experimental do Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado Utilizando Compósitos com Tecido de Fibras de Carbono**. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6152: Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração de Materiais Metálicos – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7223: Determinação da Consistência pelo abatimento do Tronco de Cone.** Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.** Rio de Janeiro, 1987.

BARR, B., BOUAMRATA, A., BAGHLI, A. Impact Strength of FRC Materials. **Engineering Fracture Mechanics**, Vol. 35, No 1/2/3, 1990, pp. 333-342.

BEBER, A.J., CAMPOS FILHO, A., CAMPAGNOLO, J.L. Tecidos de fibra de Carbono no Reforço de Vigas de Concreto Armado. **2º Congresso Internacional sobre o Comportamento de Estruturas Danificadas**, 2000.

CLOUGH, R. W. & PENZIN, J., **Dynamics of Structures**. McGraw-Hill Book Company, 2ª ed., U.S.A, 1993.

ERKI, M.A., MEIER, U. Impact Loading of Concrete Beams Externally Strengthened with CFRP Laminates. **Journal of Composites for Construction**, Vol. 3, No. 3, 1999, pp. 117-124.

GARCEZ, M.R., LOPES, M.I.P., SOARES, J.M.D. Comportamento de Vigas de Concreto Armado Reforçadas, sob Carregamento, com Tecidos de Fibra de Carbono. **V Congresso de Engenharia Civil**, UFJF, 2002.

GEORGIN, J.F., REYNOUARD, J.M. Modeling of Structures Subjected to Impact: Concrete Behaviour Under High Strain Rate. **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, 2003, pp. 131-143.

HELENE, P., TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. Editora PINI, São Paulo, 1995, p.349.

HUGHES, B.P., AL-DAFIRY, H. Impact Energy Absorption at Contact zone and supports of Reinforced Plain and Fibrous Concrete Beams . **Construction and Building Materials**, Vol. 9, No. 4, 1995, pp. 239-244.

JEROME, D.M., ROSS, C. A. Simulation of the Dynamic Response of Concrete Beams Externally Reinforced with Carbon-Fiber Reinforced Plastic. **Computers & Structures**, Vol. 64, No 5/6, 1997, pp. 1129-1153.

KRAUTHAMMER, T., ELFAHAL, M. M., LIM, J., OHNO, T., BEPPU, M., MARKESET, G. Size Effect for High-Strength Concrete Cylinders Subjected to Axial Impact. **International Journal of Impact Engineering**, No 28, 2003, pp. 1001-1016.

MACHADO, A. P. **FIBRAS DE CARBONO – Manual Prático de Dimensionamento**. Belo Horizonte, 2006, 412 pp.

MACHADO, M. G. **Estudo experimental da ductilidade de vigas em concreto armado reforçadas à flexão utilizando compósitos com tecido de fibras de carbono**. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2004.

MENEGHEL, J.M. **Análise experimental da aderência entre o concreto e compósitos com tecido de fibras de carbono**. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2005.

MENEGHETTI, L.C. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Materiais Compósitos**. Tese de Doutorado, UFRGS, 2007.

MINDESS, S., BANTHIA, N., BENTURT, A. The Response of Reinforced Concrete Beams with a Fibre Concrete Matrix to Impact Loading. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, Vol. 8, No 3, 1986, pp. 165-170.

MINDESS, S., VONDRAN, G. Properties of Concrete Reinforced with Fibrillated Polypropylene Fibres Under Impact Loading. **Cement and Concrete Research**, Vol. 18, 1988, pp. 109-115.

OSHIRO, R. E., ALVES, M. Scaling the Impact of a Mass on a Structure. **International Journal of Impact Engineering**, 2004.

PACHECO, C. O. **Verificação Experimental da Aderência CFC- Concreto por meio de Ensaio Tração- Compressão em Corpos-de-prova Cúbicos**. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2006.

PESIC, N., PILAKOUTAS, K. Concrete Beams with Externally Bonded Flexural FRP-Reinforcement Analytical Investigation of Debonding Failure. **Composites: Part B**, No 34, 2003, pp. 327-338.

RIBEIRO, P.T.P. Critérios para o Dimensionamento do Reforço do Concreto Armado com Elementos Compósitos de Fibra de Carbono. **Engenharia Estudo e Pesquisa**, Vol. 8, No 2, 2006, pp. 87-97.

S & P CLEVER REINFORCEMENT COMPANY, **Design Guide Line for S&P FRP Systems**. Brunnen, 2006.

TANG, T., SAADATMANESH, H. Analytical and Experimental Studies of Fiber-Reinforced Polymer-Strengthened Concrete Beams Under Impact Loading. **ACI Structural Journal**, Vol. 102, No. 1, 2005, pp. 139-149.

TANG, T., SAADATMANESH, H. Behavior of Concrete Beams Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer Laminates under Impact Loading. **Journal of Composites for Construction**, Vol. 7, No. 3, 2003, pp. 209-218.

TOUTANJI, H., ZHAO, L., Deng, Y., ZHANG, Y., BALAGURU, P. Cyclic Behavior of RC Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets Bonded by Inorganic Matrix. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol. 18, No. 1, 2006, pp. 28-35.

WANG, N., MINDESS, S., KO, K. Fibre Reinforced Concrete Beams Under Impact Loading. **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, No. 3, 1996, pp. 363-376.

WHITE, T.W., SOUDKI, K.A., ERKI M.A. Response of RC Beams Strengthened with CFRP Laminates and Subjected to a High Rate of Loading. **Journal of Composites for Construction**, Vol. 5, No. 3, 2001, pp. 153-162.

ZIELINSKI, A. J., REINHARDT, H. W., KORMELING, H. A. Experiments on Concrete Under Uniaxial Impact Tensile Loading. **Matériaux et Constructions**, Vol. 14, No 80, 1981, pp. 103-112.

Anexo A

Caracterização dos Agregados

Composição Granulométrica

A determinação da composição granulométrica dos agregados graúdo e miúdo, utilizados na dosagem do concreto das vigas, foi realizada de acordo com a NBR 7217:1987. As Tabelas A.1 e A.2 mostram, respectivamente, as proporções relativas de materiais retidos nas peneiras da série normal e intermediária. Os ensaios foram realizados Laboratório de Materiais da Unioeste.

Tabela A.1 – Composição granulométrica - agregado miúdo.

peneira (mm)	massa retida (g)	Porcentagem	
		Retida	retida acumulada
9,5	0,0	0,00%	0,00%
6,3	0,0	0,00%	0,00%
4,8	0,0	0,00%	0,00%
2,4	2,0	0,20%	0,20%
1,2	20,0	2,00%	2,20%
0,6	43,4	4,34%	6,55%
0,3	383,6	38,36%	44,90%
0,15	494,6	49,46%	94,36%
Fundo	56,4	5,64%	100,00%
Total	1000		

Tabela A.2 – Composição granulométrica - agregado graúdo.

peneira (mm)	massa retida (g)	Porcentagem	
		Retida	retida acumulada
32	0,0	0,00%	0,00%
25	0,0	0,00%	0,00%
19	0,0	0,00%	0,00%
12,5	1066,8	35,56%	35,56%
9,5	856,5	28,55%	64,11%
6,3	859,8	28,66%	92,77%
4,8	154,2	5,14%	97,91%
2,4	41,7	1,39%	99,30%
Fundo	21,0	0,70%	100,00
Total	3000		

Módulo de Finura do Agregado Miúdo

O modulo de finura do agregado é calculado dividindo-se a soma de todas as porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal por 100. Desta formas, para o agregado miúdo temos:

$$MF = \frac{148}{100} = 1,48 \quad (A.1)$$

Dimensão Máxima Característica

A dimensão máxima característica do agregado é a porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal. Para o agregado graúdo temos:

$$D_{\max} = 19 \text{ mm} \quad (A.2)$$

Massa Específica

A massa específica do agregado miúdo foi obtida por meio do Frasco de Chapman de acordo com a NBR 9776:1987. No frasco com 200cm^3 de água adicionou-se 500 g de agregado miúdo. A leitura feita foi de 392cm^3 , obtendo-se o seguinte valor para a massa específica:

$$\gamma_e = \frac{500}{389,4 - 200} = 2,64 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{A.4})$$

Para o cálculo da massa específica do agregado graúdo, utilizou-se o procedimento do Frasco Graduado. No frasco com 500cm^3 de água adicionou-se 650 g de agregado miúdo. A leitura feita foi de 712cm^3 , obtendo-se o seguinte valor para a massa específica:

$$\gamma_e = \frac{650}{712 - 500} = 3,06 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{A.5})$$

Massa Unitária Compactada

O procedimento para a determinação da massa unitária compactada, conforme a NBR NM 45:2006, consiste em encher um recipiente retangular, em três camadas, com o agregado graúdo, promovendo o adensamento de cada camada mediante 25 golpes de uma haste metálica, com 16 mm de diâmetro e 60 cm de comprimento. A massa unitária compactada é calculada dividindo-se a massa de brita contida no recipiente pelo volume do recipiente.

$$V_{rec} = 30,7 \times 30,7 \times 20 \text{ cm} = 18.849,8 \text{ cm}^3 \quad (\text{A.6})$$

$$P_{rec} = 8,7 \text{ kg} \quad (\text{A.7})$$

$$P_{agr} = 40,4 - 8,7 = 31,7kg = 31700g \quad (A.8)$$

$$\gamma_u = \frac{31700}{18849,8} = 1,68 g/cm^3 \quad (A.9)$$

Anexo B

Rotina Computacional

A rotina computacional desenvolvida em MAPLE, para o cálculo da capacidade resistente das vigas antes da aplicação do reforço e para o dimensionamento da área de reforço necessária para a viga resistir ao momento solicitante desejado, é mostrada a seguir, exemplificando o caso das vigas do Grupo B.

```
> restart:
DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO A FLEXÃO EM VIGAS DE CONCRETO
ARMADO
Dimensionamento pelo Estado Limite Último

Características da Viga e dos Materiais
Seção Transversal da Viga
> bw:=0.15:      # base (m)
> h:=0.15:      # altura (m)
> c:=0.03:      # cobrimento (m)
Armadura Positiva
> phi:=8:       # diâmetro (mm)
> nb:=3:       # número de barras
> fyt:=500:     # tensão de escoamento (MPa)
> Es:=210:     # módulo de elasticidade (GPa)
> Ast:=evalf(nb*(Pi*(phi/1000)^2)/4):
Armadura Negativa
> phi:=5:       # diâmetro (mm)
> nb:=2:       # número de barras
> fyc:=600:     # tensão de escoamento (MPa)
> Asc:=evalf(nb*(Pi*(phi/1000)^2)/4):
Concreto
> fc:=30:      # resistência à compressão (MPa)
Fibra de Carbono
> Ef:= 230:    # módulo de elasticidade (GPa)
> tf:= 0.122/1000: # espessura do tecido (m)
DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE

Variáveis
> Rc:=1:Rsc:=1:Rst:=1:Rfc:=0:Rft:=1:erro:=10^(-5):
Domínio 2
> dominio:=2:
> xi[st]:=10:
> i:=0:s:=3.5:
> while (sqrt((Rc+Rsc-Rst)^2)>erro) do
Força resultante da seção comprimida de concreto (kN)
> xi[c]:=(i+s)/2;
> LN:=xi[c]*(h-c)/(xi[c]+xi[st]);
> if xi[c]>2 then
```

```

> psi:=1.25*(1 - 2/(3*xi[c]))
> else
> psi:=1.25*(xi[c]/2)*(1 - xi[c]/(3*2));
> end if;
> Rc:=psi*0.8*LN*bw*0.85*fc*1000;

```

Força resultante da seção comprimida de aço (kN)

```

> xi[sc]:=xi[c]*(1-(c/LN));
> if (xi[sc]*Es) > fyc then
>   fsc:=fyc else
>   fsc:=xi[sc]*Es;
> end if;
> Rsc:=fsc*Asc*1000;

```

Força resultante da seção tracionada de aço (kN)

```

> Rst:=fyt*Ast*1000;

```

Verificação do Equilíbrio de Forças

```

> if Rc+Rsc > Rst then
>   s:= (s+i)/2 else
>   i:= (s+i)/2
> end if;
> if 3.5-xi[c]<=erro then
>   Rc:=0:Rsc:=0:Rst:=0:
> end if:
> end do:

```

Domínio 3

```

> if 3.5-xi[c]<=erro then
>   Rc:=1:Rsc:=1:Rst:=1:
>   dominio:=3:
>   i:=evalf(fyt/Est):s:=10:
>   while (sqrt((Rc+Rsc-Rst)^2)>erro) do
>     xi[st]:=(i+s)/2;
>     LN:=xi[c]*(h-c)/(xi[c]+xi[st]);

```

Força resultante da seção comprimida de concreto (kN)

```

> Rc:=0.8*LN*bw*0.85*fc*1000;
Força resultante da seção comprimida de aço (kN)
> xi[sc]:=xi[c]*(1-c/LN);
> if (xi[sc]*Esc) > fyc then
>   fsc:=fyc else
>   fsc:=xi[sc]*Es
> end if;
> Rsc:=fsc*Asc*1000;

```

Força resultante da seção tracionada de aço (kN)

```

> if (xi[st]*Es) > fyt then
>   fst:=fyt else
>   fst:=xi[st]*Est
> end if;
> Rst:=fst*Ast*1000;

```

Verificação do Equilíbrio de Forças

```

> if Rc+Rsc > Rst then
>   i:= (s+i)/2 else
>   s:= (s+i)/2
> end if;
> if xi[st]-evalf(fyt/Est)<=erro then
>   Rc:=0:Rsc:=0:Rst:=0:
> end if:
> end do:
> end if:

```

Domínio 4

```

> if xi[st]-erro<=evalf(fyt/Es) then
>   Rc:=1:Rsc:=1:Rst:=1:
>   dominio:=4:

```

```

> xi[c]:=3.5:
> i:=0:s:=evalf(fyt/Es):
> while (sqrt((Rc+Rsc-Rst)^2)>erro) do
>   xi[st]:=(i+s)/2;
>   LN:=xi[c]*(h-c)/(xi[c]+xi[st]);
Força resultante da seção comprimida de concreto (kN)
> Fc:=0.8*X*LN*0.85*fc*1000;
Força resultante da seção comprimida de aço (kN)
> xi[sc]:=xi[c]*(1-c/LN);
> if (xi[sc]*Esc) > fyc then
>   fsc:=fyc else
>   fsc:=xi[sc]*Esc
> end if;
> Rsc:=fsc*Asc*1000;
Força resultante da seção tracionada de aço (kN)
> if (xi[st]*Est) > fyt then
>   fst:=fyf else
>   fst:=xi[st]*Es
> end if;
> Rst:=fst*Ast*1000;
Verificação do Equilíbrio de Forças
> if Rc+Rsc > Rst then
>   i:= (s+i)/2 else
>   s:= (s+i)/2
> end if;
> end do:
> end if:
Resultados
> Mr:=Rc*0.6*LN+Rsc*(LN-c)+Rst*(h-LN-c):
>
'DOMINIO'=dominio; 'MOMENTO_RESISTENTE_ (kN.m)'=Mr; 'LINHA_NEUTRA_ (m)'
'=LN; 'xi[c]'=xi[c]; 'xi[st]'=xi[st];
DOMINIO = 2
MOMENTO_RESISTENTE (kN.m) = 8.299089989
LINHA_NEUTRA_ (m) = 0.02669575448
 $\xi_c = 2.861151101$ 
 $\xi_{st} = 10$ 

```

DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO - DOMÍNIO 3

```

> Mr:=12.32: # Momento Resistente com Reforço (kN.m)
> i:=evalf(fyt/Es):s:=10:
> while (sqrt((Rfc-Rft)^2)>erro) do
>   xi[c]:=3.5:
>   xi[st]:=(i+s)/2;
>   LN:=xi[c]*(h-c)/(xi[c]+xi[st]);
Força resultante da seção comprimida de concreto (kN)
> Rc:=0.8*LN*bw*0.85*fc*1000;
Força resultante da seção comprimida de aço (kN)
> xi[sc]:=xi[c]*(1-c/LN);
> if (xi[sc]*Es) > fyc then
>   fsc:=fyc else
>   fsc:=xi[sc]*Es
> end if;
> Rsc:=fsc*Asc*1000;
Força resultante da seção tracionada de aço (kN)
> if (xi[st]*Es) > fyt then
>   fst:=fyf else
>   fst:=xi[st]*Es

```

```
> end if;
> Rst:=fst*Ast*1000;
```

Força resultante do Reforço (kN)

```
> xi[f]:=xi[c]*(h-LN)/LN;
> Rfc:= (Mr - Rc*(h-0.4*LN-c)-Rsc*(h-2*c))/c;
> Rft:= (Mr - Rsc*(0.4*LN-c)-Rst*(h-c-0.4*LN))/(h-0.4*LN);
> if Rfc > Rft then
>   s:= (s+i)/2 else
>   i:= (s+i)/2
> end if;
> ff:=xi[f]*Ef;
> bf:=Rft/(ff*tf*1000);
> end do;
```

Resultados

```
>
'LINHA_NEUTRA_(m)'=LN; 'LARGURA_DO_CFC_(m)'=bf; 'xi[c]'=xi[c]; 'xi[st]
'='xi[st]; 'xi[f]'=xi[f];
```

$$LINHA_NEUTRA(m) = 0.03396437838$$

$$LARGURA_DO_CFC(m) = 0.09508044508$$

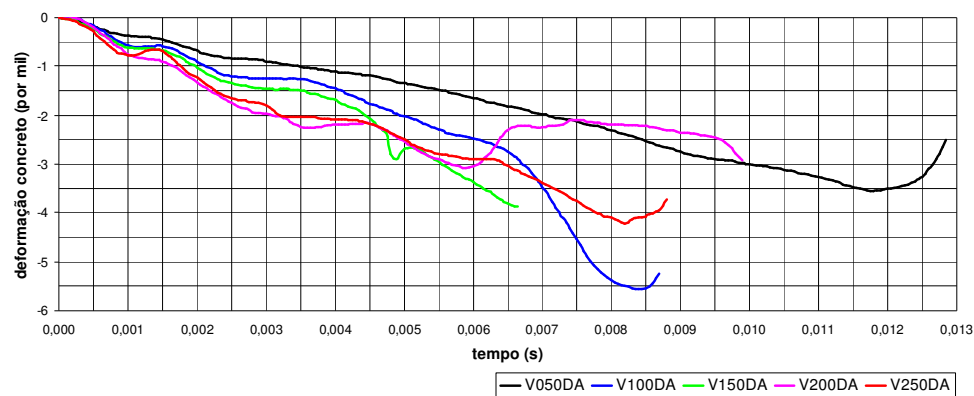
$$\xi_c = 3.5$$

$$\xi_{st} = 8.865896860$$

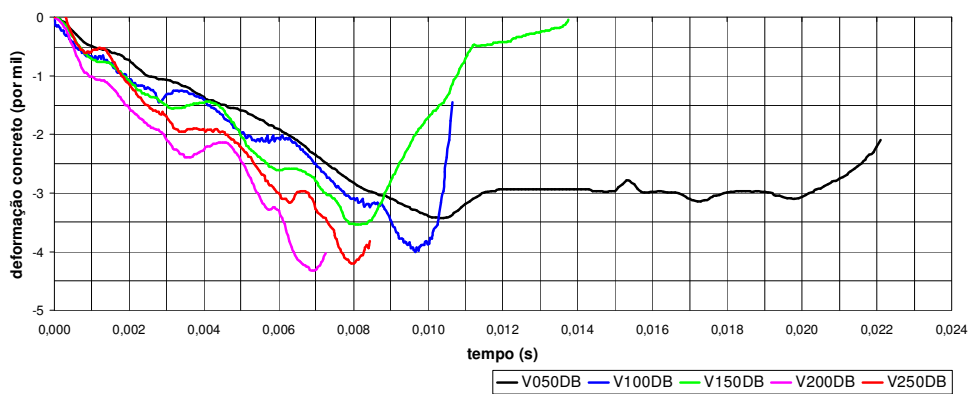
$$\xi_f = 11.95737107$$

Anexo C

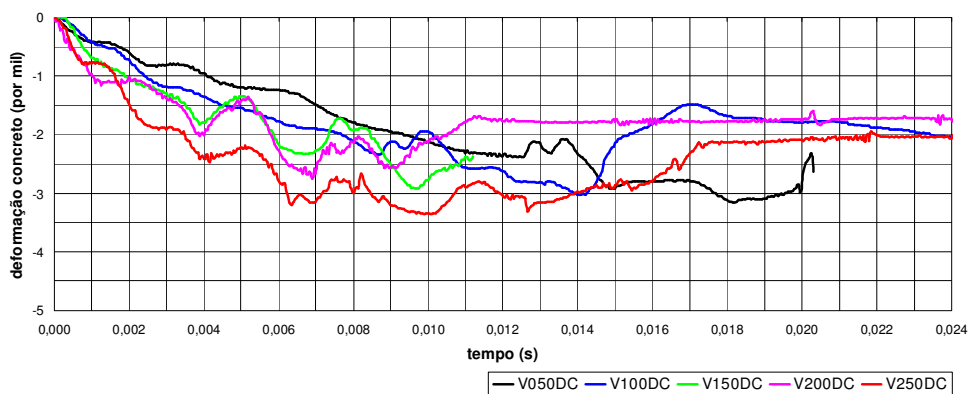
Gráficos Comparativos dos Resultados dos Ensaios



a)

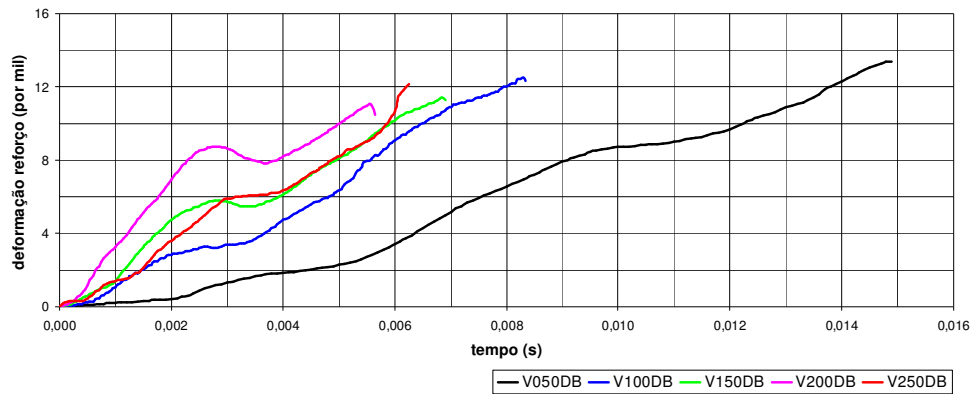


b)

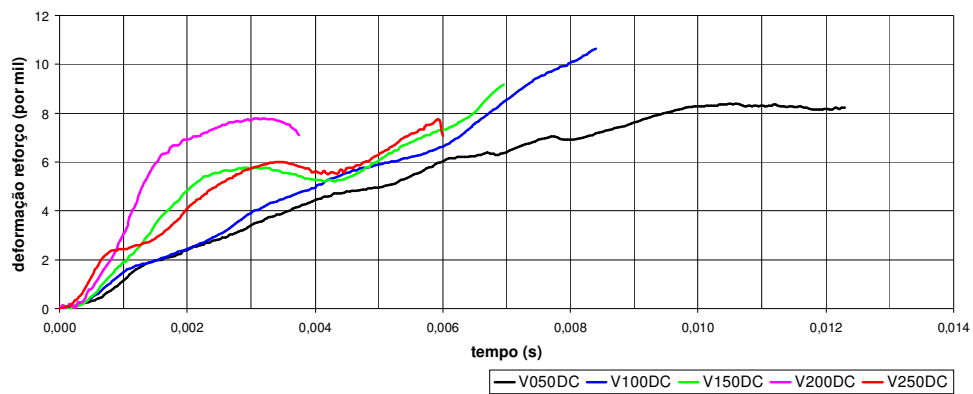


c)

Figura C.1 – Curvas deformação específica do concreto vs tempo conforme os grupos das vigas.

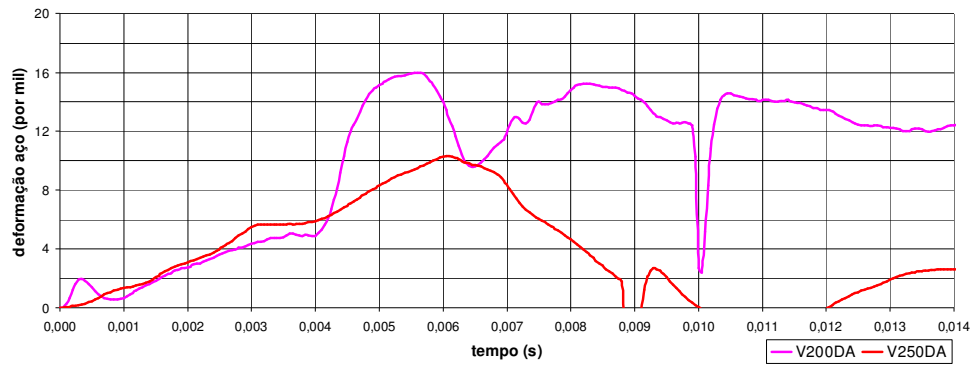


a)

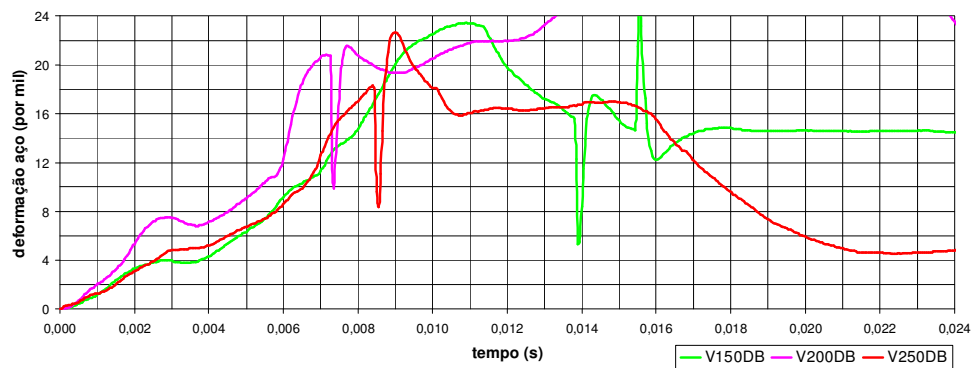


b)

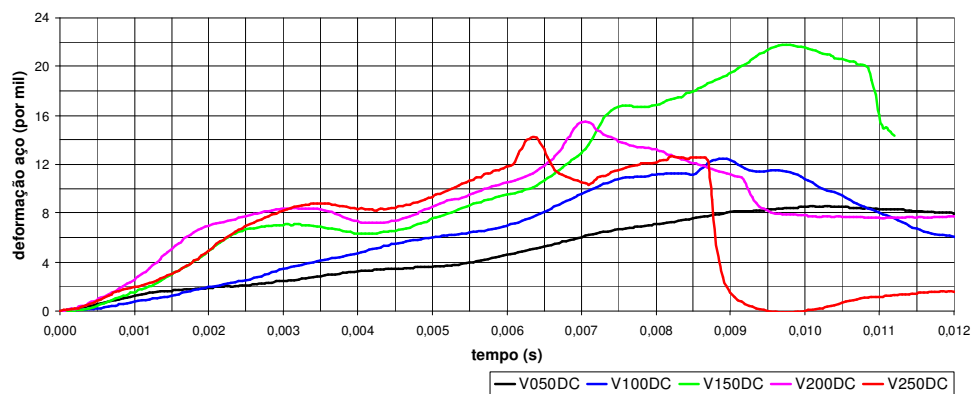
Figura C.2 – Curvas deformação específica do reforço vs tempo conforme os grupos das vigas.



a)

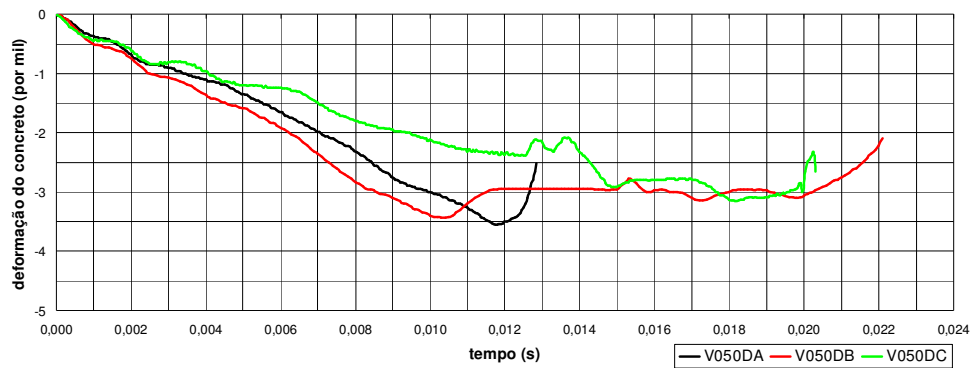


b)

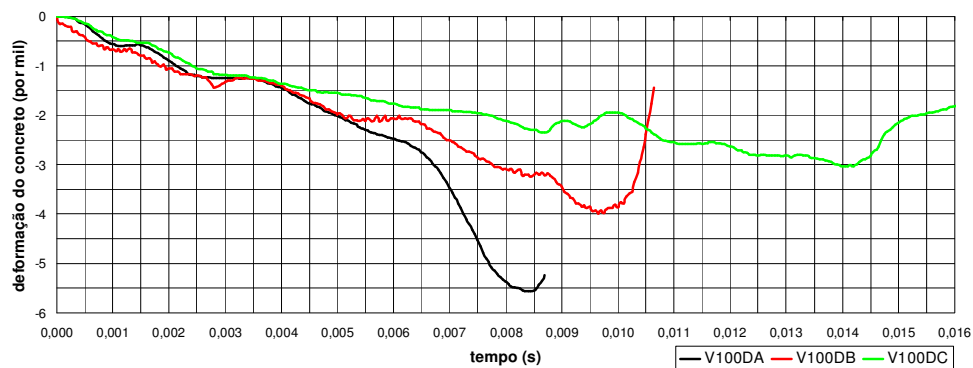


c)

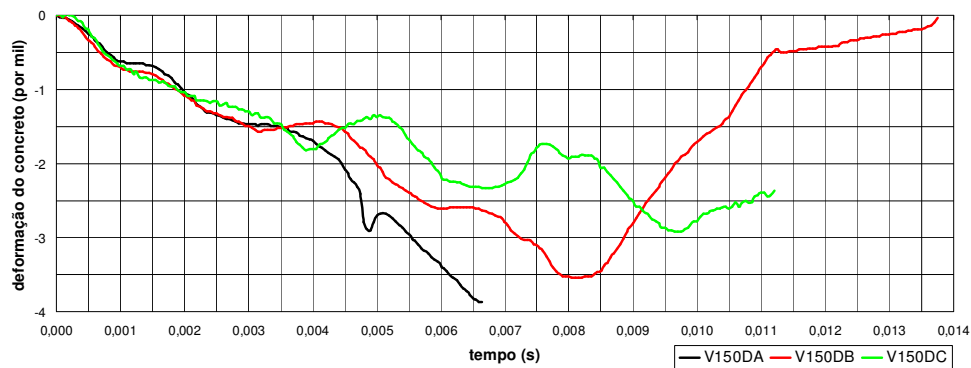
Figura C.3 – Curvas deformação específica do aço vs tempo conforme os grupos das vigas.



a)

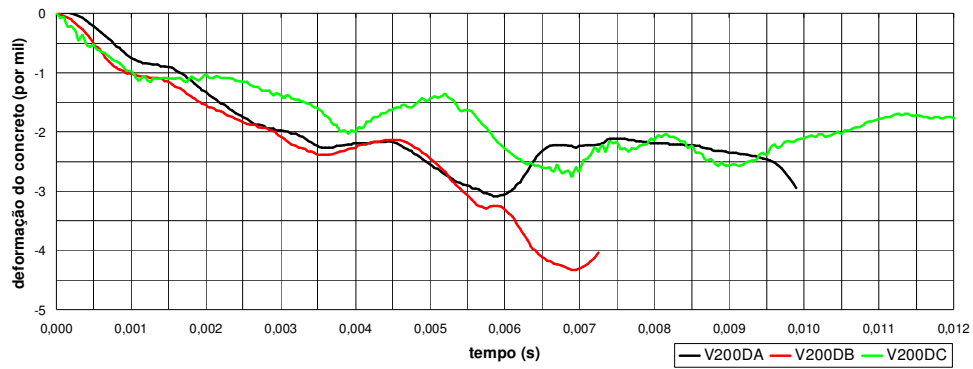


b)

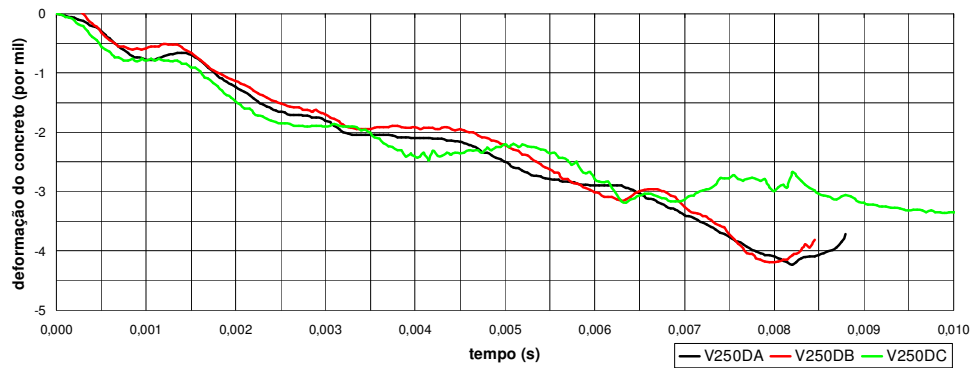


c)

Figura C.4 – Curvas deformação específica do concreto vs tempo das vigas conforme as alturas de queda do martelo.

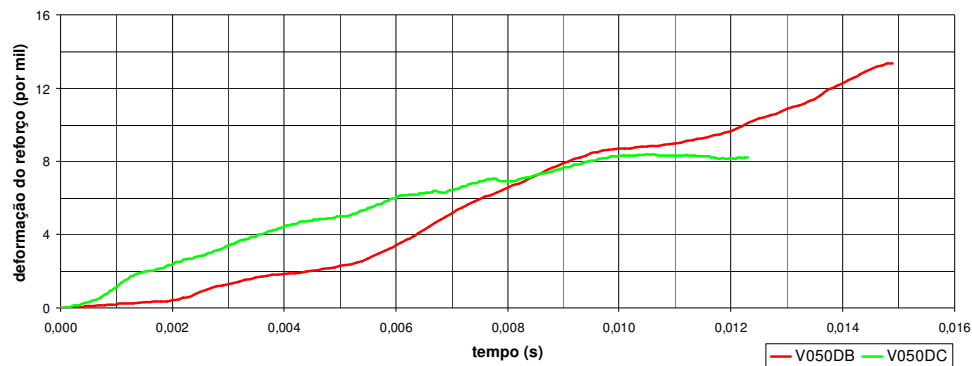


d)

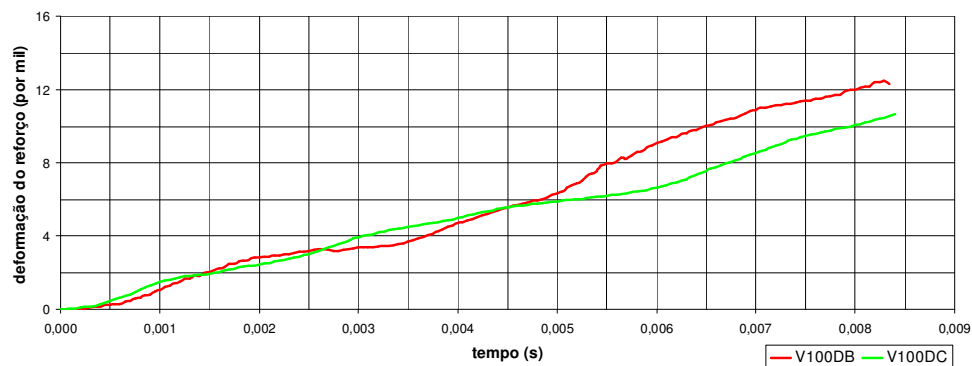


e)

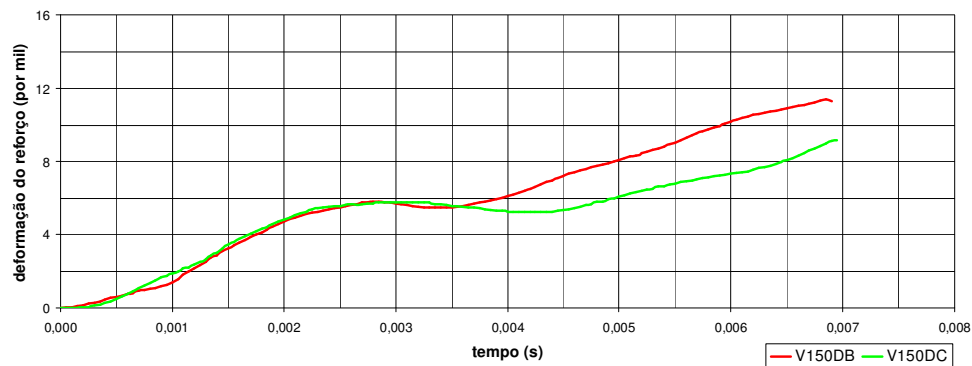
Figura C.4 – Curvas deformação específica do concreto vs tempo das vigas conforme as alturas de queda do martelo (continuação).



a)

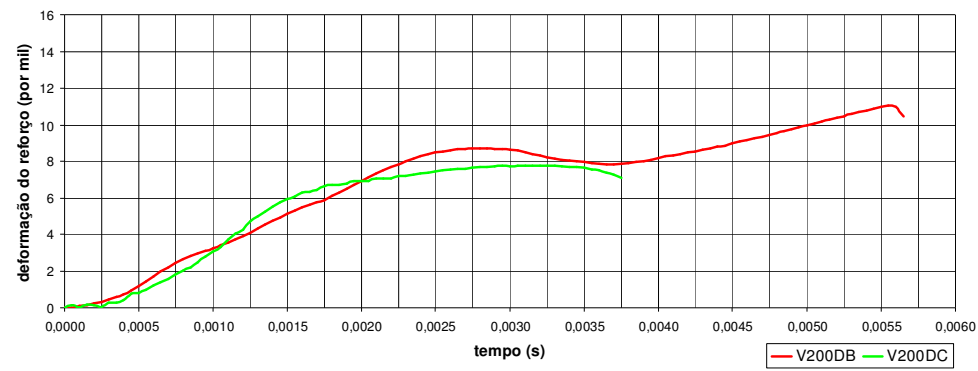


b)

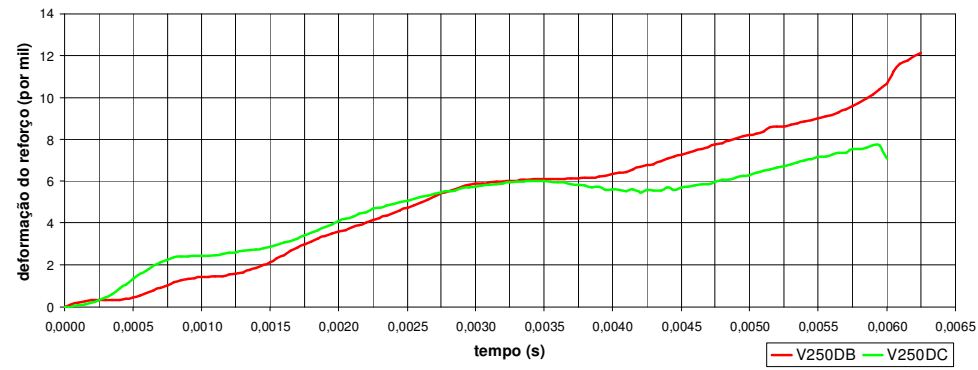


c)

Figura C.5 – Curvas deformação específica do reforço vs tempo das vigas conforme as alturas de queda do martelo.

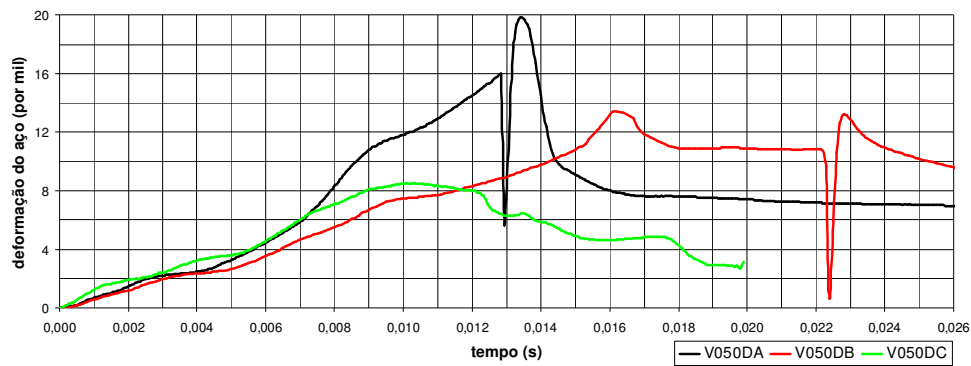


d)

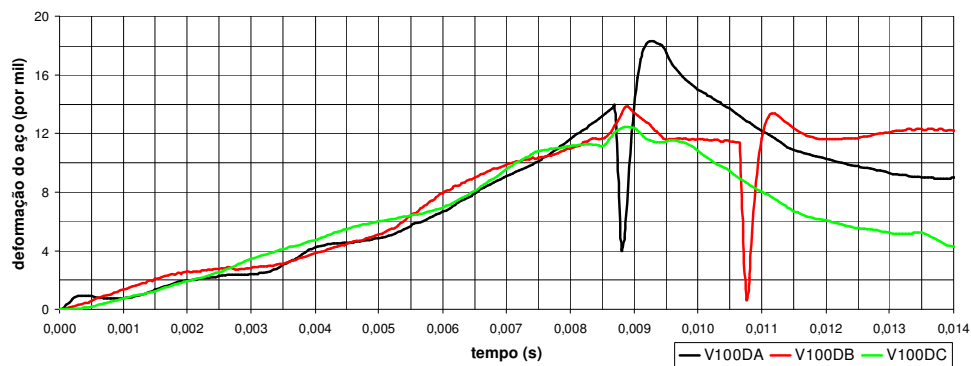


d)

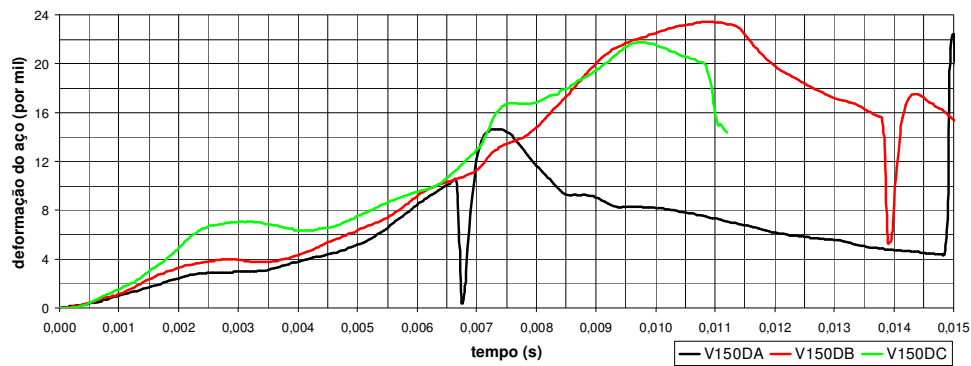
Figura C.5 – Curvas deformação específica do reforço vs tempo das vigas conforme as alturas de queda do martelo (continuação).



a)

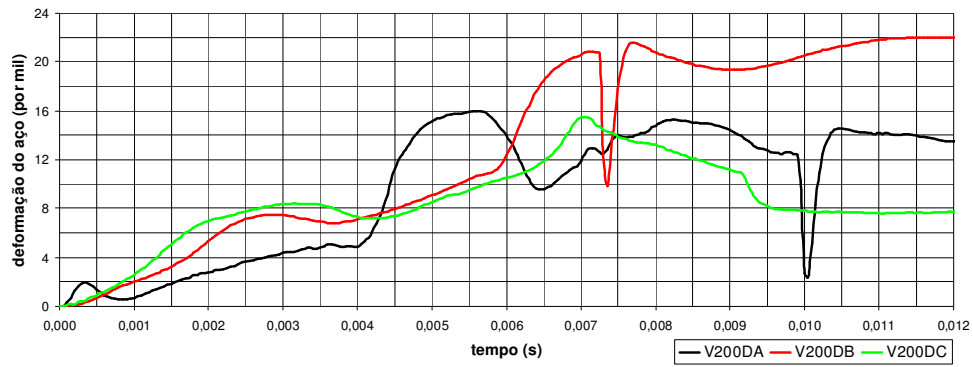


b)

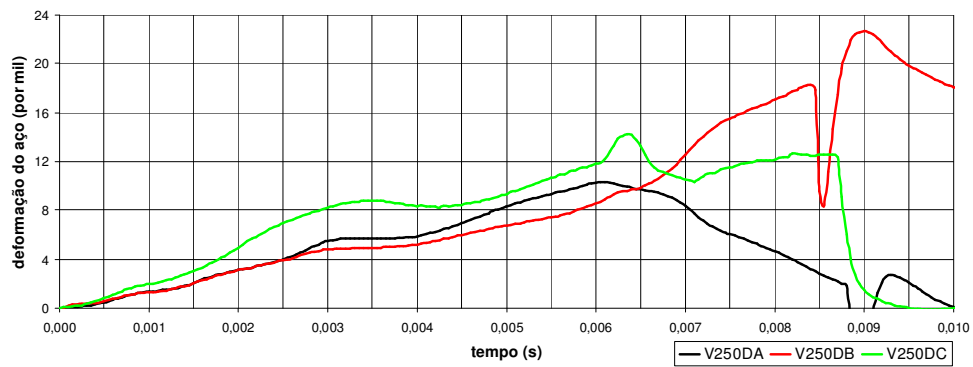


c)

Figura C.6 – Curvas deformação específica do aço vs tempo das vigas conforme as alturas de queda do martelo.



d)



e)

Figura C.6 – Curvas deformação específica do aço vs tempo das vigas conforme as alturas de queda do martelo (continuação).