

UMA CONTRIBUIÇÃO AO ENTENDIMENTO DO EFEITO DE ESCALA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO.

Roberto D. Rios*, Jorge D. Riera*, Ignacio Iturrioz†

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
Av. Osvaldo Aranha 99, 3º andar, Centro, Porto Alegre.
e-mail: rios@cpgcec.ufrgs.br, home page: <http://www.cpgcec.ufrgs.br/rrios>

† Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
Av. Sarmento Leite 545, 1º andar, Centro, Porto Alegre.
e-mail: ignacio@mecanica.ufrgs.br

Palavras chave: Efeito de Escala, Fratura em Concreto, Elementos Discretos.

Resumo. *Na engenharia civil, experimentos de laboratório são usados para estudar o comportamento de estruturas ou dos materiais de que estão compostas. Em muitas situações de interesse, as dimensões da estrutura são muito maiores que as de modelos passíveis de ensaio em laboratório. Por outro lado, modelos de comportamento estrutural que levem em conta tais efeitos de escala e de velocidade de deformação tem recebido grande atenção na literatura técnica. Corpos de prova especiais para ensaios de tração em cinco tamanhos diferentes foram ensaiadas até a ruptura por Van Vliet¹. Ditos ensaios foram reproduzidos por simulação numérica com o Método dos Elementos Discretos, visando quantificar e posteriormente explicar o efeito de escala observado nos espécimens ensaiados. É considerada nos modelos a não-homogeneidade do concreto mediante a geração aleatória das suas propriedades mecânicas, a energia específica de fratura dentre elas. É utilizada uma versão melhorada de critérios constitutivos descritos anteriormente pelos autores (Riera e Rios)². Consegue-se reproduzir corretamente os resultados experimentais, assim como os modos de falha a forma da curva de descarga e a influência da escala. O estudo fornece evidência adicional sobre as causas do efeito de escala em estruturas de concreto, atribuída no presente trabalho à combinação do efeito derivado da mecânica de fratura com a não-homogeneidade do material (efeito Weibull).*

1 INTRODUÇÃO

O efeito da escala é um aspecto que deve ser levado em conta em qualquer teoria física. Tal fato leva a entender porque a questão tem ocupado uma posição importante em muitos problemas de engenharia. Na mecânica dos sólidos, o principal efeito de escala relaciona o tamanho das estruturas com uma dimensão característica. Esta situação já foi analisada por Leonardo da Vinci³, assim como Galileo⁴. O primeiro grande avanço nesta área se deve a Griffith⁵, quem estabeleceu os fundamentos não tão só da mecânica da fratura como também à introdução da mecânica da fratura no estudo do efeito de escala.

Cabe destacar também o trabalho de Weibull⁶ na Suíça. Weibull chegou a uma crucial conclusão: “a distribuição de valores de resistência extremamente pequena com pequena probabilidade, não pode ser adequadamente descrita por nenhuma das distribuições conhecidas”. Com os trabalhos de Weibull, os fundamentos da teoria de efeito de escala pareciam estar completos. Estudos posteriores ficariam restritos a refinamentos, justificativas e aplicações de suas teorias.

As teorias de Weibull ou a Mecânica Linear da Fratura não são porém aplicáveis a casos de materiais frágeis não homogêneos. Tais materiais são caracterizados pela existência de uma grande zona em processo de fratura com dano distribuído. Dentro desse grupo de materiais pode-se mencionar vários tipos de concretos ou argamassas de cimento, polímeros ou asfaltos, vários tipos de rochas, areias cimentadas, cerâmicas, materiais refratários, etc. Dentro de todo esse grupo acima mencionado, o material concreto é o mais amplamente utilizado e seu estudo foi iniciado por Kaplan⁷. O maior avanço nesta matéria é devido a Hillerborg et al⁸. Inspirado no critério de amolecimento e o processo de fratura plástica, este último formulou o modelo da fissura fictícia. Ao mesmo tempo, Bažant⁸ demonstrou analiticamente que a localização do dano de amolecimento em bandas gera um efeito de escala sobre deflexões pós-cargas máximas e na dissipação de energia das estruturas. Em 1980 Bažant⁸ obteve, baseado na análise aproximada de dissipação de energia, uma fórmula simples para a lei do efeito de escala que descreve dito efeito na tensão nominal de ruptura de materiais frágeis submetidos a grandes crescimentos estáveis da fissura.

Uma outra idéia intrigante sobre o efeito de escala foi lançada por Carpinteri et al^{10,11,12,13}, inspirada por estudos recentes das características fractais das fissuras em vários materiais. Carpinteri propôs que a diferença entre as características fractais das fissuras e microfissuras em diferentes escalas de observação é a principal causa do efeito de escala no concreto. Esta última idéia foi posteriormente questionada por Bažant¹⁴.

Até agora, foram identificados três fenômenos básicos para explicar o efeito de escala na resistência dos sólidos:

- 1- Teoria estatística de resistência aleatória de Weibull, que leva em conta a variabilidade das propriedades mecânicas dos componentes [problema de valores extremos (min.)]
- 2- Efeito de escala da mecânica da fratura e derivados (incluindo a Teoria da redistribuição das tensões e dissipação da energia de fratura ocasionada por grandes fissuras proposta por Bažant.)

3- Teorias que podem ser consideradas uma combinação das duas anteriores (1) e (2).

Na engenharia civil, experimentos de laboratório são ferramentas essenciais para estudar o comportamento de estruturas ou dos materiais de que estas estão compostas. Quando o material sob estudo é concreto ou rocha, as dimensões reais da estrutura em geral são várias vezes maiores que as dos modelos que podem ser ensaiados em laboratório. Por este motivo tais ensaios são usualmente efetuados em escala reduzida, e como é conhecido isto induz uma dependência dos resultados com a escala escolhida. Surge assim a necessidade de um correto entendimento deste efeito de escala para poder levar os resultados experimentais para a escala da estrutura real.

Com o objetivo de verificar nesta pesquisa a capacidade do modelo proposto de prever o efeito de escala, foram simulados numericamente mediante o uso do Método dos Elementos Discretos, ensaios de tração uniaxial realizados por van Vliet et al¹. Os ensaios de tração foram escolhidos, pois eles constituem o mecanismo de fratura básico dos materiais frágeis. Os experimentos de Vliet¹ foram realizados sob deformação controlada com o objetivo de estudar o efeito de escala sobre a resistência do material assim como a energia específica de fratura.

2 MODELO ENSAIADO POR VAN VLIET ET AL

Normalmente é estudado o efeito de escala modelando os corpos a serem ensaiados em três dimensões, ou ao menos em duas dimensões, mas com uma seção prismática. Para o caso analisado foram usados modelos de forma de “osso” com o objetivo de garantir que na região central do modelo surjam exclusivamente tensões normais provocadas pela tração, evitando assim introduzir erros por causa do sistema de fixação de corpo. Este tipo de modelo foi escolhido porque as reduções de seção centrais de forma circular têm algumas vantagens amplamente conhecidas como, por exemplo, reduzir o efeito de concentração de tensões e oferecer melhores condições de fabricação sem introduzir danos durante o processo entre outros fatores.

Os modelos foram realizados em concreto de 50 MPa de tensão característica de compressão cúbica com agregado máximo de 8 mm. A espessura de todos os modelos foi escolhida em 100 mm. Embora van Vliet et al¹ tenham ensaiado modelos com dimensões de 50x75 mm, estes casos não foram analisados neste trabalho principalmente pela dificuldade de representar adequadamente sem mudar as dimensões dos elementos. Assim, somente foram modelados os cinco modelos maiores. É de praxe que a menor dimensão do modelo não deva ser menor que 3 a 5 vezes a do máximo tamanho do agregado, o que justifica o tamanho estudado por van Vliet¹. Em todos os modelos foi mantida uma espessura constante de 100 mm, e a dimensão do elemento discreto de $L_{co} = 0,02m$. As dimensões dos modelos analisados encontram-se indicadas na Figura 2.1. Nos ensaios realizados por van Vliet et al¹ foram realizadas quatro séries para cada uma das dimensões, com o objetivo de determinar o comportamento estatístico dos mesmos. Já no modelo numérico apresentado neste trabalho, foram feitas cinco ou seis simulações para cada uma das dimensões. O esquema de cargas aplicado na simulação tenta reproduzir o mais fielmente possível a metodologia experimental, ou seja, aplicando deslocamentos prescritos com taxa constante desde o início do ensaio. Neste ponto cabe destacar que, nos ensaios de

van Vliet foi usada uma velocidade de $0.028\mu\text{m/s}$, chegando em todos os casos a alongamentos da ordem de 200 a 300 μm . Tal velocidade tornaria praticamente impossível a sua simulação com a metodologia de integração proposta neste trabalho, pois exigiria um tempo computacional excessivamente grande. Após um cuidadoso estudo dos fatores envolvidos, entre eles o balanço energético, chegou-se a uma velocidade de 0.048 mm/s para a simulação.

As propriedades mecânicas do material simulado encontram-se na Tabela 2.1. Com esses dados, adotou-se um $\Delta t = 3.0 \text{ E-}06 \text{ s}$.

Tabela 2.1: propriedades mecânicas usadas na simulação numérica.

PROPRIIDADE	
f_{ck} (MPa)	45
f_{tk} (MPa)	4,5
$E[E_c]$ [N/m^2]	3,5E10
$E[G_f]$ [N/m]	100,00
ρ [kg/m^3]	2400
ν	0,18
$CV(G_f)$	0,30
$CV(E_c)$	0,30
L_{co} [m]	0,02
R_f	1,15

A Figura 2-2 mostra um esquema da ruptura numa simulação para o caso **D**, nela são representadas em cor azul as barras que não experimentaram dano, em cor laranja, as que se encontram no trecho descendente da curva tensão-deformação, enquanto as barras que atingiram seu limite de resistência foram excluídas. A forma escolhida por van Vliet et al (2000) tem uma importância fundamental para um ensaio em laboratório, pois como já foi mencionado permite, entre outras vantagens, uma maior facilidade de montagem no equipamento de ensaio. Já para o caso de fazer a simulação numérica, sua forma não interfere nos resultados atingidos. Também pode ser observado na mesma figura que, a ruptura acontece como esperado, ou seja, na zona central onde existe a redução de seção transversal. Baseado nisso, e com o objetivo de reduzir o número de graus de liberdade do modelo, com a conseqüente redução do esforço computacional necessário, foi decidido simular somente uma determinada região, definida como a zona onde existe tal redução de seção.

Na Figura 2.2, é apresentada a evolução das energias desenvolvidas e dissipadas durante o processo de carregamento para o caso do modelo D, enquanto a Figura 2.3, reproduz as curvas de carga-deslocamento obtidas por van Vliet¹.

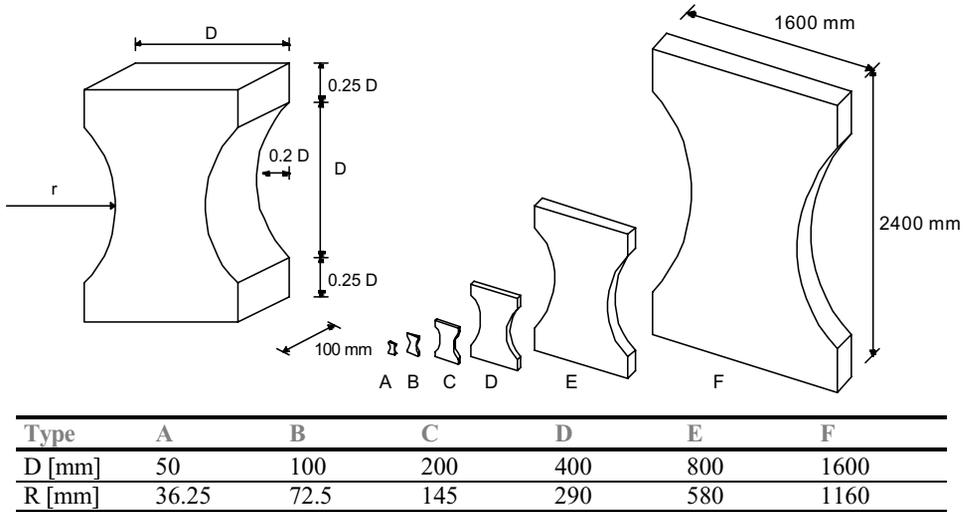


Figura 2.1 : Esquema dos modelos ensaiados por van Vliet (2000).

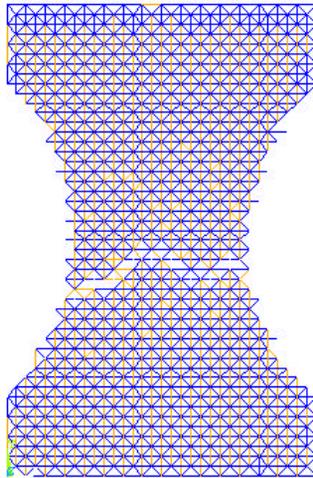


Figura 2.2: Esquema completo do modelo D após atingida a carga máxima.

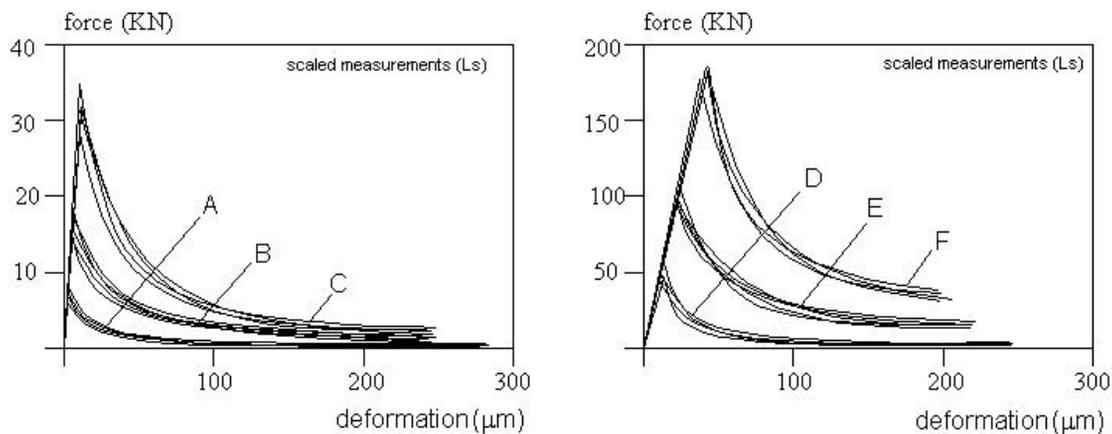


Figura 2.3: Resultados obtidos nos ensaios de van Vliet (2000)

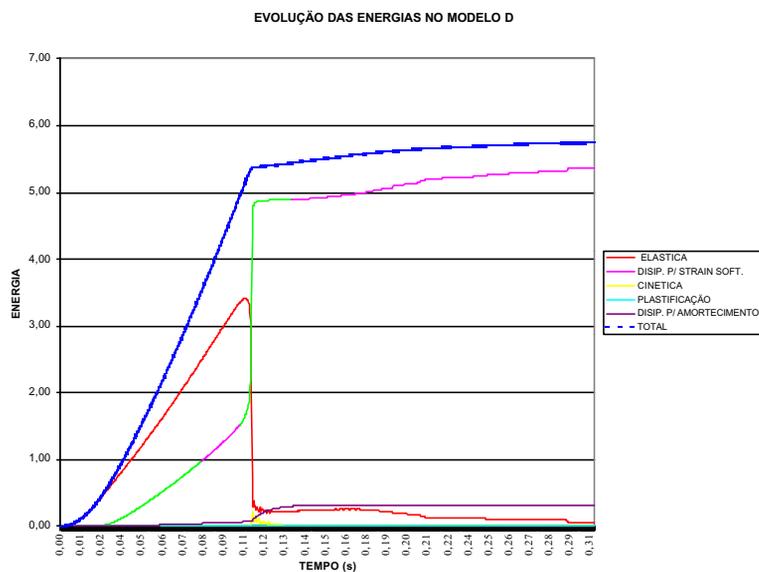


Figura 2.4: Evolução das energias envolvidas no processo de carga para o modelo D.

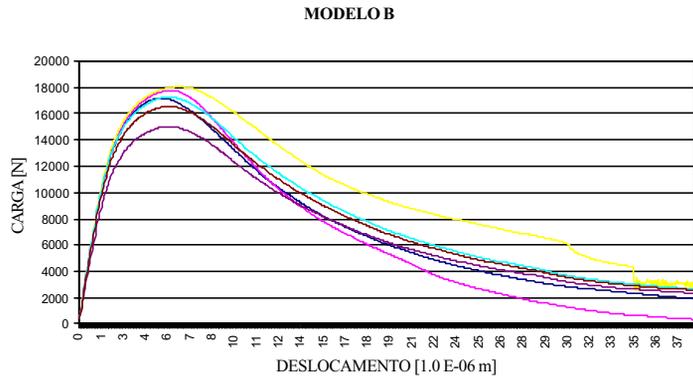


Figura 2.5: Curva carga-deslocamento para as seis simulações do modelo B.

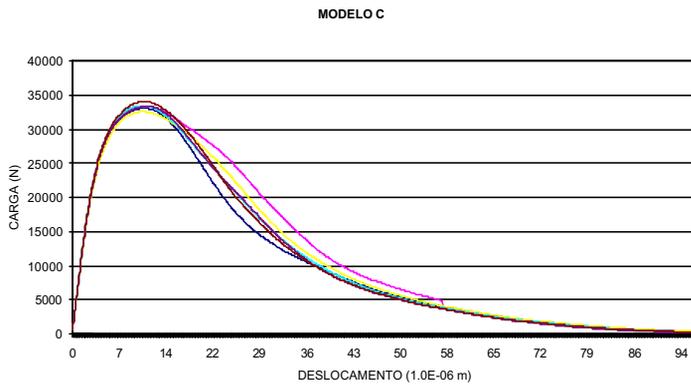


Figura 2.6: Curva carga-deslocamento para as simulações do modelo C.

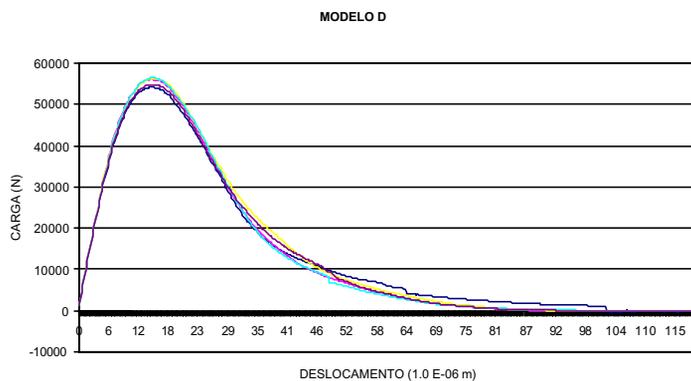


Figura 2.7: Curva carga-deslocamento para as cinco simulações do modelo D.

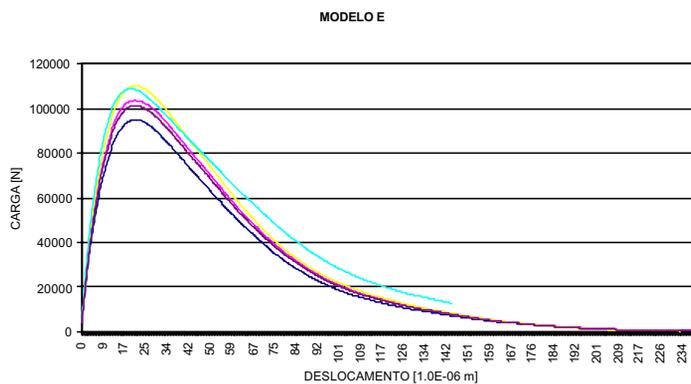


Figura 2.8: Curva carga-deslocamento para as cinco simulações do modelo E.

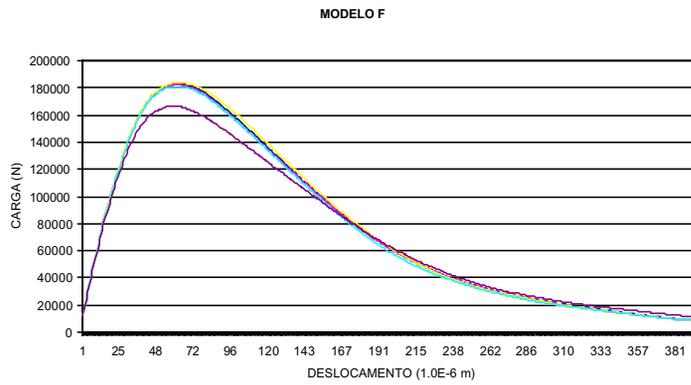


Figura 2.9: Curva carga-deslocamento para as cinco simulações do modelo F.

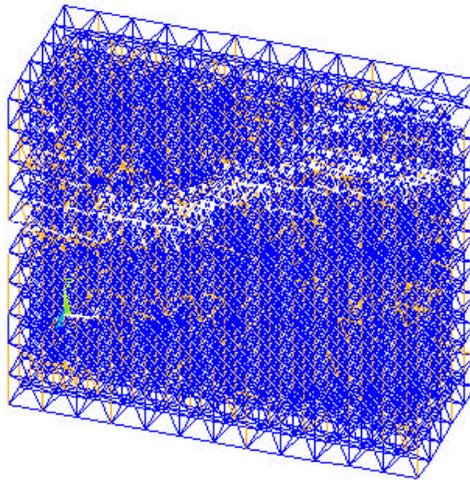


Figura 2.10: Perspectiva do esquema de ruptura obtido numa das simulações do modelo D.

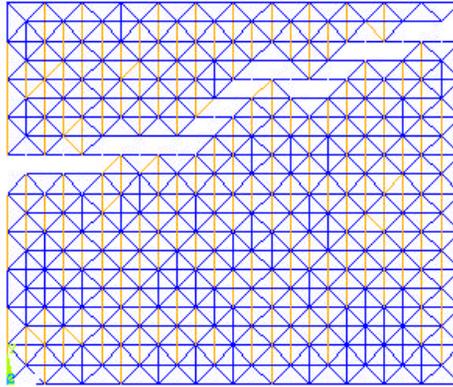


Figura 2.11: vista frontal do esquema de ruptura (Modelo D)

Tabela 2.2: Resultados numéricos e experimentais.

MODELO	σ_N [MPa]		CARGA [KN]
	DEM	van Vliet	DEM
	Médio (desv. Pad)	Médio (desv. Pad)	Médio (desv. Pad)
B	2,83 (0,180)	2,97 (0,180)	17,0 (1,810)
C	2,78 (0,150)	2,75 (0,210)	33,3 (4,200)
D	2,31 (0,035)	2,30 (0,090)	55,5 (0,900)
E	2,16 (0,130)	2,07 (0,120)	104,0 (6,207)
F	1,88 (0,091)	1,86 (0,160)	179,0 (8,710)

As Figuras 2.10 e 2.11, mostram esquemas de ruptura encontrados também para o modelo D. Com os valores indicados na Tabela 2.2, foram construídas as Figuras 2.12 e 2.13, nas quais pode-se observar a excelente correlação entre os resultados de tensão limite experimentais de van Vliet et al¹ e os obtidos no presente trabalho. Apresenta-se também em dita figura uma regressão exponencial da tensão em função da dimensão D do modelo para a simulação numérica. Na Figura 2.12, mostra-se a evolução do coeficiente de variação em função do tamanho D. Observa-se que o coeficiente de variação parece ser independente do tamanho. O desvio padrão apresenta valores médios de 0,15 Mpa (experimental) e 0,12 Mpa (numérico). O desvio padrão dos valores obtidos para os diversos tamanhos foi em ambos casos aproximadamente 0,05, o que sugere que o modelo numérico permite simular adequadamente o comportamento a tração estática de corpos de prova.

EVOLUÇÃO DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

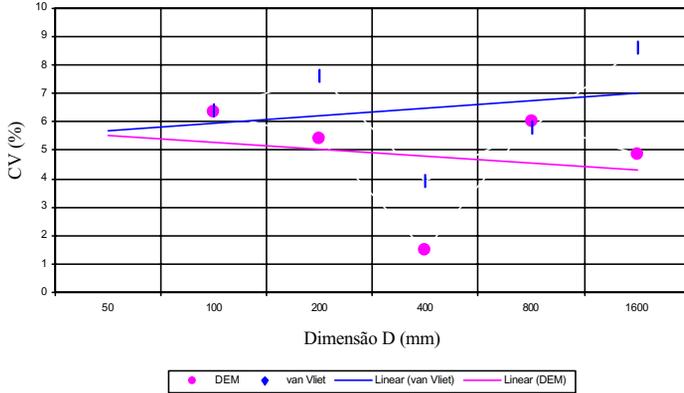


Figura 2.12: Evolução do coeficiente de variação em função do tamanho do modelo.

EVOLUÇÃO DAS TENSÕES

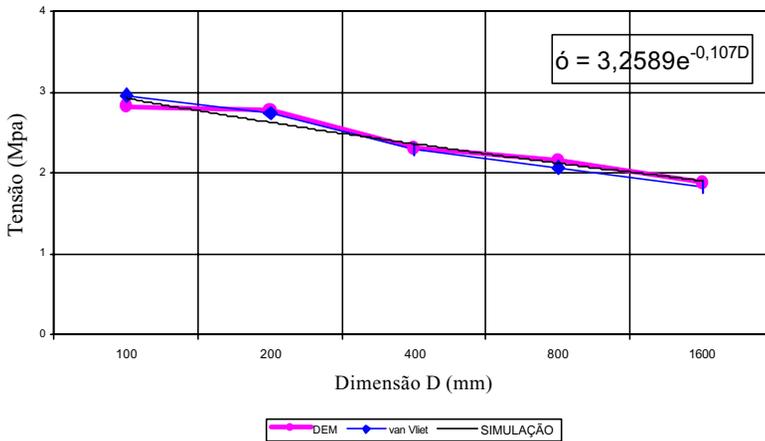


Figura 2.13: Evolução das tensões em função do tamanho do modelo

3 CONCLUSÕES

Nas figuras 2.12 e 2.13 pode-se observar a excelente correlação entre os resultados de tensão limite experimentais de van Vliet et al¹ e os obtidos no presente trabalho. Apresenta-

se também em dita figura uma regressão exponencial da tensão em função da dimensão D do modelo para a simulação numérica. Pode-se afirmar que o Método dos Elementos Discretos com as hipóteses usadas é capaz de detectar e reproduzir o efeito de tamanho, situação já confirmada em outras simulações por Rios¹⁵, Rios e Riera¹⁶

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Van VLIET M.R.A, Van MIER, J.G.M, “Size effects of concrete and sandstone”, HERON, Vol 45, No.2, 2000, 91-108.
- [2] RIERA J. D. e RIOS R., “Evolução do amortecimento com o nível de dano em estruturas de concreto armado”. Memórias-Jorn. Sud. Ing. Est., 12-17 Nov. 2000: 383-394. Punta del Este, Uruguai.
- [3] da VINCI L., *Notebooks of Leonardo da Vinci (1945)*, Edward McCurdy, London, 546; and *Les Manuscrits de Léonard da Vinci*, transi in French by Ravaisson-Mollien C., Inst de France (1881-91), Vol. 3.
- [4] GALILEO GALILEI, L., *Discorsi i Demonstrationi Matematiche intorno a due Nuove Scienze*, Elsevirii, Leiden; English transl by Weston T, London (1730), 178-181.
- [5] GRIFFTH, A.A., “Phenomena of rupture and flow in solids”, *Phi Trans* 221A, 179-180 (1920).
- [6] WEIBULL, W., “Phenomenom of rupture in solids”, *Proc. Royal Swedish. Inst. Of Eng. Res.* **153**, pp. 1-55 (1939).
- [7] KAPLAN M. F., “Crack propagation and the fracture concrete”, *ACI J*, 58(11) (1969).
- [8] HILLERBORG, A., MODÉER, M. and PETERSON, P. E., “Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements”, *Cement Concrete Res* **6**, pp. 773-782 (1976).
- [9] BAŽANT, Z. P. and CEDOLIN, L., “Fracture mechanics of reinforced concrete”, *J. Eng. Mech. Div. Proc.* **106**, 1257-1306 (1980).
- [10] CARPINTERI, A., “Fractal Nature Of Material Microstructure And Size Effects On Apparent Mechanical Properties”, *Mech Mat* **18**, 89-101 (1994).
- [11] CARPINTERI, A. and CHIAIA, B., “Fracture Mechanics of Concrete Structures”, *Proc of FraMCoS-2*, at ETH, Zürich, Wittmann F. H. (ed), Aedificatio Publ, Freiburg, 581-596 (1995).
- [12] CARPINTERI, A., CHIAIA, B. and FERRO, G., “Size effects on nominal tensile strength of concrete structures, multifractality of material ligaments and dimensional transition from order to disorder”. *Mat. Struct.* **28** (7) 311-317 (1995).
- [13] CARPINTERI, A., FERRO, G. and INTERVENIZZI, S., “Fracture Mechanics of concrete structures”, *Proc of FraMCoS-2*, at ETH, Zürich, Wittman F. H. (ed), Aedificatio Publ, Freiburg, Germany, 557-570 (1995).
- [14] BAŽANT, Z.P., *Fracture Mechanics Of Concrete: Concepts, models and Determination of Material properties*. Report by ACI Committee 446. Fracture Mechanics 1R-91. Detroit (1992).

- [15] RIOS, R. D., Aplicações do Método dos Elementos Discretos em estruturas de concreto. Tese de Doutorado, PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 161p (2002).
- [16] RIOS, R.D. e RIERA, J.D., “Consideração do efeito de escala em estruturas de concreto”. Memórias-Jorn. Sud. Ing. Est., 27-31 abril. 2002: Brasília, Brasil.