

PUNCIÓNAMENTO DE ESTRUTURAS LAMINARES DE CONCRETO SOB AÇÃO DE CARGAS DE IMPACTO

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@cpgec.ufrgs.br, home page: <http://www.cpgec.ufrgs.br/rrios>

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

Palavras chave: Puncionamento, Concreto, Elementos Discretos.

Resumo. *A determinação da resposta de estruturas laminares de concreto ou de concreto armado ou protendido, isto é, placas e cascas, submetidas a cargas de impacto, exige uma análise dinâmica não-linear que leve em conta (a) as propriedades mecânicas do material para ações de curta duração, (b) a velocidade de aplicação das cargas, na forma de diagramas força-tempo, (c) a distribuição aleatória das propriedades mecânicas e/ou defeitos presentes na estrutura, parcialmente responsáveis pelos denominados efeitos de escala. Em conseqüência, a determinação da resistência ao puncionamento demanda considerável esforço computacional utilizando programas específicos para esse fim, de alto custo, e experiência na escolha de parâmetros apropriados para o problema em consideração. No contexto acima descrito, as necessidades da engenharia de projeto tem conduzido ao desenvolvimento de fórmulas empíricas ou semi-empíricas para determinar a velocidade de um projétil com características dadas, que resultaria em perfuração de uma lâmina de concreto ou, alternativamente, a espessura necessária da lâmina para evitar perfuração. Uma revisão crítica da literatura, resumida no trabalho, mostra que as expressões propostas não levam em conta vários fatores relevantes no problema, tais como, (a) a curvatura ou curvaturas da lâmina, (b) a influência da forma da superfície de contato entre o projétil e a estrutura, (c) a influência da armadura e/ou protensão no concreto e (d) efeitos de escala. Visando a obtenção de subsídios para a elaboração de critérios melhorados de projeto, os autores utilizam simulação de Monte Carlo na determinação da resposta dinâmica não-linear de painéis planos e curvos de concreto sob ação de cargas dinâmicas com altas taxas de crescimento, até atingir um valor de pico, representativas de impacto de projéteis a velocidades da ordem de 100m/s. A estrutura é representada por um modelo de elementos discretos (DEM), sendo a resposta obtida mediante integração explícita no domínio do tempo. As propriedades mecânicas dos elementos, tais como a deformação crítica de tração ou a energia de fratura, definidas como campos aleatórios das coordenadas espaciais, são geradas por simulação.*

1 INTRODUÇÃO

A obtenção da resposta de sistemas estruturais laminares de concreto, de concreto armado ou protendido, isto é, placas e cascas, submetidas a cargas de impacto, exige uma análise dinâmica não-linear que leve em conta (a) as propriedades mecânicas do material para ações de curta duração, (b) a velocidade de aplicação das cargas, na forma de diagramas força-tempo, (c) a distribuição aleatória das propriedades mecânicas e/ou defeitos presentes na estrutura, parcialmente responsáveis pelos denominados efeitos de escala. Em conseqüência a determinação da resistência ao puncionamento demanda considerável esforço computacional utilizando programas específicos para esse fim, de alto custo, e experiência na escolha de parâmetros apropriados para o problema em consideração.

No contexto acima descrito, as necessidades da engenharia de projeto tem conduzido ao desenvolvimento de fórmulas empíricas ou semi-empíricas, que resultaria em perfuração de uma lâmina de concreto ou, alternativamente, a espessura necessária da lâmina para evitar perfuração. Numa revisão crítica da literatura, descobre-se que as expressões propostas não levam em conta vários fatores relevantes no problema, tais como, (a) a curvatura ou curvaturas da lâmina, (b) a influência da forma da superfície de contato entre o projétil e a estrutura, (c) a influência da armadura e/ou protensão no concreto e (d) efeitos de escala.

Tendo como objetivo a obtenção de subsídios para a elaboração de critérios melhorados de projeto, os autores simulam as propriedades aleatórias do material da estrutura utilizando a técnica de representação espectral discutida por Shinosuka e Deodates^{1,2}, na determinação da resposta dinâmica não-linear de painéis planos e curvos de concreto sob ação de cargas dinâmicas com altas taxas de crescimento, até atingir um valor de pico, representativas de impacto de projéteis a velocidades da ordem de 100m/s. Para a representação da estrutura se escolheu um modelo de elementos discretos (DEM), sendo a resposta obtida mediante integração explícita no domínio do tempo. As propriedades mecânicas dos elementos, tais como a deformação crítica de tração ou a energia de fratura, definidas como campos aleatórios das coordenadas espaciais, são geradas por simulação, como anteriormente indicado. O procedimento foi previamente validado mediante a análise de diversos sistemas submetidos em laboratório a cargas estáticas e dinâmicas até a ruptura, em trabalhos de Rios³, Rocha⁴ e Iturrioz⁵, entre outros.

2 O METODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

Pode-se considerar que o trabalho de Hrennikoff⁶ constitui um dos primeiros antecedentes no desenvolvimento deste método. Ele propõe a representação do contínuo mediante arranjos de bielas de rigidez equivalente. Pouco depois, Absi⁷ explorou na França a mesma idéia, realizando aplicações aos estudos de fundações de base elástica e na representação de muros em prédios altos através de arranjos de barras com rigidez equivalente. É importante mencionar o aporte significativo de Cundall⁸ ao desenvolvimento do método, em conexão com estudos geotécnicos com materiais granulares. O método proposto por Cundall (método dos elementos distintos) baseia-se em realizar a integração explícita das equações de movimento de uma estrutura formada por partículas rígidas com massas conectadas entre si, mediante molas e amortecedores.

Um dos materiais mais amplamente usado em estruturas de engenharia civil é o concreto, o qual pode ser incluído no conjunto de materiais heterogêneos frágeis, no qual foram aplicadas com sucesso diferentes versões do método dos elementos discretos.

O modelo aqui adotado utiliza coeficientes de rigidez obtidos por Nayfeh & Hefzy⁹ para um arranjo cúbico de barras, mas estes autores tinham interesse no problema oposto, isto é, na representação de painéis formados por treliças espaciais, empregados na indústria aeronáutica, através de um meio contínuo equivalente. Isto possibilita a discretização com um número menor de graus de liberdade, o que se traduz em uma redução substancial do esforço computacional.

Utilizando a idéia antes mencionada, foram desenvolvidas formulações para determinar as propriedades mecânicas equivalentes do sólido fictício. No trabalho de Nayfeh & Hefzy⁹ se realiza este estudo para dois tipos de arranjos básicos de barras (octaédrico e cúbico). Para o modelo cúbico e material isotrópico tem-se:

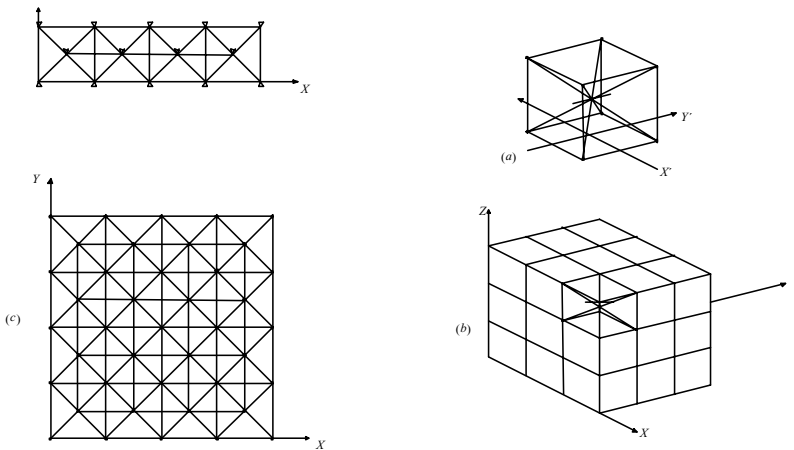


Figura 2.1: Módulo cúbico apresentado por Nayfeh & Hefzy (1979) a) Módulo Cúbico b) e c) composição de prismas

$$\begin{aligned} \ddot{a} &= \frac{9i}{(4 - 8i)} \\ EA_n &= \frac{L_c^2 (9 + 8\ddot{a})}{2 (9 + 12\ddot{a})} E \\ EA_d &= \frac{2A_n}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (2.1)$$

As equações (2.1) correspondem às rigidezes das barras (EA_n) e (EA_d) em função das propriedades elásticas do sólido que representa E. A equação de movimento para o modelo teórico é dada pela seguinte expressão:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + \bar{F}_r(t) - \bar{P}(t) = 0 \quad (2.2)$$

onde x representa o vetor de deslocamentos nodais, M a matriz de massas nodais (diagonal); C a matriz de amortecimento, também considerada diagonal, e $\bar{F}_r(t) - \bar{P}(t)$ a diferença entre o vetor de forças reativas $F_r(t)$ e o vetor de forças internas $\bar{P}(t)$, as quais atuam sobre os nós do modelo.

3 CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS SIMULADOS

Foi planejado um esquema de simulação numérica com o DEM tentando cobrir as variáveis significativas do problema, visando quantificar a influência de cada uma sobre a carga última ao puncionamento. Como o número de variáveis envolvidas é bastante grande, decidiu-se trabalhar com uma laje quadrada de 1,60 m de lado e espessura de 20 cm, com condições de apoio simplesmente apoiadas ou engastamentos nas quatro bordas. O tamanho dos elementos escolhidos para tal simulação foi $L_{co}=0,04$ m, o que permite modelar a espessura com cinco módulos, compatível com a critério que recomenda a utilização em problemas de perfuração, de mais de quatro módulos na espesura.

A superfície curva foi criada por transformação conforme já utilizada por Iturrioz², sendo adotado neste trabalho um raio de curvatura para a superfície interna da casca de 1,50m. As propriedades do material usado na simulação numérica estão indicadas na Tabela 3.1. f_{ck} e f_{tk} são as resistência a compressão e tração características do concreto, $E[G_f]$ é o valor esperado da Energia Específica de Fratura e $CV(G_f)$ seu respectivo coeficiente de variação. R_f é o fator de falha definido por Rocha⁴.

Tabela 3.1: propriedades mecânicas usadas na simulação numérica.

PROPRIEDADE	
f_{ck} (Mpa)	15
f_{tk} (MPa)	1,5
$E[E_c]$ [N/m^2]	3,0E10
$E[G_f]$ [N/m]	150,00
ρ [kg/m ³]	2400
ν	0,25
$CV(G_f)$	0,20
$CV(E_c)$	0,20
L_{co} [m]	0,04
R_f	0,70

Foi determinada a resposta da estrutura para velocidades de deslocamento nos nós de 100m/s, 50m/s e 30m/s, em regiões circulares de raio variável entre 0,10m a 0,40m, retangulares de 0,20x0,40m e quadradas de 0,20m de lado para as placas, consideradas as

regiões carregadas. Para as cascas foram simuladas cargas com diâmetros de 0,12m a 0,24m e quadradas de 0,20m de lado. Para cada carga e condições de apoio foram realizadas seis simulações para avaliar a variabilidade da resistência e dos modos de falha.

4 RESULTADOS OBTIDOS POR SIMULAÇÃO

Tabela 4.1: resultados obtidos por simulação numérica com o DEM.

Área de Carga	Vinculação	Velocidade	Carga Ruptura (KN)	CV (%)
PLACA				
20x20	Simples	100 m/s	4,07E+05	7,15
20x40	Engaste	100 m/s	4,95E+05	8,07
20x40	Engaste	50 m/s	4,86E+05	5,68
20x40	Engaste	30 m/s	4,79E+05	6,07
CircR20	Engaste	100 m/s	5,35E+05	4,39
CircR20	Simples	100 m/s	5,27E+05	2,03
CircR45	Engaste	100 m/s	8,84E+05	0,44
CircR30	Engaste	100 m/s	7,13E+05	2,82
CASCA				
20x20	Engaste	100 m/s	4,97E+05	8,9
CircR12	Engaste	100 m/s	7,46E+05	9,92
CircR20	Engaste	100 m/s	9,97E+05	7,44

Na tabela 4.1 é apresentado um resumo dos resultados obtidos por simulação numérica com o Método dos Elementos Discretos para as placas e cascas respectivamente. A carga de ruptura nela indicada refere-se ao valor médio das seis simulações feitas para cada caso. Também nesta tabela são indicados os coeficientes de variação da carga última.

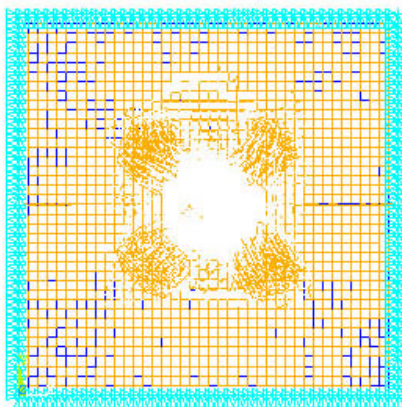


Figura 4.1: esquema de ruptura da placa para carga circular (engaste)

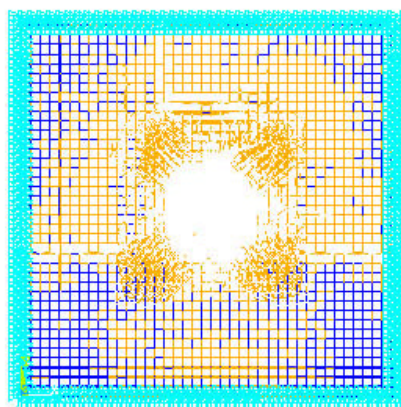


Figura 4.2: esquema de ruptura para carga circular (apoios)

Tabela 4.2: comparação de resultados entre DEM para a placa e CEB para cargas estáticas.

Area de Carga	Vinculação	Perímetro útil (cm ²)	Carga Ruptura (KN) Y	Carga Ruptura (CEB) (KN) X	Y/X
20x20	Simples	160	4,07E+05	3,92E+05	1,03
20x40	Engaste	200	4,95E+05	4,90E+05	1,01
20x40	Engaste	200	4,86E+05	4,90E+05	0,98
20x40	Engaste	200	4,79E+05	4,90E+05	0,98
CircR20	Engaste	188	5,35E+05	4,61E+05	1,16
CircR20	Simples	188	5,27E+05	4,61E+05	1,14
CircR45	Engaste	345,56	8,84E+05	8,46E+05	1,04
CircR30	Engaste	251,32	7,13E+05	6,15E+05	1,16

A Tabela 4.2, apresenta uma comparação dos resultados obtidos por simulação numérica e com a expressão proposta pelo CEB para o efeito de punção em placas de concreto simples submetidas a cargas estáticas. Nota-se que na maioria dos casos a carga obtida por simulação para as velocidades acima mencionadas são superiores aos obtidos pela norma.

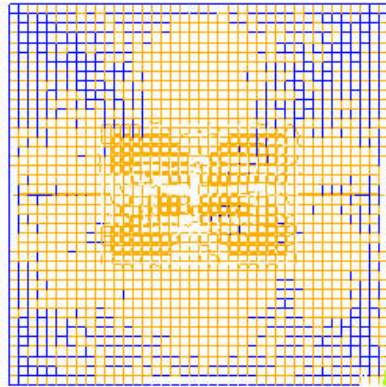


Figura 4.3: esquema de ruptura da placa para carga retangular.



Figura 4.3: vista lateral do esquema de ruptura da placa para carga retangular.

As figuras 4.1 e 4.2 correspondem às vistas superiores das placas com carregamento em uma região circular de 0,20 m de raio para uma simulação e nos casos de engastes e apoios de segunda ordem respectivamente. A Figura 4.3 corresponde à vista superior da placa para uma região de carga retangular de 0,20x0,40m, enquanto que na figura 4.4, pode-se observar uma vista lateral da mesma placa. Em ambas as figuras foi escolhida a seguinte convenção de cores: azul para barras inteiras, laranja para barras danificadas ou seja que se encontram na região de amolecimento pós-pico, enquanto que as barras rompidas foram eliminadas da representação. Em todas as figuras somente foram desenhadas as barras normais, deixando de lado as barras diagonais. Na figura 4.5, apresenta-se uma perspectiva do modelo de falha obtido para uma simulação do caso da placa engastada submetida a uma carga crescente de 100 m/s em uma área de 0,20mx0,40m.

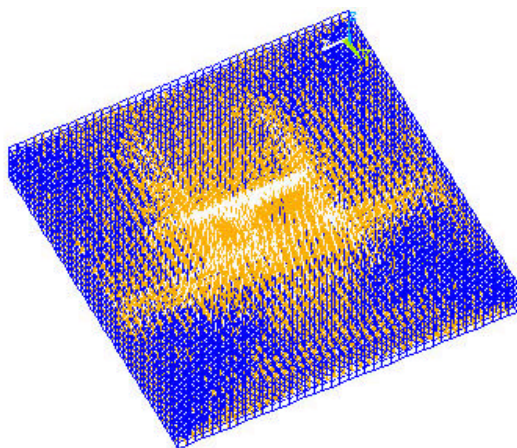


Figura 4.5: perspectiva do modo de falha da placa para carga retangular de 0,20x0,40m.

As figuras 4.6 e 4.7 correspondem a vistas superiores da placa de 1,50m de raio de curvatura submetidas a cargas aplicadas numa região quadrada de 0,20m de lado e uma circunferência de 0,24m de raio respectivamente. Já a figura 4.8, mostra uma vista lateral do esquema de ruptura por puncionamento para o caso da carga quadrada de 0,20m de lado.

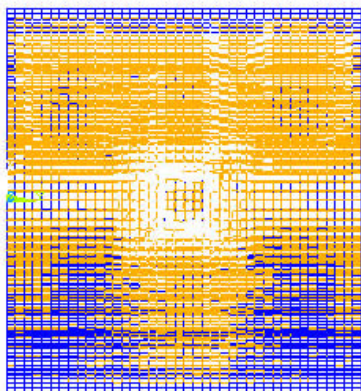


Figura 4.6: esquema de ruptura da casca para carga quadrada de 0,20m de lado

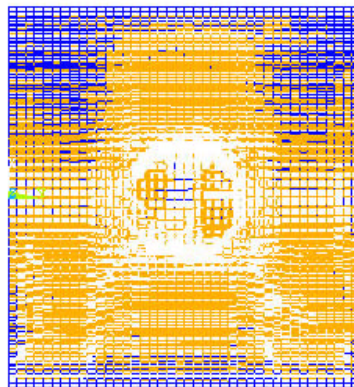


Figura 4.7: esquema de ruptura da casca para carga circular de 0,24m de raio



Figura 4.8: vista lateral do modo de falha da casca para carga quadrada de 0,20 m de lado.

As Figuras 4.9 e 4.10 correspondem às perspectivas para carga quadrada de 0,20m de lado e circular de 0,24m de raio respectivamente. A Figura 4.11, por sua vez corresponde ao resumo das cargas de punção obtidas para as placas e cascas em função da área da região onde a carga é aplicada.

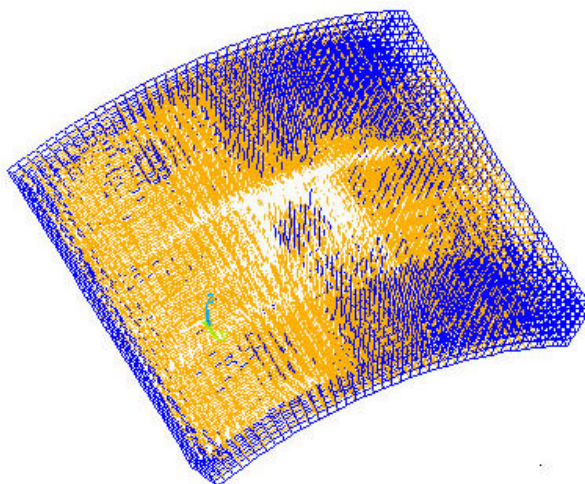


Figura 4.9: perspectiva do modo de falha da casca para carga quadrada de 0,20m de lado.

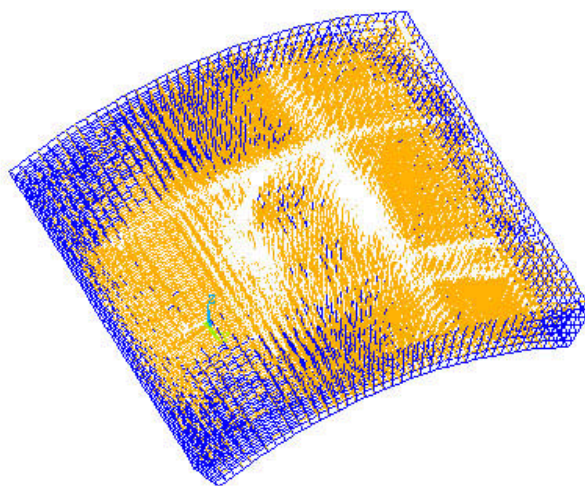


Figura 4.10: perspectiva do modo de falha da casca para carga circular de 0,24m de raio.

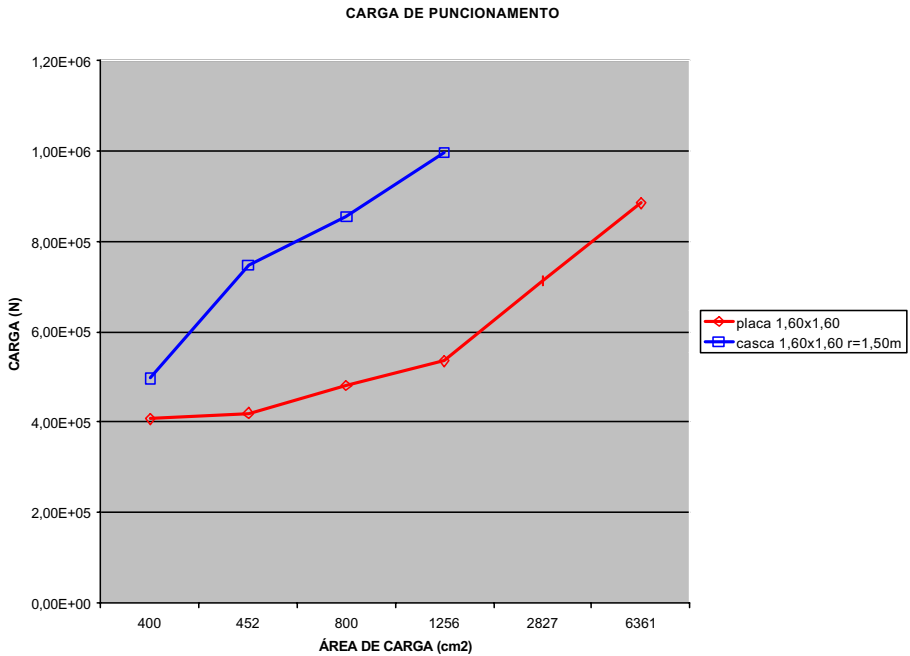


Figura 4.11: resumo das cargas de ruptura por punção obtidas para as placas e cascas.

5 CONCLUSÕES

Como pode ser observado na seção anterior existe uma grande concordância dos resultados obtidos pela simulação numérica e os valores esperados pela aplicação da norma CEB para cargas estáticas no caso das placas. A redução da velocidade de aplicação da carga de 100 m/s para 30 m/s provoca uma redução de 3,23% no valor da carga de punção para o caso da carga retangular na placa.

Como é de se esperar, a curvatura têm importância fundamental nos resultados, chegando-se a um aumento de aproximadamente 75% no valor da carga para um raio de aplicação de 0,20m e raio de curvatura da casca de 1,50m.

Embora o trabalho se encontra em andamento já é possível estabelecer um padrão de comportamento de cascas e placas frente ao punção. Atualmente, o grupo se encontra estudando o efeito da curvatura sobre a carga de punção assim como a influência da armadura para o caso de concreto armado.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SHINOZUKA, M. and DEODATIS, G.; Simulations of multi-dimensional Gaussian stochastic fields by spectral representation, *Applied Mechanics Review*, January 1996, no 1, vol **49**, 29-53.
- [2] SHINOZUKA, M. and DEODATIS, G., Simulation of stochastics processes by spectral representation, *Applied Mechanics Review*, no 4, vol **44**, 1991, pp. 191-204.
- [3] 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).
- [4] ROCHA, M.M.; Ruptura e efeitos de escala em materiais não homogêneos, Dissertação de Mestrado, CPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil (1989).
- [5] ITURRIOZ I., Aplicação do método dos elementos discretos ao estudo de estruturas laminares de concreto armado. Dissertação de Doutorado, CPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 157p (1995).
- [6] HRENNIKOFF, A. (1941). Solution problems of elasticity by the framework method, *Journal of Applied Mechanics*, 12, pp.169-175.
- [7] ABSI, E., Théorie des equivalences determination de quelques elements types. Anales de L'Institut Technique du Balument et des Travau Public. No. **281**, 83-86, (1971).
- [8] CUNDALL, P.A. & STRACK, D.L., A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* **29**, No. 1, 47-65 (1977).
- [9] NAYFEH, A.H., HEFZY, M.S.; Continuum modelling of three-dimensional truss-like space structures, *AIAA Journal*, Vol. **16**, No 8 (1978).
- [10] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB-FIP Model Code 1990. Lausanne, 1993.