



ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE CONCRETO SUBMETIDO A ESFORÇOS DE COMPRESSÃO

Raquel Caroline Zydeck

Matthews Vargas Vaucher Bandeira

Francisco Junior Keche Santos

Luis Eduardo Kostascki

Ederli Marangon

raquel.zydeck@gmail.com; matthews_vaucher@hotmail.com; franciscojr.keche@gmail.com;
luiskostascki@gmail.com; ederlimarangon@gmail.com

Grupo MAEC - Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, Campus Alegrete – Curso:
Engenharia Civil. Av. Tiaraju, Nº 810 – Ibirapuitã, Alegrete – RS – Brasil, CEP 97546-550.

Resumo. Este artigo tem como objetivo analisar a influência da altura em prismas de concreto e da restrição nas condições de contorno na resistência a compressão axial. A literatura mostra que para materiais com o comportamento quase frágil, como o concreto, o ensaio à compressão simples em prismas terá uma menor resistência quanto maior a altura. Primeiramente foi realizado um estudo experimental no qual foram moldados e rompidos prismas e cilindros de concreto com lados de 10 cm e alturas variáveis (5, 10, 20 e 40 cm) e 10x10, respectivamente, foi utilizado concreto de resistência a compressão de 50 MPa. Os ensaios foram conduzidos em duas situações, uma com a face do carregamento restringido por meio da colagem de uma chapa metálica de 2mm de espessura e outra com as faces livres por meio da aplicação de graxa na face do carregamento aplicado. O rompimento se deu por compressão simples. Nessa etapa, além do mapeamento das fissuras em cada configuração de ensaio, foram obtidas as cargas e as deformações. Na segunda etapa do trabalho foram realizadas simulações numéricas, empregando o método dos elementos discretos formados por barras (LDEM) aplicado no software comercial Abaqus/Explicit. Com o presente estudo foi possível concluir que as condições de restrições impostas nos prismas resultam em diferentes formas de ruptura, e que quanto maior a altura das amostras, menores as resistências encontradas, tanto de forma experimental como numérica.

Palavras-chaves: Resistência à compressão axial, Método dos elementos discretos formados por barras, Efeito de escala, Variação da restrição.

1 INTRODUÇÃO

A mecânica da fratura é um campo da ciência pouco desenvolvido, fato justificado pela grande complexidade de estudo, principalmente quando se trata de materiais frágeis, os quais apresentam a característica da falha brusca. Estes materiais sofrem influência do efeito de escala, o qual é responsável por grandes variações no comportamento mecânico dos mesmos. Callister e Rethwisch (2013) explicam que a fratura frágil ocorre sempre de forma repentina e catastrófica sem nenhum aviso prévio, pois as trincas se propagam rapidamente.

Visto isso, deve-se levar em conta um aspecto importante na prática da engenharia onde os ensaios realizados experimentalmente são produzidos em tamanhos extremamente reduzidos se comparado às estruturas reais e estes ensaios são essenciais para avaliar o comportamento das estruturas ou até mesmo dos materiais que estas estruturas são compostas. Desse modo para permitir que grandes estruturas sejam previamente analisadas, considerando a impossibilidade de realizar o ensaio em escala real, as simulações assumem um papel importante na engenharia civil.

Tratando-se de simulação numérica de problemas de dano e fratura, é importante ressaltar que dentre os métodos a serem utilizados, o Método dos Elementos Finitos (MEF) está relacionado a uma abordagem contínua, então se tratando de propagação de trincas este tipo de método acaba por não se tornar ideal, já quando utiliza-se do Método dos Elementos Discretos Formado por Barras (LDEM) há a possibilidade de incluir descontinuidade na modelagem de maneira direta, rompendo a ligação entre os componentes discretos, viabilizando assim uma desordem microestrutural que caracteriza materiais de estrutura heterogênea, que é o caso do concreto.

Portanto, no presente trabalho será aplicado o LDEM para a reprodução de ensaios laboratoriais de compressão direta de diferentes alturas de corpos de prova prismáticos de concreto em duas condições de contorno, variando o atrito nas extremidades das amostras em contato com os pratos da máquina de ensaio, assim como a esbeltes dos mesmos, verificando ao final dos procedimentos se os resultados experimentais coincidem com o que foi encontrado nas simulações numéricas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Mehta e Monteiro (2008) descrevem que um concreto submetido ao esforço de compressão é menos frágil se comparado a um concreto submetido a um carregamento de tração uniaxial, isso ocorre devido ao carregamento de compressão necessitar de uma energia consideravelmente maior para que as fissuras se formem e se desenvolvam na matriz. Os fatores que normalmente afetam a resistência do concreto estão relacionados com as propriedades e proporções dos materiais, as quais formam o traço do concreto.

2.1 Compressão uniaxial no concreto para diferentes alturas de corpos de prova

Vonk (1992), Mansur et al. (1995), entre outros autores citados por Van Geel (1998), constataram que a resistência à compressão uniaxial, diminui com o aumento da altura do corpo de prova, pois assim haverá menos concentrações de tensões. Através da Figura 1 pode-

se perceber o efeito que a compressão uniaxial causa nos corpos de prova prismáticos de concreto para diferentes alturas.

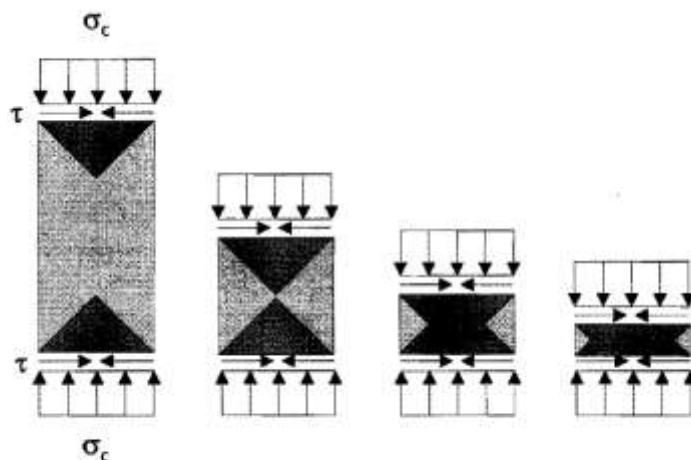


Figura 1. Influência da altura do corpo de prova em relação a compressão uniaxial. Van Geel apud de Van Vliet e Van Mier (1998, p.14)

Van Geel (1998) realizou ensaios experimentais e numéricos em corpos de prova prismáticos de concreto, para diferentes alturas e analisou como as fissuras se propagam sob o carregamento a compressão uniaxial. Na figura 2, pode-se observar as configuração de ruptura encontrados por Van Geel (1998), onde a Figura 2 (A) é uma amostra prismática de 5cm de altura, na figura (B) uma amostra prismática de 10cm de altura e na figura 2 (C) uma amostra de 20cm de altura.

Na figura 2 (A) verificou-se que é a amostra mais deformada onde a mesma se dividiu em vários blocos menores. Percebeu-se então que conforme aumenta a altura do corpo de prova ocorre uma deformação localizada, ou seja, deforma-se apenas em alguns pontos, formando uma fissura típica de cisalhamento.

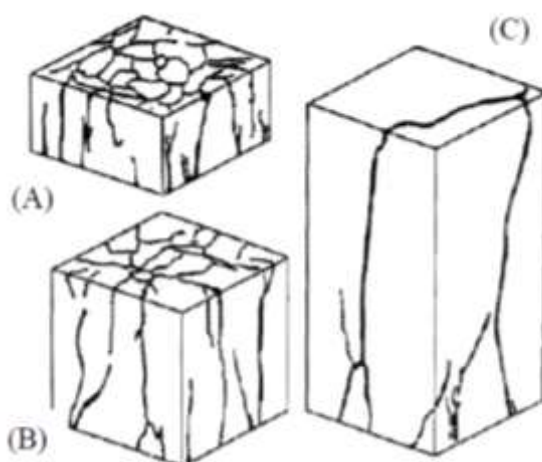


Figura 2. Amostras de concreto submetidas ao esforço de compressão uniaxial. Adaptado de Van Geel (1998)

2.2 Influência do coeficiente de atrito nas faces do carregamento aplicado

Van Geel (1998) explicou que quando se aumenta o coeficiente de atrito das faces dos pratos da máquina de carregamento em contato com o corpo de prova, o deslocamento entre o elemento e máquina torna-se restrito em virtude das tensões de fricção nas extremidades da amostra, as quais geram uma situação de confinamento no interior do elemento, o que eleva a carga máxima dos mesmos, isso ocorre em razão de que nestas regiões confinadas há uma compressão triaxial, a qual é geralmente maior que a força de compressão axial (CARPINTERI ca. 1998). Portanto, para que se estude o comportamento mecânico e de falha de corpos de prova sob carregamento axial, é necessário levar em consideração o atrito que está ocorrendo entre as amostras de concreto e os pratos da máquina do ensaio.

Na Figura 3, pode-se verificar como ocorre a distribuição de tensões e modos de ruptura em corpos de prova submetidos à compressão axial em estado de fricção Figura 3 (a) e na Figura 3 (b) pode-se observar há deslocabilidade nas faces do corpo de prova através da utilização de lubrificante, sem fricção entre os pratos da máquina.

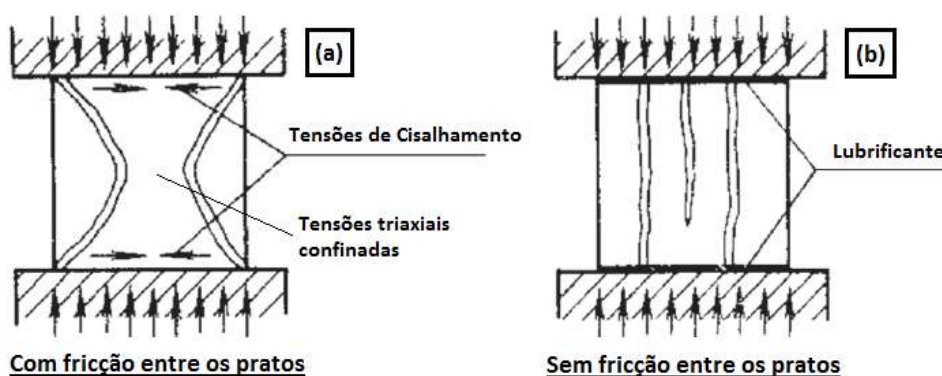


Figura 3. Modo de falha da amostra de acordo com as condições de contorno: a) ensaio com fricção e b) ensaio sem fricção. Adaptado de Bezerra et al. (2016)

2.3 Variação das propriedades mecânicas conforme a alteração das condições de contorno

Van Mier et al. (1997) estudou os efeitos da restrição nas extremidades dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos em contato com a prensa, variando a altura dos mesmos, de modo a verificar a relação do comportamento mecânico destes com a esbeltez e as condições de contorno impostas na execução do ensaio. O autor concluiu que quando os ensaios são realizados com lubrificante na interface entre a amostra e a prensa, a esbeltez dos corpos de prova não influencia na resistência, assim como determinou que há um decréscimo significativo de resistência quando comparado a ensaios em que há fricção, além de que há uma notória redução de ductilidade da amostra quando minimizada a fricção nos ensaios.

Carpinteri et al. [ca. 1998] buscou estudar o comportamento de corpos de prova variando a esbeltez e as condições de contorno entre o corpo de prova e as placas de carga, investigando estes aspectos experimentalmente e numericamente através de simulações numéricas. O autor chegou a constatações semelhantes a Van Mier et al. (1997), no caso dos

ensaios com fricção ocorreu uma grande variação de resistências na medida que se mudava a esbelteza das amostras, já nos ensaios sem fricção as resistências praticamente não variaram. Outro fator constatado foi a diminuição da ductilidade das amostras quando os ensaios foram isentos de fricção, assim como uma perda significativa de resistência.

3 METODOLOGIA

Para o presente trabalho o material escolhido foi o concreto, devido ao seu comportamento frágil. O estudo em questão foi dividido em duas etapas, a primeira consiste em realizar ensaios experimentais e a segunda em elaborar simulações numéricas, com o propósito de após o término das duas etapas ambos resultados dos processos sejam analisados e comparados entre si. Para a produção dos corpos de prova utilizou-se um concreto com resistência a compressão de 50 MPa, desse modo ensaiaram-se os mesmos em duas condições de contorno nas bases de aplicação da carga, uma com utilização de lubrificante, ou seja, aplicação de graxa (sem atrito) e outra colando uma placa de aço de 2 mm de espessura (com atrito).

3.1 Ensaios experimentais

Os materiais para a obtenção do concreto foram: brita 1, areia, cimento CPV ARI, aditivo superplastificante e água. Para a análise das propriedades dos materiais citados anteriormente, a moldagem e cura do concreto, foram desenvolvidos de acordo com os procedimentos normativos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Foram confeccionados corpos de prova cilíndricos e prismáticos. Os corpos de prova cilíndricos serviram como um concreto de referência, para posteriormente realizar as simulações numéricas. Nos corpos de prova prismáticos, foi verificada a influência da resistência a compressão com o aumento da altura dos corpos de prova. Para a realização das moldagens foram necessários três dias diferentes, devido ao número reduzido de moldes. Os corpos de prova cilíndricos possuem dimensões de 10x20 cm e os prismas de concreto apresentam dimensões de 10x10x40 cm, para o ensaio de compressão simples.

Após um dia de moldagem, foram desmoldados os corpos de prova e os mesmos permaneceram em câmara úmida. Decorridos 14 dias de cura os corpos de prova prismáticos foram cortados e lixados nas alturas necessárias para a realização do ensaio de compressão simples. Aos 28 dias foram realizados os ensaios de compressão dos corpos de prova, os quais foram ensaiados de 8 a 9 prismas de concreto para cada situação e 9 cilindros.

Estes prismas foram cortados e lixados para permitir os ensaios nas seguintes condições:

- Faces com atrito (colado): 5x10x10, 10x10x10, 20x10x10 e 40x10x10,
- Faces sem atrito (graxa): 5x10x10, 10x10x20, 20x10x10 e 40x10x10.

Nas Figuras 4 e 5 pode-se observar os corpos de prova com as faces que possui atrito (colado) e com as faces que não há atrito (livre), respectivamente.



Figura 4. Corpos de prova prismáticos com atrito.
Fonte: Acervo do autor (2017)



Figura 5. Corpos de prova prismáticos sem atrito.
Fonte: Acervo do autor (2017)

3.2 Simulações Numérica

Com as propriedades do concreto encontradas e adotadas através da primeira etapa, foi realizado simulações numéricas através do método dos elementos discretos formados por barras (LDEM).

3.2.1 Método dos elementos discretos formados por barras (LDEM)

O método dos elementos discretos formados por barras (LDEM) pode ser representado através de um modelo cúbico simples, o qual é composto por vinte elementos de barra e por nove nós, pontos onde as massas se concentram. Cada um destes nós apresenta três graus de liberdade que correspondem a três componentes de vetor deslocamento, tratando-se de um sistema de referência global (KOSTESKI, 2012).

Na Figura 6 está apresentado o modelo básico para o presente trabalho, onde na Figura 6 (a) é a configuração do mesmo, e na Figura 6 (b) é a geração do corpo prismático.

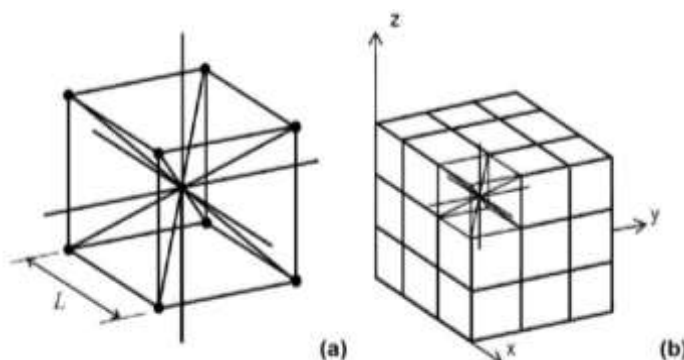


Figura 6. Discretização no DEM: a) Modelo cúbico básico, b) Geração do corpo prismático

A área transversal dos elementos posicionados longitudinalmente é calculada através da Equação 1 e a área diagonal pela Equação 2, visto que o elemento consiste em um material elástico isotrópico.

$$A_l = \phi L^2 \quad (1)$$

Na Equação 1, A_l é a área transversal dos elementos longitudinais em cm^2 a qual é o comprimento do lado do módulo cúbico em cm.

$$A_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \delta \phi L^2 \quad (2)$$

Sendo A_d a área transversal dos elementos longitudinais em cm^2 e L o comprimento do lado do módulo cúbico em cm.

Os coeficientes, ϕ e δ são inclusos nas equações anteriores e são determinados com as equações a seguir.

$$\phi = \frac{9 + 8\delta}{18 + 24\delta} \quad (3)$$

$$\delta = 9\nu(4 - 8\nu) \quad (4)$$

Onde ν é o coeficiente de Poisson do sólido. É importante observar que para $\nu = 0,25$ existe uma equivalência completa entre o modelo discreto e o contínuo isotrópico. Já para $\nu \neq 0,25$, aparecem pequenas diferenças nos termos de cisalhamento.

3.2.2 Método constitutivo não-linear para dano de material

De acordo com Maders et al. (2012) o método leva em conta que a energia de fratura dissipada no processo de ruptura, estabelece como condição que a energia dissipada pela fratura do material contínuo e sua representação discreta sejam equivalentes. Desta forma a fratura de um modelo cúbico de dimensões $L \times L \times L$ o qual é mostrado na Figura 7) (a), terá uma ruptura paralela a uma de suas faces devido a energia dissipada.

Já aplicando no módulo do DEM de dimensões $L \times L \times L$ a energia dissipada é dividido em duas partes, levando em conta a contribuição de cinco elementos longitudinais (quatro coincidentes com os eixos do módulo e um interno) e quatro elementos diagonais, o que pode ser observado na Figura 7 (b). Quando um elemento se quebra, geram-se áreas de fratura equivalentes, liberando assim energia de fratura, esta energia de fratura depende da área da fratura e da equação construtiva do material usado para a simulação.

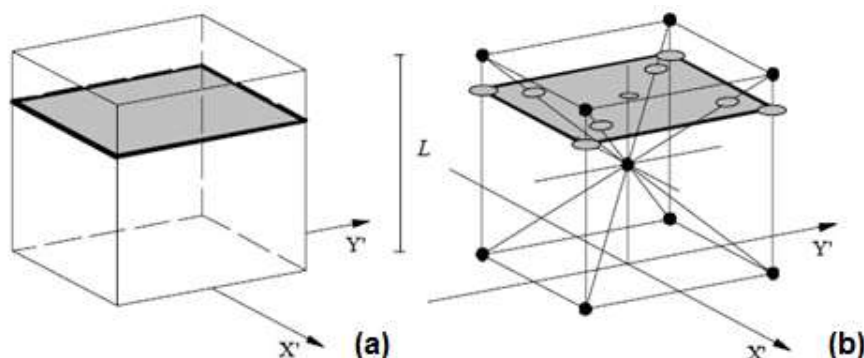


Figura 7. a) Sólido cúbico com cinco dimensões $L \times L \times L$; b) Módulo do DEM com dimensões $L \times L \times L$

3.2.3 Lei Constitutiva Bilinear

Hillerborg (1978) propôs a lei bilinear, a qual considera a fratura frágil e possibilita captar os efeitos irreversíveis da nucleação e propagação de fissuras, em razão disso, a mesma leva em consideração a redução de carga no elemento.

Os parâmetros e símbolos utilizados na definição do modelo construtivo da Figura 8 são definidos como: F é a força axial no elemento; ε é a deformação específica, sendo que ε_p é deformação crítica de falha e ε_r o limite da deformação de falha; E é a rigidez do elemento definido como o módulo de elasticidade do material; A é a área da seção transversal desse elemento; L é o comprimento do módulo do DEM; A_l e A_d são as áreas dos elementos longitudinais e diagonais.

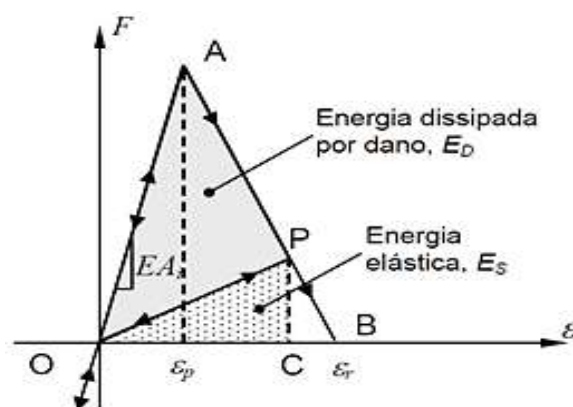


Figura 8. Modelo de Hillerborg

De acordo com Kostas, Pinto e Iturrioz (2010) no gráfico da Figura 8, a área triangular formada pelos pontos OAB configura a densidade de energia que se necessita para que ocorra fratura da área de influência do elemento, a área triangular ligadas através dos pontos OPC caracteriza a energia elástica armazenada no elemento e por fim, a área formada pelos pontos OAP representa a densidade de energia por fratura.

3.2.4 Inclusão do caráter aleatório

Conforme Rocha (1989), a aleatoriedade foi incluída nas propriedades do material. Pois assim é levado em conta as imperfeições ao tamanho do cubo elementar, em escala real. Rocha (1989) introduziu o aspecto aleatório considerando a tenacidade do material Gf , como uma variável aleatória, a qual é apresentada na equação 5, está equação admite para a mesma uma distribuição de probabilidades tipo Weibull.

$$W(Gf) = 1 - e - (Gf\beta)^\gamma \quad (5)$$

Onde β e γ são os parâmetros de escala e de forma, respectivamente.

O método de incorporação da aleatoriedade na energia específica de fratura Gf é mostrado na Figura 9. Essa energia, está relacionada com a área da RCE a qual tem uma variação espacial segundo uma distribuição tipo Weibull, o qual é mostrada na parte superior

da Figura 9. Logo, diferentes elementos terão diferentes RCE, com forma similar, como também é mostrado na Figura 9.

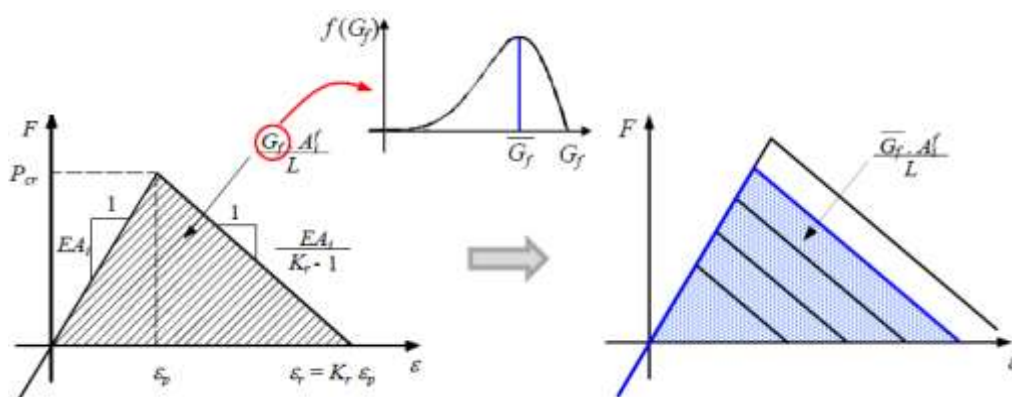


Figura 9. Esquema da incorporação da aleatoriedade no DEM

3.2.5 Implementação do DEM no ambiente Abaqus/Explicit

Segundo Kostas (2012) é possível implementar características do método dos elementos discretos no software Abaqus, pois assim ganha-se versatilidade para simulação de problemas com condições de contorno e formas de maior complexidade, assim como gerar modelos mistos DEM+MEF, ou até mesmo implementar outras leis constitutivas uniaxiais para as barras, por exemplo.

3.2.6 Modelagem da treliça espacial

A treliça espacial no Abaqus/Explicit é formada pela superposição de módulos básicos, utilizando elementos finitos de barras tridimensional com 2 nós (T3D2). No qual cada elemento encontra-se associado a uma seção e, a cada seção, atribui-se um tipo de material. Na disposição cúbica, implementada na presente formulação do DEM, podem ser identificados quatro tipos de seções diferentes, correspondentes a elementos colocados nas arestas (SA), nas faces (SC), internos (SI) e diagonais (SD), do modelo global, este esquema pode ser observado na Figura 10, onde as barras vermelhas são a representação das arestas, as verdes são as faces, as azuis são os elementos internos e já as roxas são os elementos diagonais, encontrados dentro do elemento.

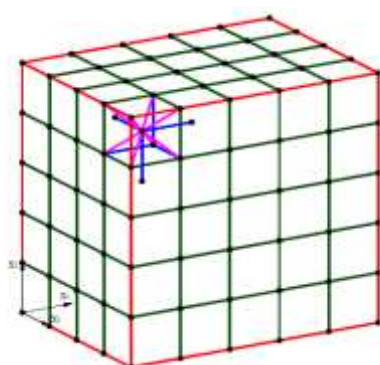


Figura 10. Cubo do LDEM mostrando as diferentes seções modeladas no Abaqus/Explicit

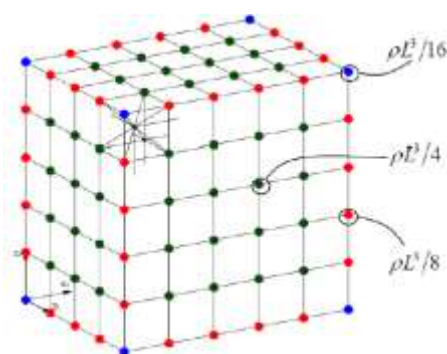


Figura 11. Cubo modelado com o DEM com as massas discretizadas

3.2.7 Discretização das massas

No método dos elementos discretos a massa do corpo simulado é discretizada e concentrada nos nós da treliça, e seu valor está diretamente relacionado com o volume de influência do nó. Considerando o módulo cúbico básico da Figura 6) (a), nota-se que no volume do módulo (L^3) está localizado o nó central, assim como o somatório da oitava parte dos nós dos vértices do módulo.

A massa do módulo cúbico deve ser equivalente a (ρL^3) , onde ρ é a massa específica do material. Sendo assim, para gerar a massa de um módulo cúbico se necessita de um nó central que aportará toda sua massa ($\rho L^3/2$), e oito oitavos devidos aos nós dos vértices ($8\rho L^3/16$).

Desse modo, os nós do vértice do modelo global, apresentados na Figura 11, têm apenas um oitavo da massa de um nó completo ($\rho L^3/16$), representados em azul, e os nós das arestas e os pertencentes às faces ou superfícies do modelo global terão um quarto e a metade da massa do nó completo, vermelho e verdes, respectivamente.

Não é possível colocar as massas somente concentradas nos nós no Abaqus/Explicit, isto porque resultariam em barras sem massas, ocasionando erros nos cálculos. Entretanto, o Abaqus/Explicit discretiza a massa do elemento de barra utilizado concentrando a mesma nos nós do elemento, em razão disso se optou por inserir uma densidade de massa nas barras que é equivalente às massas nodais no DEM.

Levando em conta duas densidades de massa equivalentes, sendo uma para as barras longitudinais (ρ_l) e outra para as barras diagonais (ρ_d), consideram-se duas restrições, que os nós centrais do modelo global apresentem massas de $\rho L^3/2$ e os nós localizados nos vértices massa de $\rho L^3/16$.

3.2.8 Introdução do modelo construtivo no Abaqus/Explicit

O modelo de ruptura para o concreto no Abaqus/Explicit, tem características similares a da lei constitutiva bilinear do LDEM. Podendo se destacar:

- O comportamento à compressão é sempre elástico linear;
- O comportamento antes de começar o dano é elástico linear;
- Pode-se remover os elementos quando eles forem totalmente danificados.

No Abaqus/Explicit é utilizado o modelo de fissuras distribuídas (smeared crack model) para representar descontinuidades do comportamento frágil no concreto. O critério de fratura se baseia no modelo de Hillerborg (1976), o qual usa a taxa de liberação de energia em Modo I, Gf como parâmetro de fratura. Na Figura 12, é mostrada a relação construtiva após a tensão máxima.

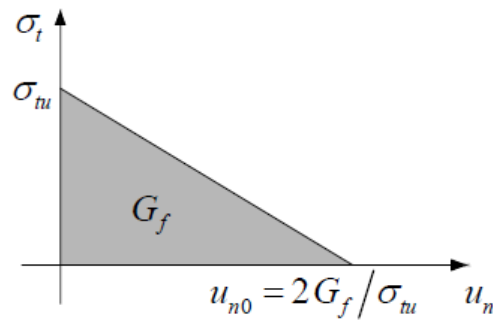


Figura 12. Modelo de tensão na falha versus deslocamento vinculado à energia de fratura utilizado no Abaqus/Explicit

3.2.9 Inclusão de caráter aleatório

Para a inclusão de aleatoriedade do material no ambiente Abaqus/Explicit, define-se x conjuntos de propriedades relativas ao material, e para cada conjunto tem-se quatro tipos de seções, as quais correspondem a elementos locados em arestas (S^A), nas faces (S^C), internos (S^I) e diagonais (S^D), do modelo global.

Em seguida divide-se a função de densidade de probabilidade de ε_p em x intervalos, vinculados aos conjuntos de propriedades já definidas, de modo que a probabilidade dentro dos mesmos seja a mesma, sendo assim a área encerrada nestes intervalos seja constante e igual a $1/x$. A Figura 13 apresenta a função de densidade de probabilidade nos quais se definiram x intervalos com a mesma probabilidade de ocorrência.

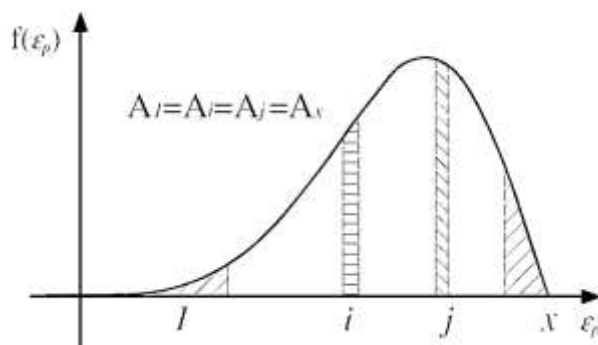


Figura 13. Função de densidade de probabilidade

Para cada material gerado (x) é atribuído um valor ε_p médio, assim como o G_f médio para cada intervalo. Sendo as áreas de distribuição iguais, a probabilidade que um valor ε_p caia em um destes intervalos é constante. Portanto, é só sortear um número dentro do intervalo $[1; x]$ com distribuição uniforme para que um elemento apresente propriedade aleatória, e então se atribui esse material ao elemento.

3.3 Caracterização do modelo

Para encontrar as propriedades do material utilizado foi realizado o ensaio experimental de resistência à compressão axial em cilindros de concreto normatizados segundo NBR 5738 (2016). As curvas típicas do resultado experimental de resistência à compressão axial estão apresentadas na Figura 14. Através delas encontrou-se o módulo de elasticidade de 33 GPa e a resistência a compressão média de todos os ensaios realizados resultou em 54 MPa. Na Figura 14 também é mostrado os resultados numéricos que serão explicados a seguir.

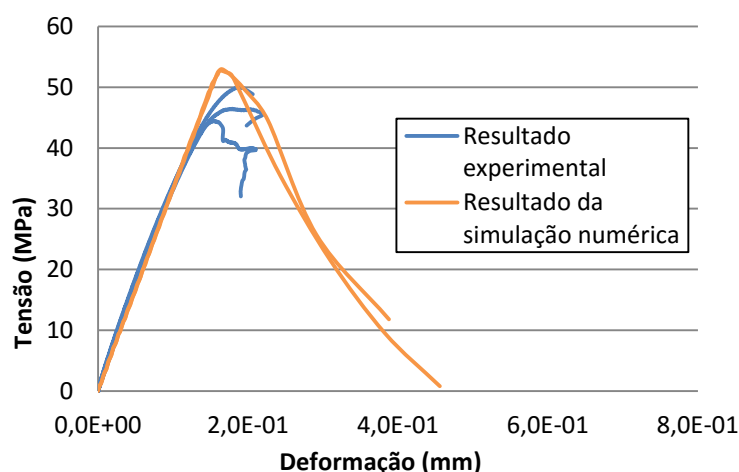


Figura 14. Curvas de Tensão versus Deformação dos corpos de prova cilíndricos

Com as propriedades do concreto encontradas experimentalmente criou-se um modelo do ensaio de compressão axial com corpos de prova cilíndricos. Este modelo foi feito no *software* ABAQUS, as placas de apoio de aço foram simuladas utilizando elementos finitos e o concreto utilizando o LDEM. Entre os dois foi utilizada uma lei de contato a princípio sem atrito. Na Figura 15 pode-se verificar o modelo numérico usado para as simulações com as condições de contorno utilizadas. As propriedades numéricas necessárias para o modelo foram ajustadas para obter a mesma curva tensão deformação do ensaio experimental. Na Figura 14 se mostrou as curvas numéricas comparadas com as experimentais.

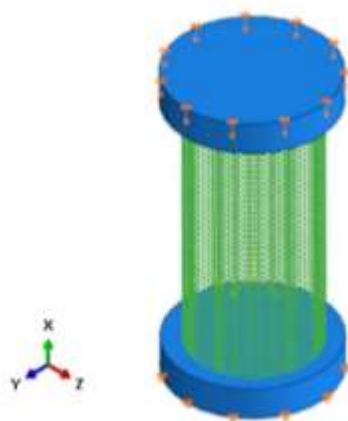


Figura 15. Modelo numérico usado

Na Tabela 1 estão apresentadas as propriedades ajustadas para o modelo numérico. O valor de G_f foi alterado para 450 N/m devido à discretização do modelo. Quando uma barra de LDEM se quebra, supõe-se que serão formadas no mínimo três fissuras e não somente uma como conjectura a teoria do método (Figura 7). Desta forma a energia de fratura do concreto (na ordem de 150 N/m) é incrementada para levar em conta este efeito. Também é considerada uma aleatoriedade no campo da energia de fratura com coeficiente de variação de 40% e comprimento de correlação de $\frac{1}{4}$ de L_c (tamanho do módulo cúbico). É importante salientar que com esta aleatoriedade colocada no modelo não foi suficiente para representar a dispersão dos resultados experimentais dos ensaios à compressão axial mostrado na Figura 14, mas valores maiores de aleatoriedade reduziam consideravelmente o valor médio da resistência à compressão pelo que se optou por ajustar a resistência média e não sua dispersão neste primeiro trabalho.

Tabela 1. Resultados encontrados e adotados

Propriedades	Concreto	Aço
E [GPa]	33	200
ρ [Kg/m ³]	2000	7850
ν	0,25	0,3
G_f [N/m]	450	-
CVG_f [%]	40	-
R_f [m ^{1/2}]	8,930	-
L_c	0,005	-

Com corpos de prova prismáticos de diferentes comprimentos foram realizados dois tipos de ensaios experimentais e suas respectivas simulações numéricas. Um deles considerando engaste entre os corpos de prova e as placas de distribuição de carregamento (colado) cujo esquema está apresentado na Figura 16 (a) e outra sem atrito entre eles, (com graxa), com esquema mostrado na Figura 16 (b). As propriedades utilizadas nas simulações estão especificadas na Tabela 1.

Na figura 17 se mostram os corpos de prova simulados com o LDEM. Com as dimensões dos corpos de prova e o tamanho do módulo básico de LDEM adotado, onde se tem que o modelo menor tem 26.500 graus de liberdade (GDL) somente no LDEM. Os outros tem 51.800; 102.200 e 203.300 GDL, respectivamente pelo aumento da altura do corpo de prova prismático, sempre sem considerar as placas de aço simuladas com elementos finitos (1600 GDL cada uma). O contato “*surface-to-surface contact*” entre os cubos de concreto e as placas de aço foi simulada com uma lei de contato sem atrito, “*frictionless*”, para simular a graxa e “*rough*” para simular a cola entre estes materiais.

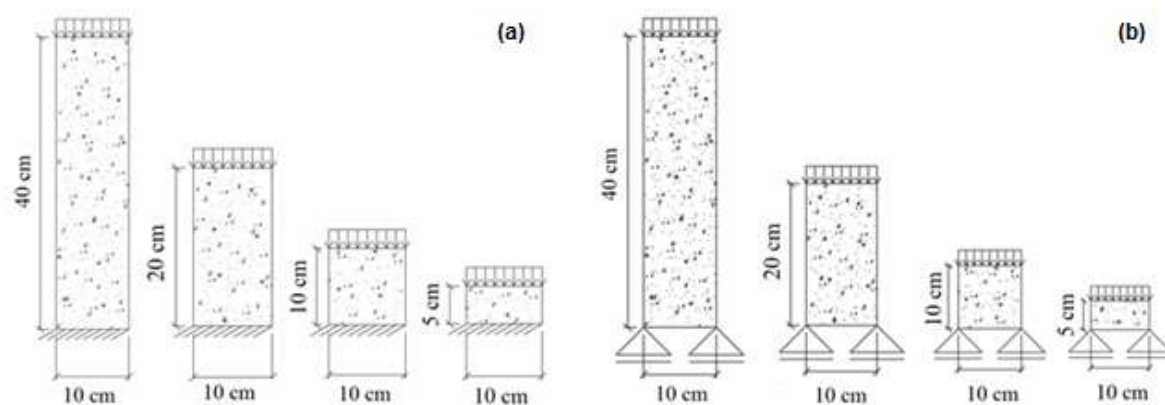


Figura 16. a) Corpos de prova com atrito; b) Corpos de prova sem atrito

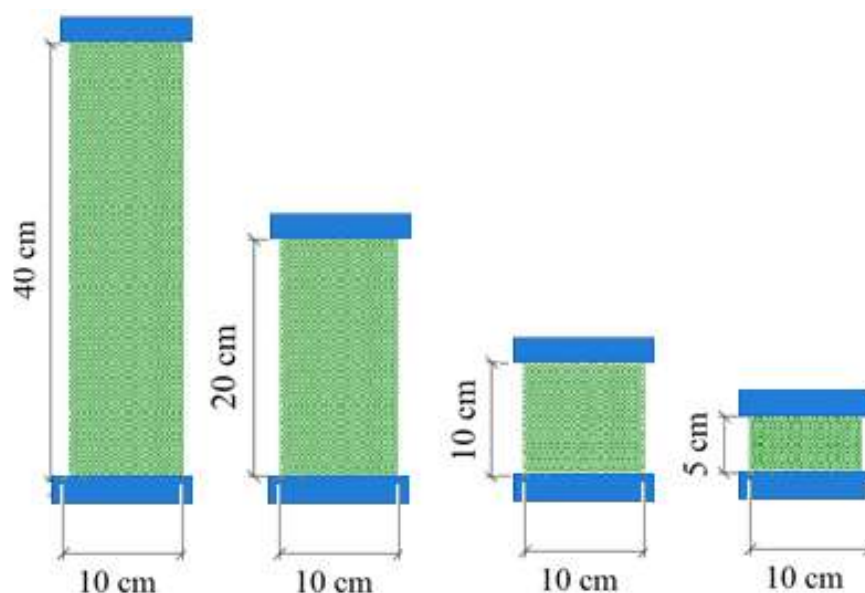


Figura 17. Corpos de prova simulados com o LDEM

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 2 pode-se observar os resultados encontrados para os ensaios experimentais e na Tabela 3 os resultados encontrados para as simulações dos corpos de prova prismáticos.

Tabela 2. Resultados encontrados experimentalmente

Altura (cm)	Restrição	Resistência Experimentais (MPa)	Coef. Variação (%)	Relação – CA/SA
5	CA	95,38	11	1,965
	SA	48,54	20	
10	CA	45,23	17	1,289
	SA	35,09	20	
20	CA	38,00	33	1,299
	SA	29,25	35	
40	CA	38,55	41	1,030
	SA	37,43	14	

Legenda: CA = Com atrito e SA = Sem atrito

Tabela 3. Resultados encontrados numericamente

Altura (cm)	Restrição	Resistência Simulações Numéricas (MPa)	Coef. Variação (%)	Relação - CA/SA
5	CA	154,81	6	2,321
	SA	66,69	5	
10	CA	121,88	8	1,860
	SA	65,52	5	
20	CA	109,10	7	1,893
	SA	57,64	10	
40	CA	104,30	3	1,631
	SA	63,95	3	

Analisando os resultados apresentados nas Tabelas 2 e 3 foi possível comprovar que os corpos de prova colados apresentaram resistência maior do que das amostras em que se utilizou graxa. Este fato está coerente com a bibliografia, porque os elementos colados tem uma restrição transversal que geram um confinamento triaxial de tensões, o que não acontece quando se coloca graxa e o carregamento tende a ser mais uniaxial. Este efeito foi encontrado tanto experimental como numericamente.

Porém ocorreu uma variação considerável entre os resultados obtidos de maneira experimental e através das simulações. Isto acontece em razão de que quando se trata de simulações numéricas, os modelos implementados representam corpo de prova ideais, ou seja, não correspondem 100% aos que são ensaiados experimentalmente. Assim a resistência à compressão axial sem atrito obtida de forma numérica deveria ser menor que a resistência encontrada experimentalmente, já que a graxa diminui o atrito, porém não o anula totalmente. Desta forma, se observa que o material simulado é muito mais resistente que o material real, sendo assim se fosse elevado a variabilidade colocada ao modelo, isto indiretamente diminuiria a resistência máxima encontrada.

A relação entre os resultados com atrito e sem atrito é muito maior na simulação numérica que a obtida experimentalmente. Isto era esperado já que, no experimental não se tem o caso sem atrito nem engastado como idealmente se consegue numericamente.

A grande diferença entre os resultados se dá para os corpos de altura superior a 10 cm, experimentalmente, não se encontrou grande variação de resultados nem muita diferença entre colar o colocar graxa entre o corpo de prova e as placas de assentamento. Já numericamente essa diferença tende a diminuir depois dos 20 cm de altura, mas ainda com grande diferença entre utilizar como condições de contorno como o engaste e o apoio simples.

Nas Figuras 18, 19, 20, 21, 22 e 23 podem-se observar as formas de rupturas de todos os prismas, encontrados tanto de forma experimental, quanto através de simulações numéricas, procedimentos os quais ambos foram realizados alternando as condições de contorno dos corpos de prova com a utilização de graxa (sem atrito) e com cola (com atrito). Nos modelos numéricos são deixadas somente as barras quebradas com coloração azul para poder identificar a forma de falha, todas as outras barras foram eliminadas para facilitar a interpretação. Estas figuras mostram as falhas representativas encontradas, tanto experimental como numericamente, já que foram realizados 4 testes para cada tamanho e condições de contorno

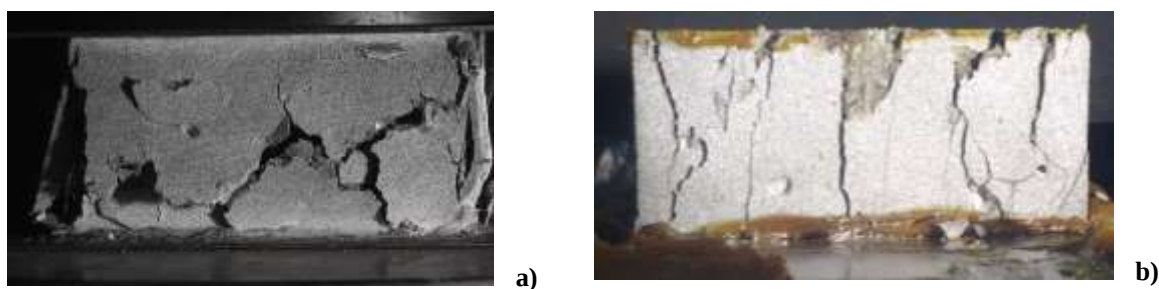


Figura 18. Corpo de prova de 5cm de altura após a ruptura do ensaio experimental. a) amostra com atrito, b) amostra sem atrito

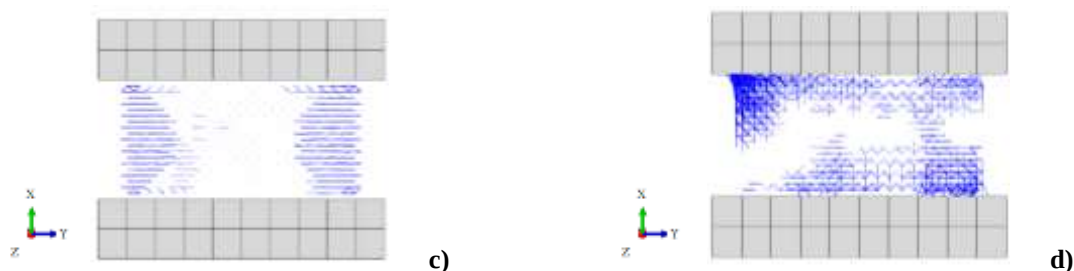


Figura 19. Corpo de prova de 5cm de altura durante a ruptura da simulação numérica. c) amostra com atrito, d) amostra sem atrito.

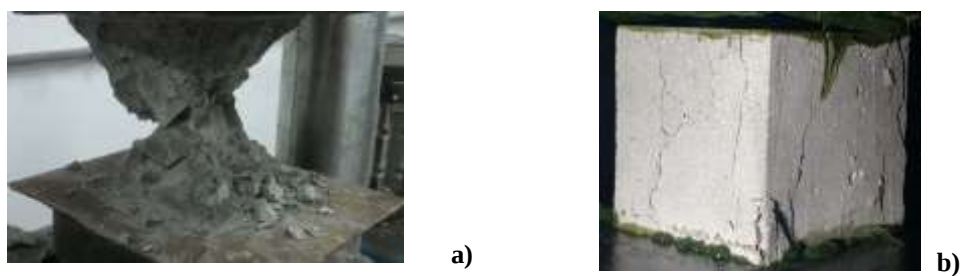


Figura 20. Corpo de prova de 10cm de altura após a ruptura, do ensaio experimental. a) amostra com atrito, b) amostra sem atrito

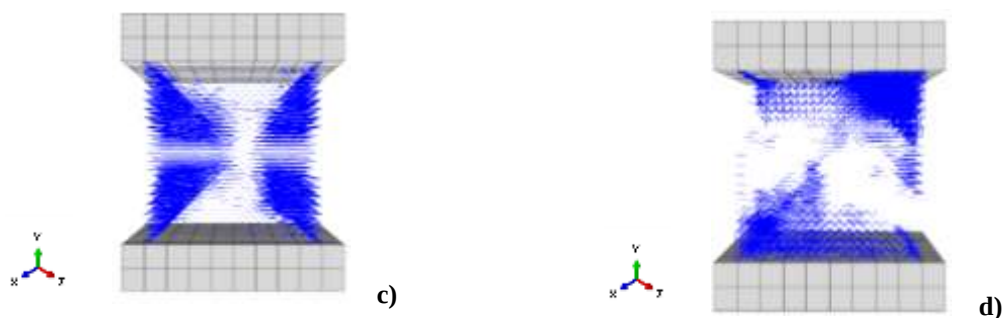


Figura 21. Corpo de prova de 10cm de altura durante a ruptura da simulação numérica. c) amostra com atrito, d) amostra sem atrito

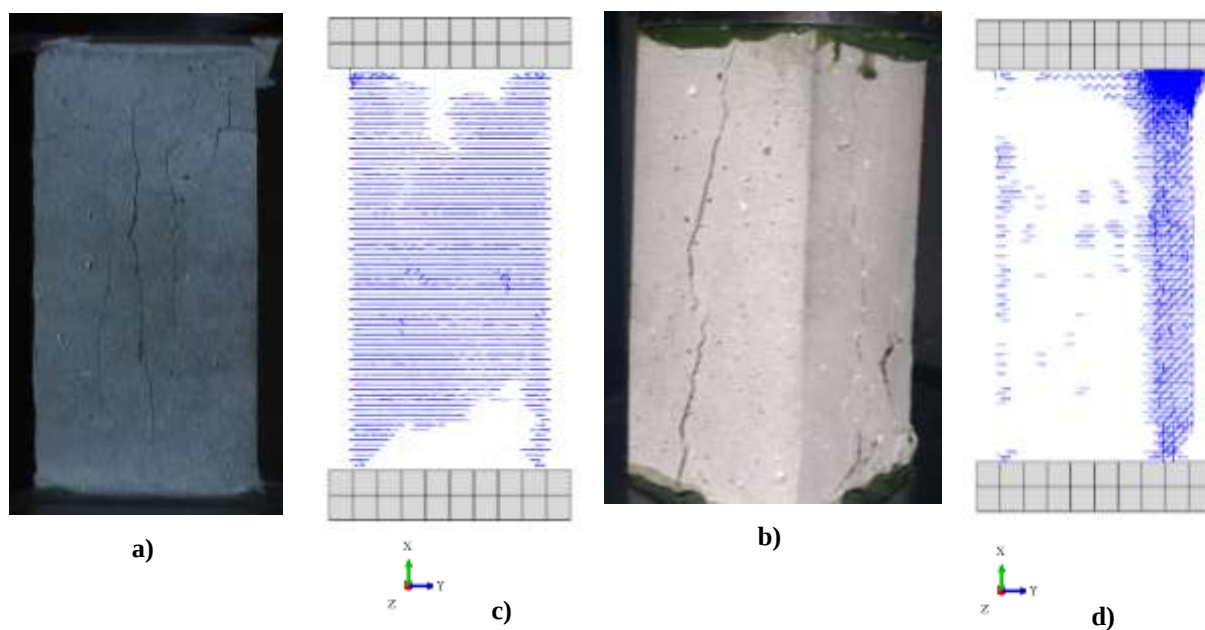


Figura 22. Corpo de prova de 20cm de altura após a ruptura. a) e b) amostra experimental com e sem atrito e c) e d) amostra experimental e numérica com e sem atrito, respectivamente

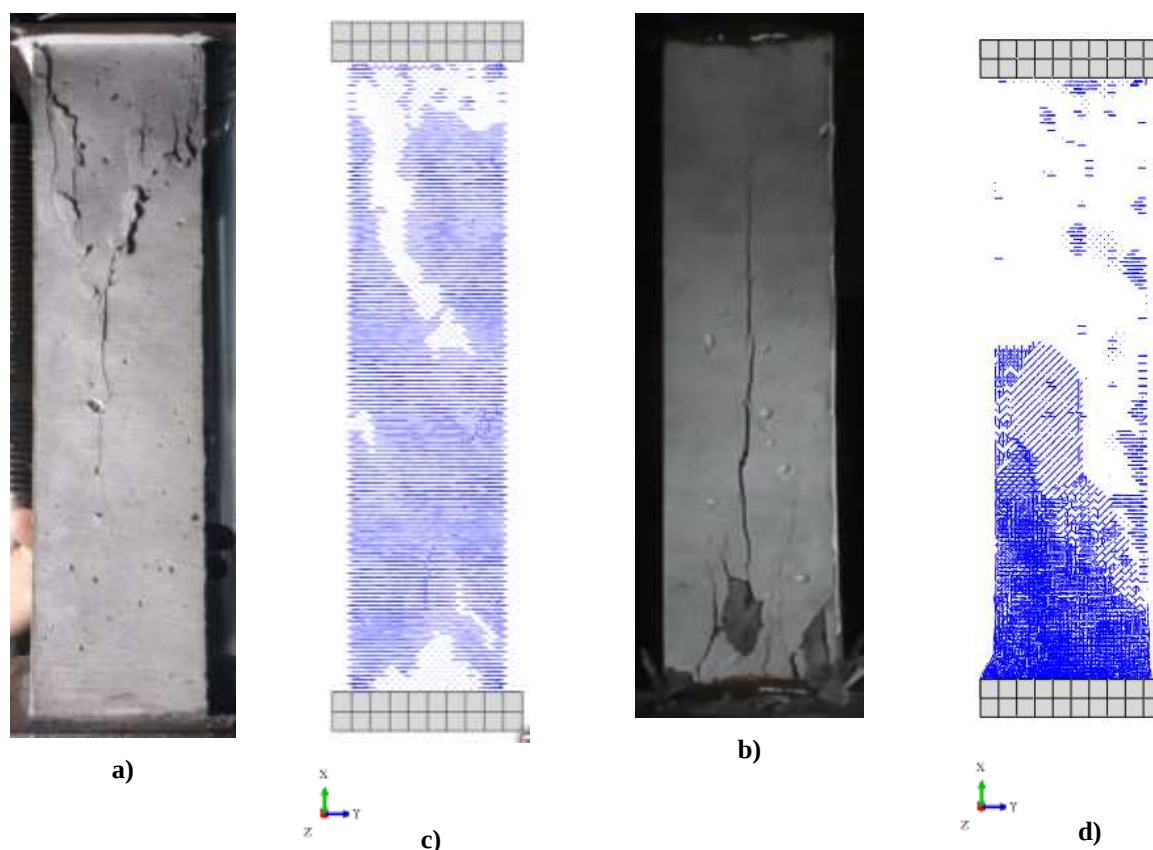


Figura 23. Corpo de prova de 40cm de altura após a ruptura. a) e b) amostra experimental com e sem atrito e c) e d) amostra experimental e numérica com e sem atrito, respectivamente

Como se pôde observar nas figuras anteriores, quando se aumenta o atrito nas extremidades dos prismas, o deslocamento entre o elemento e máquina torna-se restrito em virtude das tensões de fricção nas extremidades da amostra, gerando tensões triaxiais de confinamento que forçam a um modo de falha padrão, com formato de ampulheta devido ao cone de tensões gerado na interface entre amostra e máquina de ensaio. Isto é mais visível nos prismas de menor esbeltez, que é o caso dos corpos de prova de 5 cm de altura (Figuras 18 e 19) e de 10 cm de altura, (Figuras 20 e 21).

Em relação aos corpos de prova ensaiados com aplicação de graxa (sem atrito), observa-se que ocorre tanto nos elementos numéricos quanto nos práticos uma formação de trincas verticais paralelas, as quais se justificam pela dissipação das tensões internas devido a deslocabilidade entre o elemento de concreto e a máquina de ensaio.

5 CONCLUSÕES

Com a realização do presente trabalho verificou-se tanto experimentalmente como numericamente, que a medida em que se aumentava a altura dos corpos de prova prismáticos, independente da condição de contorno, a resistência dos mesmos reduzia, o que já era esperado conforme a bibliografia.

Os resultados encontrados experimentalmente e através das simulações numéricas apresentaram uma relação aceitável, visto que tanto para os resultados práticos quanto para os numéricos, os prismas quando restringidos (com atrito) nas suas extremidades apresentaram resistência superiores as encontradas nas amostras sem restrição (sem atrito).

Outro fator importante a ser ressaltado é que quando é aplicado graxa nas extremidades dos prismas, a variação entre os resultados à medida que é elevada a esbeltez dos corpos de prova é mínima quando comparado aos resultados obtidos dos prismas restringidos, situação que apresenta maior relevância nas simulações numéricas.

Através da realização deste trabalho pode-se verificar que houve uma grande variação entre as resistências encontradas experimentalmente e as que foram obtidas pelas simulações numéricas, em razão disso deve-se aprimorar os parâmetros a serem utilizados na simulação numérica.

AGRADECIMENTOS:

Os autores agradecem o apoio da UNIPAMPA da FAPERGS e da CNPQ que fizeram e fazem o possível para a realização de nossas pesquisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas: *NBR 5738: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto*. Rio de Janeiro, 2016.

Bezerra U.T., Alves S. M. S., Barbosa N. P., Torres S. M. Corpo de prova na forma de ampolheta: resistência à compressão de concretos e argamassas (análises numérica e experimental), *Ibracon structures and materials jornal*, v. 9, p. 510-524, August (2015).

Carpinteri A., Ciola F., Pugno N. Application of the boundary element method to the compressive strain-softening behaviour of concrete, *Fracture Mechanics of Concrete Structures, Freiburg*, p. 1949-1962, [ca. 1998].

Callister, W. D., Rethwisch, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais*, uma introdução. 8ª edição. Rio de Janeiro: LCT, 2013.

Hillerborg, A. A model for fracture analysis. *Cod LUTVDG/TV BM-3005*, p.1-8, 1978.

Kostascki, L.E. *Aplicação do Método dos Elementos Discretos formado por barras no estudo do colapso de estruturas*. 177 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

Kosteski, L., Pinto, O., Iturrioz, I. *Combinação entre o método dos elementos discretos compostos por barras e o método dos elementos finitos no ambiente Abaqus*, Associação Argentina de Mecânica Computacional Vol. XXIX, Buenos Aires, p. 5259-5283, 2010.

Maders, L., Kosteski, L.E., Iturrioz I. *Estudo do efeito de escala no método dos elementos discretos formado por barras*. Mecânica Computacional, v. XXXI, p. 1857-1876, 2012.

Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3º ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto-IBRACON, 2008.

Rocha, M. M. *Ruptura e Efeitos da Escala em Materiais não Homogêneos*. Tese (Mestrado) – CPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 1989.

Van G. E. *Concrete Behaviour in Multiaxial Compression: Experiment al Research*. Tese (Doutorado em Engenharia) - Faculdade de Arquitetura da Universidade de Tecnologia de Eindhoven, Departamento de Design Estrutural, Eindhoven, ISBN 90-6814-548-7, 1998.

Van M. J.G.M., Shah S. P., Arnaus M. *Strain-softening of concrete in uniaxial compression*. Materials and Structures/Matériaux et Constructions, v. 30, p 195-209, 1997.