



ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO COM DIFERENTES MODELAGENS DA ZONA DE TRANSIÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS NA ESCALA MESOSCÓPICA

Wanessa Mesquita Godoi Quaresma

wanessa.m.godoi@gmail.com

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil – Universidade Federal de Goiás

Avenida Universitária, 1488, Qd. 86, Lt. Área, Setor Leste Universitário, 74605-220, Goiás, Goiânia, Brasil

José Julio de Cerqueira Pituba

julio_pituba@ufg.br

Laboratório de Mecânica Computacional, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão
Av Dr Lamartne Pinto de Avelar, 1120, 75704-020, Catalão, Goiás, Brasil

Resumo. *Este trabalho trata do estudo do comportamento mecânico do concreto utilizando uma proposta de modelagem numérica bidimensional em escala mesoscópica. O material é considerado como composto por três fases consistindo de zona de interface, matriz e inclusões. Uma das abordagens permite que a zona de interface seja modelada por meio de elementos finitos coesivos de contato, onde um modelo de fratura e contato recentemente proposto é incorporado ao elemento. Por outro lado, a zona de transição pode ser modelada por elementos finitos triangulares onde o modelo de Mohr-Coulomb com características de menor resistência em relação à argamassa, é utilizado. A inclusão é considerada um material elástico linear e a matriz é um material elastoplástico obedecendo ao modelo de Mohr-Coulomb. Objetiva-se avaliar as potencialidades e limitações de uma proposta de modelagem do comportamento mecânico de materiais heterogêneos, como o concreto. Pretende-se, portanto, obter respostas macroscópicas complexas do comportamento mecânico do concreto utilizando modelos constitutivos simples, em formulação e quantidade de parâmetros, empregados na mesoescala segundo uma modelagem baseada em técnica de homogeneização*

usando um procedimento em elementos finitos dentro de uma teoria Multiescala. Os resultados encontrados demonstram que as modelagens propostas apresentam resultados promissores para o emprego numa modelagem multiescala.

Palavras-chave: *Modelos Multiescala, Concreto, Fratura Coesiva, Zona de Transição Interfacial, Plasticidade.*

1 INTRODUÇÃO

O comportamento mecânico dos materiais compósitos é de grande importância no projeto de componentes estruturais de várias áreas de aplicação. Baseado nisso, o estudo da resposta constitutiva de um corpo submetido a uma determinada carga, ou estado de excitação, configura uma importante ferramenta para a ciência dos materiais, podendo melhorar as propriedades macroscópicas por meio de mudanças de forma e/ou tipologia em nível micro estrutural. Os modelos desenvolvidos em multiescala são atrativos por terem grande potencial de desenvolvimento e utilização. Aliados aos modelos Multiescala, modelos constitutivos baseados em teorias como Mecânica da Fratura, Mecânica do Contato, Mecânica do Dano e Teoria da Plasticidade são atualmente utilizados para a modelagem do comportamento micromecânico de materiais heterogêneos. Mais especificamente, no caso do concreto, os processos de plastificação da matriz e de propagação de microfissuras, principalmente na Zona de Transição, são importantes fenômenos a serem modelados. Portanto, este trabalho pretende utilizar as ferramentas supracitadas no âmbito de uma formulação do Método dos Elementos Finitos para contribuir no estudo do comportamento mecânico do concreto. Para tanto, pode-se citar a utilização da formulação multiescala desenvolvida em Pituba *et al.* (2016), Fernandes *et al.* (2015), além do elemento finito de fratura coesiva e leis de fratura e contato associadas. Vale ainda destacar os trabalhos de Borges (2015), Oliver *et al.* (2015), Blanco *et al.* (2014), Oliver *et al.* (2014), Kim e Al Rub (2011), Nguyen *et al.* (2011) e Nguyen *et al.* (2010), entre outros.

2 MODELAGEM PROPOSTA

Para simular o comportamento mecânico do concreto, uma modelagem em sua mesoestrutura é realizada considerando o comportamento mecânico de cada material constituinte e suas interações. O estudo da mesoescala é realizado através da definição de um EVR e seu domínio é discretizado através do Método dos Elementos Finitos (MEF). A zona de interface em uma das abordagens é modelada por meio de elementos finitos coesivos de contato, onde um modelo de fratura e contato recentemente proposto é incorporado ao elemento. Por outro lado, a zona de transição pode ser modelada por elementos finitos triangulares onde o modelo de Mohr-Coulomb com características de menor resistência em relação à argamassa, é utilizado. A inclusão é considerada um material elástico linear e a matriz é um material elastoplástico obedecendo ao modelo de Mohr-Coulomb. Na Figura 1 observa-se o EVR de tamanho 100 mm x 100 mm. Em todos os EVRs, manteve-se os raios dos agregados graúdos, médio e finos com 10 mm, 5 mm e 2,5 mm, respectivamente.

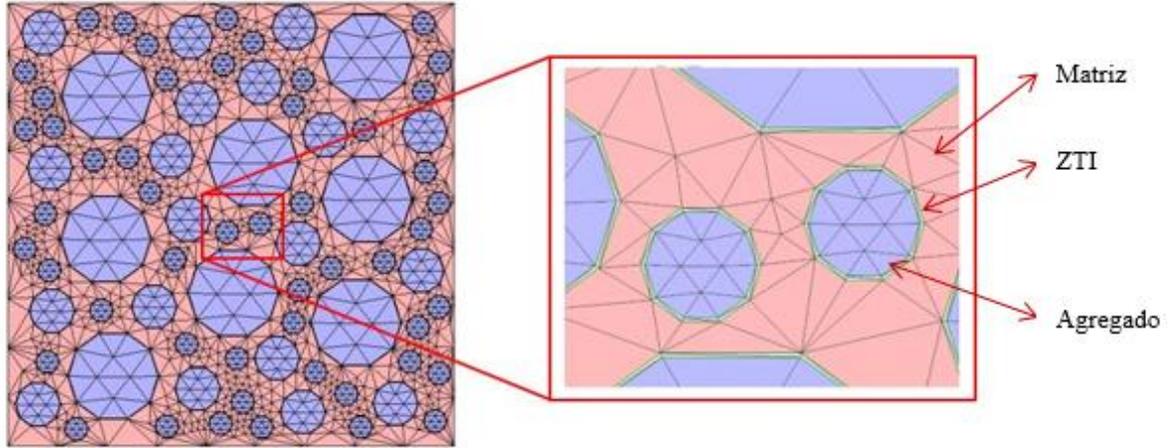


Figura 1. Elemento de Volume Representativo.

2.1 Formulação do modelo mesoescala

O EVR é descrito como contínuo de modo que o conceito de tensão permaneça válido na microescala. Considerando um tensor de deformação $\boldsymbol{\varepsilon}(x, t)$, bem como $\boldsymbol{\sigma}(x, t)$ tensor de tensão em um ponto x da macroestrutura, são obtidos como a média volumétrica sobre o respectivo campo microscópico $\boldsymbol{\varepsilon}_\mu = \boldsymbol{\varepsilon}_\mu(y, t)$ ou $\boldsymbol{\sigma}_\mu = \boldsymbol{\sigma}_\mu(y, t)$ através de um EVR associado a x , sendo y um ponto da microestrutura, isto em um instante t arbitrário, temos então:

$$\boldsymbol{\varepsilon}(x, t) = \frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu} \boldsymbol{\varepsilon}_\mu(y, t) dV. \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\sigma}(x, t) = \frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu} \boldsymbol{\sigma}_\mu(y, t) dV. \quad (2)$$

As Equações (1) e (2) apresentam a deformação macroscópica ou homogeneizada e a tensão macroscópica ou homogeneizada, processo resultante da transformação de uma quantidade microscópica em uma quantidade macroscópica por meio de um processo de homogeneização, além disso, os campos podem ser escritos em relação à tensão microscópica a seguir na Eq. (3):

$$\boldsymbol{\sigma}_\mu(y, t) = \mathbf{f}_y(\boldsymbol{\varepsilon}_\mu(y, t)). \quad (3)$$

Sendo \mathbf{f}_y o funcional constitutivo, definido neste trabalho pelo modelo de Mohr-Coulomb, assim, a deformação microscópica $\boldsymbol{\varepsilon}_\mu$ pode ser escrita em termos de campo de deslocamento microscópico \mathbf{u}_μ do EVR conforme a Eq. (4):

$$\boldsymbol{\varepsilon}_\mu(y, t) = \nabla^S \mathbf{u}_\mu(y, t). \quad (4)$$

Onde o ∇^S é o operador gradiente simétrico do campo de deslocamento \mathbf{u} . Já o campo de deslocamento microscópico \mathbf{u}_μ , sem perda de generalidade, é composto pelas seguintes contribuições, mostrada na Eq. (5):

$$\mathbf{u}_\mu(y, t) = \mathbf{u}(x, t) + \bar{\mathbf{u}}_\mu(y, t) + \tilde{\mathbf{u}}_\mu(y, t). \quad (5)$$

Sendo um deslocamento constante de corpo rígido coincidente com o deslocamento macroscópico $\mathbf{u}(x,t)$ associado ao ponto x , um campo de deformação macroscópica $\boldsymbol{\varepsilon}$:

$$\bar{\mathbf{u}}_{\mu}(y,t) := \boldsymbol{\varepsilon}(x,t)y. \quad (6)$$

Que varia linearmente com a coordenada y , e num campo de flutuação de deslocamento $\tilde{\mathbf{u}}_{\mu}(y,t)$. Reescrevendo de forma simplificada a relação acima detalhada:

$$\mathbf{u}_{\mu}(y,t) = \boldsymbol{\varepsilon}(x,t)y + \tilde{\mathbf{u}}_{\mu}(y,t). \quad (7)$$

Na Equação (7) a parte $\boldsymbol{\varepsilon}(x,t)y$ varia linearmente em y e isto resulta na multiplicação macroscópica de deformação $\boldsymbol{\varepsilon}$ do EVR, que é constante para as coordenadas do ponto y . No caso de deslocamento microscópico uniforme $\boldsymbol{\varepsilon}_{\mu}$, o deslocamento de flutuação $\tilde{\mathbf{u}}_{\mu}$, é nulo, também no EVR são satisfeitas as seguintes relações para deformação microscópica $\boldsymbol{\varepsilon}_{\mu}$ e deformação microscópica de flutuação $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\mu}$:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mu} = \nabla^S \mathbf{u}_{\mu}(y,t). \quad (8)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\mu} = \nabla^S \tilde{\mathbf{u}}_{\mu}(y,t). \quad (9)$$

Considerando a Eq. (7) e as relações acima, de forma análoga, a deformação microscópica pode ser escrita da seguinte forma:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mu}(y,t) = \boldsymbol{\varepsilon}(x,t) + \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\mu}(y,t). \quad (10)$$

Após algumas manipulações (Fernandes *et al.*, 2015), pode-se reescrever a Eq. (10) em forma de velocidade, onde uma velocidade de deformação microscópica é dita cinematicamente admissível se:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\mu}(y,t) = \nabla^S \dot{\mathbf{u}}_{\mu} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}(x,t) + \dot{\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}}_{\mu}(y,t) \forall \dot{\tilde{\mathbf{u}}}_{\mu} \in \nu_{\mu}. \quad (11)$$

A microescala é representada pelo EVR e a formulação do MEF é a ferramenta que resolve o problema de equilíbrio do mesmo. As variáveis do EVR, como por exemplo, dimensões e constantes elásticas, são distintas do material no macrocontínuo e essas características são definidas para um EVR padrão e ele será extrapolado para todos os EVRs da estrutura. Assim, a solução de um EVR, ou seja, o cálculo dos deslocamentos, das forças internas, das tensões verdadeiras e da matriz constitutiva atualizada dos seus elementos finitos é obtida quando se alcança a convergência, de acordo com a tolerância adotada, do seu problema de equilíbrio proposto. No entanto, para resolver esse problema de equilíbrio, necessita-se definir as condições de contorno a ser impostas no EVR. Assim, a resposta obtida pode variar em função da condição de contorno adotada. Desta forma, com objetivo de estruturar e organizar melhor a apresentação da formulação segundo uma abordagem multiescala para este trabalho, consideram-se cinco etapas: Equação de equilíbrio no EVR; Princípio de Hill-Mandel; Homogeneização das tensões; Condições de contorno impostas no EVR; Módulo constitutivo tangente homogeneizado.

Por motivos de simplificação será considerado o domínio das inclusões Ω_{μ}^i e o da matriz Ω_{μ}^m como um só domínio dos sólidos Ω_{μ}^i . Assumindo que as forças de inércia são desprezíveis e que o EVR é submetido a um campo de força de corpo $\mathbf{b} = \mathbf{b}(y,t)$ e a um

campo de forças de superfície $\mathbf{t}^e = \mathbf{t}^e(y, t)$ atuando em todo o contorno, o princípio dos trabalhos virtuais estabelece que o EVR está em equilíbrio, se somente se, o campo de tensão $\boldsymbol{\sigma}_\mu$ em Ω_μ satisfaz a equação variacional clássica da elasticidade:

$$\int_{\Omega_\mu^s} \boldsymbol{\sigma}_\mu(y, t) : \nabla^S \boldsymbol{\eta} dV - \int_{\Omega_\mu^s} \mathbf{b}(y, t) \cdot \boldsymbol{\eta} dV + \int_{\Omega_\mu^v} \boldsymbol{\sigma}_\mu(y, t) : \nabla^S \boldsymbol{\eta} dV - \int_{\Omega_\mu^v} \mathbf{b}(y, t) \cdot \boldsymbol{\eta} dV - \int_{\partial\Omega_\mu} \mathbf{t}^e(y, t) \cdot \boldsymbol{\eta} dA = 0 \quad \forall \boldsymbol{\eta} \in v_\mu \quad (12)$$

Os trabalhos de Hill e Mandel (Giusti *et al.*, 2009) estabeleceram o princípio de macro homogeneidade que diz que a potência das tensões macroscópicas em qualquer ponto arbitrário do macrocontínuo deve ser igual à média volumétrica da potência das tensões microscópicas sobre o EVR associado a esse ponto para qualquer movimento cinematicamente admissível do EVR (Giusti *et al.*, 2009).

Considerando as Eq. (8) e (10) escrevendo $\boldsymbol{\sigma}_\mu$ como $\boldsymbol{\sigma}_\mu = \mathbf{f}_y(\boldsymbol{\varepsilon}_\mu)$, sendo \mathbf{f}_y o funcional constitutivo e assumindo $\dot{\tilde{\mathbf{u}}}_\mu = \boldsymbol{\eta}$, pode-se obter a seguir a equação em termos de deslocamento de flutuação:

$$\int_{\Omega_\mu^s} \mathbf{f}_y(\boldsymbol{\varepsilon}(x, t) + \nabla^S \tilde{\mathbf{u}}_\mu(y, t)) : \nabla^S \boldsymbol{\eta} dV = 0 \quad \forall \boldsymbol{\eta} \in V_\mu \quad (13)$$

E por fim, a formulação é completada com a escolha apropriada do volume V_μ , ou seja, com a escolha das restrições cinemáticas do EVR. Portanto, o problema de equilíbrio microscópico consiste em dado o tensor de deformação macroscópico $\boldsymbol{\varepsilon}$, o campo $\tilde{\mathbf{u}}_\mu \in V_\mu$ de tal modo que a cada instante t , a Eq. (13) é satisfeita, em vista da arbitrariedade de $\boldsymbol{\eta}$, após a discretização do domínio do EVR em elementos, os seguintes incrementos da equação de equilíbrio microscópico devem ser mantidos para o incremento de carga no tempo $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$ e a discretização de h , de modo a encontrar o deslocamento de flutuação $\tilde{\mathbf{u}}_{\mu(n+1)} = \tilde{\mathbf{u}}_{\mu(n)} + \Delta \tilde{\mathbf{u}}_{\mu(n)}$:

$$G_h^{n+1} = \int_{\Omega_\mu^h} \mathbf{B}^T \mathbf{f}_y(\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1} + \mathbf{B} \tilde{\mathbf{u}}_{\mu(n+1)}) dV = 0 \quad (14)$$

Onde \mathbf{B} é a matriz global de deformação-deslocamento, Ω_μ^h indica o domínio discretizado do EVR. Se o incremento de carga n é não-linear, a Eq. (14) é resolvida pela aplicação do método de Newton-Raphson que consiste em buscar a correção de flutuação $\delta \tilde{\mathbf{u}}_\mu^{i+1}$ para interação $i+1$, tal que:

$$\mathbf{F}^i + \mathbf{K}^i \delta \tilde{\mathbf{u}}_\mu^{i+1} = 0 \quad (15)$$

Assim, \mathbf{F} é o vetor de forças e \mathbf{K} é a matriz de rigidez tangente do EVR. Após a computação das correções $\delta \tilde{\mathbf{u}}_\mu^{i+1}$ da Eq. (15), o próximo processo que o campo de flutuação de deslocamentos, considerando a interação $i+1$ relativa ao microcontínuo, é dado por: $\tilde{\mathbf{u}}_\mu^{i+1} = \tilde{\mathbf{u}}_\mu^i + \delta \tilde{\mathbf{u}}_\mu^{i+1}$.

Já a tensão homogeneizada é calculada pela Eq. (2), considerando que o EVR é composto por partes vazias e sólidas (matriz e agregados) $\Omega_\mu = \Omega_\mu^s \cup \Omega_\mu^v$, e resulta em:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}(x, t) = \frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu^s} \boldsymbol{\sigma}_\mu(y, t) dV + \frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu^v} \boldsymbol{\sigma}_\mu(y, t) dV \quad (16)$$

A complementação da formulação sobre equilíbrio do EVR descrita é realizada com a escolha do volume apropriado v_μ , ou seja, com escolha das restrições cinemáticas a serem impostas no EVR que leva a diferentes classes de modelos multiescala e conseqüentemente diferentes resultados numéricos (Peric *et al.*, 2011; Souza Neto *et al.*, 2006). Aqui é utilizada a condição de flutuação periódica. Observa-se que cada lado Γ_i^+ , do qual a direção normal é n_i^+ , corresponde a um lado igual Γ_i^- com direção normal n_i^- , sendo $n_i^+ = -n_i^-$, similarmente, para cada ponto y^+ definido sobre Γ_i^+ existe um ponto y^- sobre o lado Γ_i^- , isto mostra que a flutuação do deslocamento deve ser periódica no contorno do EVR, ou seja, cada par (y^+, y^-) dos pontos de ter:

$$\tilde{\mathbf{u}}_\mu(y^+, t) = \tilde{\mathbf{u}}_\mu(y^-, t) \quad \forall \{y^+, y^-\} \in \partial\Omega_\mu \quad (17)$$

2.2 Modelo de Fratura Coesiva e Plasticidade

Pituba *et al.* (2016) propôs um modelo de fratura coesiva modificado a partir de Cirak *et al.* (2005) para lidar com meios dúcteis de modo a simular o processo de fissuração até a falha da microestrutura. O modelo proposto descreve a lei coesiva de deformação-finita irreversível. A energia coesiva liberada Φ é dada pela Eq. (18):

$$\Phi = \Phi(\delta_n, \delta_s, \mathbf{q}) \quad (18)$$

Onde, δ_n é a abertura devido ao modo I (normal); δ_s é a abertura devido ao modo II (escorregamento) e q é a variável que descreve os processos inelásticos da coesão.

É possível assumir que a deformação devida a abertura por escorregamento é um valor escalar independente da direção de sua fissura na superfície, assim $\delta_s = |\delta_s|$, dando um caráter isotrópico para seu comportamento, para a formulação da lei coesiva dos modos mistos, é introduzido um deslocamento de abertura efetiva dado pela Eq. (19):

$$\delta = \sqrt{\beta^2 \delta_s^2 + \delta_n^2} \quad (19)$$

O parâmetro β assume valores diferentes para as aberturas, variando de 0 a 1, por outro lado, assumindo que a energia potencial liberada ϕ depende de δ , a lei coesiva é escrita como:

$$\mathbf{t} = \frac{t}{\delta} (\beta^2 \boldsymbol{\delta}_s + \delta_n \mathbf{n}) \quad (20)$$

Onde, \mathbf{n} é o vetor normal à fissura; $\boldsymbol{\delta}_s$ é o vetor de abertura por escorregamento localizado na superfície da fissura; \mathbf{t} é vetor de tensão coesiva ao longo da fissura, as relações propostas para a tensão efetiva t são descritas a seguir nas Eq. (21) e Eq. (22):

$$t = \sigma_c e^{-\delta/\delta_c} \quad \text{se } \delta = \delta_{\max} \text{ e } \dot{\delta} \geq 0 \quad (21)$$

$$t = \frac{t_{\max}}{\delta_{\max}} \delta \quad \text{se } \delta < \delta_{\max} \text{ ou } \dot{\delta} < 0. \quad (22)$$

Onde e é o exponencial ($e \cong 2,71828$), σ_c é a máxima tensão de tração normal coesiva, δ velocidade de abertura e δ_c é a abertura crítica. Antes do aparecimento das fraturas, uma rigidez entre as bordas da possível fratura presente entre os elementos finitos triangulares é chamada de fator de penalidade λ_p . Este fator de penalidade é um parâmetro de valor escalar. Na prática, valores altos para o fator de penalidade são adotados a fim de obter uma aproximação precisa. Tal procedimento garante que a possível fratura permaneça fechada até se atingir o critério de separação e, ao mesmo tempo, garante a admissibilidade física de todo o processo.

De maneira geral, esta estratégia pretende criar rigidez nos nós dos pares com o contato de elementos finitos coesivos, a fim de não permitir a penetração das superfícies de fissura. Por outro lado, no regime de tensão, este fator de penalidade efetivamente substitui a porção rígida inicial da lei coesiva por uma resposta linear rígida na forma da Eq. 23. Para detectar o fenômeno de contato coesivo, é adotado o conceito das diferenças entre os pontos de Gauss do elemento finito de contato e fratura coesiva.

$$t = \lambda_p \delta \quad \text{se } \lambda_p \delta \leq \sigma_c. \quad (23)$$

Os tipos de elementos considerados nesse trabalho são compostos por duas superfícies que são coincidentes na configuração indeformada do EVR. O elemento finito de contato e fratura coesiva é definido como um elemento de quatro nós sendo a sua geometria compatível com a de dois elementos triangulares bidimensionais usados para modelar as fases da matriz e de inclusão. A formulação desenvolvida pode ser encontrada em Pituba e Souza Neto (2015) e Pituba *et al.* (2016).

Por outro lado, para lidar com as deformações plásticas que surgem quando a macroestrutura do concreto está solicitada, sobretudo por tensões de compressão, o bem conhecido modelo de Mohr-Coulomb é utilizado aqui na representação do comportamento mecânico da matriz cimentícia. Tal modelo irá auxiliar na modelagem dos processos dissipativos ocorridos na Zona de Interface na representação das deformações plásticas, haja vista que mesmo considerando um comportamento elástico para a matriz, o processamento de fratura da Zona de Interface aliado à geometria dos agregados é capaz de simular o surgimento de deformações plásticas macroscópicas homogêneas quando em processo de descarregamento e inversão de sentido, evidenciando o efeito unilateral desse material (Pituba e Souza Neto, 2015).

Por fim, vale ressaltar que todo o equacionamento é resolvido através de uma formulação tangente consistente, o que leva a uma solução numérica com taxa quadrática de convergência, sendo esse um fator positivo, haja vista que em análises multiescala, o custo computacional tem alto valor.

3 ANÁLISE NÚMERICA - INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DOS AGREGADOS

Quatro diferentes distribuições são mostradas na Figura 2. O tamanho do EVR é de 100 mm x 100mm, e a fração de volume de agregados dos modelos é idêntica a 50%. Todos

os agregados são distribuídos aleatoriamente com a mesma gradação total de 5:3:2 em relação a fração volumétrica.

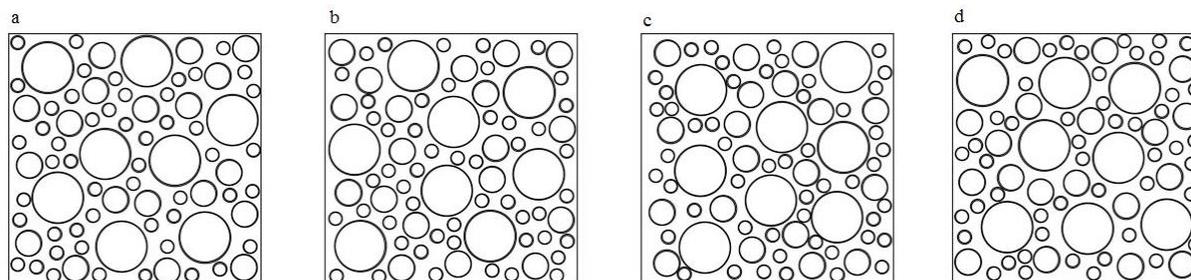


Figura 2. EVRs da análise de sensibilidade da distribuição dos agregados. (a) Modelo 1. (b) Modelo 2. (c) Modelo 3. (d) Modelo 4. (KIM; AL-RUB, 2011).

Adotando-se os modelos da Figura 2 foram realizadas duas análises: a primeira, onde a interface matriz/agregado foi modelada com elementos triangulares com a espessura indicada na Tabela 1; a segunda abordagem considera a interface matriz/agregado modelada por elementos de fratura e contato. A Tabela 1, indica as informações sobre a malha de elementos finitos que cada modelo possui, tanto para os EVRs com Zona de Transição interfacial quanto para os EVRs com elemento de fratura e contato entre a matriz/agregado.

Tabela 1. Número de Elementos Finitos para os EVRs com diferentes distribuições de agregados.

| EVR | Zona de Transição com EF triangular | | | Zona de Transição com EF de fratura e contato | | |
|----------|-------------------------------------|-----------|-----------------|-----------------------------------------------|-----------|-----------------|
| | Espessura (mm) | Nº de nós | Nº de elementos | Nº de EF fratura | Nº de nós | Nº de elementos |
| Modelo 1 | 0,2 | 2264 | 4490 | 780 | 2380 | 3158 |
| Modelo 2 | 0,2 | 2216 | 4394 | 780 | 2340 | 3078 |
| Modelo 3 | 0,2 | 2166 | 4294 | 780 | 2295 | 2988 |
| Modelo 4 | 0,2 | 2184 | 4330 | 780 | 2293 | 2984 |

3.1 Modelagem da Zona de Transição com Elementos Finitos triangulares

A Figura 3 apresenta a resposta macroscópica carga x deslocamento de concretos contendo as diferentes distribuições de agregados mostrados na Figura 2. Percebe-se que a resposta macroscópica do material até o carregamento último independe da distribuição de agregados na microestrutura. Portanto, essa constatação é reflexo do que acontece na microestrutura do material. Esse comportamento na escala mesoscópica é percebido quando do emprego da modelagem proposta neste trabalho (ver Figura 4).

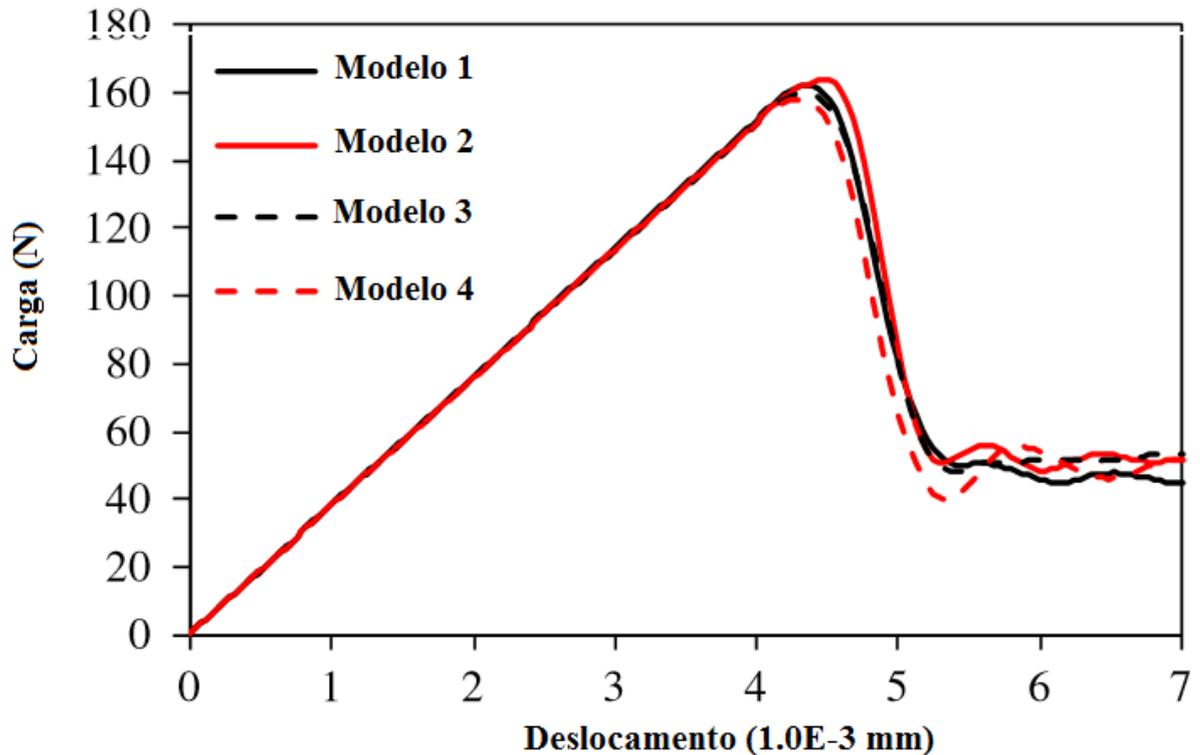


Figura 3. Relação macroscópica de carga-deslocamento para diferentes distribuições de agregados na microestrutura, adaptado pelo autor (KIM; AL-RUB, 2011).

Nesta análise cada modelo foi submetido a uma deformação macroscópica arbitrária sob regime predominante de tração em ε_x (0,0000517, 0,0000500, 0,0000521 e 0,0000515), em $\varepsilon_y = -0,000000001$, sendo γ_{xy} tomado como aproximadamente nulo e subdivididas em 30 incrementos.

Com as deformações aplicadas, obtêm-se os valores das tensões homogeneizadas para o EVR. Que são 1,8727; 1,8303; 1,8684 e 1,8550 MPa para os EVRs com modelo de distribuição 1, 2 3 e 4 respectivamente. O gráfico da Figura 4 relaciona a tensão homogeneizada na direção x com a deformação macroscópica no mesmo eixo do modelo proposto.

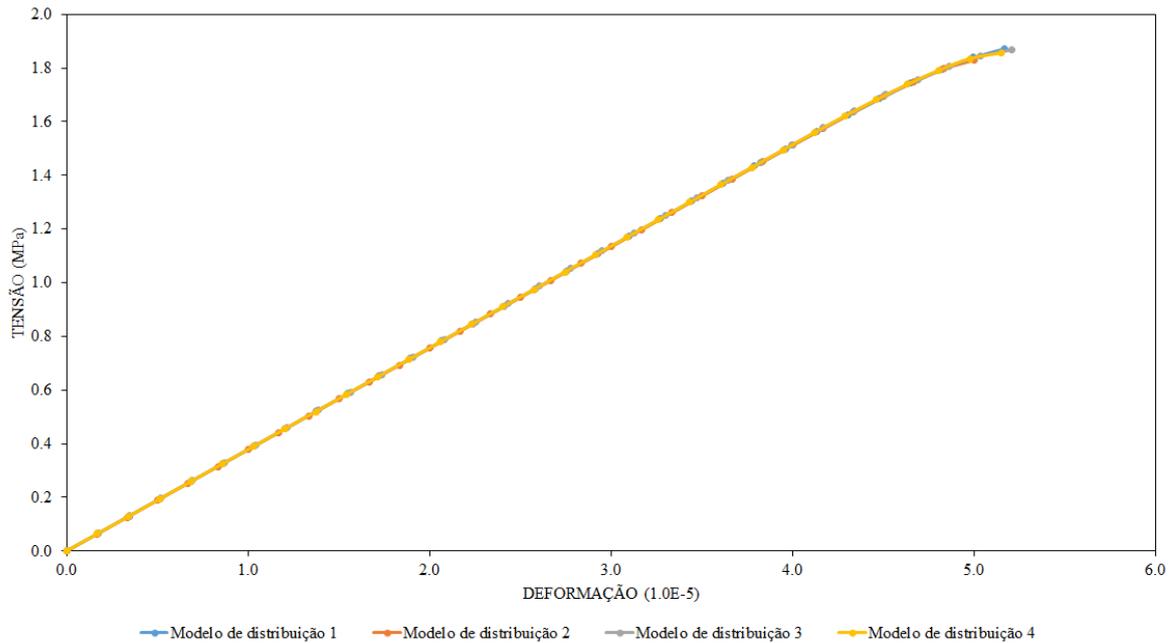


Figura 4. Relação de tensão-deformação homogeneizadas na direção x para diferentes distribuições de agregados.

Observa-se na Figura 4 as curvas de tensão-deformação homogeneizadas obtidas nesta análise entre os modelos com diferentes distribuições. As curvas são idênticas confirmando que a forma de distribuição dos agregados não influencia a resposta macromecânica homogeneizada do EVR. Contudo, ressalta-se que a Figura 4 evidencia pouca influência no regime de *softening* da resposta macromecânica. Porém, é importante ressaltar que o foco deste trabalho é analisar a microestrutura do material e, para se obter a resposta macromecânica de uma estrutura composta por este material, como fez Kim e Al-Rub (2011), é preciso realizar uma análise multiescala, o que não o objetivo aqui.

3.2 Modelagem da Zona de Transição com Elementos de fratura e contato

De posse dos mesmos EVRs, porém com a inclusão de elementos de fratura e contato na zona de transição, foram repetidas as análises do item anterior, submetendo os EVRs a uma deformação macroscópica arbitrária sob regime predominante de tração em ε_x (0.000001, 0.0000011, 0.000001 e 0.0000008), em $\varepsilon_y = -0.0000000001$, sendo γ_{xy} tomado como aproximadamente nulo e subdivididas em 30 incrementos.

Com as deformações aplicadas, obtêm-se os valores das tensões homogeneizadas na direção x para o EVR. Que são 0,0688; 0,0762; 0,0697 e 0,0552 MPa para os EVRs com modelo de distribuição 1, 2, 3 e 4 respectivamente. Uma primeira conclusão parcial que se pode observar é que parece que a identificação do parâmetro σ_c do modelo de fratura é fundamental, pois ele governa o funcionamento do elemento de fratura e contato, como elemento em processo de abertura ou, mais importante, como elemento de contato fazendo com que a fratura previamente inserida permaneça fechada conferindo um comportamento de meio contínuo da zona de transição e, conseqüentemente, uma resistência maior ao EVR, contudo, devido à inserção dos elementos de fratura e contato para modelar a zona de transição, as respostas homogeneizadas apresentaram uma perda substancial de resistência e rigidez em comparação às respostas encontradas no item anterior.

O gráfico da Figura 5 relaciona as tensões homogeneizadas na direção x com as deformações macroscópicas no mesmo eixo do modelo proposto.

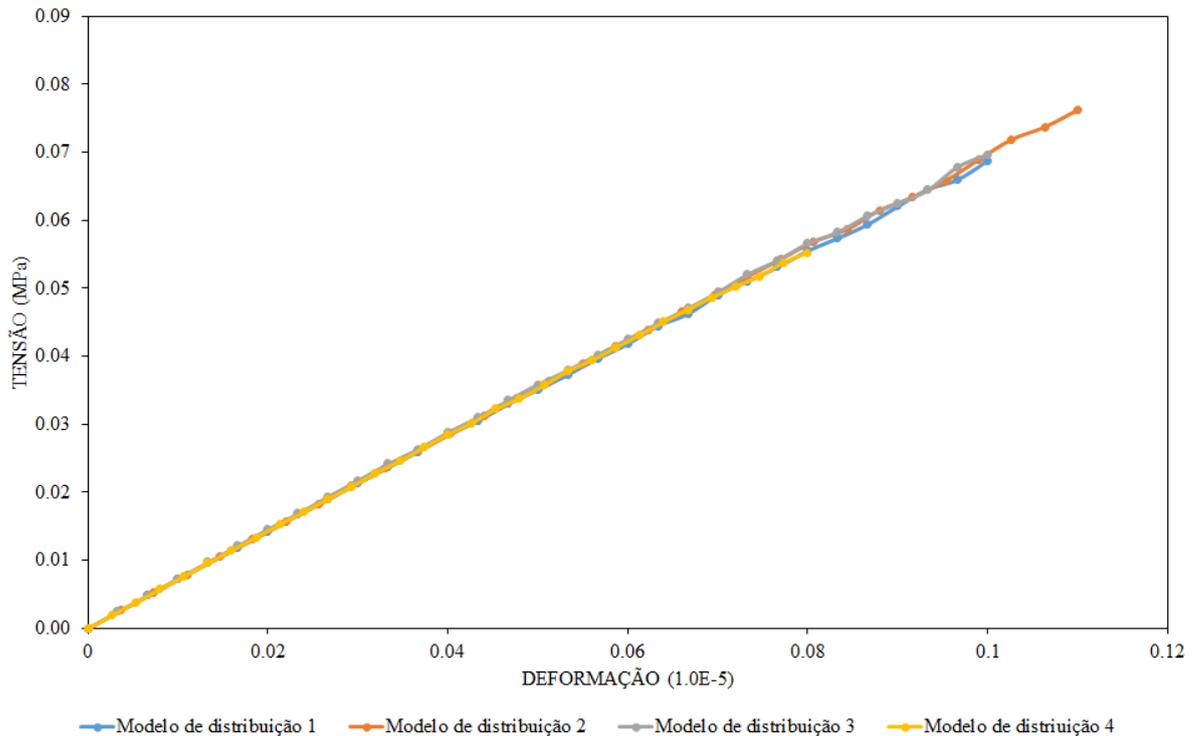


Figura 5. Relação de tensão-deformação na direção x para diferentes distribuições de agregados.

Nesta análise pode-se observar que o comportamento é o mesmo da análise com zona de transição modelada por elementos triangulares, porém quando é adicionado ao elemento de fratura e contato a análise está sujeita a maiores instabilidades das respostas numéricas isto justifica as diferentes tensões e deformações finais.

4 CONCLUSÕES

O objetivo geral do trabalho em avaliar as potencialidades e limitações de uma proposta de modelagem do comportamento mecânico do concreto na mesoescala foi atingido, mostrando que uma formulação baseada na homogeneização computacional é uma alternativa promissora, aos modelos constitutivos macroscópicos complexos para o comportamento mecânico de matérias frágeis usando um procedimento baseado no Método dos Elementos Finitos no âmbito de uma teoria multiescala. Ressaltando a necessidade do progresso deste estudo, principalmente relacionados a identificação paramétrica do modelo de fratura e contato na análise microestrutural do concreto. Acredita-se que a utilização de um modelo baseado na Mecânica do Dano possa gerar resultados melhores de identificação paramétrica.

A estratégia de utilizar modelos triangulares na ITZ apresentou um comportamento numérico estável. Pensa-se que se utilizar um modelo constitutivo que capture o regime de *softening* como modelos de dano associada a implementação de elementos triangulares com baixa razão de aspecto deve ser uma ferramenta promissora (Rodrigues *et al.*, 2016). Contudo deve-se ainda pensar no problema de localização do dano na microestrutura e a posterior formação de fratura na macroestrutura numa análise multiescala.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e o CNPq pelo apoio para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Blanco, P. J., Sánchez, P. J., Souza Neto, E. A. And Feijóo, R. A. 2014. Variational Foundations and Generalized Unified Theory of RVE-Based Multiscale Models. *Numerical Methods in Engineering*, vol. 97, pp.313-351.
- Borges, D.C. *Estudo e avaliação de uma proposta de modelagem do comportamento micromecânico do concreto*. 2015. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- Cirak, F., Ortiz, M.; Pandolfi, A. 2005. A cohesive approach to thin-shell fracture and fragmentation, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. vol. 194, pp. 2604-2618.
- Fernandes, G. R., Pituba, J. J. C.; De Souza Neto, E. A. 2015. FEM/BEM formulation for multi-scale analysis of stretched plates. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 54, pp. 47-59.
- Giusti S.M., Blanco P.J., De Souza Neto, E.A., Feijoo, R.A. 2009. An assessment of the Gurson yield criterion by a computational multi-scale approach, *Engineering Computations*, vol. 26, n. 3, pp. 281-301.
- Kim, S. M.; Al-Rub, R. K. A. 2011. Meso-scale computational modeling of the plastic-damage response of cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, vol. 41, pp.339–358.
- Nguyen, V.P.; Lloberas Valls, O.; Stroeven, M.; Sluys, L.J. 2010. On the existence of representative volumes for softening quasi-brittle materials – a failure zone averaging scheme. *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering*, vol. 199, pp. 1220-1236.
- Nguyen, V. P., Lloberas-Valls, O., Stroeven, M.; Sluys, L. J. 2011. Homogenization-based multiscale crack modeling: from micro-diffusive damage to macro-cracks, *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering.*, vol. 200, pp. 3026-3036.
- Oliver, J.; Caicedo, M.; Roubin, E.; Huespe, A.E.; Hernández, J.A. 2015. Continuum approach to computational multiscale modeling of propagating fracture. *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering*, vol. 294, pp. 384-427.
- Oliver, J.; Caicedo, M.; Roubin, E.; Hernández, J.A.; Huespe, A.E. 2014. Multi-scale (FE2) analysis of material failure in cement/aggregate-type composite structures. *Computational Modelling of Concrete Structures*, pp.39–49.
- Peric, D.; De Souza Neto E. A.; Feijóo, R. Partovi, M.; Molina, A. C. 2011. On micro-to-macro transitions for multiscale analysis of heterogeneous materials: unified variational basis and finite element implementation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Swansea, vol. 87, n.1-5, pp.149–170,
- Pituba, J. J. C., Fernandes, G. R. Souza Neto, E. A. 2016. Modelling of cohesive fracture and plasticity processes in composite microstructures, *Journal of Engineering Mechanics*, in review process.

Pituba, J. J. C.; De Souza Neto, E. A. 2015. Modeling of unilateral effect in brittle materials by a mesoscopic scale approach. *Journal Computers and Concrete*, vol. 15, n. 5, pp. 735-758.

Rodrigues, E. A.; Manzoli, O. L.; Bitencourt Jr., L. A. G.; Bittencourt. T. N. 2016. 2D mesoscale model for concrete based on the use of interface element with a high aspect ratio. *International Journal of Solids and Structures*. vol. 94-95, pp. 112–124.

de Souza Neto, E. A.; Feijóo, R. A. 2006. Variational foundations of multi-scale constitutive models of solid: small and large strain kinematical formulation. *National Laboratory for Scientific Computing (LNCC/MCT)*, Brazil, Swansea. [s.e], 53 p.