

Título: Simulação numérica por elementos finitos do comportamento mecânico de betão de agregados reciclados À mesoescala

Nome: Qifan Ren

Doutoramento em Engenharia Civil

Orientador: Doutor Jorge Manuel Calião Lopes de Brito

Co-orientador: Doutor João Nuno Noronha Ramos Vigário Pacheco

Resumo

A modelação numérica à mesoescala é uma ferramenta eficiente em termos de tempo e custo para otimizar a composição de misturas de betão e analisar as causas fenomenológicas da rotura mecânica. No entanto, falta um modelo completo para representar a mesoestrutura do betão de agregados reciclados (BAR) e permitir compreender o comportamento do BAR à mesoescala.

Esta tese de doutoramento desenvolve uma ferramenta numérica para avaliar o comportamento mecânico de BAR, bem como para investigar o comportamento mecânico de BAR com diferentes combinações de matérias-primas e composições. A investigação foi conduzida em três vertentes: (1) geração e calibração do modelo de mesoestrutura de provetes de betão. O estudo desenvolve o método de geração e separação para construir com eficiência e precisão o modelo mesoestrutural do elemento de betão. O modelo geométrico gerado é calibrado quanto ao formato das partículas e distribuição espacial do agregado grosso dentro da amostra de betão; (2) implementação da simulação numérica e validação da ferramenta desenvolvida na caracterização do comportamento mecânico do BAR. A modelação 2D e 3D do BAR sob carregamento quase estático é realizada e validada. A comparação dos resultados da modelação demonstra que o modelo 2D é adequado para análise paramétrica; (3) análises paramétricas dos fatores que têm influência vital no comportamento do BAR, utilizando o modelo desenvolvido. As influências desses fatores na resposta mecânica e no comportamento da fábrica são investigadas numericamente e depois comparadas com observações experimentais. A principal inovação da tese é o desenvolvimento de uma ferramenta numérica eficiente que modela com precisão as características geométricas da mesoescala de provetes de BAR, através da definição de geometria e forma de agregados e da sua colocação no interior do provete.

A dissertação mostra que a simulação numérica à mesoescala é uma ferramenta promissora para avaliação das propriedades de misturas de betão e para a análise das causas fenomenológicas da

rotura mecânica do BAR. A resistência do BAR é influenciada de forma relevante pela qualidade da argamassa e da zona de transição interfacial e o módulo de elasticidade está intimamente relacionado com o teor de agregados grossos na mistura e com o teor de agregados reciclados.

Palavras-chave: modelação à mesoescala; betão de agregados reciclados; comportamento mecânico; análise paramétrica; método dos elementos finitos.

Title: Finite element numerical simulation of the mechanical behaviour of recycled aggregate concrete at the meso-scale

Abstract

Numerical modelling at the mesoscale is a time- and cost-efficient tool to optimize concrete mix design and to analyse the phenomenological causes of mechanical failure. However, a complete model to represent the mesostructure of recycled aggregate concrete (RAC) and a comprehensive understanding of behaviour of RAC at mesoscale are still lacking.

This doctoral thesis presents a reliable numerical tool to assess the mechanical behaviour of RAC as well as to investigate the mechanical behaviour of RAC with different combinations of raw materials and mix design. The research was conducted into three progressive strands, comprising: (1) generation and calibration of the mesostructure model of concrete specimen. The study adapts the generation and separation method to efficiently and accurately construct the mesostructural model of concrete element. The generated geometric model is calibrated regarding particle shape and spatial distribution of coarse aggregate within the concrete specimen; (2) implementation of the numerical simulation and validation of the developed tool in characterizing mechanical behaviour of RAC. Both 2D and 3D modelling of RAC under quasistatic loading are carried out and validated. The comparison of the modelled outcomes demonstrates the 2D model is suitable for parametric analysis and is computationally efficient; (3) parametric analyses of the factors that have vital influence on the behaviour of RAC, using the model developed. The influences of these factors on the mechanical response and failure behaviour are numerically investigated, and then benchmarked with experimental observations. The main innovation of the thesis is the development of an efficient numerical tool that accurately models the mesoscale geometric characteristics of concrete specimens, namely by defining aggregate shape and size and placing them within the boundaries of the concrete specimen.

The thesis shows that numerical simulation at the mesoscale is a promising tool for assessment of the properties of concrete mix designs and for the analysis of the phenomenological causes of mechanical failure of RAC. The strength of RAC is relevantly influenced by the quality of mortar and interfacial transition zone, and the modulus of elasticity is closely related to content of coarse aggregates in a mix and incorporation ratio of recycled aggregates.

Keywords: mesoscale modelling; recycled aggregate concrete; mechanical behaviour; parametric analysis; finite element method.

Título: Simulação numérica por elementos finitos do comportamento mecânico de betão de agregados reciclados À mesoescala

Resumo alargado em Português

Os ensaios laboratoriais tradicionais têm dificuldade em identificar o mecanismo de rotura e o padrão de propagação de microfissuras através das diferentes fases do betão e são propensos a dispersão devido à heterogeneidade e comportamento quase-frágil do betão. O betão com agregados reciclados (BAR) é um material compósito artificial multifásico, composto por uma matriz cimentícia, agregados naturais e reciclados e zonas de transição interfacial (ITZ) entre os agregados e a matriz de cimento. As misturas de betão podem ser projetadas com diferentes combinações de matérias-primas e os agregados reciclados (AR) podem ser produzidos a partir de resíduos de natureza variada. Devido à preponderância destes factores, variáveis, nas propriedades do betão, os programas experimentais tradicionais necessitam de quantidades significativas de tempo e recursos para otimizar uma composição de BAR.

A modelação numérica à mesoescala é uma ferramenta eficiente em termos de tempo e custo para: (1) avaliar preliminarmente as propriedades de composições de betão com vários tipos de ligantes, agregados e adjuvantes/adições; (2) simular explicitamente o padrão de fendilhação, deformações, e dano; (3) analisar as causas fenomenológicas da rotura mecânica, permitindo compreender os factores condicionantes para a rotura (por exemplo, se a resistência é limitada pelo agregado ou pela matriz de cimento).

Na última década surgiram vários estudos sobre a modelação de betão à mesoescala. Contudo, a eficiência dos algoritmos utilizados não é otimizada e alguns fenómenos associados à geometria da mesoestrutura do betão, como o efeito de parede, são modelados de forma pragmática e sem validação experimental. Em paralelo, existe um número muito limitado de estudos sobre a modelação da mesoestrutura de BAR. A simulação numérica de BAR permitirá a compreensão abrangente do comportamento do BAR à mesoescala, identificando as condições para a incorporação e AR limitar o comportamento do betão. Enumerando: (1) os métodos atuais de modelação da mesoestrutura do betão não são suficientemente eficientes e precisos; (2) alguns fenómenos físicos (por exemplo, o efeito de parede) não são contabilizados no modelo geométrico do betão; (3) a representação da mesoestrutura do BAR é bastante simplificada pelos autores devido a dificuldades de implementação e eficiência computacional; (4) não existem análises paramétricas abrangentes, realizadas através da modelação numérica da mesoestrutura de BAR, sobre as propriedades de BAR.

Esta tese de doutoramento apresenta uma ferramenta numérica robusta que avalia o comportamento mecânico de BAR com diferentes combinações de matérias-primas. As principais contribuições desta tese residem em (1) um programa eficiente e preciso que pode construir a mesoestrutura do espécime BAR análoga à real; (2) avaliações das propriedades mecânicas do BAR com diferentes combinações de propriedades de fase e projeto de mistura, bem como seus efeitos relativos. A investigação foi conduzida em três vertentes consecutivas, compreendendo: (1) a geração e calibração do modelo de mesoestrutura do betão. (2) a implementação da simulação numérica e validação da ferramenta desenvolvida na caracterização do comportamento mecânico do BAR; (3) análises paramétricas para avaliar que parâmetros da composição do betão (no que se refere a dosagens e qualidade das matérias-primas) são mais relevantes para o comportamento de BAR. A tese está organizada em oito capítulos para abordar progressivamente as três vertentes:

- o Capítulo 1 apresenta a motivação para a tese. Os seus objetivos gerais são apresentados e as respectivas tarefas subdivididas. Este capítulo também a metodologia;
- o Capítulo 2 revê os procedimentos utilizados para a modelação à mesoescala do comportamento mecânico de BAR e constitui um guia a para implementação da modelação nos capítulos subsequentes. Os parâmetros relevantes para a modelação do betão à mesoescala são identificados. O capítulo revê diferentes estratégias e métodos para a geração de fases mesoscópicas, bem como as técnicas utilizadas para calibração do modelo geométrico. A resposta do material e as propriedades das fases mesoscópicas, a discretização da geometria e as condições de fronteira utilizadas nos estudos relativos à modelação à mesoescala do betão são revistas;
- o Capítulo 3 desenvolve um novo método de geração e separação que pode construir, de forma eficiente e precisa, o modelo mesoestrutural de um elemento de betão de forma aleatória. A base teórica das técnicas de modelação e todos os procedimentos do método proposto são apresentados. Este capítulo demonstra a aplicação do método proposto para provetes cúbicas e cilíndricas, e os modelos gerados são comparados com os métodos de geração da mesoestrutura considerados como os mais relevantes do estado da arte;
- o Capítulo 4 apresenta a calibração do modelo geométrico. As dimensões do agregado são refinadas através de extensa campanha experimental que permitiu fundamentar a modelação das dimensões segundo distribuições probabilísticas (a dimensão dos agregados foi modelada com uma distribuição Lognormal, enquanto que a esbelteza e alongamento foram-no segundo a distribuição de Weibull). Posteriormente, um programa experimental é utilizado para calibração da distribuição espacial de agregados grossos com base na técnica

de processamento de imagem e através de campanha experimental concebida para o efeito. É definido um procedimento para medir a distância e o diâmetro das partículas de agregado relevantes para o efeito de parede, tendo essas medições sido utilizadas para a calibração do efeito de parede. Finalmente, o modelo geométrico refinado (após calibração) do betão é validado, através da comparação da geometria gerada pelo modelo com a geometria de amostras de betão;

- o Capítulo 5 trata da modelação 2D do BAR. Primeiramente, é desenvolvido um modelo que combina quatro tipos de geometria simplificada de argamassa aderida para representar a mesoestrutura do BAR. Em seguida, o modelo numérico é validado tanto em tensão quanto em compressão, comparando os resultados do modelo numérico com as previsões de regulamentos. Os resultados são discutidos e compara-se o padrão de rotura da simulação e dos ensaios. Finalmente, o efeito da geometria da argamassa aderida nas propriedades mecânicas do BAR é analisado comparando os resultados entre este modelo e o que contém um único tipo de geometria dos AR;
- o Capítulo 6 desenvolve um modelo numérico tridimensional para a modelação de BAR e compara-o com os resultados do modelo 2D. O modelo numérico 3D é utilizado para simular o comportamento do betão sob compressão uniaxial, tração uniaxial e tração por compressão diametral. Posteriormente, a resposta mecânica e o comportamento de rotura de cada fase mesoscópica são analisados em relação à resposta global do BAR. A seguir, a resposta mecânica dos modelos 3D e 2D sob carregamento uniaxial é comparada, validando a viabilidade do modelo 2D para modelação do BAR. Finalmente, o comportamento mecânico da provete de BAR sob tração uniaxial e por compressão diametral é comparado e a relação entre a resistência à tração uniaxial e por compressão diametral é estabelecida;
- o Capítulo 7 apresenta as análises paramétricas com base no modelo 2D desenvolvido no Capítulo 5. O capítulo identifica os principais fatores que influenciam o comportamento do BAR - forma das partículas de AR, conteúdo de AR, conteúdo da argamassa aderida, teor de incorporação de RA, qualidade da fração de pedra presente no AR, qualidade da argamassa (argamassa aderida e argamassa nova) presente no AR e qualidade da ITZ. Cada parâmetro é tratado de forma independente numa seção individual. Em cada análise, (1) é revisto o seu efeito no comportamento do BAR; (2) o intervalo do parâmetro utilizado para modelação é determinado com base na revisão da literatura e nas composições típicos de betão; (3) o comportamento mecânico sob carga uniaxial de compressão e tração é modelado e analisado para BAR com diferentes parâmetros; (4) os resultados modelados são comparados e discutidos em relação às observações experimentais. Este capítulo termina com uma análise geral sobre os efeitos relativos dos parâmetros nas propriedades mecânicas do BAR. Os

parâmetros relevantes são identificados para facilitar o desenvolvimento de uma composição de BAR;

- o Capítulo 8 resume o trabalho realizado e os resultados globais da investigação em relação aos objetivos da investigação. São apresentadas as principais contribuições científicas e as publicações em revista resultantes. As limitações do estudo e sugestões para desenvolvimento futuro são finalmente discutidas.

A tese mostra que o método de geração e separação desenvolvido no âmbito da tese e apresentado neste documento melhora a eficiência da modelação da mesoestrutura do betão, tendo alta precisão em comparação com os métodos utilizados por outros investigadores. Os modelos geométricos refinados usando o método proposto são representativos de composições realistas em relação à distribuição de número, conteúdo e localização de partículas nas seções analisadas.

Foi demonstrado que os modelos 2D e 3D são representativos da curva completa da resposta tensão-deformação uniaxial e do padrão de rotura do BAR em comparação com o betão de referência baseado no Model Code (2010), tanto à compressão como à tensão. A modelação 2D é adequada para estudos paramétricos, enquanto a modelação 3D é adequada para o estudo detalhado da evolução do dano. Além disso, constatou-se que o comportamento global dos elementos de betão permanece elástico, independentemente do desenvolvimento da rotura na ITZ e na argamassa de AR aderida até que o dano se propague para a nova matriz de argamassa.

As análises paramétricas mostram que (1) para melhorar o desempenho mecânico, o desenvolvimento da composição de betão deve-se focar na qualidade do AR utilizado, pois garantir que a qualidade da argamassa aderida ao AR e da sua própria ITZ são determinantes para que as propriedades mecânicas do betão não sejam condicionadas pela incorporação de AR. O uso de AR com rigidez semelhante entre a argamassa aderida e a rocha natural presente no AR é uma forma adicional de aumentar a resistência à tração, pois limita a concentração de tensões; (2) o desempenho à tração do betão é mais afectado caso o AR tenha partículas alongadas, conteúdo elevado de argamassa aderida, AR com presença de rocha de rigidez elevada e má qualidade da argamassa ou ITZ aderida ao AR; (3) a rigidez do BAR é consideravelmente influenciada pelo teor de agregados grossos ou pela incorporação de partículas de AR.

Palavras chave: modelação à mesoescala; betão de agregados reciclados; comportamento mecânico; análise paramétrica; método dos elementos finitos.