



MODELAGEM GEOMÉTRICA E ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO LEVE

Amanda da Silva Franck Alves

Rômulo Murucci Oliveira

amanda.franck@ice.ufjf.br

romulo.murucci@engenharia.ufjf.br

Faculdade de Engenharia - Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

Rua José Lourenço Kelmer, s/n - Campus Universitário, Bairro São Pedro, 36036-900, Minas Gerais, Juiz de Fora, Brasil

Flávia de Souza Bastos

Flavio de Souza Barbosa

Michèle Cristina Resende Farage

flavia.bastos@ufjf.edu.br

flavio.barbosa@ufjf.edu.br

michele.farage@ufjf.edu.br

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional - UFJF

Rua José Lourenço Kelmer, s/n - Campus Universitário, Bairro São Pedro, 36036-900, Minas Gerais, Juiz de Fora, Brasil

Resumo. Concretos de agregados leves, compostos por argamassa e agregados leves, são utilizados na construção civil mundialmente. Dentre as vantagens de sua utilização, as principais são peso próprio reduzido e isolamento térmico e acústico. Contudo, devido as propriedades de seus agregados, prever seu comportamento mecânico é um grande desafio. Assim sendo, foi elaborado um código em Matlab® possibilitando modelar computacionalmente corpos de prova de concreto leve levando em consideração suas propriedades para posteriormente analisar seu comportamento mecânico via programa de elementos finitos, o Abaqus®. Para estas análises foram utilizadas as propriedades mecânicas dos agregados leves que foram previstas como consequência de resultados experimentais do módulo de elasticidade do concreto. Tal previsão se deu partir de estudos prévios quando se utilizaram processos de identificação inversa para a previsão do módulo de elasticidade dos agregados leves. Quando os valores numéricos obtidos através das análises são comparados com valores experimentais é possível notar que o modelo simulado obteve aproximação razoável mantendo a integridade do comportamento do material. Os autores agradecem à FAPEMIG, CAPES, CNPq e UFJF pelo apoio na forma de bolsas e financiamento de projetos de pesquisa.

Palavras-chave: concreto leve, modelagem geométrica, modelagem computacional, elementos finitos, resistência.

1 INTRODUÇÃO

O material mais utilizado na construção civil mundialmente é o concreto. O concreto leve, obtido trocando-se total ou parcialmente os agregados normais por agregados leves, possui resistência à compressão superior a 17MPa ao vigésimo oitavo dia (ACI 213R-87, 1999) e massa específica seca de até 2000Kg/m³ (ABNT NBR 8953:2009, 2011). Apesar de possuir um reduzido módulo de elasticidade e restrições nos ensaios de determinação de suas propriedades, esse material é reconhecido pelo seu reduzido peso específico e capacidade de isolamento térmico e acústico. Além disso, possui baixa expansibilidade térmica, o que contribui para a diminuição de custos com transporte e montagem (Rossignolo & Agnesini, 2011) e, consequentemente, para a redução do impacto ambiental como um todo.

Certas características dos agregados leves, se comparados aos agregados de peso normal, como densidade, porosidade e absorção de água acarretam a diminuição da resistência à compressão, influenciando o desempenho mecânico do concreto leve (Ke, Beaucour, Ortola, Dumontet, & Cabrillac, 2009).

De acordo com Ke, et al. (2014) sabe-se que as propriedades mecânicas deste tipo de agregado são difíceis de medir, uma vez que os grãos não são fáceis de serem cortados e são geralmente esmagados. Esses autores têm utilizado um conjunto de métodos para descrever e formular as características geométricas do agregado leve, levando em conta a massa específica do produto final, a variação da massa específica do agregado leve em função de sua dimensão, a absorção de água e a influência das características particulares dos agregados.

Em seus estudos, foram ensaiados corpos de prova de concreto leve utilizando três matrizes de argamassa com resistências diferenciadas: M8 – desempenho normal, M9 – alto desempenho e M10 – altíssimo desempenho; quatro porcentagens volumétricas de agregados em relação à matriz de argamassa (pa): 12.5%, 25%, 37.5% e 45%; e seis tipos de agregados leves: 4/10 430 A, 4/10 520 S, 4/10 550 A, 0/4 650 A, 4/10 675 S e 4/8 750 S, no qual a denominação corresponde, respectivamente, aos diâmetros característicos menor e maior (d/D), à massa específica aparente (kg/m^3) e ao tipo de agregado – “A” para argila expandida e “S” para xisto expandido.

Através de uma abordagem inversa de homogeneização melhorada por um processo iterativo de modelagem micromecânica, eles estimaram a resistência à compressão e módulo de elasticidade dos agregados, alegando ter encontrado resultados mais precisos do que os obtidos por relações empíricas. Com o objetivo de contribuir para a validação desta técnica, neste trabalho, será utilizada a modelagem computacional de corpos de prova de concreto leve. Ao utilizarmos como entrada de dados as propriedades conhecidas de argamassa e as estimadas por eles para os agregados, espera-se obter como saída de dados as propriedades para o corpo de prova semelhantes às dos ensaios experimentais originais.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo criar um modelo computacional parametrizado de corpos de prova de concreto leve com o qual se possa verificar a resistência à compressão dos agregados, estimada através de métodos inversos, bem como avaliar a influência da distribuição granulométrica e porcentagem de agregados no comportamento do corpo de prova de concreto leve.

3 MÉTODOS

Partiu-se de um código pré-existente desenvolvido em Matlab® elaborado para gerar os modelos geométricos, o que incluía procedimentos de cálculo vetorial, geometria analítica e descritiva. Para esse código, primeiramente foi gerada uma interface gráfica parametrizada que possibilita ao usuário alterar os dados de entrada e, na sequência, um *script* escrito em *Python*, para a geração de um modelo em elementos finitos integrado ao Abaqus®. Com isso, vários modelos bi-dimensionais planos, que representam a seção retangular longitudinal dos corpos de prova, foram gerados automaticamente, variando a distribuição granulométrica dos agregados, a porcentagem de agregados em relação ao volume do corpo de prova, e o tipo de argamassa.

Nestes modelos foram utilizados os valores do trabalho de referência (Ke, et al., 2014) e (Ke, et al., 2010). A Fig. 1 mostra a distribuição granulométrica dos agregados utilizados, enquanto que as Tabelas 1 e 2 apresentam os valores de módulo de Young e a Resistência à Compressão do agregado, inferidos, e da argamassa, medidos, respectivamente. O valor do Coeficiente de Poisson, tanto para a argamassa quanto para o agregado, foi adotado como 0.2.

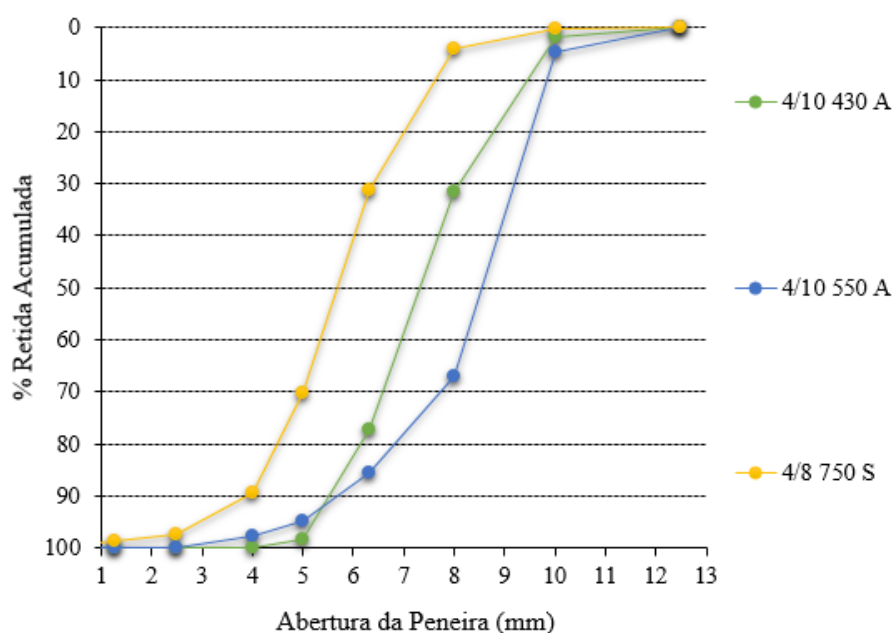


Figura 1. Distribuição granulométrica dos agregados utilizados (Ke, 2008).

Tabela 1. Propriedades do Agregado (Ke, Ortola, Beaucour, & Dumontet, 2014).

Agregado	E_a (MPa)	f_a (MPa)
4/10 430 A	7,183	16.3
4/10 550 A	8,030	18.3
4/8 750 S	20,273	37.4

Tabela 2. Propriedades da Argamassa (Ke, Ortola, Beaucour, & Dumontet, 2014).

Matriz	Desempenho	E_m (MPa)	f_m (MPa)
M8	Normal	28,600	40.2
M9	Alto	33,200	64.2
M10	Altíssimo	35,400	86.0

3.1 Interface Gráfica Interativa

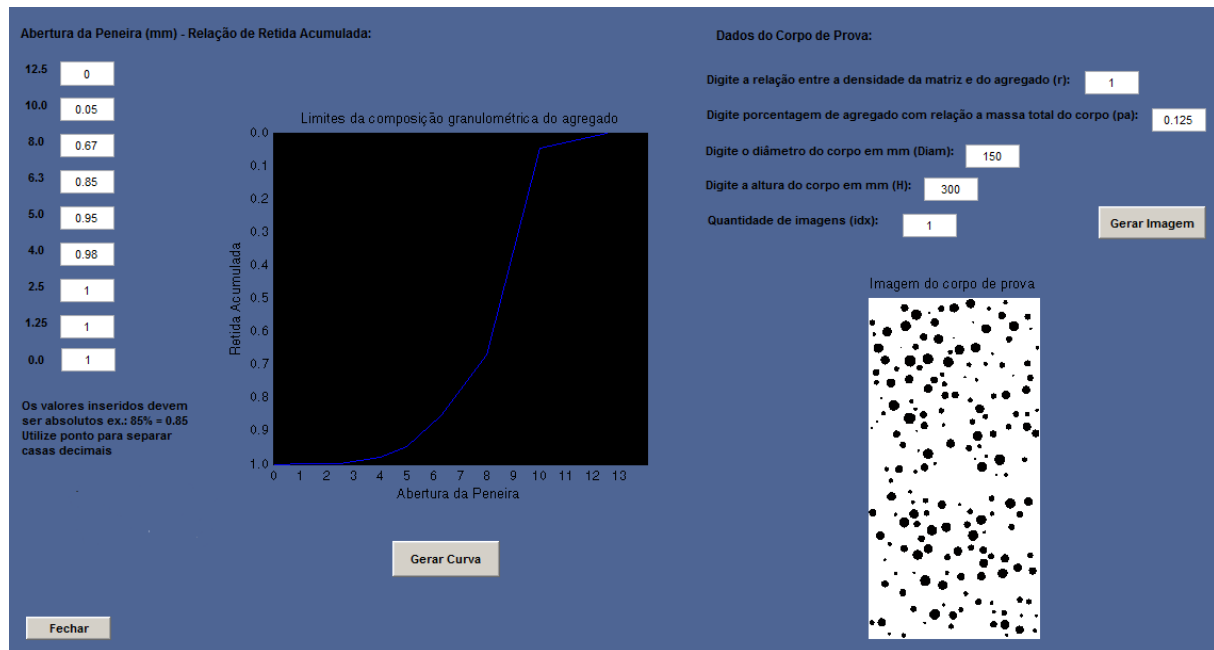


Figura 2. Interface gráfica (Acervo próprio).

Com a interface gráfica interativa é possível inserir os dados granulométricos do agregado, a partir do valor da porcentagem retida acumulada de cada peneira, e visualizar a curva granulométrica no gráfico “Abertura da Peneira versus Retida Acumulada”, através do botão “Gerar Curva”.

Podem ser preenchidos outros cinco dados do corpo de prova: a relação entre a densidade da matriz de argamassa e a densidade do agregado (r), a porcentagem de agregado em relação ao volume total do corpo de prova (pa - em valores absolutos), o diâmetro do corpo de prova ($Diam$), a altura do corpo de prova (H) e a quantidade de imagens geradas (idx). Após inserir a composição granulométrica do agregado e os dados do corpo de prova, o botão “Gerar Imagem” fornece uma imagem ilustrativa do modelo.

3.2 Modelagem Geométrica dos Corpos de Prova

Para a modelagem geométrica dos corpos de prova, foi desenvolvido um código em Matlab® que recebe como parâmetros de entrada os dados granulométricos do agregado e os dados do corpo de prova, tais como “ r ”, “ pa ”, “ $Diam$ ”, “ H ” e “ idx ”, preenchidos na interface gráfica (seção 3.1).

Armazenam-se os dados da curva granulométrica em um vetor de acordo com a distribuição das peneiras, obtendo-se assim a porcentagem de agregados passantes. Os agregados são adotados como esféricos e imersos na argamassa. Calculam-se os diâmetros médios e as porcentagens médias dos agregados passantes, além do volume total do sólido, o volume total dos agregados presentes no mesmo, e o volume de cada agregado.

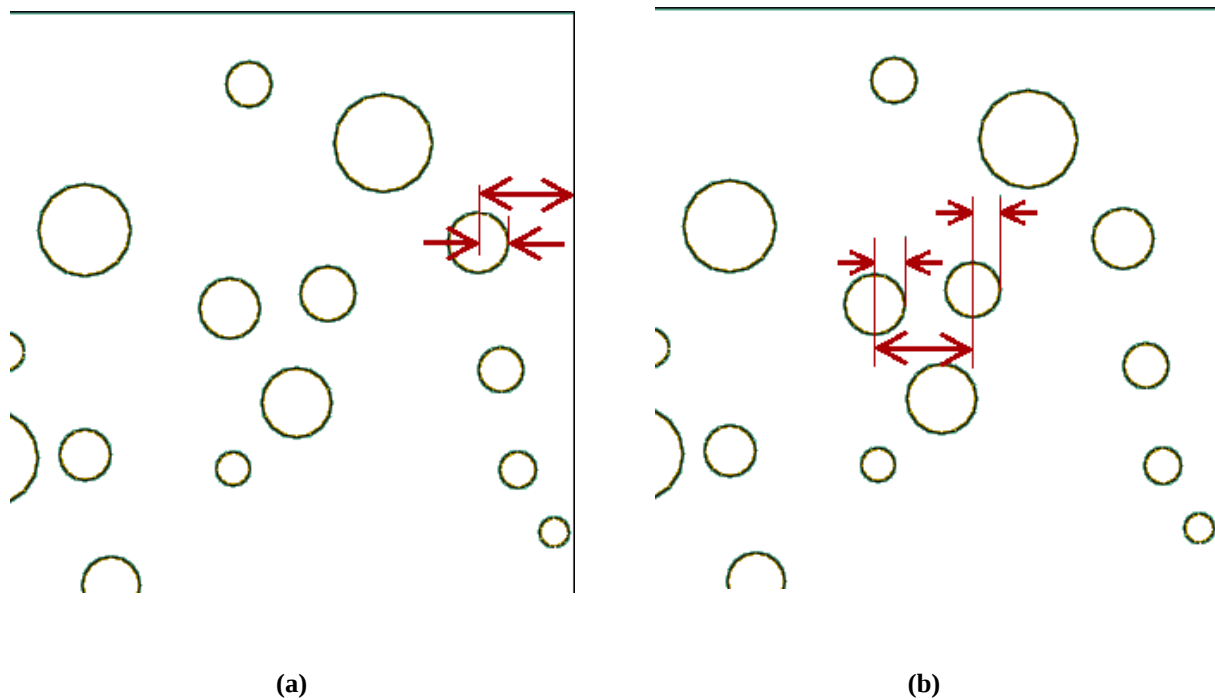


Figura 3. (a) Verificação se o agregado não está ultrapassando os limites do corpo de prova; (b) Verificação se a distância entre os centros de dois agregados é maior do que a soma dos raios das mesmas (Acervo próprio).

Dentro de um laço de repetição, o código seleciona valores aleatórios para o diâmetro e a posição de cada circunferência e verifica se o agregado está dentro do corpo de prova, pela análise da distância do agregado em relação às arestas do retângulo da seção do corpo de prova (Fig. 3 (a)).

Em seguida o código verifica se há penetração entre os agregados (Fig. 3 (b)), calculando a distância entre os centros de todos os agregados já alocados e o agregado da tentativa. À medida que as tentativas são aceitas, suas informações são armazenadas em vetores para a geração da imagem do corpo de prova com os agregados finais.

3.3 Modelagem Mecânica dos Corpos de Prova

O código em Matlab® lê os resultados finais dos vetores com as informações geométricas do corpo de prova e imprime um algoritmo em *Python* contendo os comandos capazes de gerar um modelo mecânico bidimensional em elementos finitos, integrado ao Abaqus®, no qual o concreto leve foi assumido como um meio bifásico, composto de argamassa e agregado leve como pode ser visualizado na Fig. 4. Este *script* tem a formatação requerida dos arquivos do tipo *journal* (.jnl) do Abaqus®, que normalmente são criados no momento de salvamento de um arquivo do tipo “CAE”.

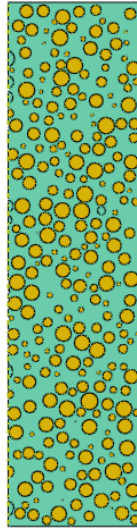


Figura 4. Modelo de concreto leve: argamassa em azul e agregado leve em amarelo (Acervo próprio).

Devido à sua simetria, o modelo tem dimensões de 7,5x30cm, metade da seção longitudinal. Para o comportamento de ambos os materiais foi adotado um modelo elasto-plástico com endurecimento isotrópico com critério de ruptura de von Mises.

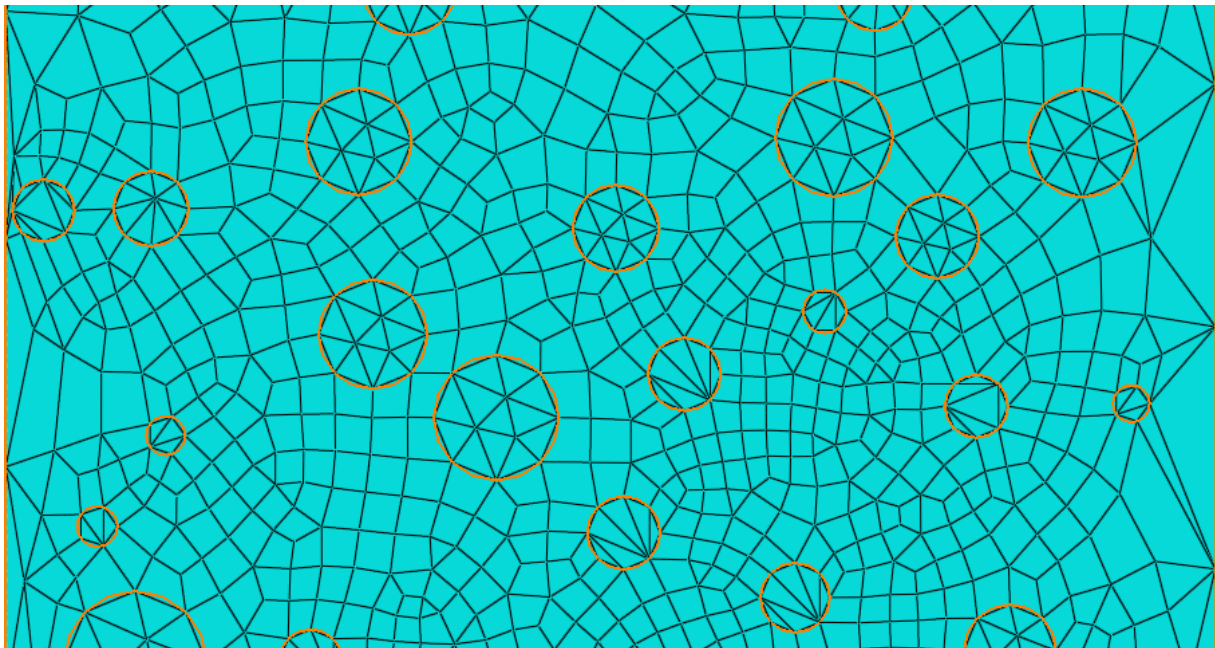


Figura 5. Detalhe das malhas: elementos quadrangulares para a argamassa e triangulares para os agregados (Acervo próprio).

Em relação à malha, foram utilizados elementos triangulares para os agregados, já que esses se adaptam melhor à geometria circular, e quadrangulares para o restante da seção constituída de argamassa (Fig. 5). Utilizou-se o recurso de distribuição de nós de elementos nas arestas da seção longitudinal e também nas circunferências dos agregados, cujo tamanho característico de elemento foi selecionado em função do raio dos mesmos.

Condições de contorno do tipo axissimétricas foram definidas na aresta que representa o eixo longitudinal do corpo-de-prova, já que o modelo representa metade da seção, e do tipo de deslocamento totalmente impedido (engaste) na base. Para o topo foi prescrito um deslocamento descendente, simulando um ensaio de compressão do corpo de prova de concreto leve. São gerados como saída de dados os históricos das forças de reação de todos os nós da base em função do deslocamento imposto.

Foram gerados modelos variando o tipo de agregado (Fig. 1), a quantidade de agregados em relação ao volume do corpo de prova (pa) e a matriz de argamassa (M8, M9 e M10), totalizando 27 modelos diferentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O procedimento escolhido para análise dos resultados (Fig. 6) envolveu a resultante das forças de reação de todos os nós da base e a divisão desta força resultante pela área da seção transversal, obtendo-se um análogo à tensão de compressão do corpo de prova. Desta forma, pode-se obter um gráfico de “Tensão versus Deformação”, através da qual se extraiu a resistência à compressão do modelo em estudo.

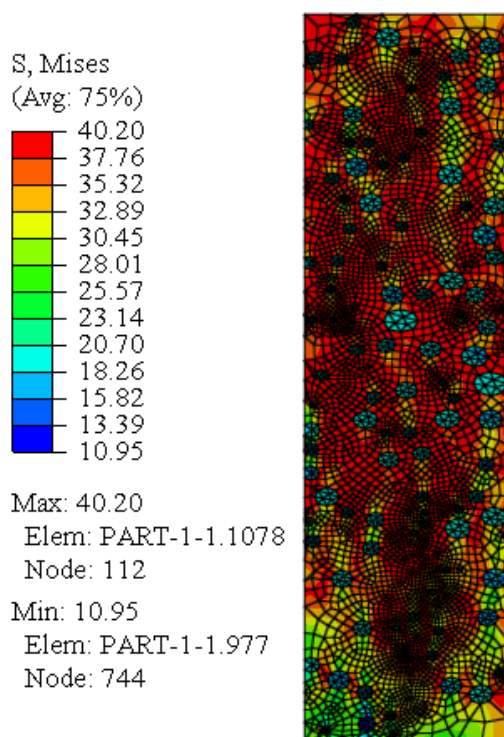


Figura 6. Análise de tensões pelo Método de Elementos Finitos (Acervo próprio).

Os resultados de resistência à compressão do corpo de prova obtidos para cada um dos 27 modelos constam nas Fig. 7 e 8, para as quais as indicações “sim” e “exp” referem-se aos valores simulados e experimentais, respectivamente.

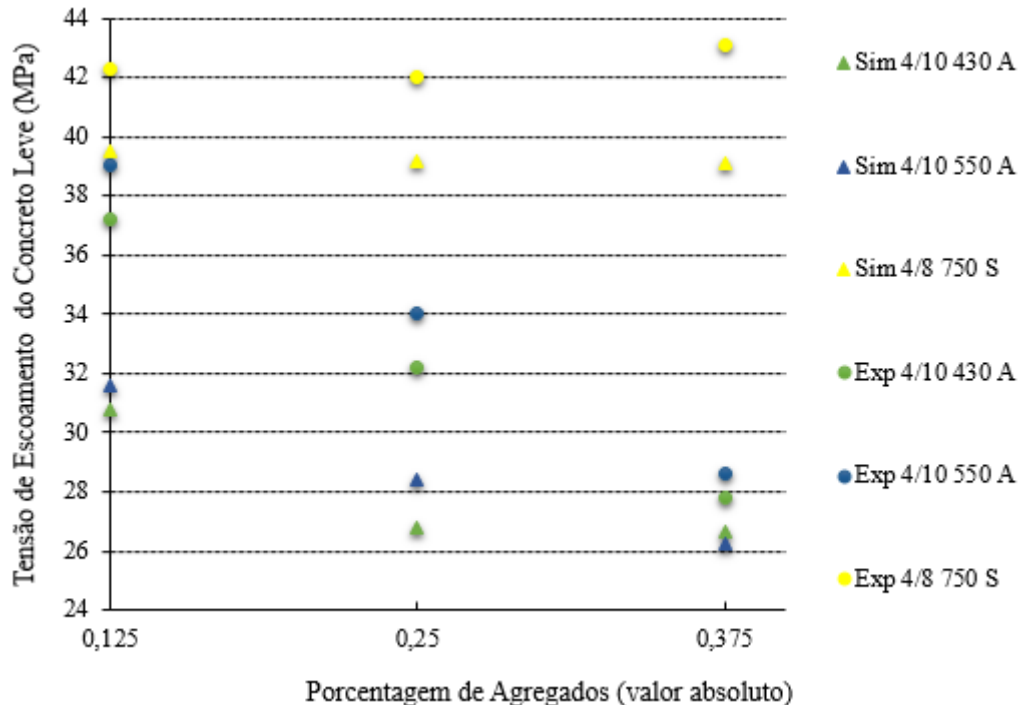


Figura 7. Gráfico da resistência à compressão (MPa) do concreto leve com argamassa M8 (Acervo próprio).

Como se pode ver na Fig. 7 em ambas as análises, experimental e numérica, obtém-se maior resistência do concreto com a utilização de agregados de xisto, seguido dos dois tipos de agregados de argila. Na análise experimental, foi verificado que para os dois agregados de argila a resistência do concreto se reduz com o aumento da porcentagem de agregado, enquanto que para o agregado de xisto, a influência da porcentagem na resistência do concreto é bem menor. Tais comportamentos condizem com os observados nos resultados numéricos.

Este comportamento linear decrescente da resistência à compressão do concreto ao se acrescentar a quantidade de agregados ocorre porque a argamassa é o elemento estrutural mais solicitado. Os concretos que possuem agregados de maior massa específica, ou de menor dimensão (materiais finos), apresentam maior resistência, afinal como a argamassa é mais resistente, quanto maior a quantidade desta mais resistente o modelo será.

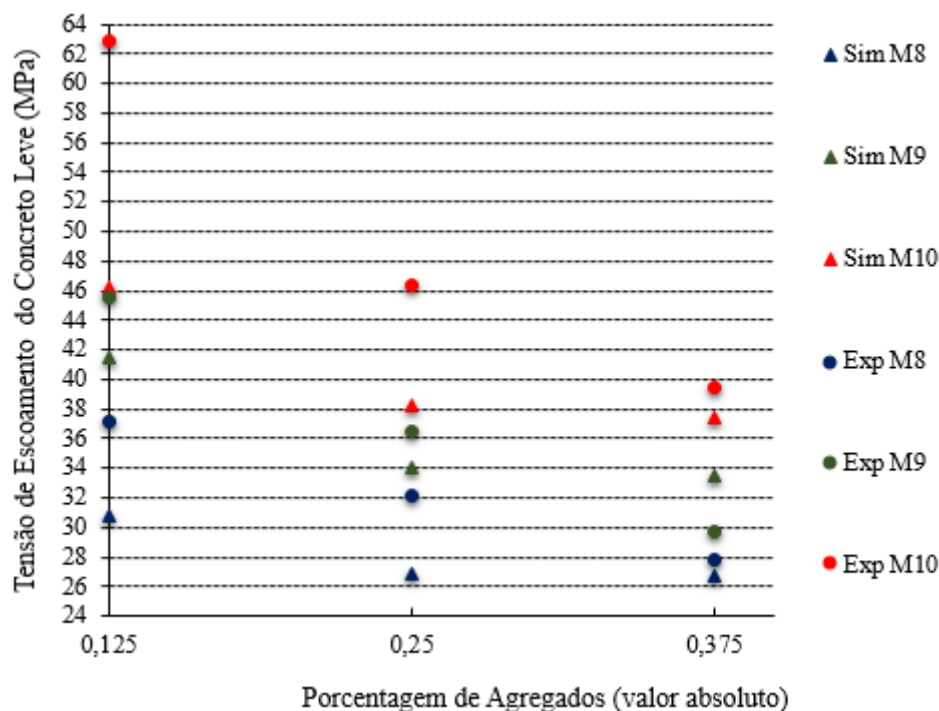


Figura 8. Gráfico da resistência à compressão (MPa) do concreto leve com agregado 4/10 430 A (Acervo próprio).

A Fig. 8 mostra que para os três tipos de argamassas testadas experimentalmente a resistência do concreto se reduz com o aumento da porcentagem dos agregados. Já a análise numérica mostrou que tal influência é maior para a primeira faixa de aumento de porcentagem, uma vez que o resultado para as duas últimas porcentagens é praticamente constante. Em ambas as análises, experimental e numérica, observou-se maior resistência do concreto para as matrizes de argamassa de maior desempenho, independentemente do tipo de agregado.

5 CONCLUSÕES

Comparando os valores simulados com os valores experimentais, nota-se que o modelo simulado obteve aproximações satisfatórias, além de manter a integridade do comportamento do material.

Ao se avaliar a Fig. 7, nota-se que os resultados simulados foram razoáveis em comparação com os valores experimentais, com média de erro percentual de 14%. A maior diferença é visível para o primeiro ponto da curva do agregado 4/10 550 A, com uma resistência inesperada muito baixa, com erro percentual de 20%.

A Fig. 8 revela que os resultados obtidos também foram razoáveis em comparação com os experimentais, com erro percentual médio de 13%, apesar do comportamento inesperado para o primeiro ponto da curva de argamassa M10.

Algumas limitações inerentes do modelo podem levar a resultados imperfeitos ou não esperados. Algumas das seguintes considerações têm efeito negativo nos resultados obtidos:

- a) Os agregados, por mais próximos que sejam da forma esférica, possuem um formato irregular (principalmente o xisto);

- b) Foi considerada a seção retangular central (ângulo de corte de zero graus) do corpo de prova cilíndrico, para a análise das tensões, não considerando as outras seções;
- c) O modelo considera, tanto agregado como argamassa, como materiais homogêneos, o que não ocorre na prática;
- d) A alocação aleatória dos agregados na argamassa não contempla situações reais, como concentração ou segregação;
- e) Na realidade, a interface entre o agregado e a argamassa apresenta características complexas e uma tênue zona de transição. O modelo considerou a transição de forma simples e abrupta;
- f) O modelo plástico com endurecimento isotrópico, apesar de obter bons resultados, é apenas uma aproximação, o comportamento dos materiais é muito complexo e depende de uma infinidade de fatores;
- g) Os resultados das análises dos modelos estão limitados aos dados de entrada inseridos e considerados;
- h) O Matlab® possui um tempo computacional muito elevado para gerar os modelos geométricos, portanto não foi possível gerar vários corpos de prova para o mesmo modelo com a finalidade de refinar os resultados. Pelo mesmo motivo é inviável gerar modelos com porcentagens de agregados maiores que 0.375 e utilizar agregados com curvas granulométricas mais complexas.

Logo, apesar das limitações, os resultados afirmam que o projeto cumpriu com seu objetivo, uma vez que é possível compreender a estrutura, formato e características do material em estudo.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG, CAPES (PROCAD 2013 N° da proposta 181309) e UFJF pelo apoio na forma de bolsas, financiamento de projetos de pesquisa e participação em eventos.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 8953:2009. (2011). *Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ACI 213R-87. (1999). *Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete*. American Concrete Institute.
- Ke, Y. (2008). Caractérisation du Comportement Mécanique des Bétons de Granulats Légers: Expérience et Modélisation. *Tese de Doutorado: L'Université de Cergy-Pontoise*.
- Ke, Y., Beaucour, A. L., Ortola, S., Dumontet, R., & Cabrillac, R. (2009). Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 2821-2828.
- Ke, Y., Ortola, S., Beaucour, A. L., & Dumontet, H. (2010). Identification of microstructural characteristics in lightweight aggregate concretes by micromechanical modelling including the interfacial transition zone (ITZ). *Cement and Concrete Research*, 1590-1600.

Ke, Y., Ortola, S., Beaucour, A., & Dumontet, H. (2014). Micro-stress analysis and identification of lightweight aggregate's failure strength by micromechanical modeling. *Mechanics of Materials*, 176-192.

Rossignolo, J. A., & Agnesini, M. V. (2011). Concreto Leve Estrutural. Em G. C. Iaia, *Concreto: Ciência e Tecnologia* (pp. 1532-1572). São Paulo: IBRACON.