

UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO PARA SIMULAR COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DE RESÍDUO CERÂMICO APLICADO EM CONCRETO

Julia de Souza Barcellos¹

Fabiano Roberto Santos de Lima²

Roberta Magalhães Mariano³

Resumo

Neste trabalho foi avaliado a influência da adição de resíduos de caco de cerâmica como agregados nas propriedades mecânicas de diferentes traços de concreto de cimento Portland. A adição dos resíduos ocorreu através da substituição do agregado miúdo areia em proporções de 0%, 10%, 20% e 30%. Os corpos-de-prova foram moldados segundo a NBR 7680 e curados por 7 e 28 dias. O desempenho dos traços obtidos foi avaliado através dos ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (NBR 5738) e determinação do módulo estático de elasticidade à compressão (NBR 8522). Tendo sido encontrado resultados variados em cada um dos testes físicos e mecânicos, buscou-se calcular a probabilidade de melhores e piores resultados através de simulações estocásticas a partir do método de Monte Carlo com a utilização da função de geração de números aleatórios disponibilizada no *software* Microsoft Excel®. Foi identificado que o traço de 30% de caco apresentou melhor comportamento mecânico. Os resultados obtidos com os testes mecânicos corroboraram em sua maioria a probabilidade simulada com o método.

Palavras-chave: Simulação Estocástica. Aproveitamento de Resíduos. Concreto Cimento Portland. Confiabilidade.

¹Engenheira de Produção pelo UGB/FERP.

²Mestre em Economia e Gestão Empresarial (UCAM).

³Doutora em Ciência e Tecnologia de Polímeros pela UFRJ.

USE OF THE MONTE CARLO METHOD TO SIMULATE PHYSICAL AND MECHANICAL BEHAVIOR OF CERAMIC WASTE APPLIED IN CONCRETE

Abstract

In this work the influence of the addition of ceramic clay residues as aggregates on the mechanical properties of different Portland cement concrete traits was evaluated. The addition of the residues occurred by replacing the sand aggregate in proportions of 0%, 10%, 20% and 30%. The specimens were molded according to NBR 7680 and cured for 7 and 28 days. The performance of the traces obtained was evaluated through compression tests of cylindrical specimens (NBR 5738) and determination of the static modulus of elasticity to compression (NBR 8522). Having found mixed results in each of the physical and mechanical tests, we sought to calculate the probability of better and worse results through stochastic simulations from the Monte Carlo method using the random number generation function provided in Microsoft software Excel®. It was identified that the trait of 30% of shank showed better mechanical behavior. The results obtained with the mechanical tests corroborated in the majority the simulated probability with the method.

Keywords: Stochastic Simulation. Residue Waste. Portland Cement Compositions. Reliability.

Introdução

O uso de padrões estabelecidos pela ABNT é comum para vários objetos, não excluindo deste a necessidade de padronizar os trabalhos acadêmicos, assim sendo, optamos por estabelecer este modelo, apoiado em vários aspectos das NBRs: 6028; 10520; 6023 etc, tendo por finalidade servir de base para a apresentação de artigos acadêmicos. O autor deverá utilizar este exemplo como base para a formatação do seu artigo.

A indústria e suas revoluções trouxeram muitos benefícios à sociedade. O setor industrial se tornou um dos mais importantes, já que traz consigo além de benefícios econômicos - segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2018), ela representa 21% do PIB do Brasil, mas responde por 51% das exportações, por 68% da pesquisa e desenvolvimento do setor privado e por 30% dos tributos federais - ela traz também os bens de consumo. Particularmente, a indústria cerâmica brasileira tem participação no PIB da ordem de 1,0%.

Levantamentos feitos pela Associação Nacional dos Fabricantes de Revestimentos Cerâmicos (Anfacer, 2017), apuraram que as projeções do setor do país ampliaram em 2017 cerca de 12% nas exportações e cresceu 1,5% em vendas no mercado interno. Contudo, como toda atividade realizada pelo homem gera problemas, a expansão desenfreada do setor trouxe como consequência o aumento de lixo industrial. Segundo Leripio (2004), o homem vive na sociedade do lixo, cercados totalmente por ele, mas só recentemente parou-se para perceber este triste aspecto da realidade. Danos que levarão séculos para que possam ser reparados, mudanças climáticas, poluição de rios, lagos e solo vêm se tornando comuns.

O cuidado com o meio ambiente passou a ser cada vez mais uma preocupação mundial, visto que a degradação do mesmo vem trazendo transtornos cada vez mais grandiosos à sociedade. Seguir as legislações ambientais e normas, como a ISO 14000, que determinam diretrizes para a prática da gestão ambiental são atitudes que as indústrias, responsáveis por grande parte dessa degradação, vêm tomando. As empresas que funcionam sem a licença ambiental estão sujeitas às sanções previstas em lei, incluindo as punições relacionadas na Lei de Crimes Ambientais, instituída em 1998: advertências, multas, embargos, paralisação temporária ou definitiva das atividades (SEBRAE, 2008).

O remodelamento feito por elas para atender as exigências e fazer o descarte dos resíduos de forma correta geram custos elevados, fazendo com que seja pensado formas de economizar e otimizar os processos, investindo em estudos e

formas de reaproveitamento dos resíduos - segundo a Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes (ABETRE, 2016) há empresas que chegam a 100% de reaproveitamento, conseguindo uma economia considerável e com redução de até 30% nos custos. Além disso, tornar a empresa socioambiental gera um ganho com a imagem pública e conseqüentemente mídia espontânea. Os resíduos das indústrias, que hoje são coletados por empresas terceirizadas e destinados aos aterros sanitários, podem gerar ganhos a elas uma vez que os resíduos sejam utilizados como parte da matéria prima dos produtos, diminuindo os custos para o descarte e de matérias primas.

Este artigo apresenta um estudo dos resíduos de uma indústria cerâmica, situada no distrito Industrial de Queimados, dando ênfase a análise probabilística de resultados. Foram realizadas simulações estocásticas de resultados a partir de resultados de testes físicos e mecânico dos rejeitos aplicados em traços de cimento Portland já existentes. As simulações foram executadas através da função de geração de números aleatórios disponibilizada no *software* Microsoft Excel® para encontrar possíveis resultados de testes utilizando composições puras, com 10%, 20% e 30% de resíduos. Com a simulação foi possível calcular a probabilidade de melhores e piores resultados comparando-os com os testes reais. Isto permitiu a obtenção de uma maior confiabilidade nos resultados anteriormente obtidos.

Referencial teórico

Lopes (2006) deixa explícito o fato de que o lixo Industrial vem se tornando cada vez mais perigoso. Antes a maior parte do resíduo era orgânico, mas com o avanço tecnológico e a diminuição da vida útil de cada produto, foi obtido um aumento de resíduos poluidores dos mais diversos tipos, como polímeros, aço, cerâmica, componentes químicos e etc. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2016) foram

coletados cerca de 71,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos no Brasil, sendo cerca de 42% destinados a lixões que não possuem a gestão necessária para que não seja causado dano ao meio ambiente. Uma forma de dizimar os danos ambientais é reduzindo a quantidade de rejeitos que se encaminham a esses lixões.

Lucas e Benatti (2008) afirmam que o desenvolvimento de estudos de reutilização ou reciclagem de resíduos são capazes de promover mudança na utilização de matérias primas, substituindo parte da matéria prima convencional por resíduos. A indústria cerâmica é capaz de fazer esse tipo de mudança, visto que possuem composições heterogêneas e uma produção em grande escala, permitindo assim a incorporação de resíduos industriais.

Paixão et al. (2011) mostram que resíduos industriais podem ser usados como agregados alternativos em composições e podem ser compostos de resíduos cerâmicos, este que tem perda de 3% de toda produção nacional. Medeiros (2016) conclui que a utilização de 30% de resíduo cerâmico em substituição ao agregado miúdo tradicional na composição do concreto apresenta características mecânicas positivas, podendo ser utilizada em estruturas pré-moldadas e pisos de revestimento.

A Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes (ABETRE, 2016) corrobora com a observação demonstrando que há empresas que chegam a 100% de reaproveitamento, conseguindo uma economia considerável e com redução de até 30% nos custos. A fim de definir se as características mecânicas serão de fato positivas mesmo havendo mudanças nos lotes dos resíduos, deve-se verificar a viabilidade da utilização dos resíduos analisando os resultados de ensaios de compressão como tensão na ruptura, carga na ruptura, módulo de elasticidade. Para dar maior confiabilidade nos testes, é importante realizar um número suficientemente grande de amostras com o máximo de lotes diferentes e coletar seus resultados, porém, dado limitações de tempo e custos associado aos testes, muitas vezes isso não é possível. Neste sentido, a projeção de

resultados com eventos aleatórios a fim de determinar as chances de obtenção do melhor resultado nos testes é particularmente útil.

Ensaio de compressão

Conforme Ruchert (2013), o ensaio de compressão é a aplicação de carga compressiva uniforme na seção transversal uniaxial em um corpo de prova a fim de conhecer o seu comportamento e suas propriedades em determinadas situações. Ele tende a provocar o encurtamento ou ruptura do corpo de prova. No teste de compressão é traçado um gráfico de tensão por deformação. É obtido através do cálculo de resistência (Equação 1), utilizando os dados provenientes do teste de compressão (ABNT, 2007).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde σ é a Tensão, F é a Força e A é a Área.

Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade, ou Young, calculado pela Equação 2, é um parâmetro mecânico que registra a medida de rigidez de um material na fase elástica. Nesta fase nenhuma alteração estrutural pode ser verificada proveniente da força aplicada. Tal módulo é uma das mais importantes propriedades elásticas para a análise dos impactos de manutenção e desempenho das estruturas do material (ALMEIDA, 2012).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde E é o Módulo de elasticidade, σ é a Tensão e ϵ é a Deformação elástica longitudinal.

Simulação

Segundo Pegden (1990), a simulação é um processo no qual é projetado um modelo computacional de um arranjo real e acarreta experimentos com este modelo com a finalidade de entender seu comportamento ou avaliar estratégias para sua operação.

A simulação pode determinar como o sistema irá reagir a mudanças de ambiente e estrutura. Ela é utilizada na solução de testes e problemas cada vez mais complexos, que dependem de entendimento para análise de vários parâmetros de forma que se chegue a possíveis conclusões à partir de um modelo projetado para prever comportamentos futuros (BELHOT, 2001; DIAS 2014).

Simulação de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo tem sido utilizada em diversas áreas do conhecimento e pode ser considerada como um método de ensaios estatísticos, no qual utiliza valores selecionados de forma aleatória, já que simula situações incertas, a fim de determinar valores para variáveis não conhecidas (SAMANEZ, 2009).

Leal e Oliveira (2011) indicam que a simulação é aplicada principalmente em gerenciamento de riscos, uma vez que se utiliza dos desvios padrões apresentados em grupos de amostrais. Esse método é mais utilizado quando o modelo é complexo, ou não-linear, ou quando envolve um número razoável de parâmetros de

incerteza (LIMA et. al, 2008). Neste processo, ao invés de estimar cenários, o comportamento estocástico de cada incerteza é arbitrado (NASCIMENTO, 2007).

O objetivo principal da Simulação de Monte Carlo é estimar o comportamento de uma variável de resultado, esta que depende de outras variáveis aleatórias, normalmente com o auxílio de modelagens de operações e de ferramentas de software que geram uma grande quantidade de cenários automaticamente (MATIAS Jr., 2006). Neste estudo, como em Fernandes (2005), a simulação consiste basicamente em gerar uma quantidade n de sucessivas amostras em termos de resultados de testes de tensão na ruptura e módulo de elasticidade (variáveis aleatórias) que serão, então, testadas em um modelo estatístico que, em verdade, vem a ser uma distribuição de probabilidade para um determinado resultado de capacidade dos testes.

Assim sendo, a simulação de Monte Carlo fornecerá uma estimativa de valor para o resultado esperado, bem como um erro para esta estimativa. Este erro total pode ser expresso pela Equação 3.

$$E\alpha = [(3.\delta)/\sqrt{n}] \quad (\text{Equação 3})$$

Onde $E\alpha$ é o erro absoluto, δ é o desvio padrão da variável aleatória n é o número de iterações.

O método é particularmente útil neste projeto para que possam ser avaliadas possíveis características mecânicas dos resíduos, já que há mudanças em algumas variáveis que podem alterar os resultados obtidos, como por exemplo mudanças nos lotes dos resíduos utilizados nos testes e a calibração dos equipamentos que podem influenciar na viabilidade do uso destes resíduos.

Controle de parâmetro para determinação do número de iterações

Rev. Episteme Transversalis, Volta Redonda-RJ, v.12, n.1, p.359-381, 2021.

Quanto maior o número de projeções, melhor é o nível de precisão da simulação (FORTES, 2014). Contudo, maior será o tempo para realizar tal. É possível determinar o número mínimo de simulações a ser utilizado com base no modelo da Equação 4.

$$n = [(Z \cdot \delta) / e]^2 \quad (\text{Equação 4})$$

Onde **Z** é o nível de confiança adotada⁴, **σ** é o desvio padrão amostral e **e** o erro absoluto.

Metodologia

Os materiais utilizados nas composições são: areia, pedra, cimento, água e caco de louça, resíduo cerâmico obtido de uma indústria de louças sanitárias. Foi adicionado à composição compondo traços de 10%, 20% e 30% segundo a NBR 5738. O método utilizado é o indutivo, que segundo Gil (2008), parte da observação de fatos ou fenômenos cujas causas se desejam conhecer. A partir de testes realizados, simulações irão ajudar a verificar se o fenômeno se repetirá e assim influenciar na tomada de decisão, pensando num todo. A pesquisa é exploratória, que, como Vergara (2010) demonstra, é realizado em áreas de pouco conhecimento sistematizado. O meio de investigação é experimental, no qual é observado o resultado de um conhecimento empírico.

Utiliza-se ainda o método estatístico para identificar elementos a serem utilizados como parâmetros na simulação e seus resultados serão obtidos através da

⁴ Em detrimento da baixa amostragem populacional de testes disponíveis, adota-se para este estudo o nível de significância estatística de 1%.

função de geração de números aleatórios disponibilizada no *software* Microsoft Excel®.

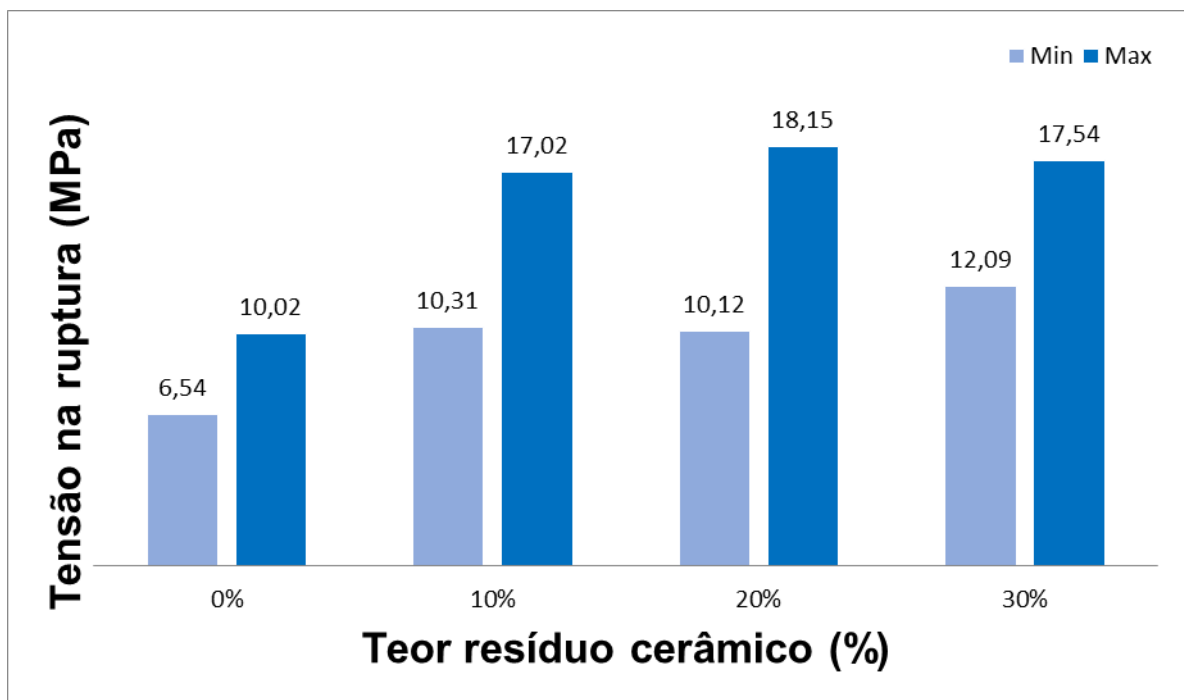
Análise e discussão dos resultados

Ensaio de compressão

O ensaio de compressão é realizado com o auxílio de uma máquina que possui duas placas de apoio, uma fixa e uma móvel. O corpo de prova é posto entre as placas e durante o ensaio, as placas pressionam o material e a partir disso, é criado um gráfico de tensão x deformação. As Figuras 1 e 2 apresentam os resultados de tensão na ruptura e módulo de elasticidade dos traços de cimento Portland com adição de resíduo cerâmico.

Os resultados estão expressos diferentes das respectivas normas ASTM (*American Society for Testing and Materials*) escolhidas para a execução e avaliação mecânica, ao qual é baseada na mediana dos valores, e é incluído o desvio padrão para cada amostra. A abordagem deste estudo, contudo, utiliza, a partir da variabilidade dos cinco corpos de prova por amostra nos parâmetros da NBR 5738, a distribuição normal por ser uma distribuição de probabilidade contínua parametrizada pela esperança matemática de um valor real μ e seu desvio padrão σ (TAFNER et al, 2006). As dispersões em torno do resultado esperado foram capturadas a partir de simulação estocástica, o qual ofertou um grande número de possibilidades considerando os dados existentes.

Figura 1. Resultados dos testes de tensão na ruptura



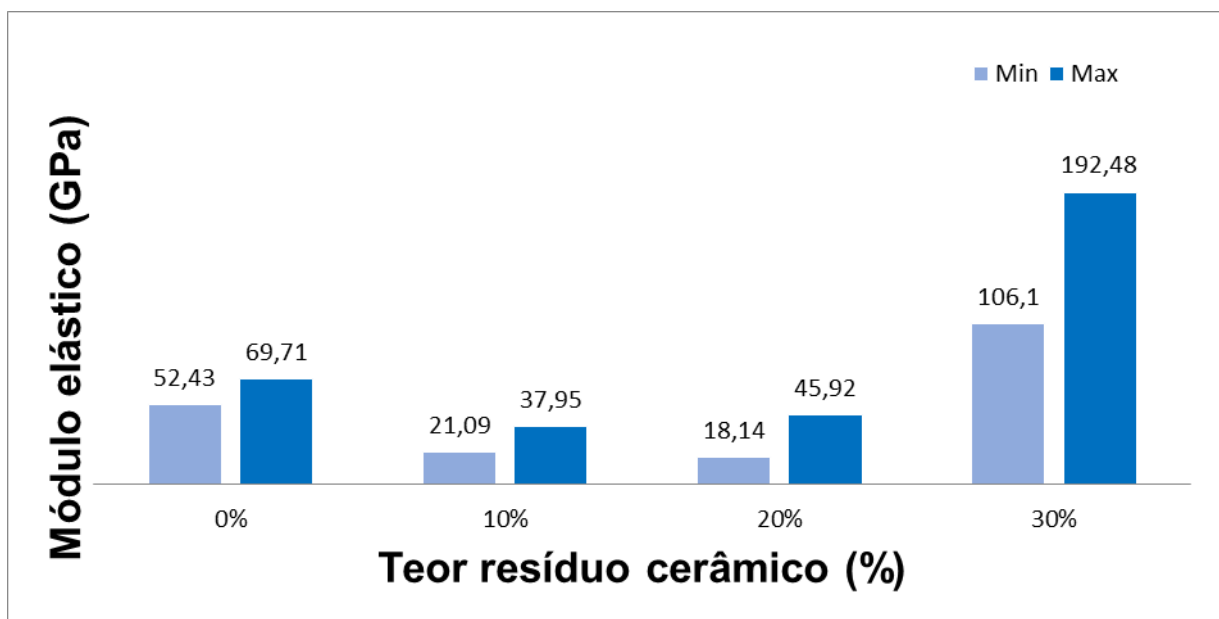
Fonte: Pesquisa do Autor

De acordo com os resultados de tensão na ruptura encontrados, observa-se que a composição tradicional de concreto de cimento Portland apresentou os menores valores de mínimo e máximo de tensão na ruptura. De forma prática, ele revela o quanto, em MPa o corpo de prova resiste antes que se haja um rompimento no corpo de prova. A adição crescente do resíduo nos traços promoveu considerável aumento de máximo e mínimo nos traços com resíduo. O traço de concreto tradicional resistiu em seu pior resultado 6,54 MPa, e em seu melhor resultado 10,02 MPa. Com o aumento do teor de resíduo na composição, foi obtida uma melhora. Após a adição de 10% de resíduo, o corpo de prova resistiu 10,31 MPa em seu pior resultado e 17,02 MPa no seu melhor cenário, mostrando com esses resultados, que a composição se tornou mais resistente a uma tensão aplicada sobre ele.

Pode ser observado que a adição de 20% de caco na composição não provocou muita variação nos traços, quando comparado com o menor teor, de 10%. A adição de 30% de resíduo cerâmico promoveu melhora significativa quando

comparado a composição 10% de caco, resistindo a 12,09 Mpa no seu pior resultado, porém, comparando o seu melhor resultado - 17,54 Mpa com o corpo adicionado de 20% de resíduo, ficando abaixo em um percentual de 3,4%. O aumento da tensão na ruptura dos novos traços podem estar associados à forte interações moleculares do caco de cerâmica reaproveitada, assim como a elevada organização na estrutura, promovendo o aumento da resistência mecânica (CALLISTER, 2012).

Figura 2. Resultados dos testes de módulo de elasticidade



Fonte: Pesquisa do Autor

Na Figura 2, com os resultados de módulo elástico, pode-se verificar o quanto o corpo de prova resistiu durante a fase elástica, ou seja, o aumento da resistência sem deformação na estrutura interna. De forma prática, ele revela o quanto, em GPa o corpo de prova resiste antes que se haja uma fissura no corpo de prova. A partir desses dados foi calculado o módulo de elasticidade. De acordo com os resultados do módulo elástico registrados no ensaio de compressão, pode ser observado que as composições com adição de 20% e 30% de resíduo no concreto de cimento

Portland apresentaram os menores valores e mínimo e máximo de tensão na ruptura.

O teste realizado com a composição sem a adição do resíduo cerâmico apresentou módulo elástico de 52,43 GPa no seu pior resultado e 69,71 GPa em seu melhor resultado. Com a adição de 10% de resíduo na composição, houve uma queda no resultado, passando a ser apenas a 21,09 GPa como mínimo e 37,95 GPa como máximo. O teste com 20% de resíduo cerâmico continuou em queda, se tornando 18,14 GPa no seu pior resultado e 45,92 GPa no seu melhor resultado. O teste representou uma melhora significativa com a adição de 30% de resíduo, obtendo uma melhora significativa na variação dos valores mínimo e máximo.

A partir dos resultados observados nos dois testes anteriores, foi possível identificar a quantidade de iterações (n) a serem realizadas com base nas médias, nos desvios padrões e no erro (e) admitido. A tabela 1 apresenta o resultado da quantidade mínima ideal para cada simulação a ser realizada, com base no modelo para determinação de n (Equação 4).

Tabela 1. Resultados do Controle de Parâmetro

CONTROLE DOS PARÂMETROS				
	0% de resíduo	10% de resíduo	20% de resíduo	30% de resíduo
Resultado Testes	11,16	11,16	18,15	12,09
	17,02	17,02	16,93	14,66
	10,58	10,58	10,12	17,54
	14,97	14,97	10,22	14,13
	10,31	10,31	11,64	13,58
Desvio Padrão	3,013	3,013	3,840	2,000
Média	12,8	12,8	13,4	14,4
Erro admitido	1%	1%	1%	1%
Erro absoluto	0,128	0,128	0,134	0,144
n para $e \leq 1\%$	4984	4984	7379	1737

Fonte: Pesquisa do Autor

Revelou-se que para a composição pura e com 10% de resíduo são necessárias 4984 iterações, para a composição com 20% de resíduo deve ser realizada 7379 iterações e para 30% de resíduo cerâmico, deve ser realizada 1737 iterações. Como é necessário utilizar nas simulações um número que atenda a todas as composições, a quantidade de iterações para cada uma foi de 7380.

Admite-se que os resultados possuem distribuição normal em torno da média, e que, portanto, deverá ser utilizado a função =INV.NORM(ALEATÓRIO(); μ ; σ)⁵ no MS Excel®.

Simulação de Resultados

A Tabela 2 mostra os valores obtidos a partir da simulação estocástica dos resultados de tensão na ruptura. A Tabela 3 apresenta os resultados provenientes da análise de probabilidade dos resultados de tensão na ruptura.

Tabela 2. Simulação estocástica para resultados de tensão na ruptura

Nº ITERAÇÕES	SIMULAÇÕES DE RESULTADOS			
	ADIÇÃO DE RESÍDUOS			
	0%	10%	20%	30%
1	8,15	6,87	12,03	13,13
2	6,86	9,87	9,79	15,57
3	5,39	13,59	14,05	12,31
4	11,51	12,89	14,44	16,96
5	9,79	8,32	14,06	12,73
6	8,46	11,47	13,16	10,37
7	9,57	13,66	14,46	15,06
8	9,03	12,02	8,97	13,42
9	5,80	10,84	19,13	12,43
10	6,31	11,34	16,42	13,24
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

⁵O inverso da distribuição cumulativa normal é uma probabilidade de resultados com base na média μ e no desvio padrão σ .

Fonte: Pesquisa do Autor

A partir dos números gerados (Tabela 2)⁶, foi realizada uma análise de forma que se pudesse quantificar os possíveis resultados dos corpos de prova. A análise foi desenvolvida verificando a probabilidade de os resultados das simulações serem maior que a média apresentada pelos resultados obtidos com os ensaios de compressão, na sequência, de a probabilidade ser maior que o melhor resultado do ensaio, seguindo de a probabilidade de os resultados obtidos com a simulação serem menor que o pior resultado obtido pelo ensaio e, por fim, a probabilidade de os resultados serem maior que 17 MPa - parâmetro que simboliza o menor número encontrado entre os melhores resultados reais encontrados.

Tabela 3. Análise de probabilidade dos resultados de Tensão na Ruptura

PROBABILIDADES DE RESULTADOS TENSÃO NA RUPTURA				
DESCRIÇÃO	ADIÇÃO DE RESÍDUOS			
	0%	10%	20%	30%
<i>Prob. ($x^* > \text{média dos ensaios realizados}$)</i>	50,11%	50,66%	50,37%	50,24%
<i>Prob. ($x^* > \text{maior resultado dos ensaios realizados}$)</i>	14,49%	8,44%	11,04%	5,96%
<i>Prob. ($x^* < \text{menor resultado obtido nos ensaios realizados}$)</i>	18,17%	19,46%	19,04%	12,28%
<i>Prob. ($x^* > 17 \text{ MPa}$)</i>	0,00%	8,58%	17,85%	9,57%

*x representa cada um valor simulado encontrado para o resultado de Tensão na Ruptura

Fonte: Pesquisa do Autor

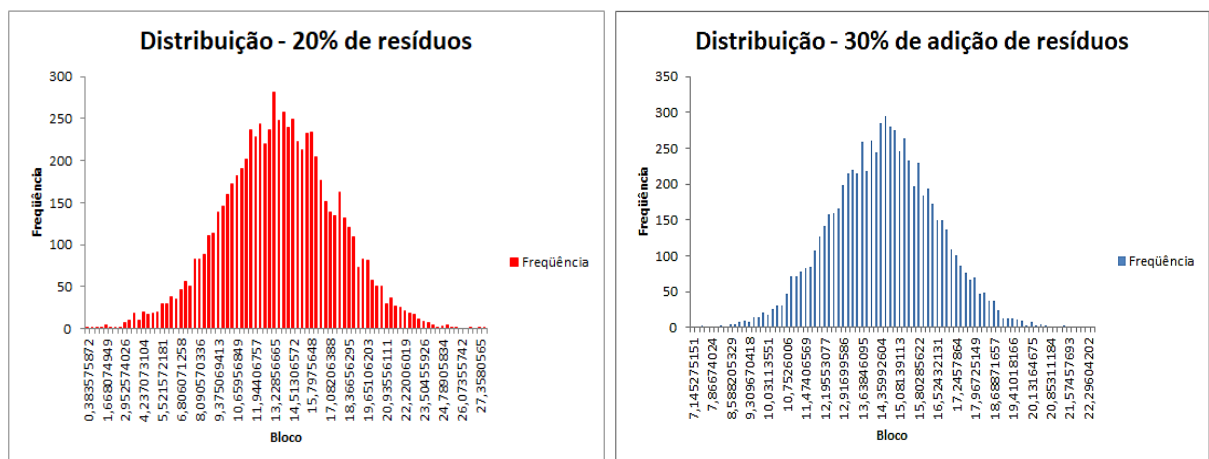
Observa-se a partir do apurado na Tabela 3, que a probabilidade de os resultados das simulações serem maior que a média, em todos os casos, são de 50%, com diferença mínima decimal. É revelado que a probabilidade de os resultados simulados serem maior que o melhor valor existente é maior com concreto puro, apresentando 14,49% de chances de estar acima. Com 10% de caco adicionado, a probabilidade de 8,44% dos resultados serem melhores que os resultados existentes e os com 30% de caco há 5,96% de chance de o resultado ser

⁶ Por questões óbvias, não é possível demonstrar todas 7380 iterações, sendo apresentadas neste artigo apenas as 10 primeiras simulações de resultados.

melhor que os já existentes. A maior probabilidade de os resultados apresentarem melhor resultado frente os demais obtidos pode ser encontrada com a adição de 20% de teor de caco cerâmico, com 11,04% de chances.

Ao analisar a probabilidade dos testes apresentarem resultados menores que o pior resultado real obtido ficou com a composição de 30% de resíduos – 12,28% de chances, enquanto para os outros a probabilidade foi maior. Foi verificado também a probabilidade de ser maior que 17 MPa (o melhor resultado obtido nos testes reais), e nesse parâmetro o melhor resultado foi obtido pela composição com 20% de caco, que apresentou 17,85% dos resultados, seguido pela composição de 30% que se repetiu em 9,57% dos casos. As Figuras 3 e 4 apresentam os resultados das distribuições de tensão na ruptura e módulo elástico, respectivamente, e a Tabela 4 mostra a simulação estocástica realizada para o módulo elástico.

Figura 3. Distribuição normal das simulações no teste de tensão na ruptura



Fonte: Pesquisa do Autor

Tabela 4. Simulação estocástica para resultados de módulo elástico

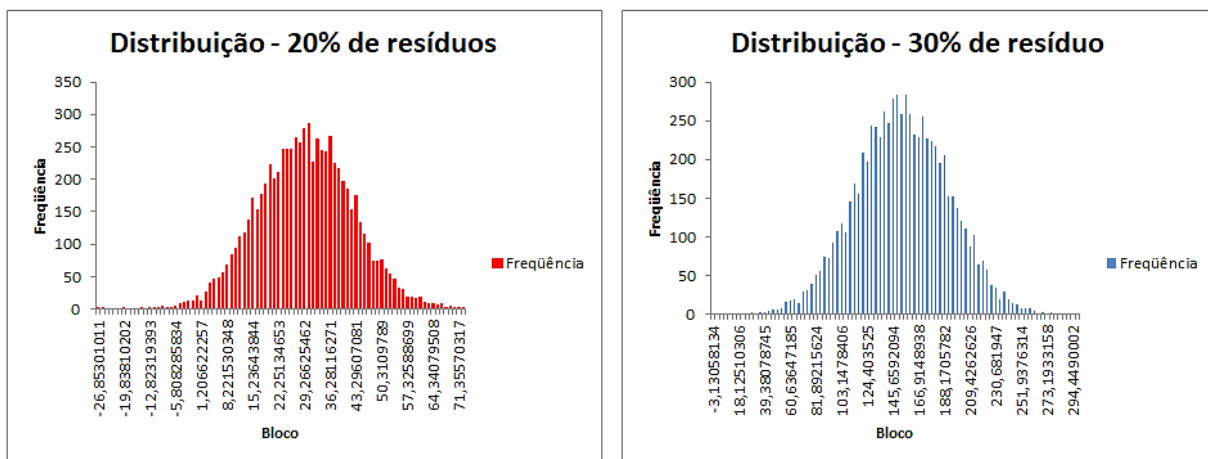
Nº ITERAÇÕES	SIMULAÇÕES DE RESULTADOS			
	ADIÇÃO DE RESÍDUOS			
	0%	10%	20%	30%
1	67,37	23,34	16,91	233,29

Rev. Episteme Transversalis, Volta Redonda-RJ, v.12, n.1, p.359-381, 2021.

2	73,76	24,76	19,83	97,92
3	66,23	42,94	37,98	116,85
4	63,46	28,18	38,14	156,37
5	57,84	19,83	14,67	168,03
6	57,57	43,77	35,08	189,15
7	62,08	32,74	16,52	155,01
8	66,08	33,7	6,13	100,38
9	65,68	21,6	8,45	196,20
10	62,50	33,00	30,37	131,94
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Fonte: Pesquisa do Autor

Figura 4. Distribuição normal das simulações no teste de módulo elástico



Fonte: Pesquisa do Autor

Foram seguidos, após a simulação, os mesmos procedimentos adotados para verificação dos testes de Tensão na Ruptura. A análise foi desenvolvida verificando a probabilidade de o resultado da simulação ser maior que a média apresentada pelos resultados dos ensaios de compressão, da probabilidade ser maior que o melhor resultado do ensaio. A Tabela 5 apresenta os resultados da análise de probabilidade dos resultados. As probabilidades obtidas a partir das simulações revelaram em todos os cenários que a adição de 30% de resíduos cerâmicos apresenta resultados mais significantes.

Tabela 5. Resultados da análise de probabilidade de resultados

PROBABILIDADES DE RESULTADOS PARA MÓDULO ELÁSTICO				
DESCRIÇÃO	ADIÇÃO DE RESÍDUOS			
	0%	10%	20%	30%
<i>Prob. (x^* > média dos ensaios realizados)</i>	50,35%	97,24%	88,58%	99,97%
<i>Prob. (x^* > maior resultado dos ensaios realizados)</i>	19,27%	11,38%	8,77%	14,50%
<i>Probabilidade (x^* < menor resultado obtido nos ensaios realizados)</i>	11,73%	18,98%	7,80%	0,01%

*x representa cada um valor simulado encontrado para o resultado de Módulo Elástico

Fonte: Pesquisa do Autor

Utilização do Coeficiente de Variação

A partir da simulação estocástica é possível verificar que as composições com 20% de resíduos cerâmicos apresentaram mais possibilidades de ter melhor desempenho no teste de Tensão na Ruptura frente aos testes com adição de 0%, 10% e 30%. Por outro lado, no teste de módulo elástico, todas possibilidades apontam para um melhor resultado com a adição de 30% de resíduos. Neste caso, é interessante verificar a extensão da variabilidade em relação à média da população obtida dos 7380 resultados.

Como esta é uma análise com base em variáveis aleatórias simuladas, pelo fato de a população amostral ser igual para ambos e os valores individuais obtidos a cada simulação diferentes, o coeficiente de variação (CV) é a medida de dispersão mais reveladora e apropriada a ser aplicada (TAFNER et al, 2006).

Muito utilizado para avaliar o percentual de desvio de um resultado em relação à media, quanto maior for o coeficiente, maior o risco de o comportamento 'variar' em detrimento do que se espera de resultado. É expresso como a razão do desvio padrão σ pela média amostral μ .

$$CV = [\sigma/\mu] \quad \text{(Equação 5)}$$

Os resultados do coeficiente de variação em relação ao teste de tensão na ruptura, expressos na Tabela 6, permitiram a verificação de que os corpos de prova compostos com 20% de resíduo apresentaram um coeficiente de variação de 28%, enquanto que a composição com 30% de resíduo apresentou um coeficiente de rendimento de 14%.

Já no teste de módulo elástico, a composição de 20% apresentou um coeficiente de variação de 44%, enquanto que o resultado encontrado com a adição de 30% apresentou um coeficiente de 25%.

Tabela 6. Coeficientes de Variação dos testes

COEFICIENTES DE VARIAÇÃO				
DESCRIÇÃO	ADIÇÃO DE RESÍDUOS			
	0%	10%	20%	30%
<i>Coef. de Variação Tensão na Ruptura</i>	18%	23%	28%	14%
<i>Coef. de Variação Módulo Elástico</i>	14%	29%	44%	25%

Fonte: Pesquisa do Autor

Considerações finais

Sendo obtido uma maior confiabilidade nos resultados por meio das simulações, as soluções obtidas com os testes de tensão na ruptura com uso de 20% e 30% de resíduo foram aceitáveis. Há evidências probabilísticas de que a utilização de 20% de resíduos cerâmicos na composição de cimento Portland apresente melhores resultados no quesito de tensão na ruptura, porém com variabilidade de 28% no coeficiente de variação acima dos 14% apresentados pelos resultados encontrados com a adição do 30%. Isto revela que há uma incerteza

maior de um resultado favorável ser alcançado, pois há uma dispersão maior em torno da média dos resultados encontrados. No módulo elástico, a simulação estocástica apresentou melhores desfechos com a adição de 30% de resíduo cerâmico. De toda forma, os resultados corroboram acerca do uso de 30% de resíduo de caco cerâmico em composições de cimento Portland, melhorando o desempenho físico e mecânico das composições.

Para que haja maior abrangência nesse estudo, se faz necessário investimentos em maior número de testes e ensaios e, ainda, como sugestão para estudos futuros, investigar os ganhos de escala que as organizações podem obter pela substituição de parte da matéria prima pelos percentuais de resíduo aplicado.

Espera-se que o uso da técnica de simulação de Monte Carlo para geração de possíveis resultados ajude na obtenção de confiabilidade dos números das pesquisas de viabilidade mecânica, que não possuem tempo hábil para pesquisa e a análise de amostras o suficiente para obtenção de soluções ideais. É esperado também que o estudo auxilie na tomada de decisão quanto o uso dos resíduos como parte da matéria prima de produtos, reduzindo o máximo de custo das empresas e contribuindo com a redução do impacto ambiental.

Referências

_____. **ABNT NBR 8522**. Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **ABNT NBR ISO 14001**. Sistemas da gestão ambiental –Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **ABNT NBR NM 65**. Cimento portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABETRE. **Inovação e sustentabilidade na cadeia de valor.** Disponível em: file:///C:/Users/BEM%20VINDO/Downloads/FGV%20-%20Resíduos%20e%20pos-consumo%20-%202013.pdf Acesso em: 15 mar. 2018.

ALMEIDA, S. M. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante.** Disponível em: http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/18433/ISMS-96DR6D/dissertacaosilviomartinsdealmeida__1_.pdf?sequence=1 Acesso em: 25 abr. 2018.

ANFACER. **Setor de revestimentos cerâmicos começa a mostrar sinais de retomada.** Disponível em : <https://www.dci.com.br/industria/setor-de-revestimentos-ceramicos-comeca-a-mostrar-sinais-de-retomada-1.503883> Acesso em: 30 abr. 2018.

BARAKAT, M. F.; Berssaneti, F. T. **Aplicabilidade do método de simulação de Monte Carlo na previsão de prazo em um projeto de transferência de tecnologia intracompanhia farmacêutica.** Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_227_325_29916.pdf> Acesso em: 31 maio 2018.

BELHOT, R. Et al. **O uso da simulação na engenharia.** Disponível em: <http://www2.eesc.usp.br/aprende/images/arquivos/o_uso_da_simulacao_no_ensino.pdf> Acesso em: 31 maio 2018.

BUCCHIANERI, J. R.; COELHO, C. J. **Previsão de demanda por simulação de Monte Carlo em uma franquia especializada em produtos de beleza.** Disponível em : <<http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2016/pdf/156669.pdf>> Acesso em: 31 maio 2018.

BUSTAMANTE, G.; BRESSIANI, J. **A indústria cerâmica brasileira.** Disponível em: <http://ceramicaindustrial.org.br/pdf/v05n03/v5n3_5.pdf> Acesso em: 07 abr. 2018.

CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais. Uma Introdução.** Rio de Janeiro: LTC Editora, 2012.

CNI. **A importância da Indústria no Brasil.** Disponível em : <http://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/importancia-da-industria/> Acesso em: 30 abr. 2018.

DA COSTA, J. S.; MARTINS C. A., BALDO J. B. **Indústria de Louça Sanitária como agregado para a Produção de Concreto e Argamassa.** Disponível em:

[Http://www.profiscientia.ifmt.edu.br/profiscientia/index.php/profiscientia/article/view/50/52](http://www.profiscientia.ifmt.edu.br/profiscientia/index.php/profiscientia/article/view/50/52) Acesso em: 30 maio 2017.

FERNANDES, C. A. B de A. **Gerenciamento de risco em projetos: como usar o Microsoft Excel para realizar simulação de Monte Carlo.** Disponível em: < http://www.pucrs.br/ciencias/viali/especializa/mia_ima_fafis/material/ead/artigos/MonteCarloExcel.pdf > Acesso em: 05 jun. 2018.

FORTES, E. **Análise de investimentos: tomada de decisão na avaliação de projetos.** São Paulo: Saint Paul Editora, 2014.

GIL, Antonio. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** São Paulo: Editora Atlas, 2008.

LEAL, Leandro. ; OLIVEIRA, Mário. **SIMULAÇÃO APLICADA AO GERENCIAMENTO DE PROJETOS: UMA REVISÃO.** Disponível em: <https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/737>. Acesso em: 06 de maio 2018.

LERIPIO, A. A. **Gerenciamento de resíduos.** <http://www.eps.ursc.br/nigra/coferecidos.html> Acesso em: 03 de abrt 2018.

LOPES, L. **Gestão e gerenciamento integrados dos resíduos sólidos urbanos.** Disponível em: file:///C:/Users/BEM%20VINDO/Downloads/DISSERTACAO_LUCIANA_LOPES.pdf Acesso em: 05 maio 2018.

LUCAS, D.; BENATTI, C. **Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil.** Disponível em: <[file:///C:/Users/BEM%20VINDO/Downloads/850-2375-1-PB%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/BEM%20VINDO/Downloads/850-2375-1-PB%20(1).pdf)> Acesso em: 05 maio 2018.

MATIAS Jr., R. **Análise quantitativa de risco baseada no método de Monte Carlo: Abordagem PMBOK.** I Congresso Brasileiro de Gerenciamento de Projetos – Florianópolis 29 a 31 de março de 2006.

MEDEIROS, A. **Reaproveitamento de resíduos cerâmicos no concreto do cimento Portland: Influencia nos traços e no comportamento mecânico.** Dissertação 2016.

NASCIMENTO, C.A.D. **Gerenciamento de Prazos: Uma revisão crítica das técnicas em uso em empreendimentos em regime de EPC.** Dissertação de Mestrado, 2007.

PAIXÃO, S. **Estudo do uso de resíduo cerâmico de obras como agregado miúdo para a fabricação de argamassas para revestimento de alvenarias.** Disponível em: < <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10006381.pdf> > Acesso em: 15 mar. 2018.

PEGDEN, C.D., SHANNON, R.E., SADOWSKI, R.P. **Introduction to Simulation Using SIMAN**, McGraw-Hill, New York, USA. v. 2. 1990.

RUCHERT, C. **Aços e ferros fundidos.** Disponível em https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2125206/mod_resource/content/1/LOM3022-MIQ-4-%20A%C3%87OS%20E%20FERROS%20FUNDIDOS%20Mod%20Cassius.pdf Acesso em: 20 março 2018.

SAMANEZ, C. **Engenharia econômica.** São Paulo: Hall, 2009.

SEBRAE. **MANUAL DE REGULARIZAÇÃO AMBIENTAL.** Disponível em <http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/manual-de-regularizacao-ambiental,d3f9634e2ca62410VgnVCM100000b272010aRCRD> Acesso em: 10 mar. 2018.

TAFNER, P.; CARVALHO, M. **Curso de estatística elementar.** Rio de Janeiro: Publit, 2006.

VERGARA, Sylvia Constant. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração.** 12. ed. São Paulo: Atlas, 2010.