Destacamento otimizado de pasta de cimento dos agregados reciclados a partir de concretos de baixo carbono com uso do fíler calcário

Optimized detachment of cement paste from recycled aggregates from low-carbon concrete using limestone filler

Tatiane Isabel Hentges
Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais de Construção (LME), Universidade de São Paulo | São Paulo, São Paulo | tatiane.hentges@lme.pcc.usp.br

Sérgio Cirelli Angulo
Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência de Materiais de Construção (LME), Universidade de São Paulo | São Paulo, São Paulo | tatiane.hentges@lme.pcc.usp.br

Luís Marcelo Marques Tavares
Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM), Universidade Federal do Rio de Janeiro | Rio de Janeiro, Rio de Janeiro | tavares@metalmat.ufrj.br

RESUMO

A pasta de cimento é a fração do agregado reciclado de concreto (ARC) que eleva sua porosidade e reduz sua resistência mecânica. Com o objetivo de aumentar o destacamento desta pasta durante a britagem, foram produzidos concreto referência e contendo 40% de fíler calcário (LF) em substituição ao cimento. Após processamento em britador de mandíbulas, verificou-se que não houve alterações na composição granulométrica do ARC obtido. Análises por espectroscopia de raios X e por reconstituição de traço indicaram que a maior parte da pasta de cimento, quando britada, foi reduzida a finos. Já a fração miúda do concreto LF apresentou maior teor de agregado natural em comparação ao concreto referência. A redução da resistência mecânica deste concreto pode ter colaborado no destacamento da pasta. Em conclusão, a inclusão de maiores teores de LF no concreto e sua resistência reduzida ajudaram a separar a pasta de cimento da fração miúda sem alterar a granulometria, demonstrando a possibilidade da produção de um ARC com características mais próximas do agregado natural.

Palavras-chave: Agregado reciclado de concreto; Fíler calcário; Destacamento de pasta cimentícia; Britagem; Circularidade.

ABSTRACT

Cement paste is the fraction of recycled concrete aggregate (RCA) that increases its porosity and reduces its mechanical strength. In order to improve the detachment of this paste during the crushing, reference concrete and concrete containing 40% limestone filler replacing cement were produced. After processing in a jaw crusher, no changes were found in the particle size distribution of the obtained RCA. X-ray spectroscopy and reconstruction of concrete composition analyses indicated that most of the cement paste, when crushed, was reduced to fines. The fine fraction of the LF concrete presented a higher content of natural aggregate compared to the reference concrete. The reduction in the mechanical strength of this concrete may have contributed to the detachment of the paste. In conclusion, the inclusion of higher levels of LF in the concrete and its reduced strength helped to separate the cement paste from the fine fraction without changing the particle size, demonstrating the possibility of producing an RCA with characteristics closer to natural aggregate.

Keywords: Recycled concrete aggregate; Limestone filler; Detachment of cement paste; Crushing; Circularity.

1 INTRODUÇÃO

Ao final do ciclo de vida de uma edificação, as estruturas de concreto são geralmente recicladas através de processos de cominuição, os quais produzem agregados reciclados de concreto (ARCs). Estes agregados, entretanto, normalmente contêm pasta de cimento aderida, responsável pela maior porosidade e menor resistência quando comparados aos agregados naturais. Essas características limitam a aplicação do ARC no concreto e várias normas no mundo impõem restrições na substituição de agregados naturais por reciclados, para usos estruturais e não estruturais.

As propriedades e a composição do concreto original influenciam significativamente na qualidade do ARC produzido (Koper; Koper; Koper, 2017). Quando a resistência da matriz cimentícia e dos agregados é similar, os agregados são fragmentados durante o processo de cominuição e as partículas geradas são mistas de pasta e agregado. Isso ocorre, por exemplo, em concretos de alta resistência, onde o baixo teor de água reduz a espessura da zona de transição interfacial, aumentando a força de adesão entre agregado e pasta (Akbarnezhad *et al.,* 2013; Larrard; Belloc, 1997). Por outro lado, quando a cominuição é de concretos com maior porosidade e propriedades mecânicas mais limitadas, as fissuras tendem a seguir por regiões mais porosas, como a zona de transição, contornando os agregados naturais. Esse processo leva ao maior desprendimento da pasta de cimento aderida e produz ARCs com propriedades (densidade, absorção de água) mais próximas às dos agregados naturais (Ragab Mohamed; Hansen, 1999).

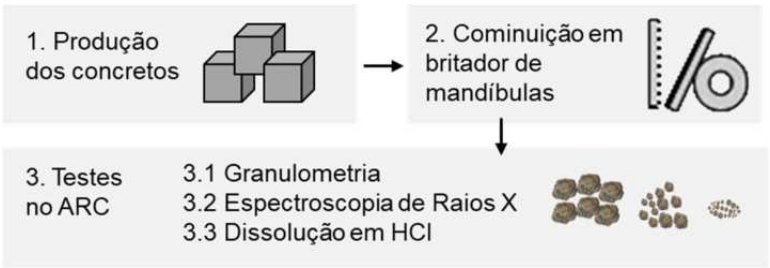
Uma estratégia que pode melhorar a qualidade do ARC é o uso de fíler calcário (LF) na matriz cimentícia. Estudos recentes (John *et al.,* 2018; Oliveira *et al*., 2024) mostram que é possível produzir concreto com alto teor de LF em substituição ao cimento mantendo a resistência mecânica. A vantagem é obter um concreto com baixa emissão de carbono. Por ser um material não reativo, em teores normais (até os 15% vendidos comercialmente) o LF atua preenchendo poros. Em teores mais elevados, é possível manter a porosidade total da matriz através de uma substituição controlada de cimento por fíler, porém o tamanho crítico do poro fica maior (Oliveira *et al.,* 2024). Em termos de propagação de fissuras, materiais cimentícios contendo LF iniciam a fratura em níveis menores de tensão, o que é atribuído ao maior tamanho crítico de poro. Ademais, tais matrizes cimentícias apresentam deformações finais maiores antes da ruptura (Menadi; Kenai; Khatib, 2014; Oliveira *et al.*, 2024), indicando o fenômeno de tenacificação em matrizes cimentícias pseudo-frágeis. Esse aumento na tenacidade é explicado por Das et al. (2015), onde amostras com LF apresentaram deformações mais bem distribuídas sob tensão. A maior uniformidade de deformações sugere que microfissuras se desenvolvem e se propagam por toda a amostra, o que potencialmente melhora o destacamento da pasta do agregado natural, deixando-o mais limpo durante o processo de cominuição.

A partir desse contexto, as perguntas que surgem são: O LF na mistura de concreto pode aumentar a liberação de agregados durante a reciclagem, sem mudança do processo de cominuição? Seria benéfico para conservar energia, facilitar o processo de separação matriz de cimento e agregado natural? O objetivo deste trabalho é analisar a composição química e granulometria dos agregados reciclados obtidos de concretos com e sem fíler calcário.

2 METODOLOGIA

O programa experimental foi conduzido em três etapas principais (Figura 1). Primeiro, foram produzidos concretos referência e contendo fíler calcário (LF). Em seguida, os corpos-de-prova foram britados em britador de mandíbula. Por fim, os agregados de concreto reciclado (ARC) resultantes foram caracterizados com relação à sua granulometria e composição química.

Figura 1: Etapas do programa experimental



2.1 MATERIAIS

Na produção dos concretos foram utilizados cimento, água, agregados graúdos e miúdos e fíler calcário (LF), (Tabela 1). O cimento utilizado foi o CPV. O agregado miúdo foi areia quartzosa de rio (granulometria entre 0,184 e 2,173 mm). O agregado graúdo foi seixo de rio (partículas entre 4,75 e 16,5 mm). Foram utilizados dois fíleres calcários: o mais grosso para substituição do cimento, e o mais fino para aumentar o empacotamento das partículas de pó e reduzir a demanda de água.

Tabela 1. Caracterização dos materiais utilizados na produção dos concretos

Material	Densidade (g/cm³)	D50 (µm)	Área superficial volumétrica*(m²/m³)
Cimento	3,08	17,41	0,836
Fíler calcário fino	2,76	2,49	3,1784
Filer calcário grosso	2,74	8,83	10,287
Areia	2,65	398	0,031
Seixo	2,65	11.526	0,0008

*A ASV da brita e areia foi estimada a partir da distribuição granulométrica, considerando partículas esféricas. ASV do cimento e dos fíleres calcários foram estimadas a partir de análises de difração a laser

40% do volume de cimento foi substituído por LF, 20% de cada tipo. Essa substituição eleva a relação água-cimento, aumenta a porosidade e reduz a resistência mecânica. Para manter a mesma porosidade em ambos concretos, a relação água-sólidos do concreto com LF foi reduzida usando modelos propostos por Oliveira et al. (2024). Ainda assim, a resistência à compressão do concreto com fíler (LF40) ficou 35% inferior ao concreto referência (Ref60). A composição dos concretos é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Consumo de materiais dos concretos estudados

Nome	Água/sólidos (m³/m³)	Água/sólidos (kg/kg)	Água/cimento (kg/kg)	Cimento	Fíler calcário	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água	Fc	E
Ref60	1,48	0,48	0,48	375,0	-	796,9	1048,8	180,8	62,6±1,9	34,3±1,9
LF40	1,26	0,72	0,43	235,4	157,0	796,8	1049,9	168,7	40,6±0,9	30,5±1,9

Foram moldados blocos de 100×100×75 mm que, após 24 horas foram levados à cura submersa por 28 dias. Então foram divididos ao meio (tornando-se 10×50×75 mm) e levados em estufa à 60ºC por 20 dias, não havendo mais variação de umidade superior a 0,5%.

2.2 MÉTODOS

Os blocos de concreto foram cominuídos em britador de mandíbulas, de escala laboratorial, localizado no Laboratório de Tecnologia Mineral da Universidade Federal do Rio de Janeiro. A amplitude da mandíbula móvel é de 10 mm. A abertura de posição fechada foi ajustada em 12,5 mm para garantir dimensão de ARC semelhante ao agregado natural, maximizando a remoção da pasta de cimento aderida (Etxeberria *et al.,* 2007).

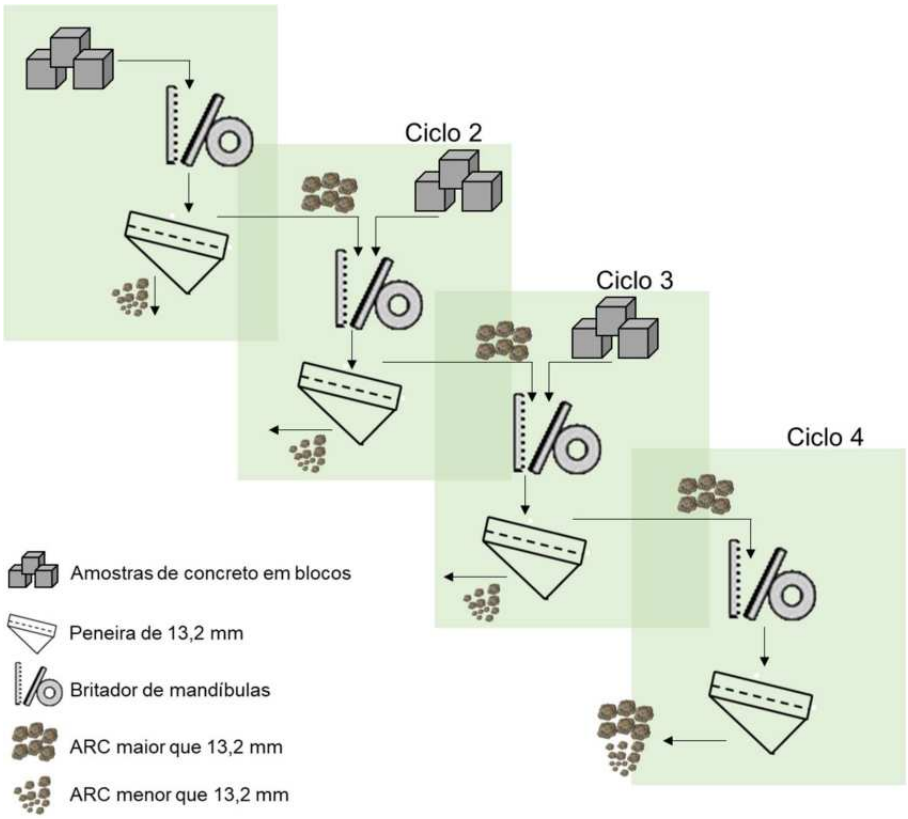
O processo de britagem foi realizado em quatro ciclos (Figura 2). Embora tenha sido realizado em modo de lote, ele foi criado para imitar a operação contínua em circuito fechado, como é o modo operacional normal na indústria. Como tal, o primeiro ciclo foi um ciclo aberto, onde apenas blocos foram alimentados no britador de mandíbula, sendo o produto peneirado em peneira de malha de 13,2 mm. No segundo e terceiro ciclos, um ciclo fechado foi empregado: o material retido em 13,2 mm do ciclo anterior foi combinado com blocos adicionais e reprocessado. O quarto ciclo envolveu a alimentação apenas do material retido acima de 13,2 mm de volta no britador. Durante todas as operações foi garantido que a câmara de alimentação estivesse completamente cheia. No segundo e terceiro ciclos, os blocos e o material retido foram alimentados simultaneamente. O produto da indústria é comumente o resultado da operação em circuito fechado então neste trabalho é analisada apenas a granulometria do ciclo 3.

A granulometria dos ARC foi determinada por peneiramento usando a série padrão de peneiras Tyler. Apenas partículas mais finas que 13,2 mm foram analisadas por espectrometria por fluorescência de raios X (FRX) e da reconstituição de traço. As partículas foram agrupadas em fração graúda (retido em 4,75 mm (+4,75 mm)), miúda (retido em 4,75 mm, passante em 0,15 mm (-4,75 mm, +0,15 mm)) e finos (retido em 0,15 mm (-0,15 mm)).

Na preparação das amostras para análise química, primeiramente foram preparadas pilhas alongadas de homogeneização. 1500 g de agregado graúdo e 500 g de miúdo foram tomadas. A fração graúda foi triturada em britador de mandíbula até obter dimensão inferior a 4,75 mm, então passou duas vezes por britador de rolos, com aberturas de 2 mm e 1 mm, respectivamente. O mesmo procedimento foi aplicado à fração miúda.

Novas pilhas alongadas foram formadas, e 150 g de cada fração selecionadas. Por fim, essas amostras foram processadas em moinho de bolas planetário, peneiradas em 75 µm, e enviadas à análise química. A fração fina não exigiu preparação adicional.

Figura 2: Fluxo esquemático dos ciclos de britagem seguidos no programa experimental



A análise química semiquantitativa por espectrometria de fluorescência de raios X foi realizada. Nesta são avaliados o conteúdo de CaO e perda ao fogo (PF), que estão relacionados à quantidade de matriz (pasta endurecida) de cimento (com e sem fíler de calcário), enquanto o SiO_2 indica a composição do agregado (Angulo *et al.,* 2009), pois apenas agregados de quartzo foram usados nos concretos originais.

Na reconstituição do traço, uma solução de HCl a 33% foi usada para determinar o teor de matriz de cimento e o teor de agregado de rocha silicática (Angulo *et al.*, 2009). Como o quartzo foi usado como agregado natural na composição original do concreto, a solução ácida foi capaz de dissolver apenas os compostos associados à pasta de cimento, como o cimento hidratado e o fíler calcário. O procedimento do ensaio seguiu (Quarcioni; Cincotto, 2006).

3 RESULTADOS

Devido à semelhança entre as distribuições granulométricas (Figura 3) entre os agregados, a Tabela 3 apresenta as porcentagens da fração graúda, miúda e fina. Dado que os ARCs foram obtidos por ciclo de cominuição fechado, o teor de agregados graúdos ficou próximo a 60%, um pouco inferior ao valor encontrado na literatura científica de britagem usando britadores de mandíbula (Ulsen *et al.*, 2019). Isso ocorre porque as partículas mais grossas (acima de 13,2 mm) foram rebritadas. Ao comparar as formulações de concreto, diferenças insignificantes foram observadas, da ordem ou inferiores a 1%.

Os óxidos da composição química são apresentados na Tabela 4, além da estimativa do teor de matriz de cimento e fíler por HCl. Os teores de matriz de cimento estão de acordo com os 23% de massa esperados na composição (formulação original) de ambos os concretos. Para ambos ARCs, há maior quantidade de matriz de cimento na fração de finos. Para o concreto referência, o teor de CaO + PF é quase o dobro na fração fina, quando comparado aos teores na fração miúda e graúda. Esse resultado é ligeiramente mais pronunciado nos agregados do concreto LF. Neste caso, a fração miúda apresentou o menor teor de matriz de cimento, enquanto o teor na fração de finos apresentou valor quatro vezes maior que os teores da fração graúda e

miúda. Essa análise foi também válida pelo ensaio de reconstituição com HCl (Figura 4), ou seja, a adição de LF e a redução na resistência à compressão do concreto auxiliaram na separar a matriz de cimento dos agregados naturais (em particular, a areia) durante a britagem.

Figura 3: Distribuição granulométrica dos ARCs produzidos do concreto Referência (Ref) e do concreto com fíler calcário (LF)

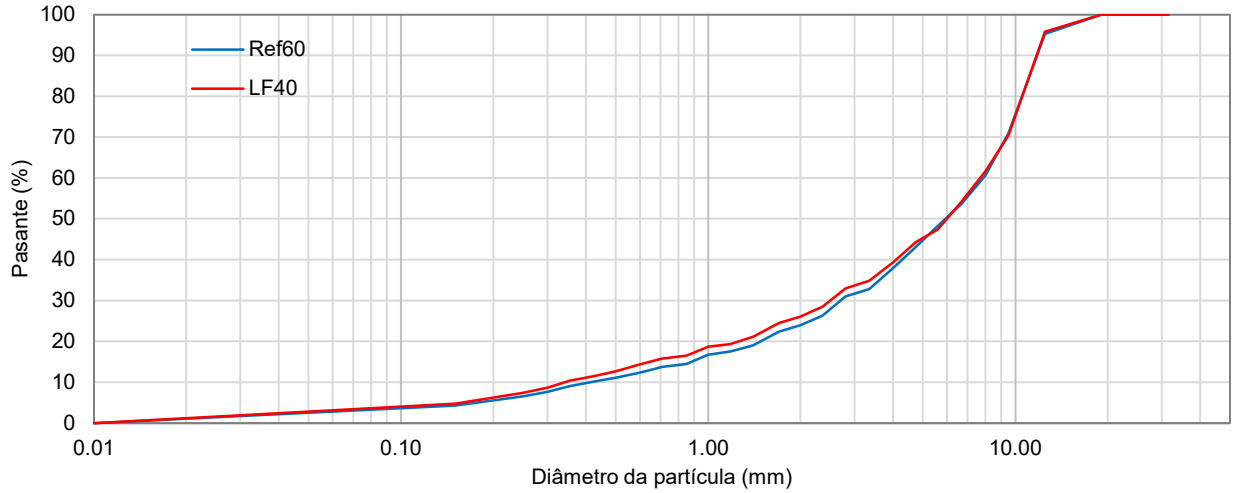


Tabela 3. Distribuição em massa (%) de agregados reciclados graúdos, miúdos e finos produzidos

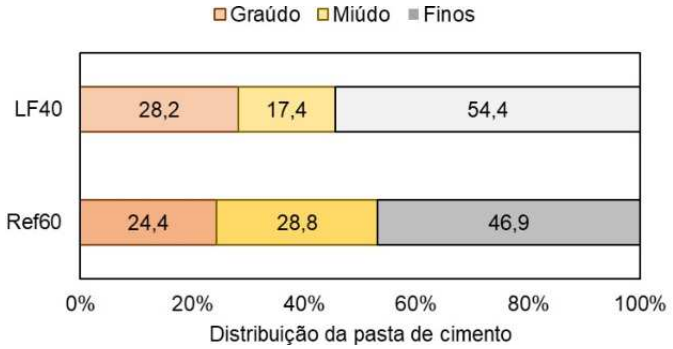
Concreto	Graúdo (+4,75)	Miúdo (4.75>0.15mm)	Finos (-0,15mm)
Ref60	56,9	38,8	4,3
LF40	55,7	39,6	4,8

Tabela 4. Composição química principal (%) do ARC determinada por FRX

#	Fração	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	PF	CaO + PF	Teor de pasta de cimento determinada por solução de HCl
Ref60	+4,75	78,9	7,6	1,3	0,2	0,4	0,1	10,1	17,7	20,0
	-4,75+0,15	78,3	11,6	1,8	0,4	0,7	0,1	5,4	17,0	25,0
	+0,15	62,0	20,7	2,7	0,8	1,0	0,1	10,1	30,8	33,3
LF40	+4,75	83,3	8,1	1,2	0,2	1,0	Tr	5,2	13,3	20,0
	-4,75+0,15	88,4	5,4	0,9	0,2	0,8	Tr	3,5	8,9	11,1
	-0,15	57,1	22,4	2,2	1,0	2,2	0,1	13,2	35,6	33,3

O teor de SiO_2 de cada fração está relacionado ao seixo e areia de rio e inversamente relacionado ao teor de CaO + PF. Os ARCs graúdos e miúdos de referência contêm basicamente a mesma quantidade de SiO_2, enquanto a fração de finos contém 16% menos. Como esperado, a fração miúda dos ARCs de LF tem 5% mais SiO_2 do que a graúda e 30,3% a mais do que os finos.

Figura 4: Percentual de pasta cimentícia, determinada por HCl, em cada fração de ARC produzidos de concreto referência (Ref60) e com fíler calcário (LF40)



Quando comparado com os agregados de referência, o maior teor de cimento nos finos do ARC obtido a partir do concreto com fíler calcário, bem como o maior teor de SiO2 na fração miúda sugerem a obtenção de ARC mais limpo (com menos matriz de cimento aderida). Esses resultados sugerem que o mecanismo de fissuração mais homogêneo induzido pela presença de LF e redução da resistência mecânica ajudam a destacar mais a pasta de cimento dos agregados naturais, indicando o LF com algum potencial de melhorar a qualidade dos ARCs obtidos.

4 CONCLUSÕES

A influência da composição do concreto no ARC produzido por britador de mandíbulas em ciclo fechado foi estudada, podendo-se concluir que:

- Não houve diferença na distribuição granulométrica dos agregados, demonstrando que a presença de LF não altera o tamanho das partículas geradas no britador.
- Metade da pasta cimentícia se encontra na fração de finos. Porém, a fração miúda do ARC com LF apresentou menor quantidade de matriz (pasta) de cimento aderida.

Neste trabalho, a introdução de LF na composição do concreto resultou em um compósito cimentício com reduzido teor de cimento, porém de menor resistência mecânica. Este, quando britado, produziu um agregado reciclado mais limpo (com menor teor de matriz de cimento aderida), sem alteração perceptível na distribuição granulométrica do ARC.

AGRADECIMENTOS

Tatiane Hentges agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP processo 2021/01351-8) pelo apoio financeiro e bolsa de doutorado. Sérgio Angulo agradece ao Conselho Nacional Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pela bolsa do processo 305564/2018-8.

REFERÊNCIAS

AKBARNEZHAD, A. *et al.* Effects of the Parent Concrete Properties and Crushing Procedure on the Properties of Coarse Recycled Concrete Aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 12, p. 1795–1802, dez. 2013.

ANGULO, S. C. *et al.* Chemical–mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil. **Waste Management**, v. 29, n. 2, p. 721–730, fev. 2009.

DAS, S. et al. Fracture process zone and tensile behavior of blended binders containing limestone powder. **Cement and Concrete Research**, v. 73, p. 51–62, 1 jul. 2015.

ETXEBERRIA, M. *et al.* Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 5, p. 735–742, maio 2007.

JOHN, V. M. *et al*. Fillers in cementitious materials — Experience, recent advances and future potential. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 65–78, dez. 2018.

KOPER, A.; KOPER, W.; KOPER, M. Influence of Raw Concrete Material Quality on Selected Properties of Recycled Concrete Aggregates. **Procedia Engineering**, v. 172, p. 536–543, 2017.

LARRARD, F. DE; BELLOC, A. The Influence of Aggregate on the Compressive Strength of Normal and High-Strength Concrete. **Materials Journal**, v. 94, n. 5, p. 417–426, 1 set. 1997.

MENADI, B.; KENAI, S.; KHATIB, J. M. Fracture behaviour of concrete containing limestone fines. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, v. 167, n. 3, p. 162–170, jun. 2014.

OLIVEIRA, F. C. D. *et al*. Mechanical properties of reduced-sized limestone filler-cement pastes and their variability using an instrumented point load test. **Journal of Building Engineering**, v. 94, p. 109802, out. 2024.

QUARCIONI, V. A.; CINCOTTO, M. A. Optmization of calculation method for determination of composition of hardened mortars of Portland cement and hydrated lime made in laboratory. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 10, p. 1069–1078, dez. 2006.

RAGAB MOHAMED, A.; HANSEN, W. Micromechanical modeling of crack-aggregate interaction in concrete materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, n. 5–6, p. 349–359, dez. 1999.

ULSEN, C. *et al.* Concrete aggregates properties crushed by jaw and impact secondary crushing. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 1, p. 494–502, jan. 2019.