CONCRETOS DE BAIXO CONSUMO DE CIMENTO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO: AVALIAÇÃO TÉCNICA E DE CUSTOS

Low-Cement Concrete with Coarse Recycled Concrete Aggregate: Technical Assessment and Cost Analyzes

Leonardo Camara Machado
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo| São Paulo, SP| leonardo.machado@lme.pcc.usp.br
Sérgio Cirelli Angulo
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo| São Paulo, SP| sergio.angulo@lme.pcc.usp.br

Resumo

*Este estudo avalia a resistência à compressão, a eficiência no uso do cimento (pelo índice de intensidade de ligante; kgcimento/resistência) e os custos de concretos com agregados graúdos reciclados de concreto (ARCO), usando fíler carbonático e aditivos dispersantes. A estratégia é usada para reduzir o consumo de cimento e produzir concreto de baixa emissão de carbono. Foram analisadas três composições: referência (N-REF), baixo consumo de cimento com agregado natural (N-RED) e baixo consumo de cimento com ARCO (R-RED). Os resultados indicam que o uso de fíleres e aditivos permitiu reduzir a intensidade de ligante necessária em 30% (9,8→6,8 kg cimento*m^{-3}*MPa^{-1}) no traço N-RED e 20% (9,6→7,8) no traço R-RED, em comparação com N-REF. A resistência característica à compressão do traço N-RED reduziu ~22% (32,8MPa→25,5MPa), e a do R-RED ~5,5% (25,5MPa→24,1 MPa), em relação ao N-RED. O traço R-RED apresentou uma redução de 10% no custo (R$311/m³→R$280/m³) em relação aos outros concretos. Esses resultados demonstram ser possível produzir concretos de resistência estrutural (>C20), com menor consumo de cimento, com 100% de ARCO e custo similar ao concreto convencional, ultrapassando os limites normativos atuais e contribuindo com a descarbonização do setor.*

Palavras-chave: *Concreto de baixo consumo de cimento, Agregado Reciclado de concreto, Redução de CO_2, Índice Intensidade de Ligante.*

Abstract

This study evaluates the compressive strength, cement use efficiency (through the binder intensity index; kgcement/strength), and costs of concretes with recycled concrete coarse aggregates (ARCO), using limestone filler and dispersing admixtures. This strategy aims to reduce cement consumption and produce low-carbon concrete. Three mix compositions were analyzed: reference (N-REF), low-cement consumption with natural aggregate (N-RED), and low-cement consumption with ARCO (R-RED). The results indicate that the use of fillers and admixtures allowed for a 30% reduction in binder intensity (9.8 → 6.8 kg cementm^{-3}MPa^{-1}) in the N-RED mix and 20% (9.6 → 7.8) in the R-RED mix compared to N-REF. The characteristic compressive strength of the N-RED mix decreased by ~22% (32.8 MPa → 25.5 MPa), while that of the R-RED mix decreased by ~5.5% (25.5 MPa → 24.1 MPa) relative to N-RED. The R-RED mix showed a 10% cost reduction (R$311/m³ → R$280/m³) compared to the other concretes. These results demonstrate the feasibility of producing structural-strength concretes (>C20) with lower cement consumption, using 100% ARCO, and at a cost similar to conventional concrete, exceeding current regulatory limits and contributing to the sector's decarbonization.

Keywords: *Low-cement concrete, Recycled concrete aggregate, CO_2 reduction, Binder Intensity Index.*

1. INTRODUÇÃO

O uso de agregados reciclados de concreto (ARCO) em concretos tem sido amplamente difundido (Angulo *et a*l., 2023; Angulo; Figueiredo, 2011; Brito; Poon; Baojian, 2019; Brito; Saikia, 2013a; Larrard; Colina, 2019; Machado *et al.,* 2024), com registros de diversas aplicações reais pelo mundo (Dao; Sedran; Larrard, 2014; Brito; Saikia, 2013a). No Brasil, pela norma NBR 15116 (ABNT, 2021), é permitido o uso em concretos não estruturais, e estruturais, com limitações (até 20% de substituição em massa, quando expostos em ambientes não agressivos, isentos de impureza). Contudo, estudos apontam que a limitação de 20% de substituição poderia ser ultrapassada inclusive para os concretos estruturais, quando há um bom controle das propriedades dos agregados e da composição do concreto (Machado *et al.,* 2024).

Devido à maior porosidade dos agregados reciclados (AR) em relação aos agregados naturais (AN) (Henry *et al.,* 2011; Khoury *et al.,* 2018), seu uso tende a reduzir a resistência a compressão dos concretos (Angulo; Figueiredo, 2011; Brito; Saikia, 2013b). Para mitigar esses efeitos, diversos estudos propõe o aumento do consumo de cimento, por adotarem simples práticas de substituição, sem uso de aditivos ou outras estratégias de melhoria de trabalhabilidade e redução do consumo de água (Machado *et al.,* 2024). Essa prática aumenta as emissões de CO_2 devido à produção do cimento (300-800kg.CO_2/t) (Ipcc - Intergovernamental Painel of Climate Change, 2006), reduzindo os benefícios ambientais dos AR.

Por outro lado, existem estratégias para reduzir o consumo de cimento para os concretos convencionais, como o uso de fíler carbonático, aditivos dispersantes, técnicas de empacotamento, entre outras (Damineli *et al.,* 2010; Damineli; Pileggi; John, 2013; Grazia *et al.,* 2020; Rebmann, 2011, 2017; Scrivener; John; Gartner, 2018; Grazia *et al.,* 2019) (também aplicáveis a concretos com AR). No Brasil, há aplicações reais de paredes de concreto de baixo consumo de cimento com 100% de agregado reciclado misto (ARM) (Redação, 2020); porém mais estudos são necessários, avaliando custos, propriedades mecânicas e eficiência no uso do cimento, também para ARCO.

Com relação a eficiência no uso do cimento, esta pode ser mensurada pelo Índice Intensidade de Ligante (IL), conceito já aplicado em concretos convencionais (Damineli et al., 2010; Machado, 2022; Quattrone *et al.,* 2014). Esse índice divide o consumo de ligantes (kg/m³) pela resistência à compressão (MPa), indicando quantos kg de ligante são necessários para alcançar 1 MPa de resistência (equação 1). Quanto menor o índice maior a eficiência e menor o impacto ambiental.

$$IL = \frac{Consumo\ de\ ligante\ (kg/m^3)}{Resistência\ à\ compressão\ (MPa)} \quad (1)$$

O objetivo deste trabalho é avaliar: a resistência de concretos de baixo consumo de cimento usando 100% agregados reciclados graúdos de concreto; a eficiência no uso do ligante através do índice intensidade de ligante (IL) e os custos, comparando-o com concretos de referência, usando ou não a estratégia do baixo consumo de cimento.

2. METODOLOGIA

Este trabalho foi conduzido, através de pesquisa experimental, em 3 etapas: 1) Caracterização dos materiais, 2) Formulação e avaliação dos concretos; 3) Análise de custos.

2.1. Caracterização dos materiais

Na produção dos concretos foi empregado cimento CP-V-ARI, fíler carbonático de granulometria inferior à do cimento (Profine 1) e outro de granulometria similar à do cimento (Procarb 5). Utilizou-se areia grossa artificial de britagem e areia média natural de rio. Entre os agregados graúdos, foram utilizados AN de rocha britada (granito) e ARCO (fornecido pela empresa Rafa Entulhos – São Paulo).

Para os finos, foi realizado ensaio de granulometria por difração laser (HELOS KR SYMPATEC entre 0,1µm e 350 µm), em dois conjuntos de lentes. Foi também realizada adsortometria de gás nitrogênio a 55K para medir a área específica pelo método BET. Para a areia, o material foi separado em duas frações através de uma única peneira de 1,18mm. A distribuição granulométrica da fração retida em 1,18mm foi determinada em equipamento de análise de imagem dinâmica (Qicpic Sympatec), com dispersão por gravidade a seco e com aquisição de 25 imagens/segundo. O material passante teve sua granulometria avaliada com metodologia similar a dos finos. A densidade das areias e finos foi avaliada por picnometria por intrusão gás hélio.

A granulometria, densidade, absorção e teor de finos dos agregados graúdos foi determinada respectivamente conforme as normas NBR NM 248 (ABNT, 2003a), NBR NM 53 (ABNT, 2009), e NBR NM 46 (ABNT, 2003b). A Tabela 1 abaixo apresenta o resultado da caracterização dos materiais.

Tabela 1 – Caracterização dos materiais.

Insumo	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)	Densidade (g/cm³)	Área específica (m²/g)	
CPV - ARI	1,92	11,06	29,54	3,14	1,15	
Profine 1	0,86	3,33	9,15	2,79	3,86	
Procarb 5	1,69	10,16	23,92	2,78	1,02	
Insumo	**D10 (µm)**	**D50 (µm)**	**D90 (µm)**	**Densidade (g/cm³)**	**Módulo de finura**	
Areia Natural	25	599	3103	2,70	2,47	
Areia Artificial	65	1418	5644	2,63	3,37	
Insumo	**D10 (mm)**	**D50 (mm)**	**D90 (mm)**	**Densidade (g/cm³)**	**Absorção de água 24h**	**Material pulverulento**
Agregado graúdo Natural	4,75	6,3	9,5	2,62	0,75%	Não realizado
Agregado graúdo Reciclado	4,75	9,5	12,5	2,27	5,5%	1,9%

2.2. FORMULAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS

Foram definidos 3 traços:

1) Concreto convencional com agregados naturais, (N-*REF*);
2) Concreto com baixo consumo de cimento com agregado natural; (*N-RED*);
3) Concreto com baixo consumo de cimento com *ARCO* graúdo. (*R-RED*).

Além dos materiais básicos, o concreto convencional continha aditivo dispersante polifuncional (PF), enquanto os de baixo consumo de cimento continham fíler carbonático para preencher os espaços vazios entre grãos de cimento (Profine 1), e para substituir parcialmente o cimento (Procarb 5). A substituição dos AN por ARCO foi feita em volume. Também foram utilizados aditivos superplastificante (SP) à base de policarboxilatos. No traço de cimento reduzido, a adoção do aditivo PF junto do SP visou a redução da quantidade total de SP no concreto, focando na redução de custos. Os traços foram ajustados experimentalmente para atingir classe de resistência de 30MPa e consistência na classe S100 no concreto referência. A Tabela 2 apresenta os consumos dos materiais utilizados.

Tabela 2 – Traços e características dos concretos produzidos

Insumos	Consumo de materiais (kg/m³)		
	N-REF	N-RED	R-RED
Cimento	329,9	206,0	202,3
Procarb 5	0,0	117,7	115,6
Profine 1	0,0	155,0	152,2
Areia Natural	325,2	314,6	309,0
Areia Artificial	479,6	464,0	455,7
Agregado Graúdo Natural (AN)	996,5	964,2	0,0
Agregado Graúdo Reciclado (*ARCO*)	0,0	0,0	811,2
Água total	219,1	182,6	197,1
[1]Consumo de água pré saturação *NA*	5,2	5,1	0,0
[1]Consumo de água de pré saturação *ARCO*	0,0	0,0	31,2
[2] % aditivo poli funcional	0,8%	2,3%	0,6%
[2] % aditivo Superplastificante	0,0%	2,0%	0,8%
[3] Relação água/cimento efetiva	0,65	0,86	0,86
Classe de consistência - *Slump* (cm)	S100	S160	S160

[1] - Água de Pré-Saturação calculada como: 70% da absorção de água(24h) * consumo de agregados.
[2] - % em relação a massa de cimento
[3] - Relação água cimento efetiva pode ser entendida como a quantidade de água total da mistura, subtraída da água absorvida pelos agregados graúdos, em relação à quantidade de cimento (MACHADO, 2022).

No traço *N-RED* foi utilizado um teor de aditivo (em %) superior ao previsto - além do mínimo necessário para atingir o abatimento esperado. Contudo, no traço *R-RED*, a dosagem foi ajustada para os valores originalmente planejados, sem diferenças significativas no abatimento em relação ao *N-RED*. O aumento da classe de consistência nos traços de cimento reduzido em relação à referência (S100 para S160) já era esperado devido a alteração na composição e volume de pasta com a inclusão dos dois tipos de fíller.

Foram moldados 6 corpos de prova de concreto para avaliação da resistência à compressão, mantidos em câmara úmida por 28 dias. Os ensaios foram realizados com o corpo de prova na condição saturada superfície seca. A resistência à compressão foi avaliada conforme a norma NBR 5739 (ABNT, 2018). A resistência característica estimada dos concretos ($f_{ck,est}$) foi calculada conforme NBR 12655 (ABNT, 2022) item 6.2.3.2 – (equação 2).

$$fck,est = 2 \times \frac{f_1+f_2+\cdots+f_{m-1}}{m-1} - f_m \quad (2)$$

Onde *m* é igual a n/2; f_1, f_2, ..., f_m são os valores das resistências dos exemplares, em ordem crescente. O índice Intensidade de Ligante (IL) foi calculado conforme equação 1.

2.3. Análise de custos

Os custos do cimento, areia, brita natural e aditivos foram obtidos a partir da tabela SINAPI - São Paulo (12/2024) – sem frete (Tabela 3). Para os ARCO, utilizou-se o valor médio de São Paulo, conforme indicado no relatório setorial de 2024 da Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON). Os custos de fíleres foram primeiramente obtidos em orçamentos com fornecedores do mercado. Contudo, atualmente, os fíleres disponíveis no mercado não são voltados para produção de concreto em larga escala, possuindo preços elevados (até 3 vezes o do cimento), inviabilizando seu uso. Assim, a melhor estratégia seria produção própria por moagem do calcário, reduzindo o custo para cerca de 70% do clínquer (70%*~R$200 por tonelada de clinquer – Valor consultado com cimenteira nacional). Considerando frete, estimou-se R$210/t na análise de custos como melhor cenário futuro. A Tabela 3 apresenta os custos utilizados na análise.

Tabela 3 – Custos levantados e estimados para os insumos

Código SINAPI – SP-12/2024	Descrição do insumo	Un. De medida	Preço mediano R$
132	Aditivo plastificante retardador de pega e redutor de água para concreto, líquido e isento de cloretos	L	7,31
43618	Aditivo superplastificante de pega normal para concreto, líquido e isento de cloretos	kg	18,40
367	Areia grossa - posto jazida/fornecedor (retirado na jazida, sem transporte) [1]	m^3	79,01
370	Areia media - posto jazida/fornecedor (retirado na jazida, sem transporte) [1]	m^3	78,00
1379	Cimento Portland composto CP II-32[2]	kg	0,60
4721	Pedra britada n. 1 (9,5 a 19 mm) posto pedreira/fornecedor, sem frete [1]	m^3	77,78
ABRECON 2025	Agregado graúdo reciclado posto usina/fornecedor, sem frente [1]	m^3	29,7
C usto de produção estimado	Filler carbonático	kg	0,21

[1] – No item 3.1, os volumes foram convertidos para massa adotando Massa unitária 1500kg/m³ para AN e 1000kg/m³ para ARCO
[2] – Por não existir Cimento CP V-ARI na tabela SINAPI, foi adotado o custo do Cimento CP II-32

Fonte: Indicado na tabela

3. RESULTADOS E ANÁLISES PARCIAIS

A Tabela 4 apresenta os resultados e análises parciais dos ensaios de resistência à compressão uniaxial. Em comparação com N-REF, o traço N-RED apresentou uma redução de ~22% (32,8 MPa → 25,5MPa) na resistência característica estimada à compressão ($f_{ck,est}$), e uma redução na intensidade de ligante (IL) de 30% (9,8 → 6,8 kgcimento*m^{-3}*MPa^{-1}), demonstrando o potencial dessas estratégias em reduzir o consumo de cimento (e as emissões de CO_2). No traço R-RED, o $f_{ck,est}$ reduziu apenas mais ~5,5% (~25,5MPa → ~24,1MPa) em relação ao *N-RED*, porém o IL ainda se manteve quase 20% mais baixo (9,6 → 7,8) do que a referência. A redução do IL no traço com cimento reduzido, mesmo com ARCO, pode ser atribuída à atuação combinada dos fíleres carbonáticos e dos aditivos na otimização da matriz cimentícia (melhor empacotamento e redução da demanda de água), reduzindo os efeitos da porosidade do ARCO na queda de resistência.

Tabela 4 - Resultados de resistência à compressão (*fc*), resistência média (*fcm*), resistência característica (*fck,est*), desvio padrão (*SD*), e IL médio.

Indicador avaliado	CP	N REF	N RED	R RED
Resistência à compressão – (fc) (Mpa)	1	32,9	25,9	24,1
	2	33,4	29,4	24,9
	3	33,5	29,7	25,0
	4	35,2	31,6	26,5
	5	35,8	32,1	26,9
	6	36,1	32,9	27,8
Resistência média (fcm) - (MPa)		34,5	30,3	25,9
Desvio padrão – (SD) - (MPa)		1,4	2,5	1,4
Resistência característica à compressão calculado (fck,est) – (MPa)[1]		32,8	25,5	24,1
Consumo de cimento (kg/m³)		329,9	206,0	202,3
IL - Intensidade de Ligante (kg cimento*m-3*MPa-1)		9,6	6,8	7,8

Apesar das reduções na classe de resistência característica do concreto (C30→C25→C20), os resultados mostram que é tecnicamente possível produzir, numa primeira aproximação, concretos com classe de

resistência estrutural (>C20) (ABNT, 2023), com baixo consumo de cimento (~200kg/m³) e com 100% de ARCO graúdo.

Resultados que ainda podem ser melhorados, otimizando a separação granulométrica dos agregados, e combinação de aditivos. A produção destes concretos ultrapassa limites normativos existentes, como o teor de substituição do ARCO de 100% e consumo de cimento mínimo de 250kg/m³, mas existem aplicações possíveis onde a exposição a quesitos de durabilidade não seja crítica, sendo possível uma discussão sobre a flexibilização de tais limites. por exemplo em elementos estruturais com baixa carga e Classe de agressividade ambiental fraca (I) (ABNT, 2023), como residências unifamiliares em zona rural.

3.1. Análise de custos

A Tabela 5 apresenta os custos para cada traço, multiplicando os consumos (Tabela 2) pelos custos (Tabela 3).

Tabela 5 – Custos para a produção dos concretos

Materiais	N-REF	N-RED	R-RED
Cimento	R$ 197,94	R$ 123,60	R$ 121,38
Procarb 5	-	R$ 24,72	R$ 24,28
Profine 1	-	R$ 32,55	R$ 31,96
Areia Natural	R$ 16,91	R$ 16,36	R$ 16,07
Areia Artificial	R$ 25,26	R$ 24,44	R$ 24,00
Agregado Graúdo Natural (AN)	R$ 51,67	R$ 50,00	-
Agregado Graúdo Reciclado (*ARCO*)	-	-	R$ 24,09
Aditivo poli funcional	R$ 19,29	R$ 9,04[1]	R$ 8,87
Aditivo SP	-	R$ 30,32[1]	R$ 29,78
Total (R$/m³)	R$ 311,08	R$ 311,02	R$ 280,43

[1] - Proporção corrigida de % de aditivo considerando o adotado em R-RED para melhor refletir a realidade.

O traço N-RED não apresentou alterações no custo de produção em relação ao N-REF, devido ao valor reduzido dos fíleres em relação ao cimento, admitindo o cenário de produção do fíler no local, demonstrando ser possível produzir concretos estruturais com AN, com menor IL e com custo similar a um concreto convencional. No traço com ARCO (R-RED), houve uma redução de 10% no custo do concreto (~R$311/m³→~R$280/m³) em relação N-RED, devido aos custos reduzidos do ARCO em relação ao AN.Contudo, essa análise não inclui os fretes, que poderiam impactar significativamente os custos gerando mais economia relacionada ao uso do ARCO, principalmente em regiões onde a extração ocorre com grandes distâncias de transporte (ex: areia para São Paulo pode percorrer mais de 100km).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou como a adoção de estratégias de redução do consumo de cimento (uso de aditivos e fíleres carbonáticos) e a substituição agregados naturais (AN) por 100% de agregados graúdos reciclados de concreto (ARCO) afetaram a resistência à compressão, a eficiência no uso do ligante (através do índice Intensidade de Ligante - IL) e o custo do concreto em relação à referência, podendo-se concluir que:

- Foi possível obter uma diminuição na IL de ~30% no traço com AN (N-RED), e em 20% com ARCO (R-RED), quando comparados com a referência (N-REF), demonstrando o potencial dessas ações nas reduções de CO_2 do setor.
- A redução na IL acompanha a uma diminuição da classe de resistência característica do concreto, passando de C30(N-REF), para C25(N-RED) e C20(R-RED).
- Foi possível produzir concretos com classes de resistência estrutural, com menor consumo de ligante (e menor emissão de CO_2), com custos similares ou até 10% menores (com ARCO) que o concreto convencional. Essa redução ainda pode ser maior caso sejam considerados os fretes.

Apesar da redução na resistência, ainda existem diversas aplicações estruturais possíveis para esses materiais (onde haja baixos riscos relacionados à durabilidade). Esses achados reforçam a importância de pesquisas alinhadas com as metas globais de circularidade e descarbonização do setor do concreto para a mitigação das mudanças climáticas. Mais estudos ainda são necessários, otimizando composições e custos, para que essas soluções sejam amplamente implementadas.

5. AGRADECIMENTOS

Leonardo Camara Machado agradece à CAPES pelo apoio financeiro e bolsa de mestrado e doutorado (processos 88887.506272/2020-00 e 88887.842127/2023-00). Sérgio Angulo agradece ao Conselho Nacional Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pela bolsa do processo 305564/2018-8. Os autores agradecem também à empresa Rafa Entulhos pela doação do material.

REFERÊNCIAS

ANGULO, S. C. et al. **MARE manual de aplicação do agregado reciclado**. 2. ed. [s.l.] Portal de Livros Abertos da USP, 2023.

ANGULO, S.; FIGUEIREDO, A. CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS. Em: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 2. ed. [s.l.] IBRACON, 2011. p. 1731–1767.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**. Determinação da composição granulométrica. , 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**. Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. , 2003b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53.** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR5739.** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15116.** Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento portland - Requisitos e métodos de ensaio. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655.** Concreto de cimento portland - preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimento. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118.** Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. 2023.

BRITO, J.; POON, C. S.; BAOJIAN, Z. **New Trends in Recycled Aggregate Concrete**. Switzerland: MDPI, 2019.

BRITO, J.; SAIKIA, N. Use of Construction and Demolition Waste as Aggregate: Properties of Concrete. Em: DE BRITO, J.; SAIKIA, N. (Eds.). **Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste**. Green Energy and Technology. London: Springer, 2013a. p. 229–337.

BRITO, J.; SAIKIA, N. **Recycled Aggregate in Concrete**. London: Springer London, 2013b.

DAMINELI, B. L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555–562, 1 set. 2010.

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Eco-efficient concrete: 2. Lower binder intensity eco-efficient concretes**. [s.l.] Woodhead Publishing, 2013.

DAO, D.T; SEDRAN, T; DE LARRARD, F. **Optimization of the Recycling of Concrete in Concrete Application to an Airport Slab**. Australian Society for Concrete Pavements (ASCP). **Anais**... Em: 12TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONCRETE ROAD. Prague, Czech Republic: 23 set. 2014. Disponível em: <https://concretepavements.com.au/resource/optimization-of-the-recycling-of-concrete-in-concrete-application-to-an-airport-slab/>. Acesso em: 24 jan. 2022

GRAZIA, M. T. et al. Evaluation of the fresh and hardened state properties of low cement content systems. **Magazine of Concrete Research**, v. 72, n. 5, p. 232–245, mar. 2020.

HENRY, M. et al. EFFECT OF RECYCLED AGGREGATE QUALITY ON VARIATION AND ESTIMATION OF CONCRETE STRENGTH. **undefined**, 2011.

IPCC - INTERGOVERNAMENTAL PAINEL OF CLIMATE CHANGE. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 3 - Chapter 2 - Industrial Processes and Product Use**. [s.l.] IPCC, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/find_ef.php?orderby=source_data&refresh=false>. Acesso em: 9 jan. 2022.

KHOURY, E. et al. Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic variability. **Construction and Building Materials**, v. 175, 16 maio 2018.

LARRARD, F. DE; COLINA, H. **Concrete Recycling - Research and Practice**. Florida: CRC Press Taylor & Francis Group, 2019.

MACHADO, L. C. **Concretos com agregados reciclados de concreto: eficiência no uso do cimento.** text—[s.l.] Universidade de São Paulo, 19 dez. 2022.

MACHADO, L. C. et al. Simple way to model the mechanical properties of concretes with recycled concrete aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 84, p. 108213, 1 maio 2024.

QUATTRONE, M. et al. **Influence of recycled aggregate in binder intensity of concretes**. . Em: CONCRETE INNOVATION CONFERENCE. Oslo: 2014.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. Mestrado em Estruturas—São Carlos: Universidade de São Paulo, 6 maio 2011.

REBMANN, M. S. **Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados.** Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana—São Paulo: Universidade de São Paulo, 20 jan. 2017.

REDAÇÃO, D. **Jetra Construtora: concreto sustentável com agregados reciclados - ArqXp**. Disponível em: <https://arqxp.com/jetra-construtora-concreto-sustentavel-com-agregados-reciclados/>. Acesso em: 4 fev. 2025.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, Report of UNEP SBCI WORKING GROUP ON LOW-CO2 ECO-EFFICIENT CEMENT-BASED MATERIALS. v. 114, p. 2–26, 1 dez. 2018.

T. DE GRAZIA, M. et al. Investigation of the use of continuous particle packing models (PPMs) on the fresh and hardened properties of low-cement concrete (LCC) systems. **Construction and Building Materials**, v. 195, p. 524–536, 20 jan. 2019.