



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**ECOEFIÊNCIA DE CONCRETOS COM AGREGADOS GRAÚDOS
RECICLADOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

RAFAELA GOULART GOMES OLIVEIRA

Foz do Iguaçu
2023



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO
(ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**ECOEFIÊNCIA DE CONCRETOS COM AGREGADOS GRAÚDOS
RECICLADOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

RAFAELA GOULART GOMES OLIVEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Edna Possan
Coorientadora: Prof. Dra. Giovanna Patrícia Gava Oyamada

Foz do Iguaçu
2023

RAFAELA GOULART GOMES OLIVEIRA

**ECOEFIÊNCIA DE CONCRETOS COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof. Dra. Edna Possan
UNILA

Coorientadora: Prof. Dra. Giovanna Patrícia Gava Oyamada
UNIOESTE

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral
UFC

Prof. Dra. Heloisa Fuganti Campos Marques
UFPR

Prof. Dra. Ana Carolina Parapinski dos Santos
UNILA

Foz do Iguaçu, 19 de abril de 2023.

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

O48e

Oliveira, Rafaela Goulart Gomes.

Ecoeficiência de concretos com agregados graúdos reciclados de construção e demolição / Rafaela Goulart Gomes Oliveira. - Foz do Iguaçu, 2023.

109 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território (ILATIT), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECI).

Orientador: Edna Possan.

Coorientador: Giovanna Patrícia Gava Oyamada.

1. Concreto. 2. Gestão integrada de resíduos sólidos. 3. Demolição. 4. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). I. Possan, Edna. II. Oyamada, Giovanna Patrícia Gava. III. Título.

CDU 691

Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu
irmão. Vocês são tudo para mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por seu infinito amparo em todos os momentos.

Aos meus pais e ao meu irmão, razões da minha vida, por serem minha base forte e estarem sempre ao meu lado. Em especial à minha mãe, Professora Elrismar, pelas contribuições acadêmicas. Seu talento e amor pela pesquisa, são inspirações para mim.

Às amigas irmãs que a vida me deu, Isabella e Heloá, por todo o cuidado e amizade de sempre. A companhia, os conselhos e as risadas com vocês sempre foram injeções de ânimo para prosseguir.

Aos amigos, Gabriela, Eduardo, Carlos, Deborah, Thais e Amanda, pelos papos, roles, jantas, desabafos e ajuda no laboratório. A amizade de vocês tornou o mestrado muito mais leve e divertido.

Às meninas do concreto, Natália, Tamires, Tácila e Juliana, pela parceria no trabalho árduo no laboratório.

À minha orientadora desde 2018, Edna, por todos os ensinamentos, oportunidades, incentivos e apoio. Seu entusiasmo com a pesquisa e seu jeito alegre e gentil de ensinar fazem toda a diferença.

À minha coorientadora Giovanna, pelas imensas contribuições, que viabilizaram e enriqueceram esse trabalho.

Aos técnicos do laboratório da UNILA e UFC, Andrey, Caio, Dalila, Wagner, Luciano, Paulo Vitor e Helano, aos engenheiros e colaboradores de Itaipu, Fabio, Maurício, Hugo e Arnaldo e ao professor Antônio Eduardo, pelo apoio no trabalho experimental.

À CAPES pela bolsa de estudos. E à UNILA e ao PPGECI pelo auxílio concedido para apoio nas viagens necessárias para realização da pesquisa.

À ITAIPU BINACIONAL e à Universidade Federal do Ceará (UFC) pela colaboração para os ensaios da pesquisa.

Ao Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (CEASB) e à União Dinâmica de Faculdades Cataratas (UDC), pelo empréstimo de equipamentos.

À Mineromix Concreto, à Coneresuper de Cascavel, à Future Reciclagem Inteligente e à MC-bauchemie, pela doação de materiais.

A todos, o meu muito obrigada.

*Os dias prósperos não vêm por acaso; nascem de muita
fadiga e persistência. **Henry Ford***

RESUMO

A reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), para a produção de agregados reciclados (RA) para concreto, é uma alternativa que promove a economia circular, reduzindo o descarte de resíduos sólidos e o consumo de matéria-prima virgem. Porém, geralmente, o uso de agregados reciclados demanda maior consumo de cimento para a manutenção das propriedades mecânicas do concreto, elevando as emissões de CO_2 associadas à produção do produto, o que não é de interesse do ponto de vista de desempenho econômico e ambiental. Neste contexto, esta pesquisa produziu concretos com agregados reciclados de RCD, visando atender desempenho ambiental, técnico e econômico. Foi avaliada a influência do teor (0%, 20% e 30%) e do tipo de RA (misto e de concreto), da relação água/cimento (0,45, 0,55 e 0,65) e do tipo de cimento (CP V e CP IV), nas propriedades mecânicas e nos indicadores de ecoeficiência e de fluidez do concreto. Misturas proporcionadas pelo método IPT/EPUSP foram utilizadas como referência e como base para proporcionar os concretos com RA pelo método de dosagem do Volume Equivalente de Argamassa (EMV). Foram conduzidos estudos de reologia e ensaios mecânicos para avaliar as propriedades dos concretos produzidos. O desempenho ambiental foi avaliado a partir dos indicadores de ecoeficiência, índice de ligante - IL ($Kg_Cimento \cdot m^{-3} \cdot MPa^{-1}$) e índice de Carbono - IC ($Kg_CO_2 \cdot m^{-3} \cdot MPa^{-1}$). O desempenho técnico no estado endurecido foi avaliado por ensaios de resistência à compressão - f_c (MPa) e módulo de elasticidade estático - EE (GPa), e no estado fresco, por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone e de dois indicadores de fluidez, tensão de escoamento - τ_0 (Nm) e viscosidade plástica - μ (Nm/rpm). A avaliação do desempenho econômico foi realizada a partir do custo dos concretos produzidos (R\$/m³ e R\$/MPa). Como resultado, verifica-se que o Agregado Reciclado de Concreto (CRA) apresentou melhor resultado do que o Agregado Reciclado Misto (MRA). Concretos de relação a/c 0,45 e 0,55 com 30% de RA resultaram em índices ambientais similares e ligeiramente melhores que concretos produzidos com agregado natural. O tipo de cimento influenciou significativamente o índice de carbono, com melhores índices para concretos produzidos com cimento CP IV, em função do menor teor de clínquer. A análise de variância ANOVA confirma a influência estatística do teor de substituição, da origem dos agregados, da relação a/c e do tipo de cimento, sobre a resistência à compressão e os indicadores de ecoeficiência dos concretos. O método de dosagem EMV propicia a diminuição do consumo de cimento conforme o aumento do teor de RA empregado no proporcionamento, o que reduz o teor de argamassa e o abatimento dos concretos. Para alcançar o abatimento alvo (120 ±30 mm), os concretos com RA demandaram aditivo de maior eficiência além de maior consumo do produto. Também se fez necessário ajuste do teor de argamassa dos concretos com RA, não sendo considerada a redução total de cimento sugerida pelo método EMV. Em função da diminuição do consumo de cimento das misturas com RA, houve redução nos custos por m³ dos concretos com RA. A partir do ajuste do consumo de cimento proposto pelo método EMV e com a utilização de aditivo superplastificante, mesmo em concretos de relação a/c intermediária (0,55) e RA misto, foi possível minimizar as perdas de resistência e custos por MPa em relação aos concretos com agregado natural. Além de obter indicadores ambientais similares aos concretos de referência e inferiores aos indicadores encontrados na literatura para concretos produzidos com MRA.

Palavras-chave: Concretos ecoeficientes; Resíduos de construção e demolição; Indicadores de ecoeficiência; Índice de ligante; Índice de carbono.

ABSTRACT

The recycling of the Construction and Demolition Waste (CDW), to produce recycled aggregates (RA) for concrete, is an alternative that promotes the circular economy, reducing the disposal of solid waste and the consumption of virgin raw materials. However, in general, the use of recycled aggregates requires a higher cement consumption for the maintenance of the mechanical properties of the concrete, increasing the CO_2 emissions associated with the production of the product, which is not of interest from the point of view of the economic and environmental performance. In this context, the present research provided concretes with recycled aggregates of CDW, intending to meet the environmental, technical and economic performance. The influence of the content (0%, 20% e 30%) and type of CDW (mixed and concrete), the water/cement ratio (0,45 0,55 e 0,65) and the type of cement (CP V e CP IV), in the mechanical properties and on the eco-efficient indicators and on the concrete fluidity indicators. Mixtures provided by the IPT/EPUSP, were used as a reference and as a basis for proportion concrete with RCA by the Equivalent Mortar Volume (EMV) method. Rheological studies and mechanical tests were carried out for evaluating the properties of the produced concretes. The environmental performance was evaluated from the eco-efficient indicators, Binder Index - IL ($Kg_Cimento/m^3/MPa$) and Carbon index - IC ($Kg_CO_2/m^3/MPa$). The technical performance in the hardened state were evaluated by tests of compressive strength - f_c (MPa) and static elastic modulus - EE (GPa); in the fresh state, by means of slump test and of two fluidity indicators, yield stress - τ_0 (Nm) and plastic viscosity - μ (Nm/rpm). The evaluation of the economic performance was carried out based on the cost of the produced concretes ($R\$/m^3$ and $R\$/MPa$). As a result, it appears that the Recycled Concrete Aggregate (RCA) presented better results than the Mixed Recycled Aggregate (MRA). Concretes with w/c ratios of 0.45 and 0.55 with 30% RA resulted in similar and slightly better environmental indices than concrete produced with natural aggregate. The type of cement significantly influenced the carbon index, with better indexes for concrete produced with CP IV cement, due to the lower clinker content. The ANOVA analysis of variance confirms the statistical influence of the replacement content, the origin of the aggregates, the w/c ratio and type of cement, on the compressive strength and on the eco-efficiency indicators of the concretes. The EMV dosing method leads to a decrease in cement consumption as the RA content used in proportioning increases, which reduces the mortar content and the slump of concrete. To reach the target slump (120 ± 30 mm), the RA concretes required a more efficient additive in addition to a higher consumption of the product. It was also necessary to adjust the mortar content of the concretes with RA, not considering the total cement reduction suggested by the EMV method. Due to the decrease in cement consumption of mixes with RA, there was a reduction in costs per m^3 of concretes with RA. From the adjustment of cement consumption proposed by the EMV method and with the use of superplasticizer additive, even in concrete with intermediate w/c ratio (0.55) and mixed RA, it was possible to minimize strength losses and costs per MPa in compared to concrete with natural aggregate. In addition to obtaining environmental indicators similar to the reference concretes and lower than the indicators found in the literature for concretes produced with MRA.

Keywords: Eco-efficient concretes; Construction and demolition waste; Eco-efficiency indicators; Binder index; Carbon index.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Indicadores da literatura a) Índice de Ligante (IL) x Resistência à compressão (f_c) (nacional); b) IL x f_c (Internacional); c) Índice de Carbono (IC) x f_c (mundial).	21
Figura 2 – Intensidade de Ligante x Resistência à compressão de concretos com AGR.....	24
Figura 3 – Índice de carbono x Resistência à compressão de concretos com AGR.....	26
Figura 4 – Curvas de fluxo dos fluidos – Tensão de cisalhamento (τ) x taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$)	35
Figura 5 – Fluxograma da pesquisa	40
Figura 6 - Curvas Granulométricas dos a) cimentos b) agregados graúdos natural e reciclados (ARM e ARC) e c) agregado miúdo empregados.....	43
Figura 7 - Análise termogravimétrica (TG) do a) cimento CP V ARI b) CP IV	44
Figura 8 – Reômetro PHESO e haste de mistura.....	49
Figura 9 – Procedimento de mistura do concreto e ciclo de cisalhamento do ensaio de reometria	50
Figura 10 – Detalhamento da etapa 11 (Figura 9) – ciclo de cisalhamento.....	50
Figura 11 – Resistência à compressão ao longo do tempo para concretos de diferentes a) relações a/c; e b) tipos de cimento e origem de agregado reciclado (misto - MRA ou de concreto - CRA).....	54
Figura 12 – Módulo de elasticidade x Resistência à compressão (28 dias)	55
Figura 13 – Propriedades mecânicas x Teor de substituição para a) diferentes a/c (CP V; RA misto), b) origem de agregado reciclado (a/c=0,55; CP V) e c) tipo de cimento (RA misto; a/c = 0,55), aos 28 dias.....	56
Figura 14 – a) Índice de carbono x f_c (MPa); b) Índice de ligante x f_c (MPa), aos 28 dias.....	60
Figura 15 – Índices de Machado (2020) x Resultados da pesquisa: a) Índice de ligante x f_c (MPa); b) Índice de carbono x f_c (MPa) aos 28 dias	62
Figura 16 – Índices de Ligante e Carbono x Teor de substituição para a) diferentes a/c (CP V, RA misto), b) origem de agregado reciclado (a/c=0,55; CP V) e c) tipo de cimento (RA misto; a/c = 0,55), aos 28 dias.....	62
Figura 17 – Ajuste de Bingham das curvas Torque x Velocidade dos concretos	66
Figura 18 – Parâmetros reológicos e Abatimento x Teor de RA (Bingham)	67
Figura 19 – Custos totais das misturas de concreto a) R\$/m ³ ; b) R\$/MPa.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Concretos com menores IL utilizando agregado graúdo reciclado (AGR) para faixa de resistência à compressão de 40 a 60 ± 2 MPa.....	23
Tabela 2 – Concretos com menores IC utilizando agregado graúdo reciclado.....	25
Tabela 3 – Diretrizes para produção de concretos ecoeficientes com RA.....	27
Tabela 4 – IC e IL de concretos utilizando agregado graúdo reciclado misto para faixas de resistência à compressão de 20 a 50 ± 3 MPa	28
Tabela 5 – Modelos reológicos x Fluidos - Equacionamento.....	35
Tabela 6 – Modelos Reológicos.....	37
Tabela 7 - Variáveis do projeto experimental.....	41
Tabela 8 - Ensaio de caracterização físico-química dos materiais	42
Tabela 9 – Espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) dos cimentos e argamassa residual	43
Tabela 10 - Material necessário (Kg) para produção de 1m ³ de concreto	47
Tabela 11 - Proporcionalamento do concreto, em massa.	48
Tabela 12 – Normas e procedimentos de ensaio no estado fresco e endurecido	48
Tabela 13 – Informações de compra e custo dos materiais	51
Tabela 14 – Emissões de CO ₂ dos materiais constituintes das misturas em estudo.....	52
Tabela 15 – Resultados médios e desvio padrão para o Módulo de elasticidade (GPa) e Resistência à compressão axial (MPa) dos concretos.....	55
Tabela 16 – Resultados de Índice de carbono (IC) e ligante (IL) aos 28 dias	59
Tabela 17 – Índice de carbono (IC) e ligante (IL) teóricos e experimental, para concretos de diferentes características e classes de resistência	61
Tabela 18 – ANOVA ¹ considerando as variáveis de controle tipo de cimento, teor e tipo de agregado, idade e suas interações nas variáveis de resposta	65
Tabela 19 – Informações de mistura e parâmetros de Fluidez.....	66
Tabela 20 – Custos das misturas	68
Tabela 21 – Melhores resultados da pesquisa experimental.....	71
Tabela 22 – Resistência à compressão, índices ambientais, custos por MPa, perdas (-) e ganhos (+) em percentual.....	72
Tabela 23 – Resistência à compressão, índices ambientais, custos por MPa, perdas (-) e ganhos (+) em percentual.....	72
Tabela 24 – IC e IL teóricos para concretos de diferentes características e classes de resistência.....	73
Tabela 25 – Emissões de CO ₂ em Kg. CO ₂ /m ³ , por material.....	89
Tabela 26 - Teor de argamassa (α) e abatimento das misturas de concreto.....	89
Tabela 27 – Resultados ANOVA ¹	90
Tabela 28 – Valores mínimos, médios e máximos dos indicadores obtidos por Machado (2020) para concretos com agregados graúdos reciclados (AGR)	92
Tabela 29 – Valores mínimos, médios e máximos dos indicadores obtidos por Machado (2020) para concretos com 20 a 30% de agregados graúdos reciclados (AGR)	103
Tabela 30 – Valores mínimos, médios e máximos dos indicadores obtidos por Machado (2020) para concretos com 20 a 30% de AGR e resistência de 20 a 50 ± 3 MPa.....	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RCD	Resíduos de construção e demolição
EMV	Método do volume equivalente de argamassa
IL	Índice de Ligante
IC	Índice de Carbono
τ_0	Tensão de escoamento
μ	Viscosidade plástica
f_c	Resistência à compressão
EE	Módulo de elasticidade
γ	Massa específica
PAIC	Pesquisa anual da indústria da construção
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
RCC	Resíduos de construção civil
RCA-C	Concreto com agregado graúdo reciclado
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
RA	Agregados reciclados de resíduos de construção e demolição
MRA	Agregado reciclado misto
CRA	Agregado reciclado de concreto
OVA	Agregado natural virgem original
RM	Argamassa residual
NM	Argamassa fresca
NA	Agregado Natural
TM	Volume total de argamassa
NAC	Concreto com agregado natural
TG	Análise termogravimétrica
BET	Área superficial específica
FRX	Espectrometria por fluorescência por raio-x
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
UFC	Universidade Federal do Ceará
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
UFG	Universidade Federal de Goiás
CRTI	Centro Regional de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da UFG
LADEMA	Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
a/c	Relação água/cimento
ANOVA	Análise de Variância
AGR	Agregado graúdo reciclado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	15
1.2 PERGUNTA DA PESQUISA	15
1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	16
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
2 CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO DE RCD	17
2.1 INTRODUÇÃO	17
2.2 ECOEFICIÊNCIA DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM RA	20
2.3 MÉTODO DO VOLUME EQUIVALENTE DE ARGAMASSA (EMV)	31
2.4 REOLOGIA DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM RA	33
2.4.1 Ensaio de Reometria	36
2.4.2 Fatores que influenciam na reologia do concreto com RA	37
2.4.2.1 <i>Relação água/cimento, teor de pasta e aditivo superplastificante</i>	38
2.4.2.2 <i>Cimento e Sílica Ativa</i>	38
2.4.2.3 <i>Tempo e Temperatura</i>	38
2.4.2.4 <i>Agregados e estado de saturação</i>	39
3 MÉTODO	40
3.1 DEFINIÇÃO DO PROJETO EXPERIMENTAL	40
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	41
3.3 PROPORCIONAMENTO DAS MISTURAS	44
3.4 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS	48
3.5 REOMETRIA	49
3.6 MÉTODO DE ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1 ANÁLISE DE INDICADORES MECÂNICOS	54
4.2 ANÁLISE DE INDICADORES AMBIENTAIS	59
4.3 ANOVA – FC, IC E IL	64
4.4 ANÁLISE DE INDICADORES DE FLUIDEZ	65
4.5 ANÁLISE DE CUSTOS	68
4.6 ANÁLISE GERAL	71
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
5.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	76
REFERÊNCIAS	77
APÊNDICE A – TABELAS COMPLEMENTARES	89
ANEXO A – TABELAS COMPLEMENTARES	92

1 INTRODUÇÃO

A Pesquisa Anual da Indústria da Construção (PAIC), realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), mostra que o setor da construção civil Brasileiro teve alta nos últimos 10 anos (2011-2020) nos segmentos de construção de edifícios (5,4%) e serviços especializados para construção (3,5%). Esse crescimento do setor contribui para a elevação do quantitativo de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). No Brasil, foram coletados no ano de 2022, cerca de 81,8 milhões de toneladas de RSU (ABRELPE, 2022).

Os resíduos produzidos pela construção civil são denominados Resíduos de Construção e Demolição (RCD) ou Resíduos de Construção Civil (RCC). Esses resíduos são constituídos por diversos materiais, como argamassas, telhas, concreto, cerâmicas etc. (CARNEIRO et al., 2001), correspondendo a mais da metade dos RSU. Em 2021, foram coletados 48 milhões de toneladas de RCD (ABRELPE, 2022), com crescimento de aproximadamente 2,1% em relação ao ano anterior, uma vez que em 2020 foram coletados 47 milhões de toneladas de RCD (ABRELPE, 2021). Os RCD podem causar problemas à saúde dos seres humanos e ao meio ambiente, pois, sua gestão inadequada pode contaminar o solo e o lençol freático (MAGALHÃES; DANILEVICZ; SAURIN, 2017; WU; YU; SHEN, 2017), devendo ser devidamente manejados, preferencialmente beneficiados para a produção de novos agregados.

A indústria da construção civil também provoca elevada extração de recursos naturais e emissões de CO_2 (FEIZ et al., 2015; SANTOS; LEITE, 2018). O setor é responsável por cerca de 50% do total de recursos naturais extraídos no planeta (JOHN, 2017) e, por aproximadamente, 5% a 8% das emissões mundiais de gases de efeito estufa (SNIC, 2019), oriundas, principalmente, do processo produtivo do cimento (FEIZ et al., 2015). Considerando a crescente preocupação com o desenvolvimento sustentável e com a aplicação da economia circular, a implementação de regulamentações a respeito da gestão e aproveitamento eficaz dos resíduos se faz necessária (MATIAS, 2020). Diversos pesquisadores têm estudado a aplicação dos RCD como matéria-prima em produtos da construção civil, pois além de amenizar os impactos ambientais (NENO; BRITO; VEIGA, 2014; SANTOS; LEITE, 2018; XUAN; ZHAN; POON, 2016), promove ganhos econômicos por produzir novos materiais com o que era resíduo (KOCHEM, 2016). O aproveitamento dos RCD para produção de agregados reciclados miúdos e graúdos para concreto, por meio de processamento mecânico, é uma das aplicações mais promissoras para contribuir

com a sustentabilidade do setor (GONZÁLEZ et al., 2021).

Porém, devido às características intrínsecas desses agregados, constata-se que a utilização de agregado reciclado na produção de concretos pode conduzir a perdas de fluidez (AMARIO et al., 2017, 2021; AMER et al., 2016; MATIAS et al., 2013), de resistência mecânica, (BAHRAMI et al., 2020; MACHADO, 2020; ZONG; FEI; ZHANG, 2014) e de durabilidade (LOVATO et al., 2012) quando comparado aos concretos produzidos com agregado natural. Por isso, em muitas aplicações com agregados reciclados, para manutenção do desempenho, tem-se a elevação do consumo de cimento da mistura (VIEIRA; FIGUEIREDO; JOHN, 2020). Sabendo que a produção de cimento é responsável por elevadas emissões de CO_2 e que seu custo é maior em relação aos agregados (VIEIRA; FIGUEIREDO; JOHN, 2020), é possível que essa necessidade de aumento do consumo de cimento prejudique os possíveis ganhos da utilização de agregados reciclados, o que não é desejável.

Neste sentido, o proporcionamento de materiais à base de cimento considerando os princípios da ecoeficiência pode contribuir para que esses atendam aos requisitos de desempenho (comportamento em uso), sejam economicamente viáveis, socialmente justos e ambientalmente adequados (reduzida pegada de carbono, energia, água e geração de resíduos). Neste estudo, considera-se concreto ecoeficiente o material que atende ao desempenho requerido no estado fresco (trabalhabilidade) e endurecido (resistência à compressão¹) e apresenta baixa pegada de carbono com custo otimizado, sendo desejável a promoção da economia circular por meio da incorporação de resíduos.

Dentre as alternativas para contornar o problema da elevação do consumo de cimento, em concretos com agregado reciclado, pode estar a utilização de métodos de dosagem específicos. Fathifazl et al. (2009) afirmam que a utilização do método do Volume Equivalente de Argamassa (EMV), pode diminuir o consumo de cimento da mistura de concreto produzida com agregado reciclado (RA), mantendo o desempenho mecânico. Diferente dos métodos convencionais, o EMV leva em conta o teor de argamassa residual aderida nos agregados reciclados graúdos, realizando um ajuste no teor de agregado natural e argamassa do concreto com RA. Sem esse ajuste, esse concreto teria um teor total de argamassa maior, do que se fosse produzido com agregado natural (NA), o que pode ser a causa das propriedades mecânicas inferiores (FATHIFAZL et al., 2009).

¹ A depender do uso, outras propriedades podem ser requeridas.

Machado (2020), por meio de revisão sistemática da literatura com trabalhos que produziram concretos com agregados reciclado nos últimos trinta anos (1990-2020), propôs diretrizes teóricas e metas para melhorar a ecoeficiência destes concretos. As diretrizes constituem um conjunto de orientações voltadas à produção de concretos ecoeficientes. Já as metas, são os valores alvo desejáveis de indicadores de ecoeficiência, para os concretos produzidos seguindo as diretrizes (MACHADO, 2020). Os indicadores de ecoeficiência são dados em unidades de $Kg.Cimento.m^{-3}.MPa^{-1}$ e $Kg.CO_2.m^{-3}.MPa^{-1}$ e representam respectivamente a eficiência do concreto em termos de consumo de ligante e emissão de carbono (DAMINELLI et al., 2010).

Dentre as diretrizes estabelecidas por Machado (2020) estão a utilização de agregado reciclado de concreto (CRA), adições minerais e cimentos com menor teor de clínquer e de alta resistência, além de limitar o consumo de ligantes, melhorar o empacotamento das misturas, trabalhar com concretos de elevada resistência à compressão, entre outras. Estas diretrizes possuem caráter teórico-científico e estão associadas à obtenção da meta de índice de ligante (IL) de $7 Kg.Cimento.m^{-3}.MPa^{-1}$ e índice de carbono (IC) de $5 Kg.CO_2.m^{-3}.MPa^{-1}$, sendo necessário avaliá-las experimentalmente a fim de verificar se podem efetivamente conduzir à produção de concretos ecoeficientes. O estudo não considera questões relacionadas ao estado fresco, especialmente se a fluidez dos concretos é adequada para uma dada aplicação prática.

Os concretos analisados por Machado (2020), que conduziram a estes valores de indicadores, são majormente misturas de elevada resistência (baixa relação a/c). No entanto, 64% dos concretos produzidos no mundo possuem resistência à compressão inferiores a 37 MPa (ERMCO, 2020), sendo necessário também avaliar a ecoeficiência para misturas deste nível de resistência, sendo este o objeto deste estudo.

Também, faz-se necessário considerar a aplicabilidade destes concretos, uma vez que a redução no teor de argamassa fresca do concreto proposta pelo EMV pode conduzir a desafios no que diz respeito às propriedades no estado fresco (HAYLES; SANCHEZ; NOEL, 2018).

Tendo isso em vista, o presente trabalho avaliou os indicadores de ecoeficiência de concretos com agregados reciclados mistos e de concreto, utilizando o método de dosagem do EMV (FATHIFAZL et al., 2009), considerando propriedades no estado fresco e endurecido. Os concretos produzidos visam atender aos requisitos de desempenho nos estados fresco e endurecido (fluidez e propriedades mecânicas), possuir baixa pegada de carbono (consumo de cimento otimizado), promover a economia circular

(uso de agregados reciclados), sendo também economicamente viáveis. Para a avaliação desses concretos, foram utilizados ensaios de caracterização mecânica (resistência à compressão e módulo de elasticidade), indicadores de fluidez (tensão de escoamento - τ_0 (Nm) e viscosidade plástica - μ (Nm/rpm)), indicadores de ecoeficiência (índice de ligante - IL ($Kg.Cimento.m^{-3}.MPa^{-1}$) e índice de carbono - IC ($Kg.CO_2.m^{-3}.MPa^{-1}$)) e de custo (R\$/m³ e R\$/MPa).

1.1 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

Avaliar os indicadores de ecoeficiência de concretos com agregados reciclados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), considerando propriedades no estado fresco e endurecido.

Em decorrência do objetivo geral, tem-se como objetivos específicos:

- a) Avaliar o efeito do teor de substituição e da origem do agregado graúdo reciclado (misto ou concreto) nas propriedades mecânicas e nos indicadores de ecoeficiência;
- b) Analisar o efeito do tipo do cimento nos indicadores de ecoeficiência dos concretos;
- c) Avaliar o efeito do teor de substituição e da origem do agregado graúdo reciclado (misto ou concreto) nos indicadores de fluidez.

1.2 PERGUNTA DA PESQUISA

Essa pesquisa buscou responder a seguinte pergunta: É possível produzir concretos com agregados reciclados de construção e demolição, de resistência à compressão inferior a 50 MPa, com indicadores de ecoeficiência melhores do que os dos concretos convencionais?

A partir desse questionamento levantou-se a seguinte hipótese: a partir da consideração de diretrizes teóricas para melhoria da ecoeficiência, propostas na literatura, associado a métodos de proporcionamento que considerem as particularidades dos agregados reciclados, pode-se produzir concretos menos emissivos atendendo ao desempenho requerido no estado fresco e endurecido.

1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

No que se refere ao desempenho dos concretos produzidos, esse estudo avalia as seguintes propriedades: fluidez, resistência à compressão e módulo de elasticidade. No contexto de desempenho ambiental o estudo avaliará apenas a pegada de carbono. A variabilidade inerente aos agregados reciclados e demais materiais utilizados na produção do concreto, não será avaliada. Os concretos produzidos, são aplicáveis à classe de agressividade II da NBR 6118 (ABNT, 2014).

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho apresenta cinco capítulos. No Capítulo 1, tem-se a introdução e justificativa da pesquisa, também são apresentados os objetivos, a pergunta e as limitações do estudo.

No Capítulos 2 é apresentada a revisão de literatura tratando sobre agregados reciclados de RCD, ecoeficiência de concretos produzidos com agregados reciclados de RCD, assim como indicadores, diretrizes e metas para alcançá-la. Apresenta-se também o método de dosagem do Volume Equivalente de Argamassa (EMV) e por fim, trata-se sobre a reologia de concretos produzidos com agregado reciclado, principalmente no que diz respeito à influência das características intrínsecas desses agregados nessa propriedade.

No Capítulo 3, apresenta-se a metodologia empregada no trabalho, que compreende em definir o projeto experimental, descrever os procedimentos de caracterização dos materiais, proporcionamento e produção das misturas, realização dos ensaios para avaliar fluidez, resistência à compressão e módulo de elasticidade, bem como explicitar como os resultados foram analisados (gráficos de regressão e análise estatística ANOVA). Em seguida, no Capítulo 4, foram apresentados os resultados e discussões da pesquisa e no Capítulo 5 as conclusões e sugestões para estudos futuros.

2 CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO DE RCD

2.1 INTRODUÇÃO

Por apresentar propriedades mecânicas adequadas a diversos usos na construção civil, durabilidade e baixo custo, o concreto de Cimento Portland é um produto muito utilizado no setor da construção (VALIPOUR et al., 2014). São produzidas, por ano, cerca de 10 bilhões de toneladas de concreto no mundo, assim, para sua produção, tem-se grande extração de recursos naturais (agregados), considerável emissão de CO_2 (decorrente do processo produtivo do cimento), além de elevada produção de resíduos (ANDREW, 2019; SILVA; BRITO; DHIR, 2018).

Nesse contexto, para que o uso do concreto como material de construção seja viável em longo prazo, é preciso produzi-lo de forma sustentável, utilizando matérias-primas recicláveis e tecnologias que permitam sua fabricação com menor impacto ambiental (PROSKE et al., 2013). Nessa perspectiva, o setor da construção civil tem buscado alternativas para se adequar à produção de materiais com baixa emissão de carbono, dentre elas, o desenvolvimento de concretos com adições de materiais cimentícios suplementares (subprodutos) ou com o uso de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) como agregado reciclado para concreto (GONZÁLEZ et al., 2021).

Os RCD são materiais oriundos de atividades do ramo da construção civil, como reformas, demolições e/ou construções. Para que possam ser reciclados ou reutilizados, os resíduos precisam ser previamente separados em quatro categorias, para garantir a correta destinação (BRASIL, 2002), a saber: Classe A - Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, provenientes de demolições, construções e/ou reformas (telhas, concreto, tijolos, argamassa etc.) (BRASIL, 2002); Classe B - Resíduos recicláveis para destinações diversas (papel, plásticos, gesso, madeiras etc.) (BRASIL, 2015); Classe C - Resíduos cuja reciclagem não é viável economicamente (BRASIL, 2011); Classe D - Resíduos perigosos que possam ser prejudiciais à saúde, provenientes da construção civil (materiais com amianto, tintas, solventes etc.) (BRASIL, 2004)

Os resíduos das classes A e B podem ser reciclados, os das classes C e D devem ser destinados conforme as normas técnicas específicas, sendo que os resíduos da classe A podem ser reciclados como agregado, reaproveitados ou encaminhados para aterros específicos para esse tipo de resíduo (BRASIL, 2002).

De acordo com a resolução 307 do CONAMA (BRASIL, 2002), “agregado reciclado é um material proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que

apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, infraestrutura, aterros sanitários ou outras obras de engenharia”. Os agregados reciclados de RCD (graúdos e miúdos) são classificados em três tipos: de concreto (composto em maior parte por resíduos de concreto), cimentício (composto em maior parte por resíduos de materiais cimentícios em geral) e misto (composto tanto por resíduos de materiais cimentícios, como de materiais cerâmicos) (ABNT NBR 15.116, 2021)

A incorporação desses agregados reciclados ao concreto minimiza os problemas ambientais, uma vez que reduz o descarte de resíduos e a utilização de agregado natural, pois ao empregar o material reciclado, não se faz necessária a extração de matéria-prima virgem (GONZÁLEZ et al., 2021; SANTOS; LEITE, 2018). Sendo essa a ideia mais promissora para contribuir com a economia circular e com a sustentabilidade nesse setor (GONZÁLEZ et al., 2021). A economia circular é um modelo que colabora para a melhoria da qualidade de vida da sociedade visando à sustentabilidade e ao investimento em produtos duráveis e que possam retornar para o ciclo econômico.

De acordo com Ghisellini, Cialani e Ulgiati (2016), a gestão de resíduos tornou-se um importante subsetor desse modelo econômico. Contudo, o percentual mundial de reutilização de resíduos de construção, como agregado para concreto, é pequeno, em torno de 5% (ISLAM et al., 2019; SAADI; ISMAIL; ALIAS, 2016). Isso se dá por razões como a elevada disponibilidade e o baixo custo dos agregados naturais² (ZHANG et al., 2019), o processo de separação ineficiente dos resíduos (FALESCHINI et al., 2014) e as propriedades do agregado reciclado, que são distintas dos agregados naturais.

As características do RCD que chega à central de reciclagem, como a granulometria, composição (COSTA, 2018) e o tipo de equipamento empregado na britagem, têm influência na qualidade e na quantidade de agregado miúdo e graúdo gerado no processamento. O processo de britagem afeta também o teor de argamassa aderida presente no agregado reciclado (FLOREA; BROUWERS, 2013).

Em geral, cerca de 65% a 70% do agregado reciclado é composto de agregado natural graúdo e miúdo, a porcentagem restante é constituída de argamassa aderida (POON; SHUI; LAM, 2004). Outros autores encontraram valores em torno de 50% (KISKU et al., 2020; RIGO, 2019). A presença dessa argamassa residual na superfície do agregado reciclado, altera suas propriedades físicas, fazendo com que este apresente menor densidade, maior capacidade de absorção de água e porosidade, bem como,

² Isso pode variar conforme a região, uma vez que os custos de frete podem elevar o custo total dos agregados.

consequentemente, menor desempenho mecânico em comparação ao agregado natural (AMARIO et al., 2017; AMER et al., 2016; ANDRADE FILHO, 2021; KAPOOR; SINGH; SINGH, 2016; LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012).

A heterogeneidade das propriedades físicas e químicas dos componentes do agregado reciclado dificulta sua aplicação, por isso são normalmente utilizados para fabricação de concretos não estruturais, tijolos, bases e sub-bases de pavimentação, argamassas etc. (COSTA, 2018). Essa limitação se deve essencialmente “a preocupações com a qualidade do material, propriedades mecânicas e desempenho a longo prazo” (HAYLES; SANCHEZ; NOEL, 2018, p. 1, tradução nossa). No Brasil, a NBR 15.116 (ABNT, 2021) em sua atualização recente, permite a aplicação dos agregados reciclados no preparo de concretos estruturais. Porém, pontua que para esses concretos indica-se a utilização apenas de agregados reciclados de concreto, limitando o teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto em 20% e restringindo a aplicação desses concretos apenas em zonas de agressividade I e II da NBR 6118 (ABNT, 2014).

A elevada porosidade dos agregados reciclados traz impactos para a porosidade total do concreto, aumentando-a e consequentemente prejudicando suas propriedades mecânicas (ANDRADE FILHO, 2021; VIEIRA; FIGUEIREDO; JOHN, 2020). Diversos autores observaram que a resistência mecânica do concreto diminui conforme se substitui o agregado natural por agregado reciclado (BAHRAMI et al., 2020; LEITE, 2001; LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012; MACHADO, 2020; ZONG; FEI; ZHANG, 2014). O mesmo acontece com o módulo de elasticidade, uma vez que tem-se o aumento da quantidade de argamassa, devido à presença de argamassa aderida no agregado reciclado, o que eleva a porosidade, diminui a rigidez e, consequentemente, o módulo de elasticidade do concreto (ESTOLANO et al., 2018; GERIN, 2020; LEITE, 2001; WANG et al., 2016).

Assim, para a obtenção de uma resistência mecânica similar a um concreto sem a utilização de RA, pode haver um aumento no consumo de cimento (VIEIRA; FIGUEIREDO; JOHN, 2020), o que não é desejável do ponto de vista econômico e ambiental, já que o cimento é o componente mais caro e menos sustentável³ do concreto. Esse fato pode prejudicar a ecoeficiência do concreto produzido.

No entanto, Fathifazl et al. (2009) acreditam que a redução das propriedades mecânicas do concreto, ao utilizar agregado reciclado, ocorre devido à sua composição e

³ No Brasil, as emissões oriundas da produção de clínquer são 832 KgCO₂/t (WBCSD, 2019).

que é possível manter propriedades mecânicas similares a de um concreto produzido com agregado natural e com menor teor de cimento. Os autores afirmam que essa possibilidade é a partir da utilização de um método de dosagem adequado, como o Método do Volume Equivalente de Argamassa (EMV).

Por fim, entende-se que é necessário avaliar a viabilidade ambiental do concreto produzido com agregado reciclado de construção e demolição. Geralmente, para isso, é realizada a análise do ciclo de vida (TAKANO et al., 2014). A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é o método usado para medir o desempenho ambiental de todo o ciclo de vida de um produto: extração da matéria-prima, fabricação, uso, descarte, reciclagem e reutilização. O objetivo é avaliar como potencializar o uso dos materiais atendendo às demandas sem prejudicar a qualidade do produto (VIEIRA; CALMON; COELHO, 2016). Porém, a realização da ACV exige muito tempo, além de ser onerosa.

Nesse sentido, uma possibilidade para realizar a avaliação do desempenho ambiental do concreto pode ser por meio de análise de indicadores de ecoeficiência e indicadores de fluidez (parâmetros reológicos). A partir desses indicadores, é possível avaliar o desempenho mecânico, a pegada de carbono e a aplicabilidade do concreto, ou seja, consegue-se mensurar se o uso dos agregados reciclados prejudicou a qualidade mecânica e ambiental do concreto, assim como é feito na avaliação do ciclo de vida.

Sendo assim, destaca-se que todos os elementos discutidos nesta seção – a ecoeficiência de concretos produzidos com agregado reciclado de RCD (RA), o Método do Volume Equivalente de Argamassa (EMV) e a fluidez em concretos produzidos com RA – serão abordados, de forma aprofundada nas seções seguintes.

2.2 ECOEFICIÊNCIA DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM RA

Um concreto ecoeficiente é aquele que atende às características de propriedades mecânicas e de durabilidade desejadas no projeto, tendo custo, emissão de CO_2 , uso de água, energia e geração de resíduos otimizados.

Para avaliar a ecoeficiência dos concretos pode-se empregar os indicadores: i) índice de ligantes (IL), com a qual pode-se obter a eficiência do cimento no concreto; e ii) índice de CO_2 (IC), que fornece potencial de degradação ambiental do concreto, calculados por meio das Equações 1 e 2, respectivamente (DAMINELLI et al., 2010). Pode-se dizer que a ecoeficiência do concreto é inversamente proporcional ao valor desses indicadores.

$$IL = \frac{C_{cim}}{f_{c28}} \quad (1)$$

$$IC = \frac{c_{CO_2}}{f_{c28}} \quad (2)$$

Onde:

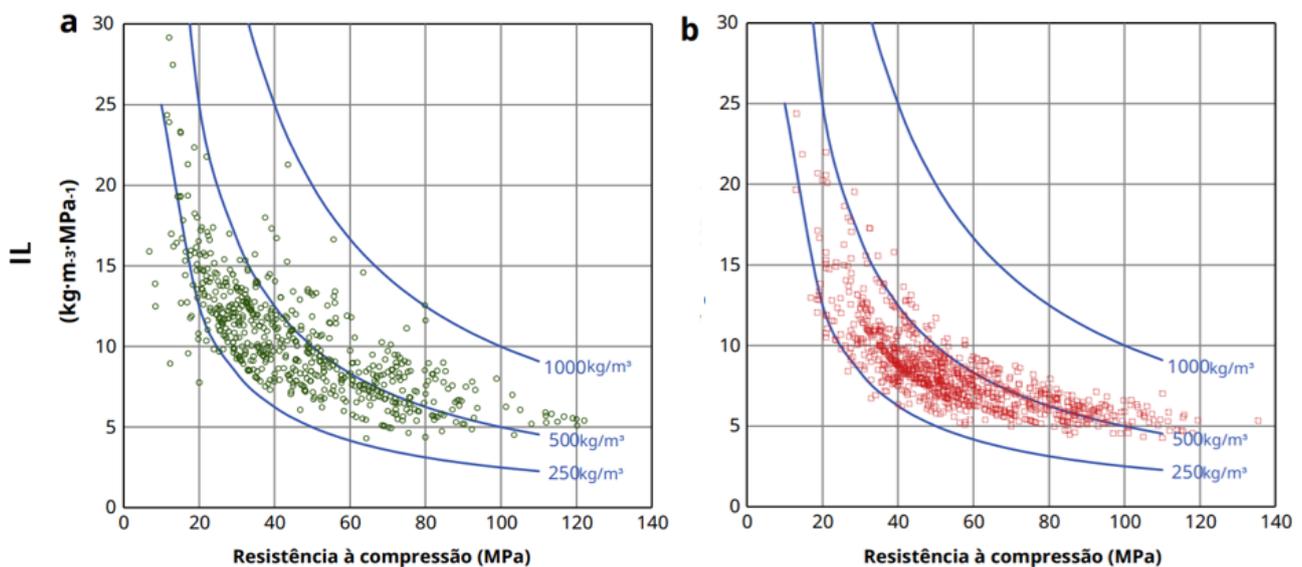
C_{cim} - Consumo de cimento do concreto (Kg.Cimento/m³)

c_{CO_2} - Massa de CO₂ emitida na produção do clínquer (Kg.CO₂/m³)

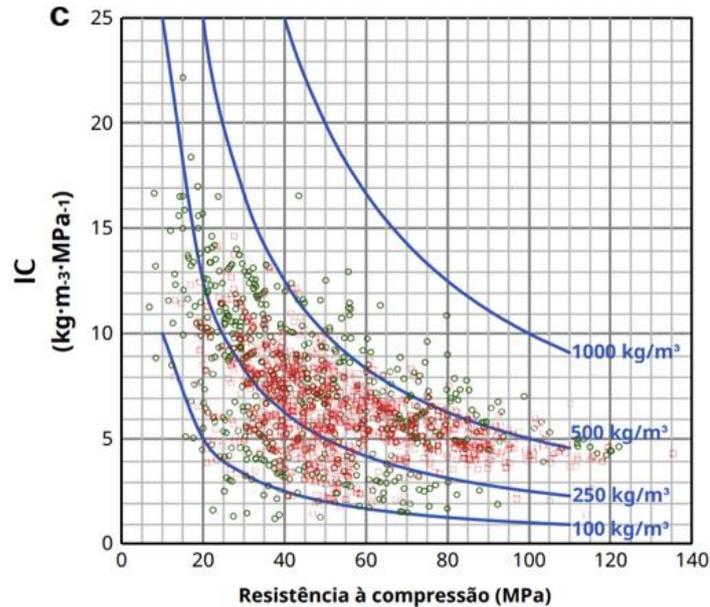
f_c - Resistência à compressão aos 28 dias (Mpa)

Damineli et al. (2010) realizaram uma revisão sistemática de trabalhos realizados entre 1988 e 2009 que produziram concretos convencionais, buscando avaliar o consumo de ligante (Figura 1). A partir dos dois indicadores das Equações 1 e 2, avaliaram a eficiência quanto ao uso de ligantes e pegada de carbono. Considerando concretos com resistência de 20 MPa e superior a 60MPa, os menores IL encontrados pelo autor foram 13 e 5 $Kg_Cimento.m^{-3}.MPa^{-1}$, respectivamente. No que diz respeito ao IC⁴, independente da classe de resistência, o menor valor encontrado em concretos produzidos com cimentos com baixo fator de clínquer foi 1,5 $Kg_CO_2.m^{-3}.MPa^{-1}$. Com base nas análises realizadas, o autor propôs como meta alvo para concretos convencionais: $IC < 1,5 Kg_CO_2.m^{-3}.MPa^{-1}$ e $IL < 5 Kg_Cimento.m^{-3}.MPa^{-1}$.

Figura 1 – Indicadores da literatura a) Índice de Ligante (IL) x Resistência à compressão (fc) (nacional); b) IL x fc (Internacional); c) Índice de Carbono (IC) x fc (mundial).



⁴ No estudo de Damineli et al. (2010) não foram consideradas as emissões referentes às adições minerais e aditivos para cálculo do índice de carbono (IC).



Fonte: Traduzido de Daminieli et al. (2010)

Similar ao trabalho de Daminieli et al. (2010), Machado (2020) analisou os resultados de trabalhos que produziram concretos com agregados reciclados no período de 1990 a 2020. Foram selecionados trabalhos que tivessem informações sobre as misturas produzidas: teor de substituição e composição do RCD utilizado; consumo de ligantes das misturas, teor e tipo de adições minerais e aditivos; resistência à compressão aos 28 dias e consumo de água. A partir do cálculo⁵ dos indicadores de ligante (IL) e de carbono (IC) dos concretos produzidos nos estudos, a autora propôs diretrizes para produção de concretos com agregados reciclados mais ecoeficientes, os quais devem possuir $IC < 5 \text{ Kg}_{CO_2} \cdot m^{-3} \cdot MPa^{-1}$ e $IL < 7 \text{ Kg}_{Cimento} \cdot m^{-3} \cdot MPa^{-1}$. Essas diretrizes e metas estão baseadas nos melhores resultados obtidos no levantamento bibliográfico realizado pela autora.

Machado (2020) observou que a maioria dos estudos utilizava altos teores de cimento, no caso de estudos com substituição de agregados graúdos reciclados, apenas 2,5% dos dados coletados utilizaram teores inferiores a $250 \text{ Kg}/m^3$. A resistência à compressão média desses concretos foi de 20 MPa, o que eleva o índice de ligante. A autora não analisou pesquisas com consumos de cimento superiores $420 \text{ Kg}/m^3$, dentre as misturas consideradas como mais eficientes. Os estudos com melhores resultados de IL encontrados por Machado (2020), estão apresentados na Tabela 1.

⁵ O cálculo do IL e IC em Machado (2020) foi realizado sem considerar as emissões dos agregados, de transporte e de recarbonatação.

Tabela 1 – Concretos com menores IL utilizando agregado graúdo reciclado (AGR) para faixa de resistência à compressão de 40 a 60 ± 2 MPa

Estudo	Origem do AGR**	Tratamento dos AGR	Teor de AGR (%)	CC* (Kg)	a/c	Teor de Superplastificante (%)	fc (MPa)	IL (Kg_Cim /m ³ /MPa)	
Etxeberria, Vázquez e Marí (2006)	Concreto	-	25	300	0,55	1,66	42,00	7,14	
Kou e Poon (2010)	Concreto	sim	100	380	0,50	-	49,80	7,63	
Akbarnezhad <i>et al.</i> (2011)	Concreto	sim	20	375	0,45	2,00	62,00	6,05	
			40				58,00	6,47	
			60				57,50	6,52	
			80				54,50	6,88	
Pacheco <i>et al.</i> (2015)	Concreto de alta resistência	-	100	350	0,45	1,0	56,96	6,14	
Pedro <i>et al.</i> (2019)	Concreto de alta resistência	-	100	350	0,42	1,0	53,20	6,58	
Domingo-Cabo <i>et al.</i> (2009)	Concreto de alta resistência	-	100	380	0,50	1,4	54,80	6,93	
			Mínimo	20	300	0,42	1,0	42,00	6,05
			Média	69	356	0,50	1,2	54,30	6,7
			Mediana	80	363	0,5	1,2	54,80	6,6
			Máximo	100	380	0,55	2,0	62,00	7,63

*CC - Consumo de cimento (Kg/m³); ** Agregado graúdo reciclado

Fonte: Adaptado de Machado (2020)

O trabalho de Etxeberria, Vázquez e Marí (2006)⁶ foi o que apresentou menor valor de IL, dentre os concretos com resistência inferior a 50MPa. Kou e Poon (2010), obtiveram IL próximo ao de Etxeberria, Vázquez e Marí (2006), com aplicação de 100% de AGR, porém consumiram maior quantidade de ligante e fizeram tratamento do AGR por impregnação em acetato de polivinila (PVA) para melhorar a qualidade do agregado graúdo reciclado.

Embora tenham utilizado um teor de ligante muito próximo ao de Kou e Poon (2010), Akbarnezhad *et al.* (2011)⁷ obtiveram valores de IL mais baixos, mesmo para um teor de substituição mais elevado (80%), isso se deve às maiores resistências à compressão obtidas nesses concretos. No estudo de Akbarnezhad *et al.* (2011) foi realizado um tratamento termomecânico nos agregados e, segundo Machado (2020), esse tipo de tratamento eleva em aproximadamente 30% a resistência à compressão dos concretos com agregado reciclado. Machado (2020) ressalta ainda que o gasto de energia em tratamentos nos agregados, se contabilizado no cálculo de IC, impacta na ecoeficiência do concreto.

Observa-se que os estudos de Pacheco *et al.* (2015)⁸, Pedro *et al.* (2019) e Domingo-Cabo *et al.* (2009)⁹, apresentaram consumos de ligante muito próximos ou inferiores aos de Kou e Poon (2010) e Akbarnezhad *et al.* (2011). Além disso apresentaram

⁶ Foi utilizado cimento CEM I fc ≥ 52,5 MPa, correspondente ao cimento brasileiro CP V.

⁷ Kou e Poon (2010) e Akbarnezhad *et al.* (2011) utilizaram o cimento tipo I-ASTM C150.

⁸ Foi utilizado cimento CEM II A-L fc ≥ 42,5 MPa, que possui de 80% a 94% de clínquer e de 6% a 20% de calcário.

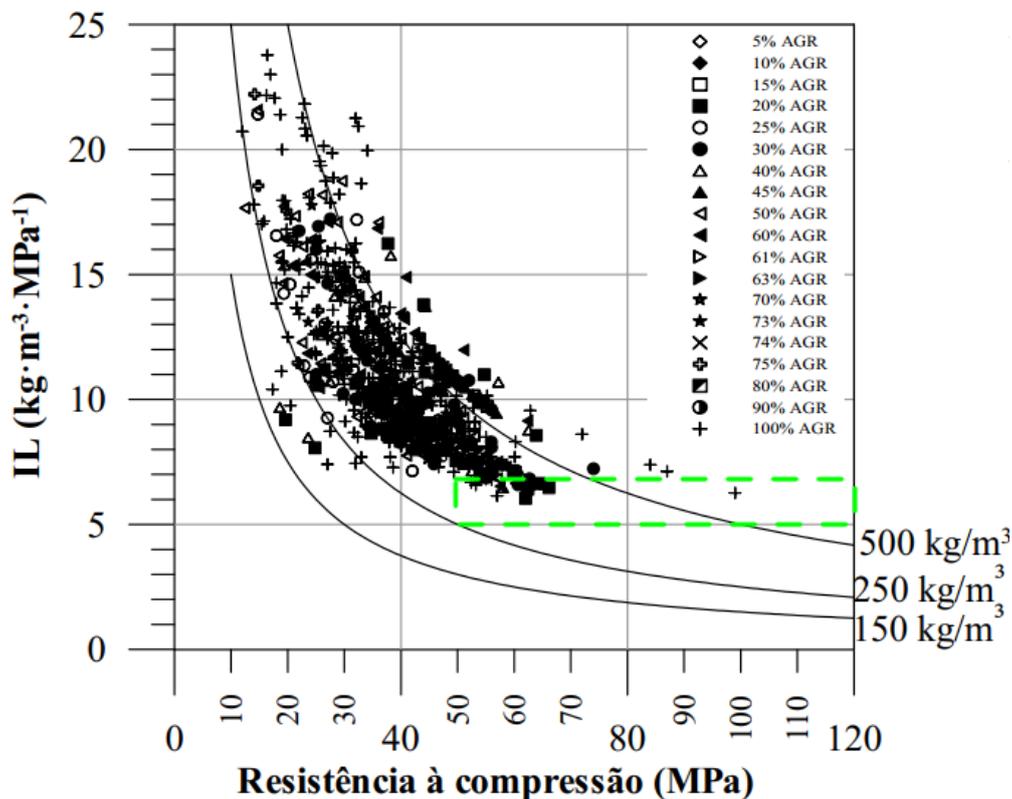
⁹ Pedro *et al.* (2019) e Domingo-Cabo *et al.* (2009) utilizaram cimento CEM I fc ≥ 42,5 MPa (correspondente ao CP V).

valores de IL próximos aos de Akbarnezhad et al. (2011), mesmo com o uso de maior teor de substituição de agregados (100%). Nos estudos desses três autores, os agregados utilizados eram originados de concretos de elevada resistência e foram utilizados cimentos de elevada resistência. A autora destaca que:

A utilização de aditivos superplastificantes (comum em todos os estudos que apresentaram os melhores resultados), a qualidade dos agregados, proveniente dos tratamentos utilizados ou da origem (os melhores resultados foram para agregados com concretos de origem de elevadas resistências), a utilização de um cimento de elevada resistência, a compensação da taxa de absorção de água dos AGR ou a utilização de um método de mistura com o fracionamento da água foram as práticas que apresentaram maior influência nos valores reduzidos de IL (MACHADO,2020, p. 80).

Na Figura 2, está apresentado o gráfico do trabalho de Machado (2020) que relaciona a resistência à compressão, consumo de cimento, teor de substituição e IL. Os melhores¹⁰ valores de IL, para concretos produzidos com AGR, estão destacados no gráfico.

Figura 2 – Intensidade de Ligante x Resistência à compressão de concretos com AGR



Fonte: Machado (2020)

¹⁰ Machado (2020) considerou como melhores resultados os concretos com consumo de cimento inferior a 420 kg e com IL ≤ 8 Kg . Cimento . m⁻³ . MPa⁻¹ para concretos com $f_c \leq 50$ MPa ou IL ≤ 7 Kg . Cimento . m⁻³ . MPa⁻¹, em concretos com $f_c > 50$ MPa.

No caso do índice de carbono (IC), dentre os estudos realizados com concretos produzidos com AGR, os melhores resultados, segundo Machado (2020), estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Concretos com menores IC utilizando agregado graúdo reciclado

Estudo	Origem do AGR	Teor de AGR (%)	CC* (Kg)	a/c	Teor de Superplastificante (%)	fc (MPa)	IC (Kg_CO ₂ /m ³ /MPa)	IL (Kg_Cim/m ³ /MPa)
Lotfi <i>et al.</i> (2015)**	Concreto	20	300	0,60	-	34,70	2,40	8,60
		50				32,20	2,61	9,32
		100				27,10	3,10	11,07
Pacheco <i>et al.</i> (2015)***	Concreto de alta resistência	100	350	0,45	1,0	56,96	4,58	6,14
Mínimo		20	300	0,45	0,0	27,10	2,40	6,14
Média		68	325	0,50	1,0	37,70	3,20	8,80
Mediana		75	325	0,50	1,0	33,50	2,90	9,00
Máximo		100	350	0,60	1,0	56,96	4,58	11,07

*CC - Consumo de cimento (Kg/m³); ** Foi utilizado cimento CEM III/B (20-34% de clínquer); *** Foi utilizado cimento CEM II/A (80-94% de clínquer);

Fonte: Adaptado de Machado (2020)

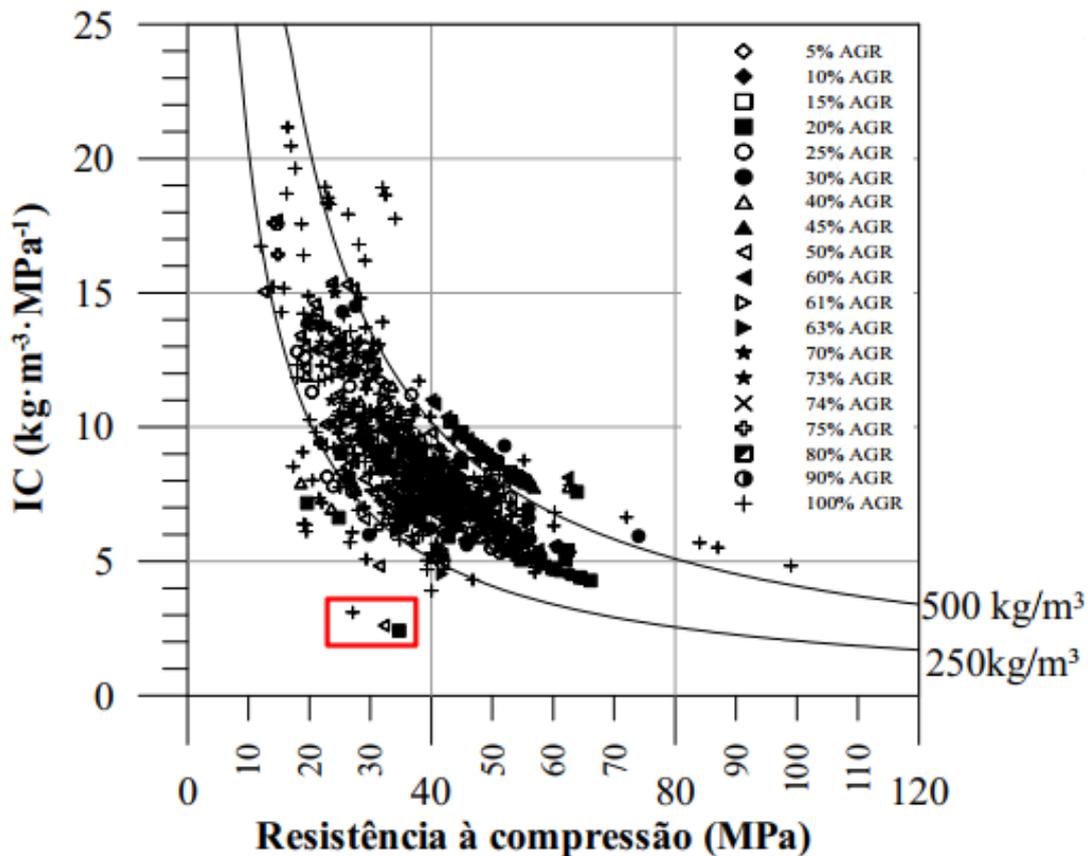
O estudo de Lotfi *et al.* (2015) utilizou um cimento com reduzido valor de clínquer, obtendo os menores valor de IC, porém apresentou elevados valores de IL. O estudo de Pacheco *et al.* (2015) obteve um valor de IC um pouco mais alto, 4,58 Kg.CO₂.m⁻³.MPa⁻¹, mas apresentou simultaneamente um valor mais baixo valor de IL. Embora tenha sido utilizado um cimento com elevado teor de clínquer, a elevada resistência à compressão do concreto produzido no estudo de Pacheco *et al.* (2015), contribuiu para reduzir o índice de ligante. Machado (2020) destaca o que é determinante para alcançar um menor IC:

Uso de AGR com elevados valores de resistência à compressão do concreto de origem (fc > 50 MPa); dimensão máxima característica do AGR limitada a 20 mm; redução de cerca de 25% da relação a/c da mistura de CR em relação à mistura de referência, sem aumentar o consumo de ligantes; inserção de aditivo químico superplastificante, conduzindo uma elevada dispersão do cimento e conseqüente redução do consumo (MACHADO, 2020, p. 95).

Na Figura 3, está apresentado o gráfico da pesquisa de Machado (2020) que relaciona a resistência à compressão, consumo de cimento, teor de substituição e IC. Os melhores¹¹ valores de IC, para concretos produzidos com AGR, estão destacados no gráfico.

¹¹ Machado (2020) considerou como melhores resultados os concretos com consumo de cimento inferior a 420 kg e que possuem IC ≤ 4 Kg.CO₂.m⁻³.MPa⁻¹ no caso de concretos com fc ≤ 50 MPa ou IC ≤ 5 Kg.CO₂.m⁻³.MPa⁻¹, no caso de concretos com fc > 50 MPa.

Figura 3 – Índice de carbono x Resistência à compressão de concretos com AGR



Fonte: Machado (2020)

Tendo tudo isso em conta, segundo Machado (2020), a mistura mais promissora com substituição de agregados graúdos reciclados em concreto foi a de Pacheco et al. (2015). Essa mistura, juntamente com os melhores¹² resultados encontrados pela autora em concretos com agregado miúdo e com agregado miúdo e graúdo reciclado, orientaram as metas e diretrizes por ela estabelecidas. Na Tabela 3 estão apresentadas as diretrizes propostas por Machado (2020) e por outros autores.

Com base no exposto, nota-se que as diretrizes propostas por Machado (2020) estão baseadas em concretos de elevada resistência (acima de 40MPa), produzidos com agregados oriundos do processamento de concreto (em geral concretos de alta resistência). Além disso, muitas vezes, os agregados de concreto utilizados passaram por tratamentos para remoção da argamassa residual (AKBARNEZHAD et al., 2011; ETXEBERRIA; VÁZQUEZ; MARÍ, 2006).

Da parcela de RCD que é reciclada atualmente no Brasil, aproximadamente

¹² Os melhores resultados para concretos com agregado miúdo reciclado foram obtidos no trabalho de Hu, Wang e Kim (2013): $IC = 4,73 \text{ Kg. CO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ e $IL = 6,96 \text{ Kg. cimento} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$. E para concretos com agregado graúdo e miúdo reciclado, em Pedro et al. (2019): $IC = 4,95 \text{ Kg. CO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ e $IL = 6,49 \text{ Kg. cimento} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$. A discussão desses dados não foi apresentada nesse trabalho por esse ter foco apenas em agregados graúdos.

60% correspondem a agregado graúdo (CONTRERAS et al., 2016), com uma produção muito maior de agregado misto em relação ao agregado de concreto (FERREIRA et al., 2019). Dessa forma, seria interessante viabilizar a aplicação dos resíduos mistos em concretos com bons índices de ecoeficiência

Tabela 3 – Diretrizes para produção de concretos ecoeficientes com RA

Categoria	Tipo	Diretrizes
Materiais	Aglomerante e Agregado	No caso de cimentos com alto teor de clínquer, trabalhar com altas resistência à compressão do concreto ¹⁾
		Trabalhar com cimentos com fator de clínquer inferior a 35% ¹⁾
		Uso de cimentos com resistências à compressão superior a 40 MPa ¹⁾
		Utilização de adições minerais, de preferência pozolanas ¹⁾
		Preferencialmente empregar agregados reciclados de concreto (CRA) ¹⁾
		Uso de agregados reciclados com processo de beneficiamento menos emissivo e de menor consumo energético ¹⁾
		Agregado graúdo reciclado com D _{máx} = 19 mm e agregado miúdo reciclado com D _{máx} = 2,4 mm ¹⁾
		Realizar tratamento superficial dos agregados de RCD ⁴⁾
Produção de Concreto	Proporcionamento	Processamento de agregado miúdo reciclado (AMR) para produção de pós para utilização em substituição ao cimento ²⁾
		Trabalhar com misturas melhor empacotadas ¹⁾
		Atender a um limite máximo de consumo de ligante, conforme a resistência à compressão do concreto (C20 < 140 kg; C30 < 210 kg; C40 < 280 kg; C50 < 350 kg; Acima de C50 < 350 kg) ¹⁾
		Uso de menores a/c sem que isso implique no aumento do consumo de ligantes ¹⁾
		Utilização de aditivo químicos para aumento da fluidez ¹⁾
		Produzir as amostras utilizando o método de mistura em duas etapas ¹⁾
		Fazer a compensação da água absorvida pelo agregado reciclado ¹⁾
Considerar o volume de argamassa aderida às partículas do AGR ³⁾		

¹⁾Diretrizes propostas por Machado (2020); ²⁾Oliveira, Dezen e Possan (2020); ³⁾Fathifazl et al. (2009); ⁴⁾PAWLUCZUK et al., (2019), TAM; BUTERA; LE (2016) e KIM et al., (2017).

Fonte: Adaptado de Machado (2020)

No entanto, se a análise realizada por Machado (2020) considerasse concretos com agregado de resíduo misto, os valores dos indicadores e das metas propostas seriam diferentes (menos ecoeficientes). Assim, foi realizado o cálculo de IC e IL (Tabela 4) a partir de estudos que utilizaram agregado graúdo reciclado misto (MRA) na produção do concreto. Observa-se que os valores dos indicadores médios obtidos foram mais elevados que as metas propostas por Machado (2020).

Os melhores resultados entre os concretos produzidos com MRA, foram obtidos por Bizinotto et al. (2017), que trabalharam com concretos de resistência acima de 45 MPa. A mediana dos dados levantados na Tabela 4 foi considerada como indicador alvo para os concretos com agregado reciclado produzidos nessa pesquisa, $IC < 7,8 \text{ Kg_CO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ e $IL < 10,7 \text{ Kg_Cimento} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$.

Tabela 4 – IC e IL de concretos utilizando agregado graúdo reciclado misto para faixas de resistência à compressão de 20 a 50 ± 3 MPa

Estudo	Teor de AGR (%)	Cimento (Kg)	A/C	Tipo e Teor de Aditivo (%)	fc (MPa)	IL(kg. Cim.m ⁻³ . MPa ⁻¹)	IC(kg. CO ₂ .m ⁻³ . MPa ⁻¹)	Tipo de Cimento (%Clínquer)
González et al (2021)	25%	380	0,45	FUCHS BRYTEN NF - 1,55%	38,5	9,9	8,1	CEM I 42,5 R (95-100%)
	50%				37,8	10,1	8,2	
Salles et al (2020)**	25%	364	0,55	Fluxer RMX 7000 (SP-II R) - 1%	42,2	8,6	6,9	CP V-ARI (90-100%)
	50%				44,3	8,2	6,6	
	100%				37,1	9,8	7,8	
Lima et al (2010)	50%	424	0,49	-	35,8	11,9	9,5	CP V ARI (90-100%)
		329	0,63		27,8	11,8	9,5	
		252	0,82		18,1	13,9	11,1	
Salgado e Silva (2021)	20%	360	0,50	Master Glenium 51 - 0,3%	32,0	11,3	7,8	CPII F-32 (75 – 89%)
Bizinotto et al (2017)	20%	364	0,50	Policarboxilatos - 1%	45,9	7,9	6,5	CEM I 52,5R (95-100%)
		336*	0,50		47,4	7,1	5,8	
	35%	313*	0,50	Policarboxilatos - 1,5%	46,3	6,8	5,5	
		364	0,50	Policarboxilatos - 1%	45,3	8,0	6,6	
Cantero et al (2021)	50%	300	0,59	-	34,8	8,6	7,1	CEM I 42,5 R (95-100%)
Velardo (2021)	100%	400	0,45	Superplastificante - 1,55%	51,0	7,8	6,4	CEM I 42,5 R (95-100%)
Meng et al (2021)	100%	336	0,50	Agente redutor de água - 1,8%	22,2	15,1	12,4	CEM I 42,5 (95-100%)
		397	0,42		25,9	15,3	12,6	
		469	0,36		29,3	16,0	13,1	
		553	0,30		37,9	14,6	12,0	
Gupta, Agrawal e Chaudhary (2022)	100%	400	0,40	-	27,3	14,6	12,0	CEM I 42,5 (95-100%)
Ângulo et al (2009)	40%	300	0,67	-	21,0	14,3	7,8	CPII E (65%)
		400	0,50		32,0	12,5	6,9	
Mínimo	20%	252	0,3	-	18,1	6,8	5,5	-
Média	55%	376	0,51	-	35,5	11,1	8,6	-
Mediana	50%	364	0,50	-	36,5	10,7	7,8	-
Máximo	100%	553	0,82	-	51,0	16,0	13,1	-

*Foi utilizado o método de dosagem do volume equivalente de argamassa; ** Foi realizado tratamento dos agregados reciclados.

Em relação às diretrizes propostas por Machado (2020), observa-se que o teor de clínquer do cimento tem grande influência sobre o valor do índice de carbono (IC). Isso se deve às altas emissões de CO₂ associadas à produção do clínquer. Os cimentos com adições (CP III e CP IV) apresentam menores teores de clínquer e, conseqüentemente, maior ecoeficiência em comparação aos cimentos que têm elevado teor de clínquer (DAMINELI, 2013). No entanto, não existe disponibilidade desses cimentos em todas as regiões do país.

Damineli (2013, p. 2) destaca as orientações do professor Kumar Mehta: “a busca por sustentabilidade (...) depende do uso de cimentos com menor teor de clínquer e concretos com menor teor de ligantes”. Por esse motivo, ao utilizar cimentos com elevado teor de clínquer é recomendável trabalhar com concretos de elevadas resistências à compressão, para manter um bom índice de ligante (IL).

Nesse contexto, outra alternativa são as substituições de parte do teor de cimento do concreto por materiais cimentícios suplementares, segundo Campos (2019) isso pode ser feito por meio de técnicas de empacotamento de partículas. Esses materiais são subprodutos industriais, por isso, são considerados carbono neutro. O uso de adições minerais no concreto, como a sílica ativa, aumenta a compacidade do concreto, o que contribui para diminuir a necessidade de ligante e água, e assim, melhoram a resistência à compressão do concreto e sua durabilidade (AL-MARTINI; AL-KHATIB, 2020). E, conseqüentemente, melhoram também o índice de ligante e de carbono, uma vez que se tem um concreto de maior resistência à compressão, utilizando materiais menos emissivos.

Para realizar a reciclagem dos resíduos de construção e demolição nas centrais de reciclagem, tem-se custos e emissões de CO_2 de transporte e processamento. O processamento do RCD no local de geração (canteiro), utilizando um britador móvel reduz significativamente os impactos ambientais e os custos, referentes ao transporte (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2014; VIEIRA; FIGUEIREDO; JOHN, 2020). Tem-se também redução dos custos de transporte dos resíduos para os aterros, que em alguns casos, a depender da distância do local de aterro, pode superar o custo de produção do concreto (VIEIRA; FIGUEIREDO; JOHN, 2020). Contudo, essa solução não é possível de ser viabilizada em todas as obras.

O tipo de britador utilizado influencia diretamente nas propriedades do agregado reciclado produzido (tamanho, formato, quantidade de argamassa aderida) e conseqüentemente nas propriedades do concreto produzido (MATIAS et al., 2013; VIEIRA; FIGUEIREDO; JOHN, 2020). Concretos produzidos com agregados de elevado diâmetro máximo característico e lamelares, apresentam maior predisposição para exsudação, o que prejudica a zona de transição e conseqüentemente a resistência à compressão do concreto (ANDRADE FILHO, 2021), bem como seu índice de ligante. Além disso, a presença de argamassa residual nos agregados reciclados, também prejudica o desempenho do concreto, devido principalmente a elevada capacidade de absorção de água que esta confere aos agregados reciclados (SALLES et al., 2021). Nesse contexto, podem ser aplicados, diversos tratamentos para melhorar a qualidade do agregado reciclado a partir da remoção da argamassa residual ou do tratamento desta, dentre esses limpeza com ácido (KIM et al., 2017), aquecimento e atrito (PAWLUCZUK et al., 2019), carbonatação (TAM; BUTERA; LE, 2016), etc.

Ao realizar a substituição de agregados naturais por agregados reciclados, tem-se uma diminuição da resistência à compressão, diretamente proporcional ao aumento

do teor de substituição, se a relação água/cimento for mantida. A redução da relação a/c da mistura em virtude da elevada absorção dos agregados reciclados (reduzindo a água de amassamento), auxilia na manutenção da resistência, que seria prejudicada pelas propriedades inferiores, desses agregados em relação aos agregados naturais, nos casos em que os teores de substituição não são tão elevados (SALLES et al., 2021). Existe um consenso de que em substituições inferiores à 30%, pode-se evitar a perda de desempenho, ajustando o consumo de cimento, no entanto, neste caso tem-se aumento do custo (BRAGA; SILVESTRE; DE BRITO, 2017) e prejuízos no aspecto ambiental, devido às elevadas emissões referentes ao cimento (JIMÉNEZ; DOMÍNGUEZ; VEGA-AZAMAR, 2018). A necessidade do uso de menores relações a/c sem que isso implique no aumento do consumo de ligantes, está relacionada a não elevar o IC e IL do concreto.

Segundo Ozbakkaloglu, Gholampour e Xie (2018), a elevação do teor de agregado reciclado, devido à sua elevada absorção de água, causa também, redução na fluidez. Assim, para garantir uma fluidez adequada é fundamental: compensar a água absorvida pelos agregados reciclados (LEITE; FIGUEIREDO FILHO; LIMA, 2013), o uso de aditivos (LEITE; FIGUEIREDO FILHO; LIMA, 2013; RASHID et al., 2020) e a utilização de métodos de mistura específicos (LEITE; FIGUEIREDO FILHO; LIMA, 2013; TAM; GAO; TAM, 2005).

Segundo Gerin (2020) dentre esses métodos estão: pré-molhagem compensando a água de absorção (LEITE, 2001), pré-molhagem sem compensar a água de absorção (KUSTER JUNIOR, 2018) e o método de mistura em duas fases (TAM; GAO; TAM, 2005). Sabendo que o desempenho do concreto no estado fresco influencia nas propriedades do estado endurecido (SILVA; BRITO; DHIR, 2018), exercerá também influencia nos valores de IC e IL. A influência dos agregados reciclados nas propriedades do concreto no estado fresco será melhor tratada posteriormente em um tópico específico dessa revisão.

O uso de teores de substituição limitados a 40% e a utilização de agregado reciclado de concreto, contribuem para a melhora das propriedades dos concretos (SANTOS; LEITE, 2018). Os agregados reciclados de concreto apresentam menor absorção, maior massa específica (ESTOLANO et al., 2018) e menor porosidade, que os agregados reciclados mistos (SANTOS; LEITE, 2018; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2015). Isso se deve a alguns dos materiais constituintes dos agregados reciclados mistos, que têm desempenho muito inferior aos agregados naturais (materiais cerâmicos e argamassa) (SALLES et al., 2021). A composição dos resíduos de RCD afetam o desempenho do

concreto produzido (CABRAL et al., 2012). Assim, se tem melhores resultados de resistência à compressão e, de maneira geral, melhores resultados no estado fresco e endurecido, e nos valores dos indicadores de ecoeficiência (IC e IL), utilizando agregados provenientes de resíduos de concreto (SANTOS; LEITE, 2018; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2015).

Dentre os concretos produzidos com agregados reciclados de concreto, Yildirim, Meyer e Herfellner (2015) constataram propriedades mecânicas similares ou melhores, ao dos concretos produzidos com agregado natural, em concretos com agregados reciclados cujo agregado reciclado é proveniente de resíduos de concretos de resistência entre 80 MPa e 100 MPa. O contrário ocorre quando os resíduos são provenientes de concretos que possuem resistência entre 30 MPa a 45 MPa, ou seja, nesse caso, o concreto reciclado tem propriedades inferiores ao concreto produzido com agregado natural.

Oliveira, Dezen e Possan (2020) propõem a utilização da fração fina dos resíduos provenientes de concretos em substituição ao cimento, tendo-se bons resultados na aplicação em concretos, com a utilização de teores substituição de até 25%. Essa alternativa pode contribuir para produção de concretos com menor índice de carbono, em função da redução do teor de cimento utilizado.

Fathifazl et al. (2009) também propõem como alternativa para produzir concretos com baixo índice de ligante, a utilização de um método de dosagem que permita a utilização dos agregados reciclados, mantendo os níveis de resistência de um concreto de referência produzido com agregado natural, com consumo de cimento otimizado, com o Método do Volume Equivalente de Argamassa EMV. Esse método e sua contribuição para a ecoeficiência dos concretos serão tratados no tópico seguinte. Nesse sentido, a utilização desse método também pode ser uma alternativa para viabilizar os limites de ligantes em função da resistência propostos por Machado (2020).

2.3 MÉTODO DO VOLUME EQUIVALENTE DE ARGAMASSA (EMV)

O agregado graúdo reciclado (RCA) tem em sua composição agregado natural virgem original (OVA - *original virgin aggregate*) e argamassa residual (RM – *residual mortar*). Isso deve ser levado em conta no processo de dosagem de misturas de concreto com RCA (RCA-C – *Concrete with Recycled coarse aggregate*), de modo que o teor de argamassa (NM – *New mortar*) e agregado natural (NA – *natural aggregate*) frescos

presentes na mistura sejam ajustados para que o volume total de argamassa (TM – *total mortar*) seja semelhante ao de uma mistura de referência (NAC – *concrete with natural aggregate*). A mistura NAC é dosada com método de dosagem tradicional e feita com 100% de NA, de mesma forma e diâmetro máximo que o RCA, a ser utilizado na mistura de concreto com RCA (FATHIFAZL et al., 2009).

Os métodos tradicionais de dosagem não indicam a necessidade deste ajuste. Assim, o proporcionamento de um concreto com RCA pelo método tradicional conduz à matrizes com maior teor de argamassa, devido à argamassa residual presente no RCA. Um maior teor de argamassa, em geral, pode fazer com que as propriedades do concreto com agregado reciclado sejam inferiores (FATHIFAZL et al., 2009; KISKU et al., 2020).

Com a utilização do método do Volume Equivalente de Argamassa (EMV), para a dosagem de concreto, é possível obter concretos com agregado reciclado com propriedades similares aos concretos feitos com agregados naturais e com menor consumo de cimento (BIZINOTTO et al., 2017; FATHIFAZL et al., 2009), uma vez que demanda menos argamassa fresca do que a necessária no método convencional (FATHIFAZL et al., 2009). Para que o concreto com RCA e o concreto de referência com apenas agregado natural tenham propriedades similares no estado endurecido, o método cita que as condições estabelecidas nas Equações 3 e 4, devem ser atendidas.

$$V_{TM}^{RCA-concrete} = V_M^{NAC} \quad (3)$$

$$V_{TNA}^{RCA-concrete} = V_{NA}^{NAC} \quad (4)$$

Onde:

$$V_{TM}^{RCA-concrete} = V_{RM}^{RCA-concrete} + V_{NM}^{RCA-concrete}$$

$$V_{TNA}^{RCA-concrete} = V_{OVA}^{RCA-concrete} + V_{NA}^{RCA-concrete}$$

$$V_{TM}^{RCA-concrete} = \text{Volume total de argamassa em RCA} - C$$

$$V_{TNA}^{RCA-concrete} = \text{volume total de agregado em RCA} - C$$

$$V_M^{NAC} = \text{volume de argamassa em NAC}$$

$$V_{NA}^{NAC} = \text{volume de agregado em NAC}$$

$$V_{RM}^{RCA-concrete} = \text{volume de RM em RCA} - C$$

$$V_{NM}^{RCA-concrete} = \text{volume de NM em RCA} - C$$

$$V_{OVA}^{RCA-concrete} = \text{volume de OVA em RCA} - C$$

$$V_{NA}^{RCA-concrete} = \text{volume de NA em RCA} - C$$

No entanto, apesar de o método EMV possibilitar a obtenção de uma resistência à compressão similar à dos concretos de referência, dosados com métodos convencionais, tem-se um prejuízo no que diz respeito à trabalhabilidade e às propriedades reológicas (BIZINOTTO et al., 2017). Isso ocorre em virtude da redução da quantidade de argamassa fresca, ocasionada pela redução do consumo de cimento, areia e água, ao considerar a argamassa residual aderida no agregado reciclado. O que leva esses concretos a apresentar menores valores de abatimento (FALESCHINI et al., 2014; PELLEGRINO; FALESCHINI, 2016) e maiores tensões de escoamento e viscosidade plástica (BIZINOTTO et al., 2017). Os equacionamentos e descrição detalhada de aplicação do método está apresentada no capítulo 3.

2.4 REOLOGIA DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM RA

Vários estudos sobre a utilização de RA como agregado para concreto foram realizados nas últimas décadas, no entanto, ainda são necessários maiores estudos para entender a influência do agregado reciclado nas propriedades do estado fresco desses concretos (AMARIO et al., 2021; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2018)

Os agregados reciclados possuem superfície porosa e textura rugosa, devido à presença da argamassa residual aderida. Essa argamassa faz com que esse tipo de agregado apresente forma irregular, tenha elevada capacidade de absorção de água e menor densidade (CARTUXO et al., 2015; VÁZQUEZ et al., 2014).

A porosidade, a textura e a forma dos agregados reciclados influenciam nas propriedades do estado fresco do concreto com RA, observando-se uma perda de fluidez desses concretos em relação aos concretos produzidos com agregado natural (AMARIO et al., 2021). A elevada capacidade de absorção de água dos agregados reciclados, em razão de sua porosidade, altera a quantidade de água efetiva da mistura e conseqüentemente a fluidez (AMARIO et al., 2017; AMER et al., 2016; MATIAS et al., 2013).

A trabalhabilidade é compreendida, como a facilidade de lançar e adensar o concreto, sem perda de homogeneidade, e é avaliada a partir de testes que permitem medir a consistência e a coesão do concreto (NAGARAJ; GIRISH, 2021). Dentre as alternativas que contribuem para a melhora da fluidez do concreto estão a utilização de aditivos superplastificantes, o aumento do teor de água da mistura, o aumento do teor de umidade dos agregados reciclados e o aumento do teor de cimento do traço (AMER et al., 2016).

Existem diversos ensaios empíricos para avaliar as propriedades do concreto no estado fresco e definir sua fluidez. O teste de abatimento de tronco de cone é o método mais usual (NAGARAJ; GIRISH, 2021; SOUALHI et al., 2017). Porém, é um método de um só parâmetro e está suscetível a variações de operador (WALLEVIK; WALLEVIK, 2011). Para uma avaliação mais precisa, o ideal é utilizar métodos que avaliem as propriedades do concreto no estado fresco utilizando de grandezas físicas (JIAO et al., 2017; NAZAR et al., 2020). Nesse sentido, os ensaios reológicos multiponto são os métodos mais adequados (GONZÁLEZ-TABOADA et al., 2017b).

A reologia corresponde a uma área da ciência que investiga o fluxo e a deformação da matéria (sólidos e fluidos) sob ação de uma tensão, ao longo do tempo, levando em conta as condições de pressão e temperatura (CUNHA FILHO, 2015). Por meio da reologia pode-se descrever as propriedades de fluxo do concreto por dois parâmetros físicos, tensão de escoamento (τ_0) e viscosidade plástica (μ) (NAGARAJ; GIRISH, 2021).

A tensão de escoamento é a tensão de cisalhamento limite a partir da qual se inicia (tensão de escoamento estática) ou se mantém (tensão de escoamento dinâmica) o fluxo de escoamento do concreto (BIZINOTTO et al., 2017; MARTINI; KHARTABIL; NEITHALATH, 2021). Já a viscosidade plástica, representa uma medida de resistência do fluido ao escoamento (CHÁCARA, 2020) e é dada pela razão entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento (JIAO et al., 2017).

Conforme a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento que cada fluido apresenta, esses são classificados como não-newtonianos e newtonianos (CUNHA FILHO, 2015; GOTTSCHLICH, 2011). Nos fluidos newtonianos, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento é linear. Quando essa linearidade não ocorre, os fluidos são ditos não-newtonianos (IRGENS, 2013).

Os fluidos não newtonianos são divididos em: viscoelásticos, dependentes do tempo e independentes do tempo (CHÁCARA, 2020). Os fluidos viscoelásticos apresentam um comportamento parcial entre líquido viscoso e sólido elástico (NASCIMENTO, 2008).

Os fluidos dependentes do tempo podem ser tixotrópicos ou reopéticos (GOTTSCHLICH, 2011). Nos tixotrópicos a viscosidade do fluido diminui ao longo do tempo, quando submetido a uma taxa de cisalhamento constante. Já nos reopéticos, o contrário acontece, a viscosidade do fluido aumenta ao longo do tempo, quando submetido a uma taxa de cisalhamento constante (REIS, 2008).

Dentre os fluidos independentes do tempo, tem-se os puramente viscosos e os viscoplásticos. Os fluidos puramente viscosos, podem ser dilatantes ou pseudoplásticos.

Nos fluidos dilatantes, tem-se um aumento da viscosidade, à medida que a taxa de cisalhamento cresce (IRGENS, 2013). Nos pseudoplásticos, tem-se uma diminuição da viscosidade, com o incremento da taxa de cisalhamento (CHÁCARA, 2020).

Os fluidos viscoplásticos ou plásticos diferem-se dos fluidos newtonianos apenas pela necessidade da superação de uma tensão limite de escoamento para iniciar seu fluxo (GOTSCHLICH, 2011). Quando sob tensão inferior à tensão de escoamento, apresentam comportamento de sólido, quando a tensão torna-se maior que a de escoamento, comportam-se como fluidos (GOTSCHLICH, 2011; IRGENS, 2013).

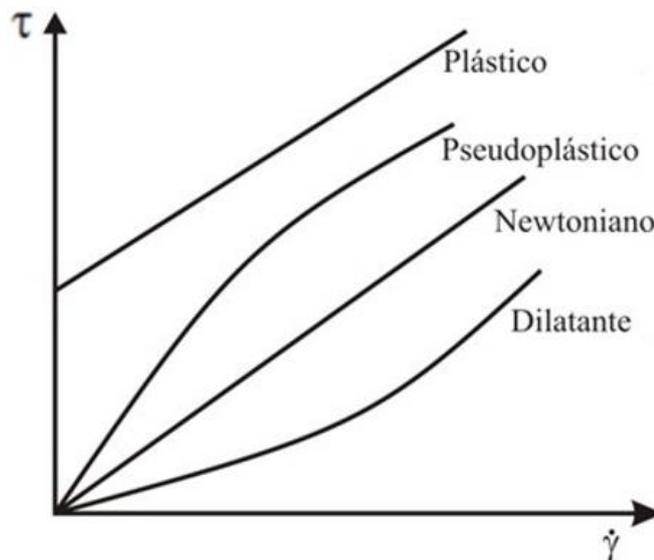
O comportamento de fluxo dos fluidos (Figura 4) é descrito a partir de modelos reológicos. As equações que definem os modelos e o tipo de fluido para qual cada modelo é aplicável estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5¹³ – Modelos reológicos x Fluidos - Equacionamento

Modelo Reológico	Equação	Fluido
Newton	$\tau = \mu * \dot{\gamma}$	Newtoniano
Lei das Potências	$\tau = k * \dot{\gamma}^n$	Dilatante Pseudoplástico
Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu * \dot{\gamma}$	Plástico
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + \mu * \dot{\gamma}^n$	
Bingham Modificado	$\tau = \tau_0 + \mu * \dot{\gamma} + c * \dot{\gamma}^2$	

K = Índice de consistência; n = Índice de comportamento do escoamento; μ = viscosidade plástica; τ_0 = tensão limite de escoamento; c=parâmetro de segunda ordem

Figura 4 – Curvas de fluxo dos fluidos – Tensão de cisalhamento (τ) x taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$)



Fonte: Adaptado de Gotschlich (2011)

¹³ A Tabela 5 foi construída a partir das informações de Singh e Singh (2018) e Gotschlich (2011).

2.4.1 Ensaio de Reometria

Os parâmetros reológicos são obtidos a partir do ensaio laboratorial de reometria, para isso utilizam-se reômetros (TAHAR et al., 2020). Dentre os resultados de ensaio, o reômetro fornece a resistência ao torque do concreto para as velocidades de rotação atuantes ao longo do tempo (FALESCHINI et al., 2014; SINGH; SINGH, 2018; TAHAR et al., 2020).

Em geral, são realizados dois tipos de testes nesse equipamento: curva de fluxo e crescimento de tensão (FERRARIS et al., 2017; SINGH; KUMAR; SINGH, 2017). Sendo mais comum o ensaio de curva de fluxo (FERRARIS et al., 2017). No teste de crescimento de tensão, utiliza-se uma velocidade de rotação baixa e constante e monitora-se o torque. A partir desse teste pode-se estudar a tixotropia do concreto e determinar a tensão de escoamento estática (correspondente ao torque máximo). Já no teste de curva de fluxo, mede-se a relação entre a velocidade de rotação do reômetro e o torque, esse teste possibilita estudar o fluxo do concreto (SINGH; KUMAR; SINGH, 2017).

Para determinar os valores de viscosidade plástica e a tensão de escoamento dinâmica, ajusta-se os dados experimentais obtidos no teste de curva de fluxo, no modelo reológico adequado (GONZÁLEZ-TABOADA et al., 2017a).

Como mostrado anteriormente, existem diversos modelos reológicos que descrevem os comportamentos dos fluídos, o modelo reológico de Bingham é o mais utilizado para o concreto (AJAY et al., 2018; GIRISH et al., 2018). No entanto, a obtenção de tensões de escoamento negativas (fisicamente impossível) indica que o modelo de Bingham não está adequado para descrever as propriedades reológicas do concreto, isso geralmente acontece em concretos autoadensáveis. Nesses casos, recomenda-se a utilização de outros modelos (GONZÁLEZ-TABOADA et al., 2017a; SINGH; SINGH, 2018), como o modelo de Herschel-Bulkley ou o de Bingham modificado. As descrições dos três modelos matemáticos estão apresentadas na Tabela 6.

Os parâmetros G e H , obtidos a partir do ajuste dos dados com o modelo reológico de Bingham, são semelhantes e diretamente proporcionais ao torque limite de escoamento (τ_0) e a viscosidade plástica (μ) da mistura, respectivamente (HU; WANG, 2011; MATOS et al., 2018; SCHANKOSKI et al., 2017).

Tabela 6 – Modelos Reológicos

Modelo de Bingham	Modelo de Herschel-Bulkley	Modelo de Bingham Modificado
$T = G + HN$ $\tau = \tau_0 + \mu * \dot{\gamma}$ $\tau_0 = \frac{G}{4\pi h} * \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) * \frac{1}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$ $\mu = \frac{H}{8\pi^2 h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right)$	$T = G_{HB} + H_{HB} N^n$ $\tau = \tau_0 + \mu * \dot{\gamma}^n$ $\tau_0 = \frac{G_{HB}}{4\pi h} * \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) * \frac{1}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$ $\mu = \frac{H_{HB}}{2^{2n+1} \pi^{n+1} h} n^n \left(\frac{1}{R_1^{2/n}} - \frac{1}{R_2^{2/n}} \right)^n$	$T = G + HN + CN^2$ $\tau = \tau_0 + \mu * \dot{\gamma} + c * \dot{\gamma}^2$ $\tau_0 = \frac{G}{4\pi h} * \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) * \frac{1}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$ $\mu = \frac{H}{8\pi^2 h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right)$ $c = \frac{C}{8\pi^3 h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \left(\frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \right)$
<p>Onde:</p> <p>T – torque (Nm)</p> <p>G – Interceptação obtida pelo ajuste linear entre torque e velocidade de rotação (Nm)</p> <p>H – Inclinação obtida do ajuste linear entre torque e velocidade de rotação (Nm.s)</p> <p>N – velocidade de rotação (rps)</p> <p>τ – tensão de cisalhamento (Pa)</p> <p>τ_0 – tensão de escoamento (Pa)</p> <p>μ – viscosidade plástica (Pa.s)</p> <p>h – altura da palheta (m)</p> <p>R_1 – raio interno (m)</p> <p>R_2 – raio externo (m)</p>	<p>Onde:</p> <p>T – torque (Nm)</p> <p>G_{HB} e H_{HB} – parâmetros previstos por Herschel-Bulkley para uma relação TN</p> <p>N – velocidade de rotação (rps)</p> <p>τ – tensão de cisalhamento (Pa)</p> <p>τ_0 – tensão de escoamento (Pa)</p> <p>μ – viscosidade plástica (Pa.s)</p> <p>n – índice de fluxo</p> <p>h – altura da palheta (m)</p> <p>R_1 – raio interno (m)</p> <p>R_2 – raio externo (m)</p>	<p>Onde:</p> <p>T – torque (Nm)</p> <p>G, H e C – parâmetros obtidos do ajuste polinomial de segunda ordem para uma relação TN</p> <p>N – velocidade de rotação (rps)</p> <p>τ – tensão de cisalhamento (Pa)</p> <p>τ_0 – tensão de escoamento (Pa)</p> <p>μ – viscosidade plástica (Pa.s)</p> <p>c – parâmetro de segunda ordem (Pa s²)</p> <p>h – altura da palheta (m)</p> <p>R_1 – raio interno (m)</p> <p>R_2 – raio externo (m)</p>

Fonte: Singh e Singh (2018)

2.4.2 Fatores que influenciam na reologia do concreto com RA

O comportamento reológico do concreto é influenciado por fatores como: relação água/cimento, relação pasta/agregados, presença de aditivo superplastificante, tipo de ligantes (cimento e adições minerais) (AMARIO et al., 2021), finura do cimento (NAZAR et al., 2020), tempo de mistura (NAZAR et al., 2020; WANG et al., 2021), temperatura (WANG et al., 2021) e granulometria dos agregados (JIAO et al., 2017).

No concreto produzido com agregados reciclados, além das condições citadas anteriormente, tem-se a influência de outros fatores particulares desses agregados, nas propriedades reológicas (tensão de escoamento e viscosidade plástica). Dentre eles, o estado de saturação, formato irregular e rugosidade do agregado reciclado (AMARIO et al., 2017), bem como a elevada absorção de água desses agregados (RANGEL et al., 2019). A elevação dos parâmetros reológicos (tensão de escoamento e viscosidade plástica) indica misturas mais coesas e com menor fluidez (WANG et al., 2017).

2.4.2.1 Relação água/cimento, teor de pasta e aditivo superplastificante

Alguns autores constataram uma relação inversamente proporcional entre a relação água/cimento e os parâmetros reológicos, ou seja, conforme aumenta-se a relação água/cimento, tem-se uma diminuição da viscosidade e da tensão de escoamento (BANFILL et al., 2006; KUDER et al., 2007; WALLEVIK; WALLEVIK, 2011; WANG et al., 2017). O mesmo ocorre ao elevar o teor de pasta, pois essa preenche os vazios entre os agregados conferindo fluidez para o concreto (JIAO et al., 2017).

A presença de superplastificante também diminui a tensão de escoamento (PERROT et al., 2012) e melhora a reologia do concreto fresco (KWAN; FUNG, 2013), pois dispersa as partículas de cimento, liberando a água aprisionada nos aglomerados, aumentando o teor de água livre na mistura (AMER et al., 2016).

2.4.2.2 Cimento e Sílica Ativa

Jiao et al. (2017) citam diversos estudos que observaram uma diminuição da fluidez e elevação dos parâmetros reológicos com a utilização de sílica ativa (AHARI; ERDEM; RAMYAR, 2015; BENAICHA et al., 2015; LU; YANG; MEI, 2015; RAHMAN; BALUCH; MALIK, 2014). Os grãos de sílica ativa possuem elevada área superficial (LI; KWAN, 2014), assim, essa perda de fluidez pode ser ocasionada pela elevação da demanda de água, em virtude do aumento da área superficial (NAZAR et al., 2020).

Observa-se influência das propriedades físicas e da composição do cimento na reologia do concreto (JIAO et al., 2017; KONDEPUDI; SUBRAMANIAM, 2019). Tendo-se menor fluidez para os cimentos com elevada perda ao fogo, área superficial (JIAO et al., 2017), teor alcalino, teor de C_3A e finura (DILS; BOEL; SCHUTTER, 2013).

2.4.2.3 Tempo e Temperatura

Os parâmetros reológicos (viscosidade plástica e tensão de escoamento) são afetados pelo tempo de mistura (MARTINI; KHARTABIL; NEITHALATH, 2021), uma vez que o concreto vai perdendo sua fluidez ao longo do período de hidratação (TAHAR et al., 2020) e pela temperatura. Temperaturas elevadas aceleram a pega do concreto, havendo assim perda de trabalhabilidade (HEIKAL; MORSY; AIAD, 2005; PETIT; WIRQUIN; KHAYAT, 2010) e aumento da viscosidade plástica (WU; FALL; CAI, 2013).

2.4.2.4 Agregados e estado de saturação

A angularidade e a rugosidade dos agregados reciclados aumentam o atrito entre as partículas (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2018), causando um aumento nos valores dos parâmetros reológicos do concreto (viscosidade plástica e tensão de escoamento) e consequentemente uma perda na sua fluidez (BIZINOTTO et al., 2017; JIAO et al., 2017; WANG et al., 2021).

Além da morfologia, o teor de agregado presente no concreto também afeta as propriedades reológicas, uma vez que esse teor também influencia no atrito existente entre as partículas e no teor de pasta livre (JIAO et al., 2017). Vários autores observaram aumento dos parâmetros reológicos à medida que se aumenta o teor de agregado gráudo reciclado (AMER et al., 2016; BIZINOTTO et al., 2017; GONZÁLEZ-TABOADA et al., 2017b; MARTINI; KHARTABIL; NEITHALATH, 2021; TAHAR et al., 2020). González-Taboada et al. (2017b) observaram ainda, que, em geral, os parâmetros reológicos são afetados igualmente, exceto para teores de agregado reciclado inferiores a 50%, onde a tensão de escoamento estática foi mais afetada em relação à viscosidade plástica.

Em relação ao agregado miúdo, a presença desses entre os agregados gráudos preenche os vazios e reduz o atrito, assim, tem-se uma menor viscosidade plástica e melhor fluidez do concreto (JIAO et al., 2017).

No caso do uso de agregado reciclado seco, se a água de absorção não for compensada, os agregados absorvem a água de amassamento, levando ao aumento da viscosidade plástica e da tensão de escoamento. Assim, tem-se como alternativa a compensação da água de absorção durante a mistura ou a pré-saturação dos agregados utilizados no concreto (SILVA; DE BRITO; DHIR, 2018).

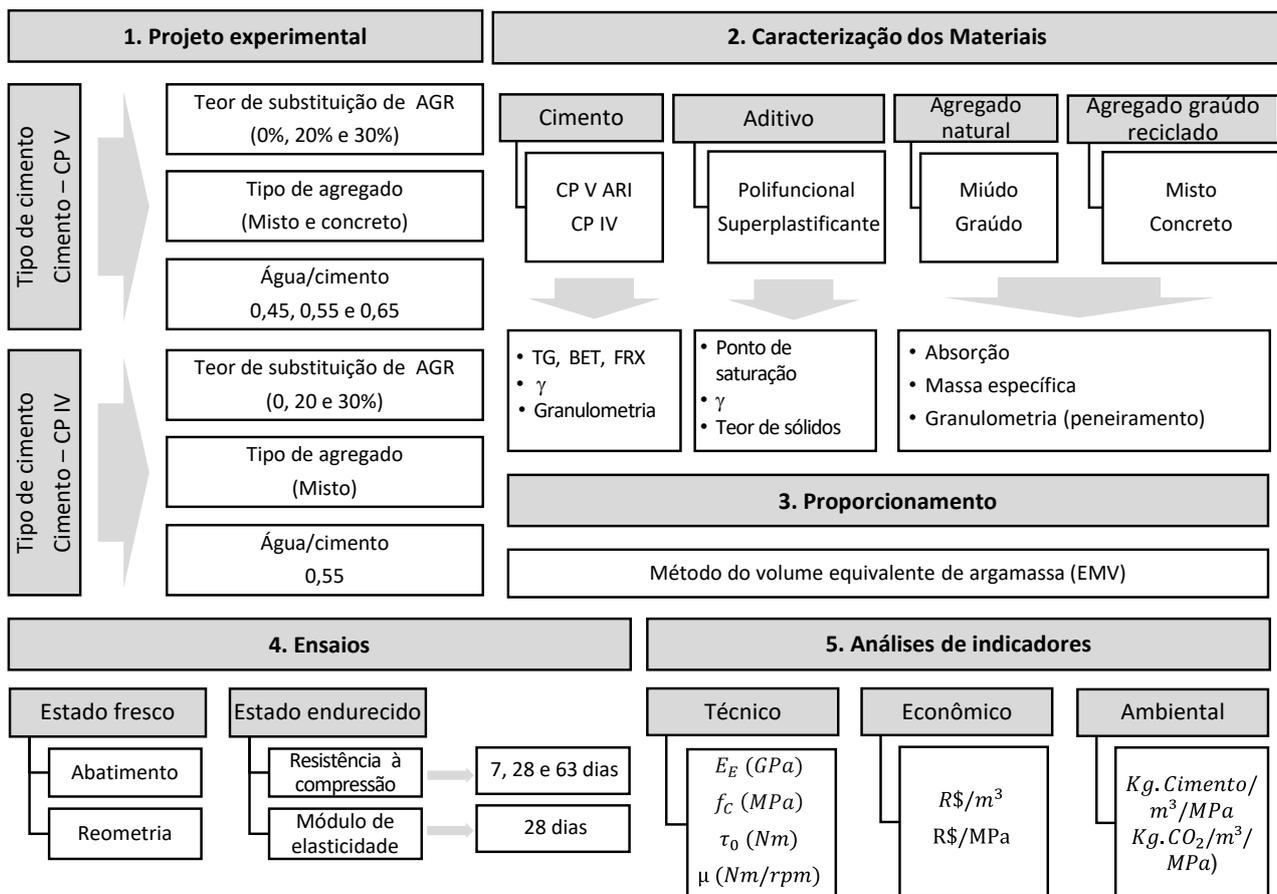
Diversas pesquisas constataram que a utilização de agregados reciclados pré-saturados leva a melhores resultados em termos reológicos, porém, prejudicam a resistência à compressão (AMER et al., 2016; BIZINOTTO et al., 2017; TAHAR et al., 2020), pois podem elevar a relação água/cimento (ANDRADE FILHO, 2021).

Segundo Silva, De Brito e Dhir (2018), a utilização do método de compensação da água de absorção conduz a resistências mecânicas ligeiramente mais elevadas, em comparação à pré-saturação. Além disso, segundo González-Taboada et al. (2017a), a utilização do método de pré-saturação dos agregados na indústria é inviável, principalmente para elevadas quantidades de agregado (superior a 20% de substituição).

3 MÉTODO

A método de pesquisa deste trabalho foi desenvolvida em seis etapas: i) Definição do projeto experimental; ii) Caracterização dos materiais; iii) Proporcionamento das misturas e produção das amostras; iv) Ensaio de reologia; v) Ensaio de caracterização mecânica; e, vi) Análise dos resultados. Na Figura 5 está apresentado o fluxograma da pesquisa.

Figura 5 – Fluxograma da pesquisa



3.1 DEFINIÇÃO DO PROJETO EXPERIMENTAL

Neste trabalho foi realizada a avaliação dos indicadores de ecoeficiência de concretos produzidos com agregados reciclados mistos e de concreto, proporcionados pelo método de dosagem EMV, tendo em conta propriedades no estado fresco e endurecido. Avaliou-se a influência do teor de substituição de agregado graúdo reciclado (0%, 20% e 30%), da origem do RCD (misto ou concreto), do tipo de cimento (CP V ARI e CP IV 32) e da relação água/cimento (0,45, 0,55, 0,65) na ecoeficiência e nas propriedades reológicas

dos concretos com RCD, para 14 misturas (Tabela 7). Optou-se por trabalhar com concretos de classes de resistência mais baixas (C20 à C50), uma vez que essas são as classes de resistência de maior demanda comercial e que carecem de estudos de ecoeficiência.

Tabela 7 - Variáveis do projeto experimental

Nomenclatura ²	Tipo de Cimento	a/c	Tipo de agregado	% Agregados ¹				
				NA		RA		
				FA	CA	FA	CA	
REF 0,45 V N	CP V ARI (V)	0,45	Natural (N)	100	100	0	0	
20% 0,45 V M			Reciclado misto (M)	100	80	0	20	
30% 0,45 V M				100	70	0	30	
REF 0,65 V N		0,65	Natural (N)	100	100	0	0	
20% 0,65 V M			Reciclado misto (M)	100	80	0	20	
30% 0,65 V M				100	70	0	30	
REF 0,55 V N			0,55	Natural (N)	100	100	0	0
20% 0,55 V M				Reciclado misto (M)	100	80	0	20
30% 0,55 V M					100	70	0	30
20% 0,55 V C		Reciclado de concreto (C)		100	80	0	20	
30% 0,55 V C			100	70	0	30		
20% 0,55 IV M		CP IV (IV)	0,55	Reciclado misto (M)	100	80	0	20
30% 0,55 IV M					100	70	0	30
REF 0,55 IV N				Natural (N)	100	100	0	0

¹ "NA"= Agregado Natural; "RA"= Agregado Reciclado; "FA"= Agregado miúdo; "CA"= Agregado graúdo.

² "REF, 20% e 30%"= 0%, 20% e 30% de agregado reciclado; "0,45, 0,55 e 0,65" = a/c; "V e IV"= CP V e CP IV. "N, M e C"= Agregado natural, agregado reciclado misto e agregado reciclado de concreto.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para reproduzir as amostras dos concretos com agregados graúdos reciclados (RCA-C), foram utilizados cimento CP V ARI e CP IV 32, agregado miúdo natural de origem quartzosa do Rio Paraná, brita natural de origem basáltica da pedreira de Foz do Iguaçu/PR, agregado graúdo reciclado de RCD de concreto, agregado graúdo reciclado de RCD misto, água e aditivos polifuncional e superplastificante. Os ensaios de caracterização¹⁴ realizados estão apresentadas nas Figuras 6 e 7 e nas Tabelas 8 e 9.

Por meio da composição gravimétrica do agregado graúdo reciclado misto, observou-se que este é composto por 10,01% de cerâmica vermelha, 26,33% de argamassas, 5,83% de cerâmica de revestimento, 28,21% de agregado graúdo, 27,55% de agregados com argamassa aderida e 2,08% de outros materiais.

Para viabilizar o proporcionamento dos concretos com o EMV, fez-se a determinação dos teores de argamassa residual (RM) dos agregados reciclados a partir da

¹⁴ Todos os ensaios de caracterização realizados estão disponíveis no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da Universidade Federal da Integração Latino Americana (UNILA), com exceção do ensaio de espectrometria por fluorescência de raios X (FRX) que foi conduzido junto ao Centro Regional de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da Universidade Federal de Goiás (UFG).

metodologia de Abbas *et al.* (2008). O ensaio consiste em imergir três¹⁵ quilos de agregado seco, com dimensão granulométrica superior a 4,75 mm em sulfato de sódio com concentração de 26%. Após 24 horas de imersão, segue-se para cinco ciclos de congelamento (16 horas à -17 °C) e descongelamento (8 horas à 80 °C). Feito isso, o sulfato de sódio é eliminado e os agregados lavados sob a peneira 4,75 mm. Após a lavagem, os agregados são novamente secos por 24 horas a 105 °C e uma nova pesagem é realizada. O valor do teor de argamassa residual é obtido a partir da Equação 5.

$$RMC\% = \left[\frac{W_{RCA} - W_{OVA}}{W_{RCA}} \right] * 100 \quad (5)$$

Onde: W_{RCA} = massa inicial seca do RCA
 W_{OVA} = massa final seca do OVA (após remoção da RM)
 RMC = teor de argamassa residual

Tabela 8 - Ensaio de caracterização físico-química dos materiais

Propriedade	Norma/Procedimento	Material	Resultados
Massa específica (g/cm ³)	ABNT NBR 16605 (2017)	Cimento CP V ARI	3,03
		Cimento CP IV	2,96
	ABNT NBR 16916 (2021)	Areia Natural	2,58
	ABNT NBR 16917 (2021)	Agregado Graúdo Natural	2,90
		Agregado Graúdo Reciclado Misto	2,50
		Agregado Graúdo Reciclado de Concreto	2,63
	ABNT NBR 11768-3 (2019)	Aditivo Polifuncional	1,02
ABNT NBR 11768-3 (2019)	Aditivo Superplastificante	1,08	
Teor de argamassa residual (%)	ABBAS <i>et al.</i> (2008)	Agregado Graúdo Reciclado Misto	47,36
		Agregado Graúdo Reciclado de Concreto	30,83
Dmed (μm) por granulometria a laser ¹⁾	ISO 13320 (2020)	Cimento CP V ARI	11,90
		Cimento CP IV	10,99
Dmax (mm) por peneiramento ¹⁾	ABNT NBR NM 248 (2003)	Areia Natural	4,75
		Agregado Graúdo Natural	19,00
		Agregado Graúdo Reciclado Misto	
		Agregado Graúdo Reciclado de Concreto	
Absorção (%)	ABNT NBR NM 30 (2001)	Areia Natural	0,96
	ABNT NBR NM 53 (2009)	Agregado Graúdo Natural	1,39
		Agregado Graúdo Reciclado Misto	7,29
		Agregado Graúdo Reciclado de Concreto	2,11
Ponto de saturação do aditivo superplastificante (%)	KANTRO (1980)	Pasta (CP V ARI + água)	0,60
Ponto de saturação do aditivo polifuncional (%)		Pasta (CP IV + água)	0,60
		Pasta (CP V ARI + água)	0,30
		Pasta (CP IV + água)	0,4
Teor de sólidos por termoanálise	ABNT NBR 11768-3 (2019)	Aditivo Polifuncional	17,79
	ABNT NBR 11768-3 (2019)	Aditivo Superplastificante	34,79

¹⁵ 2 kg com granulometria superior a 9,5mm e 1 kg com granulometria entre 4,75 e 9,5mm.

Propriedade	Norma/Procedimento	Material	Resultados
Análise termogravimétrica (TG)	ASTM E 2550 (2017)	Cimento CP V ARI	2)
		Cimento CP IV	
Espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX)	ABNT NBR 16137 (2016)	Cimento CP V ARI	3)
		Cimento CP IV	
Área específica BET (m ² /g)	ISO 9277 (2010)	Cimento CP V ARI	3,57
		Cimento CP IV	2,97

1) Os gráficos estão na Figura 6; 2) Os resultados estão na Figura 7; 3) Os resultados estão apresentados na tabela 9.

Figura 6 - Curvas Granulométricas dos a) cimentos b) agregados graúdos natural e reciclados (ARM e ARC) e c) agregado miúdo empregados

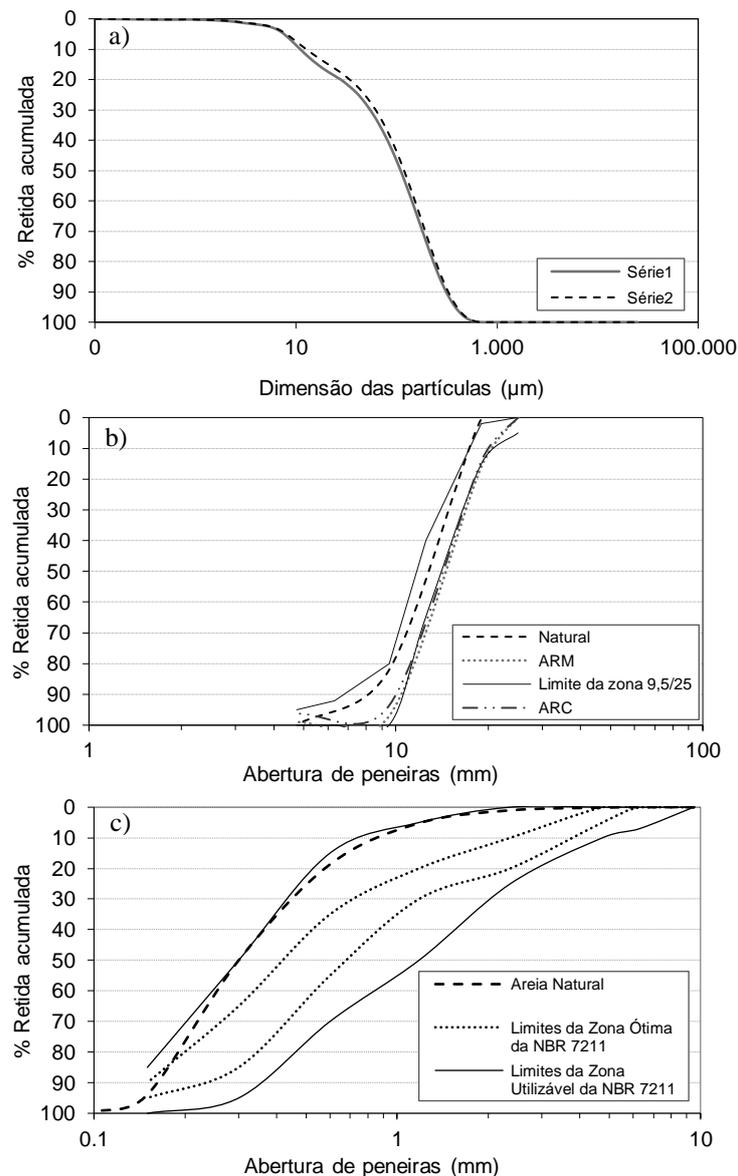
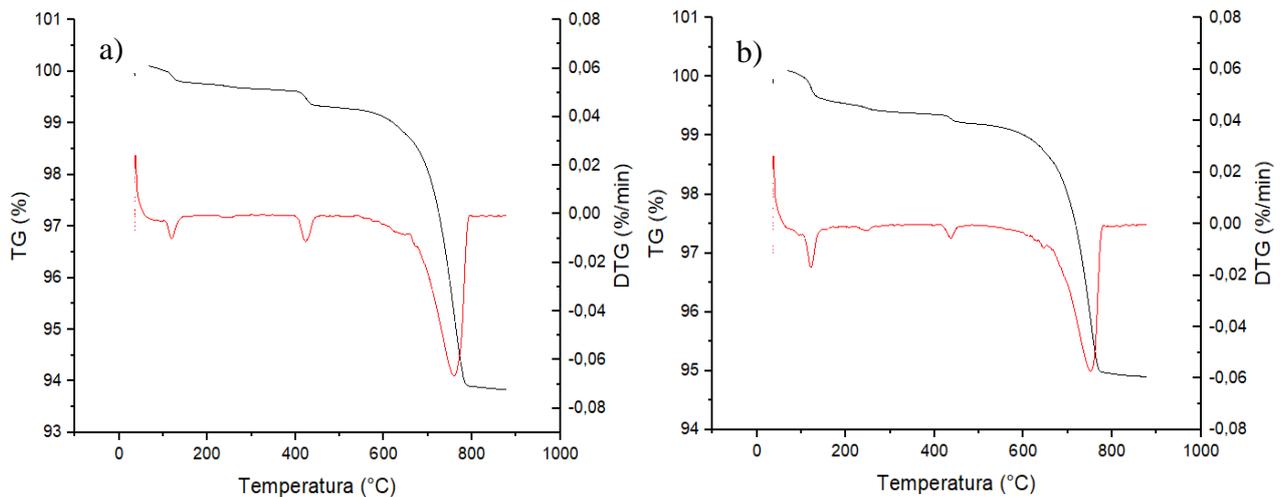


Tabela 9 – Espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) dos cimentos e argamassa residual

Amostra (%)	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Outros	P.F
CP V ARI	60,06	18,31	6,22	4,3	2,76	1,95	0,8	0,31	0,19	-	-	6,00
CP IV	49,93	25,45	5,62	7,37	2,61	2,44	1,32	0,41	0,16	-	-	4,58
Argamassa Residual MRA	7,41	69,95	1,43	5,71	-	3,26	0,43	1,22	2,17	-	-	7,46

P.F = Perda ao Fogo

Figura 7 - Análise termogravimétrica (TG) do a) cimento CP V ARI b) CP IV



Observa-se nos resultados de análise termogravimétrica apresentados na Figura 7, um percentual residual à 900°C de aproximadamente 94% e 95% para os cimentos CP V e CP IV respectivamente. A maior perda de massa ocorreu entre 600°C e 780°C devido à descarbonatação (liberação de CO_2) do material carbonático presente na composição do cimento

3.3 PROPORCIONAMENTO DAS MISTURAS

O método de dosagem utilizado para o proporcionamento das misturas foi o Método do Volume Equivalente de Argamassa (EMV), desenvolvido por Fathifazl *et al* (2009), o qual visa a otimização de dosagem de concretos com resíduos de construção. Para a aplicação do método, inicialmente determina-se as proporções¹⁶ da mistura de referência dosada por um método convencional. Neste trabalho, foram adotadas como misturas de referências as do estudo de Rigo (2019), proporcionadas pelo método do IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1993). Também determina-se os pesos específicos dos materiais: agregado graúdo reciclado (SG_b^{RCA}) e agregado natural (SG_b^{NA}), o módulo de finura da areia, o diâmetro máximo do agregado graúdo (D_{max}) e o teor de argamassa residual (RMC) (equação 5, ver resultados na tabela 8).

O teor de argamassa residual máximo - RMC_{max} é determinado pela equação 6. Se $RMC > RMC_{max}$ não é possível substituir 100% do agregado natural (NA) por agregado

¹⁶ W_w^{NAC} = água; W_c^{NAC} = cimento; W_{OD-FA}^{NAC} = areia seca; W_{NA}^{NAC} = agregado grúdo seco.

gráudo reciclado (RCA) na mistura garantindo as mesmas propriedades do concreto de referência produzido com agregado natural.

$$RMC_{max} \% = \left(1 - V_{DR-NA}^{NAC} * \frac{SG_b^{NA}}{SG_b^{RCA}} \right) * 100 \quad (6)$$

Onde: V_{DR-NA}^{NAC} = massa específica compactada unitária do NA no NAC¹⁷
 SG_b^{NA} = massa específica do NA
 SG_b^{RCA} = massa específica do RCA
 RMC_{max} = teor de argamassa residual máximo

Assim, existe uma relação mínima (R_{min}), que indica a porcentagem do volume total de agregado gráudo do concreto com RCA, que deve ser obrigatoriamente composta por agregado natural. Admitindo que RCA e NA possuem a mesma forma e granulometria e que o agregado natural utilizado seja similar ao agregado virgem original do agregado gráudo reciclado, determina-se o valor de R_{min} a partir da Equação 7. Se o valor de R_{min} for negativo, significa que é possível realizar 100% de substituição do agregado natural por RCA.

$$R_{min} = 1 - \frac{(1 - RMC)}{V_{DR-NA}^{NAC}} * \frac{SG_b^{RCA}}{SG_b^{NA}} \geq 0 \quad (7)$$

Onde: V_{DR-NA}^{NAC} = massa específica compactada unitária do NA no NAC
 SG_b^{NA} = massa específica do NA
 SG_b^{RCA} = massa específica do RCA
 R_{min} = teor mínimo de NA em RCA – C
 RMC = teor de argamassa residual

Para compensar a deficiência de agregado natural no concreto com agregado gráudo reciclado, em comparação com as misturas de referência, adota-se $V_{NA}^{RCA-concrete} = V_{RM}^{RCA-concrete}$. Assim, a relação R é dada pela Equação 8.

$$R = 1 - (1 - RMC) * \frac{SG_b^{RCA}}{SG_b^{OVA}} \quad (8)$$

Onde: SG_b^{OVA} = massa específica do OVA
 SG_b^{RCA} = massa específica do RCA
 R = teor de NA em RCA – C
 RMC = teor de argamassa residual

Feito isso, calcula-se os volumes necessários de agregado gráudo reciclado e agregado natural no concreto com agregado gráudo reciclado (RCA-C), com as Equações

¹⁷ De posse do Dmax, do módulo de finura e da Tabela A.1.5.3.6 da ACI-211.1-97 (ACI, 1997), determina-se o V_{DR-NA}^{NAC} .

9 a 11. Depois, as proporções de RCA e NA no RCA-C são determinadas a partir das Equações 12 e 13.

$$V_{RCA}^{RCA-C} = \frac{V_{NA}^{NAC} * (1 - R)}{(1 - RMC) * \frac{SG_b^{RCA}}{SG_b^{OVA}}} \quad (9)$$

$$V_{NA}^{RCA-C} = V_{NA}^{NAC} * R \quad (10)$$

$$V_{NA}^{NAC} = \frac{W_{OD-NA}^{NAC}}{SG_b^{NA} * 1000} \quad (11)$$

$$W_{OD-RCA}^{RCA-concrete} = V_{RCA}^{RCA-C} * SG_b^{RCA} * 1,000 \quad (12)$$

$$W_{OD-NA}^{RCA-concrete} = V_{NA}^{RCA-C} * SG_b^{NA} * 1,000 \quad (13)$$

Onde: R = teor de NA em RCA – C
 RMC = teor de argamassa residual
 V_{RCA}^{RCA-C} = volume de RCA em RCA – C
 SG_b^{RCA} = massa específica do RCA
 SG_b^{OVA} = massa específica do OVA
 V_{NA}^{NAC} = volume de NA em NAC
 V_{NA}^{RCA-C} = volume de NA em RCA – C
 W_{OD-NA}^{NAC} = peso de NA no NAC
 $W_{OD-RCA}^{RCA-concrete}$ = peso de RCA em RCA – C
 $W_{OD-NA}^{RCA-concrete}$ = peso de NA em RCA – C
 SG_b^{NA} = massa específica de NA

Para determinar as quantidades de água, cimento e areia na mistura de concreto com agregado graúdo reciclado (Equações 16 a 18), deve-se conhecer o volume de Argamassa Residual (RM) e o volume de Argamassa Nova (NM) no concreto com agregado graúdo reciclado, dados pelas Equações 14 e 15, respectivamente.

$$V_{RM}^{RCA-C} = V_{RCA}^{RCA-C} * \left[1 - (1 - RMC) * \frac{SG_b^{RCA}}{SG_b^{OVA}} \right] \quad (14)$$

$$V_{NM}^{RCA-C} = V_M^{NAC} - V_{RM}^{RCA-C} \quad (15)$$

$$W_w^{RCA-C} = W_w^{NAC} * \frac{V_{NM}^{RCA-C}}{V_M^{NAC}} \quad (16)$$

$$W_c^{RCA-C} = W_c^{NAC} * \frac{V_{NM}^{RCA-C}}{V_M^{NAC}} \quad (17)$$

$$W_{OD-FA}^{RCA-C} = W_{OD-FA}^{NAC} * \frac{V_{NM}^{RCA-C}}{V_M^{NAC}} \quad (18)$$

Onde: V_{RM}^{RCA-C} = volume de RM em RCA - C
 RMC = teor de argamassa residual
 V_{RCA}^{RCA-C} = volume de RCA em RCA - C
 SG_b^{RCA} = massa específica do RCA
 SG_b^{OVA} = massa específica do OVA
 V_{NM}^{RCA-C} = volume de NM em RCA - C
 V_M^{NAC} = volume de argamassa em NAC
 W_w^{RCA-C} e W_w^{NAC} = peso de água nas misturas RCA - C e NAC
 W_c^{RCA-C} e W_c^{NAC} = peso de cimento nas misturas RCA - C e NAC
 W_{OD-FA}^{RCA-C} = peso de agregado miúdo em RCA - C
 W_{OD-FA}^{NAC} = peso de agregado miúdo em NAC

Nas Tabelas 10 e 11 tem-se as proporções e quantidades de materiais utilizadas para produzir 1m³ de concreto de cada uma das misturas, dosadas pelo método IPT e pelo método EMV. Padronizou-se o consumo de cimento obtido com a dosagem do método EMV das misturas de 20% com agregado reciclado misto (MRA) para as misturas de 30% de MRA. Essa padronização foi realizada para tornar o teor de argamassa dessas misturas mais próximo ao das misturas de 20% de MRA e assim melhorar suas propriedades no estado fresco, a quantidade de cimento adicional foi descontada do volume de agregado miúdo. Esse ajuste não foi realizado para a mistura com agregado reciclado de concreto (CRA) pois o teor de argamassa dessa mistura já era maior do que o das demais misturas de 30% de agregado reciclado.

Tabela 10 - Material necessário (Kg) para produção de 1m³ de concreto

Método de dosagem	Nomenclatura	Cimento	Agregado Miúdo Natural	Agregado graúdo		Água	Água total ¹	Aditivo ² (%)
				Natural	Reciclado			
IPT/EPUSP	REF 0,45 V N	419	803	1084	0	189	200	0,3P
	REF 0,55 V N	339	882	1083	0	186	198	
	REF 0,55 IV N	339	882	1083	0	186	198	
	REF 0,65 V N	284	936	1082	0	185	197	0,6 P
EMV	20% 0,45 V M	384	736	958	240	173	196	0,3 P + 0,3 S
	20% 0,55 V M	311	809	957	239	171	194	
	20% 0,55 V C	321	836	923	231	177	186	
	20% 0,55 IV M	311	809	957	239	171	194	
	20% 0,65 V M	261	858	956	239	169	193	
	30% 0,45 V M	384	716	885	379	164	194	0,6 S
	30% 0,55 V M	311	792	884	379	162	192	
	30% 0,55 V C	311	811	835	359	171	179	
30% 0,65 V M	261	844	883	378	160	191		
30% 0,55 IV M	311	792	884	379	162	192		

¹⁾ Água com adição da água de absorção; ²⁾ O teor de aditivo é dado em função da massa de cimento, foram utilizados aditivos polifuncional (P), superplastificante (S) e a mescla de ambos (P+S). Foi aumentando-se gradualmente o teor de aditivo conforme aumentava-se o teor de RA, para manter a fluidez adequada.

Tabela 11 - Proporcionalamento do concreto, em massa.

Método de dosagem	Nomenclatura	Cimento	Agregado Miúdo Natural	Agregado graúdo		a/c ¹	α^2
				Natural	Reciclado		
IPT/EPUSP	REF 0,45 V N	1,00	1,92	2,59	0,00	0,45	0,53
	REF 0,55 V N	1,00	2,60	3,20	0,00	0,55	
	REF 0,55 IV N	1,00	2,60	3,20	0,00	0,55	
	REF 0,65 V N	1,00	3,29	3,81	0,00	0,65	
EMV	20% 0,45 V M	1,00	1,92	2,49	0,62	0,45	0,48
	20% 0,55 V M	1,00	2,60	3,08	0,77	0,55	
	20% 0,55 V C	1,00	2,60	2,87	0,72	0,55	0,50
	20% 0,55 IV M	1,00	2,60	3,08	0,77	0,55	0,48
	20% 0,65 V M	1,00	3,29	3,67	0,92	0,65	
	30% 0,45 V M	1,00	1,86	2,30	0,99	0,43	0,47
	30% 0,55 V M	1,00	2,55	2,84	1,22	0,52	
	30% 0,55 V C	1,00	2,60	2,68	1,15	0,55	0,48
	30% 0,65 V M	1,00	3,24	3,39	1,45	0,62	0,47
	30% 0,55 IV M	1,00	2,55	2,84	1,22	0,52	

¹ Em virtude do ajuste do consumo de cimento das misturas com 30% de agregado reciclado misto, ocorreu uma ligeira redução da relação a/c dessas misturas em relação as demais; ² Teor de argamassa seca.

3.4 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS

As misturas foram produzidas em misturador de elevada eficiência e adensadas com um vibrador de imersão. O agregado miúdo foi utilizado na condição seca (secagem em estufa a 100 °C por 24 horas) e os agregados graúdos na condição seca ao ar, em ambiente de laboratório.

Foram conduzidos ensaios de abatimento de tronco de cone, fixando o abatimento¹⁸ em 120 ± 30 mm e reometria para avaliar as propriedades no estado fresco. O ensaio de reometria foi realizado apenas em concretos de relação água/cimento=0,55 e produzidos com cimento CP V. Para avaliar as propriedades no estado endurecido, foram realizados ensaios de resistência à compressão (fc) aos 7, 28 e 63 dias e módulo de elasticidade estático (EE) aos 28 dias (Tabela 12).

Tabela 12 – Normas e procedimentos de ensaio no estado fresco e endurecido

Ensaio ¹⁹	Norma/Procedimento	Nº de amostras por mistura	Formato	Idade de ensaio (dias)
Reometria	Rebmann (2016)	-	-	Imediatamente após a mistura
Abatimento de tronco de cone	ABNT NBR NM 67 (1998)	-	-	
Resistência à compressão	ABNT NBR 5739 (2018)	3	Cilíndrico (10x20 cm)	7
		3		28
		3		63
Módulo de elasticidade estático	ABNT NBR 8522 (2017)	3		28

¹⁸ Foi adotada a classe de consistência S100 conforme a ABNT NBR 8953 (2015) e o ajuste da consistência foi realizado na quantidade de aditivo.

¹⁹ O ensaio de reometria foi realizado no laboratório da Universidade Federal do Ceará (UFC) e os demais ensaios no laboratório da ITAIPU BINACIONAL.

3.5 REOMETRIA

Os concretos utilizados para o ensaio de reometria foram misturados no próprio equipamento de ensaio, reômetro rotacional planetário PHESO (Figura 8). O reômetro conta com um recipiente de mistura com capacidade de 20 L, 20,2 cm de altura e 37,8 cm de diâmetro, com haste de mistura de 10,5 cm de altura e 28,0 cm de diâmetro.

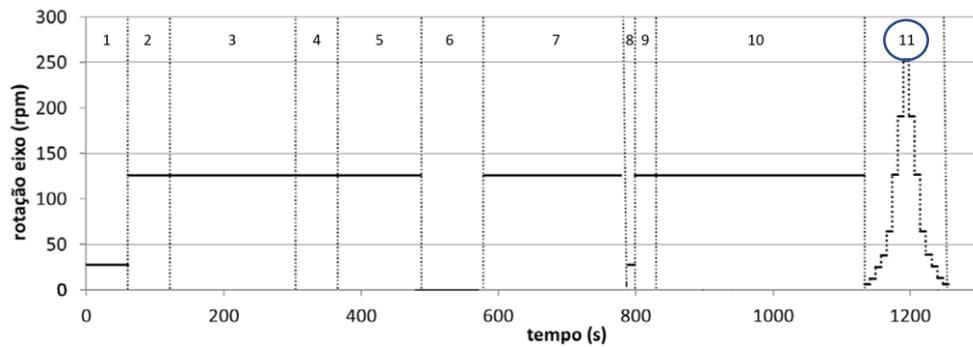
Figura 8 – Reômetro PHESO e haste de mistura



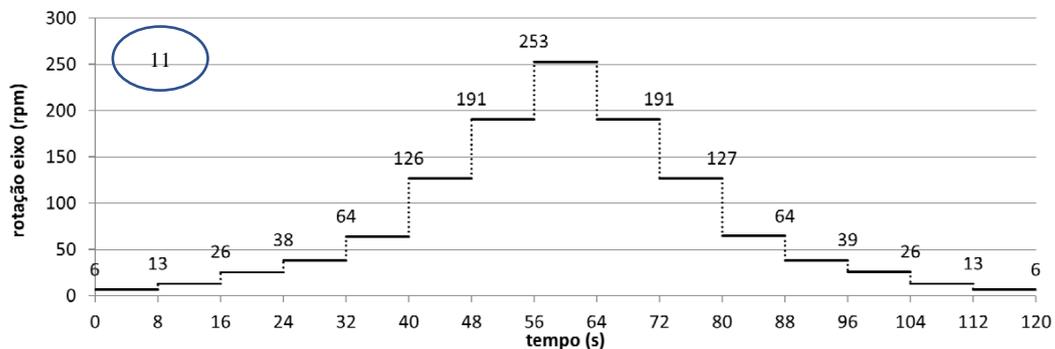
O processo de mistura (Figura 9) e o protocolo de ensaio (Figura 10) foram conduzidos em 11 etapas: 1) Haste de mistura é posicionada à 1 mm do fundo do recipiente de mistura; 2) Cimento e areia são colocados no recipiente de mistura (1min); 3) Cimento e areia são misturados por 3 minutos; 4) Água e aditivo são adicionados (1min); 5) Homogeneíza-se a argamassa por 2 minutos; 6) Raspagem das laterais do recipiente de mistura (1,5 min); 7) Homogeneíza-se a argamassa por 3,5 minutos; 8) Haste de mistura é reposicionada à 3 mm do fundo do recipiente de mistura (evita o travamento do agregado graúdo); 9) Agregados graúdos são adicionados (30 segundos); 10) Homogeneíza-se o concreto por 5 minutos; 11) Realiza-se o ciclo de cisalhamento do concreto (2 minutos) (REBMANN, 2016).

O ensaio realizado foi o teste de curva de fluxo, segundo o protocolo proposto por Rebmann (2016). Esse protocolo foi configurado no *software* do reômetro (número de ciclos, tempo de duração e velocidade de cada ciclo), conforme exemplificado na Figura 10.

Durante o processo de ensaio, o equipamento faz registros dos torques necessários para atingir cada uma das velocidades de rotação estabelecidas (Figura 10), gerando um gráfico que relaciona a resistência ao torque do concreto (Nm) com as velocidades de rotação (rpm). De posse desses dados, utilizam-se os modelos matemáticos de Bingham para ajustar os dados e determinar os parâmetros reológicos do concreto, tensão de escoamento – τ_0 e a viscosidade plástica - μ (FALESCHINI et al., 2014; SINGH; SINGH, 2018). Para o ajuste utilizam-se dados da curva descendente de torque x velocidade (VARHEN, 2016; REBMANN, 2016).

Figura 9 – Procedimento de mistura do concreto e ciclo de cisalhamento do ensaio de reometria

Fonte: Adaptado de Rebmann (2016)

Figura 10 – Detalhamento da etapa 11 (Figura 9) – ciclo de cisalhamento

Fonte: Rebmann (2016)

Durante o processo de ensaio, o equipamento faz registros dos torques necessários para atingir cada uma das velocidades de rotação estabelecidas (Figura 10), gerando um gráfico que relaciona a resistência ao torque do concreto (Nm) com as velocidades de rotação (rpm). De posse desses dados, utilizam-se os modelos matemáticos de Bingham para ajustar os dados e determinar os parâmetros reológicos do concreto, tensão de escoamento – τ_0 e a viscosidade plástica - μ (FALESCHINI et al., 2014; SINGH; SINGH, 2018). Para o ajuste utilizam-se dados da curva descendente de torque x velocidade (VARHEN, 2016; REBMANN, 2016).

3.6 MÉTODO DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise de resultados dos concretos produzidos com agregado reciclados foi realizada com base na avaliação de três parâmetros:

- i) Técnico
 - a. Mecânico (resistência à compressão – f_c (MPa), módulo de elasticidade – E_E (GPa));

- b. Fluidez (tensão de escoamento – τ_0 (Nm) e viscosidade plástica – μ (Nm/rpm)) e abatimento (mm);
- ii) Ambiental (IL - Kg.Cimento/m³/MPa e IC - Kg.CO₂/m³/MPa).
- iii) Econômico (R\$/m³ e R\$/MPa);

A análise de desempenho técnico foi realizada levando em conta o desempenho mecânico e de fluidez dos concretos. Verificando-se a influência das variáveis de controle da pesquisa (tipo de cimento, a/c, teor de substituição e origem do agregado graúdo de RCD) nas variáveis de resposta (resistência à compressão, módulo de elasticidade, tensão de escoamento e viscosidade plástica).

Para a avaliação de desempenho econômico foi levantado junto aos fornecedores, o custo em R\$, de cada material necessário para a produção concreto (Tabela 13). O custo de cada mistura foi determinado pelo somatório do consumo em massa de cada material necessário para produzir um m³ de concreto e obter 1MPa de resistência à compressão, multiplicado pelo respectivo custo. Não foram considerados os custos associados ao transporte dos materiais e da mistura do concreto.

Tabela 13 – Informações de compra e custo dos materiais

Material	R\$/Kg	Origem do Orçamento	Fornecimento
Cimento Portland CP V	0,85	Panorama	Sacos 50Kg
Cimento Portland CP IV	0,83	Concresuper	Sacos 50 Kg ²⁰
Agregado graúdo natural	0,0362	Mineromix	m ³
Agregado miúdo natural	0,0542	Mineromix	m ³
Agregado graúdo reciclado ¹	0,0152	Future reciclagem	m ³
Aditivo Polifuncional	4,02	Mc - Bauchemie	Tambor 200L
Aditivo Superplastificante	17,27	Mc - Bauchemie	Tambor 200L

¹ O agregado reciclado de concreto foi obtido a partir da trituração de corpos de prova doados pela ITAIPU BINACIONAL. Para fins de quantificação de custos, o valor desse agregado será considerado equivalente ao do agregado reciclado misto.

Na avaliação de desempenho ambiental, foram calculados os indicadores IC e IL (Equações 1 e 2), para isso utilizou-se os valores de consumo de cimento (Tabela 10), os resultados de resistência à compressão (Tabela 15) e os valores de emissões de CO₂ (Tabela 14) correspondentes à cada mistura de concreto. Não foram computadas as emissões de transporte dos materiais e emissões de mistura, transporte e lançamento do concreto. Essas são variáveis a depender das condições e local de construção. No entanto, em processos em que se tem aplicação prática estas emissões devem ser computadas.

Para estimar as emissões de CO₂ dos concretos produzidos, realizou-se um

²⁰ O cimento utilizado na pesquisa foi doado a granel por concreteira, porém para equiparação de custo o orçamento foi feito para esse cimento ensacado.

somatório das emissões contabilizadas de cada material componente da mistura (Equação 19). O cálculo das emissões referentes ao cimento foi conduzido a partir da Equação 20. As emissões dos demais materiais, bem como as emissões referentes ao processo produtivo do clínquer e de energia elétrica estão apresentadas na Tabela 14.

$$E_{concreto} = E_{cim} \times C_{cim} + E_{agr\ rec} \times C_{agr\ rec} + E_{areia} \times C_{areia} + E_{agr\ nat} \times C_{agr\ nat} + E_{adt} \times C_{adt}$$

Onde:

- $E_{concreto}$: Emissão total para produção do concreto, em KgCO₂/t;
 E_{cim} : Emissão para a produção do cimento, em KgCO₂/t;
 $E_{agr\ rec}$: Emissão para a produção do agregado reciclado, em KgCO₂/t;
 E_{areia} : Emissão para a produção da areia, em KgCO₂/t;
 $E_{agr\ nat}$: Emissão para a produção do agregado natural, em KgCO₂/t;
 E_{adt} : Emissão para a produção dos aditivos, em KgCO₂/t;
 C_{cim} : Consumo de cimento para produzir 1 m³, em Kg;
 $C_{agr\ rec}$: Consumo de agregado reciclado para produzir 1 m³, em Kg;
 C_{areia} : Consumo de areia para produzir 1 m³, em Kg;
 $C_{agr\ nat}$: Consumo de agregado natural para produzir 1 m³, em Kg;
 C_{adt} : Consumo de aditivo para produzir 1 m³, em Kg

$$E_c = E_{clín} \times c_c + E_{ee} \times f_e$$

Onde:

- E_c : Emissão para a produção do cimento, em KgCO₂/t;
 $E_{clín}$: Emissão para a produção do clínquer, em KgCO₂/tclínquer;
 c_c : Teor de clínquer do cimento, em %;
 E_{ee} : Emissão para a produção de energia elétrica, em Kg CO₂/kWh
 f_e : Fator de emissão de energia elétrica, em Kg CO₂/kWh

Tabela 14 – Emissões de CO₂ dos materiais constituintes das misturas em estudo

Material	Processo	Descrição	Valores	Referência
Cimento	Produção de Clínquer	Emissões por calcinação e queima de combustíveis (Kg·CO ₂ /tclínquer)	832	GNR PROJECT (WBCSD, 2019)
		Porcentagem no CP V - ARI (%)	90 – 100 ²	NBR 16697(ABNT, 2018)
		Porcentagem no CP IV (%)	45 – 85 ²	NBR 16697(ABNT, 2018)
	Energia elétrica	Consumo (kWh/t)	108	GNR PROJECT (WBCSD, 2019)
		Fator de Emissão (Kg·CO ₂ /kWh)	0,08	(MCTIC, 2016)
Agregado graúdo natural	Produção dos agregados ¹	Emissão (Kg·CO ₂ /t)	4,67	(SCHMALFUSS; TIMM; PASSUELLO, 2022)/ SIDAC
Agregado miúdo natural			12,51	
Agregado graúdo reciclado				1,3

Material	Processo	Descrição	Valores	Referência
Aditivo Polifuncional	Produção dos aditivos ³	Emissão (Kg-CO ₂ /t)	255,73	(EPD INTERNACIONAL, 2021a)
Aditivo Superplastificante			538,04	(EPD INTERNACIONAL, 2021b)

¹As emissões dos agregados foram obtidas nos relatórios do SIDAC;

² Foram adotadas valores médios de % de clínquer dos cimentos, 95% para CP V e 65% para CP IV;

³Foi realizada uma média das emissões de diferentes aditivos analisados nos relatórios da EPD Internacional.

Os dados da avaliação de desempenho ambiental e os resultados de resistência à compressão, também foram analisados por meio de análise estatística ANOVA no *software* Statistica 12.0. Para a realização da ANOVA foram realizadas três combinações distintas, a fim de avaliar a influência das diferentes variáveis de controle: origem dos RA, tipo de cimento, teor de substituição, relação a/c e idade, nas variáveis de resposta: resistência à compressão, índice de ligante e índice de carbono. Foi adotado nível de significância de 95% (p-valor < 0,05).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DE INDICADORES MECÂNICOS

Observa-se, na Figura 11 e Tabela 15, que a resistência à compressão aumenta ao longo do tempo, com exceção do valor de resistência à compressão aos 63 dias das misturas produzidas com 30% de agregado reciclado misto para a relação a/c 0,55, com ambos os cimentos, que apresentaram valores inferiores à resistência aos 28 dias (dentro do desvio padrão).

Figura 11 – Resistência à compressão ao longo do tempo para concretos de diferentes a) relações a/c; e b) tipos de cimento e origem de agregado reciclado (misto - MRA ou de concreto - CRA)

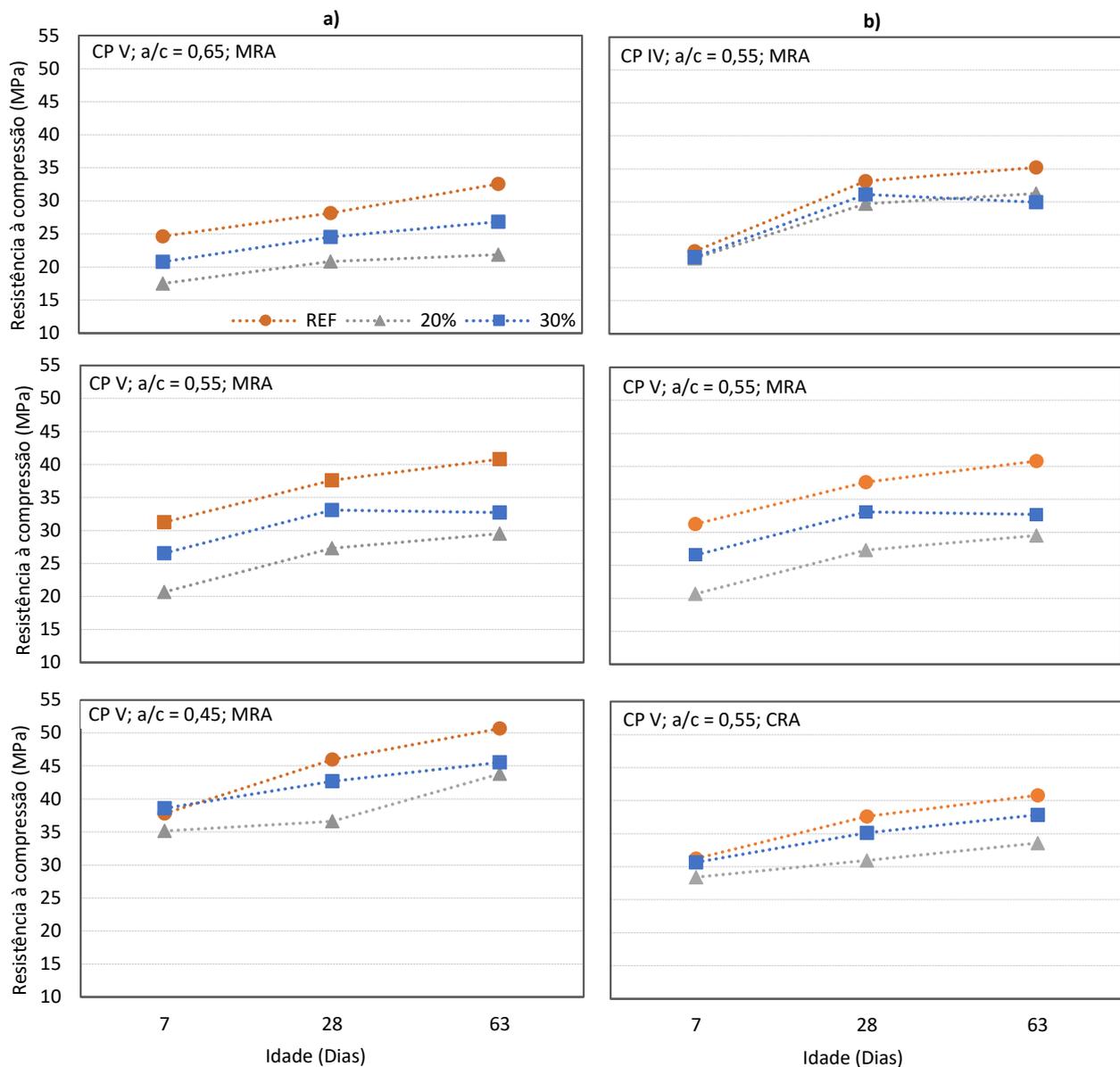
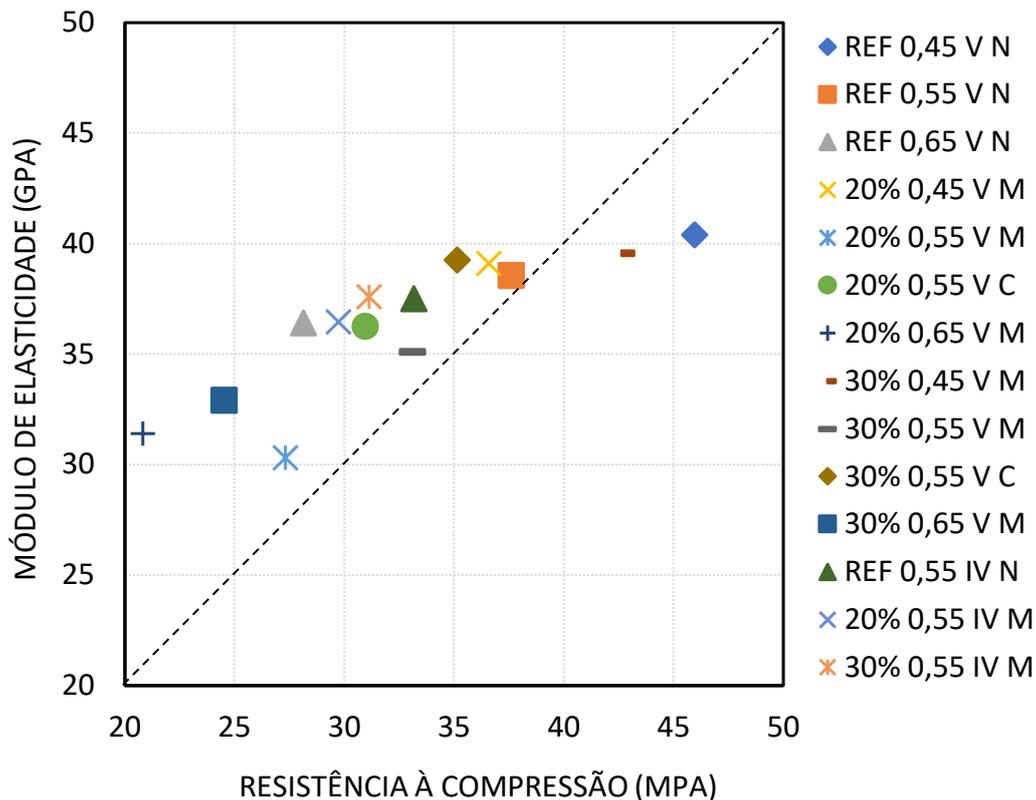


Tabela 15 – Resultados médios e desvio padrão para o Módulo de elasticidade (GPa) e Resistência à compressão axial (MPa) dos concretos

Concretos	EE (GPa) 28 dias	desvio (GPa)	fc (MPa) 7 dias	desvio (MPa)	fc (MPa) 28 dias	desvio (MPa)	fc (MPa) 63 dias	desvio (MPa)
REF 0,45 V N	40,4	0,0	37,8	0,3	46,0	0,9	50,7	0,2
REF 0,55 V N	38,6	0,2	31,3	0,1	37,6	0,3	40,8	0,6
REF 0,65 V N	36,4	0,9	24,7	0,1	28,1	0,3	32,6	0,1
20% 0,45 V M	39,1	0,0	35,2	0,6	36,6	1,1	43,8	0,7
20% 0,55 V M	30,3	0,4	20,7	1,4	27,3	0,7	29,5	1,6
20% 0,55 V C	36,3	0,2	28,4	0,1	31,0	0,8	33,6	0,4
20% 0,65 V M	31,4	0,6	17,5	0,8	20,8	0,5	21,9	0,1
30% 0,45 V M	39,6	0,5	38,6	2,1	42,7	2,4	45,6	2,1
30% 0,55 V M	35,1	1,4	26,6	0,4	33,1	0,9	32,7	0,0
30% 0,55 V C	39,3	0,8	30,7	0,2	35,2	0,4	37,9	0,1
30% 0,65 V M	32,9	0,0	20,8	0,0	24,5	0,2	26,9	0,1
REF 0,55 IV N	37,5	0,3	22,5	0,3	33,2	1,5	35,2	0,1
20% 0,55 IV M	36,5	0,8	21,4	0,9	29,7	1,1	31,3	0,4
30% 0,55 IV M	37,6	1,4	21,6	0,4	31,1	0,4	30,0	1,1

Figura 12 – Módulo de elasticidade x Resistência à compressão (28 dias)



“REF, 20% e 30%”= 0%, 20% e 30% de agregado reciclado

“0,45, 0,55 e 0,65” = a/c;

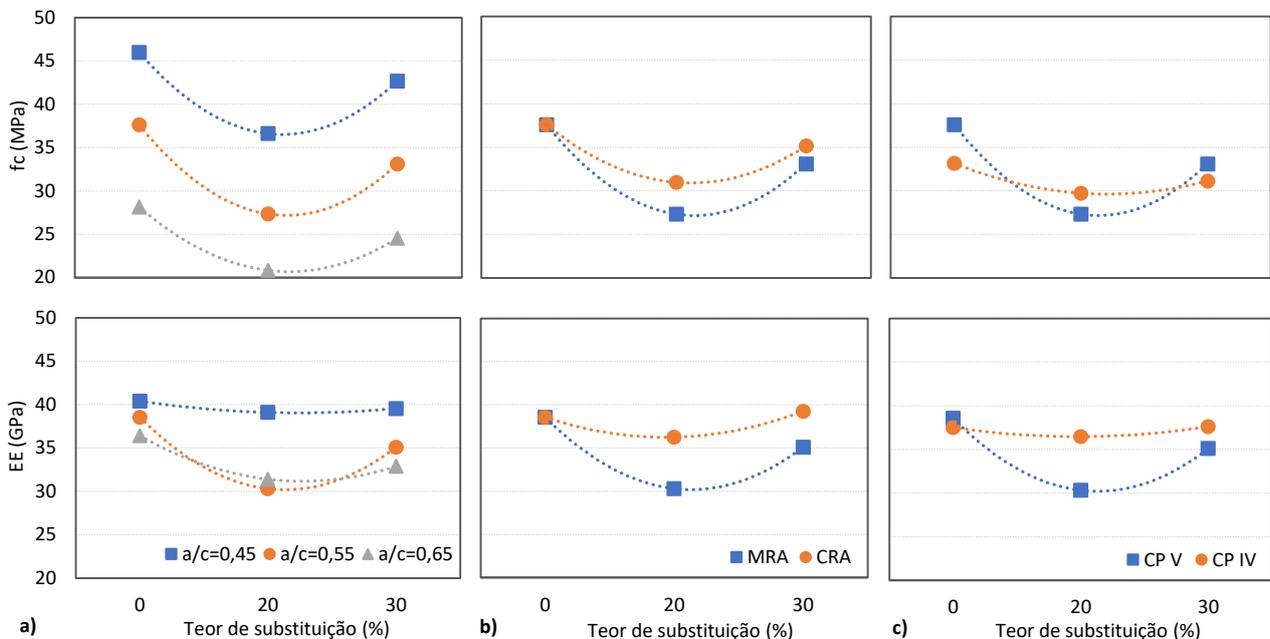
“V e IV”= CP V e CP IV;

“N, M e C”= Agregado natural, agregado reciclado misto e agregado reciclado de concreto

Observa-se ainda, nas Figuras 12 e 13a, que os concretos com propriedades mecânicas (resistência à compressão e módulo de elasticidade) mais elevadas, estão associados a menores relações a/c, independente do teor de substituição de agregado

reciclado e do tipo de cimento, exceto o módulo de elasticidade da mistura de 20% de RA para $a/c = 0,55$ que foi ligeiramente menor que o da mesma mistura com $a/c = 0,65$. Sendo que, entre concretos de mesma relação a/c , os produzidos com agregado reciclado de concreto apresentaram propriedades mecânicas superiores aos produzidos com RA misto (Figura 13 b). Nota-se também, que os concretos produzidos com cimento CP V apresentaram propriedades mecânicas maiores em relação aos produzidos com cimento CP IV, com exceção das propriedades mecânicas da mistura de 20% de RA misto para a relação $a/c = 0,55$ e do módulo de elasticidade da mistura de 30% de RA misto para a relação $a/c = 0,55$ (Figura 13 c).

Figura 13 – Propriedades mecânicas x Teor de substituição para a) diferentes a/c (CP V; RA misto), b) origem de agregado reciclado ($a/c=0,55$; CP V) e c) tipo de cimento (RA misto; $a/c = 0,55$), aos 28 dias



Nota-se que os concretos com 30% de RA apresentaram propriedades mecânicas superiores aos com 20%, com exceção da resistência à compressão aos 63 dias do concreto com 30% de RA misto, produzido com cimento CP IV e de relação $a/c = 0,55$ (Figura 11). Os concretos produzidos apenas com agregado natural (REF) apresentam propriedades mecânicas superiores aos concretos com RA. Com exceção de duas misturas de 30% de RA para a relação $a/c = 0,55$: i) a produzida com CP IV e RA misto e ii) com CP V e RA de concreto, que apresentaram módulo de elasticidade, ligeiramente maior que suas misturas de referência (dentro do desvio padrão). O valor de resistência à compressão aos 7 dias da mistura de 30% de RA misto, relação $a/c = 0,45$ e produzida com CP V, também foi mais elevado em comparação à mistura de referência, porém, dentro do desvio padrão

(Figura 11 e Tabela 15).

Vale ressaltar que o consumo de cimento das misturas com RA foi menor que as produzidas apenas com agregado natural devido à utilização do método de dosagem EMV, o qual reduz o teor de cimento quando se faz a incorporação de agregados reciclados. Os autores do método, Fathifazi et al., (2009), partem do pressuposto que o teor de argamassa residual aderida nos agregados graúdos reciclados, deve ser considerado como parte do teor de argamassa total do concreto a ser produzido. Assim, o método propõe complementar o teor de agregado natural e descontar o volume excedente, no teor de argamassa fresca (água, areia e cimento) do concreto produzido com RA. Logo, se consumo de cimento não fosse alterado haveria chances para manutenção ou até elevação da resistência mecânica dos concretos com agregados reciclados. Hayles, Sanchez e Noel (2018) observaram que os concretos com RA proporcionados pelo método EMV, apresentavam desempenho similar ao concreto convencional de referência para misturas com consumo de cimento superior a 400 Kg/m³ e com utilização de aditivo superplastificante. Porém para concretos com resistências alvo entre 25 e 35 MPa, os resultados de resistência à compressão e abatimento do estudo de Hayles, Sanchez e Noel (2018) foram inferiores aos concretos de referência.

Nesse sentido, adaptações do método EMV foram propostas pelos autores a fim de melhorar as propriedades no estado fresco e a perda de resistência mecânica desses concretos, devido à elevada redução do consumo de cimento realizada pelo método EMV. Os autores propuseram uma adaptação de maneira a reduzir a quantidade de areia e aumentar o cimento fresco presentes na mistura, após considerar o teor de argamassa residual aderido nos agregados, mas ainda assim, mantendo o teor total de argamassa do concreto de referência. Isso melhora o desempenho da mistura no estado fresco e endurecido, porém prejudica sua ecoeficiência caso o ganho de resistência não compense o aumento do consumo de cimento (HAYLES; SANCHEZ; NOEL, 2018).

Pela literatura, já é sabido que as propriedades mecânicas aumentam à medida que a a/c diminui (MEHTA; MONTEIRO, 2014) e que os concretos produzidos apenas com agregado natural (0% RA) apresentam melhores propriedades mecânicas em relação aos concretos com RA (SALLES et al., 2021). A argamassa residual, aderida na superfície dos RA, faz com que este apresente menor densidade e maior porosidade e absorção de água (AMARIO et al., 2017; ANDRADE FILHO, 2021). Essa elevada porosidade dos RA aumenta a porosidade total do concreto, diminuindo suas propriedades mecânicas (ANDRADE FILHO, 2021; VIEIRA; FIGUEIREDO; JOHN, 2020) em relação aos

concretos produzidos com agregado natural. Além disso, a necessidade da adição de água de compensação devido à elevada absorção de água dos RA, também pode prejudicar as propriedades mecânicas desses concretos, pois podem causar um aumento da relação água/cimento total (ANDRADE FILHO, 2021). Essa água adicional promove aumento da porosidade da pasta endurecida, prejudicando a resistência à compressão desses concretos (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Em geral, devido a essas características do agregado reciclado, a resistência à compressão dos concretos tende a diminuir conforme aumenta-se o teor de agregado reciclado (SALLES et al., 2021; BAHRAMI et al., 2020; MACHADO, 2020) assim como o módulo de elasticidade (ESTOLANO et al., 2018; GERIN, 2020), o que ocorreu entre as misturas de referência (0% de RA) e as com 20% de RA. No entanto, nas misturas dessa pesquisa observou-se que os concretos com 30% de RA apresentaram propriedades mecânicas superiores aos concretos com 20% de RA e inferiores aos de referência (Figuras 11 e 13). Isso pode estar associado ao uso exclusivo e em maior teor, de aditivo superplastificante nos concretos com 30% de RA, o que contribuiu para uma maior dispersão das partículas de cimento e, conseqüentemente, para a melhora das propriedades mecânicas (MACHADO, 2020). Além disso, o uso de aditivo superplastificante também contribuiu para melhores resultados de resistência mecânica, em virtude da melhora da trabalhabilidade desses concretos, uma vez que, segundo Hayles, Sanchez e Noel (2018), problemas relativos à trabalhabilidade do concreto podem prejudicar a resistência mecânica.

O ajuste feito no proporcionamento realizado pelo método de dosagem EMV para melhorar a fluidez dos concretos com 30% de RA (aumento do teor de argamassa), também contribuiu para o aumento de resistência desses concretos em relação aos produzidos com 20% de RA. Pois se fixou para os concretos com 30% de RA, o mesmo consumo de cimento dos de 20% de RA, mantendo o teor de argamassa mínimo de 47%. O aumento do consumo de cimento pode auxiliar na compensação da perda de resistência mecânica provocada pela adição de agregado reciclado (BRAGA; SILVESTRE; DE BRITO, 2017; VIEIRA; FIGUEIREDO; JOHN, 2020).

Os concretos produzidos com RA de concreto apresentaram propriedades mecânicas superiores aos produzidos com RA misto. Isso ocorre porque o RA de concreto apresenta menor porosidade (SANTOS; LEITE, 2018; SILVA; DE BRITO; DHIR, 2015), menor absorção, maior massa específica que os RA misto (ESTOLANO et al., 2018), o que

contribui para o melhor desempenho mecânico do concreto, análogo ao relatado anteriormente entre agregados naturais e reciclados (Figura 13 b).

No que diz respeito ao tipo de cimento, observou-se na Figura 13c que os concretos produzidos com cimento CP V apresentaram resistência à compressão superior aos produzidos com cimento CP IV. No entanto, a diferença de resistência diminui após as idades iniciais (Figura 11). Em geral, isso se deve a composição dos cimentos e à alta resistência inicial do cimento CP V, uma vez que o clínquer, presente em sua composição, tem moagem mais fina em relação aos demais cimentos. Embora os cimentos utilizados nesta pesquisa tenham apresentado finuras similares, a diminuição dessa, influencia na reatividade, uma vez que devido à maior área superficial, suas partículas terão maior área de contato com o ativador da reação (água), adquirindo elevadas resistências iniciais mais rapidamente. Essa reatividade é significativa apenas nas primeiras idades, tendo menor influência na resistência mecânica aos 28 dias (LANGARO et al., 2017).

4.2 ANÁLISE DE INDICADORES AMBIENTAIS

Os menores índices de carbono foram obtidos para os concretos produzidos com cimento CP IV, contudo os índices de ligante dos concretos produzidos com esse tipo de cimento foram mais elevados (Tabela 16 e Figura 14). Os concretos de referência para as relações a/c 0,45 e 0,55; os concretos produzidos com cimento CP V e 30% de RA misto para a relação a/c de 0,45 e; cimento CP V com 30% de RA de concreto e misto para a a/c 0,55, também apresentaram bons índices de carbono e de ligante. Isso se deve ao menor valor de emissões do cimento CP IV em relação ao CP V e aos bons resultados de resistência à compressão obtidos, em função da baixa relação a/c utilizada, pelo emprego de agregado reciclado de melhor qualidade (de concreto) e pela otimização de cimento nos traços com RA dessas misturas.

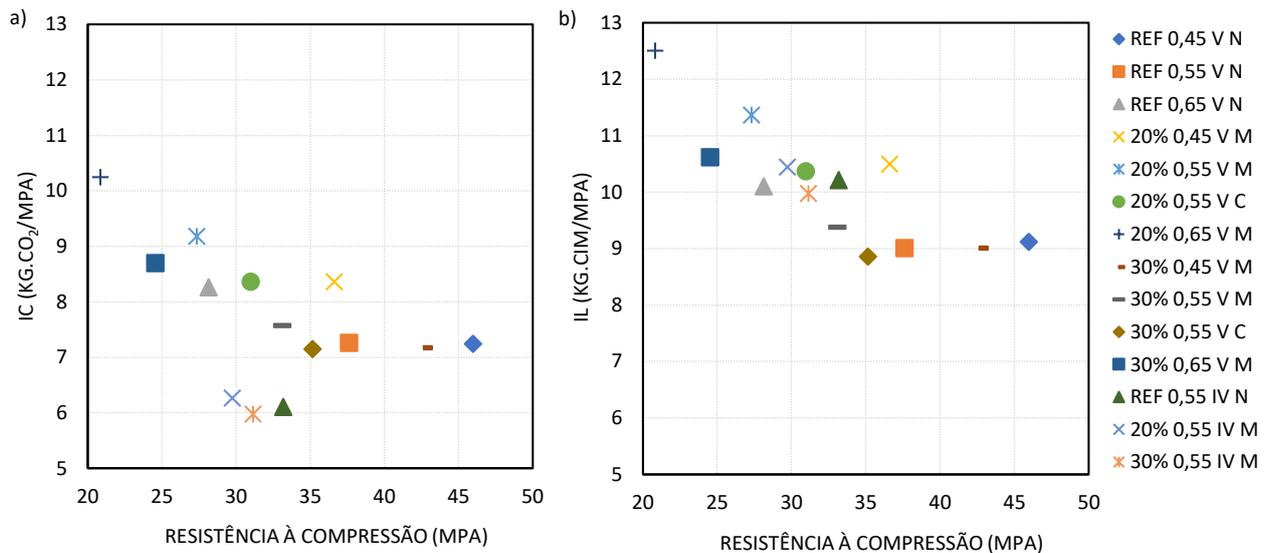
Tabela 16 – Resultados de Índice de carbono (IC) e ligante (IL) aos 28 dias

Concretos	Consumo de Cimento (Kg/m ³)	fc 28 dias (MPa)	Emissões Totais ¹ (Kg. CO ₂ /m ³)	Índices	
				Carbono (Kg. CO ₂ /MPa)	Ligante (Kg.Cim/MPa)
REF 0,45 V N	419	46,0	333,1	7,3	9,1
REF 0,55 V N	339	37,6	273,0	7,3	9,0
REF 0,65 V N	284	28,1	232,5	8,3	10,1
20% 0,45 V M	384	36,6	306,1	8,4	10,5
20% 0,55 V M	311	27,3	250,9	9,2	11,4
20% 0,55 V C	321	31,0	259,1	8,4	10,4
20% 0,65 V M	261	20,8	213,5	10,3	12,5
30% 0,45 V M	384	42,7	306,0	7,2	9,0

Concretos	Consumo de Cimento (Kg/m ³)	fc 28 dias (MPa)	Emissões Totais ¹ (Kg. CO ₂ /m ³)	Índices	
				Carbono (Kg. CO ₂ /MPa)	Ligante (Kg.Cim/MPa)
30% 0,55 V M	311	33,1	250,8	7,6	9,4
30% 0,55 V C	311	35,2	251,4	7,2	8,9
30% 0,65 V M	261	24,5	213,4	8,7	10,6
REF 0,55 IV N	339	33,2	202,6	6,1	10,2
20% 0,55 IV M	311	29,7	186,3	6,3	10,5
30% 0,55 IV M	311	31,1	186,2	6,0	10,0

¹ A tabela com os valores de emissões de cada material está apresentada no apêndice A; ² Foram adotadas valores médios de % de clínquer, 95% para CP V e 65% para CP IV.

Figura 14 – a) Índice de carbono x fc (MPa); b) Índice de ligante x fc (MPa), aos 28 dias



Dentre os concretos com os melhores resultados, todos apresentaram índices inferiores à mediana dos valores encontrados na literatura para concretos produzidos com RA misto (Tabela 4), sendo os valores da mediana, os indicadores alvo dessa pesquisa ($IL = 10,7 \text{ Kg_Cimento} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ e $IC = 7,8 \text{ Kg_CO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$). Com exceção dos concretos com 20% de RA misto com a/c 0,55 e 0,65, todos os demais concretos da pesquisa apresentaram índices de ligante e carbono inferiores a média ($IL = 11,1 \text{ Kg_Cimento} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ e $IC = 8,6 \text{ Kg_CO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$) dos valores de índices encontrados na literatura para RA misto (Tabela 4).

Os concretos desta pesquisa não atenderam às metas propostas por Damineli et al. (2010), de $IC < 1,5 \text{ Kg_CO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ e $IL < 5 \text{ Kg_Cimento} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$, para concretos convencionais, e nem as metas de Machado (2020), para concretos reciclados ($IC < 5,0 \text{ Kg_CO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ e $IL < 7 \text{ Kg_Cimento} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$). Isso está relacionado

ao fato de os valores de resistência mecânica alvo desta pesquisa serem inferiores a 50 MPa e as metas dos autores citados serem baseados em concretos de elevada resistência. Segundo os resultados de Damineli et al. (2010) e de Machado (2020), a ecoeficiência é mais fácil de ser atingida em concretos de alta resistência, para concretos com e sem agregados reciclados.

Observando a Tabela 17, nota-se que o valor do índice de ligante encontrado por Damineli et al. (2010), para concretos de 20 MPa, é mais elevado do que o valor da meta proposta. Assim como a mediana dos valores de indicadores obtidos no banco de dados de Machado (2020), quando se leva em conta concretos de todas as classes de resistência ($IC < 8,2 \text{ Kg_CO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ e $IL < 10,7 \text{ Kg_Cimento} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$).

Tabela 17 – Índice de carbono (IC) e ligante (IL) teóricos e experimental, para concretos de diferentes características e classes de resistência

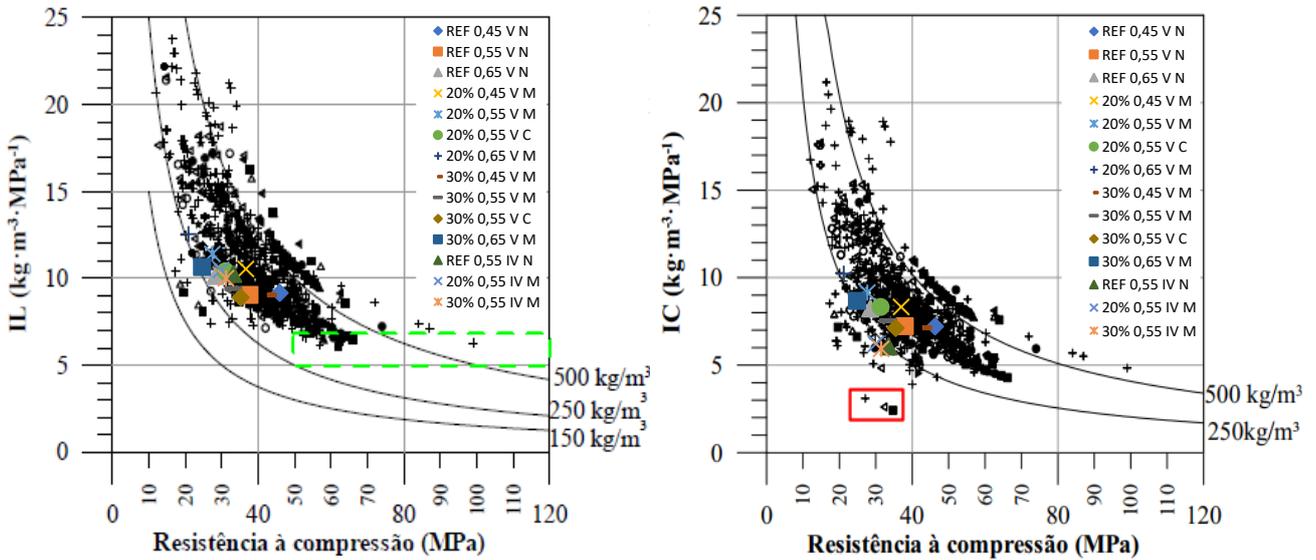
Características e nível de resistência do concreto	IC	IL	Fonte
Concretos sem agregados reciclados com resistência de 20 MPa	1,5	13,0	Damineli et al. (2010)
Concretos sem agregados reciclados com resistência superior a 60 MPa	1,5	5,0	
Concretos com agregados reciclados com resistência superior a 50 MPa	5,0	7,0	Machado (2020)
Concretos com agregados reciclados miúdos, graúdos ou ambos ²	8,2	10,7	
Concretos com agregados graúdos reciclados (AGR) ²	8,1	10,6	
Concretos com agregados reciclados com 20 a 30% de AGR ²	7,4	9,8	
Concretos com 20 a 30 % de AGR e com resistência de 20 a 50 ± 3 MPa	7,6	10,1	
Concretos com AGR mistos e com resistências de 20 a 50 ± 3 MPa	7,8	10,7	Oliveira (2023) Indicadores teóricos da literatura
Concretos com agregados reciclados com resistência de 20 a 50 MPa	7,5	10,2	Oliveira (2023), Indicadores dos dados experimentais

¹Os dados de Machado (2020), exceto os relacionados a concretos com agregados reciclados com resistência superior a 50 MPa e os dados de Oliveira (2023) são representados pela mediana dos dados obtidos. Os bancos de dados de Machado (2020) estão apresentados no anexo A.

² Considerados concretos de todas as classes de resistência.

Nota-se também, que a mediana dos indicadores obtidos no banco de dados de Machado (2020), para concretos com 20% a 30% de AGR e resistência entre 20MPa e 50 MPa: $IC < 7,6 \text{ Kg_CO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ e $IL < 10,1 \text{ Kg_Cimento} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$, são similares à mediana dos indicadores teóricos da literatura para AGR misto: $IC < 7,8 \text{ Kg_CO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ e $IL < 10,7 \text{ Kg_Cimento} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$; e indicadores experimentais: $IC < 7,5 \text{ Kg_CO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ e $IL < 10,2 \text{ Kg_Cimento} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$, obtidos nessa pesquisa (Tabela 17). Na Figura 15, tem-se os índices obtidos nesta pesquisa sobrepostos aos índices obtidos por Machado (2020) para concretos com RA.

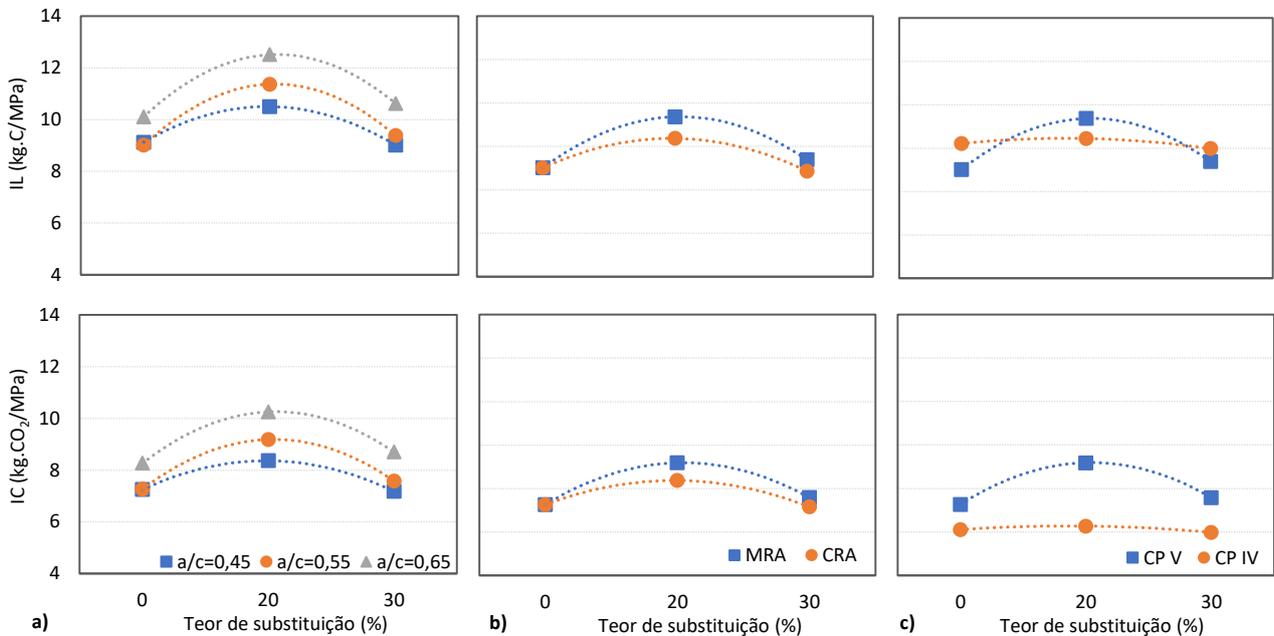
Figura 15 – Índices de Machado (2020) x Resultados da pesquisa: a) Índice de ligante x f_c (MPa); b) Índice de carbono x f_c (MPa) aos 28 dias



Fonte: Adaptado de Machado (2020)

Legenda: “REF, 20% e 30%” = 0%, 20% e 30% de agregado reciclado
 “0,45, 0,55 e 0,65” = a/c;
 “V e IV” = CP V e CP IV;
 “N, M e C” = Agregado natural, agregado reciclado misto e agregado reciclado de concreto

Figura 16 – Índices de Ligante e Carbono x Teor de substituição para a) diferentes a/c (CP V, RA misto), b) origem de agregado reciclado (a/c=0,55; CP V) e c) tipo de cimento (RA misto; a/c = 0,55), aos 28 dias



Verifica-se uma tendência inversa entre os gráficos de resistência mecânica (Figura 13) e indicadores (Figura 16), uma vez que maiores valores de resistência mecânica contribuem para índices de ligante e de carbono mais baixos e, conseqüentemente,

contribuem para uma maior ecoeficiência, já que a ecoeficiência do concreto é inversamente proporcional ao valor dos índices (DAMINELI, 2013). Assim, os concretos com melhor desempenho mecânico também estão entre os que apresentaram melhores índices: entre os concretos com agregado reciclado, os produzidos RA de concreto (Figura 16 b) e concretos de maior relação a/c (Figura 16 a). Com exceção do concreto de referência para a relação a/c=0,55 que apresentou IL ligeiramente menor que a mistura com a/c = 0,45, em virtude do seu menor consumo de cimento.

O tipo de cimento influenciou significativamente o índice de carbono (Figura 16 c), tendo-se índices de carbono bem menores nos concretos produzidos com cimento CP IV. Isso está relacionado ao teor de clínquer presente no cimento, devido às altas emissões de CO_2 associadas à produção do clínquer. O cimento CP IV apresenta um menor teor de clínquer em sua composição em relação ao cimento CP V e, conseqüentemente, melhores índices de carbono, uma vez que possui valores de emissões inferiores (DAMINELI, 2013). No caso do índice de ligante, os resultados foram mais próximos, independentemente do tipo de cimento, tendo-se menores índices de ligante para os concretos produzidos com cimento CP V, exceto no concreto com 20% de agregado reciclado, devido a esse ter apresentado resistência à compressão menor em relação à mesma mistura de concreto produzida com cimento CP IV.

Contudo, independentemente do tipo de cimento, para as relações a/c 0,45 e 0,55, os concretos que possuem melhores índices (ligante e carbono) foram os com 30%, 0% (referência) e 20% de RA, respectivamente (exceto a mistura de 30% de RA misto com a/c 0,55, que apresentou índices ligeiramente mais elevados que a mistura de referência). Isso se deve ao menor consumo de cimento das misturas de agregado reciclado em relação aos traços de referência, o que melhora diretamente o índice de ligante e por conseqüência, também o índice de carbono, em virtude da redução das emissões. Além disso, os concretos com 30% de RA tiveram bom desempenho mecânico, apresentando uma perda menor de resistência à compressão do que a perda apresentada pelos concretos com 20% de RA, em relação aos concretos de referência. O melhor desempenho dos concretos com 30% de RA, em relação aos com 20% de agregado reciclado, está relacionado ao uso de superplastificante e a fixação do consumo de cimento entre concretos com 20 e 30% de agregado reciclado misto.

Os concretos produzidos apenas com agregado natural apresentaram melhores índices do que os concretos com 20% de RA para as a/c 0,45 e 0,55 e melhores

também que todos os concretos com agregado reciclado, no caso da a/c 0,65. Ainda assim, a produção de concretos com incorporação de resíduos tem a vantagem da não extração de matéria-prima virgem devido ao emprego de material reciclado o que reduz volumes de disposição de resíduos, além da redução das emissões oriundas do processo produtivo de novos agregados naturais. Apesar destes fatos que contribuem para a circularidade e sustentabilidade no setor da construção civil (GONZÁLEZ et al., 2021; HAYLES; SANCHEZ; NOËL, 2018), nas análises atuais de ecoeficiência a substituição de agregados naturais por reciclados ainda é abordada somente no âmbito qualitativo (não há um indicador numérico para mensurar a pegada de não extração de matéria-prima virgem. Tem-se maiormente indicadores de pegada de energia, emissões, água e resíduos associados ao processo produtivo.

4.3 ANOVA – FC, IC E IL

Analisando a Tabela 18, verifica-se que as variáveis de controle tipo de cimento, origem do RA, relação a/c, idade e teor de RA possuem significância estatística para todas as variáveis de resposta (resistência à compressão, índice de ligante e índice de carbono). Em conformidade com a análise gráfica dos dados da pesquisa e com a literatura, como apresentado nos tópicos 4.1 e 4.2.

A interação simultânea entre a/c, idade e teor de RA apresentaram significância estatística para todas as variáveis de resposta. A interação das variáveis de controle, tipo de cimento, origem do RA e relação água/cimento com a idade e com o teor de RA também apresentou significância estatística. No entanto, a interação conjunta entre tipo de cimento, idade e teor de RA, não foi significativa para nenhuma variável de resposta. Já a interação entre origem do RA, idade e teor de RA, foi significativa apenas para os índices de ligante e carbono.

Verifica-se ainda que a interação entre idade e teor de RA tem significância significativa apenas na variável de resposta índice de carbono, quando se varia o tipo de cimento e na variável resistência à compressão ao variar a relação a/c. A tabela completa das análises estatística realizada está disponível no apêndice A.

Tabela 18 – ANOVA¹ considerando as variáveis de controle tipo de cimento, teor e tipo de agregado, idade e suas interações nas variáveis de resposta

Variável de controle	Variáveis de resposta		
	Resistência à compressão	Índice de ligante	Índice de carbono
	p-valor	p-valor	p-valor
Tipo de cimento (TC)	0,00	0,00	0,00
Idade	0,00	0,00	0,00
%RA	0,00	0,00	0,00
TC * idade	0,00	0,00	0,02
TC *%RA	0,00	0,00	0,00
Idade*%RA	0,57	0,05	0,02
TC*idade*%RA	0,76	0,23	0,10
Variável de controle	p-valor	p-valor	p-valor
Origem do RA	0,00	0,00	0,00
Idade	0,00	0,00	0,00
%RA	0,00	0,00	0,00
Origem * idade	0,02	0,00	0,00
Origem *%RA	0,00	0,00	0,00
Idade*%RA	0,13	0,07	0,07
Origem*idade*%RA	0,21	0,03	0,03
Variável de controle	p-valor	p-valor	p-valor
a/c	0,00	0,00	0,00
Idade	0,00	0,00	0,00
%RA	0,00	0,00	0,00
a/c * idade	0,00	0,00	0,00
a/c *%RA	0,00	0,00	0,00
Idade*%RA	0,02	0,47	0,44
a/c*idade*%RA	0,02	0,00	0,00

¹ As combinações que **NÃO** possuem significância estatística (p-valor > 0,05) estão destacados em negrito.
Legenda: TC - Tipo de cimento; %RA - Teor de agregado reciclado; **Origem** - Origem do agregado reciclado;
a/c – relação a/c

4.4 ANÁLISE DE INDICADORES DE FLUIDEZ

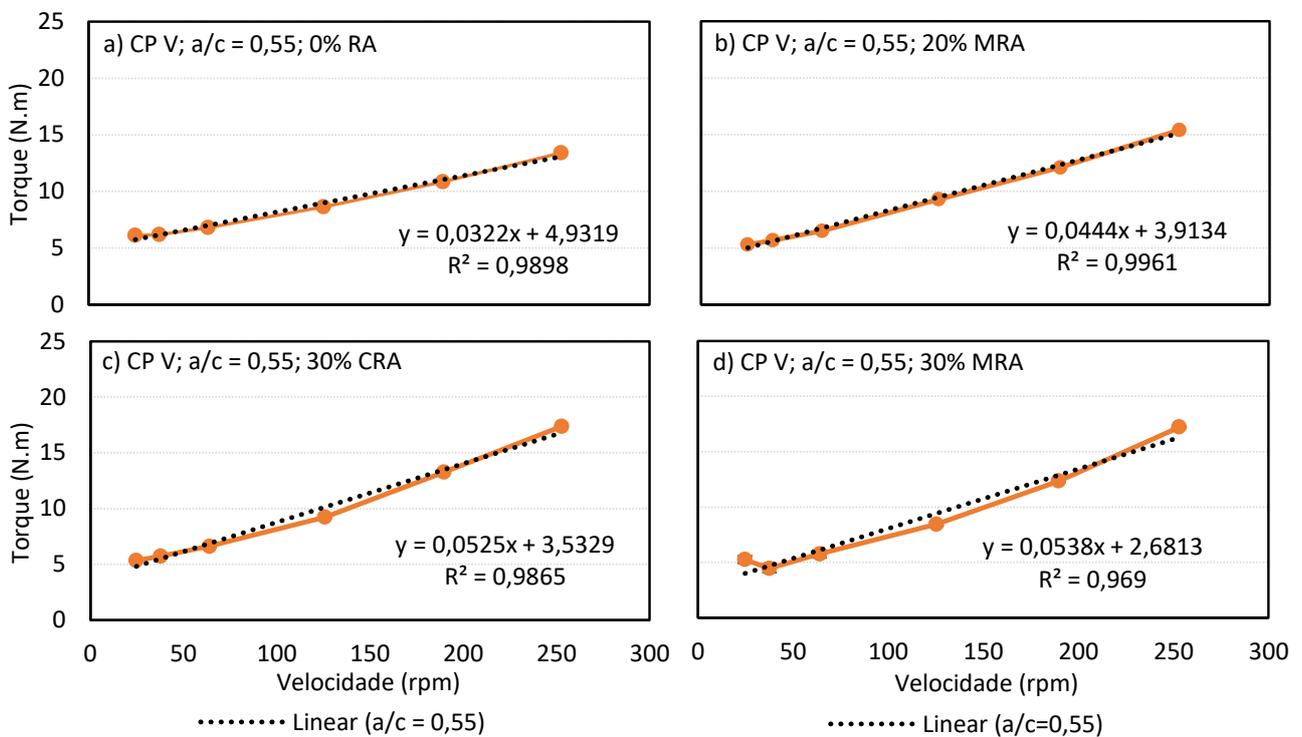
O comportamento dos concretos no estado fresco foi avaliado a partir dos valores de abatimento e dos parâmetros reológicos (τ_0 e μ) do concreto (Tabela 19). Os parâmetros reológicos foram determinados a partir do ajuste das curvas de desaceleração Torque x Velocidade com o modelo reológico de Bingham (Figura 17). Em virtude da variabilidade inicial das curvas de torque x velocidade, o ajuste para estimar os parâmetros reológicos foi realizado apenas até o patamar da velocidade de 26 rpm da curva de desaceleração.

Tabela 19 – Informações de mistura e parâmetros de Fluidez

Concretos	Consumo por m ³					α^3	Abatimento (mm) ⁴	Parâmetros reológicos		
	Cimento	Água		Aditivo (%)				Bingham		
		Cálculo	Total	P ¹	S ²			τ_0 [N.m]	μ [N.m/rpm]	R ²
REF 0,55 V	339	186	198	0,3	-	0,53	125	4,93	0,032	0,990
20% 0,55 V M	311	171	194	0,3	0,3	0,48	130	3,91	0,044	0,996
30% 0,55 V M	311	162	192	-	0,6	0,47	140	2,68	0,054	0,969
30% 0,55 V C	311	171	179	-	0,6	0,48	135	3,53	0,052	0,987

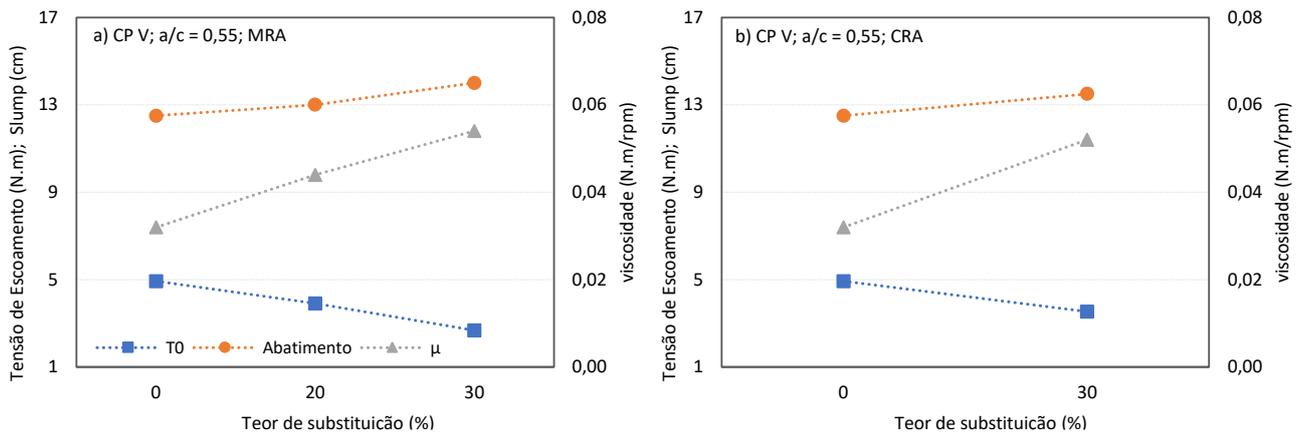
¹ aditivo polifuncional; ² aditivo superplastificante; ³ teor de argamassa; ⁴ os valores de abatimento dos demais concretos da pesquisa estão apresentados na Tabela 26 do apêndice A.

Figura 17 – Ajuste de Bingham das curvas Torque x Velocidade dos concretos



Analisando a Tabela 19, identifica-se que o modelo ajustou bem os dados, pois os coeficientes de correlação foram acima de 0,969. Os concretos que apresentaram menor tensão de escoamento foram os concretos com 30% de RA misto, seguidos pelos com 30% de RA de concreto e de 20% de RA misto. Sendo que a maior tensão de escoamento obtida foi no concreto de referência. No que diz respeito à viscosidade plástica e ao abatimento, identifica-se uma tendência contrária ao observado para a tensão de escoamento, os concretos que apresentaram menores tensões de escoamento, tiveram os maiores valores de viscosidade plástica e abatimento (Figura 18).

Figura 18 – Parâmetros reológicos e Abatimento x Teor de RA (Bingham)



Em virtude das características intrínsecas dos RA, já discutidas anteriormente, os concretos com agregado reciclado geralmente apresentam perda de fluidez em relação aos concretos produzidos com agregado natural (AMARIO et al., 2021). Porém, é possível melhorar a fluidez desses concretos com a utilização de aditivos superplastificantes (AMER et al., 2016) e com a compensação da água de absorção dos RA (LEITE; FIGUEIREDO FILHO; LIMA, 2013), conforme observou-se nas misturas de concreto analisadas.

O teor de aditivo foi sendo incrementado à medida que o teor de agregado reciclado aumentou, visando eliminar os efeitos das propriedades desses agregados na fluidez. Nas misturas de referências, utilizou-se apenas aditivo polifuncional, nas misturas com 20% de RA, realizou-se uma mescla entre aditivo polifuncional e superplastificante e, nas de 30% de RA, apenas superplastificante.

Os parâmetros de fluidez, tensão de escoamento e viscosidade plástica possuem correlação com os valores de abatimento e com o tempo de escoamento, respectivamente (WALLEVIK, 2006). Menores valores de tensão de escoamento indicam misturas com maior fluidez e maiores valores de viscosidade plástica, caracterizam misturas mais coesas (WANG et al., 2017), sendo a viscosidade plástica um parâmetro da resistência à segregação do concreto (JIAO et al., 2017). Assim, é necessário definir indicadores de valores adequados desses parâmetros de maneira a obter uma mistura de concreto com adequada fluidez e estabilidade (XIE et al., 2013).

Yun, Choi e Yeon (2016) relataram que Beaupre (1994) correlacionou os parâmetros reológicos de 42 misturas de concreto com sua capacidade de bombeamento e assim determinou valores limites de tensão de escoamento e viscosidade plástica para

uma mistura ser considerada bombeável: $\tau_0 = 4,3 \text{ N}\cdot\text{m}$ e $\mu = 2,9 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{21}$. Apenas a mistura de 20% de agregado reciclado atende a ambos os critérios, sendo que a mistura de referência extrapola em 0,63 N.m o valor limite de tensão de escoamento e as misturas com 30% de RA misto e de concreto, extrapolem o valor limite da viscosidade plástica em 0,34 e 0,22 N.m.s, respectivamente.

4.5 ANÁLISE DE CUSTOS

Dentre os materiais utilizados na produção das misturas de concreto, os mais onerosos são os aditivos e o cimento. O consumo de cimento é bem maior em relação ao consumo de aditivos, tendo assim maior impacto no custo total das misturas. Contudo, mesmo com uso em pequena quantidade, os aditivos representam uma parcela de custo não desprezível.

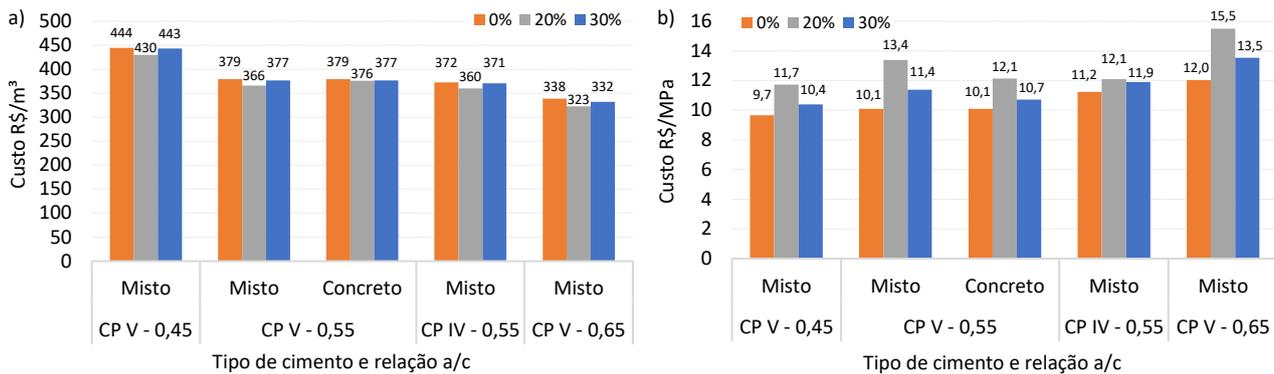
Observa-se, na Tabela 20 e Figura 19a, uma diminuição de custos por m^3 da ordem de 14,67% e 23,85% ao aumentar a relação a/c de 0,45 para 0,55 e 0,65 respectivamente, em concretos produzidos com cimento CP V e com 0% de agregado reciclado, de 14,79% e 24,82% para misturas com 20% de agregado reciclado misto e de 14,95% e 25,09% para concretos com 30% de RA misto. Essa redução de custos ocorre principalmente em virtude da redução do consumo de cimento provocado pela redução da relação a/c.

Tabela 20 – Custos das misturas

Concretos	Custo							Total	
	Cimento	Agregado Miúdo Natural	Agregado graúdo		Aditivo PF	Aditivo SP	R\$/m ³	R\$/MPa	
			Natural	Reciclado					
REF 0,45 V N	356,5	43,5	39,3	0,0	5,1	0,0	444,4	9,7	
REF 0,55 V N	288,1	47,8	39,2	0,0	4,1	0,0	379,2	10,1	
REF 0,65 V N	241,6	50,7	39,2	0,0	6,9	0,0	338,4	12,0	
20% 0,45 V M	326,7	39,9	34,7	3,6	4,6	19,9	429,5	11,7	
20% 0,55 V M	264,0	43,8	34,7	3,6	3,8	16,1	366,0	13,4	
20% 0,55 V C	273,0	45,3	33,4	3,5	3,9	16,6	375,8	12,1	
20% 0,65 V M	221,5	46,5	34,6	3,6	3,1	13,5	322,9	15,5	
30% 0,45 V M	326,7	38,8	32,0	5,8	0,0	39,8	443,1	10,4	
30% 0,55 V M	264,0	42,9	32,0	5,8	0,0	32,2	376,9	11,4	
30% 0,55 V C	264,7	44,0	30,2	5,5	0,0	32,3	376,6	10,7	
30% 0,65 V M	221,5	45,8	32,0	5,8	0,0	27,0	332,0	13,5	
REF 0,55 IV N	281,3	47,8	39,2	0,0	4,1	0,0	372,4	11,2	
20% 0,55 IV M	257,8	43,8	34,7	3,6	3,8	16,1	359,8	12,1	
30% 0,55 IV M	257,8	42,9	32,0	5,8	0,0	32,2	370,7	11,9	

²¹ $\mu = 2,9\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s} = 0,0483\text{N}\cdot\text{m}/\text{rpm}$

Figura 19 – Custos totais das misturas de concreto a) R\$/m³; b) R\$/MPa



No entanto, quando os custos são avaliados por MPa (Figura 19b), tem-se uma tendência contrária. Tendo-se aumentos de custos da ordem de 4,33% e 24,44% ao aumentar a relação a/c de 0,45 para 0,55 e 0,45 para 0,65, respectivamente, para concretos com 0% de agregado reciclado misto; de 14,13% e 32,07% para concretos com 20% de RA misto; e de 9,59% e 30,23% para concretos com 30% de agregado reciclado misto. Isso mostra que a diminuição do consumo de cimento ao reduzir a relação a/c diminui o custo total de produção do m³ da mistura, mas aumenta o valor gasto para atingir 1MPa de resistência. Ou seja, a redução de custos pela redução do consumo de cimento utilizado, pode não compensar a perda de resistência ocorrida.

Nas misturas produzidas com adição de agregado reciclado misto²², devido à redução do consumo de cimento em relação aos traços de referência (0%) proporcionada pela utilização do método de dosagem EMV, houve uma diminuição dos custos por m³ referente ao cimento de aproximadamente 8,3% nos concretos de todos os tipos de cimento e relações a/c (Tabela 20).

No que diz respeito aos valores de custo totais, ao aumentar o teor de substituição de agregados reciclados mistos de 0% para 20% de agregado reciclado, houve uma redução de custos por m³ de 3,35%, 3,48% e 4,58% nos concretos relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente. Isso porque, apesar da necessidade de utilizar um aditivo superplastificante, juntamente com o aditivo polifuncional utilizado nos concretos de referência, para manter uma boa fluidez nos concretos com agregado reciclado, a redução dos custos referentes ao cimento proporcionada pelo método EMV, compensou o aumento de gastos relativos ao aditivo adicional.

²² A redução de custos independe do teor de substituição, uma vez que o consumo de cimento é fixo para as misturas de 20 e 30% de adição de agregado reciclado misto.

Entretanto, ao aumentar o teor de substituição de RA misto de 20% para 30%, teve-se um aumento de custos por m³ de 3,17%, 2,98% e 2,81% nos concretos relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente. Isso ocorreu porque o consumo de cimento nesses concretos é equivalente e em virtude da fluidez, nos concretos com 30% de RA, utilizou-se apenas aditivo superplastificante e em maior teor, o que ocasionou o aumento de custos. Contudo, os concretos com 30% de agregado reciclado misto apresentaram custos por m³ ligeiramente menores que os concretos de referência (0% RA), da ordem de 0,28%, 0,6% e 1,90% para concretos com relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente.

Ao avaliar o custo por MPa (Figura 19b), de misturas com agregado reciclado, verifica-se que independente do teor de substituição, ocorre um aumento nos custos, isso porque esses concretos possuem resistência à compressão inferior aos produzidos com agregado natural. Sendo esse aumento de custos menor para concretos com 30% de RA, uma vez que esses apresentaram desempenho mecânico superior aos com 20% de RA. O aumento dos custos por MPa foi de 21,41%, 32,82% e 28,85% para concretos com 20% de RA misto e de 7,5%, 12,91% e 12,5% para concretos com 30% de RA misto, nos concretos de relação a/c 0,45, 0,55 e 0,65, respectivamente, em relação às misturas de referência.

As diferenças de custo por m³, observadas ao variar a origem do agregado (misto ou de concreto) em misturas com 20% de RA, estão relacionadas, principalmente, ao maior consumo de cimento das misturas com agregado reciclado de concreto. Esse tipo de agregado possui menor teor de argamassa residual aderida, havendo assim, um desconto menor da quantidade cimento da mistura de referência ao aplicar o método de dosagem EMV. O aumento de custos por m³ foi da ordem de 2,68% para concretos com 20% de RA de concreto, em relação a concretos com 20% de agregado reciclado misto.

Praticamente, não se observa diferença de custo por m³ entre as misturas com 30% de agregado misto e de concreto, sendo essa diferença de 0,08%, isso se deve à padronização do consumo de cimento realizada nas misturas de 30% de RA misto, o que aproximou o consumo de cimento dessa mistura com a de 30% de agregado reciclado de concreto.

No entanto, ao avaliar os custos por MPa (Figura 19 b), nota-se diferença, uma vez que os concretos produzidos com agregado reciclado de concreto apresentaram maior desempenho mecânico, reduzindo o custo para atingir 1 MPa de resistência. A redução de custos por MPa, ao utilizar RA de concreto, foi de 9,4% e 5,91%, em relação a concretos produzidos com 20 e 30 % de agregado reciclado misto, respectivamente.

Em relação ao tipo de cimento, identifica-se uma diminuição de custo por m³ da ordem de 1,79%, 1,7% e 1,65% nas misturas de cimento CP IV produzidas com 0,20 e 30% de RA misto, em relação às misturas equivalentes produzidas com cimento CP V, isso porque o cimento CP IV possui custo ligeiramente menor que cimento CP V (Figura 19 a). No entanto, nota-se que a perda de resistência pela utilização do cimento de menor custo, eleva o custo por MPa em 11,33% e 4,56% nas misturas de 0 e 30% de RA misto, em relação às misturas equivalentes produzidas com cimento CP V. A mistura de 20% de RA misto produzida com cimento CP IV obteve um resultado de resistência à compressão aos 28 dias superior à mistura equivalente produzida com CP V apresentando assim um custo 9,66% menor (Figura 19 b).

4.6 ANÁLISE GERAL

Fazendo uma análise geral em termos de propriedades mecânicas, indicadores ambientais (ligante e carbono simultaneamente) e custos por MPa²³, nota-se que os resultados mais promissores (Tabela 21) são obtidos para concretos produzidos com relações a/c igual ou inferior a 0,55 e com cimento com maior teor de clínquer (CP V). Em relação a origem do agregado, os melhores desempenhos foram observados em misturas com agregado natural, agregado reciclado de concreto e reciclado misto, respectivamente.

Tabela 21 – Melhores resultados da pesquisa experimental

Concretos	CC ¹ (Kg/m ³)	f _c 28 dias (MPa)	Emissões (Kg.CO ₂ /m ³)	Índices		Custo total		Abatimento (mm)
				Carbono (Kg.CO ₂ /MPa)	Ligante (Kg.Cim/MPa)	R\$/m ³	R\$/MPa	
REF 0,45 V N	419	46,0	333,1	7,3	9,1	444,4	9,7	145
30% 0,45 V M	384	42,7	306,0	7,2	9,0	443,1	10,4	150
REF 0,55 V N	339	37,6	273,0	7,3	9,0	379,2	10,1	125
30% 0,55 V M	311	33,1	250,8	7,6	9,4	376,9	11,4	140
30% 0,55 V C	311	35,2	251,4	7,2	8,9	376,6	10,7	135

¹Consumo de cimento

Observa-se na Tabela 22 que houve perda na resistência à compressão, índice de carbono, índice de ligante e nos custos por MPa, ao aumentar a a/c de 0,45 para 0,55 e ao empregar 30% de agregado reciclado. Exceto no que diz respeito aos índices ambientais, quando se aumentou a relação a/c de 0,45 para 0,55 em concretos de

²³ Optou-se por considerar a análise de custos por MPa por levar em conta também o ganho ou perda de resistência. Sendo que a relação entre custos por m³ e por MPa foi inversamente proporcional. Uma vez que a redução do consumo de cimento diminui o custo, mas também reduz a resistência à compressão (Tabela 21).

referência e ao empregar 30% de agregado reciclado de concreto. Nesses casos o valor dos índices foi mantido ou apresentou ligeiro ganho (1,1% a 1,4%), em virtude da redução do consumo de cimento e da menor perda de resistência do concreto produzido com agregado de concreto em relação ao concreto com emprego de agregado misto.

Tabela 22 – Resistência à compressão, índices ambientais, custos por MPa, perdas (-) e ganhos (+) em percentual

Concretos	Perdas e ganhos (%)			R\$/MPa
	fc 28 dias (MPa)	Índice de Carbono (Kg. CO ₂ /MPa)	Índice de Ligante (Kg.Cim/MPa)	
Cimento CP V; a/c = 0,45 e 0,55; agregado natural (N) e agregado reciclado misto (M)				
30% 0,45 M → 30% 0,55 M	-22,5 %	-5,6 %	-4,4 %	-9,6 %
REF 0,45 N → REF 0,55 N	-18,3 %	0 %	+1,1 %	- 4,1 %
Cimento CP V; a/c = 0,55; agregado natural (N), reciclado misto (M) e reciclado de concreto (c)				
REF 0,55 N → 30% 0,55 M	-12,0 %	-4,1 %	-4,4 %	-12,9 %
REF 0,55 N → 30% 0,55 C	-6,4 %	+ 1,4 %	+1,1 %	-5,9 %

Na Tabela 23, pode-se observar as perdas ou ganhos em percentual, dos concretos com 30% de RA e com 20% de RA em relação aos concretos de referência (agregado natural), para as relações a/c 0,45 e 0,55 e produzidos com agregados reciclados misto e de concreto. As perdas nos concretos com 20% de RA são mais elevadas do que as observadas nos concretos com 30% de RA (Tabela 23). Isso ocorre devido ao ajuste realizado no consumo de cimento e aplicação de somente aditivo superplastificante, nos concretos com 30% de RA.

Tabela 23 – Resistência à compressão, índices ambientais, custos por MPa, perdas (-) e ganhos (+) em percentual

Concretos	Perdas e ganhos (%)			R\$/MPa
	fc 28 dias (MPa)	Índice de Carbono (Kg.CO ₂ /MPa)	Índice de Ligante (Kg.Cim/MPa)	
Cimento CP V; a/c = 0,45; agregado natural (N) e agregado reciclado misto (M)				
REF 0,45 N → 20% 0,45 M	-20,4%	-15,1%	-15,4%	-20,6%
REF 0,45 N → 30% 0,45 M	-7,2%	+ 1,4 %	+ 1,1 %	- 7,2 %
Cimento CP V; a/c = 0,55; agregado natural e agregado reciclado misto (M)				
REF 0,55 N → 20% 0,55 M	-27,4 %	-26,0 %	-26,7 %	-32,7 %
REF 0,55 N → 30% 0,55 M	-12,0 %	-4,1 %	-4,4 %	-12,9 %
Cimento CP V; a/c = 0,55; agregado natural e agregado reciclado de concreto (C)				
REF 0,55 N → 20% 0,55 C	-17,6 %	-15,1 %	-15,6 %	-19,8 %
REF 0,55 N → 30% 0,55 C	-6,4 %	+ 1,4 %	+1,1 %	-5,9 %

Neste estudo constatou-se que o emprego de um método de dosagem que considera as especificidades dos agregados reciclados de RCD como o EMV e com a utilização de tecnologias, como aditivo superplastificante, foi possível, mesmo em concretos de relação a/c intermediária (0,55) e agregado reciclado misto, produzir concretos com agregados reciclados que possuam indicadores ambientais melhores do que os dos concretos produzidos com agregado natural, reduzindo as perdas de custos por MPa e

desempenho mecânico. Porém os índices encontrados nos concretos com agregado reciclado da pesquisa não atenderam às metas de ecoeficiência estipuladas por Machado (2020) de $IC < 5,0 \text{ Kg}_{CO_2} \cdot m^{-3} \cdot MPa^{-1}$ e $IL < 7 \text{ Kg}_{Cimento} \cdot m^{-3} \cdot MPa^{-1}$. Destaca-se que os indicadores da autora foram obtidos com base em concretos com melhores resultados de IC e IL, advindos de um amplo banco de dados da literatura, com resistência à compressão superior a 40 MPa e emprego de agregados de concreto. Já nesse estudo foram proporcionados concretos de resistência entre 20 MPa e 50 MPa, com utilização de agregado reciclado sem tratamento e em sua maioria agregados reciclados mistos.

Porém, os concretos com melhor desempenho geral (Tabela 21) apresentaram valores de indicadores inferiores à mediana dos dados encontrados na literatura para concretos produzidos com agregado reciclado misto (Tabela 24). Os valores de indicadores foram inferiores também à mediana dos valores de indicadores obtidos por Machado (2020) para concretos: com agregado graúdo reciclado (AGR) independente da origem e teor de substituição; concretos com 20% e 30% de AGR; e concretos com 20% e 30% de AGR cuja classe de resistência está entre 20 a 50 ± 3 MPa (Tabela 24). Além disso esses concretos apresentaram valores similares aos indicadores de seus concretos de referência.

Tabela 24 – IC e IL teóricos para concretos de diferentes características e classes de resistência

Características e nível de resistência do concreto	IC <i>Kg.CO₂.m⁻³.MPa⁻¹</i>	IL <i>Kg.Cim.m⁻³.MPa⁻¹</i>	Fonte	Observação
Concretos com agregados graúdos reciclados (AGR) ²	8,1	10,6	Machado (2020)	Tabela 28 - Anexo A
Concretos com agregados reciclados com 20 a 30% de AGR ²	7,4	9,8		Tabela 29 - Anexo A
Concretos com 20 a 30 % de AGR e com resistência de 20 a 50 ± 3 MPa	7,6	10,1		Tabela 30 - Anexo A
Concretos com AGR mistos e com resistências de 20 a 50 ± 3 MPa	7,8	10,7	Oliveira (2023)	Indicadores teóricos da literatura (Tabela 4)
Concretos com agregados reciclados com resistência de 20 a 50 MPa	7,5	10,2		Indicadores dos dados experimentais (Tabela 16)

¹Os dados de Machado (2020) e Oliveira (2023) são representados pela mediana dos dados obtidos. Os bancos de dados de Machado (2020) estão apresentados no anexo A.

Com base no estudo experimental desenvolvido e na análise de dados disponíveis na literatura verifica-se que são necessários mais estudos sobre concretos com agregados reciclados, considerando o proporcionamento otimizado, uso de aditivos e adições, teores ótimos de agregados reciclados incorporados e os impactos nas propriedades no estado fresco e endurecido e indicadores de ecoeficiência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista o objetivo de avaliar os indicadores de ecoeficiência de concretos com agregados reciclados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), considerando propriedades no estado fresco e endurecido e analisando os resultados obtidos, conclui-se que: É possível produzir concretos com agregados reciclados de construção e demolição, de resistência à compressão inferior a 50 MPa, com melhores indicadores de ecoeficiência do que os dos concretos convencionais. As principais conclusões estão apresentadas a seguir:

Concretos com 30% de agregado reciclado apresentaram propriedades mecânicas superiores aos com 20% de RA, o que está associado ao consumo fixo de cimento, em ambos os teores de substituição (20 e 30%), e ao uso exclusivo, e em maior teor, de superplastificante nos concretos com 30% de RA. Os concretos produzidos com agregado reciclado de concreto (CRA) apresentaram melhor desempenho mecânico em relação aos produzidos com agregado reciclado misto (MRA), devido às características inferiores do MRA em comparação ao CRA. Já os concretos produzidos apenas com agregado natural tiveram melhores desempenhos em relação aos produzidos com agregados reciclados, isso se deve às melhores características do agregado natural e em função da redução do consumo de cimento nos concretos com agregado reciclado, promovido pelo método de proporcionamento EMV utilizado nesses concretos.

Por consequência da influência nas propriedades mecânicas, o teor de substituição e a origem do agregado reciclado também influenciaram nos indicadores de ecoeficiência, uma vez que os valores desses indicadores estão diretamente relacionados aos resultados de resistência à compressão. Contudo, no caso dos índices de ligante e de carbono, diferentemente das propriedades mecânicas, a redução do consumo de cimento, proporcionada pelo EMV, foi benéfica para os valores dos índices, quando o prejuízo dessa redução à resistência à compressão não foi tão elevado. Isso se deve a redução do consumo de cimento que também melhora diretamente o índice de ligante e por consequência, o índice de carbono, devido à redução das emissões. Assim, para as relações a/c mais baixas (0,45 e 0,55), onde tem-se maiores valores de resistência à compressão, em geral os melhores índices foram obtidos nos concretos com 30%, 0% (referência) e 20% de RA, respectivamente. Isso está associado ao bom desempenho mecânico da mistura de 30% de RA, que teve menor perda de resistência à compressão do que os concretos com 20% de RA, em relação à mistura de referência (Tabela 22),

mesmo com menor consumo de cimento. No entanto, para os concretos com relação a/c 0,65, que possuem menor resistência à compressão, os melhores índices foram obtidos nos concretos com 0% (referência), 30% e 20% de agregado reciclado, respectivamente.

No que diz respeito ao tipo de cimento, os melhores índices de carbono foram obtidos para os concretos produzidos com cimento CP IV, devido ao seu menor valor de emissões de CO_2 em relação ao CP V. No caso do índice de ligante, obteve-se menores índices em concretos produzidos com CP V, contudo, com menor variação do que as observadas para o índice de carbono. Pois o consumo de cimento dos concretos foi equivalente, tendo-se variação de resistência à compressão inferior à variação das emissões.

Pela análise de variância ANOVA, o teor de substituição, a relação a/c , a origem dos agregados e o tipo de cimento, apresentam influência estatística significativa na resistência à compressão e nos índices de ecoeficiência.

Com adaptações no consumo de cimento dos concretos com 30% de RA e no tipo e teor de aditivo utilizado conforme o teor de RA, obteve-se o abatimento desejado (120 ± 30) em todos os concretos da pesquisa. Dentre os concretos submetidos ao ensaio de reometria (a/c 0,55 e cimento CP V), as misturas com RA misto apresentaram melhores valores de tensão de escoamento em relação aos concretos com RA de concreto. Em virtude da fixação do consumo de cimento entre concretos com 20 e 30% de RA e do uso exclusivo e em maior teor de superplastificante nos concretos com 30% de RA, esses apresentaram melhores resultados de tensão de escoamento, seguidos pelos com 20% de RA e então pelos concretos de referência. Contudo, apenas o concreto de 20% de RA misto atendeu às limitações dos parâmetros (tensão de escoamento e viscosidade plástica) estipulados pela literatura para ser considerado bombeável.

Tem-se resultados mais promissores em termos de propriedades mecânicas, índices de ligante e de carbono (simultaneamente) e custos por MPa, para concretos com agregado reciclado de menores relações a/c (inferiores a 0,55), com cimento de maior teor de clínquer e que utilizam agregado reciclado de concreto, como relatado nas diretrizes de Machado (2020). Contudo, podem ser produzidos concretos com MRA com indicadores de ecoeficiência similares aos de concretos sem agregados reciclados. Para isso faz-se necessário considerar as características dos RA, como argamassa aderida e absorção de água, e empregar métodos de dosagem apropriados e aditivos.

Assim, ainda que os concretos com menor a/c e produzidos com agregado natural ou RA de concreto tenham apresentado melhores resultados, não se pode

desconsiderar o ganho que a aplicação dos RA mistos em concretos proporcionam em relação à circularidade, à incorporação de resíduos e a não extração de matéria-prima virgem. Principalmente tendo em conta a maior disponibilidade do agregado misto, em comparação aos RA de concreto e que 64% dos concretos produzidos no mundo possuem resistência à compressão inferiores a 37 MPa (resistência intermediária).

5.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Tendo em vista que a incorporação de resíduos e a não extração de matéria-prima virgem pode trazer benefícios em termos econômicos e ambientais; e com o objetivo de minimizar as perdas de desempenho mecânico e, conseqüentemente, de custos por MPa de concretos com RA misto de resistência intermediária, para estudos futuros sugere-se a realização de um projeto experimental que permita:

- a) Avaliar em que medida é possível otimizar o consumo de cimento em diferentes teores de substituição, de maneira a não perder desempenho mecânico em relação aos concretos de referência; e com menor prejuízo possível aos indicadores de ecoeficiência, em concretos de resistência intermediária (a/c 0,55) – aplicando o conceito do método do Volume Equivalente de Argamassa (EMV), mas realizando ajustes graduais no consumo de cimento proposto pelo método.
- b) Quantificar o impacto em termos econômicos e ambientais, da incorporação de resíduos e da não extração de matéria-prima.
- c) Avaliar outros teores de substituição, uma vez que aplicando o conceito do método do Volume Equivalente de Argamassa (EMV), mas realizando ajustes graduais no consumo de cimento proposto pelo método, pode ser possível utilizar teores de substituição superiores a 30%, com o auxílio de aditivo superplastificante para manter a fluidez adequada.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, A.; FATHIFAZL, G.; BURKAN ISGOR, O.; RAZAQPUR, A.; FOURNIER, B.; FOO, S. Proposed method for determining the residual mortar content of recycled concrete aggregates. *Journal of ASTM Internacional*, v.5, n.1, 2008.
- AHARI, R. S.; ERDEM, T. K.; RAMYAR, K. Thixotropy and structural breakdown properties of self consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, v. 59, p. 26–37, 1 maio 2015.
- AJAY, N. et al. Experimental studies on rheological properties of conventional vibrated concrete using direct shear box. *The Indian Concrete Journal*, v. 92, n. 8, p. 19–28, 2018.
- AKBARNEZHAD, A. et al. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 8, p. 3469–3479, ago. 2011.
- AL-MARTINI, S.; AL-KHATIB, M. I. Rheology of self-consolidating concrete in hot weather conditions. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, v. 173, n. 5, p. 215–226, out. 2020.
- AMARIO, M. et al. Rheological behavior at fresh state of structural recycled aggregate concrete. *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet - Proceedings of the 2017 fib Symposium*, p. 215–223, 2017.
- AMARIO, M. et al. Analytical tool for assessment of the rheological behavior of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 309, p. 125166, 22 nov. 2021.
- AMER, A. A. M. et al. Rheological and mechanical behavior of concrete made with pre-saturated and dried recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 123, p. 300–308, 1 out. 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 2550**: Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry. West Conshohocken, 2017.
- ANDRADE FILHO, P. E. S. **Comportamento de ligações aço-concreto reciclado por meio de adesivos**. Dissertação de mestrado - São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, 2021.
- ANDREW, R. M. Global CO2 emissions from cement production, 1928-2018. *Earth System Science Data*, v. 11, n. 4, p. 1675–1710, 20 nov. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 01 mai. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 25 jun. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto (Procedimento). Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953**: Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16137**: Ensaios não destrutivos - Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11768-3**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 3: Ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16917**: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

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

BAHRAMI, N. et al. Optimum recycled concrete aggregate and micro-silica content in self-compacting concrete: Rheological, mechanical and microstructural properties. **Journal of Building Engineering**, v. 31, 1 set. 2020.

BANFILL, P. F. G. et al. Rheology of low carbon fibre content reinforced cement mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 9, p. 773-780, 1 out. 2006.

BENAICHA, M. et al. Influence of silica fume and viscosity modifying agent on the mechanical and rheological behavior of self compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 103–110, 1 jun. 2015.

- BIZINOTTO, M. B. et al. Effects of chemical admixtures on the rheology of fresh recycled aggregate concretes. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 353-362, 1 out. 2017.
- BRAGA, A. M.; SILVESTRE, J. D.; DE BRITO, J. Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 529-543, set. 2017.
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº. 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil.** Ministério do Meio Ambiente: CONAMA. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Imprensa Oficial, 2002.
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução Conama nº 348, de 16 de agosto de 2004. Altera a Resolução Conama no 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos.** Ministério do Meio Ambiente: CONAMA. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Imprensa Oficial, 2004.
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução Conama nº 431, de 21 de maio de 2011. Altera a Resolução no 307, de 5 de julho de 2002, estabelecendo nova classificação para o gesso.** Ministério do Meio Ambiente: CONAMA. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Imprensa Oficial, 2011.
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução Conama nº 469, de 29 de julho de 2015. Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.** Ministério do Meio Ambiente: CONAMA. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Imprensa Oficial, 2015.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, T. I. E. C.-M. **3ª Comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima.** Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações: MCTIC. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Imprensa Oficial, 2016.
- BEAUPRE, D. **Rheology of high-performance shotcrete.** Tese (Doutorado). Vancouver: University of British Columbia, 1994.
- CABRAL, A. E. B. et al. Performance estimation for concretes made with recycled aggregates of construction and demolition waste of some Brazilian cities. **Materials Research**, v. 15, n. 6, p. 1037-1046, 25 set. 2012.
- CAMPOS, H. F. **Dosagem de concreto sustentável e de alta resistência, otimizada por modelos de empacotamento de partículas, com substituição parcial do cimento portland por pó de pedra e sílica ativa.** Tese (Doutorado). Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2019.
- CARNEIRO, A. P. et al. Características do Entulho e do Agregado Reciclado. **Reciclagem de Entulho para a Produção de Materiais de Construção: Projeto Entulho Bom.** Salvador: EDUFBA, 2001. v. 1. p.1-312.
- CARTUXO, F. et al. Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates – Influence of the superplasticizer. **Construction and Building Materials**, v. 89, p. 36-47, 1 ago. 2015.
- CHÁCARA, D. M. **Reologia de depósitos de rejeitos espessados de minério de ferro para estudos de Dam Break.** Dissertação de mestrado—Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro preto, 2020.

- CONTRERAS, M. et al. Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 594-600, 1 out. 2016.
- COSTA, J. Y. A. **Agregado reciclado de resíduos de construção e demolição: variabilidade e influência no comportamento mecânico do concreto**. Dissertação de mestrado, São Paulo: Universidade São Judas Tadeu, 2018.
- CUNHA FILHO, F. J. V. DA. **Estudo reológico de um fluido de perfuração à base n-parafina, utilizando argila modificada com tensoativo**. Dissertação de mestrado, Natal, RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Centro de Tecnologia Departamento de Engenharia Química, 2015.
- 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. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. Tese (Doutorado)—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2013.
- DOMINGO-CABO, A. et al. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 7, p. 2545-2553, jul. 2009.
- EPD INTERNACIONAL. **Aditivo plastificante para concreto**. Estocolmo, 2021. Disponível em: <www.environdec.com>. Acesso em: 20 jan. 2023.
- EPD INTERNACIONAL. **Aditivo superplastificante para concreto**. Estocolmo, 2021. Disponível em: <www.environdec.com>. Acesso em: 20 jan. 2023.
- ESTOLANO, V. et al. Avaliação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos de pré-fabricados de concreto. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 1, 2018.
- ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A. Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 58, n. 10, p. 683-690, dez. 2006.
- EUROPEAN READY MIXED CONCRETE ORGANIZATION. **READY-MIXED CONCRETE INDUSTRY STATISTICS**. Bélgica: ERMCO, 2020. Disponível em: <<http://www.ermco.eu>>. Acesso em: 20 jan. 2023.
- FALESCHINI, F. et al. Rheology of fresh concretes with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 407-416, 30 dez. 2014.
- FATHIFAZL, G. et al. New Mixture Proportioning Method for Concrete Made with Coarse Recycled Concrete Aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, n. 10, p. 601-611, 15 set. 2009.
- FEIZ, R. et al. Improving the CO2 performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 98, p. 272-281, 1 jul. 2015.
- FERRARIS, C. F. et al. **Role of Rheology in Achieving Successful Concrete Performance**. Disponível em: <<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&i=51700809>>. Acesso em: 26 jun. 2022.

- FERREIRA, R. L. S. et al. The role of powder content of the recycled aggregates of CDW in the behaviour of rendering mortars. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 601-612, maio 2019.
- FLOREA, M. V. A.; BROUWERS, H. J. H. Properties of various size fractions of crushed concrete related to process conditions and re-use. **Cement and Concrete Research**, v. 52, p. 11-21, 1 out. 2013.
- GERIN, M. T. **Comportamento de pilares mistos preenchidos com concreto de resíduos de concreto submetidos a compressão axial centrada: efeito do teor de substituição e da forma de aplicação da força**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2020.
- GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 11–32, 15 fev. 2016.
- GIRISH, S. et al. A scientific approach to measure the workability of concrete using new concrete shear box. **The Indian Concrete Journal**, v. 92, n. 3, p. 24-35, 2018.
- GONZÁLEZ, M. D. et al. The Design and Development of Recycled Concretes in a Circular Economy Using Mixed Construction and Demolition Waste. **Materials (Basel, Switzerland)**, v. 14, n. 16, 2 ago. 2021.
- GONZÁLEZ-TABOADA, I. et al. Tools for the study of self-compacting recycled concrete fresh behaviour: Workability and rheology. **Journal of Cleaner Production**, v. 156, p. 1-18, jul. 2017a.
- GONZÁLEZ-TABOADA, I. et al. Analysis of rheological behaviour of self-compacting concrete made with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 18-25, dez. 2017b.
- GOTSCHLICH, M. F. L. **Escoamento de fluidos não newtonianos: revisão da literatura e análise de correlações para o fator de atrito e coeficientes de perda localizada**. Dissertação de mestrado, Florianópolis: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2011.
- HAYLES, M.; SANCHEZ, L. F. M.; NOËL, M. Eco-efficient low cement recycled concrete aggregate mixtures for structural applications. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 724–732, 30 abr. 2018.
- HEIKAL, M.; MORSY, M. S.; AIAD, I. Effect of treatment temperature on the early hydration characteristics of superplasticized silica fume blended cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 680–687, 1 abr. 2005.
- HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1993
- HU, J.; WANG, K. Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 3, p. 1196–1204, mar. 2011.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Anual da Indústria da Construção - PAIC**. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/54/paic_2020_v30_informativo.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2022.

- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9277**: Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption - BET method. Genebra, 2010.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13320**: Particle size analysis - Laser diffraction methods. Genebra, 2020.
- IRGENS, F. Rheology and non-newtonian fluids. **Rheology and Non-Newtonian Fluids**, v. 9783319010533, p. 1–190, 1 jul. 2013.
- ISLAM, R. et al. An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling. **Waste Management**, v. 95, p. 10-21, 15 jul. 2019.
- JIAO, D. et al. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 146-159, 1 out. 2017.
- JIMÉNEZ, L. F.; DOMÍNGUEZ, J. A.; VEGA-AZAMAR, R. E. Carbon Footprint of Recycled Aggregate Concrete. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, p. 1-6, 30 maio 2018.
- KAPOOR, K.; SINGH, S. P.; SINGH, B. Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 67-76, 15 dez. 2016.
- KIM, H.-S. et al. Quality improvement of recycled aggregates using the acid treatment method and the strength characteristics of the resulting mortar. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 19, n. 2, p. 968-976, 15 abr. 2017.
- KISKU, N. et al. Microstructural investigation of recycled aggregate concrete produced by adopting equal mortar volume method along with two stage mixing approach. **Structures**, v. 24, p. 742-753, abr. 2020.
- KOCHEM, K. **Potencialidades de logística reversa do resíduo de gesso da indústria da construção civil**. Dissertação de mestrado, Medianeira: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.
- KONDEPUDI, K.; SUBRAMANIAM, K. V. L. Rheological characterization of low-calcium fly ash suspensions in alkaline silicate colloidal solutions for geopolymers concrete production. **Journal of Cleaner Production**, v. 234, p. 690-701, 10 out. 2019.
- KOU, S.-C.; POON, C.-S. Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 649-654, set. 2010.
- KUDER, K. G. et al. Rheology of fiber-reinforced cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 2, p. 191-199, fev. 2007.
- KUSTER JUNIOR, J. S. **Avaliação da incorporação de agregado reciclado na composição de concretos autoadensáveis**. Dissertação (Mestrado em estruturas e construção civil). São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2018.
- KWAN, A. K. H.; FUNG, W. W. S. Effects of SP on flowability and cohesiveness of cement-sand mortar. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 1050–1057, 1 nov. 2013.
- LANGARO, E. A. et al. A influência da composição química e da finura no desempenho de cimentos álcali ativados obtidos com escórias de alto forno. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 1, 2017.

- LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânica de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese de doutorado— Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- LEITE, M. B.; FIGUEIREDO FILHO, J. G. L.; LIMA, P. R. L. Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate. **Materials and Structures**, v. 46, n. 10, p. 1765–1778, 22 out. 2013.
- LI, Y.; KWAN, A. K. H. Ternary blending of cement with fly ash microsphere and condensed silica fume to improve the performance of mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 49, p. 26-35, 1 maio 2014.
- LIMBACHIYA, M.; MEDDAH, M. S.; OUCHAGOUR, Y. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 439-449, 1 fev. 2012.
- LOTFI, S. et al. Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 243-256, out. 2015.
- LOVATO, P. S. et al. Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 437–447, jan. 2012.
- LU, C.; YANG, H.; MEI, G. Relationship between slump flow and rheological properties of self compacting concrete with silica fume and its permeability. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 157-162, 30 jan. 2015.
- MACHADO, L. S. M. **Determinação da ecoeficiência de concretos reciclados em função do consumo de ligantes**. Dissertação de mestrado, Feira de Santana: Universidade Estadual de Feira de Santana, 2020.
- MAGALHÃES, R. F. DE; DANILEVICZ, Â. DE M. F.; SAURIN, T. A. Reducing construction waste: A study of urban infrastructure projects. **Waste Management**, v. 67, p. 265-277, 1 set. 2017.
- MARTINI, S. AL; KHARTABIL, A.; NEITHALATH, N. Rheological Properties of Recycled Aggregate Concrete Incorporating Supplementary Cementitious Materials. **ACI Materials Journal**, v. 118, n. 6, 1 nov. 2021.
- MATIAS, A. N. **Resíduos de construção e demolição à luz da Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Foz do Iguaçu: Universidade Federal da Integração Latino-Americana, 2020.
- MATIAS, D. et al. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 101-109, 1 jul. 2013.
- MATOS, P. R. DE et al. Rheological behavior of Portland cement pastes and self-compacting concretes containing porcelain polishing residue. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 508–518, jun. 2018.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- NAGARAJ, A.; GIRISH, S. Rheology of Fresh Concrete - A Review. **Journal of Rehabilitation in Civil Engineering**, v. 9, n. 3, p. 118-131, 1 ago. 2021.

- NASCIMENTO, C. R. **Reologia e Reometria Aplicadas ao Estudo de Polpas Minerai**s. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. v. 12.
- NAZAR, S. et al. Rheological properties of cementitious composites with and without nano-materials: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 272, nov. 2020.
- NENO, C.; BRITO, J. DE; VEIGA, R. Using fine recycled concrete aggregate for mortar production. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 168-177, jan. 2014.
- OLIVEIRA, L. S.; JOHN, V. M. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: agregado reciclado**. São Paulo: SIDAC, 2022.
- OLIVEIRA, T. C. F.; DEZEN, B. G. S.; POSSAN, E. Use of concrete fine fraction waste as a replacement of Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, p. 123126, nov. 2020.
- OZBAKKALOGLU, T.; GHOLAMPOUR, A.; XIE, T. Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete: Effect of Recycled Aggregate Properties and Content. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 2, fev. 2018.
- PACHECO, J. et al. Destructive Horizontal Load Tests of Full-Scale Recycled-Aggregate Concrete Structures. **ACI Structural Journal**, v. 112, n. 6, nov. 2015.
- PAWLUCZUK, E. et al. The Influence of Heat and Mechanical Treatment of Concrete Rubble on the Properties of Recycled Aggregate Concrete. **Materials**, v. 12, n. 3, p. 367, 24 jan. 2019.
- PEDRO, D. et al. Microstructural Features of Recycled Aggregate Concrete: From Non-Structural to High-Performance Concrete. **Microscopy and Microanalysis**, v. 25, n. 3, p. 601-616, 4 jun. 2019.
- PELLEGRINO, C.; FALESCHINI, F. Sustainability Improvements in the Concrete Industry. **Green Energy and Technology**. 2016.
- PERROT, A. et al. Yield stress and bleeding of fresh cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 7, p. 937-944, 1 jul. 2012.
- PETIT, J. Y.; WIRQUIN, E.; KHAYAT, K. H. Effect of temperature on the rheology of flowable mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 1, p. 43-53, 1 jan. 2010.
- POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 18, n. 6, p. 461-468, 1 jul. 2004.
- PROSKE, T. et al. Eco-friendly concretes with reduced water and cement contents- Mix design principles and laboratory tests. **Cement and Concrete Research**, v. 51, p. 38-46, 1 set. 2013.
- RAHMAN, M. K.; BALUCH, M. H.; MALIK, M. A. Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 710-717, 15 jan. 2014.
- RANGEL, C. S. et al. Generalized quality control parameter for heterogenous recycled concrete aggregates: A pilot scale case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 589-601, 20 jan. 2019.

RASHID, K. et al. Multi-criteria optimization of recycled aggregate concrete mixes. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, dez. 2020.

REBMANN, M. S. **Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados**. Tese (Doutorado). São Paulo: Universidade de São Paulo, 2016.

REIS, J. F. A. **Determinação de Parâmetros Reológicos de Concretos Através do Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone Modificado: Estudo de Caso**. Dissertação de mestrado-Ilha Solteira: Universidade Estadual de São Paulo, 2008.

RIGO, E. **Avaliação do potencial de captura de CO₂ de concretos com resíduos de construção e demolição devido à carbonatação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Foz do Iguaçu: Universidade Federal da Integração Latino Americana, 2019.

SAADI, N.; ISMAIL, Z.; ALIAS, Z. A review of construction waste management and initiatives in malaysia. **Journal of Sustainability Science and Management**, v. 11, p. 101-114, 2016.

SALLES, P. V. et al. A importância da segregação do agregado reciclado na resistência e na durabilidade do concreto estrutural. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 3, p. 177-196, set. 2021.

SANTOS, A. A. M.; LEITE, M. B. Avaliação de concretos reciclados com agregado graúdo de concreto dosados pelo método da ABCP modificado. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 4, p. 341-359, out. 2018.

SCHANKOSKI, R. A. et al. Avaliação da reologia de concretos autoadensáveis contendo fílers de britagem. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 2, 2017.

SCHMALFUSS, L. M.; TIMM, J.; PASSUELLO, A. C. B. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: minerais**. São Paulo: SIDAC, 2022

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 201-217, ago. 2014.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 19, n. 7, p. 825-849, 9 ago. 2015.

SILVA, R. V.; BRITO, J. DE; DHIR, R. K. Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 19-31, 30 jul. 2018.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO - SNIC. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono na indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. Disponível em: <<http://snic.org.br/noticias-ver.php?id=28>>. Acesso em: 19 nov. 2021.

SINGH, R. B.; KUMAR, N.; SINGH, B. Effect of Supplementary Cementitious Materials on Rheology of Different Grades of Self-Compacting Concrete Made with Recycled Aggregates. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 15, n. 9, p. 524-535, 14 set. 2017.

- SINGH, R. B.; SINGH, B. Rheological behaviour of different grades of self-compacting concrete containing recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 354-364, fev. 2018.
- SOUALHI, H. et al. New model to estimate plastic viscosity of eco-friendly and conventional concrete. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 323-334, 15 mar. 2017.
- TAHAR, Z. et al. Rheology and strength of concrete made with recycled concrete aggregates as replacement of natural aggregates. **Epitoanyag - Journal of Silicate Based and Composite Materials**, v. 72, n. 2, p. 48-58, 2020.
- TAKANO, A. et al. Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. **Building and Environment**, v. 79, p. 20-30, 1 set. 2014.
- TAM, V. W. Y.; BUTERA, A.; LE, K. N. Carbon-conditioned recycled aggregate in concrete production. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 672-680, out. 2016.
- TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1195-1203, jun. 2005.
- VALIPOUR, M. et al. Environmental assessment of green concrete containing natural zeolite on the global warming index in marine environments. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 418-423, 15 fev. 2014.
- VARHEN, C. et al. Effect of the substitution of cement by limestone filler on the rheological behaviour and shrinkage of microconcretes. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 375-386, out. 2016.
- VÁZQUEZ, E. et al. Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 61-67, 30 set. 2014.
- VIEIRA, D. R.; CALMON, J. L.; COELHO, F. Z. Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 656-666, out. 2016.
- VIEIRA, L. DE B. P.; FIGUEIREDO, A. D. DE; JOHN, V. M. Evaluation of the use of crushed returned concrete as recycled aggregate in ready-mix concrete plant. **Journal of Building Engineering**, v. 31, 1 set. 2020.
- WALLEVIK, J. E. Relationship between the Bingham parameters and slump. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p. 1214–1221, jul. 2006.
- WALLEVIK, O. H.; WALLEVIK, J. E. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1279-1288, dez. 2011.
- WANG, Q. et al. Long-term behaviour of simply-supported steel-bars truss slabs with recycled coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 116, p. 335-346, 30 jul. 2016.
- WANG, R. et al. Influence of rheological properties of cement mortar on steel fiber distribution in UHPC. **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 65-73, 30 jul. 2017.
- WANG, W. et al. Fresh and rheological characteristics of fiber reinforced concrete, A review. **Construction and Building Materials**, v. 296, ago. 2021.

WEDDING, P.; KANTRO, D. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste-A Miniature Slump Test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95, 1980.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **GNR Project: Reporting CO2**. 2019. Disponível em: <<https://gccassociation.org/gnr/>>. Acesso em: 19 nov. 2021.

WU, D.; FALL, M.; CAI, S. J. Coupling temperature, cement hydration and rheological behaviour of fresh cemented paste backfill. **Minerals Engineering**, v. 42, p. 76-87, 1 mar. 2013.

WU, Z.; YU, A. T. W.; SHEN, L. Investigating the determinants of contractor's construction and demolition waste management behavior in Mainland China. **Waste Management**, v. 60, p. 290-300, 1 fev. 2017.

XIE, H. et al. Workability and proportion design of pumping concrete based on rheological parameters. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 267–275, jul. 2013.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 67-74, 1 jan. 2016.

YILDIRIM, S. T.; MEYER, C.; HERFELLNER, S. Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze–thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 288-296, ago. 2015.

YUN, K.-K.; CHOI, P.; YEON, J. H. Predicting Pumpability and Shootability of Crushed Aggregate Wet-Mix Shotcrete Based on Rheological Properties. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2016, p. 1–9, 2016.

ZHANG, C. et al. Eco-efficiency assessment of technological innovations in high-grade concrete recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 149, p. 649-663, 1 out. 2019.

ZONG, L.; FEI, Z.; ZHANG, S. Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 70, p. 175-182, 1 maio 2014.

APÊNDICES

APÊNDICE A – TABELAS COMPLEMENTARES

Tabela 25 – Emissões de CO₂ em Kg. CO₂/m³, por material

Emissões							
Concretos	Cimento	Agregado Miúdo Natural	Agregado graúdo		Aditivo PF	Aditivo SP	Total Kg. CO ₂ /m ³
			Natural	Reciclado			
REF 0,45 V N	317,7	10,1	5,1	0,0	0,3	0,0	333,1
REF 0,55 V N	256,7	11,0	5,1	0,0	0,3	0,0	273,0
REF 0,65 V N	215,3	11,7	5,1	0,0	0,4	0,0	232,5
20% 0,45 V M	291,2	9,2	4,5	0,3	0,3	0,6	306,1
20% 0,55 V M	235,3	10,1	4,5	0,3	0,2	0,5	250,9
20% 0,55 V C	243,3	10,5	4,3	0,3	0,3	0,5	259,1
20% 0,65 V M	197,4	10,7	4,5	0,3	0,2	0,4	213,5
30% 0,45 V M	291,2	9,0	4,1	0,5	0,0	1,2	306,0
30% 0,55 V M	235,3	9,9	4,1	0,5	0,0	1,0	250,8
30% 0,55 V C	235,9	10,1	3,9	0,5	0,0	1,0	251,4
30% 0,65 V M	197,4	10,6	4,1	0,5	0,0	0,8	213,4
REF 0,55 IV N	186,2	11,0	5,1	0,0	0,3	0,0	202,6
20% 0,55 IV M	170,7	10,1	4,5	0,3	0,2	0,5	186,3
30% 0,55 IV M	170,7	9,9	4,1	0,5	0,0	1,0	186,2

Tabela 26 - Teor de argamassa (α) e abatimento das misturas de concreto

Concretos	Cimento	Água	Água total	Aditivo (%)	α	Abatimento (mm)
REF 0,45 V N	419	189	200	0,3P	0,53	145
REF 0,55 V N	339	186	198			125
REF 0,55 IV N	339	186	198			130
REF 0,65 V N	284	185	197			120
20% 0,55 V C	321	177	186	0,3P + 0,3S	0,50	135
20% 0,55 IV M	311	171	194		0,48	135
20% 0,45 V M	384	173	196			140
20% 0,55 V M	311	171	194			130
20% 0,65 V M	261	169	193			120
30% 0,55 V C	311	171	179	0,6 S	0,48	135
30% 0,45 V M	384	164	194		0,47	150
30% 0,55 V M	311	162	192			140
30% 0,65 V M	261	160	191			125
30% 0,55 IV M	311	162	192			150

Tabela 27 – Resultados ANOVA¹

Variável de controle	Variáveis de resposta														
	Resistência à compressão					Índice de ligante					Índice de carbono				
	SS	DF	MS	F-test	p-valor	SS	DF	MS	F-test	p-valor	SS	DF	MS	F-test	p-valor
Tipo de cimento (TC)	70,20	1,00	70,20	88,80	0,00	13,69	1,00	13,69	48,79	0,00	23,23	1,00	23,23	192,73	0,00
Idade	599,19	1,00	599,19	757,99	0,00	118,01	1,00	118,01	420,60	0,00	53,89	1,00	53,89	447,08	0,00
%RA	268,35	2,00	134,17	169,73	0,00	24,31	2,00	12,16	43,33	0,00	14,98	2,00	7,49	62,12	0,00
TC * idade	19,88	1,00	19,88	25,14	0,00	8,12	1,00	8,12	28,96	0,00	0,76	1,00	0,76	6,32	0,02
TC *%RA	86,03	2,00	43,02	54,42	0,00	13,24	2,00	6,62	23,59	0,00	9,24	2,00	4,62	38,33	0,00
Idade*%RA	0,90	2,00	0,45	0,57	0,57	1,88	2,00	0,94	3,34	0,05	1,10	2,00	0,55	4,57	0,02
TC*idade*%RA	0,45	2,00	0,22	0,28	0,76	0,89	2,00	0,44	1,58	0,23	0,60	2,00	0,30	2,51	0,10
Erro	18,97	24,00	0,79			6,73	24,00	0,28			2,89	24,00	0,12		
Variável de controle	SS	DF	MS	F-test	p-valor	SS	DF	MS	F-test	p-valor	SS	DF	MS	F-test	p-valor
Origem do RA	73,16	1,00	73,16	83,98	0,00	10,52	1,00	10,52	55,27	0,00	6,93	1,00	6,93	55,91	0,00
Idade	311,29	1,00	311,29	357,31	0,00	41,31	1,00	41,31	216,99	0,00	26,90	1,00	26,90	216,90	0,00
%RA	387,69	2,00	193,85	222,50	0,00	38,75	2,00	19,37	101,76	0,00	25,50	2,00	12,75	102,80	0,00
Origem * idade	5,65	1,00	5,65	6,48	0,02	2,51	1,00	2,51	13,20	0,00	1,64	1,00	1,64	13,24	0,00
Origem *%RA	39,46	2,00	19,73	22,65	0,00	6,28	2,00	3,14	16,48	0,00	4,15	2,00	2,08	16,73	0,00
Idade*%RA	3,85	2,00	1,93	2,21	0,13	1,15	2,00	0,57	3,01	0,07	0,75	2,00	0,38	3,03	0,07
Origem*idade*%RA	2,94	2,00	1,47	1,69	0,21	1,61	2,00	0,81	4,23	0,03	1,05	2,00	0,53	4,25	0,03
Erro	20,91	24,00	0,87			4,57	24,00	0,19			2,98	24,00	0,12		
Variável de controle	SS	DF	MS	F-test	p-valor	SS	DF	MS	F-test	p-valor	SS	DF	MS	F-test	p-valor
a/c	2516,08	2,00	1258,04	852,23	0,00	33,14	2,00	16,57	92,47	0,00	29,35	2,00	14,68	126,76	0,00
Idade	348,89	1,00	348,89	236,35	0,00	52,20	1,00	52,20	291,30	0,00	34,13	1,00	34,13	294,77	0,00
%RA	546,94	2,00	273,47	185,26	0,00	49,44	2,00	24,72	137,95	0,00	33,09	2,00	16,54	142,89	0,00
a/c * idade	20,42	2,00	10,21	6,92	0,00	4,65	2,00	2,33	12,98	0,00	3,12	2,00	1,56	13,46	0,00
a/c *%RA	34,48	4,00	8,62	5,84	0,00	13,20	4,00	3,30	18,41	0,00	8,76	4,00	2,19	18,92	0,00
Idade*%RA	13,50	2,00	6,75	4,57	0,02	0,28	2,00	0,14	0,77	0,47	0,19	2,00	0,10	0,84	0,44
a/c*idade*%RA	20,11	4,00	5,03	3,41	0,02	4,33	4,00	1,08	6,04	0,00	2,79	4,00	0,70	6,02	0,00
Erro	53,14	36,00	1,48			6,45	36,00	0,18			4,17	36,00	0,12		

¹ As combinações que não possuem significância estatística (p-valor > 0,05) estão destacados em negrito.

ANEXOS

ANEXO A – TABELAS COMPLEMENTARES

Tabela 28 – Valores mínimos, médios e máximos dos indicadores obtidos por Machado (2020) para concretos com agregados graúdos reciclados (AGR)

Estudo	Ano	Teor de AR	fc (MPa)	CC (Kg/m ³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Batayneh e Asi (2007)	2007	5%AGR	32,50	446	13,72	97,50	376,18	11,57
Zong-ping Chen (2010)	2010	10%AGR	46,50	524	11,27	97,50	437,37	9,41
Kanellopoulos, Nicolaidis e Petrou (2014)	2014	10%AGR	61,70	400	6,48	97,50	336,03	5,45
Batayneh e Asi (2007)	2007	10%AGR	31,00	446	14,39	97,50	376,18	12,13
Batayneh e Asi (2007)	2007	15%AGR	30,50	446	14,62	97,50	376,18	12,33
Kwan et al. (2011)	2012	15%AGR	38,50	328	8,52	97,50	269,30	6,99
Ismail e Ramli (2013)	2013	15%AGR	50,82	537	10,57	97,50	440,37	8,67
Ismail e Ramli (2013)	2013	15%AGR	53,96	537	9,95	97,50	440,37	8,16
Ismail e Ramli (2013)	2013	15%AGR	55,20	537	9,73	97,50	440,37	7,98
Ismail e Ramli (2013)	2013	15%AGR	50,52	537	10,63	97,50	440,37	8,72
Ismail e Ramli (2013)	2013	15%AGR	54,40	537	9,87	97,50	440,37	8,09
Ismail e Ramli (2013)	2013	15%AGR	45,00	537	11,93	97,50	440,37	9,79
Ismail e Ramli (2013)	2013	15%AGR	55,27	537	9,72	97,50	440,37	7,97
Ismail e Ramli (2013)	2013	15%AGR	49,12	537	10,93	97,50	440,37	8,97
Ismail e Ramli (2013)	2013	15%AGR	43,21	537	12,43	97,50	440,37	10,19
Ismail e Ramli (2013)	2013	15%AGR	52,91	537	10,15	97,50	440,37	8,32
Gómez-Soberon (2002)	2002	15%AGR	38,10	400	10,50	97,50	342,45	8,99
Campos (2017)	2017	20%AGR	46,78	487	10,40	75,00	329,19	7,04
Araujo et al. (2016)	2016	19%AGR	41,23	475	11,51	85,00	343,79	8,34
Santos (2016)	2016	20%AGR	44,20	490	11,09	85,00	353,91	8,01
Santos (2016)	2016	20%AGR	37,60	372	9,89	85,00	268,68	7,15
Santos (2016)	2016	20%AGR	26,50	297	11,21	85,00	214,51	8,09
Amario (2015)	2015	20%AGR	25,23	266	10,56	97,50	227,37	9,01
Amario (2015)	2015	20%AGR	45,78	392	8,55	97,50	339,45	7,41
Amario (2015)	2015	20%AGR	63,88	547	8,57	97,50	484,34	7,58
Thomas et al. (2013)	2012	20%AGR	51,00	380	7,45	97,50	311,99	6,12
Kou e Poon (2012)	2012	20%AGR	41,00	410	10,00	97,50	219,09	5,34
Kou e Poon (2012)	2012	20%AGR	45,30	410	9,05	97,50	336,62	7,43
Kou e Poon (2012)	2012	20%AGR	42,80	410	9,58	97,50	252,67	5,90
López-Uceda et al. (2016)	2016	20%AGR	19,60	180	9,18	87,00	140,50	7,17
Lotfi et al. (2015)	2015	20%AGR	34,70	300	8,65	27,00	84,02	2,42
López-Uceda et al. (2016)	2016	20%AGR	24,80	200	8,06	87,00	164,34	6,63
Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014)	2014	20%AGR	37,70	612	16,23	97,50	297,71	7,90
Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014)	2014	20%AGR	44,00	607	13,80	97,50	282,98	6,43
Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014)	2010	20%AGR	54,70	601	10,99	97,50	275,94	5,04
Zong-ping Chen (2010)	2010	20%AGR	44,70	524	11,72	97,50	437,37	9,78
Kou e Poon (2008)	2008	20%AGR	41,20	355	8,62	97,50	298,04	7,23
Fonseca, Brito e Evangelista (2011)	2011	20%AGR	48,80	446	9,14	87,00	329,99	6,76
Batayneh e Asi (2007)	2007	20%AGR	29,80	446	14,97	97,50	376,18	12,62
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	20%AGR	62,40	400	6,41	97,50	337,38	5,41
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	20%AGR	49,70	400	8,05	97,50	316,34	6,37
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	20%AGR	43,60	400	9,17	97,50	307,93	7,06
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	20%AGR	35,20	460	13,07	97,50	250,07	7,10
Dapena et al. (2011)	2011	20%AGR	51,10	380	7,44	97,50	317,96	6,22
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	20%AGR	45,30	410	9,05	97,50	345,81	7,63
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	20%AGR	42,80	410	9,58	97,50	324,78	7,59
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	20%AGR	41,00	410	10,00	97,50	316,36	7,72
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	20%AGR	37,10	460	12,40	97,50	250,07	6,74
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	20%AGR	38,10	460	12,07	97,50	250,07	6,56
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	20%AGR	40,00	340	8,50	97,50	278,82	6,97
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	20%AGR	42,56	340	7,99	97,50	278,82	6,55
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	20%AGR	38,40	340	8,85	97,50	278,82	7,26
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	20%AGR	32,00	340	10,63	97,50	278,82	8,71
Domingo-Cabo et al. (2009)	2009	20%AGR	47,40	380	8,02	97,50	319,44	6,74
Domingo-Cabo et al. (2009)	2009	20%AGR	47,70	380	7,97	97,50	319,44	6,70
Akbarnezhad et al. (2011)	2011	20%AGR	62,00	375	6,05	97,50	313,07	5,05
Akbarnezhad et al. (2011)	2011	20%AGR	54,00	375	6,94	97,50	313,07	5,80

Estudo	Ano	Teor de AR	fc (MPa)	CC (Kg/m ³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Babu et al. (2015)	2015	20%AGR	43,48	535	12,30	65,00	283,51	6,52
Kou, Poon e Wan (2012)	2012	20%AGR	39,40	410	10,41	97,50	336,62	8,54
Kou, Poon e Wan (2012)	2012	20%AGR	39,70	410	10,33	97,50	336,62	8,48
Kou, Poon e Wan (2012)	2012	20%AGR	45,30	410	9,05	97,50	336,62	7,43
Talamona e Hai Tan (2012)	2012	20%AGR	44,56	400	8,98	97,50	329,03	7,38
Babu et al. (2015)	2015	20%AGR	64,41	535	8,31	65,00	283,51	4,40
Babu et al. (2015)	2015	20%AGR	66,12	535	8,09	65,00	283,51	4,29
Babu et al. (2015)	2015	20%AGR	59,84	535	8,94	65,00	283,51	4,74
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	22,90	260	11,35	92,00	186,47	8,14
Fedumenti (2013)	2013	25%AGR	23,90	260	10,88	92,00	186,47	7,80
Bazuco (1999)	1999	25%AGR	36,73	465	12,65	97,00	411,46	11,20
Bazuco (1999)	1999	25%AGR	26,58	346	13,01	97,00	306,32	11,52
Bazuco (1999)	1999	25%AGR	19,29	275	14,24	97,00	243,30	12,61
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	51,30	382	7,45	92,00	273,52	5,33
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	35,20	309	8,78	92,00	221,71	6,30
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	37,50	437	11,65	92,00	338,22	9,02
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	31,60	354	11,20	92,00	273,98	8,67
Pedrozo (2008)	2008	25%AGR	24,23	378	15,60	92,00	299,59	12,36
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	20,40	298	14,61	92,00	230,64	11,31
Fedumenti (2013)	2013	25%AGR	49,83	382	7,67	92,00	273,52	5,49
Fedumenti (2013)	2013	25%AGR	33,97	309	9,10	92,00	221,71	6,53
Fedumenti (2013)	2013	25%AGR	39,00	437	11,21	92,00	338,22	8,67
Fedumenti (2013)	2013	25%AGR	28,43	354	12,45	92,00	273,98	9,64
Fedumenti (2013)	2013	25%AGR	18,00	298	16,56	92,00	230,64	12,81
Rao, Bhattacharyya e Barai (2011)	2011	25%AGR	45,75	401	8,77	97,50	332,58	7,27
Rao, Bhattacharyya e Barai (2010)	2010	25%AGR	50,44	401	7,95	97,50	334,93	6,64
Etxeberria, Vazquez e Barra (2007)	2007	25%AGR	28,00	300	10,71	97,50	255,71	9,13
Elhakam, Mohamed e Awad (2012)	2012	25%AGR	27,00	250	9,26	97,50	205,26	7,60
Elhakam, Mohamed e Awad (2012)	2012	25%AGR	38,00	400	10,53	97,50	328,41	8,64
Pacheco et al. (2015)	2015	25%AGR	35,68	350	9,81	87,00	257,13	7,21
Mas e Olmo (2012)	2012	25%AGR	14,71	315	21,41	97,50	258,62	17,58
Yang e Hang (2006)	2006	25%AGR	41,80	414	9,90	97,50	348,78	8,34
Yang e Ma (2013)	2013	25%AGR	53,00	473	8,92	97,50	391,09	7,38
Etxeberria, Vazquez e Mari (2006)	2006	25%AGR	42,00	300	7,14	97,50	258,37	6,15
Matias et al. (2013)	2013	25%AGR	52,00	413	7,94	87,00	304,58	5,86
Matias et al. (2013)	2013	25%AGR	50,00	413	8,26	87,00	304,44	6,09
Matias et al. (2013)	2013	25%AGR	49,00	413	8,43	87,00	304,30	6,21
Duan et al. (2020)	2020	25%AGR	32,20	554	17,19	97,50	352,81	10,96
Duan et al. (2020)	2020	25%AGR	32,58	492	15,10	97,50	352,51	10,82
Bahrami et al. (2020)	2020	25%AGR	37,00	500	13,51	97,50	330,66	8,94
Gómez-Soberon (2002)	2002	30%AGR	37,00	400	10,81	97,50	342,45	9,26
Limbacyia, Meddah e Ouchagour (2011)	2011	30%AGR	25,00	275	11,00	97,50	227,93	9,12
Corinaldesi (2010)	2010	30%AGR	46,10	350	7,59	87,00	265,53	5,76
Corinaldesi (2010)	2010	30%AGR	45,80	340	7,42	87,00	257,18	5,62
Corinaldesi (2010)	2010	30%AGR	39,90	330	8,27	87,00	248,87	6,24
Corinaldesi (2010)	2010	30%AGR	36,30	320	8,82	87,00	240,60	6,63
Corinaldesi (2010)	2010	30%AGR	34,70	310	8,93	87,00	232,38	6,70
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	56,21	400	7,12	97,50	329,19	5,86
Kuster Junior (2018)	2018	30%AGR	49,35	483	9,79	97,50	354,28	7,18
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	53,73	400	7,44	97,50	329,19	6,13
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	52,40	400	7,63	97,50	329,19	6,28
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	37,22	397	10,66	97,50	326,45	8,77
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	34,02	393	11,56	97,50	323,75	9,52
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	32,30	390	12,08	97,50	321,09	9,94
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	74,01	535	7,23	97,50	440,15	5,95
Xiao, Lei e Zhang (2012)	2012	30%AGR	33,60	400	11,90	97,50	328,41	9,77
Zong-ping Chen (2010)	2010	30%AGR	47,20	524	11,10	97,50	437,37	9,27
Huda e Alan (2015)	2015	30%AGR	35,60	350	9,83	97,50	233,06	6,55
Kwan et al. (2011)	2012	30%AGR	37,00	328	8,86	97,50	269,30	7,28
Kanellopoulos, Nicolaidis e Petrou (2014)	2014	30%AGR	60,70	400	6,59	97,50	336,03	5,54
Xiao, Sun e Falkner (2006)	2006	30%AGR	27,52	474	17,22	97,50	399,33	14,51
Xiao, Huang e Sun (2014)	2014	30%AGR	25,00	400	16,00	97,50	328,80	13,15
Xiao, Li e Zang (2005)	2005	30%AGR	25,40	430	16,93	97,50	363,10	14,30
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	44,89	537	11,96	97,50	440,37	9,81
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	55,99	537	9,59	97,50	440,37	7,87
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	53,50	537	10,04	97,50	440,37	8,23
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	48,86	537	10,99	97,50	440,37	9,01

Estudo	Ano	Teor de AR	fc (MPa)	CC (Kg/m ³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	50,16	537	10,71	97,50	440,37	8,78
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	46,92	537	11,45	97,50	440,37	9,39
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	55,93	537	9,60	97,50	440,37	7,87
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	49,94	537	10,75	97,50	440,37	8,82
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	53,66	537	10,01	97,50	440,37	8,21
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	49,91	537	10,76	97,50	440,37	8,82
Yang , Chung e Ashou (2008)	2008	30%AGR	36,70	350	9,54	97,50	295,74	8,06
Yang , Chung e Ashou (2008)	2008	30%AGR	32,60	350	10,74	97,50	295,74	9,07
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	31,92	320	10,01	97,50	268,38	8,41
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	39,97	361	9,03	97,50	303,16	7,58
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	41,11	415	10,09	97,50	348,33	8,47
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	49,55	464	9,37	97,50	389,79	7,87
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	37,64	320	8,49	97,50	268,38	7,13
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	44,99	361	8,03	97,50	303,16	6,74
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	47,47	415	8,74	97,50	348,33	7,34
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	55,95	464	8,30	97,50	389,79	6,97
Babu et al. (2015)	2015	30%AGR	40,78	535	13,12	65,00	283,51	6,95
Babu et al. (2015)	2015	30%AGR	57,94	535	9,23	65,00	283,51	4,89
Babu et al. (2015)	2015	30%AGR	62,67	535	8,54	65,00	283,51	4,52
Bui e Takahashi (2017)	2017	30%AGR	56,00	453	8,08	97,50	369,75	6,60
Bui e Takahashi (2017)	2017	30%AGR	50,50	453	8,96	97,50	369,75	7,32
Ali e Hamid (2015)	2015	30%AGR	22,00	368	16,75	97,50	303,18	13,78
Ali e Hamid (2015)	2015	30%AGR	27,04	396	14,64	97,50	325,76	12,05
Ali e Hamid (2015)	2015	30%AGR	33,11	395	11,92	97,50	324,86	9,81
Limbachiya e Dhir (2000)	2000	30%AGR	35,20	370	10,51	97,50	319,27	9,07
Limbachiya e Dhir (2000)	2000	30%AGR	44,80	460	10,27	97,50	396,94	8,86
Limbachiya e Dhir (2000)	2000	30%AGR	52,00	560	10,77	97,50	483,86	9,30
Xie et al. (2020)	2020	30%AGR	36,16	373	10,32	97,50	304,06	8,41
Xie et al. (2020)	2020	30%AGR	39,20	373	9,52	97,50	299,74	7,65
Xie et al. (2020)	2020	30%AGR	42,32	373	8,81	97,50	296,88	7,02
Xie et al. (2020)	2020	30%AGR	41,20	373	9,05	97,50	294,01	7,14
Babu et al. (2015)	2015	30%AGR	64,61	535	8,28	65,00	283,51	4,39
Limbacyia, Meddah e Ouchagour (2011)	2011	30%AGR	29,80	305	10,23	97,50	178,38	5,99
Amario (2015)	2015	40%AGR	62,53	549	8,78	97,50	485,84	7,77
Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014)	2015	40%AGR	45,98	385	8,38	97,50	333,98	7,26
Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014)	2014	40%AGR	57,20	612	10,70	97,50	299,09	5,23
Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014)	2014	40%AGR	44,30	608	13,72	97,50	283,71	6,40
Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014)	2014	40%AGR	38,20	602	15,76	97,50	278,01	7,28
Zong-ping Chen (2010)	2010	40%AGR	46,80	524	11,20	97,50	437,37	9,35
Huda e Alan (2015)	2015	40%AGR	33,10	347	10,47	97,50	228,97	6,92
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	40%AGR	34,70	460	13,26	97,50	250,07	7,21
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	40%AGR	36,00	460	12,78	97,50	250,07	6,95
Santos (2016)	2016	40%AGR	47,40	489	10,32	85,00	353,74	7,46
Santos (2016)	2016	40%AGR	34,80	367	10,55	85,00	265,49	7,63
Santos (2016)	2016	40%AGR	27,50	295	10,73	85,00	213,40	7,76
López-Uceda et al. (2016)	2016	40%AGR	18,60	180	9,68	87,00	147,44	7,93
López-Uceda et al. (2016)	2016	40%AGR	23,60	200	8,47	87,00	164,34	6,96
Tenório et al. (2012)	2012	40%AGR	19,50	300	15,38	92,00	232,46	11,92
Tenório et al. (2012)	2012	40%AGR	28,30	400	14,13	92,00	309,95	10,95
Tenório et al. (2012)	2012	40%AGR	33,60	500	14,88	92,00	387,44	11,53
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	40%AGR	37,20	460	12,37	97,50	250,07	6,72
Akbarnezhad et al. (2011)	2011	40%AGR	52,50	375	7,14	97,50	313,07	5,96
Akbarnezhad et al. (2011)	2011	40%AGR	58,00	375	6,47	97,50	313,07	5,40
Babu et al. (2015)	2015	40%AGR	38,67	535	13,83	65,00	283,51	7,33
Babu et al. (2015)	2015	40%AGR	57,10	535	9,37	65,00	283,51	4,97
Babu et al. (2015)	2015	40%AGR	60,32	535	8,87	65,00	283,51	4,70
Babu et al. (2015)	2015	40%AGR	61,21	535	8,74	65,00	283,51	4,63
Talamona e Hai Tan (2012)	2012	40%AGR	41,68	400	9,60	97,50	329,03	7,89
Ismail e Ramli (2013)	2013	45%AGR	44,62	537	12,03	97,50	440,37	9,87
Ismail e Ramli (2013)	2013	45%AGR	54,43	537	9,87	97,50	440,37	8,09
Ismail e Ramli (2013)	2013	45%AGR	56,86	537	9,44	97,50	440,37	7,74
Ismail e Ramli (2013)	2013	45%AGR	45,78	537	11,73	97,50	440,37	9,62
Ismail e Ramli (2013)	2013	45%AGR	49,48	537	10,85	97,50	440,37	8,90
Ismail e Ramli (2013)	2013	45%AGR	51,35	537	10,46	97,50	440,37	8,58
Ismail e Ramli (2013)	2013	45%AGR	52,62	537	10,21	97,50	440,37	8,37
Araujo et al. (2016)	2016	43%AGR	39,60	472	11,91	85,00	342,56	8,65
Ismail e Ramli (2013)	2013	45%AGR	50,33	537	10,67	97,50	440,37	8,75

Estudo	Ano	Teor de AR	fc (MPa)	CC (Kg/m ³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Ismail e Ramli (2013)	2013	45%AGR	49,97	537	10,75	97,50	440,37	8,81
Ismail e Ramli (2013)	2013	45%AGR	53,68	537	10,00	97,50	440,37	8,20
Limbacyia, Meddah e Ouchagour (2011)	2011	50%AGR	29,00	330	11,38	97,50	190,83	6,58
Levy (2001)	2001	50%AGR	26,00	329	12,65	75,00	221,40	8,52
Poon et al. (2004)	2004	50%AGR	44,90	353	7,86	97,50	302,21	6,73
Bazuco (1999)	1999	50%AGR	27,12	464	17,11	97,00	410,86	15,15
Bazuco (1999)	1999	50%AGR	20,85	343	16,47	97,00	304,06	14,58
Bazuco (1999)	1999	50%AGR	19,13	280	14,64	97,00	248,09	12,97
Ceconello (2013)	2013	50%AGR	42,50	502	11,81	92,00	344,93	8,12
Ceconello (2013)	2013	50%AGR	33,40	407	12,19	92,00	279,45	8,37
Kuster Junior (2018)	2018	50%AGR	50,56	483	9,55	97,50	354,28	7,01
Ceconello (2013)	2013	50%AGR	27,10	342	12,62	92,00	235,18	8,68
Ceconello (2013)	2013	50%AGR	44,20	393	8,89	92,00	304,16	6,88
Leite (2001)	2001	50%AGR	29,30	433	14,78	97,00	368,79	12,59
Leite (2001)	2001	50%AGR	18,40	290	15,76	97,00	247,00	13,42
Leite (2001)	2001	50%AGR	12,40	219	17,66	97,00	186,53	15,04
Ceconello (2013)	2013	50%AGR	33,50	319	9,52	92,00	246,89	7,37
Ceconello (2013)	2013	50%AGR	25,00	268	10,72	92,00	207,42	8,30
Fedumenti (2013)	2013	50%AGR	35,60	502	14,10	92,00	344,93	9,69
Figueredo Filho (2011)	2011	50%AGR	35,70	435	12,18	85,00	314,22	8,80
Pedrozo (2008)	2008	50%AGR	22,61	365	16,12	92,00	288,81	12,77
Moitinho e Leite (2015)	2015	50%AGR	36,90	476	12,90	97,50	391,74	10,62
Moitinho e Leite (2015)	2015	50%AGR	28,40	355	12,48	97,50	291,74	10,27
Moitinho e Leite (2015)	2015	50%AGR	22,50	276	12,28	97,50	227,39	10,11
Fedumenti (2013)	2013	50%AGR	24,87	407	16,37	92,00	279,45	11,24
Fedumenti (2013)	2013	50%AGR	19,30	342	17,72	92,00	235,18	12,19
Fedumenti (2013)	2013	50%AGR	41,67	393	9,43	92,00	304,16	7,30
Fedumenti (2013)	2013	50%AGR	32,03	319	9,96	92,00	246,89	7,71
Fedumenti (2013)	2013	50%AGR	25,60	268	10,47	92,00	207,42	8,10
Limbacyia, Meddah e Ouchagour (2011)	2011	50%AGR	25,80	295	11,43	97,50	244,50	9,48
Malešev, Radonjanin, Marinkovi (2010)	2010	50%AGR	45,22	352	7,78	87,00	262,23	5,80
Thomas et al. (2013)	2013	50%AGR	55,00	380	6,91	97,50	311,62	5,67
Lotfi et al. (2015)	2015	50%AGR	32,20	300	9,32	27,00	84,02	2,61
Rao, Bhattacharyya e Barai (2011)	2011	50%AGR	42,50	401	9,44	97,50	333,15	7,84
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	50%AGR	50,00	400	8,00	97,50	329,19	6,58
Xiao, Lei e Zhang (2012)	2012	50%AGR	32,70	400	12,23	97,50	328,41	10,04
González-Fonteboa e Martínez-Abella (2008)	2008	50%AGR	35,85	345	9,62	97,50	294,56	8,22
González-Fonteboa e Martínez-Abella (2008)	2008	50%AGR	39,03	345	8,84	97,50	271,39	6,95
Kapoor (2016)	2016	50%AGR	36,00	615	17,08	97,50	364,07	10,11
Kapoor (2016)	2016	50%AGR	38,00	487	12,82	97,50	363,01	9,55
Kapoor (2016)	2016	50%AGR	40,00	497	12,43	97,50	391,71	9,79
Kou, Poon e Agrela (2011)	2011	50%AGR	52,00	390	7,50	97,50	323,24	6,22
Kou, Poon e Agrela (2011)	2011	50%AGR	56,00	390	6,96	97,50	291,04	5,20
Kou, Poon e Agrela (2011)	2011	50%AGR	57,00	390	6,84	97,50	299,91	5,26
Kou, Poon e Agrela (2011)	2011	50%AGR	42,00	390	9,29	97,50	210,38	5,01
Kou e Poon (2012)	2012	50%AGR	42,50	410	9,65	97,50	336,62	7,92
Kou e Poon (2012)	2012	50%AGR	41,70	410	9,83	97,50	219,09	5,25
Kou e Poon (2012)	2012	50%AGR	37,10	411	11,06	97,50	253,08	6,82
Zong-ping Chen (2010)	2010	50%AGR	43,40	524	12,07	97,50	437,37	10,08
Huda e Alan (2015)	2015	50%AGR	30,40	347	11,40	97,50	230,71	7,59
Rao, Bhattacharyya e Barai (2010)	2010	50%AGR	49,19	401	8,15	97,50	335,50	6,82
Kou e Poon (2008)	2008	50%AGR	36,40	355	9,75	97,50	298,04	8,19
Mas e Olmo (2012)	2012	50%AGR	14,60	315	21,58	97,50	258,62	17,71
Latterza (1998)	1998	50%AGR	29,00	335	11,55	75,00	234,23	8,08
Etxeberria, Vazquez e Barra (2007)	2007	50%AGR	29,00	318	10,97	97,50	271,23	9,35
Fonseca, Brito e Evangelista (2011)	2011	50%AGR	51,30	446	8,69	87,00	329,99	6,43
Elhakam, Mohamed e Awad (2012)	2012	50%AGR	22,00	250	11,36	97,50	205,26	9,33
Elhakam, Mohamed e Awad (2012)	2012	50%AGR	37,00	400	10,81	97,50	328,41	8,88
Kanellopoulos, Nicolaidis e Petrou (2014)	2014	50%AGR	60,20	400	6,64	97,50	336,03	5,58
Kou e Poon (2013)	2013	50%AGR	42,50	410	9,65	97,50	336,22	7,91
Kou e Poon (2013)	2013	50%AGR	41,70	410	9,83	97,50	252,37	6,05
Kou e Poon (2013)	2013	50%AGR	37,10	410	11,05	97,50	218,83	5,90
Kou e Poon (2013)	2013	50%AGR	31,40	410	13,06	97,50	151,75	4,83
Matias et al. (2014)	2014	50%AGR	48,00	413	8,60	87,00	305,23	6,36
González-Fonteboa e Martínez-Abella (2005)	2005	50%AGR	40,20	345	8,58	97,50	296,24	7,37
González-Fonteboa et al. (2009)	2009	50%AGR	42,66	373	8,73	97,50	292,60	6,86
Xiao, Sun e Falkner (2006)	2006	50%AGR	26,08	474	18,17	97,50	399,33	15,31

Estudo	Ano	Teor de AR	fc (MPa)	CC (Kg/m ³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Corinaldesi, Letelier e Moriconi (2011)	2011	50%AGR	34,50	350	10,14	87,00	262,91	7,62
Xiao, Huang e Sun (2014)	2014	50%AGR	25,00	406	16,24	97,50	333,73	13,35
Yang e Ma (2013)	2013	50%AGR	51,10	473	9,26	97,50	391,09	7,65
Leite e Monteiro (2016)	2016	50%AGR	39,10	354	9,05	97,50	291,33	7,45
Leite e Monteiro (2016)	2016	50%AGR	38,80	354	9,12	97,50	291,33	7,51
Dapena et al. (2011)	2011	50%AGR	48,10	380	7,90	97,50	317,96	6,61
Leite e Monteiro (2016)	2016	50%AGR	41,90	354	8,45	97,50	291,33	6,95
Leite e Monteiro (2016)	2016	50%AGR	38,00	354	9,32	97,50	291,33	7,67
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	50%AGR	55,80	400	7,17	97,50	337,38	6,05
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	50%AGR	44,30	400	9,03	97,50	316,34	7,14
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	50%AGR	40,40	400	9,90	97,50	307,93	7,62
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	50%AGR	42,50	410	9,65	97,50	345,81	8,14
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	50%AGR	41,70	410	9,83	97,50	324,78	7,79
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	50%AGR	37,10	410	11,05	97,50	316,36	8,53
Xiao, Li e Zang (2005)	2005	50%AGR	23,60	430	18,22	97,50	363,10	15,39
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	50%AGR	33,60	460	13,69	97,50	250,07	7,44
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	50%AGR	34,50	460	13,33	97,50	250,08	7,25
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	50%AGR	35,00	460	13,14	97,50	250,08	7,15
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	50%AGR	35,90	460	12,81	97,50	250,08	6,97
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	50%AGR	36,24	340	9,38	97,50	278,82	7,69
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	50%AGR	43,20	340	7,87	97,50	278,82	6,45
Domingo-Cabo et al. (2009)	2009	50%AGR	44,30	380	8,58	97,50	319,44	7,21
Domingo-Cabo et al. (2009)	2009	50%AGR	50,20	380	7,57	97,50	319,44	6,36
Etzeberria, Vazquez e Mari (2006)	2006	50%AGR	41,00	318	7,76	97,50	274,73	6,70
Matias et al. (2013)	2013	50%AGR	51,00	413	8,10	87,00	304,51	5,97
Matias et al. (2013)	2013	50%AGR	51,00	413	8,10	87,00	304,51	5,97
Matias et al. (2013)	2013	50%AGR	51,00	413	8,10	87,00	304,51	5,97
Yang , Chung e Ashou (2008)	2008	50%AGR	38,00	350	9,21	97,50	295,74	7,78
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	50%AGR	33,36	340	10,19	97,50	278,82	8,36
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	50%AGR	29,60	340	11,49	97,50	278,82	9,42
Yang , Chung e Ashou (2008)	2008	50%AGR	30,40	350	11,51	97,50	295,74	9,73
Ridzuan et al. (2001)	2001	50%AGR	40,50	355	8,77	97,50	303,92	7,50
Babu et al. (2015)	2015	50%AGR	37,42	535	14,30	65,00	283,51	7,58
Babu et al. (2015)	2015	50%AGR	55,02	535	9,72	65,00	283,51	5,15
Babu et al. (2015)	2015	50%AGR	58,58	535	9,13	65,00	283,51	4,84
Babu et al. (2015)	2015	50%AGR	60,34	535	8,87	65,00	283,51	4,70
Bui e Takahashi (2017)	2017	50%AGR	53,00	453	8,54	97,50	369,75	6,98
Bui e Takahashi (2017)	2017	50%AGR	43,00	453	10,52	97,50	369,75	8,60
Ali e Hamid (2015)	2015	50%AGR	21,25	368	17,34	97,50	303,18	14,27
Ali e Hamid (2015)	2015	50%AGR	24,17	396	16,38	97,50	325,76	13,48
Kou, Poon e Wan (2012)	2012	50%AGR	37,80	410	10,85	97,50	336,62	8,91
Kou, Poon e Wan (2012)	2012	50%AGR	33,90	410	12,09	97,50	336,62	9,93
Kou, Poon e Wan (2012)	2012	50%AGR	42,50	410	9,65	97,50	336,62	7,92
Ali e Hamid (2015)	2015	50%AGR	31,18	395	12,66	97,50	324,86	10,42
Duan et al. (2020)	2020	50%AGR	29,54	554	18,73	97,50	352,81	11,94
Duan et al. (2020)	2020	50%AGR	28,78	492	17,10	97,50	352,51	12,25
Xie et al. (2020)	2020	50%AGR	37,04	373	10,07	97,50	304,06	8,21
Xie et al. (2020)	2020	50%AGR	37,68	373	9,90	97,50	299,74	7,95
Xie et al. (2020)	2020	50%AGR	38,72	373	9,63	97,50	296,88	7,67
Xie et al. (2020)	2020	50%AGR	36,96	373	10,09	97,50	294,01	7,95
Bahrani et al. (2020)	2020	50%AGR	33,50	500	14,93	97,50	330,66	9,87
Gómez-Soberon (2002)	2002	60%AGR	35,80	400	11,17	97,50	342,45	9,57
Amario (2015)	2015	60%AGR	23,45	278	11,85	97,50	237,41	10,12
Amario (2015)	2015	60%AGR	46,90	397	8,47	97,50	350,31	7,47
Amario (2015)	2015	60%AGR	62,35	570	9,15	97,50	505,99	8,12
Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014)	2014	60%AGR	51,10	612	11,98	97,50	302,55	5,92
Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014)	2014	60%AGR	40,90	609	14,89	97,50	285,13	6,97
Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014)	2014	60%AGR	35,80	603	16,84	97,50	280,09	7,82
Zong-ping Chen (2010)	2010	60%AGR	49,20	524	10,65	97,50	437,37	8,89
Kwan et al. (2011)	2012	60%AGR	28,00	328	11,71	97,50	269,30	9,62
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	60%AGR	32,60	460	14,11	97,50	250,07	7,67
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	60%AGR	35,20	460	13,07	97,50	250,07	7,10
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	60%AGR	36,30	460	12,67	97,50	250,07	6,89
Marinkovic et al. (2010)	2010	60%AGR	33,60	300	8,93	97,50	250,40	7,45
Marinkovic et al. (2010)	2010	60%AGR	41,10	351	8,54	97,50	292,97	7,13
Marinkovic et al. (2010)	2010	60%AGR	48,10	402	8,36	97,50	335,54	6,98
Ismail e Ramli (2013)	2013	60%AGR	42,44	537	12,65	97,50	440,37	10,38

Estudo	Ano	Teor de AR	fc (MPa)	CC (Kg/m ³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Ismail e Ramli (2013)	2013	60%AGR	40,61	537	13,22	97,50	440,37	10,84
Ismail e Ramli (2013)	2013	60%AGR	54,73	537	9,81	97,50	440,37	8,05
Ismail e Ramli (2013)	2013	60%AGR	39,96	537	13,44	97,50	440,37	11,02
Ismail e Ramli (2013)	2013	60%AGR	40,43	537	13,28	97,50	440,37	10,89
Ismail e Ramli (2013)	2013	60%AGR	53,19	537	10,10	97,50	440,37	8,28
Ismail e Ramli (2013)	2013	60%AGR	48,03	537	11,18	97,50	440,37	9,17
Ismail e Ramli (2013)	2013	60%AGR	47,52	537	11,30	97,50	440,37	9,27
Ismail e Ramli (2013)	2013	60%AGR	43,25	537	12,42	97,50	440,37	10,18
Ismail e Ramli (2013)	2013	60%AGR	46,01	537	11,67	97,50	440,37	9,57
Akbarnezhad et al. (2011)	2011	60%AGR	44,50	375	8,43	97,50	313,07	7,04
Akbarnezhad et al. (2011)	2011	60%AGR	57,50	375	6,52	97,50	313,07	5,44
Zuhud (2008)	2008	60%AGR	20,83	320	15,35	97,50	268,38	12,88
Zuhud (2008)	2008	60%AGR	24,03	360	14,98	97,50	302,24	12,58
Zuhud (2008)	2008	60%AGR	19,46	320	16,43	97,50	268,38	13,79
Zuhud (2008)	2008	60%AGR	23,24	360	15,49	97,50	302,24	13,01
Zuhud (2008)	2008	60%AGR	28,77	320	11,11	97,50	268,38	9,33
Zuhud (2008)	2008	60%AGR	32,83	361	11,00	97,50	303,16	9,23
Zuhud (2008)	2008	60%AGR	36,35	415	11,41	97,50	348,33	9,58
Zuhud (2008)	2008	60%AGR	45,02	464	10,31	97,50	389,79	8,66
Babu et al. (2015)	2015	60%AGR	35,75	535	14,96	65,00	283,51	7,93
Babu et al. (2015)	2015	60%AGR	52,27	535	10,23	65,00	283,51	5,42
Babu et al. (2015)	2015	60%AGR	57,04	535	9,38	65,00	283,51	4,97
Babu et al. (2015)	2015	60%AGR	57,92	535	9,24	65,00	283,51	4,89
Talamona e Hai Tan (2012)	2012	60%AGR	41,28	400	9,69	97,50	329,03	7,97
Kisku et al. (2020)	2020	61,01%AGR	29,74	333	11,19	97,50	274,27	9,22
Kisku et al. (2020)	2020	61,01%AGR	35,22	333	9,45	97,50	255,13	7,24
Abbas et al. (2009)	2009	63,5%AGR	39,20	335	8,55	97,50	278,96	7,12
Abbas et al. (2009)	2009	63,5%AGR	34,20	335	9,80	97,50	209,18	6,12
Abbas et al. (2009)	2009	63,5%AGR	41,80	335	8,01	97,50	189,90	4,54
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	70%AGR	46,80	400	8,55	97,50	329,19	7,03
Xiao, Lei e Zhang (2012)	2012	70%AGR	31,10	400	12,86	97,50	328,41	10,56
Zong-ping Chen (2010)	2010	70%AGR	44,60	524	11,75	97,50	437,37	9,81
Xiao, Huang e Sun (2014)	2014	70%AGR	29,30	415	14,16	97,50	341,13	11,64
Xiao, Li e Zang (2005)	2005	70%AGR	24,20	430	17,77	97,50	363,10	15,00
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	70%AGR	35,20	340	9,66	97,50	278,82	7,92
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	70%AGR	44,64	340	7,62	97,50	278,82	6,25
Babu et al. (2015)	2015	70%AGR	33,74	535	15,86	65,00	283,51	8,40
Babu et al. (2015)	2015	70%AGR	51,30	535	10,43	65,00	283,51	5,53
Babu et al. (2015)	2015	70%AGR	55,03	535	9,72	65,00	283,51	5,15
Babu et al. (2015)	2015	70%AGR	55,94	535	9,56	65,00	283,51	5,07
Bui e Takahashi (2017)	2017	70%AGR	48,00	453	9,43	97,50	369,75	7,70
Bui e Takahashi (2017)	2017	70%AGR	42,00	453	10,77	97,50	369,75	8,80
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	70%AGR	31,60	340	10,76	97,50	278,82	8,82
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	70%AGR	26,48	340	12,84	97,50	278,82	10,53
Villagrán-Zaccardi, Zega e Di Maio (2008)	2008	73%AGR	31,60	388	12,28	97,50	325,74	10,31
Villagrán-Zaccardi, Zega e Di Maio (2008)	2008	73%AGR	23,60	309	13,09	97,50	259,42	10,99
Abbas et al. (2009)	2009	74,3%AGR	40,00	358	8,95	97,50	298,11	7,45
Abbas et al. (2009)	2009	74,3%AGR	35,20	359	10,20	97,50	224,18	6,37
Abbas et al. (2009)	2009	74,3%AGR	40,00	358	8,95	97,50	202,96	5,07
Bahrami et al. (2020)	2020	75%AGR	31,36	500	15,94	97,50	330,66	10,54
Bazuco (1999)	1999	75%AGR	30,88	451	14,61	97,00	399,69	12,94
Bazuco (1999)	1999	75%AGR	25,40	345	13,57	97,00	305,28	12,02
Bazuco (1999)	1999	75%AGR	14,83	275	18,55	97,00	243,67	16,43
Elhakam, Mohamed e Awad (2012)	2012	75%AGR	21,80	250	11,47	97,50	205,26	9,42
Elhakam, Mohamed e Awad (2012)	2012	75%AGR	35,00	400	11,43	97,50	328,41	9,38
Yang e Ma (2013)	2013	75%AGR	50,40	473	9,38	97,50	391,09	7,76
Ridzuan et al. (2001)	2001	75%AGR	43,50	355	8,16	97,50	303,92	6,99
Poon et al. (2004)	2004	80%AGR	44,70	353	7,90	97,50	302,21	6,76
Pedrozo (2008)	2008	75%AGR	19,80	348	17,56	92,00	275,42	13,91
Araujo et al. (2016)	2016	75%AGR	35,80	462	12,90	85,00	335,44	9,37
Mas e Olmo (2012)	2012	75%AGR	14,18	315	22,21	92,00	249,68	17,61
Zong-ping Chen (2010)	2010	80%AGR	48,40	524	10,83	97,50	437,37	9,04
Kwan et al. (2011)	2012	80%AGR	26,00	328	12,62	97,50	269,30	10,36
Akbarnezhad et al. (2011)	2011	80%AGR	42,50	375	8,82	97,50	313,07	7,37
Akbarnezhad et al. (2011)	2011	80%AGR	54,50	375	6,88	97,50	313,07	5,74
Babu et al. (2015)	2015	80%AGR	31,87	535	16,79	65,00	283,51	8,90
Babu et al. (2015)	2015	80%AGR	48,00	535	11,15	65,00	283,51	5,91

Estudo	Ano	Teor de AR	fc (MPa)	CC (Kg/m ³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Babu et al. (2015)	2015	80%AGR	52,34	535	10,22	65,00	283,51	5,42
Babu et al. (2015)	2015	80%AGR	54,08	535	9,89	65,00	283,51	5,24
Talamona e Hai Tan (2012)	2012	80%AGR	40,56	400	9,86	97,50	329,03	8,11
Zong-ping Chen (2010)	2010	90% AGR	47,40	524	11,05	97,50	437,37	9,23
Babu et al. (2015)	2015	90% AGR	29,74	535	17,99	65,00	283,51	9,53
Babu et al. (2015)	2015	90% AGR	46,66	535	11,47	65,00	283,51	6,08
Babu et al. (2015)	2015	90% AGR	50,42	535	10,61	65,00	283,51	5,62
Babu et al. (2015)	2015	90% AGR	52,26	535	10,24	65,00	283,51	5,42
Poon et al. (2004)	2004	100%AGR	46,80	353	7,54	65,00	201,71	4,31
Silva (2011)	2011	100%AGR	33,60	400	11,90	85,00	289,99	8,63
Silva (2011)	2011	100%AGR	26,70	500	18,73	85,00	362,44	13,57
Bazuco (1999)	1999	100%AGR	29,19	451	15,47	97,00	399,82	13,70
Bazuco (1999)	1999	100%AGR	19,80	333	16,80	97,00	294,62	14,88
Bazuco (1999)	1999	100%AGR	15,79	270	17,13	97,00	239,56	15,17
Berndt (2009)	2009	100%AGR	38,00	395	10,39	97,50	333,22	8,77
Limbacyia, Meddah e Ouchagour(2011)	2011	100%AGR	24,60	310	12,60	97,50	256,94	10,44
Thomas et al. (2013)	2013	100%AGR	56,00	380	6,79	97,50	311,62	5,56
Kuster Junior (2018)	2018	100%AGR	53,08	483	9,10	97,50	355,38	6,70
Malešev, Radonjanin, Marinkovi(2010)	2010	100%AGR	45,66	348	7,62	87,00	259,16	5,68
Silva (2011)	2011	100%AGR	31,30	400	12,78	85,00	289,99	9,26
Gómez-Soberon (2002)	2002	100%AGR	34,50	400	11,59	97,50	342,45	9,93
Silva (2011)	2011	100%AGR	25,60	500	19,53	85,00	362,10	14,14
Liu et al. (2016)	2016	100%AGR	28,40	456	16,06	97,50	375,28	13,21
Liu et al. (2016)	2016	100%AGR	30,90	456	14,76	97,50	375,28	12,14
Liu et al. (2016)	2016	100%AGR	32,30	456	14,12	97,50	375,28	11,62
Figueredo Filho (2011)	2011	100%AGR	32,50	414	12,73	85,00	299,04	9,20
Pedrozo (2008)	2008	100%AGR	19,05	342	17,96	92,00	271,06	14,23
Araujo et al. (2016)	2016	100%AGR	38,30	469	12,23	85,00	342,69	8,95
Lofli et al. (2015)	2015	100%AGR	27,10	300	11,07	27,00	84,02	3,10
Kapoor (2016)	2016	100%AGR	33,00	615	18,64	97,50	366,59	11,11
Kapoor (2016)	2016	100%AGR	35,00	487	13,91	97,50	365,24	10,44
Kapoor (2016)	2016	100%AGR	37,00	497	13,43	97,50	393,96	10,65
Kou, Poon e Agrela (2011)	2011	100%AGR	49,00	390	7,96	97,50	323,24	6,60
Kou, Poon e Agrela (2011)	2011	100%AGR	54,00	390	7,22	97,50	291,04	5,39
Kou, Poon e Agrela (2011)	2011	100%AGR	54,00	390	7,22	97,50	299,91	5,55
Kou, Poon e Agrela (2011)	2011	100%AGR	37,00	390	10,54	97,50	210,38	5,69
Kou e Poon (2012)	2012	100%AGR	38,10	410	10,76	97,50	336,62	8,84
Kou e Poon (2012)	2012	100%AGR	36,80	410	11,14	97,50	219,09	5,95
Kou e Poon (2012)	2012	100%AGR	25,20	410	16,27	97,50	252,67	10,03
Rao, Bhattacharyya e Barai (2011)	2011	100%AGR	40,80	401	9,83	97,50	333,38	8,17
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	100%AGR	46,00	400	8,70	97,50	329,19	7,16
Somna et al. (2012)	2012	100%AGR	41,00	424	10,34	97,50	348,11	8,49
Somna et al. (2012)	2012	100%AGR	42,70	424	9,93	97,50	283,63	6,64
Somna et al. (2012)	2012	100%AGR	40,80	424	10,39	97,50	230,53	5,65
Somna et al. (2012)	2012	100%AGR	39,30	424	10,79	97,50	184,54	4,70
Tangchirapat et al. (2008)	2008	100%AGR	30,00	380	12,67	97,50	319,03	10,63
Tangchirapat et al. (2008)	2008	100%AGR	38,00	380	10,00	97,50	270,37	7,11
Tangchirapat et al. (2008)	2008	100%AGR	35,00	380	10,86	97,50	228,39	6,53
Tangchirapat et al. (2008)	2008	100%AGR	28,00	380	13,57	97,50	193,29	6,90
Tangchirapat et al. (2013)	2013	100%AGR	44,00	380	8,64	97,50	311,62	7,08
Tangchirapat et al. (2013)	2013	100%AGR	42,00	380	9,05	97,50	249,45	5,94
Tangchirapat et al. (2013)	2013	100%AGR	41,00	380	9,27	97,50	202,82	4,95
Tangchirapat et al. (2013)	2013	100%AGR	40,00	380	9,50	97,50	156,19	3,90
López-Uceda et al. (2016)	2016	100%AGR	17,30	180	10,40	87,00	147,44	8,52
López-Uceda et al. (2016)	2016	100%AGR	20,50	200	9,76	87,00	164,34	8,02
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	100%AGR	41,90	400	9,55	97,50	329,19	7,86
Rahal (2007)	2007	100%AGR	16,24	360	22,17	97,50	303,64	18,70
Rahal (2007)	2007	100%AGR	23,36	380	16,27	97,50	320,51	13,72
Rahal (2007)	2007	100%AGR	25,84	400	15,48	97,50	337,38	13,06
Rahal (2007)	2007	100%AGR	31,52	420	13,32	97,50	354,25	11,24
Rahal (2007)	2007	100%AGR	37,20	460	12,37	97,50	387,99	10,43
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	100%AGR	41,50	400	9,64	97,50	329,19	7,93
Latterza (1998)	1998	100%AGR	27,00	335	12,41	75,00	234,23	8,68
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	100%AGR	25,26	390	15,45	97,50	321,09	12,71
Vieira (2003)	2003	100%AGR	12,00	249	20,71	92,00	200,84	16,74
Vieira (2003)	2003	100%AGR	22,00	335	15,21	92,00	270,31	12,29
Vieira (2003)	2003	100%AGR	39,80	511	12,85	92,00	413,21	10,38

Estudo	Ano	Teor de AR	fc (MPa)	CC (Kg/m ³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Somna et al. (2012)	2012	100%AGR	33,30	350	10,51	97,50	287,36	8,63
Somna et al. (2012)	2012	100%AGR	34,70	350	10,09	97,50	230,70	6,65
Somna et al. (2012)	2012	100%AGR	30,80	455	14,77	97,50	189,91	6,17
Somna et al. (2012)	2012	100%AGR	29,30	350	11,95	97,50	148,85	5,08
Somna et al. (2012)	2012	100%AGR	24,80	295	11,90	97,50	242,20	9,77
Somna et al. (2012)	2012	100%AGR	25,00	295	11,80	97,50	193,88	7,76
Somna et al. (2012)	2012	100%AGR	21,60	295	13,66	97,50	158,68	7,35
Somna et al. (2012)	2012	100%AGR	19,40	295	15,21	97,50	123,36	6,36
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	100%AGR	55,46	535	9,64	97,50	440,15	7,94
Xiao, Lei e Zhang (2012)	2012	100%AGR	42,90	400	9,32	97,50	328,41	7,66
Xiao, Lei e Zhang (2012)	2012	100%AGR	40,00	400	10,00	97,50	328,41	8,21
Xiao, Lei e Zhang (2012)	2012	100%AGR	31,70	400	12,62	97,50	328,41	10,36
Xiao, Lei e Zhang (2012)	2012	100%AGR	26,80	400	14,93	97,50	328,41	12,25
Xiao, Lei e Zhang (2012)	2012	100%AGR	18,70	400	21,39	97,50	328,41	17,56
Xiao, Lei e Zhang (2012)	2012	100%AGR	27,00	200	7,41	97,50	164,20	6,08
Xiao, Lei e Zhang (2012)	2012	100%AGR	27,40	300	10,95	97,50	246,31	8,99
Xiao, Lei e Zhang (2012)	2012	100%AGR	31,40	500	15,92	97,50	410,51	13,07
Xiao, Lei e Zhang (2012)	2012	100%AGR	27,20	400	14,71	97,50	295,65	10,87
Xiao, Lei e Zhang (2012)	2012	100%AGR	32,00	400	12,50	97,50	298,43	9,33
Xiao, Lei e Zhang (2012)	2012	100%AGR	32,20	400	12,42	97,50	295,69	9,18
Somna, Jaturapitakkul e Amde (2012)	2012	100%AGR	24,80	295	11,90	97,50	242,20	9,77
Somna, Jaturapitakkul e Amde (2012)	2012	100%AGR	25,00	295	11,80	97,50	193,88	7,76
Somna, Jaturapitakkul e Amde (2012)	2012	100%AGR	22,00	295	13,41	97,50	157,84	7,17
Somna, Jaturapitakkul e Amde (2012)	2012	100%AGR	19,00	295	15,53	97,50	121,40	6,39
Zong-ping Chen (2010)	2010	100%AGR	48,40	524	10,83	97,50	437,37	9,04
Li, Xiao e Zhou (2009)	2009	100%AGR	43,60	500	11,47	97,50	416,36	9,55
Li, Xiao e Zhou (2009)	2009	100%AGR	45,80	500	10,92	97,50	337,81	7,38
Li, Xiao e Zhou (2009)	2009	100%AGR	43,80	500	11,42	97,50	337,86	7,71
Li, Xiao e Zhou (2009)	2009	100%AGR	46,20	500	10,82	97,50	337,92	7,31
Li, Xiao e Zhou (2009)	2009	100%AGR	47,60	500	10,50	97,50	341,34	7,17
Li, Xiao e Zhou (2009)	2009	100%AGR	47,20	500	10,59	97,50	344,76	7,30
Li, Xiao e Zhou (2009)	2009	100%AGR	42,00	500	11,90	97,50	341,28	8,13
Rao, Bhattacharyya e Barai (2010)	2010	100%AGR	44,52	401	9,01	97,50	335,72	7,54
Kou e Poon (2008)	2008	100%AGR	34,30	355	10,35	97,50	298,04	8,69
Etxeberria, Vazquez e Barra (2007)	2007	100%AGR	28,00	325	11,61	97,50	279,19	9,97
Fonseca, Brito e Evangelista (2011)	2011	100%AGR	51,20	446	8,71	87,00	329,99	6,45
Elhakam, Mohamed e Awad (2012)	2012	100%AGR	20,00	250	12,50	97,50	205,26	10,26
Elhakam, Mohamed e Awad (2012)	2012	100%AGR	33,60	400	11,90	97,50	328,41	9,77
Kanellopoulos, Nicolaidis e Petrou (2014)	2014	100%AGR	62,70	400	6,38	97,50	336,03	5,36
Kou e Poon (2013)	2013	100%AGR	38,10	410	10,76	97,50	336,22	8,82
Kou e Poon (2013)	2013	100%AGR	36,80	410	11,14	97,50	252,37	6,86
Kou e Poon (2013)	2013	100%AGR	32,20	410	12,73	97,50	218,83	6,80
Kou e Poon (2013)	2013	100%AGR	26,60	410	15,41	97,50	151,75	5,70
Matias et al. (2014)	2014	100%AGR	51,00	413	8,10	87,00	305,23	5,98
Pacheco et al. (2015)	2015	100%AGR	37,12	350	9,43	87,00	257,13	6,93
Pacheco et al. (2015)	2015	100%AGR	56,96	350	6,14	87,00	261,09	4,58
Arora e Singh (2016)	2016	100%AGR	31,70	491	15,49	97,50	282,58	8,91
Xiao, Sun e Falkner (2006)	2006	100%AGR	22,96	501	21,82	97,50	422,08	18,38
Sun, Xiao e Zhou (2008)	2008	100%AGR	22,96	501	21,82	97,50	420,61	18,32
Xiao, Li e Tawana (2012)	2012	100%AGR	30,36	486	15,99	97,50	398,61	13,13
Yang e Hang (2006)	2006	100%AGR	36,60	414	11,31	97,50	348,78	9,53
Xiao, Huang e Sun (2014)	2014	100%AGR	27,00	430	15,93	97,50	353,46	13,09
Poon e Lam (2004)	2004	100%AGR	32,60	379	11,63	97,50	324,47	9,95
Dapena et al. (2011)	2011	100%AGR	52,00	380	7,31	97,50	317,96	6,11
Xiao et al. (2013)	2013	100%AGR	34,80	307	8,82	97,50	201,92	5,80
Xiao et al. (2013)	2013	100%AGR	45,00	444	9,87	97,50	364,10	8,09
Li et al. (2012)	2012	100%AGR	45,50	444	9,76	97,50	364,53	8,01
Kong et al. (2010)	2010	100%AGR	25,70	420	16,34	97,50	280,62	10,92
Kong et al. (2010)	2010	100%AGR	29,70	420	14,14	97,50	286,46	9,64
Lee e Choi (2013)	2013	100%AGR	23,70	343	14,47	97,50	281,28	11,87
Salem e Burdette (1998)	1998	100%AGR	38,85	324	8,34	97,50	247,23	6,36
Salem e Burdette (1998)	1998	100%AGR	35,52	335	9,44	97,50	247,25	6,96
Salem e Burdette (1998)	1998	100%AGR	29,91	324	10,83	97,50	247,23	8,27
Oliveira e Vazquez (1996)	1996	100%AGR	35,42	339	9,57	97,50	301,79	8,52
Oliveira e Vazquez (1996)	1996	100%AGR	36,50	339	9,29	97,50	301,79	8,27
Oliveira e Vazquez (1996)	1996	100%AGR	34,36	339	9,87	97,50	301,79	8,78
Oliveira e Vazquez (1996)	1996	100%AGR	39,75	339	8,53	97,50	301,79	7,59

Estudo	Ano	Teor de AR	fc (MPa)	CC (Kg/m ³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Tavakoli e Soroushian (1996)	1996	100%AGR	37,92	314	8,28	97,50	279,54	7,37
Tavakoli e Soroushian (1996)	1996	100%AGR	33,78	314	9,30	97,50	279,54	8,28
Tavakoli e Soroushian (1996)	1996	100%AGR	36,54	314	8,59	97,50	279,54	7,65
Tavakoli e Soroushian (1996)	1996	100%AGR	35,50	314	8,85	97,50	279,54	7,87
Tavakoli e Soroushian (1996)	1996	100%AGR	55,15	415	7,52	97,50	369,45	6,70
Tavakoli e Soroushian (1996)	1996	100%AGR	42,51	415	9,76	97,50	369,45	8,69
Tavakoli e Soroushian (1996)	1996	100%AGR	55,84	415	7,43	97,50	369,45	6,62
Tavakoli e Soroushian (1996)	1996	100%AGR	34,47	415	12,04	97,50	369,45	10,72
Tavakoli e Soroushian (1996)	1996	100%AGR	55,50	400	7,21	97,50	356,10	6,42
Tavakoli e Soroushian (1996)	1996	100%AGR	45,50	400	8,79	97,50	356,10	7,83
Tavakoli e Soroushian (1996)	1996	100%AGR	55,15	400	7,25	97,50	356,10	6,46
Tavakoli e Soroushian (1996)	1996	100%AGR	43,15	400	9,27	97,50	356,10	8,25
Tavakoli e Soroushian (1996)	1996	100%AGR	31,71	303	9,56	97,50	269,75	8,51
Tavakoli e Soroushian (1996)	1996	100%AGR	33,78	303	8,97	97,50	269,75	7,99
Tavakoli e Soroushian (1996)	1996	100%AGR	34,47	303	8,79	97,50	269,75	7,83
Tavakoli e Soroushian (1996)	1996	100%AGR	30,30	303	10,00	97,50	269,75	8,90
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	100%AGR	42,00	400	9,52	97,50	337,38	8,03
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	100%AGR	39,50	400	10,13	97,50	316,34	8,01
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	100%AGR	38,40	400	10,42	97,50	307,93	8,02
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	100%AGR	38,10	410	10,76	97,50	345,81	9,08
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	100%AGR	36,80	410	11,14	97,50	324,78	8,83
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	100%AGR	25,20	410	16,27	97,50	316,36	12,55
Xiao, Li e Zang (2005)	2005	100%AGR	23,80	430	18,07	97,50	363,10	15,26
Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor (2001)	2001	100%AGR	27,50	240	8,73	97,50	205,47	7,47
Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor (2001)	2001	100%AGR	32,00	238	7,44	97,50	203,76	6,37
Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor (2001)	2001	100%AGR	33,00	254	7,70	97,50	217,46	6,59
Wang et al. (2019)	2019	100%AGR	48,24	400	8,29	97,50	328,33	6,81
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	100%AGR	30,10	460	15,28	97,50	250,07	8,31
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	100%AGR	34,00	460	13,53	97,50	250,07	7,35
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	100%AGR	35,40	460	12,99	97,50	250,07	7,06
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	100%AGR	30,00	460	15,33	97,50	250,07	8,34
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	100%AGR	32,00	460	14,38	97,50	250,08	7,81
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	100%AGR	33,50	460	13,73	97,50	250,08	7,47
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	100%AGR	35,40	460	12,99	97,50	250,08	7,06
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	100%AGR	33,28	340	10,22	97,50	278,82	8,38
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	100%AGR	46,64	340	7,29	97,50	278,82	5,98
Domingo-Cabo et al. (2009)	2009	100%AGR	54,80	380	6,93	97,50	322,45	5,88
Domingo-Cabo et al. (2009)	2009	100%AGR	54,10	380	7,02	97,50	322,45	5,96
Etxeberria, Vazquez e Mari (2006)	2006	100%AGR	40,00	325	8,13	97,50	280,78	7,02
Abdulla (2015)	2015	100%AGR	29,50	353	11,97	97,50	290,51	9,85
Abdulla (2015)	2015	100%AGR	31,20	353	11,31	97,50	290,51	9,31
Boudali et al. (2017)	2017	100%AGR	40,00	490	12,25	72,00	211,65	5,29
Boudali et al. (2017)	2017	100%AGR	42,00	490	11,67	72,00	211,78	5,04
Chen, Yen e Chen (2003)	2003	100%AGR	38,00	520	13,68	97,50	445,18	11,72
Chen, Yen e Chen (2003)	2003	100%AGR	31,00	430	13,87	97,50	368,13	11,88
Chen, Yen e Chen (2003)	2003	100%AGR	27,00	339	12,56	97,50	290,23	10,75
Chen, Yen e Chen (2003)	2003	100%AGR	21,50	294	13,67	97,50	251,70	11,71
Chen, Yen e Chen (2003)	2003	100%AGR	18,00	249	13,83	97,50	213,17	11,84
Chen, Yen e Chen (2003)	2003	100%AGR	32,00	520	16,25	97,50	445,18	13,91
Chen, Yen e Chen (2003)	2003	100%AGR	28,00	430	15,36	97,50	368,13	13,15
Chen, Yen e Chen (2003)	2003	100%AGR	22,00	339	15,41	97,50	290,23	13,19
Chen, Yen e Chen (2003)	2003	100%AGR	19,00	294	15,47	97,50	251,70	13,25
Chen, Yen e Chen (2003)	2003	100%AGR	14,00	249	17,79	97,50	213,17	15,23
Chen, Yen e Chen (2003)	2003	100%AGR	32,00	520	16,25	97,50	445,18	13,91
Chen, Yen e Chen (2003)	2003	100%AGR	28,00	430	15,36	97,50	368,13	13,15
Chen, Yen e Chen (2003)	2003	100%AGR	21,00	339	16,14	97,50	290,23	13,82
Chen, Yen e Chen (2003)	2003	100%AGR	19,00	294	15,47	97,50	251,70	13,25
Chen, Yen e Chen (2003)	2003	100%AGR	14,00	249	17,79	97,50	213,17	15,23
Wang et al. (2017)	2017	100%AGR	42,00	467	11,12	97,50	381,60	9,09
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	100%AGR	30,48	340	11,15	97,50	278,82	9,15
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	100%AGR	25,20	340	13,49	97,50	278,82	11,06
Wang et al. (2017)	2017	100%AGR	47,00	467	9,94	97,50	381,60	8,12
Wang et al. (2017)	2017	100%AGR	49,80	467	9,38	97,50	381,60	7,66
Wang et al. (2017)	2017	100%AGR	47,90	467	9,75	97,50	381,60	7,97
Wang et al. (2017)	2017	100%AGR	47,00	467	9,94	97,50	381,60	8,12
Wang et al. (2017)	2017	100%AGR	53,00	467	8,81	97,50	381,60	7,20
Wang et al. (2017)	2017	100%AGR	53,00	467	8,81	97,50	381,60	7,20

Estudo	Ano	Teor de AR	fc (MPa)	CC (Kg/m ³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Abdulla (2015)	2015	100%AGR	28,90	353	12,21	97,50	290,51	10,05
Abdulla (2015)	2015	100%AGR	27,00	353	13,07	97,50	290,51	10,76
Abdulla (2015)	2015	100%AGR	20,50	353	17,22	97,50	290,51	14,17
Wang et al. (2017)	2017	100%AGR	41,00	467	11,39	97,50	381,60	9,31
Wang et al. (2017)	2017	100%AGR	41,50	467	11,25	97,50	381,60	9,20
Wang et al. (2017)	2017	100%AGR	48,00	467	9,73	97,50	381,60	7,95
Wang et al. (2017)	2017	100%AGR	55,00	467	8,49	97,50	381,60	6,94
Ismail e Ramli (2014)	2014	100%AGR	47,30	510	10,78	97,50	419,22	8,86
Ismail e Ramli (2014)	2014	100%AGR	52,80	510	9,66	97,50	420,37	7,96
Murkharjee e Barai (2014)	2014	100%AGR	35,00	450	12,86	97,50	369,90	10,57
Murkharjee e Barai (2014)	2014	100%AGR	38,00	450	11,84	97,50	367,14	9,66
Murkharjee e Barai (2014)	2014	100%AGR	39,00	450	11,54	97,50	364,37	9,34
Murkharjee e Barai (2014)	2014	100%AGR	40,50	450	11,11	97,50	358,84	8,86
Zhang et al. (2016)	2016	100%AGR	35,46	347	9,79	97,50	290,67	8,20
Zhang et al. (2016)	2016	100%AGR	36,67	347	9,46	97,50	290,67	7,93
Zhang et al. (2016)	2016	100%AGR	40,52	347	8,56	97,50	290,67	7,17
Kou e Poon (2010)	2010	100%AGR	49,80	380	7,63	97,50	317,18	6,37
Kou e Poon (2010)	2010	100%AGR	50,00	380	7,60	97,50	317,18	6,34
Kou e Poon (2010)	2010	100%AGR	52,00	380	7,31	97,50	317,18	6,10
Zhu et al. (2013)	2013	100%AGR	30,00	380	12,67	97,50	311,62	10,39
Zhu et al. (2013)	2013	100%AGR	19,00	380	20,00	97,50	311,62	16,40
Zhu et al. (2013)	2013	100%AGR	25,50	380	14,90	97,50	311,62	12,22
Sahoo et al. (2016)	2016	100%AGR	38,22	372	9,73	97,50	306,15	8,01
Sahoo et al. (2016)	2016	100%AGR	41,02	372	9,07	97,50	306,15	7,46
Sahoo et al. (2016)	2016	100%AGR	43,13	372	8,63	97,50	306,15	7,10
Shaikh et al. (2017)	2017	100%AGR	34,00	430	12,65	97,50	351,36	10,33
Shaikh et al. (2017)	2017	100%AGR	41,80	439	10,49	97,50	361,30	8,64
Shaikh et al. (2017)	2017	100%AGR	44,00	439	9,97	97,50	361,30	8,21
Sahoo et al. (2016)	2016	100%AGR	46,22	372	8,05	97,50	306,15	6,62
Sahoo et al. (2016)	2016	100%AGR	44,60	372	8,34	97,50	306,15	6,86
Zeng et al. (2019)	2019	100%AGR	49,30	350	7,10	97,50	285,31	5,79
Zeng et al. (2019)	2019	100%AGR	52,40	350	6,68	97,50	285,31	5,44
Pedro et al. (2019)	2019	100%AGR	18,88	210	11,12	97,50	171,19	9,07
Pedro et al. (2019)	2019	100%AGR	53,20	350	6,58	97,50	289,27	5,44
Li et al. (2017)	2017	100%AGR	27,09	409	15,10	97,50	334,20	12,34
Li et al. (2017)	2017	100%AGR	29,30	409	13,96	97,50	334,20	11,40
Matias et al. (2013)	2013	100%AGR	51,00	413	8,10	87,00	302,18	5,93
Matias et al. (2013)	2013	100%AGR	49,00	413	8,43	87,00	302,18	6,17
Matias et al. (2013)	2013	100%AGR	48,00	413	8,60	87,00	302,18	6,30
Akbarnezhad et al. (2011)	2011	100%AGR	41,50	375	9,04	97,50	313,07	7,54
Akbarnezhad et al. (2011)	2011	100%AGR	55,00	375	6,82	97,50	313,07	5,69
Katz (2003)	2003	100%AGR	29,10	296	10,17	97,50	253,41	8,71
Katz (2003)	2003	100%AGR	26,80	298	11,12	97,50	255,12	9,52
Casuccio et al. (2008)	2008	100%AGR	18,00	264	14,67	97,50	221,64	12,31
Casuccio et al. (2008)	2008	100%AGR	15,40	262	17,01	97,50	219,96	14,28
Casuccio et al. (2008)	2008	100%AGR	36,40	427	11,73	97,50	363,22	9,98
Casuccio et al. (2008)	2008	100%AGR	35,70	423	11,85	97,50	359,77	10,08
Casuccio et al. (2008)	2008	100%AGR	44,40	443	9,98	97,50	376,32	8,48
Casuccio et al. (2008)	2008	100%AGR	43,80	442	10,09	97,50	375,38	8,57
Yang , Chung e Ashou (2008)	2008	100%AGR	36,00	350	9,72	97,50	295,74	8,22
Yang , Chung e Ashou (2008)	2008	100%AGR	29,50	350	11,86	97,50	295,74	10,03
Ryu (2002)	2002	100%AGR	72,00	620	8,61	97,50	477,91	6,64
Tabsh e Abdelfatah (2009)	2009	100%AGR	36,00	318	8,83	97,50	264,81	7,36
Tabsh e Abdelfatah (2009)	2009	100%AGR	25,00	318	12,72	97,50	264,81	10,59
Tabsh e Abdelfatah (2009)	2009	100%AGR	22,50	318	14,13	97,50	264,81	11,77
Tabsh e Abdelfatah (2009)	2009	100%AGR	49,80	505	10,14	97,50	420,53	8,44
Tabsh e Abdelfatah (2009)	2009	100%AGR	48,00	505	10,52	97,50	420,53	8,76
Tabsh e Abdelfatah (2009)	2009	100%AGR	47,50	505	10,63	97,50	420,53	8,85
Ridzuan et al. (2001)	2001	100%AGR	38,00	320	8,42	97,50	273,96	7,21
Ridzuan et al. (2001)	2001	100%AGR	45,00	355	7,89	97,50	303,92	6,75
Ridzuan et al. (2001)	2001	100%AGR	48,00	375	7,81	97,50	321,05	6,69
Yang, Du e Bao (2011)	2011	100%AGR	41,24	435	10,55	97,50	360,54	8,74
Otsuki, Miyazato e Yodsudjai (2003)	2003	100%AGR	44,00	425	9,66	97,50	366,32	8,33
Otsuki, Miyazato e Yodsudjai (2003)	2003	100%AGR	30,00	318	10,60	97,50	273,74	9,12
Otsuki, Miyazato e Yodsudjai (2003)	2003	100%AGR	24,00	257	10,71	97,50	221,39	9,22
Butler, West e Tighe (2013)	2013	100%AGR	38,60	281	7,28	97,50	230,43	5,97
Butler, West e Tighe (2013)	2013	100%AGR	38,10	293	7,69	97,50	240,27	6,31

Estudo	Ano	Teor de AR	fc (MPa)	CC (Kg/m ³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Butler, West e Tighe (2013)	2013	100%AGR	39,30	337	8,58	97,50	276,36	7,03
Butler, West e Tighe (2013)	2013	100%AGR	60,10	463	7,70	97,50	379,68	6,32
Butler, West e Tighe (2013)	2013	100%AGR	60,20	500	8,31	97,50	410,53	6,82
Butler, West e Tighe (2013)	2013	100%AGR	62,80	600	9,55	97,50	492,82	7,85
Kou, Poon e Exteberria (2011)	2011	100%AGR	34,30	355	10,35	97,50	294,23	8,58
Kou, Poon e Exteberria (2011)	2011	100%AGR	35,60	355	9,97	97,50	294,23	8,26
Yang, Du e Bao (2011)	2011	100%AGR	39,04	435	11,14	97,50	360,54	9,24
Yang, Du e Bao (2011)	2011	100%AGR	35,08	435	12,40	97,50	360,54	10,28
Belén et al. (2011)	2011	100%AGR	31,71	275	8,67	97,50	230,10	7,26
Belén et al. (2011)	2011	100%AGR	32,35	275	8,50	97,50	230,10	7,11
Belén et al. (2011)	2011	100%AGR	30,13	275	9,13	97,50	230,10	7,64
Belén et al. (2011)	2011	100%AGR	43,74	380	8,69	97,50	317,96	7,27
Belén et al. (2011)	2011	100%AGR	37,45	380	10,15	97,50	317,96	8,49
Belén et al. (2011)	2011	100%AGR	40,54	380	9,37	97,50	317,96	7,84
Ann et al. (2008)	2008	100%AGR	21,50	350	16,28	97,50	293,84	13,67
Ann et al. (2008)	2008	100%AGR	21,00	350	16,67	97,50	205,90	9,80
Ann et al. (2008)	2008	100%AGR	19,50	350	17,95	97,50	119,11	6,11
Katz (2004)	2004	100%AGR	38,24	365	9,54	97,50	312,48	8,17
Katz (2004)	2004	100%AGR	39,44	365	9,25	97,50	312,48	7,92
Katz (2004)	2004	100%AGR	41,04	365	8,89	97,50	312,48	7,61
Katz (2004)	2004	100%AGR	32,96	333	10,10	97,50	285,09	8,65
Katz (2004)	2004	100%AGR	32,64	333	10,20	97,50	285,09	8,73
Abbas et al. (2009)	2009	100%AGR	41,80	349	8,35	97,50	290,62	6,95
Abbas et al. (2009)	2009	100%AGR	34,00	349	10,26	97,50	218,35	6,42
Abbas et al. (2009)	2009	100%AGR	42,00	349	8,31	97,50	197,75	4,71
Abbas et al. (2009)	2009	100%AGR	39,70	349	8,79	97,50	290,62	7,32
Abbas et al. (2009)	2009	100%AGR	35,00	349	9,97	97,50	218,35	6,24
Abbas et al. (2009)	2009	100%AGR	39,30	349	8,88	97,50	197,75	5,03
Zaharieva, Buyle-Bodin e Wirquin (2004)	2004	100%AGR	37,80	400	10,58	97,50	346,97	9,18
Bui e Takahashi (2017)	2017	100%AGR	35,00	453	12,93	97,50	369,75	10,56
Talamona e Hai Tan (2012)	2012	100%AGR	40,56	400	9,86	97,50	329,03	8,11
Limbachiya e Dhir (2000)	2000	100%AGR	38,40	370	9,64	97,50	319,27	8,31
Limbachiya e Dhir (2000)	2000	100%AGR	48,80	460	9,43	97,50	396,94	8,13
Limbachiya e Dhir (2000)	2000	100%AGR	55,20	560	10,14	97,50	483,86	8,77
Duan et al. (2020)	2020	100%AGR	27,88	554	19,85	97,50	352,81	12,65
Duan et al. (2020)	2020	100%AGR	27,54	492	17,86	97,50	352,51	12,80
Bairagi, Vidyadhara e Ravande (1990)	1990	100%AGR	16,96	390	23,00	97,50	347,20	20,47
Bairagi, Vidyadhara e Ravande (1990)	1990	100%AGR	17,68	390	22,06	97,50	347,20	19,64
Bairagi, Vidyadhara e Ravande (1990)	1990	100%AGR	16,40	390	23,78	97,50	347,20	21,17
Bairagi, Vidyadhara e Ravande (1990)	1990	100%AGR	22,56	480	21,28	97,50	427,32	18,94
Kou, Poon e Wan (2012)	2012	100%AGR	27,90	410	14,70	97,50	336,62	12,07
Kou, Poon e Wan (2012)	2012	100%AGR	32,30	410	12,69	97,50	336,62	10,42
Kou, Poon e Wan (2012)	2012	100%AGR	38,10	410	10,76	97,50	336,62	8,84
Bairagi, Vidyadhara e Ravande (1990)	1990	100%AGR	23,36	480	20,55	97,50	427,32	18,29
Bairagi, Vidyadhara e Ravande (1990)	1990	100%AGR	23,04	480	20,83	97,50	427,32	18,55
Bairagi, Vidyadhara e Ravande (1990)	1990	100%AGR	28,08	530	18,87	97,50	471,83	16,80
Bairagi, Vidyadhara e Ravande (1990)	1990	100%AGR	29,12	530	18,20	97,50	471,83	16,20
Bairagi, Vidyadhara e Ravande (1990)	1990	100%AGR	26,32	530	20,14	97,50	471,83	17,93
Bairagi, Vidyadhara e Ravande (1990)	1990	100%AGR	32,48	680	20,94	97,50	605,37	18,64
Bairagi, Vidyadhara e Ravande (1990)	1990	100%AGR	32,00	680	21,25	97,50	605,37	18,92
Larbi e Steijaert (1994)	1994	100%AGR	30,00	330	11,00	97,50	293,78	9,79
Bairagi, Vidyadhara e Ravande (1990)	1990	100%AGR	34,08	680	19,95	97,50	605,37	17,76
Xie et al. (2020)	2020	100%AGR	28,88	373	12,92	97,50	304,06	10,53
Xie et al. (2020)	2020	100%AGR	34,32	373	10,87	97,50	299,74	8,73
Xie et al. (2020)	2020	100%AGR	35,84	373	10,41	97,50	296,88	8,28
Xie et al. (2020)	2020	100%AGR	36,72	373	10,16	97,50	294,01	8,01
Zhi-hai et al. (2020)	2020	100%AGR	27,20	400	14,71	97,50	282,76	10,40
Zhi-hai et al. (2020)	2020	100%AGR	28,40	400	14,08	97,50	291,03	10,25
Zhi-hai et al. (2020)	2020	100%AGR	33,60	400	11,90	97,50	282,44	8,41
Zhi-hai et al. (2020)	2020	100%AGR	36,00	400	11,11	97,50	290,76	8,08
Bahrami et al. (2020)	2020	100%AGR	25,83	500	19,36	97,50	330,66	12,80
Ryu (2002)	2002	100%AGR	99,00	620	6,26	97,50	477,91	4,83
Ryu (2002)	2002	100%AGR	84,00	620	7,38	97,50	477,91	5,69
Otsuki, Miyazato e Yodsudjai (2003)	2003	100%AGR	87,00	620	7,13	97,50	479,31	5,51
Limbacyia, Meddah e Ouchagour (2011)	2011	100%AGR	29,00	350	12,07	97,50	203,27	7,01
Babu et al. (2015)	2015	100%AGR	28,39	535	18,84	97,50	420,17	14,80
Babu et al. (2015)	2015	100%AGR	43,80	535	12,21	97,50	420,17	9,59

Estudo	Ano	Teor de AR	fc (MPa)	CC (Kg/m³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Babu et al. (2015)	2015	100%AGR	49,84	535	10,73	97,50	420,17	8,43
Babu et al. (2015)	2015	100%AGR	51,14	535	10,46	97,50	420,17	8,22
Média			38,52	411	11,34	94,55	313,35	8,69
Mediana			38,00	400	10,56	97,50	305,23	8,09
Máximo			99,00	680	23,78	97,50	605,37	21,17
Mínimo			12,00	180	6,05	27,00	84,02	2,42

Fonte: Adaptado de Machado (2020)

Tabela 29 – Valores mínimos, médios e máximos dos indicadores obtidos por Machado (2020) para concretos com 20 a 30% de agregados graúdos reciclados (AGR)

Estudo	Ano	Teor de RA	fc (MPa)	CC (Kg/m³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Campos (2017)	2017	20%AGR	46,78	487	10,40	75,00	329,19	7,04
Santos (2016)	2016	20%AGR	44,20	490	11,09	85,00	353,91	8,01
Santos (2016)	2016	20%AGR	37,60	372	9,89	85,00	268,68	7,15
Santos (2016)	2016	20%AGR	26,50	297	11,21	85,00	214,51	8,09
Amario (2015)	2015	20%AGR	25,23	266	10,56	97,50	227,37	9,01
Amario (2015)	2015	20%AGR	45,78	392	8,55	97,50	339,45	7,41
Amario (2015)	2015	20%AGR	63,88	547	8,57	97,50	484,34	7,58
Thomas et al. (2013)	2012	20%AGR	51,00	380	7,45	97,50	311,99	6,12
Kou e Poon (2012)	2012	20%AGR	41,00	410	10,00	97,50	219,09	5,34
Kou e Poon (2012)	2012	20%AGR	45,30	410	9,05	97,50	336,62	7,43
Kou e Poon (2012)	2012	20%AGR	42,80	410	9,58	97,50	252,67	5,90
López-Uceda et al. (2016)	2016	20%AGR	19,60	180	9,18	87,00	140,50	7,17
Lotfi et al. (2015)	2015	20%AGR	34,70	300	8,65	27,00	84,02	2,42
López-Uceda et al. (2016)	2016	20%AGR	24,80	200	8,06	87,00	164,34	6,63
Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014)	2014	20%AGR	37,70	612	16,23	97,50	297,71	7,90
Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014)	2014	20%AGR	44,00	607	13,80	97,50	282,98	6,43
Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014)	2010	20%AGR	54,70	601	10,99	97,50	275,94	5,04
Zong-ping Chen (2010)	2010	20%AGR	44,70	524	11,72	97,50	437,37	9,78
Kou e Poon (2008)	2008	20%AGR	41,20	355	8,62	97,50	298,04	7,23
Fonseca, Brito e Evangelista (2011)	2011	20%AGR	48,80	446	9,14	87,00	329,99	6,76
Batayneh e Asi (2007)	2007	20%AGR	29,80	446	14,97	97,50	376,18	12,62
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	20%AGR	62,40	400	6,41	97,50	337,38	5,41
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	20%AGR	49,70	400	8,05	97,50	316,34	6,37
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	20%AGR	43,60	400	9,17	97,50	307,93	7,06
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	20%AGR	35,20	460	13,07	97,50	250,07	7,10
Dapena et al. (2011)	2011	20%AGR	51,10	380	7,44	97,50	317,96	6,22
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	20%AGR	45,30	410	9,05	97,50	345,81	7,63
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	20%AGR	42,80	410	9,58	97,50	324,78	7,59
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	20%AGR	41,00	410	10,00	97,50	316,36	7,72
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	20%AGR	37,10	460	12,40	97,50	250,07	6,74
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	20%AGR	38,10	460	12,07	97,50	250,07	6,56
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	20%AGR	40,00	340	8,50	97,50	278,82	6,97
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	20%AGR	42,56	340	7,99	97,50	278,82	6,55
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	20%AGR	38,40	340	8,85	97,50	278,82	7,26
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	20%AGR	32,00	340	10,63	97,50	278,82	8,71
Domingo-Cabo et al. (2009)	2009	20%AGR	47,40	380	8,02	97,50	319,44	6,74
Domingo-Cabo et al. (2009)	2009	20%AGR	47,70	380	7,97	97,50	319,44	6,70
Akbarnezhad et al. (2011)	2011	20%AGR	62,00	375	6,05	97,50	313,07	5,05
Akbarnezhad et al. (2011)	2011	20%AGR	54,00	375	6,94	97,50	313,07	5,80
Babu et al. (2015)	2015	20%AGR	43,48	535	12,30	65,00	283,51	6,52
Kou, Poon e Wan (2012)	2012	20%AGR	39,40	410	10,41	97,50	336,62	8,54
Kou, Poon e Wan (2012)	2012	20%AGR	39,70	410	10,33	97,50	336,62	8,48
Kou, Poon e Wan (2012)	2012	20%AGR	45,30	410	9,05	97,50	336,62	7,43
Talamona e Hai Tan (2012)	2012	20%AGR	44,56	400	8,98	97,50	329,03	7,38
Babu et al. (2015)	2015	20%AGR	64,41	535	8,31	65,00	283,51	4,40
Babu et al. (2015)	2015	20%AGR	66,12	535	8,09	65,00	283,51	4,29
Babu et al. (2015)	2015	20%AGR	59,84	535	8,94	65,00	283,51	4,74
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	22,90	260	11,35	92,00	186,47	8,14
Fedumenti (2013)	2013	25%AGR	23,90	260	10,88	92,00	186,47	7,80

Estudo	Ano	Teor de RA	fc (MPa)	CC (Kg/m ³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Bazuco (1999)	1999	25%AGR	36,73	465	12,65	97,00	411,46	11,20
Bazuco (1999)	1999	25%AGR	26,58	346	13,01	97,00	306,32	11,52
Bazuco (1999)	1999	25%AGR	19,29	275	14,24	97,00	243,30	12,61
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	51,30	382	7,45	92,00	273,52	5,33
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	35,20	309	8,78	92,00	221,71	6,30
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	37,50	437	11,65	92,00	338,22	9,02
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	31,60	354	11,20	92,00	273,98	8,67
Pedrozo (2008)	2008	25%AGR	24,23	378	15,60	92,00	299,59	12,36
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	20,40	298	14,61	92,00	230,64	11,31
Fedumenti (2013)	2013	25%AGR	49,83	382	7,67	92,00	273,52	5,49
Fedumenti (2013)	2013	25%AGR	33,97	309	9,10	92,00	221,71	6,53
Fedumenti (2013)	2013	25%AGR	39,00	437	11,21	92,00	338,22	8,67
Fedumenti (2013)	2013	25%AGR	28,43	354	12,45	92,00	273,98	9,64
Fedumenti (2013)	2013	25%AGR	18,00	298	16,56	92,00	230,64	12,81
Rao, Bhattacharyya e Barai (2011)	2011	25%AGR	45,75	401	8,77	97,50	332,58	7,27
Rao, Bhattacharyya e Barai (2010)	2010	25%AGR	50,44	401	7,95	97,50	334,93	6,64
Etxeberria, Vazquez e Barra (2007)	2007	25%AGR	28,00	300	10,71	97,50	255,71	9,13
Elhakam, Mohamed e Awad (2012)	2012	25%AGR	27,00	250	9,26	97,50	205,26	7,60
Elhakam, Mohamed e Awad (2012)	2012	25%AGR	38,00	400	10,53	97,50	328,41	8,64
Pacheco et al. (2015)	2015	25%AGR	35,68	350	9,81	87,00	257,13	7,21
Mas e Olmo (2012)	2012	25%AGR	14,71	315	21,41	97,50	258,62	17,58
Yang e Hang (2006)	2006	25%AGR	41,80	414	9,90	97,50	348,78	8,34
Yang e Ma (2013)	2013	25%AGR	53,00	473	8,92	97,50	391,09	7,38
Etxeberria, Vazquez e Mari (2006)	2006	25%AGR	42,00	300	7,14	97,50	258,37	6,15
Matias et al. (2013)	2013	25%AGR	52,00	413	7,94	87,00	304,58	5,86
Matias et al. (2013)	2013	25%AGR	50,00	413	8,26	87,00	304,44	6,09
Matias et al. (2013)	2013	25%AGR	49,00	413	8,43	87,00	304,30	6,21
Duan et al. (2020)	2020	25%AGR	32,20	554	17,19	97,50	352,81	10,96
Duan et al. (2020)	2020	25%AGR	32,58	492	15,10	97,50	352,51	10,82
Bahrami et al. (2020)	2020	25%AGR	37,00	500	13,51	97,50	330,66	8,94
Gómez-Soberon (2002)	2002	30%AGR	37,00	400	10,81	97,50	342,45	9,26
Limbacyia, Meddah e Ouchagour (2011)	2011	30%AGR	25,00	275	11,00	97,50	227,93	9,12
Corinaldesi (2010)	2010	30%AGR	46,10	350	7,59	87,00	265,53	5,76
Corinaldesi (2010)	2010	30%AGR	45,80	340	7,42	87,00	257,18	5,62
Corinaldesi (2010)	2010	30%AGR	39,90	330	8,27	87,00	248,87	6,24
Corinaldesi (2010)	2010	30%AGR	36,30	320	8,82	87,00	240,60	6,63
Corinaldesi (2010)	2010	30%AGR	34,70	310	8,93	87,00	232,38	6,70
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	56,21	400	7,12	97,50	329,19	5,86
Kuster Junior (2018)	2018	30%AGR	49,35	483	9,79	97,50	354,28	7,18
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	53,73	400	7,44	97,50	329,19	6,13
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	52,40	400	7,63	97,50	329,19	6,28
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	37,22	397	10,66	97,50	326,45	8,77
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	34,02	393	11,56	97,50	323,75	9,52
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	32,30	390	12,08	97,50	321,09	9,94
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	74,01	535	7,23	97,50	440,15	5,95
Xiao, Lei e Zhang (2012)	2012	30%AGR	33,60	400	11,90	97,50	328,41	9,77
Zong-ping Chen (2010)	2010	30%AGR	47,20	524	11,10	97,50	437,37	9,27
Huda e Alan (2015)	2015	30%AGR	35,60	350	9,83	97,50	233,06	6,55
Kwan et al. (2011)	2012	30%AGR	37,00	328	8,86	97,50	269,30	7,28
Kanellopoulos, Nicolaidis e Petrou (2014)	2014	30%AGR	60,70	400	6,59	97,50	336,03	5,54
Xiao, Sun e Falkner (2006)	2006	30%AGR	27,52	474	17,22	97,50	399,33	14,51
Xiao, Huang e Sun (2014)	2014	30%AGR	25,00	400	16,00	97,50	328,80	13,15
Xiao, Li e Zang (2005)	2005	30%AGR	25,40	430	16,93	97,50	363,10	14,30
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	44,89	537	11,96	97,50	440,37	9,81
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	55,99	537	9,59	97,50	440,37	7,87
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	53,50	537	10,04	97,50	440,37	8,23
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	48,86	537	10,99	97,50	440,37	9,01
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	50,16	537	10,71	97,50	440,37	8,78
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	46,92	537	11,45	97,50	440,37	9,39
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	55,93	537	9,60	97,50	440,37	7,87
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	49,94	537	10,75	97,50	440,37	8,82
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	53,66	537	10,01	97,50	440,37	8,21
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	49,91	537	10,76	97,50	440,37	8,82
Yang , Chung e Ashou (2008)	2008	30%AGR	36,70	350	9,54	97,50	295,74	8,06
Yang , Chung e Ashou (2008)	2008	30%AGR	32,60	350	10,74	97,50	295,74	9,07

Estudo	Ano	Teor de RA	fc (MPa)	CC (Kg/m ³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	31,92	320	10,01	97,50	268,38	8,41
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	39,97	361	9,03	97,50	303,16	7,58
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	41,11	415	10,09	97,50	348,33	8,47
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	49,55	464	9,37	97,50	389,79	7,87
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	37,64	320	8,49	97,50	268,38	7,13
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	44,99	361	8,03	97,50	303,16	6,74
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	47,47	415	8,74	97,50	348,33	7,34
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	55,95	464	8,30	97,50	389,79	6,97
Babu et al. (2015)	2015	30%AGR	40,78	535	13,12	65,00	283,51	6,95
Babu et al. (2015)	2015	30%AGR	57,94	535	9,23	65,00	283,51	4,89
Babu et al. (2015)	2015	30%AGR	62,67	535	8,54	65,00	283,51	4,52
Bui e Takahashi (2017)	2017	30%AGR	56,00	453	8,08	97,50	369,75	6,60
Bui e Takahashi (2017)	2017	30%AGR	50,50	453	8,96	97,50	369,75	7,32
Ali e Hamid (2015)	2015	30%AGR	22,00	368	16,75	97,50	303,18	13,78
Ali e Hamid (2015)	2015	30%AGR	27,04	396	14,64	97,50	325,76	12,05
Ali e Hamid (2015)	2015	30%AGR	33,11	395	11,92	97,50	324,86	9,81
Limbachiya e Dhir (2000)	2000	30%AGR	35,20	370	10,51	97,50	319,27	9,07
Limbachiya e Dhir (2000)	2000	30%AGR	44,80	460	10,27	97,50	396,94	8,86
Limbachiya e Dhir (2000)	2000	30%AGR	52,00	560	10,77	97,50	483,86	9,30
Xie et al. (2020)	2020	30%AGR	36,16	373	10,32	97,50	304,06	8,41
Xie et al. (2020)	2020	30%AGR	39,20	373	9,52	97,50	299,74	7,65
Xie et al. (2020)	2020	30%AGR	42,32	373	8,81	97,50	296,88	7,02
Xie et al. (2020)	2020	30%AGR	41,20	373	9,05	97,50	294,01	7,14
Babu et al. (2015)	2015	30%AGR	64,61	535	8,28	65,00	283,51	4,39
Limbacyia, Meddah e Ouchagour (2011)	2011	30%AGR	29,80	305	10,23	97,50	178,38	5,99
Média			41,73	411	10,30	93,26	312,25	7,88
Mediana			41,20	400	9,81	97,50	311,99	7,41
Máximo			74,01	612	21,41	97,50	484,34	17,58
Mínimo			14,71	180	6,05	27,00	84,02	2,42

Fonte: Adaptado de Machado (2020)

Tabela 30 – Valores mínimos, médios e máximos dos indicadores obtidos por Machado (2020) para concretos com 20 a 30% de AGR e resistência de 20 a 50 ± 3 MPa

Estudo	Ano	Teor de RA	fc (MPa)	CC (Kg/m ³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Campos (2017)	2017	20%AGR	46,78	487	10,40	75,00	329,19	7,04
Santos (2016)	2016	20%AGR	44,20	490	11,09	85,00	353,91	8,01
Santos (2016)	2016	20%AGR	37,60	372	9,89	85,00	268,68	7,15
Santos (2016)	2016	20%AGR	26,50	297	11,21	85,00	214,51	8,09
Amario (2015)	2015	20%AGR	25,23	266	10,56	97,50	227,37	9,01
Amario (2015)	2015	20%AGR	45,78	392	8,55	97,50	339,45	7,41
Thomas et al. (2013)	2012	20%AGR	51,00	380	7,45	97,50	311,99	6,12
Kou e Poon (2012)	2012	20%AGR	41,00	410	10,00	97,50	219,09	5,34
Kou e Poon (2012)	2012	20%AGR	45,30	410	9,05	97,50	336,62	7,43
Kou e Poon (2012)	2012	20%AGR	42,80	410	9,58	97,50	252,67	5,90
López-Uceda et al. (2016)	2016	20%AGR	19,60	180	9,18	87,00	140,50	7,17
Lofii et al. (2015)	2015	20%AGR	34,70	300	8,65	27,00	84,02	2,42
López-Uceda et al. (2016)	2016	20%AGR	24,80	200	8,06	87,00	164,34	6,63
Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014)	2014	20%AGR	37,70	612	16,23	97,50	297,71	7,90
Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014)	2014	20%AGR	44,00	607	13,80	97,50	282,98	6,43
Zong-ping Chen (2010)	2010	20%AGR	44,70	524	11,72	97,50	437,37	9,78
Kou e Poon (2008)	2008	20%AGR	41,20	355	8,62	97,50	298,04	7,23
Fonseca, Brito e Evangelista (2011)	2011	20%AGR	48,80	446	9,14	87,00	329,99	6,76
Batayneh e Asi (2007)	2007	20%AGR	29,80	446	14,97	97,50	376,18	12,62
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	20%AGR	49,70	400	8,05	97,50	316,34	6,37
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	20%AGR	43,60	400	9,17	97,50	307,93	7,06
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	20%AGR	35,20	460	13,07	97,50	250,07	7,10
Dapena et al. (2011)	2011	20%AGR	51,10	380	7,44	97,50	317,96	6,22
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	20%AGR	45,30	410	9,05	97,50	345,81	7,63
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	20%AGR	42,80	410	9,58	97,50	324,78	7,59

Estudo	Ano	Teor de RA	fc (MPa)	CC (Kg/m ³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Kou, Poon e Chan (2007)	2007	20%AGR	41,00	410	10,00	97,50	316,36	7,72
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	20%AGR	37,10	460	12,40	97,50	250,07	6,74
Rajhans, Panda e Nayak (2018)	2018	20%AGR	38,10	460	12,07	97,50	250,07	6,56
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	20%AGR	40,00	340	8,50	97,50	278,82	6,97
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	20%AGR	42,56	340	7,99	97,50	278,82	6,55
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	20%AGR	38,40	340	8,85	97,50	278,82	7,26
Younis e Pilakoutas (2013)	2013	20%AGR	32,00	340	10,63	97,50	278,82	8,71
Domingo-Cabo et al. (2009)	2009	20%AGR	47,40	380	8,02	97,50	319,44	6,74
Domingo-Cabo et al. (2009)	2009	20%AGR	47,70	380	7,97	97,50	319,44	6,70
Babu et al. (2015)	2015	20%AGR	43,48	535	12,30	65,00	283,51	6,52
Kou, Poon e Wan (2012)	2012	20%AGR	39,40	410	10,41	97,50	336,62	8,54
Kou, Poon e Wan (2012)	2012	20%AGR	39,70	410	10,33	97,50	336,62	8,48
Kou, Poon e Wan (2012)	2012	20%AGR	45,30	410	9,05	97,50	336,62	7,43
Talamona e Hai Tan (2012)	2012	20%AGR	44,56	400	8,98	97,50	329,03	7,38
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	22,90	260	11,35	92,00	186,47	8,14
Fedumentis (2013)	2013	25%AGR	23,90	260	10,88	92,00	186,47	7,80
Bazuco (1999)	1999	25%AGR	36,73	465	12,65	97,00	411,46	11,20
Bazuco (1999)	1999	25%AGR	26,58	346	13,01	97,00	306,32	11,52
Bazuco (1999)	1999	25%AGR	19,29	275	14,24	97,00	243,30	12,61
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	51,30	382	7,45	92,00	273,52	5,33
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	35,20	309	8,78	92,00	221,71	6,30
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	37,50	437	11,65	92,00	338,22	9,02
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	31,60	354	11,20	92,00	273,98	8,67
Pedrozo (2008)	2008	25%AGR	24,23	378	15,60	92,00	299,59	12,36
Ceconello (2013)	2013	25%AGR	20,40	298	14,61	92,00	230,64	11,31
Fedumentis (2013)	2013	25%AGR	49,83	382	7,67	92,00	273,52	5,49
Fedumentis (2013)	2013	25%AGR	33,97	309	9,10	92,00	221,71	6,53
Fedumentis (2013)	2013	25%AGR	39,00	437	11,21	92,00	338,22	8,67
Fedumentis (2013)	2013	25%AGR	28,43	354	12,45	92,00	273,98	9,64
Fedumentis (2013)	2013	25%AGR	18,00	298	16,56	92,00	230,64	12,81
Rao, Bhattacharyya e Barai (2011)	2011	25%AGR	45,75	401	8,77	97,50	332,58	7,27
Rao, Bhattacharyya e Barai (2010)	2010	25%AGR	50,44	401	7,95	97,50	334,93	6,64
Ettxeberria, Vazquez e Barra (2007)	2007	25%AGR	28,00	300	10,71	97,50	255,71	9,13
Elhakam, Mohamed e Awad (2012)	2012	25%AGR	27,00	250	9,26	97,50	205,26	7,60
Elhakam, Mohamed e Awad (2012)	2012	25%AGR	38,00	400	10,53	97,50	328,41	8,64
Pacheco et al. (2015)	2015	25%AGR	35,68	350	9,81	87,00	257,13	7,21
Yang e Hang (2006)	2006	25%AGR	41,80	414	9,90	97,50	348,78	8,34
Yang e Ma (2013)	2013	25%AGR	53,00	473	8,92	97,50	391,09	7,38
Ettxeberria, Vazquez e Mari (2006)	2006	25%AGR	42,00	300	7,14	97,50	258,37	6,15
Matias et al. (2013)	2013	25%AGR	52,00	413	7,94	87,00	304,58	5,86
Matias et al. (2013)	2013	25%AGR	50,00	413	8,26	87,00	304,44	6,09
Matias et al. (2013)	2013	25%AGR	49,00	413	8,43	87,00	304,30	6,21
Duan et al. (2020)	2020	25%AGR	32,20	554	17,19	97,50	352,81	10,96
Duan et al. (2020)	2020	25%AGR	32,58	492	15,10	97,50	352,51	10,82
Bahrani et al. (2020)	2020	25%AGR	37,00	500	13,51	97,50	330,66	8,94
Gomez-Soberon (2002)	2002	30%AGR	37,00	400	10,81	97,50	342,45	9,26
Limbacyia, Meddah e Ouchagour (2011)	2011	30%AGR	25,00	275	11,00	97,50	227,93	9,12
Corinaldesi (2010)	2010	30%AGR	46,10	350	7,59	87,00	265,53	5,76
Corinaldesi (2010)	2010	30%AGR	45,80	340	7,42	87,00	257,18	5,62
Corinaldesi (2010)	2010	30%AGR	39,90	330	8,27	87,00	248,87	6,24
Corinaldesi (2010)	2010	30%AGR	36,30	320	8,82	87,00	240,60	6,63
Corinaldesi (2010)	2010	30%AGR	34,70	310	8,93	87,00	232,38	6,70
Kuster Junior (2018)	2018	30%AGR	49,35	483	9,79	97,50	354,28	7,18
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	52,40	400	7,63	97,50	329,19	6,28
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	37,22	397	10,66	97,50	326,45	8,77
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	34,02	393	11,56	97,50	323,75	9,52
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	32,30	390	12,08	97,50	321,09	9,94
Xiao, Lei e Zhang (2012)	2012	30%AGR	33,60	400	11,90	97,50	328,41	9,77
Zong-ping Chen (2010)	2010	30%AGR	47,20	524	11,10	97,50	437,37	9,27
Huda e Alan (2015)	2015	30%AGR	35,60	350	9,83	97,50	233,06	6,55
Kwan et al. (2011)	2012	30%AGR	37,00	328	8,86	97,50	269,30	7,28
Xiao, Sun e Falkner (2006)	2006	30%AGR	27,52	474	17,22	97,50	399,33	14,51
Xiao, Huang e Sun (2014)	2014	30%AGR	25,00	400	16,00	97,50	328,80	13,15
Xiao, Li e Zang (2005)	2005	30%AGR	25,40	430	16,93	97,50	363,10	14,30
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	44,89	537	11,96	97,50	440,37	9,81

Estudo	Ano	Teor de RA	fc (MPa)	CC (Kg/m ³)	IL	Teor de clínquer (%)	Emissões	IC
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	48,86	537	10,99	97,50	440,37	9,01
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	50,16	537	10,71	97,50	440,37	8,78
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	46,92	537	11,45	97,50	440,37	9,39
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	49,94	537	10,75	97,50	440,37	8,82
Ismail e Ramli (2013)	2013	30%AGR	49,91	537	10,76	97,50	440,37	8,82
Yang , Chung e Ashou (2008)	2008	30%AGR	36,70	350	9,54	97,50	295,74	8,06
Yang , Chung e Ashou (2008)	2008	30%AGR	32,60	350	10,74	97,50	295,74	9,07
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	31,92	320	10,01	97,50	268,38	8,41
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	39,97	361	9,03	97,50	303,16	7,58
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	41,11	415	10,09	97,50	348,33	8,47
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	49,55	464	9,37	97,50	389,79	7,87
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	37,64	320	8,49	97,50	268,38	7,13
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	44,99	361	8,03	97,50	303,16	6,74
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	47,47	415	8,74	97,50	348,33	7,34
Babu et al. (2015)	2015	30%AGR	40,78	535	13,12	65,00	283,51	6,95
Bui e Takahashi (2017)	2017	30%AGR	50,50	453	8,96	97,50	369,75	7,32
Ali e Hamid (2015)	2015	30%AGR	22,00	368	16,75	97,50	303,18	13,78
Ali e Hamid (2015)	2015	30%AGR	27,04	396	14,64	97,50	325,76	12,05
Ali e Hamid (2015)	2015	30%AGR	33,11	395	11,92	97,50	324,86	9,81
Limbachiya e Dhir (2000)	2000	30%AGR	35,20	370	10,51	97,50	319,27	9,07
Limbachiya e Dhir (2000)	2000	30%AGR	44,80	460	10,27	97,50	396,94	8,86
Limbachiya e Dhir (2000)	2000	30%AGR	52,00	560	10,77	97,50	483,86	9,30
Xie et al. (2020)	2020	30%AGR	36,16	373	10,32	97,50	304,06	8,41
Xie et al. (2020)	2020	30%AGR	39,20	373	9,52	97,50	299,74	7,65
Xie et al. (2020)	2020	30%AGR	42,32	373	8,81	97,50	296,88	7,02
Xie et al. (2020)	2020	30%AGR	41,20	373	9,05	97,50	294,01	7,14
Limbacyia, Meddah e Ouchagour (2011)	2011	30%AGR	29,80	305	10,23	97,50	178,38	5,99
Média			38,78	397	10,56	94,13	305,68	8,14
Mediana			39,40	397	10,09	97,50	304,58	7,60
Máximo			53,00	612	17,22	97,50	483,86	14,51
Mínimo			18,00	180	7,14	27,00	84,02	2,42

Fonte: Adaptado de Machado (2020)