

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA**  
**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E**  
**AMBIENTAL**

**LAIS SAMPAIO MACHADO**

**DETERMINAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA DE CONCRETOS RECICLADOS**  
**EM FUNÇÃO DO CONSUMO DE LIGANTES**

**FEIRA DE SANTANA, BA - BRASIL**  
**NOVEMBRO/2020**

LAIS SAMPAIO MACHADO

**DETERMINAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA DE CONCRETOS RECICLADOS  
EM FUNÇÃO DO CONSUMO DE LIGANTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Estadual de Feira de Santana, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental.

**Área de concentração:** Materiais de Construção e Estruturas.

Orientadora:

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Monica Batista Leite

FEIRA DE SANTANA, BA – BRASIL

NOVEMBRO/2020

**Ficha catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteado - UEFS**

Machado, Lais Sampaio

M132d Determinação da ecoeficiência de concretos reciclados em função do consumo de ligantes / Lais Sampaio Machado. – 2020.  
168f.: il.

Orientadora: Mônica Batista Leite

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Feira de Santana.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2020.

1. Concreto reciclado. 2. Intensidade de Ligantes (concreto). 3. CO<sub>2</sub> - Intensidade. 4. Concreto – Dosagem. 5. Ecoeficiência. 6. Sustentabilidade. I. Leite, Mônica Batista, orient. II. Universidade Estadual de Feira de Santana. III. Título.

CDU: 624.012.45

Rejane Maria Rosa Ribeiro – Bibliotecária CRB-5/695

**DETERMINAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA DE CONCRETOS RECICLADOS  
EM FUNÇÃO DO CONSUMO DE LIGANTES**

Lais Sampaio Machado

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE  
PÓSGRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA  
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

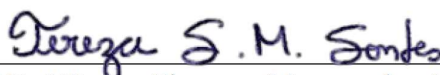
Feira de Santana, 18 de novembro de 2020.

Aprovado por:



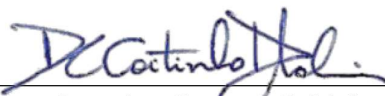
---

Prof.ª Dr.ª Mônica Batista Leite  
(Universidade Estadual de Feira de Santana)



---

Prof.ª Dr.ª Tereza Simonne Mascarenhas Santos  
(Universidade Estadual de Feira de Santana)



---

Prof.ª Dr.ª Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul)

FEIRA DE SANTANA, BA – BRASIL  
NOVEMBRO, 2020

Consagra ao SENHOR todas as tuas obras e os teus  
planos serão bem sucedidos.

(Pv 16:3)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, autor da vida, sem ele nada seria possível. Obrigado por me permitir realizar mais um sonho, por me conceder força e coragem para superar cada obstáculo enfrentado.

À minha mãe e meu pai, pelo apoio incondicional em todas as escolhas da minha vida. Tudo que sou hoje é graças a vocês. Meus exemplos, meu amor maior.

À professora e orientadora Mônica Leite pela disponibilidade em todos os momentos, pelo profissionalismo e competência. Tenho uma imensa admiração e minha eterna gratidão. Você me conduziu nesse mestrado da melhor forma possível, lembro do meu primeiro dia de UEFS que você viabilizou minha continuidade no programa. Durante todas as etapas do mestrado, levantou a minha cabeça, me aconselhou e me direcionou da melhor forma, sempre me mostrando que com muito trabalho e dedicação seria possível. Com você eu aprendi muito mais do que eu imaginava, sou muito grata a Deus pelo privilégio da sua orientação e principalmente do seu exemplo.

Ao meu noivo Marko, você é minha fonte de amor. Muito obrigada por percorrer esse caminho ao meu lado, por me fortalecer nos momentos difíceis e entender minhas angústias e ausências. Você acreditou em mim o tempo inteiro e não mediu esforços para realizar esse sonho junto comigo.

À Leo e Isa, muito obrigado por todo amor e apoio. À Marcela e Marcelo, vocês confiam mais em mim que eu mesma. Muito obrigada pela amizade, companhia e apoio.

À tia Nubia e tio Tadeu, vocês são família, me dão um suporte emocional pelo qual sou eternamente grata.

Às grandes amigas Alana e Kaline que o mestrado me deu a oportunidade de conhecer e que já fazem parte da minha vida. Tenho certeza que Deus escolheu vocês para estar comigo nesta caminhada. Obrigada pelo apoio e amizade, ainda bem que tenho vocês.

Aos meus amigos do mestrado: Paulo, John, Dagoberto, Tamires, Brendhy, Monique, Henrique, Luan, Tailan, Andréa e Yasmim. Obrigada por todo apoio, carinho e incentivos diários, vocês tornaram essa jornada mais leve.

Ao PPGECEA pela oportunidade. À Mariana, Cátia e a aos professores do programa pela solicitude e disponibilidade.

Ao Instituto Federal do Sertão Pernambucano, no qual sou servidora com muito orgulho, por me conceder o afastamento integral para que esse sonho fosse possível. Em especial

ao colega Ebson Alves, por reconhecer a importância de uma dedicação exclusiva ao mestrado e conduzir as demandas do setor da melhor forma possível.

À UEFS pelo apoio institucional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e institucional ao PPGECEA.

Agradeço a todos que estiveram ao meu lado, que me incentivaram de alguma forma para que essa jornada fosse menos árdua.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGECEA/UEFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## **DETERMINAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA DE CONCRETOS RECICLADOS EM FUNÇÃO DO CONSUMO DE LIGANTES**

Lais Sampaio Machado

Novembro, 2020

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Monica Batista Leite

Programa: Engenharia Civil e Ambiental

As emissões de CO<sub>2</sub> da indústria do cimento representam cerca de 7 % das emissões totais geradas pelo homem em todo mundo. A produção do cimento deverá aumentar de 12 - 23 % acima do nível de 2014 até 2050, e as estratégias tradicionais para mitigar tais emissões, com foco na produção de cimento, não serão capazes de compensar esse crescimento. Dessa forma, novas alternativas devem ser desenvolvidas, o que inclui aumentar a eficiência do consumo de cimento nos concretos. O uso de agregados reciclados de RCD como substituto dos agregados naturais geralmente aumenta o consumo de cimento no concreto reciclado (CR), para se obter um mesmo desempenho. Tal fato pode comprometer o princípio da sustentabilidade do uso desse resíduo. Assim, esse estudo tem como objetivo estabelecer um panorama do consumo de ligantes dos CR, cujos dados estão disponíveis na literatura, e medir a eficiência dessas misturas por meio da Intensidade de Ligantes (IL) e Intensidade de CO<sub>2</sub> (IC). Além disso, o estudo visa estabelecer metas e diretrizes que possam contribuir com o aumento da ecoeficiência no consumo de ligantes dos CR. Em geral, os CR apresentam elevados consumos de cimento com o aumento da resistência à compressão, aos 28 dias. Os menores valores de IL observados variam de 6 a 7 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>, o que ocorre para CR com resistências acima de 50 MPa, e os menores valores de IC variam de 2 a 4 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>, para resistências menores que 50 MPa, e misturas que utilizam cimentos com baixos teores de clínquer. Tais faixas de IL e IC revelam um potencial significativo para ganhos de desempenho, que podem conduzir a uma redução das emissões de CO<sub>2</sub> dentro da cadeia do CR, uma vez que a grande maioria resultados de IL e IC estão muito acima do limite superior dessas



faixas de valores. A partir do panorama estabelecido são apontados como metas possíveis de serem alcançadas nos CR um valor de  $IL \leq 7 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  e um valor de  $IC \leq 5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ . Para isso, de uma maneira geral, é necessário reduzir a relação a/c dos CR, limitando o consumo de ligantes, utilizar adições minerais, de preferência ativas, melhorar a dispersão e empacotamento das partículas, utilizar cimentos de elevada resistência e com baixo fator clínquer, foram algumas das diretrizes estabelecidas.

**Palavras-chave:** Concretos reciclados, intensidade de ligantes, intensidade de  $\text{CO}_2$ , dosagem, ecoeficiência, sustentabilidade.

Abstract of Dissertation presented to PPGECEA/UEFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## **THE ECO-EFFICIENCY OF RECYCLED CONCRETE BASED ON THE BINDERS CONSUMPTION**

Lais Sampaio Machado

November, 2020

Advisor: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Monica Batista Leite

Department: Civil and Environmental Engineering

The cement industry CO<sub>2</sub> emissions represent about 7 % of total greenhouse gases emissions worldwide. Cement production is expected to increase by 12 – 23 % above the level of 2014 until 2050, and traditional strategies to mitigate such emissions focusing on cement production will not be able to compensate for this growth. Thus, new alternatives must be developed, which includes increasing the efficiency of cement consumption in concretes. The use of recycled aggregates from CDW as a substitute for natural aggregates generally increases the cement content in recycled concrete (RC) to obtain the same performance. This fact can compromise the principle of sustainability in the use of this residue. Thus, this study aims to establish an overview of the binder's consumption of RC, whose data are available in the literature, and to measure the efficiency of these mixtures through the Binder Intensity (*bi*) and CO<sub>2</sub> Intensity (*ci*). In addition, the study aims to establish benchmarks and guidelines that can contribute to increasing eco-efficiency in the RC binder's consumption. In general, RC show high cement consumption with an increase in compressive strength at 28 days. The lowest values of *bi* observed range from 6 to 7 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>, which occurs for RC with strengths above 50 MPa, and the lowest values of *ci* range from 2 to 4 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>, for strengths less than 50 MPa and mixtures that use cements with low clinker contents. Such *bi* and *ci* ranges reveal significant potential for RC gains reducing CO<sub>2</sub> emissions within the RC chain, since the vast majority of *bi* and *ci* results are above the upper limit of these ranges. Based on the panorama, a  $bi \leq 7 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  and a  $ci \leq 5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  are identified as

possible benchmarks for RC. Some of the main guidelines drawn were: to reduce the w/b ratio of RC, limiting the binder's consumption; to use mineral additions, preferably the active ones; improve the dispersion and the particle packaging; to use high-strength Portland cements, limiting the clinker-factor.

**Keywords:** Recycled concrete, binder intensity, CO<sub>2</sub> intensity; mixture proportioning, efficiency, sustainability.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1	OBJETIVOS .....	22
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	22
<b>2</b>	<b>PANORAMA DA CADEIA DO CIMENTO E O IMPACTO AMBIENTAL 24</b>	
2.1	PRODUÇÃO DE CIMENTO.....	24
2.2	EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> DO CIMENTO.....	27
2.3	ESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> DO CIMENTO PORTLAND.....	31
2.4	INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO USO DO CIMENTO.....	33
	<b>2.4.1 Intensidade de CO<sub>2</sub> (IC).....</b>	<b>33</b>
	<b>2.4.2 Intensidade de ligantes (IL).....</b>	<b>35</b>
2.5	PANORAMA DA EFICIÊNCIA DE LIGANTES EM CONCRETOS CONVENCIONAIS.....	35
<b>3</b>	<b>ECOEFIÊNCIA NO CONSUMO DE CIMENTO X COMPORTAMENTO DOS CONCRETOS COM RCD .....</b>	<b>45</b>
3.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	45
3.2	MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	49
3.3	PERMEABILIDADE .....	51
3.4	A INFLUÊNCIA DO PROCESSAMENTO DOS RESÍDUOS NA ECOEFICIÊNCIA DOS CONCRETOS RECICLADOS .....	52
3.5	CONSIDERAÇÕES .....	56
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>57</b>
4.1	LEVANTAMENTO DOS DADOS.....	57
4.2	CÁLCULO DO IL e IC .....	58
4.3	ANÁLISE DOS INDICADORES E VARIÁVEIS .....	60
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>63</b>
5.1	CONSUMO DE LIGANTES.....	63
5.2	INTENSIDADE DE LIGANTES .....	71
	<b>5.2.1 Efeito do AGR sobre o IL.....</b>	<b>75</b>
	<b>5.2.2 Efeito do AMR sobre o IL .....</b>	<b>80</b>
	<b>5.2.3 Efeito do AGR/AMR sobre o IL .....</b>	<b>83</b>
	<b>5.2.4 Comparações entre o IL<sub>CR</sub> com o IL<sub>CC</sub> .....</b>	<b>85</b>
5.3	INTENSIDADE DE CO <sub>2</sub> (IC) .....	87
	<b>5.3.1 Efeito do AGR sobre o IC.....</b>	<b>91</b>

<b>5.3.2 Efeito do AMR sobre o IC</b> .....	95
<b>5.3.3 Efeito do AGR/AMR sobre o IC</b> .....	97
<b>5.3.4 Comparações entre IC<sub>CR</sub> com o IC<sub>CC</sub></b> .....	99
<b>5.3.5 Concretos com baixo IC e baixo IL</b> .....	99
5.4 <b>ADIÇÕES MINERAIS NOS CR</b> .....	103
5.5 <b>ADITIVOS QUÍMICOS NOS CR</b> .....	105
5.6 <b>METAS E DIRETRIZES</b> .....	105
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>108</b>
6.1 <b>CONCLUSÃO</b> .....	108
6.2 <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	110
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>111</b>
<b>APÊNDICE 1 – REFERÊNCIAS UTILIZADAS PARA COLETA DE DADOS</b>	<b>122</b>
<b>APÊNDICE 2 – BANCO DE DADOS PARA CONCRETOS COM AGR, AMR E</b>	
<b>AGR/AMR</b> .....	<b>135</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Evolução da produção de cimento no Brasil de 1950 a 2014 (Fonte: Adaptado de SNIC, 2013, 2019).....	25
<b>Figura 2</b> Evolução da produção de cimento mundial no período de 1995 a 2018 (Fonte: Adaptado de GNR, 2018; CEMBUREAU, 2010).....	25
<b>Figura 3</b> Projeção da produção de cimento no Brasil de 2014 – 2050 para um cenário de baixa e de alta demanda (Fonte: Adaptado de SNIC, 2019).....	26
<b>Figura 4</b> Projeção da produção de cimento no mundo de 2014 – 2050 para um cenário de baixa e de alta demanda (Fonte: Adaptado de WBCSD, 2018).....	27
<b>Figura 5</b> Emissões de CO <sub>2</sub> da produção de cimento no Brasil (Fonte: Adaptado de SNIC, 2019).....	28
<b>Figura 6</b> Emissão de CO <sub>2</sub> (kg por tonelada de cimento Portland produzido) em diferentes países e regiões (Fonte: Adaptado de SNIC, 2019).....	29
<b>Figura 7</b> Intensidade de CO <sub>2</sub> (IC) estimada <i>versus</i> resistência à compressão, aos 28 dias (Fonte: DAMINELI <i>et al.</i> , 2010).....	38
<b>Figura 8</b> Intensidade de ligantes (IL) <i>versus</i> resistência à compressão, aos 28 dias (Fonte: DAMINELI <i>et al.</i> , 2010).....	38
<b>Figura 9</b> Novos resultados de intensidade de ligantes (IL) <i>versus</i> resistência à compressão, aos 28 dias, do estudo de Scrivener, John e Gartner (2018).....	40
<b>Figura 10</b> Novos resultados de intensidade de CO <sub>2</sub> (IC) <i>versus</i> resistência à compressão, aos 28 dias, do estudo de Scrivener, John e Gartner (2018).....	40
<b>Figura 11</b> Resultados de intensidade de ligantes (IL) <i>versus</i> resistência à compressão, aos 28 dias, do estudo de Grazia <i>et al.</i> (2019).....	41
<b>Figura 12</b> Relação entre a resistência à compressão do concreto com agregado natural (NAC) e concreto com agregado reciclado (RAC) e o consumo de cimento (Fonte: MARINKOVIC <i>et al.</i> , 2010).....	46
<b>Figura 13</b> $E_{cr}/E_{cc}$ <i>versus</i> teor de substituição de misturas com AGR .....	50
<b>Figura 14</b> Etapas da metodologia adotada.....	57
<b>Figura 15</b> Fluxograma com as variáveis analisadas, separados por grupo: a) Referência; b) AR; c) Concreto .....	61
<b>Figura 16</b> Relações entre as variáveis analisadas .....	62

<b>Figura 17</b> Consumo de ligantes <i>versus</i> resistência à compressão para todos os dados coletados, separados por dados brasileiros (azul) e dados internacionais (vermelho) para as misturas com diferentes teores de AGR, AMR e AGR/AMR .....	63
<b>Figura 18</b> Consumo de ligantes <i>versus</i> resistência à compressão: a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diversos teores de AGR/AMR.....	65
<b>Figura 19</b> Resistência à compressão <i>versus</i> teor de substituição: a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR .....	67
<b>Figura 20</b> Consumo de ligantes <i>versus</i> teor de substituição: a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR .....	69
<b>Figura 21</b> Relação entre a Intensidade de ligantes ( <i>IL</i> ) <i>versus</i> resistência à compressão: a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR .....	72
<b>Figura 22</b> Intensidade de ligantes ( <i>IL</i> ) <i>versus</i> ano: a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR .....	74
<b>Figura 23</b> Intensidade de ligantes ( <i>IL</i> ) <i>versus</i> teor de AGR.....	75
<b>Figura 24</b> Intensidade de ligantes ( <i>IL</i> ) <i>versus</i> teor de AMR .....	80
<b>Figura 25</b> Intensidade de ligantes ( <i>IL</i> ) <i>versus</i> teor de AGR/AMR.....	84
<b>Figura 26</b> Emissões de CO <sub>2</sub> <i>versus</i> resistência à compressão: a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR .....	87
<b>Figura 27</b> Relação entre a Intensidade de CO <sub>2</sub> ( <i>IC</i> ) <i>versus</i> resistência à compressão: a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR.....	89
<b>Figura 28</b> Intensidade de CO <sub>2</sub> ( <i>IC</i> ) <i>versus</i> ano: a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR .....	90
<b>Figura 29</b> Intensidade de CO <sub>2</sub> ( <i>IC</i> ) <i>versus</i> teor de AGR .....	91
<b>Figura 30</b> Resultados de IC (kg.m <sup>-3</sup> .MPa <sup>-1</sup> ) <i>versus</i> resultados de IL (kg.m <sup>-3</sup> .MPa <sup>-1</sup> ): a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR.....	94

<b>Figura 31</b> Intensidade de CO <sub>2</sub> (IC) <i>versus</i> teor de AMR.....	95
<b>Figura 32</b> Intensidade de CO <sub>2</sub> (IC) <i>versus</i> teor de AGR/AMR.....	98
<b>Figura 33</b> IC (kg.m <sup>-3</sup> .MPa <sup>-1</sup> ) <i>versus</i> fração de clínquer (%):a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR .....	100
<b>Figura 34</b> Metas de IC e de IL e diretrizes gerais para dosagem e produção dos concretos reciclados.....	106



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> Fator clínquer e estimativa das emissões de CO <sub>2</sub> por toneladas de cimento no Brasil e no mundo.....	30
<b>Tabela 2</b> Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto .....	36
<b>Tabela 3</b> Levantamento bibliográfico dos valores de consumo de cimento e resistência à compressão, aos 28 dias, de concretos convencionais.....	37
<b>Tabela 4</b> Perdas, em percentual, dos resultados de resistência à compressão de acordo com o teor de agregado reciclado (AR).....	47
<b>Tabela 5</b> Resultados equivalentes de resistência à compressão do CR em comparação ao concreto convencional em função do teor de agregado reciclado e do consumo de cimento .....	49
<b>Tabela 6</b> Valores de consumo de energia e emissões de CO <sub>2</sub> para os diferentes tratamentos dos AGR .....	54
<b>Tabela 7</b> Palavras-chave da pesquisa.....	58
<b>Tabela 8</b> Série histórica de emissões de CO <sub>2</sub> por tonelada de clínquer usada para o cálculo do IC.....	59
<b>Tabela 9</b> Valores de referência das emissões dos materiais utilizados nos estudos com exceção dos cimentos .....	60
<b>Tabela 10</b> Resultados dos estudos com maiores valores de resistência à compressão para os concretos com AGR, AMR e AGR/AMR .....	68
<b>Tabela 11</b> Características dos concretos com menores IL para as misturas com diferentes teores de AGR.....	76
<b>Tabela 12</b> Características dos concretos com menores IL para as misturas com diferentes teores de AMR e da combinação de AGR/AMR.....	81
<b>Tabela 13</b> Características dos concretos com os melhores resultados de IC para as misturas com diferentes teores de AGR, AMR e AGR/AMR.....	93
<b>Tabela 14</b> Estudos com $IL < 7 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ e $IC < 5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ para as misturas com diferentes teores de AGR, AMR e AGR/AMR .....	102
<b>Tabela 15</b> Proporções das misturas com elevados teores de substituição e adições minerais .....	103

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AGR – Agregado graúdo reciclado

AMR – Agregado miúdo reciclado

AN – Agregado natural

AR – Agregado reciclado

CC – Concreto convencional

CR– Concreto reciclado

CV – Cinza volante

IC – Intensidade de CO<sub>2</sub>

IL – Intensidade de ligantes

IAR – Aditivo incorporador de ar

RCD – Resíduo da construção e demolição

SA – Sílica ativa

SP – Superplastificante

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

VMA – vem do inglês *Viscosit Modifier Agent* que significa agente modificador de viscosidade

WBCSD – vem do inglês *World Business Council for Sustainable Development* que significa Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável

## 1 INTRODUÇÃO

Devido aos impactos negativos do RCD no meio ambiente, ao elevado volume gerado e à escassez de fontes viáveis de agregados virgens situados nas proximidades de áreas metropolitanas, a reutilização de RCD para produzir novos materiais tornou-se uma prioridade na indústria da construção civil e o número de estudos com concretos reciclados (CR) tem aumentado nas últimas décadas. A reciclagem de RCD produz resultados com significativos benefícios ambientais, porém alguns fatores negativos são relatados na literatura. O processamento dos agregados reciclados geralmente consome um pouco mais de energia do que o processamento de materiais virgens (QUATTRONE; ÂNGULO; JOHN, 2014), além do transporte e destinação dos resíduos que podem impactar negativamente na pegada de CO<sub>2</sub> (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018), a depender do local dos depósitos e usinas de reciclagem dos resíduos.

Além disso, considerando a reutilização do RCD na cadeia do concreto, a resistência à compressão do CR é geralmente menor que a do concreto convencional (CC) produzido com agregados naturais, para um mesmo consumo de cimento (BAHRAMI *et al.*, 2020; BOGAS, BRITO; RAMOS, 2016; CORINALDESI, 2010; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002; KATZ, 2003; LOVATO *et al.*, 2012; RAHAL, 2007). Os resultados apontam que o uso de agregados reciclados substituindo os agregados naturais geralmente aumenta o teor de cimento dos concretos para que se obtenha um mesmo desempenho mecânico (OTSUKI, MIYAZATO; YODSUDJAI, 2003; ETXEBERRIA; VÁZQUEZ; MARÍ, 2006; ANGULO *et al.*, 2010; PEDRO *et al.*, 2019; VIEIRA; FIGUEIREDO; JOHN, 2020). Desse modo, o princípio da sustentabilidade destes concretos pode ser reduzido.

O cimento Portland é um insumo fundamental da cadeia produtiva da indústria da construção civil, componente básico de concretos e argamassas e elemento imprescindível ao desenvolvimento da infraestrutura dos países. O Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD<sup>1</sup>), em 2018, destacou que até o ano de 2050 há uma estimativa de crescimento da produção global do cimento que varia entre 12 - 23 % acima do nível de produção alcançado em 2014, que foi da ordem de 4,17 Bt/ano. O processo produtivo do cimento Portland é intensivo na emissão de gases de efeito estufa. Para cada 1 tonelada de cimento produzido são emitidos para a atmosfera

---

<sup>1</sup> WBCSD - *World Business Council for Sustainable Development.*

cerca de 634 kg de CO<sub>2</sub> (média mundial de 2018, segundo dados do WBCSD, 2018). Globalmente, essas emissões representam cerca de 7 % das emissões totais de CO<sub>2</sub> geradas pelo homem (WBCSD, 2018).

A indústria cimenteira já atua no sentido de diminuir essas emissões, adotando ações como: aumento da eficiência nos fornos; modificações dos combustíveis utilizados; e substituição de clínquer por adições minerais. Porém, tais estratégias não são capazes de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> a níveis satisfatórios. Mesmo que a redução sugerida seja atingida, a necessidade de aumento da produção de cimento para atender as demandas sociais fará com que as emissões totais continuem a aumentar, ainda que se considere o melhor cenário industrial possível (DAMINELI, 2013). Dessa forma, novas alternativas devem ser desenvolvidas para a mitigação da emissão de CO<sub>2</sub> proveniente da produção e consumo do cimento, uma vez que, sem inovação, o impacto ambiental da cadeia do cimento só tende a crescer.

Uma estratégia para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> é o aumento da eficiência do uso dos ligantes na etapa de sua aplicação, uma alternativa que vai além das estratégias focadas na produção do cimento (JOHN, 2003; DAMINELI, 2013; DAMINELI *et al.*, 2010). A redução do consumo de cimento é uma alternativa atrativa, tendo em vista que os agregados e finos inertes têm impactos ambientais e custos muito menores do que os ligantes (DAMINELI, 2013).

Scrivener, John e Gartner (2018) apresentam duas áreas principais que podem fornecer reduções adicionais substanciais nas emissões globais de CO<sub>2</sub> relacionadas ao cimento e ao concreto nos próximos 20-30 anos: i) aumento do uso de material cimentício suplementar em substituição ao clínquer; e ii) uso eficiente do cimento em concretos e argamassas. Os autores destacam que a otimização do projeto da mistura pode melhorar a ecoeficiência do concreto, o empacotamento das partículas, em toda a fração grossa e fina dos materiais, juntamente com o uso de dispersantes e adições, pode reduzir o conteúdo de cimento e manter o desempenho do produto.

Van Damme (2018) faz uma abordagem histórica do concreto e destaca que a otimização da formulação granular e, conseqüente, diminuição do conteúdo de cimento representa uma das mudanças radicais necessárias para a inovação da cadeia do concreto. De acordo com Mehta (2009), a redução do consumo de cimento no concreto, a redução do volume de concreto nas estruturas e a redução do teor de clínquer no cimento, são três

possíveis processos que levaria ao caminho da sustentabilidade na indústria do cimento e do concreto.

Para o CC já existe um panorama sobre a eficiência no uso de ligantes estabelecido por Damineli *et al.* (2010). Os autores realizaram um levantamento de publicações brasileiras e internacionais para avaliar em que níveis de consumo se encontram os CC produzidos e avaliaram a eficiência usando dois indicadores de desempenho. O primeiro indicador se refere à relação entre o teor de ligantes e a resistência à compressão, chamado de Intensidade de Ligantes (IL); o segundo indicador mede a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida em relação à resistência à compressão do concreto e é chamado de Intensidade de CO<sub>2</sub> (IC). O IL mede a eficiência do uso de ligantes e o IC permite realizar uma estimativa do potencial de aquecimento global da mistura de concreto (DAMINELI *et al.*, 2010).

Misturas de concreto com alta eficiência de cimento apresentam consumos e desempenhos adequados, alcançados com o menor consumo possível de cimento. No estudo de Damineli *et al.* (2010), os valores de IL e IC encontrados foram:

- a) para CC com mais de 60 MPa: IL mínimo de  $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ ;
- b) para CC com 20 MPa: IL mínimo de  $13 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ ;
- c) para todas as faixas de resistência à compressão: IC mínimo por volta de  $1,5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  (que ocorre devido a substituição do clínquer por adições).

Os dados mostraram que é possível melhorar a eficiência dos concretos convencionais e os autores sugerem, em um futuro não tão distante, um IL de  $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  como uma meta realista para concretos de resistências comuns (até 50 MPa), um IL correspondente a consumos de ligantes totais de  $250 \text{ kg/m}^3$  para as resistências menores que 50 MPa e um IC de  $1,5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  (DAMINELI, 2013).

Depois de Damineli *et al.* (2010), alguns outros estudos utilizaram esses indicadores (IC e IL) para medir a eficiência de concretos convencionais e valores inferiores à meta estabelecida por Damineli *et al.* (2010) já foram relatados (YANG; SONG; SONG, 2016; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018; GRAZIA *et al.*, 2019; MATOS; SAKATA; PRUDÊNCIO, 2019; LIM; ELLIS; SKERLOS, 2019). Assim, a estratégia de otimização de ligantes para redução das emissões de CO<sub>2</sub> se torna ainda mais promissora, tendo em vista que na última década foi crescente a obtenção de CC com melhores eficiências. Isso

evidencia a importância dos indicadores de eficiência do uso de ligantes propostos por Damineli *et al.* (2010) que estão conduzindo as melhorias para os concretos convencionais.

O desenvolvimento de concretos com elevado empacotamento e dispersão das partículas, associados ao uso de superplastificantes e adições minerais provenientes de resíduos industriais, têm permitido a redução do consumo de aglomerantes, sem prejuízo na durabilidade e resistência de CC (CAMPOS, KLEIN; MARQUES FILHO, 2020; BARBOZA, 2016; WASSERMANN, KATZ; BENTUR, 2009; REBMANN, 2011).

A falta de um conjunto de indicadores de desempenho do uso de ligantes nos CR inibe a adoção de estratégias para otimização da aplicação do RCD. Esse conjunto de indicadores também é necessário para se discutir as variáveis dos CR que vão conduzir a melhorias dos processos, determinar um valor meta para esse indicador, estabelecer metas viáveis e diretrizes para se reduzir o consumo de ligantes nos CR.

Até o momento, apenas dois estudos de concretos reciclados propuseram uma melhoria na eficiência do consumo de cimento, utilizando os conceitos e diretrizes aplicados aos CC. O primeiro, o estudo de Hayles, Sanchez e Noel (2018), no qual se utilizou o método do volume equivalente de argamassa (EMV) e os resultados mostraram que o concreto com 100 % de substituição dos agregados e consumo de cimento de 322 kg.m<sup>-3</sup> apresentou 35 MPa de resistência à compressão, aos 28 dias, e um IL de 9,2 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>. Esses valores representam uma melhor eficiência quando comparado com o CC produzido no estudo. O segundo, o estudo de Damineli e Pablos (2018), no qual se produziu concretos substituindo agregados grãos naturais por agregados grãos reciclados mistos usando a teoria do empacotamento e dispersão das partículas e os resultados mostraram que os concretos reciclados alcançaram maior eficiência quando comparados aos concretos com agregados naturais sem dispersantes. A melhor eficiência observada no CR com 100 % de AGR ocorreu para um consumo de cimento de 314 kg/m<sup>3</sup>, resistência à compressão, aos 28 dias, de 26,4 MPa e um IL de 12 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>.

Apesar dos estudos de Hayles, Sanchez e Noel (2018) e Damineli e Pablos (2018) terem sido desenvolvidos com foco na melhoria da eficiência de ligantes dos concretos reciclados, ainda não se tem um panorama que permite determinar a eficiência do uso de ligantes nesses concretos, bem como, apontar quais as melhores condutas a serem adotadas para alcançar a melhoria dessa eficiência. Nesse sentido, esse trabalho pretende

analisar os consumos de ligantes de concretos reciclados, cujos resultados estão disponíveis na literatura, medindo a ecoeficiência destes concretos por meio dos indicadores: intensidade de ligantes (IL) e intensidade de CO<sub>2</sub> (IC), e avaliar os principais parâmetros que influenciam nestes resultados.

## 1.1 OBJETIVOS

Esse estudo tem como objetivo geral estabelecer o panorama sobre a ecoeficiência no consumo de ligantes dos concretos reciclados (CR) produzidos no período de 1990 a 2020.

E tem como objetivos específicos:

- determinar a faixa de consumos de ligantes dos concretos com agregados reciclados em função das resistências à compressão, cujos dados estão publicados na literatura no período de 1990 a 2020;
- calcular a Intensidade de Ligantes (IL) e a Intensidade de CO<sub>2</sub> (IC) das misturas de concreto com agregados reciclados;
- avaliar a influência de diferentes teores de agregados miúdo reciclado (AMR), de agregado graúdo reciclado (AGR) ou da combinação entre AGR/AMR sobre a Intensidade de Ligantes e Intensidade de CO<sub>2</sub> dos concretos com agregados reciclados;
- verificar se os grupos I ( $f_c \leq 50$  MPa) e II ( $f_c > 50$  MPa) de classes de resistência estabelecidos pela NBR 8953 (ABNT, 2015) exercem influência sobre os resultados de IL e IC dos concretos reciclados;
- definir metas de IC e IL para os CR;
- apontar diretrizes para melhoria da ecoeficiência no consumo de ligantes dos concretos com agregados reciclados.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente estudo está estruturado em 6 capítulos da seguinte forma:

Capítulo 1: apresenta uma breve introdução sobre o tema, apontando a relevância do estudo e os objetivos gerais e específicos.

Capítulo 2: apresenta uma revisão bibliográfica sobre o panorama da cadeia do cimento e os impactos ambientais associados. Este capítulo aborda a situação atual dos impactos ambientais relacionados à produção de cimento no Brasil e no mundo. Citam-se dados sobre a produção de cimento, teores usuais de clínquer no cimento e emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil e no mundo, estratégias para redução das emissões de CO<sub>2</sub> do cimento, indicadores de eficiência do cimento e o panorama da eficiência de ligantes em concretos convencionais.

Capítulo 3: apresenta uma relação entre a ecoeficiência no consumo de ligantes e o comportamento do concreto com RCD, abrange os principais impactos do resíduo da construção e demolição nas propriedades mecânicas do concreto e os principais impactos dos processamentos dos resíduos de RCD.

Capítulo 4: apresenta a metodologia adotada para o estudo, como foi realizada a definição das variáveis e o levantamento de dados, o cálculo do IL e do IC.

Capítulo 5: apresenta os resultados das faixas de consumos de ligantes dos concretos com agregados reciclados em função das resistências à compressão, os indicadores (IL e IC) das misturas de concreto com agregados reciclados e suas relações com os teores de agregados miúdo reciclado (AMR), de agregado graúdo reciclado (AGR) ou da combinação entre AGR/AMR e a influência que os grupos I e II de classes de resistência estabelecidos pela NBR 8953 (ABNT, 2015) exercem influência sobre os resultados de IL e IC dos concretos reciclados.

Capítulo 6: apresenta as conclusões do estudo e sugestões de temas para pesquisas futuras.



## 2 PANORAMA DA CADEIA DO CIMENTO E O IMPACTO AMBIENTAL

O cimento é um importante indicador da atividade econômica no segmento da construção civil, por ser um insumo fundamental da cadeia produtiva da construção e componente imprescindível ao desenvolvimento da infraestrutura do país. O Brasil tem um programa de infraestrutura a ser implementado e aliado à expectativa de crescimento populacional, espera-se um aumento da produção de cimento nas próximas décadas, o que também é esperado no âmbito mundial. O processo produtivo do cimento, por sua vez, é intensivo nas emissões de gases do efeito estufa. Dessa forma, os impactos ambientais da cadeia do cimento devem ser minimizados, considerando o aumento previsto da produção.

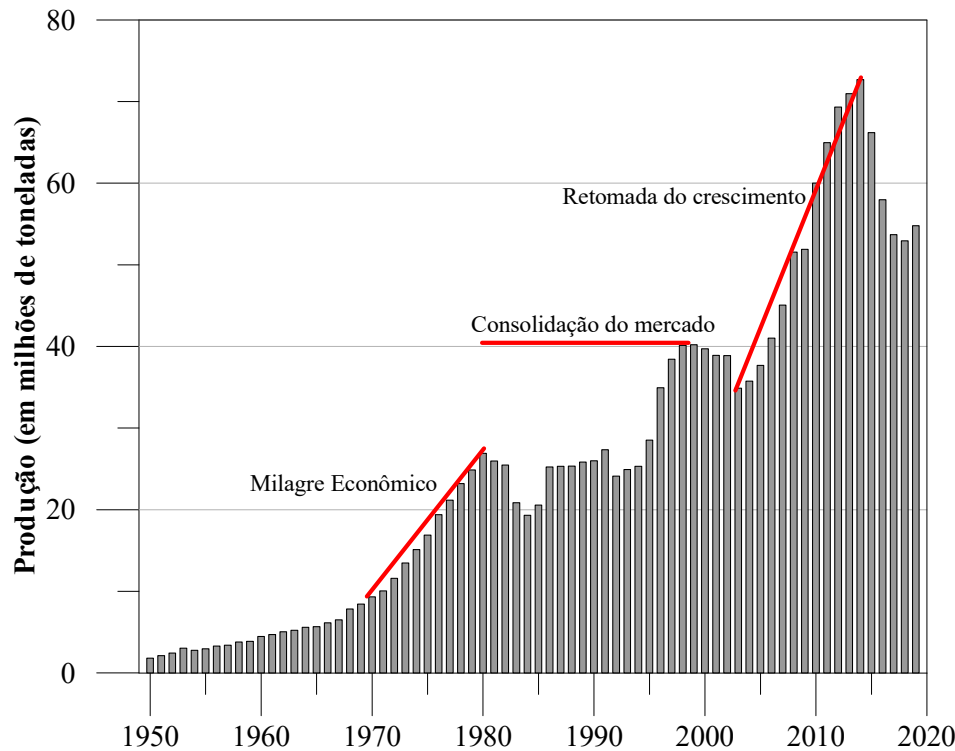
### 2.1 PRODUÇÃO DE CIMENTO

No Brasil, as primeiras iniciativas para a fabricação de cimento ocorreram no final do século XIX. Em 1926, o cimento começou a ser produzido no Brasil em escala industrial. Entre 1970 e 1980, a produção cresceu intensamente, com uma elevação do patamar de 9,8 milhões de toneladas, em 1970, para 27,2 milhões de toneladas, em 1980, conforme pode ser observado na Figura 1. Ao final da década de 1990, alcançou-se uma produção de 40,2 milhões de toneladas de cimento devido, especialmente, ao advento do Plano Real (SNIC, 2013).

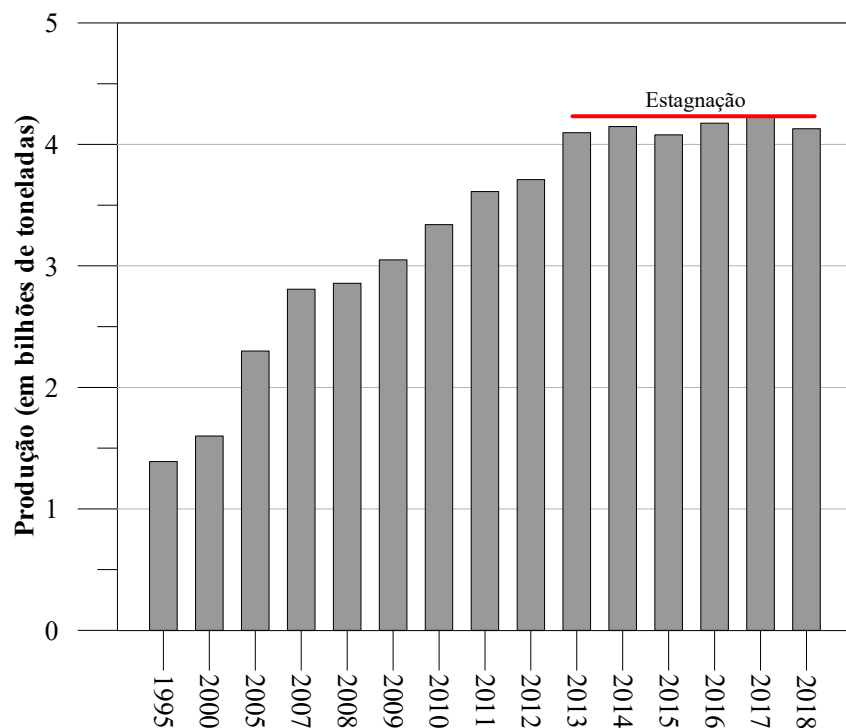
Na Figura 1, observa-se que, entre 2003 e 2014, a produção anual de cimento no Brasil praticamente dobrou devido ao crescimento da renda e do emprego, forte expansão do crédito imobiliário, queda da taxa de juros e inflação, e elevado investimento em programas de infraestrutura, chegando-se à produção recorde de 72 milhões de toneladas em 2014 (SNIC, 2019).

Desde 2015, o país vem enfrentando uma crise político-econômica, que resultou na redução do investimento em infraestrutura e aumento do desemprego. Com isso, a atividade da construção civil sofreu uma retração e os dados de produção de cimento referentes a 2018 são da ordem de 52 milhões de toneladas (SNIC, 2019).

A evolução da produção de cimento mundial está apresentada na Figura 2. Pode-se observar um aumento na produção de cimento de aproximadamente 300 % entre os anos de 1995 e 2018. Entre 2013 e 2018, diferente dos dados brasileiros, houve estagnação da produção de cimento mundial, ainda que em patamares elevados.



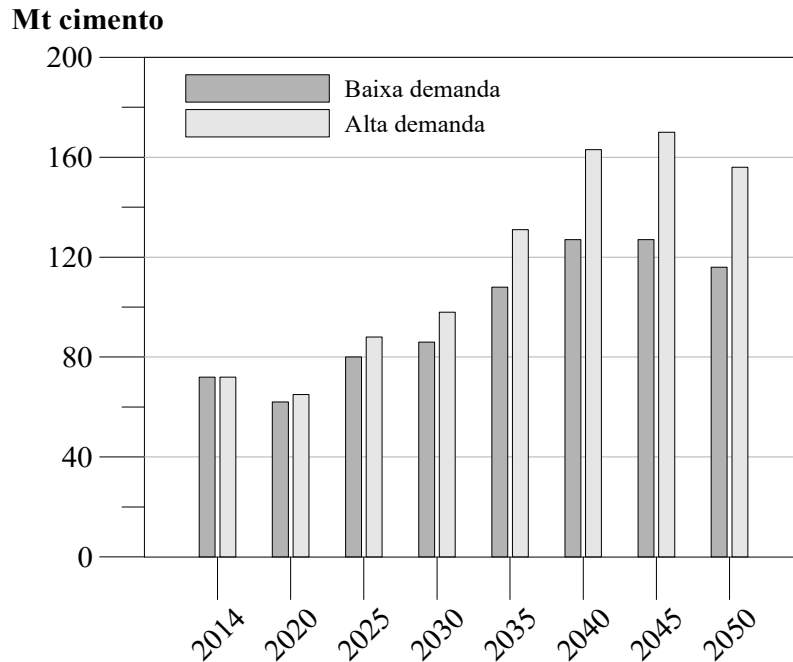
**Figura 1** Evolução da produção de cimento no Brasil de 1950 a 2014 (Fonte: Adaptado de SNIC, 2013, 2019)



**Figura 2** Evolução da produção de cimento mundial no período de 1995 a 2018 (Fonte: Adaptado de GNR, 2018; CEMBUREAU, 2010)

O Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), em 2019, fez a projeção da produção de cimento no Brasil entre 2014 e 2050, considerando dois cenários de

crescimento: de alta demanda e baixa demanda. Para obtenção dos valores, alguns fatores foram levados em conta, como: as grandes deficiências em infraestrutura; o elevado déficit habitacional; os avanços tecnológicos; e o crescimento populacional. Os valores dessa projeção estão apresentados na Figura 3.

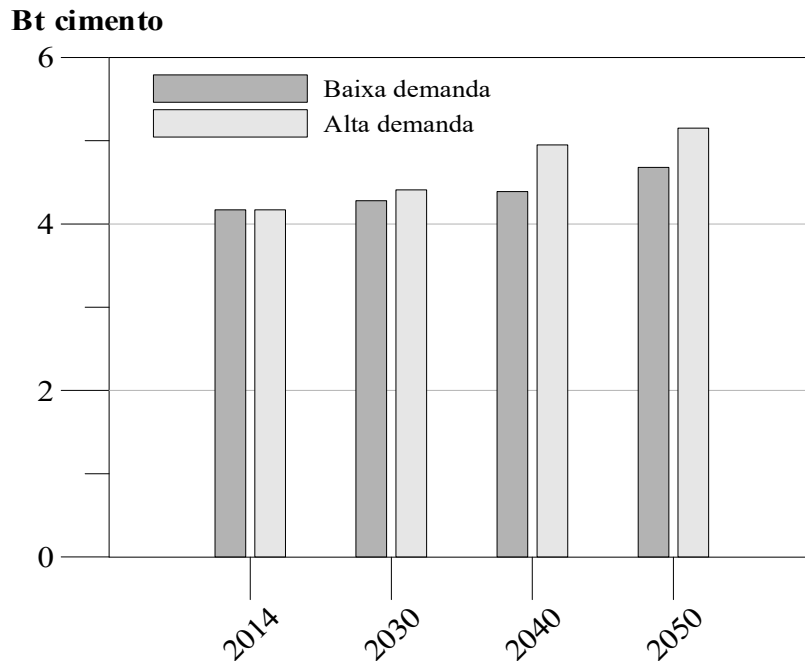


**Figura 3** Projeção da produção de cimento no Brasil de 2014 – 2050 para um cenário de baixa e de alta demanda (Fonte: Adaptado de SNIC, 2019)

Segundo o SNIC (2019), a recuperação da economia brasileira a partir da recessão até 2020, o subsequente crescimento do PIB e os déficits de infraestrutura e habitacional deverão impulsionar a demanda de cimento de forma constante de 2020 a 2040, como se observa no gráfico da Figura 3, mesmo no cenário de baixa demanda. Entre 2040 e 2050, espera-se um período de estabilização e, por volta de 2050, uma ligeira queda na produção de cimento, acompanhando inclusive a reversão do crescimento populacional prevista pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Dessa forma, observa-se um aumento na produção de cimento na faixa de 38 % para a previsão de baixa demanda e 54 % de aumento para a alta demanda, de 2014 a 2050. Esse crescimento de longo prazo na produção de cimento representa um desafio considerável para o setor brasileiro em termos de demanda de energia e emissões de CO<sub>2</sub>.

Em relação à produção mundial de cimento, o WBCSD (2018) também faz uma projeção até 2050 para dois cenários, conforme apresentado na Figura 4. A crescente

população global e os padrões de urbanização, juntamente com as necessidades de desenvolvimento de infraestrutura, aumentam a demanda por cimento e concreto. Assim, a produção global do cimento deve crescer até 2050 na faixa de 12 %, para a previsão de baixa demanda, e 23 %, para a previsão de alta demanda, em relação à produção de 2014 (WBCSD, 2018).



**Figura 4** Projeção da produção de cimento no mundo de 2014 – 2050 para um cenário de baixa e de alta demanda (Fonte: Adaptado de WBCSD, 2018)

A projeção da produção de cimento dos dados brasileiros é maior quando comparado aos dados mundiais. Isso está associado ao elevado déficit habitacional e de infraestrutura do país e à expectativa de crescimento populacional, que apontam para uma retomada do crescimento na produção em médio/longo prazo (SNIC, 2019). As principais consequências deste aumento de produção se refletem no aumento das emissões de CO<sub>2</sub>, o que será melhor discutido no Item 2.2.

## 2.2 EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> DO CIMENTO

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico, produzido pela moagem do clínquer, que é composto predominantemente por silicatos de cálcio, aluminato de cálcio e ferroaluminato de cálcio. Clínqueres são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de material

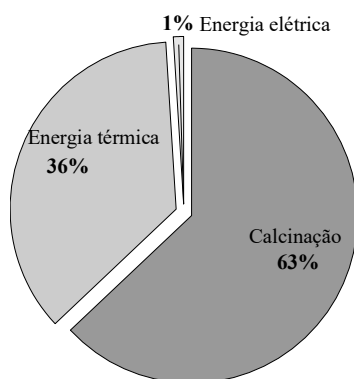
sinterizado, que são produzidos quando uma mistura de matérias-primas de composição pré-determinada é aquecida em altas temperaturas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

As principais matérias-primas usadas na fabricação do clínquer são o calcário e as argilas. Para a produção de uma tonelada de clínquer são necessárias aproximadamente 1,3 t de calcário, 0,25 t de argila e pequenas quantidades de outros materiais, totalizando aproximadamente 1,6 t de matéria-prima por tonelada de clínquer produzido (WANG *et al.*, 2016; van OSS; PADOVANI, 2002).

Quase toda a emissão de CO<sub>2</sub> na indústria cimenteira concentra-se na produção do clínquer e é devida principalmente à queima de combustíveis e à decomposição química das matérias-primas (van OSS; PADOVANI, 2003). Cerca de 30 a 40 % das emissões diretas de CO<sub>2</sub> provêm da queima de combustíveis e os 60 a 70 % restantes são inerentes ao processo e decorrem da reação química envolvida na decomposição de calcário em óxido de cálcio (Equação 1), precursor da formação do clínquer (SNIC, 2019).



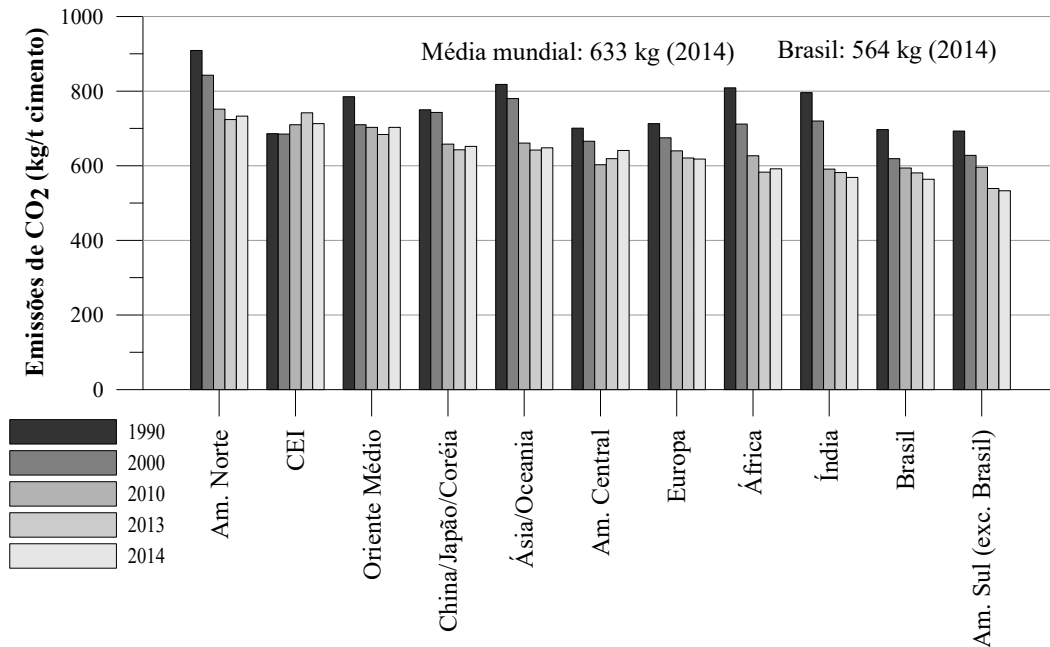
No Brasil, a parcela correspondente à queima de combustíveis representa 36 % das emissões totais, enquanto que as emissões da calcinação contribuem com outros 63 %, e apenas 1 % corresponde à energia elétrica, conforme mostrado na Figura 5 (SNIC, 2019).



**Figura 5** Emissões de CO<sub>2</sub> da produção de cimento no Brasil (Fonte: Adaptado de SNIC, 2019)

A indústria cimenteira responde, globalmente, por cerca de 7 % de todo o CO<sub>2</sub> emitido pelo homem (SNIC, 2019). No Brasil, em função de ações que vêm sendo implementadas há anos, essa participação é praticamente um terço da média mundial, ou seja, cerca de 2,6 % (WBCSD, 2014). Desde o início da contabilização das emissões de

CO<sub>2</sub> no setor, em 1990, até hoje, o Brasil tem ocupado posição de vanguarda entre os países/regiões com menor emissão específica de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento produzida no mundo, como pode ser visto na Figura 6.



**Figura 6** Emissão de CO<sub>2</sub> (kg por tonelada de cimento Portland produzido) em diferentes países e regiões (Fonte: Adaptado de SNIC, 2019)

De acordo com o SNIC (2019), entre os anos de 1990 e 2014, as emissões específicas do setor no Brasil reduziram 18 %, de 700 kg de CO<sub>2</sub>/t cimento para 564 kg de CO<sub>2</sub>/t cimento. Enquanto isso, nesse mesmo período, a produção de cimento aumentou 277 %, passando de 26 milhões para 72 milhões de toneladas. A redução das emissões de CO<sub>2</sub> da indústria do cimento se deve a ações como: uso de adições minerais que substituem o clínquer; uso de combustíveis alternativos; e eficiência térmica e elétrica dos fornos usados na produção do clínquer (tais ações serão melhor explicados no Item 2.3).

O SNIC (2019) e o WBCSD (2018) apresentam os cenários brasileiros e mundiais do fator clínquer médio e as emissões de CO<sub>2</sub> do cimento, de 2014 a 2050, conforme mostrado na Tabela 1.

A previsão apresentada é a diminuição das emissões até 2050 em quase 34 % para os dados brasileiros, com relação às emissões de 2014. Observa-se também uma redução

no teor de clínquer, ou seja, teores maiores de adições minerais serão incorporados aos cimentos. Além disso, outros fatores irão contribuir para essa redução na emissão de CO<sub>2</sub>, como utilização de combustíveis alternativos, com a utilização de biomassas e resíduos com poder energético em substituição a combustíveis fósseis não renováveis; medidas de eficiência energética, mediante investimentos em linhas e equipamentos de menor consumo térmico e/ou elétrico; tecnologias inovadoras e emergentes, por meio da pesquisa e desenvolvimento em tecnologias disruptivas, como a captura de carbono (SNIC, 2019). Estas alternativas serão melhor discutidas em no Item 2.3.

**Tabela 1** Fator clínquer e estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> por toneladas de cimento no Brasil e no mundo

	Dados brasileiros <sup>1</sup>				Dados mundiais <sup>2</sup>			
	2014	2030	2040	2050	2014	2030*	2040*	2050*
Fator clínquer (relação clínquer/cimento)	0,67	0,59	0,54	0,52	0,65	0,64	0,63	0,60
kg CO <sub>2</sub> /ton cimento	564	485	414	375	633	629	618	601

Fonte: 1 - SNIC (2019); 2 - Adaptado de WBCSD (2018).

Nota: \* As projeções para os anos de 2030, 2040 e 2050 foram estimadas de acordo com o percentual de redução apresentado no Roadmap (WBCSD, 2018), que foram de 4, 15 e 32 % para os anos de 2030, 2040 e 2050, respectivamente.

Em relação às emissões mundiais, o WBCSD (2018) aponta uma redução de 32 % dos níveis de CO<sub>2</sub> proveniente da produção do cimento de 2014 até 2050. Há também uma redução no teor de clínquer, maiores substituições por adições minerais são esperadas para as próximas décadas. Além disso, o WBCSD (2018) apresenta outras estratégias para redução das emissões mundiais que serão discutidas no Item 2.3.

Os dados mostram que mesmo que as emissões específicas do clínquer diminuam, conforme demonstrado nas projeções, isto será compensado pelo aumento estimado da produção do cimento, apresentado no Item 2.1. Como diminuir a produção não é uma opção sustentável do ponto de vista social, deve-se primar pela diminuição dos impactos ambientais, mantendo-se o aumento da produção. Então, a questão é como diminuir os impactos com o aumento da produção? Ou seja, observa-se, diante do panorama apresentado, que é primordial adotar outras estratégias para minimização de emissões de CO<sub>2</sub> devido à produção e uso do cimento Portland.

## 2.3 ESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> DO CIMENTO PORTLAND

O SNIC (2019) e o WBCSD (2018) apresentaram quatro pilares principais para redução de emissões aplicáveis à indústria do cimento Portland, que são:

- utilização de matérias-primas alternativas, por meio do uso de adições minerais e substitutos do clínquer;
- uso de combustíveis alternativos, por meio da utilização de biomassas e resíduos com poder energético, em substituição a combustíveis fósseis não renováveis, de maior emissão;
- eficiência térmica e elétrica, mediante investimentos em linhas de produção e equipamentos de menor consumo;
- tecnologias inovadoras e emergentes, por meio de pesquisas em tecnologias disruptivas, como a captura de carbono.

O SNIC (2019) aponta, como principal alternativa, elevar o uso de adições e reduzir a quantidade de clínquer no cimento. Com a redução da razão clínquer/cimento de 67 %, em 2014, para 52 %, em 2050, seria possível evitar a emissão cumulativa de cerca de 290 Mt de CO<sub>2</sub>. Isto representa 69 % do potencial de redução do setor cimenteiro até 2050 (SNIC, 2019).

Humphreys e Mahasenana (2002) afirmam que as estratégias consolidadas na indústria do cimento para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> da produção de clínquer são: a) substituição de clínquer por adições minerais como CV e EAF; b) busca do aumento da eficiência energética do processo de produção; e c) uso de combustíveis alternativos, como os bio-combustíveis. Os autores afirmam ainda que o crescimento da produção do cimento deve ser mais rápido do que o aumento da disponibilidade de EAF ou CV e, portanto, outras estratégias devem ser consideradas.

Segundo Oliveira *et al.* (2014), a estratégia mais popular para a redução dos impactos ambientais do concreto é a redução do teor de clínquer no cimento Portland. De uma forma geral, a estratégia utilizada pelos consumidores de cimento envolve a preferência por tipos de cimentos com menor teor de clínquer, com base na hipótese de que as adições minerais, que são resíduos de outras cadeias produtivas, como as cinzas volantes (CV), oriundas da queima de carvão mineral, principalmente em termoelétricas,



e a escória de alto-forno (EAF), gerada na produção do ferro-gusa, chegam para a indústria cimenteira com impacto ambiental nulo. Essa hipótese tem sido questionada por alguns autores que defendem que parte do CO<sub>2</sub> e outros impactos ambientais dos processos industriais que originaram estas adições não devem ser desprezados e sim alocados para esses resíduos (CHEN *et al.*, 2010; KURDA; SILVESTRE; BRITO, 2018; ROBAYO-SALAZAR *et al.*, 2018; ALNAHHAL *et al.*, 2018; DUMANI; MAPIRAVANA, 2018).

Em 2009, Mehta estabeleceu três ferramentas para o alcance da sustentabilidade na indústria do concreto, buscando a redução das emissões de CO<sub>2</sub>: i) menor consumo de concreto; ii) menor consumo de cimento nos traços de concreto; e iii) menor consumo de clínquer na fabricação do cimento. A primeira ferramenta está associada à concepção estrutural e à organização da cadeia produtiva da construção civil. A segunda, está associada à otimização do consumo de cimento Portland no concreto, sem diminuição do desempenho do material. Por fim, a terceira ferramenta está relacionada ao desenvolvimento na tecnologia de produção do cimento Portland e no estudo de adições que irão substituir o clínquer.

Damineli, Pileggi e John (2013) discutem estratégias para mitigar emissões de CO<sub>2</sub> da cadeia do cimento Portland e afirmam que é possível realizar diminuição substancial das emissões associadas à produção do concreto por meio da otimização do uso dos ligantes, utilizando materiais cimentícios suplementares (EAF, sílica ativa - SA, CV) e aditivos superplastificantes.

No Brasil, os teores de clínquer permitidos nos diferentes tipos de cimento e suas substituições estão normatizados pela NBR 16697 (ABNT, 2018), na qual as faixas de adição são bastante amplas. Porém, a indústria cimenteira não controla o volume de oferta das adições minerais (EAF e CV), ou seja, as adições nem sempre serão suficientes para toda a demanda da indústria nacional, ou mesmo internacional. Em momentos de grande crescimento da demanda de cimento Portland, os teores de substituição tendem a ser reduzidos, pois a produção do cimento aumenta mais rapidamente que a produção de aço e de energia por queima de carvão mineral, por exemplo (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Scrivener, John e Gartner (2018) destacam duas áreas principais que podem fornecer reduções nas emissões globais de CO<sub>2</sub> relacionadas ao cimento e ao concreto nos próximos 20 - 30 anos: i) aumento do uso de material cimentício suplementar em

substituição ao clínquer; e ii) uso eficiente do cimento em concretos e argamassas. Segundo os autores, se o nível médio de substituição de clínquer no cimento chegar a 40 % (ou seja, usar um fator clínquer menor que 0,60), pode-se evitar até 400 milhões de toneladas de emissões de CO<sub>2</sub> anualmente. Em relação ao uso mais eficiente do cimento em concretos e argamassas, os autores afirmam que a otimização do projeto da mistura pode melhorar a ecoeficiência através do empacotamento das partículas juntamente com o uso de dispersantes e adições minerais, de maneira a reduzir ainda mais o conteúdo de cimento de concretos e argamassas, mantendo o desempenho do produto.

Van Damme (2018) e Miller *et al.* (2016) também afirmam que a execução de estruturas de concreto com conteúdo de ligantes otimizadas representa uma das estratégias fundamentais para a inovação e redução do consumo de cimento Portland dentro da cadeia do concreto.

Com base no exposto, observa-se que a otimização do uso do cimento na produção dos concretos deve ser considerada como uma das ferramentas mais promissoras para o desenvolvimento de concretos ecoeficientes e deve ser mais difundida na indústria da construção civil. Isso, ao considerar que as demais medidas de mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> pela indústria cimenteira não serão suficientes, em função do aumento no consumo de cimento Portland esperado para os próximos 30 anos.

## 2.4 INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO USO DO CIMENTO

Considerando que o problema das emissões de CO<sub>2</sub> por parte da indústria do cimento tem sérios impactos ambientais e as estratégias convencionais para mitigação dessas emissões não serão suficientes, é extremamente relevante a utilização de indicadores que permitam comparar a eficiência dos concretos e estabelecer diretrizes para melhoria da ecoeficiência no consumo de ligantes nestes materiais.

### 2.4.1 Intensidade de CO<sub>2</sub> (IC)

O estudo de Damineli *et al.* (2010) propõe o primeiro indicador simplificado para a medição do desempenho ambiental de concretos: a Intensidade de CO<sub>2</sub> (IC), que mede a quantidade de CO<sub>2</sub> em relação à resistência à compressão do concreto. Dessa forma, esse indicador é representado pela razão entre as emissões de CO<sub>2</sub> da mistura de concreto (impacto), em kg.m<sup>-3</sup>, e a resistência à compressão (desempenho), em MPa (Equação 2):

$$IC = \frac{c}{Rc} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

IC = Intensidade de CO<sub>2</sub>, em kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>;

c = emissões totais de CO<sub>2</sub>, em kg.m<sup>-3</sup>;

Rc = resistência à compressão do concreto, aos 28 dias, em MPa.

As emissões totais de CO<sub>2</sub> são calculadas de maneira a contabilizar todas as emissões dos materiais constituintes do concreto na sua etapa de produção, no caso do concreto: cimento, agregados, aditivos e adições. Dessa forma, deve seguir a Equação 3:

$$c (\text{CO}_2\text{-concreto}) = c_1 (\text{CO}_2\text{-cimento}) + c_2 (\text{CO}_2\text{-adições}) + c_3 (\text{CO}_2\text{-aditivos}) + c_4 (\text{CO}_2\text{-agregados}) \quad \text{Equação 3}$$

No estudo de Damineli (2013), para o cálculo do IC, os autores consideraram apenas a quantidade relativa à produção da fração de clínquer presente nos traços de concreto, por ser esta a parcela majoritária na emissão de CO<sub>2</sub>. Os outros ligantes porventura utilizados na produção do concreto, que geralmente são resíduos industriais como a EAF, SA e CV, foram considerados nulos em termos de emissões de CO<sub>2</sub>. O autor ainda afirma que essas adições não estarão disponíveis em escala compatível para abastecer toda a demanda mundial crescente de concreto (DAMINELI, 2013).

Também, por carência de informações detalhadas sobre a produção de cada cimento utilizado nos diversos dados analisados, Damineli (2013) assumiu a emissão de 1 (uma) tonelada de CO<sub>2</sub> por tonelada de clínquer. A quantidade de clínquer no cimento foi estimada com base na média dos limites estabelecidos pelas normas que controlam a fabricação do cimento Portland, calculado pela subtração do teor total de adições minerais e assumindo um teor de sulfato de cálcio de 5 %, valor comum em cimentos mundiais. Dessa forma, esse índice acaba refletindo apenas o consumo de clínquer, negligenciando as outras contribuições e a eficiência da produção do fabricante do cimento, que pode ter emissões de CO<sub>2</sub> inferiores aos adotados conforme a eficiência energética e combustível utilizado (DAMINELI, 2013).

Esse indicador mede diretamente a ecoeficiência das misturas, quanto maior o IC, menor a eficiência. Segundo Damineli (2013), no futuro, o cálculo deste indicador será

baseado em declarações ambientais de produtos, em acordo com normas internacionais como as da família ISO 14000.

#### 2.4.2 Intensidade de ligantes (IL)

Só a substituição do clínquer por adições minerais não é garantia para obter um concreto de baixo impacto ambiental. Em geral, deve-se buscar uma redução do consumo dos ligantes com aumento do desempenho mecânico para obter um concreto mais eficiente. Desta forma, Daminieli *et al.* (2010) propuseram um segundo indicador para avaliar a eficiência dos concretos: a Intensidade de Ligantes (IL), que relaciona o consumo total de ligantes do concreto (impacto), em  $\text{kg.m}^{-3}$ , e a resistência à compressão (desempenho), em MPa (Equação 4):

$$IL = \frac{l}{R_c} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

IL = Intensidade de ligantes, em  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ ;

l = consumo total de materiais ligantes do concreto, incluindo cimento Portland e adições minerais (ativas e/ou inertes), em  $\text{kg.m}^{-3}$ ;

R<sub>c</sub> = resistência à compressão do concreto, aos 28 dias, em MPa.

O IL permite medir a quantidade de ligantes necessária para produzir uma unidade de resistência e, portanto, mede a eficiência do processo de dosagem e qualidade dos materiais constituintes, determinando a eficiência do uso dos ligantes (DAMINIELI, 2013). Quanto maior o IL, maior o teor de ligantes necessário para a realização da mesma função e, portanto, menor a ecoeficiência do concreto.

A intensidade de ligantes (IL) mede a eficiência do uso de ligantes e a intensidade de CO<sub>2</sub> (IC) permite realizar uma estimativa do potencial de aquecimento global da mistura (DAMINIELI, 2013).

## 2.5 PANORAMA DA EFICIÊNCIA DE LIGANTES EM CONCRETOS CONVENCIONAIS

A NBR 12655 (ABNT, 2015) especifica o consumo mínimo de cimento dependendo da classe de agressividade em que se encontra a estrutura de concreto. Dessa forma, o consumo mínimo varia de 260 a 360  $\text{kg/m}^3$ , quando a resistência à compressão

varia de 20 para 40 MPa. Há ainda uma restrição de máxima relação água/cimento e mínima resistência prescritas para cada uma das quatro classes de agressividade do ambiente, como pode ser verificado na Tabela 2.

**Tabela 2** Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto kg/m <sup>3</sup>	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

Fonte: NBR 12655 (ABNT, 2015).

Nota: CA - Componentes e elementos estruturais de concreto armado; CP - Componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

A Tabela 3 contém resultados de alguns trabalhos da literatura, com consumos de cimento inferiores ao mínimo estabelecido pela NBR 12655 (ABNT, 2015) para os valores de resistências à compressão, aos 28 dias, encontrados nos estudos. Observa-se que os consumos variam de 149 kg de cimento para um concreto de 43,0 MPa de resistência à compressão, do estudo de Grazia *et al.* (2019), a 355 kg de cimento para um concreto de 100,3 MPa, do estudo de Campos, Klein e Marques Filho (2020). Ou seja, verifica-se que para um concreto de 43,0 MPa de resistência à compressão, o consumo de cimento utilizado corresponde apenas a cerca de 41 % do limite estabelecido pela NBR 12655 (ABNT, 2015) que é de 360 kg de cimento no mínimo, para um concreto C40, como visto na Tabela 2.

Os resultados dos estudos em concretos convencionais mostram que os requisitos de norma sobre consumos mínimos de cimento devem ser revistos, levando em consideração o aumento dos conhecimentos científicos sobre mistura e produção de concretos, como a adoção das teorias sobre empacotamento, dispersão das partículas e afinidades químicas entre finos aglomerantes e aditivos, como já foi defendido por Wassermann, Katz e Bentur (2009) e Scrivener, John e Gartner (2018). Tais avanços no conhecimento ampliam a possibilidade de se obter maior eficiência no uso dos ligantes e permitem aplicar consumos inferiores aos estabelecidos em norma, sem prejuízo sobre a resistência e durabilidade dos concretos produzidos. Além das implicações econômicas e

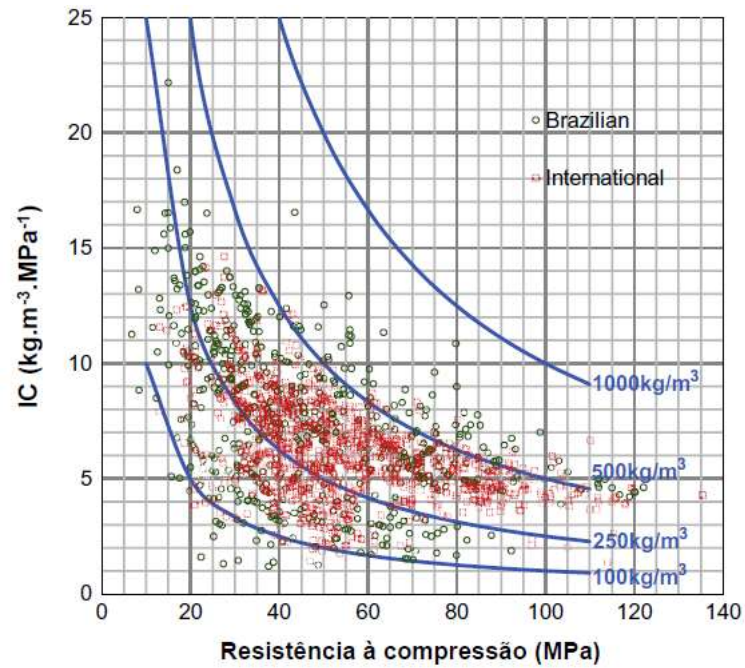
ambientais, que ao se reduzir o consumo de cimento, reduz as emissões de CO<sub>2</sub> e o custo ambiental do cimento incorporado ao concreto.

**Tabela 3** Levantamento bibliográfico dos valores de consumo de cimento e resistência à compressão, aos 28 dias, de concretos convencionais

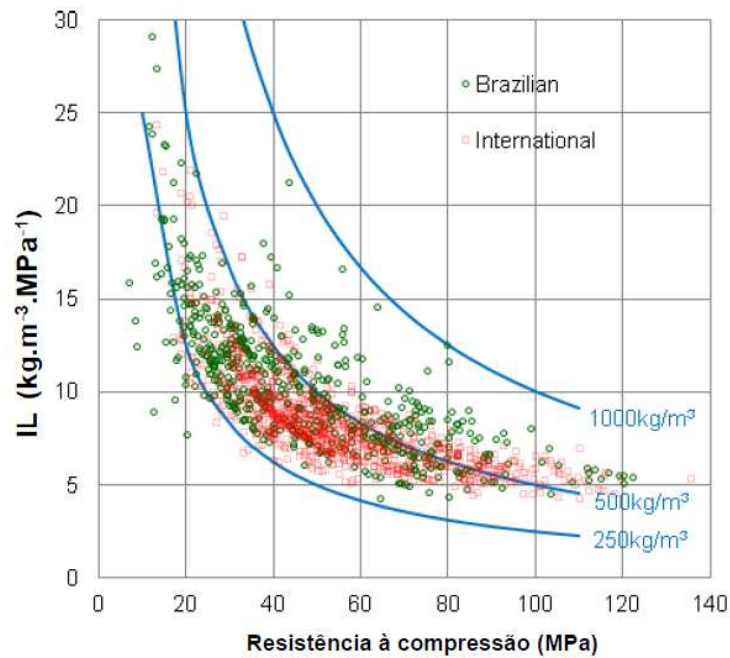
Autor	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão, aos 28 dias (MPa)
Campos, Klein e Marques Filho (2020)	315	90,6
	335	104,2
	355	100,3
Damineli (2013)	200	66,0
	282	70,0
Grazia <i>et al.</i> (2019)	261	66,0
	214	54,0
	197	54,0
	161	49,0
	149	43,0
Matos, Sakata e Prudêncio (2019)	328	58,9
	292	57,8
	255	55,3
Rebmann, Trigo e Liborio (2010)	235	37,3
Rebmann (2011)	200	51,0
	210	34,0
Wassermann, Katz e Bentur (2009)	221	40,0
	259	40,0

Damineli *et al.* (2010) realizaram um levantamento de publicações nacionais e internacionais para avaliar em que níveis de consumo de ligantes se encontram os concretos convencionais produzidos. Além disso, os autores avaliaram a eficiência desses concretos usando os dois indicadores de desempenho: IC e IL descritos no item 2.4. Um total de 156 artigos foram selecionados, dentre os publicados no período de 1988 e 2009, ou seja, foram analisados 20 anos de estudos em concretos produzidos com agregados naturais.

A Figura 7 apresenta o IC *versus* a resistência à compressão, aos 28 dias, enquanto na Figura 8 estão apresentados os resultados do IL *versus* a resistência à compressão, aos 28 dias, do levantamento realizado por Damineli *et al.* (2010).



**Figura 7** Intensidade de CO<sub>2</sub> (IC) estimada *versus* resistência à compressão, aos 28 dias (Fonte: DAMINELI *et al.*, 2010)



**Figura 8** Intensidade de ligantes (IL) *versus* resistência à compressão, aos 28 dias (Fonte: DAMINELI *et al.*, 2010)

O IC mínimo encontrado foi da ordem de  $1,5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para todas as faixas de resistência à compressão, aos 28 dias, avaliadas (cerca de 6 a 135 MPa). Em relação ao IL, o resultado do levantamento proposto por Damineli *et al.* (2010) mostrou valores variando de 4,3 a  $29 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ , sendo que a maior parte dos concretos apresenta valores de IL entre 5 e  $15 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ , conforme mostrado na Figura 8.

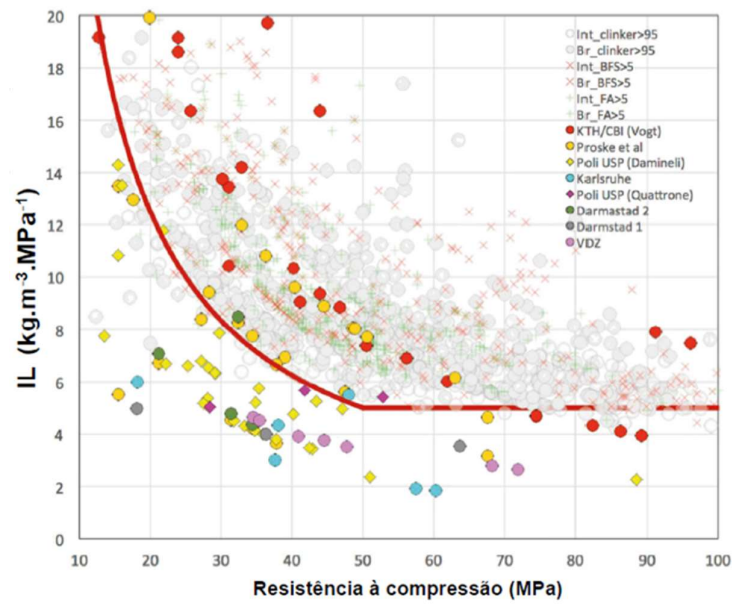
É importante lembrar que os valores de IC contêm certa imprecisão, devido às considerações feitas para a obtenção dos resultados, uma vez que apenas as emissões relacionadas com o consumo de clínquer foram consideradas. Assim, observou-se formulações de concretos com alto valor de Intensidade de Ligantes (IL) mas baixo valor de Intensidade de  $\text{CO}_2$  (IC) e, portanto, segundo Damineli *et al.* (2010), os valores encontrados para o IL são mais representativos da determinação da eficiência dos ligantes.

Damineli *et al.* (2010) encontraram um IL mínimo de  $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para concretos com resistências acima de 50 MPa. Os autores estabelecem o valor de  $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  como uma meta realista em um futuro não tão distante. Para concretos de 20 MPa, o IL mínimo encontrado foi de cerca de  $13 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ . Os autores também sugerem que são necessárias mais pesquisas sobre as implicações das reduções significativas de teor de cimento no desempenho a longo prazo dos concretos, pois a resistência à compressão pode não ser o único parâmetro a definir o consumo mínimo de cimento.

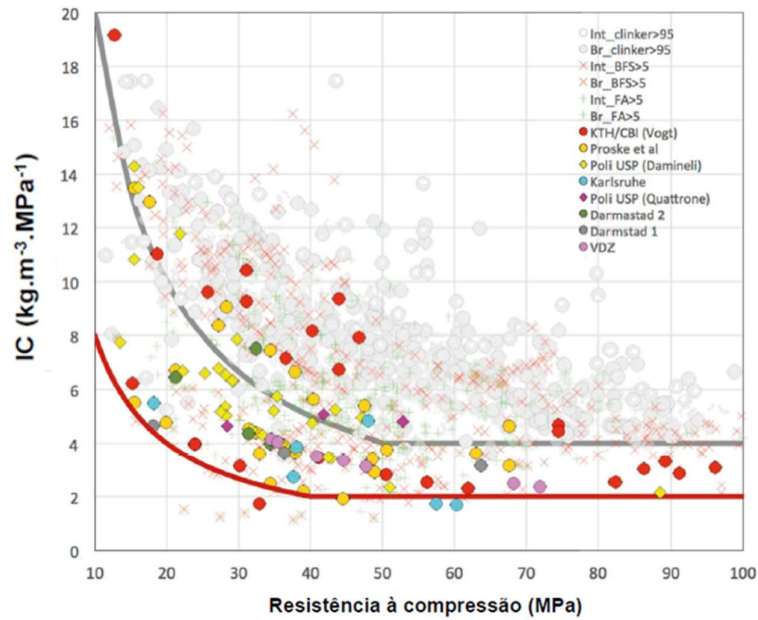
Depois de Damineli *et al.* (2010), alguns outros estudos utilizaram esses indicadores (IC e IL) para medir a eficiência de concretos convencionais (YANG; SONG; SONG, 2016; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018; GRAZIA *et al.*, 2019; MATOS; SAKATA; PRUDÊNCIO, 2019; LIM; ELLIS; SKERLOS, 2019).

Scrivener, John e Gartner (2018) apresentam dados de IC e IL, de concretos desenvolvidos na Universidade de São Paulo (USP), com valores de IL inferiores a  $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  e IC inferior a  $2 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ . Os autores uniram estes resultados com os dados de Damineli *et al.* (2010), conforme apresentado nas Figuras 9 e 10.





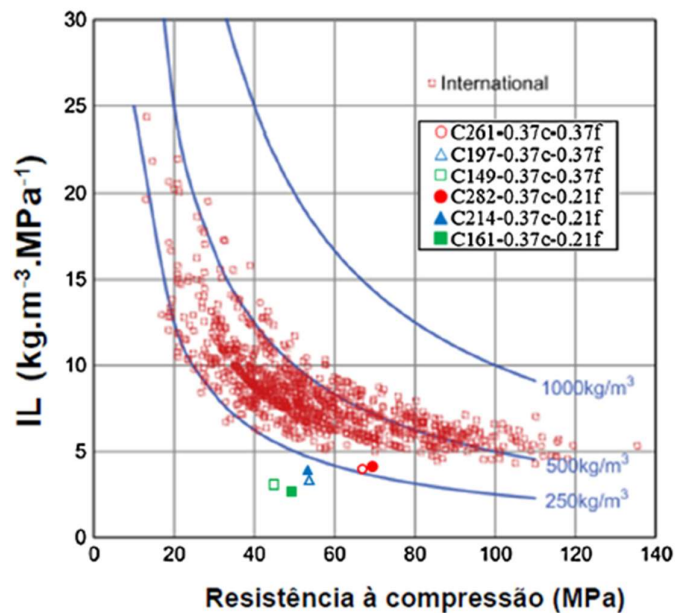
**Figura 9** Novos resultados de intensidade de ligantes (IL) *versus* resistência à compressão, aos 28 dias, do estudo de Scrivener, John e Gartner (2018)



**Figura 10** Novos resultados de intensidade de  $\text{CO}_2$  (IC) *versus* resistência à compressão, aos 28 dias, do estudo de Scrivener, John e Gartner (2018)

O IL mínimo observado foi de  $2 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para concretos com resistência à compressão acima de 50 MPa. Para concretos com resistência à compressão de 30 MPa a intensidade mínima de ligante foi de cerca de  $8 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ , mas a média foi de cerca de  $12 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ . O IC mínimo observado foi de cerca de  $2 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para concretos com resistência à compressão entre 40 - 50 MPa e que aumentou exponencialmente para resistências mais baixas. Os valores de IC mais baixos foram alcançadas substituindo o clínquer por adições minerais (SCRIVENER, JOHN; GARTNER, 2018).

Grazia *et al.* (2019) avaliaram misturas com baixos conteúdos de cimento, obtidos utilizando modelos de empacotamento de partículas (MEP). Os autores encontraram, para todas as misturas analisadas, valores de IL inferior a  $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ , com resistência à compressão entre 40 e 60 MPa, e consumos de ligantes abaixo de 250 kg. Isso representa concretos com ecoeficiências elevadas quando comparados com os valores do panorama estabelecido por Damineli *et al.* (2010), conforme pode ser observado na Figura 11.



**Figura 11** Resultados de intensidade de ligantes (IL) versus resistência à compressão, aos 28 dias, do estudo de Grazia *et al.* (2019)

Observa-se que já foram encontrados valores inferiores à meta estabelecida por Damineli *et al.* (2010). Isso evidencia que melhores eficiências são possíveis para os concretos convencionais, quando comparadas com os valores do panorama estabelecido em 2010 por Damineli *et al.* (2010). Assim, a estratégia de otimização de ligantes para

redução das emissões de CO<sub>2</sub> se torna ainda mais promissora, tendo em vista que na última década é crescente a obtenção de concretos com melhores eficiências.

As principais metodologias aplicadas para a redução do consumo de cimento e, paralelamente, ao ganho de resistência são: a redução da relação água/cimento, utilização de adições minerais para melhoria da zona de transição e refinamento dos poros, uma completa dispersão das partículas com o uso de aditivos superplastificantes, e máximo preenchimento do volume do concreto pelos agregados (CAMPOS, KLEIN; MARQUES FILHO, 2020; GRAZIA *et al.* 2019; MATOS; SAKATA; PRUDÊNCIO, 2019; BARBOZA, 2016; WASSERMANN; KATZ; BENTUR, 2009; REBMANN, 2011).

Em um concreto com menor consumo de cimento, e, portanto, maior conteúdo de agregados, tem-se maior área superficial de cada grão de agregado, portanto zonas de interface de maior extensão (REBMANN, 2011). Dessa forma, melhorias na zona de transição, decorrentes do uso de aditivos e adições minerais, são muito recomendáveis nos concretos com baixo consumo de cimento.

No levantamento realizado por Damineli *et al.* (2011), todas as misturas com IL < 6 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup> apresentaram adições de partículas finas dispersas. Dentre esses finos, a faixa granulométrica entre 1 e 25 μm (grãos de tamanho igual aos cimentos mais comuns) é ainda pouco explorada, como apontado por Damineli (2013). O autor justifica uma maior demanda de água para essa faixa, porém afirma que é uma das alternativas mais promissoras do ponto de vista do empacotamento de partículas, e que o aumento na demanda de água pode ser compensado com o uso de dispersantes.

Barboza (2016) afirma que a influência do empacotamento é mais expressiva para as adições mais finas, como a sílica ativa. O uso de sílica ativa em proporções de 5 a 10 % já é comum na produção de concretos de alto desempenho. Melo (2000) afirma que a proporção de 10 % de sílica ativa é capaz de contribuir, com boa relação custo/benefício, com o incremento da resistência mecânica, principalmente em idades mais avançadas. Pereira (2010) indica ainda que a troca de cerca de 25 % de sílica ativa por metacaulinita melhora o empacotamento entre estes materiais mais finos, obtendo ganhos de resistência, como visto num estudo realizado com argamassas.

Rebmann (2011) utilizou 7,5 % de sílica ativa e 2,5 % de metacaulinita, em proporção volumétrica, em relação ao total de aglomerantes, com consumos de cimento de 279 e 199 kg/m<sup>3</sup> e obteve IL de 4,1 e 3,8 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>, respectivamente.

Outro exemplo é o estudo apresentado por Rebmann, Trigo e Liborio (2010), no qual foram avaliados dois concretos convencionais. O primeiro com consumo de cimento Portland de 260 kg/m<sup>3</sup> sem adição e o segundo com 235 kg/m<sup>3</sup> de cimento e 18 kg/m<sup>3</sup> de sílica ativa. O primeiro apresentou resistência à compressão, aos 28 dias, de 24,2 MPa e IL de 10,7 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>; o segundo apresentou resistência de 37 MPa e IL de 6,3 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>, ou seja, um concreto mais eficiente quando comparado com o primeiro concreto sem adições.

Damineli (2013) também produziu um concreto de 210 kg/m<sup>3</sup> de cimento Portland e 10 kg/m<sup>3</sup> de sílica ativa, obtendo um IL de 2,38 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>, sendo o concreto de maior eficiência produzido em seu estudo.

Matos, Sakata e Prudêncio (2019) avaliaram o uso de cinza volante em substituição ao cimento Portland nos teores de 10, 20 e 30 %. Os concretos contendo cinzas volantes mostraram resistências à compressão, aos 28 dias, de até 59 MPa (10 % de cinzas volantes), 58 MPa (20 % de cinzas volantes) e 55 MPa (30 % de cinzas volantes), com bons indicadores de durabilidade. Esses resultados são provenientes de traços com 365 kg/m<sup>3</sup> de ligantes e portanto, geram IL de 6,2 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>, 6,3 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup> e 6,6 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>, respectivamente.

O emprego dos fíleres também é uma opção para a melhoria da matriz cimentícia dos concretos ecoeficientes, pela sua função de preenchimento e, conseqüentemente, empacotamento das partículas no sistema. O uso de finos inertes tem sido desprezado devido ao fato de comumente demandarem maior teor de água, diminuindo a resistência, já que não contribuem de forma importante com a resistência mecânica dos concretos por meio dos processos de hidratação. Porém, a utilização dos aditivos químicos é capaz de dispersar os finos de forma efetiva, o que permite formulações de concretos com resistências equivalentes, como já foi demonstrado nos estudos de Damineli (2013), Damineli *et al.* (2017), Barboza (2016), Rebmann, Trigo e Liborio (2010), Barboza e Almeida Filho (2015) e Grazia *et al.* (2019).

Quando se tem a pretensão de reduzir a relação água/cimento (a/c) sem aumentar o consumo de cimento, necessariamente será necessária a inserção de aditivos superplastificantes nas misturas. No estudo realizado por Daminieli (2013), os menores valores de IL dos concretos brasileiros ( $< 5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ ) foram obtidos por meio de uma combinação de uma relação a/c muito baixa, misturas com sílica ativa e aditivos superplastificantes, resultando em concretos com resistência à compressão sempre acima de 60 MPa.

Matos, Sakata e Prudêncio (2019) utilizaram um teor máximo de 1 % de aditivo superplastificante para todas as misturas analisadas. Campos, Klein e Marques Filho (2020) utilizaram um teor máximo de 1,8 % de aditivo superplastificante, teor que variava de acordo com o teor de pasta do concreto. A mistura com 29 % de pasta (ou seja, o menor teor de pasta), utilizou 1,8 % de SP, em massa em relação aos ligantes, ao aumentar o volume da pasta para 31 %, o teor de aditivo foi de 1,5 % e para 33 % de pasta, o teor de SP foi de 1,2 %.

### 3 ECOEFICIÊNCIA NO CONSUMO DE CIMENTO X COMPORTAMENTO DOS CONCRETOS COM RCD

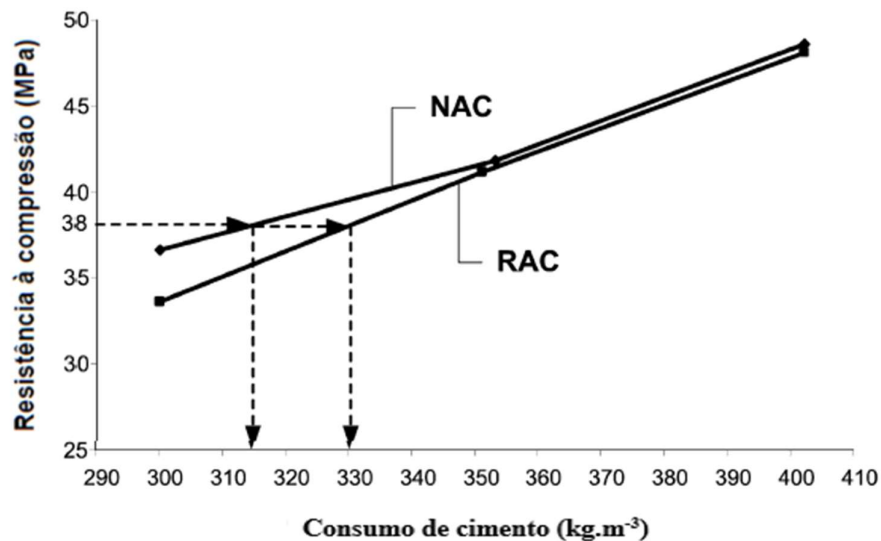
O capítulo anterior apresentou um panorama sobre a produção de cimento, as emissões de CO<sub>2</sub> associadas e estratégias que vem sendo adotadas para mitigação dessas emissões. Além disso, apresentou os indicadores de desempenho utilizados para os concretos convencionais que serão aplicados para os concretos reciclados e um panorama da eficiência de ligantes para os primeiros. O comportamento dos concretos reciclados normalmente é diferente dos concretos convencionais. Os agregados reciclados de RCD apresentam características específicas que podem impactar nas propriedades do concreto, o que têm uma implicação sobre a ecoeficiência no uso de ligantes, principalmente no caso da resistência à compressão.

#### 3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O uso de RCD como agregado reciclado geralmente aumenta o consumo de cimento dos concretos, quando o mesmo desempenho apresentado pelos concretos convencionais é requerido. Isso pode ser constatado em vários estudos e representa uma lacuna na tecnologia do concreto reciclado para se atender ao objetivo da sustentabilidade (ANGULO *et al.*, 2010; RYU, 2002; OTSUKI, MIYAZATO; YODSUDJAI, 2003; MARINKOVIC *et al.*, 2010; BOGAS; BRITO; RAMOS, 2016; PEDRO *et al.*, 2019; ETXEBERRIA; VÁZQUEZ; MARÍ, 2006; VIEIRA; FIGUEIREDO; JOHN, 2020).

Marinkovic *et al.* (2010) estabeleceram uma relação entre a resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados e naturais com os valores de consumo de cimento, os resultados estão apresentados na Figura 12. Os autores avaliaram misturas com 100 % de agregados graúdos naturais e 60 % de agregados graúdos reciclados de concreto. Observa-se que, para a mesma relação a/c, o concreto com agregado reciclado tem resistência à compressão ligeiramente menor do que o concreto com agregado natural. Usando esta relação, os autores determinaram o teor de cimento para se alcançar uma resistência à compressão de pelo menos 38 MPa, e para isso, o concreto com agregado reciclado precisaria de um consumo de cimento cerca de 5 % maior que o concreto com agregado natural. Os autores apontam como causa da redução do desempenho do concreto reciclado, a alta taxa de absorção de água de agregados reciclados, sendo necessário saturar o agregado reciclado antes ou durante a mistura, para obter a trabalhabilidade adequada. Além disso, a densidade do CR é ligeiramente inferior

(cerca de 6 %) do que a densidade de CC por causa da densidade mais baixa do agregado de concreto reciclado.



**Figura 12** Relação entre a resistência à compressão do concreto com agregado natural (NAC) e concreto com agregado reciclado (RAC) e o consumo de cimento (Fonte: MARINKOVIC *et al.*, 2010)

González-Fonteboa e Martínez-Abella (2008) avaliaram concretos com 50 % de AGR misto e compararam com concretos com 100 % de agregados naturais. Os concretos reciclados produzidos apresentaram uma quantidade de cimento 6,2 % maior quando comparada com o concreto convencional produzido, para a mesma resistência à compressão (aproximadamente 30 MPa, aos 28 dias) e com a mesma consistência. Os autores justificam esse comportamento devido à alta taxa de absorção de água dos agregados reciclados quando comparados com os naturais.

Etxeberria, Vázquez e Marí (2006) avaliaram concretos com 25, 50 e 100 % de AGR de concreto. Os autores aumentaram em 6,0 e 8,3 % a quantidade de cimento para o concreto com 50 e 100 % de AGR, respectivamente, para alcançar uma resistência à compressão semelhante a do concreto de referência. Os autores atribuem o aumento no consumo de cimento à alta porosidade dos agregados reciclados, o que exigiu uma fase pasta de cimento mais densa.

Angulo *et al.* (2010) avaliaram como a porosidade do agregado graúdo misto de RCD influencia na resistência à compressão do concreto. O uso do AGR aumentou o

consumo de cimento em pelo menos 5 %, quando comparado com concreto com agregados naturais, produzidos para se atingir a mesma resistência à compressão. Os autores associam essa perda de resistência a presença de uma fraca camada de pasta de cimento e até mesmo asfalto nos grãos de agregados reciclados. Assim, Angulo *et al.* (2010) concluíram que o uso de 100 % de AGR misto pode ser negativo do ponto de vista ambiental, devido à necessidade de acréscimo no consumo de cimento dos CR.

A Tabela 4 apresenta as perdas, em percentual, da resistência à compressão das misturas com agregados reciclados comparadas com as misturas com agregados naturais de vários estudos, para um mesmo consumo de cimento.

**Tabela 4** Perdas, em percentual, dos resultados de resistência à compressão de acordo com o teor de agregado reciclado (AR)

Autor	Teor de AR	C (kg)	Adição mineral		f <sub>CREC</sub> /f <sub>CREP</sub> (%)
			Tipo	Teor (kg)	
Gómez-Soberon (2002)	60% AGR	400	-	-	8,2
	100% AGR	400	-	-	11,6
Katz (2003)	100% AGR	296	-	-	22,5
Zaharieva, Buyle-Bodin e Wirquin (2004)	100 % AGR	400	-	-	9,9
Xiao, Li e Zhang (2005)	30% AGR	430	-	-	5,6
	50% AGR	430	-	-	12,2
	70% AGR	430	-	-	10,0
	100% AGR	430	-	-	11,5
Rahal (2007)	100% AGR	360-460	-	-	9,3-14,3
Ângulo <i>et al.</i> (2010)	40% AGR	300-500	-	-	9,1-33,3
Corinaldesi (2010)	30% AGR	310-350	-	-	18,4-22,3
Kou e Poon (2012)	50% AGR	410	-	-	12,6
	100% AGR	410	CV	102,5	38,0
Bahrami <i>et al.</i> (2020)	50%AGR	500	FC	100	14,1
	75% AGR	500	FC	100	19,6
	100% AGR	500	FC	100	33,8
Evangelista e Brito (2007)	100% AMR	362	-	-	7,6
Bogas, Brito e Ramos (2016)	100% AMR	350	-	-	14,1
	100% AMR	420	-	-	27,4

Nota: C-Consumo de ligantes, em kg, para produzir 1 m<sup>3</sup> de concreto, correspondente ao consumo de cimento e de adições minerais (pozolânicas e inertes), CV-Cinza Volante, FC-Filer Calcário



Observa-se que a resistência à compressão do concreto com agregado reciclado, quando comparada com o concreto de referência, reduz em até 38,0 %, como no estudo de Kou e Poon (2012), e pode ser de no mínimo 5,6 %, quando se usa 30 % de AGR, como observado por Xiao, Li e Zhang (2005). Os resultados também apontam que há um aumento da taxa de redução da resistência à compressão do CR, em comparação ao CC, quando o teor de AGR aumenta e o consumo de cimento é mantido, como nos estudos de Gómez-Soberon (2002), Xiao, Li e Zhang (2005), Kou e Poon (2012) e Bahrami *et al.* (2020). De maneira geral, os autores justificam esse comportamento devido a maior porosidade, menor resistência e menor módulo de elasticidade do grão de agregado reciclado. Dessa forma, para se atingir resistências equivalentes seria necessário aumentar o consumo de cimento. Contudo, se a relação a/c reduzir muito, nem mesmo o aumento no consumo de cimento pode resultar em melhoria da resistência, como é o caso do estudo de Bogas, Brito e Ramos (2016). Os autores verificaram uma redução mais acentuada da resistência à compressão (27,4 %), em comparação com o concreto de referência, quando o CR foi produzido com 420 kg de cimento, e uma menor redução (14,1 %) quando se utilizou 350 kg de cimento, para o mesmo teor de AMR (100 %). A primeira mistura apresenta uma relação a/c igual a 0,35 e a segunda um a/c igual a 0,53. Ou seja, quando há a redução da relação a/c, e conseqüente melhoria da matriz cimentícia, o AR contribui de modo mais acentuado na redução da resistência devido a sua natureza porosa e baixa resistência do grão do agregado, que funciona como um defeito na mistura e atua como elo fraco do sistema.

Também foram encontrados na literatura alguns estudos com resistências equivalentes, ou seja, a taxa de redução da resistência à compressão do CR foi menor ou igual a 5 %<sup>2</sup>, quando comparado com o CC, para os mesmos valores de consumo de cimento. Tais resultados estão apresentados na Tabela 5.

Observa-se que todos os estudos que apresentaram equivalências de resistência, possuem elevados consumos de ligantes ( $C > 500 \text{ kg/m}^3$ ). Isso diminui a ecoeficiência dos concretos reciclados, tendo em vista que o material com maior impacto ambiental na cadeia do concreto, é o cimento, como já foi discutido no Item 2.2. Esse fato, evidencia

---

<sup>2</sup> Para resistência à compressão é usual trabalhar com coeficientes de determinação de no mínimo 95 %, ou seja, admite-se para essa propriedade variações nos resultados de até 5,0 %.

ainda mais a necessidade da busca pela otimização do consumo de ligantes nos concretos reciclados, de maneira a melhorar a ecoeficiência desse tipo de concreto.

**Tabela 5** Resultados equivalentes de resistência à compressão do CR em comparação ao concreto convencional em função do teor de agregado reciclado e do consumo de cimento

Autor	Teor de AR	C (kg)	Adição mineral		$f_{c_{REC}}/f_{c_{REF}}$ (%)
			Tipo	Teor (kg)	
Ryu (2002)	100%AGR	620	SA	62	0,1
Otsuki, Miyazato e Yodsudjai (2003)	100%AGR	620	SA	62	0
Kapoor, Singh e Singh (2016)	50%AGR	615	CV	185	4
Tuyan, Aghabaglou e Ramyar (2014)	60%AGR	612	CV/FC	135/162	2,3
	60%AGR	607	CV/FC	135/157	3,1
	60%AGR	601	CV/FC	135/151	3,7
Branco (2012)	20%AMR	567	-	-	1,9
	40%AMR	567	-	-	0,85
Pedro <i>et al.</i> (2019)	100% AGR/100%AMR	605	CV	55	3,5

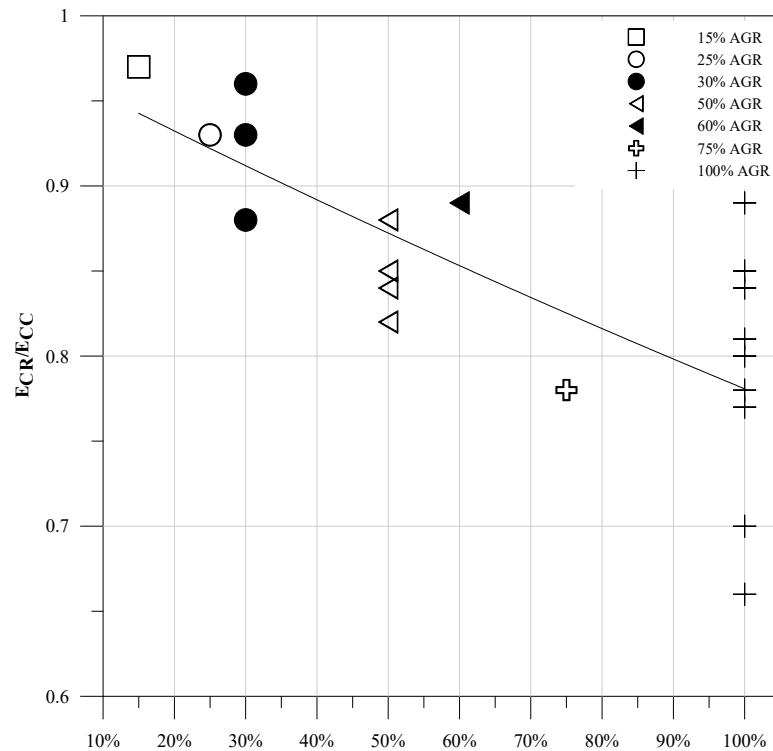
Nota: C-Consumo de ligantes, em kg, para produzir 1 m<sup>3</sup> de concreto, correspondente ao consumo de cimento e de adições minerais (pozolânicas e inertes), SA-Sílica Ativa, CV-Cinza Volante, FC-Fíler Calcário.

### 3.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Alguns autores indicam que o módulo de elasticidade dos CR geralmente é menor que o CC (BAIRAGI; RAVANDE; PAREEK, 1993; LEITE, 2001; LEVY, 2001; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002; RAHAL, 2007; EVANGELISTA; BRITO, 2007; CORINALDESI, 2010; FONSECA; BRITO; EVANGELISTA, 2011; ETXEBERRIA; VÁZQUEZ; MARÍ, 2006; GONZÁLEZ-FONTEBOA; MARTÍNEZ-ABELLA, 2008; LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012). Isso ocorre devido a maior porosidade do agregado que ocasiona uma menor resistência e menor módulo de elasticidade do grão de agregado reciclado.

No gráfico da Figura 13 estão representados a relação entre módulo de elasticidade do concreto reciclado ( $E_{cr}$ ) e o módulo de elasticidade do concreto convencional ( $E_{cc}$ )

*versus* o teor de substituição dos concretos contendo agregados graúdos reciclados de alguns estudos disponíveis na literatura (BAIRAGI; RAVANDE; PAREEK, 1993; LEITE, 2001; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002; EVANGELISTA; BRITO, 2007; GONZÁLEZ-FONTEBOA; MARTÍNEZ-ABELLA, 2008; LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012).



**Figura 13**  $E_{cr}/E_{cc}$  versus teor de substituição de misturas com AGR

Todos os estudos apresentados na Figura 13 foram de concretos com AGR de concreto. Verifica-se uma taxa de redução do módulo de elasticidade de até 35 % para os CR com 100 % de AGR. Outros resultados de literatura também apontam elevadas reduções (até 40 %) para o módulo de elasticidade de concretos com agregados reciclados de diferentes origens e composições (BAIRAGI; RAVANDE; PAREEK, 1993; LEITE, 2001; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002; EVANGELISTA; BRITO, 2007; GONZÁLEZ-FONTEBOA; MARTÍNEZ-ABELLA, 2008; LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012).

Brito e Alves (2010) e Cabral (2013) associam os baixos valores de módulo dos CR, às características mecânicas inferiores dos AR, principalmente a menor rigidez. Leite (2001) afirma que o módulo de elasticidade dos agregados reciclados se aproxima dos

valores de módulo de elasticidade da matriz da pasta de cimento, tendo em vista que a composição dos resíduos de RCD se dá basicamente a partir de materiais de base cimentícia e compostos cerâmicos. Como a porosidade do agregado controla a restrição de deformação da matriz, e como o agregado reciclado é mais deformável do que o agregado natural, o concreto produzido com AR é mais deformável do que o concreto produzido com agregados naturais.

Como visto anteriormente, uma alternativa para melhorar o comportamento mecânico do CR com elevados teores de AR é o aumento da quantidade de cimento (conforme apresentado no Item 3.2). Contudo, isso pode comprometer a ecoeficiência dos CR em termos dos consumos de ligantes. Além disso, uma outra questão que surge, é que mesmo que se atinja elevados valores de resistência à compressão ( $f_c > 50$  MPa), o módulo de elasticidade de concretos reciclados para fins estruturais, com elevados teores de AR, poderá ser reduzido. Tal fato inviabilizaria a redução do volume de concreto, pois os elementos estruturais não poderiam ter suas seções reduzidas devido às elevadas deformações do CR. Dessa forma, a redução do volume de concreto utilizado nas estruturas, um dos parâmetros estabelecidos por Mehta (2009) como um caminho para a sustentabilidade na indústria do cimento e do concreto, provavelmente não seria alcançado.

Assim, além de buscar melhorias nos consumos de ligantes dos CR, de modo que o seu desempenho mecânico seja atingido, é necessário que se busque também alternativas para minimizar o efeito que o uso de elevados teores de AR possam ter no módulo de elasticidade desses concretos, devido a elevada porosidade dos grãos deste agregado.

### 3.3 PERMEABILIDADE

Além da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, os concretos reciclados também têm a sua porosidade total afetada pelo AR. Geralmente, o concreto com agregados reciclados é mais poroso quando comparado com o concreto com agregados naturais. A matriz de cimento bem como os materiais cerâmicos são mais porosos que o agregado natural. Portanto, quanto maior o teor de AR, seja de concreto, argamassa, cerâmico, ou misto, maior o conteúdo de poros no concreto e, conseqüentemente, maior tende a ser sua permeabilidade (WAINWRIGHT; CABRERA, 1994; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002; ETXEBERRIA; VAZQUEZ MARÍ, 2006; BRITO; ALVES, 2010; EVANGELISTA; BRITO, 2010).

Segundo Gómez-Soberón (2002), concretos reciclados podem possuir valores de permeabilidade que são o dobro dos concretos convencionais, isso acontece principalmente para concretos com altos teores de AR.

Os agregados reciclados, de um modo geral, apresentam elevada taxa de absorção de água, em função da sua maior porosidade. Esta absorção resulta em alterações no teor de água das misturas, e têm implicação direta sobre as propriedades microestruturais dos materiais à base de cimento (PADOVAN, 2013).

Segundo Leite (2001), a maior quantidade de água que será incorporada à mistura, propiciará um aumento na relação água/cimento, e conseqüente redução da resistência mecânica do concreto produzido com agregado reciclado. Dessa forma, para uma melhor ecoeficiência dos concretos reciclados, essa absorção dos agregados reciclados deve ser corrigida. Alguns autores produziram concretos reciclados com a taxa de absorção dos agregados compensadas totalmente e conseguiram elevados valores de resistência à compressão ( $f_c > 40$  MPa) para consumos de ligantes não tão altos ( $C < 380$  kg) (EVANGELISTA; BRITO, 2007; PACHECO et al., 2015; ETXEBERRIA; VÁZQUEZ; MARÍ, 2006; AKBARNEZHAD *et al.*, 2011; PEDRO *et al.*, 2019). Assim, se um aumento na resistência à compressão é um indicativo de redução da porosidade, compensar a taxa de absorção de água do AR pode conduzir a melhores eficiências dos concretos reciclados em função do uso de ligantes, e também pode contribuir para a redução da permeabilidade desses concretos.

#### 3.4 A INFLUÊNCIA DO PROCESSAMENTO DOS RESÍDUOS NA ECOEFICIÊNCIA DOS CONCRETOS RECICLADOS

Algumas propriedades dos concretos são alteradas com o uso de agregados reciclados em substituição aos naturais, conforme já discutido nos itens 3.1, 3.2 e 3.3. Para minimizar o efeito que AR exerce sobre as propriedades do novo concreto foram relatados na literatura alguns métodos para tentar reduzir a porosidade do agregado, ou anular sua influência.

Um dos fatores que impactam nas propriedades mecânicas dos agregados reciclados é a presença de argamassa antiga aderida, no caso dos AR de concreto, o que aumenta a porosidade, diminui a densidade, gerando uma menor resistência à compressão, conforme

já foi discutido em 3.1. O teor de argamassa antiga aderida no agregado reciclado de concreto pode variar entre 20 e 70 % (LI, 2008).

Vários métodos de tratamento para tentar eliminar a maior parte dessa argamassa aderida foram propostos para melhorar a qualidade do AGR (SHIMA *et al.*, 2005; MULDER *et al.*, 2007; AKBARNEZHAD *et al.*, 2011). Os mais relatados na literatura são: tratamento térmico, mecânico, termomecânico e químico (pré-embrição ou imersão dos agregados reciclados em diferentes solventes ácidos). No entanto, não se deve levar em consideração somente a melhor qualidade dos AGR e, conseqüentemente, dos concretos produzidos, mas também o tempo e energia consumido no tratamento, o que vai gerar um impacto ambiental que pode inviabilizar a utilização do material do ponto de vista prático e/ou ambiental.

Alguns tratamentos térmicos são destacados na literatura com bons resultados no que diz respeito à remoção da pasta de cimento (SHIMA *et al.*, 2005; MULDER *et al.*, 2007; AKBARNEZHAD *et al.*, 2011). O aquecimento gera fissuras na pasta de cimento e parte da argamassa antiga aderida se separa da superfície do agregado, reduzindo o seu percentual no grão. Porém, geralmente não é contabilizado o impacto ambiental desses processos, no que tange ao consumo energético decorrente do tratamento térmico.

Shima *et al.* (2005) apresentam um tratamento termomecânico para se obter agregado reciclado de alta qualidade. O resíduo é aquecido em um forno vertical a base de querosene, a uma temperatura de cerca de 300 °C e submetido à abrasão em um moinho de bolas rotativo. Devido à temperatura do processo, que apenas fragiliza a pasta, a moagem é necessária para remover a maior parte da pasta de cimento. Os autores propõem a reutilização da fração fina, proveniente da pasta de cimento removida, na produção do cimento, de modo a reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> da indústria do cimento.

Mulder *et al.* (2007) também utilizaram um tratamento termomecânico semelhante. Os autores utilizaram um forno rotativo em que o resíduo de concreto é tratado termicamente a uma temperatura de aproximadamente 700 °C para retirar a pasta de cimento antiga aderida. Após o tratamento, os constituintes podem ser separados por simples peneiramento. Esses agregados secundários retêm cerca de 2 % da pasta de cimento aderida, em volume. Contudo, os impactos ambientais também não foram considerados.

Akbarnezhad *et al.* (2011) utilizaram também um tratamento termomecânico, porém, com a utilização de um forno de micro-ondas a 140 °C e, posteriormente, os agregados foram submetidos a abrasão, para remover a argamassa antiga aderida das partículas de AGR. Os autores constataram que para substituição de até 40 % praticamente não houve perda de resistência em relação ao concreto de referência (sem agregados reciclados). Os concretos produzidos com os agregados tratados apresentaram resultados de resistência à compressão aproximadamente 30 % maiores quando comparados com os concretos que utilizaram os agregados sem tratamento. No entanto, isso gera um consumo energético que não foi contabilizado, o que diminui a ecoeficiência deste tipo de concreto.

Quattrone, Angulo e John (2014) analisaram os impactos ambientais em termos de consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> das técnicas de processamento mecânicos e termomecânicos que produzem AGR de alto desempenho, reduzindo o volume da pasta de cimento antiga aderida. Os autores concluíram que, com exceção do aquecimento por micro-ondas, o consumo de energia por tonelada de agregado graúdo produzida pelo processo termomecânico é entre 36 e 62 vezes maior do que o do processo de reciclagem convencional. Além disso, observou-se que o processamento mecânico aumenta o consumo de energia de 3 a 4 vezes em comparação com a reciclagem convencional (apenas britagem, separador magnético e peneiramento). Os resultados dos consumos de energia e emissões de CO<sub>2</sub> destes procedimentos estão detalhados na Tabela 6.

**Tabela 6** Valores de consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> para os diferentes tratamentos dos AGR

	Reciclagem convencional	Tratamento mecânico	Tratamento térmico
Consumo de energia (MJ/t)	37	-	1400 - 2300
Emissões de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> / t)	1,5 - 4,5	3,8 - 21,7	~200

Fonte: Adaptado de Quattrone, Angulo e John (2014).

Dessa forma, segundo Quattrone, Angulo e John (2014), a remoção da pasta de cimento antiga do agregado de concreto para produzir agregado reciclado de alto desempenho só é viável do ponto de vista ambiental em locais onde os agregados naturais são muito escassos, com elevadas distâncias de transporte. Além disso, a reutilização dos finos gerados nos processos pode minimizar a carga ambiental associada a cada tipo de processo. Os autores ainda concluem que, do ponto de vista ambiental, o processo

mecânico e o processo de aquecimento por micro-ondas parecem ter o maior potencial de aplicação, quando comparado aos demais processos.

Além desses tratamentos, alguns autores utilizaram o tratamento de superfície nos agregados graúdos reciclados (KATZ, 2004; YOUNIS; PILAKOUTAS, 2013; ISMAIL; RAMLI, 2014). Katz (2004) tratou os agregados graúdos de concreto por impregnação de solução de sílica ativa e por limpeza ultrassônica. Um aumento de 30 e 15 % na resistência à compressão, aos 7 e 28 dias, foi observado após o tratamento com sílica ativa. O tratamento ultrassônico resultou em uma melhora de 7 %.

Younis e Pilakoutas (2013) também utilizaram um tratamento de superfície para melhorar a qualidade dos agregados. Os autores utilizaram pequenas quantidades de microfíleres reativos e não reativos para um tratamento de superfície nos agregados e conseguiram concretos com resistências elevadas ( $f_c \geq 50$  MPa).

Ismail e Ramli (2014) utilizaram dois tipos de tratamentos de superfície. No primeiro, os AGR foram tratados por imersão em ácido clorídrico (HCl) na concentração de 0,5 mol/ litro e no segundo, os agregados foram impregnados com solução de metassilicato de cálcio para revestir sua superfície. Os resultados do estudo mostram que o efeito da combinação desses dois métodos de tratamento de superfície é benéfico. A densidade de partícula, absorção de água e resistência mecânica do AGR são significativamente melhoradas. E, conseqüentemente, o concreto produzido com o AGR tratado apresentou resistência mecânica que se aproxima do concreto com agregados naturais e supera a resistência do concreto com AGR não tratado. Além disso, observou-se uma redução da retração por secagem do CR em comparação ao concreto com agregados naturais.

Com base no que foi exposto, é interessante mencionar que os diferentes tipos de tratamentos devem ser avaliados quando se trata de eficiência dos concretos reciclados. CR produzidos com AGR submetidos a algum tipo de tratamento provavelmente irão resultar em concretos mais eficientes. Porém, deve-se avaliar o tipo de tratamento utilizado em termos de consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>. Pois o tratamento do agregado pode ser expressivo do ponto de vista ambiental, o que diminuir a ecoeficiência deste tipo de concreto.



### 3.5 CONSIDERAÇÕES

A ecoeficiência no consumo de ligantes está intimamente relacionada com o comportamento dos concretos reciclados. Conforme relatado na literatura, os concretos reciclados tendem a seguir a mesma linha em algumas propriedades avaliadas, tais quais:

- i. menores valores de resistência à compressão ao manter o consumo de ligantes;
- ii. menores valores de módulo de elasticidade para CR com AGR ao aumentar o teor de substituição;
- iii. maior permeabilidade do concreto reciclado quando comparado com o concreto convencional;
- iv. o processamento dos agregados reciclados gera um impacto ambiental expressivo que deve ser ponderado na avaliação da ecoeficiência dos concretos reciclados.

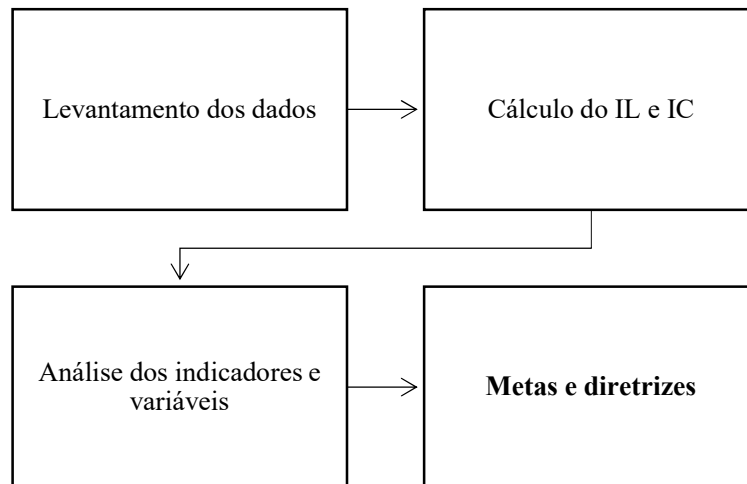
Dessa forma, essa tendência já permite afirmar que para a obtenção de concretos reciclados mais eficientes é necessário:

- i. reduzir o consumo de ligantes;
- ii. verificar a influência de elevadas taxas de substituição, tendo em vista a redução dos valores de módulo de elasticidade, para concretos com agregados graúdos reciclados;
- iii. compensar a taxa de absorção dos agregados reciclados, de modo a reduzir a porosidade dos CR;
- iv. utilizar processos de beneficiamento do RCD que apresentem menor impacto em termos de consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>.

## 4 METODOLOGIA

Para o alcance dos objetivos propostos, faz-se necessário a adoção de uma metodologia que deve organizar todos os aspectos relativos à construção e a validação do estudo através de uma análise bibliométrica.

A etapas da metodologia seguem o fluxograma da Figura 14 e estão detalhadas a seguir.



**Figura 14** Etapas da metodologia adotada

### 4.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS

No desenvolvimento desse estudo foi realizado um levantamento dos dados de misturas de concretos com agregados reciclados presentes na literatura. Os resultados foram coletados para todos os teores de substituição encontrados para agregados graúdos, miúdos e a combinação de agregados graúdos e miúdos. Esses dados foram usados para avaliar o consumo de cimento dos CR e testar os indicadores de eficiência IL e IC.

Para isso, foram catalogados os trabalhos publicados sobre o tema e que deveriam conter pelo menos informações sobre a composição do RCD utilizado, o teor de substituição, o consumo dos ligantes de cada mistura, teor e tipo de aditivos e adições minerais, consumo total de água e a resistência à compressão, aos 28 dias, dos concretos produzidos.

Para a coleta de dados foram definidos dois grupos de palavras-chaves que foram combinadas para realizar a pesquisa bibliográfica, conforme apresentado na Tabela 7.

**Tabela 7** Palavras-chave da pesquisa

<b>Grupo 1</b>		<b>Grupo 2</b>	
Resíduo da construção e demolição	Concreto	Agregado reciclado	Concreto

Os grupos de pesquisa foram definidos para abranger a maior quantidade de estudos disponíveis com CR. Como a resistência à compressão é a principal propriedade mecânica analisada nos estudos de CR e, de um modo geral, na grande maioria está descrito a proporção dos materiais utilizados, foi possível fazer a coleta de dados necessária para a análise.

A busca foi realizada nos repositórios *Web of Science*, *Science Direct*, e *Scholar Google*. Os estudos selecionados deveriam estar publicados no período de 1990 a 2020, o que totalizou uma base de dados de 153 registros e um total de 884 dados coletados (150 dados brasileiros e 734 internacionais, oriundos de 10 países distintos) de artigos, dissertações e teses. A partir disso, uma planilha com todos os registros foi confeccionada no Microsoft Excel®, incluindo: (a) referência; (b) tipo de publicação (artigo, dissertação ou tese); (c) ano de publicação; (d) nacionalidade; (e) país; (f) tipo de RCD; (g) tipo de agregado (AGR/AMR); (h) teor de substituição; (i): resistência à compressão, aos 28 dias; (j) geometria do corpo de prova; (k) consumo de cimento; (l) tipo de cimento utilizado; (m) teor e tipo de aditivos químicos; (n) teor e tipo de adições minerais; (o) consumo total de água; (p) relação a/c.

A influência da geometria do corpo de prova utilizado para a obtenção da resistência à compressão foi corrigida de acordo com Neville (1995). O autor apresenta que a resistência do corpo de prova cilíndrico é igual a 0,8 da resistência do corpo de prova cúbico da BS 1881: 1983.

#### 4.2 CÁLCULO DO IL e IC

Conforme proposto por Damineli *et al.* (2010), para o cálculo do IL é necessário conhecer o valor do consumo de ligantes e a resistência à compressão, aos 28 dias, valores coletados de cada estudo com AR.

O estudo de Damireli *et al.* (2010) também propõe o cálculo do IC, conforme demonstrado em 2.4.1. Esse indicador é representado pela razão entre as emissões de CO<sub>2</sub> da mistura de concreto, em kg.m<sup>-3</sup>, e a resistência à compressão, aos 28 dias, em MPa.

Os estudos não apresentaram dados sobre as emissões de CO<sub>2</sub>, que são necessários para o cálculo do IC. Dessa forma, as quantidades de CO<sub>2</sub> emitidas pelos constituintes do concreto foram obtidas da literatura. Todas as emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da produção e transporte de matérias-primas e concreto foram ignoradas, assim como, a captura de CO<sub>2</sub> durante o ciclo de vida do concreto. Para o cimento, foi utilizada a referência do WBCSD/GNR (2018) que apresenta um histórico de emissões para o período de 1990 a 2018, conforme detalhado na Tabela 8. Esses dados foram aplicados para cada estudo, de acordo com o ano de publicação, para os anos que não havia a publicação das emissões, adotou-se o valor referente ao ano imediatamente inferior.

**Tabela 8** Série histórica de emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada de clínquer usada para o cálculo do IC

Ano	Emissões (kg CO <sub>2</sub> / t clínquer)	Ano	Emissões (kg CO <sub>2</sub> / t clínquer)	Ano	Emissões (kg CO <sub>2</sub> / t clínquer)	Ano	Emissões (kg CO <sub>2</sub> / t clínquer)
1990	913	2007	865	2011	850	2015	844
2000	878	2008	861	2012	842	2016	844
2005	866	2009	854	2013	841	2017	838
2006	864	2010	856	2014	843	2018	836

Fonte: WBCSD (2018).

O teor de clínquer e das adições minerais de cada tipo de cimento utilizado em cada estudo foram estimados como sendo a média entre o mínimo e o máximo permitido pela norma de especificação de cada tipo de cimento, de acordo com cada país do estudo de origem e ano (NBR 5738; NBR 16697; NBR 5732; NBR11578; NBR 5735; NBR 5736; NBR 5733; NBR 5739; BS12; BS1370; BS4027; BS146; ASTM C150; ASTM C595; ASTM C525; BS 8500-1:2006).

Dentre os materiais constituintes do concreto, o cimento é o material que apresenta a maior contribuição para emissão de CO<sub>2</sub> (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018; JOHN *et al.*, 2019; QUATTRONE; ÂNGULO; JOHN, 2014). Porém, para se obter um indicador com valor mais representativo, foram contabilizados também a contribuição das emissões de CO<sub>2</sub> das adições minerais e dos aditivos superplastificantes. Para estes

materiais foram utilizados dados da literatura e o banco de dados internacional do Ecoinvent v3.0, disponível no SimaPro 7.3<sup>®</sup>. Este software é utilizado para realizar Análise de Ciclo de Vida (ACV) de materiais cimentícios e a base de dados foi analisada usando o método do IPCC 2013 GWP 100a. Os valores de referência das emissões, expressos em kg.CO<sub>2</sub>.eq/kg, e as referências utilizadas estão apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9** Valores de referência das emissões dos materiais utilizados nos estudos com exceção dos cimentos

Materiais	Emissões (kg.CO <sub>2</sub> .eq/kg)	Referência
Sílica ativa	3,07E-03	Ecoinvent
Escória de alto forno	7,15E-02	Ecoinvent
Fíler	2,92E-03	Ecoinvent
Cinza volante	2,00E-03	Kurda, Silvestre e Brito (2018)
Pozolana natural	9,31E-03	Robayo-Salazar <i>et al.</i> (2018)
Cinza da casca de arroz	1,03E-01	Alnahhal <i>et al.</i> (2018)
Metacaulim	4,30E-01	Dumani e Mapiravana (2018)
Superplastificante (policarboxilato)	1,13E+00	Ecoinvent

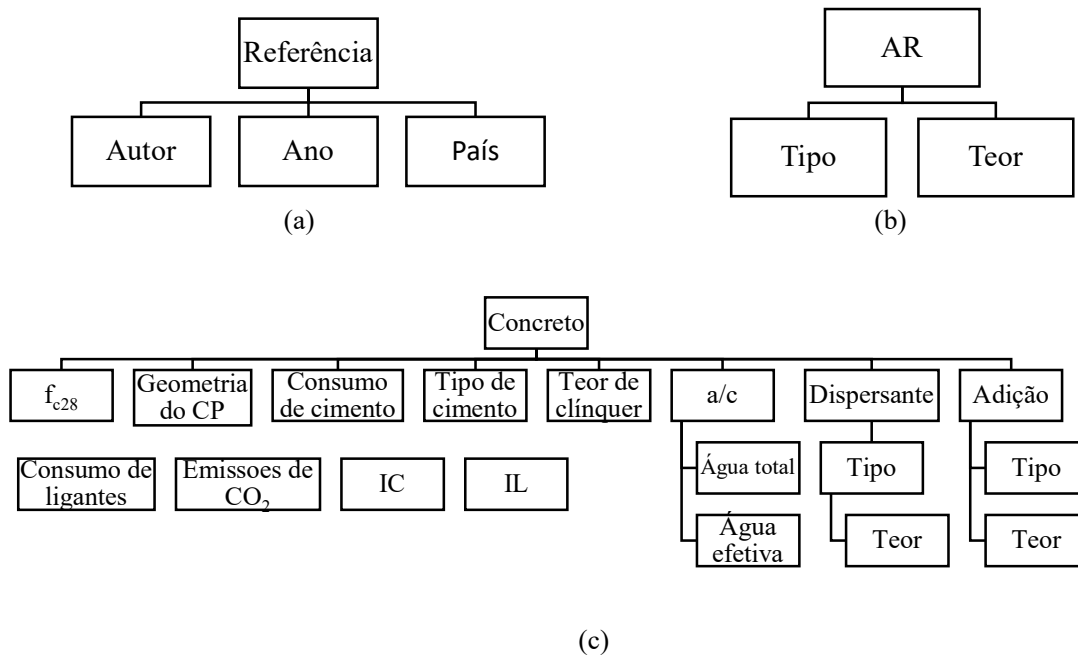
A partir desses valores, foi possível calcular a quantidade de emissões totais de CO<sub>2</sub>, contabilizando as parcelas:

- i. Clínquer;
- ii. Adições do cimento;
- iii. Adições do concreto;
- iv. Aditivo químico.

Estabelecidos esses valores de emissões totais e com os valores de resistência à compressão, aos 28 dias, de cada estudo, foi possível calcular o IC.

#### 4.3 ANÁLISE DOS INDICADORES E VARIÁVEIS

As variáveis analisadas foram divididas em três grupos: Referência, Agregado Reciclado e Concreto e estão detalhadas na Figura 15.



**Figura 15** Fluxograma com as variáveis analisadas separados por grupo: a) Referência; b) AR; c) Concreto

Junto com a análise do IL, para cada estudo, foram avaliados: os consumos de cimento, os valores de resistência à compressão, aos 28 dias, os teores de substituição dos agregados naturais pelos reciclados e os anos de publicação dos estudos avaliados. Com essas informações, foi possível montar os gráficos:

- i. consumo de cimento *versus* resistência à compressão;
- ii. resistência à compressão *versus* teor de substituição;
- iii. consumo de cimento *versus* teor de substituição;
- iv. IL *versus* resistência à compressão;
- v. IL *versus* ano de publicação.

Junto com a análise do IC, para cada estudo foram avaliados: as emissões de CO<sub>2</sub>, resistência à compressão, fração de clínquer, ano de publicação e o IL. Com essas informações, foi possível montar os gráficos:

- i. Emissões de CO<sub>2</sub> *versus* resistência à compressão;
- ii. IC *versus* resistência à compressão;
- iii. IC *versus* fração de clínquer;
- iv. IC *versus* ano de publicação;

v. IC versus IL;

O fluxograma com as relações estabelecidas entre as variáveis analisadas está apresentado na Figura 16.

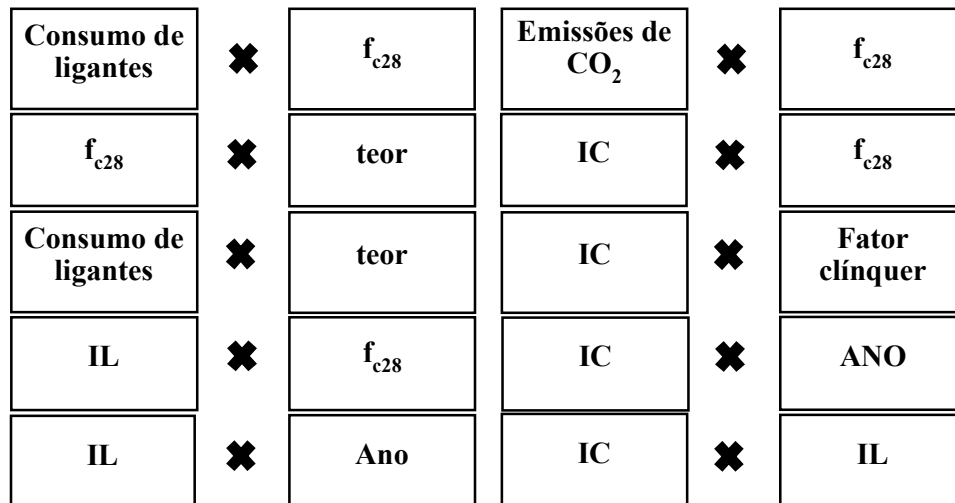


Figura 16 Relações entre as variáveis analisadas

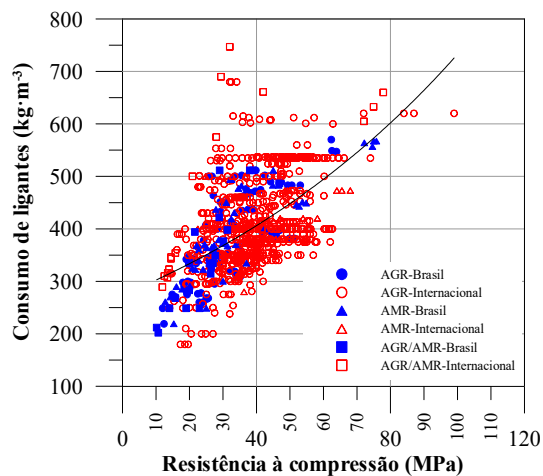
A partir dessas informações, foi possível identificar os estudos com melhores resultados em termos de eficiência, propor metas de IL e IC e apontar diretrizes para melhoria da ecoeficiência no consumo de ligantes dos concretos com agregados reciclados.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CONSUMO DE LIGANTES

Como mencionado, foram coletados um total de 153 registros (artigos, teses e dissertações) conforme listagem no Apêndice 1, o que totalizou 884 dados (150 dados brasileiros e 734 internacionais, oriundos de 10 países distintos). Para a coleta de dados, foram considerados todos os tipos de concreto com agregados reciclados miúdos, grãos e concretos reciclados combinando agregados miúdos/grãos. No levantamento, não foram considerados os resultados dos estudos dos concretos reciclados com fibras. Dentre os dados coletados, 729 foram de concretos com AGR (83 dados nacionais e 646 dados internacionais); 103 dados de concretos com AMR (46 dados nacionais e 57 dados internacionais) e 52 dados de concretos com AGR/AMR (21 dados nacionais e 31 dados internacionais).

Na Figura 17 estão apresentados os dados de consumo de ligantes ( $\text{kg/m}^3$ ) *versus* resistência à compressão (MPa) para todos os estudos avaliados (brasileiros e internacionais) contendo concretos com AGR, concretos com AMR e concretos com a mistura de AGR/AMR.



**Figura 17** Consumo de ligantes *versus* resistência à compressão para todos os dados coletados, separados por dados brasileiros (azul) e dados internacionais (vermelho) para as misturas com diferentes teores de AGR, AMR e AGR/AMR

Dos estudos levantados, verificou-se que a maioria dos dados corresponde a dados internacionais (~89 % para o AGR, ~55 % para o AMR e ~60 % para o AGR/AMR). No gráfico da Figura 17 observa-se que não há diferenças expressivas no comportamento dos concretos reciclados dos estudos internacionais e brasileiros, mesmo havendo variação

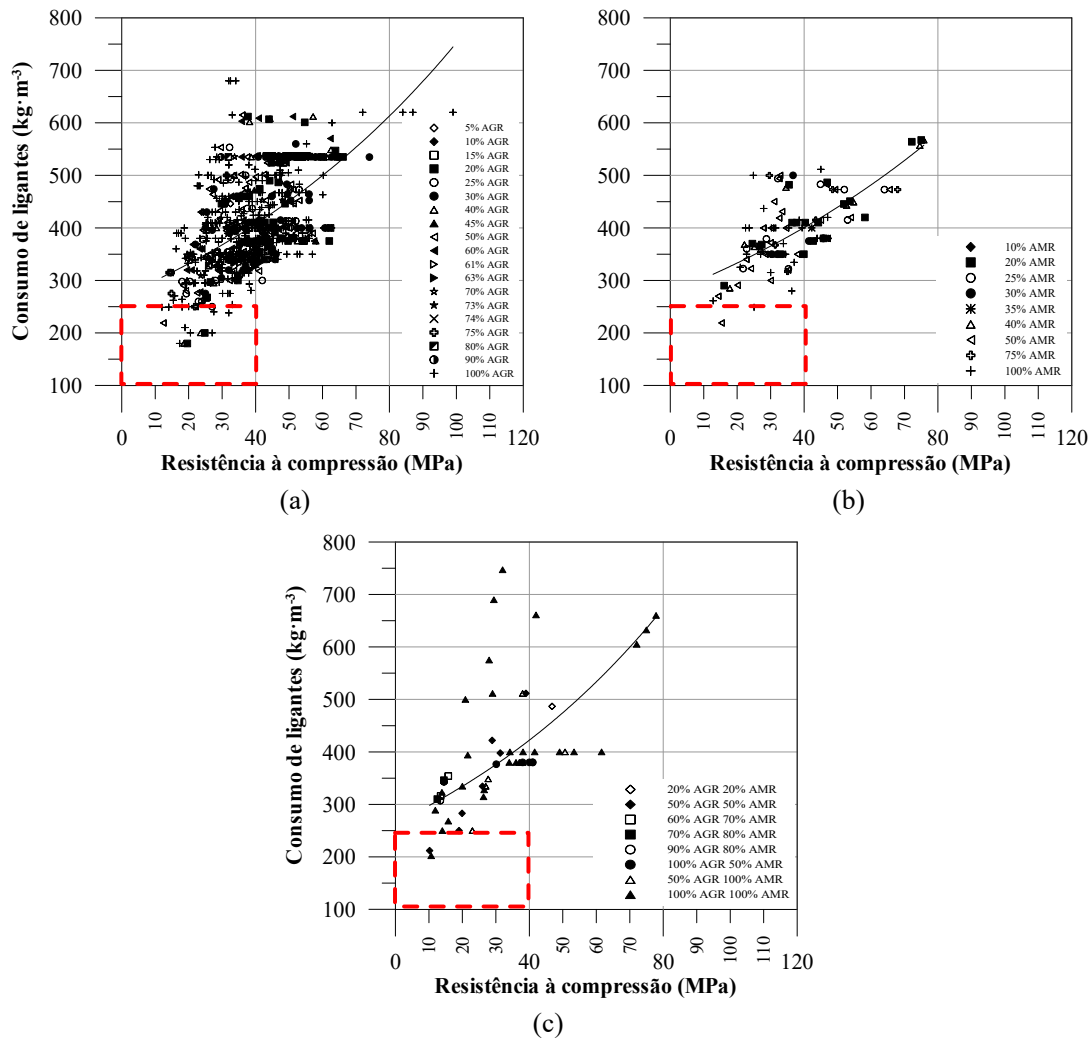


nos materiais utilizados e métodos de dosagem e mistura adotados para a produção dos concretos reciclados.

De maneira geral, os estudos apresentam elevados consumos de cimento, a maioria (~94 %) está entre 250 e 550 quilogramas por metro cúbico para resistências variando de 10 a 80 MPa. Para qualquer um dos tamanhos de agregados reciclados avaliados, pode-se observar que o consumo de ligantes aumenta conforme o aumento da resistência à compressão. No entanto, a dispersão de resultados é grande, havendo para um mesmo consumo de ligantes diferentes resultados de resistência à compressão. Isso mostra que muitos outros fatores estão influenciando na quantidade de ligantes necessária para uma determinada resistência à compressão do concreto reciclado.

Os dados coletados também foram avaliados em função do teor de agregados reciclados utilizados. Em geral, o uso de maiores teores de substituição dos agregados naturais pelos reciclados eleva o consumo de ligantes e reduz a resistência à compressão (Figura 18). A maioria dos dados (~83 %) referem-se a agregados graúdos reciclados em substituição ao natural, variando o teor de substituição dos agregados.

Os agregados reciclados dos 153 estudos avaliados foram separados por componente do RCD e estão assim distribuídos: concreto (674 dados), misto (156 dados), cerâmica (8 dados), argamassa (12 dados), concreto e argamassa (4 dados), concreto e cerâmica (30 dados). A grande maioria dos dados corresponde a agregados de concreto, aproximadamente 80 % para os agregados graúdos, 62 % para os agregados miúdos e 40 % para as misturas com a combinação dos dois agregados reciclados, graúdos e miúdos. Com a finalidade de se reduzir os fatores que impactam na dispersão dos resultados, tentou-se separar os agregados reciclados por tipo de componente de origem do RCD e teores de substituição, porém não se verificou melhorias das análises, tão pouco uma tendência de comportamento para os diferentes tipos de componentes de origem dos AR. Portanto, os dados foram analisados para os diversos teores de substituição para todos os estudos de concreto com agregados reciclados coletados, separando-se a análise das misturas apenas por tamanho de AR utilizado nos concretos (AGR – Figura 18a - e AMR – Figura 18b) e as misturas incorporando os dois tamanhos de AR (AGR/AMR – Figura 18c), em diferentes proporções para cada uma das situações.



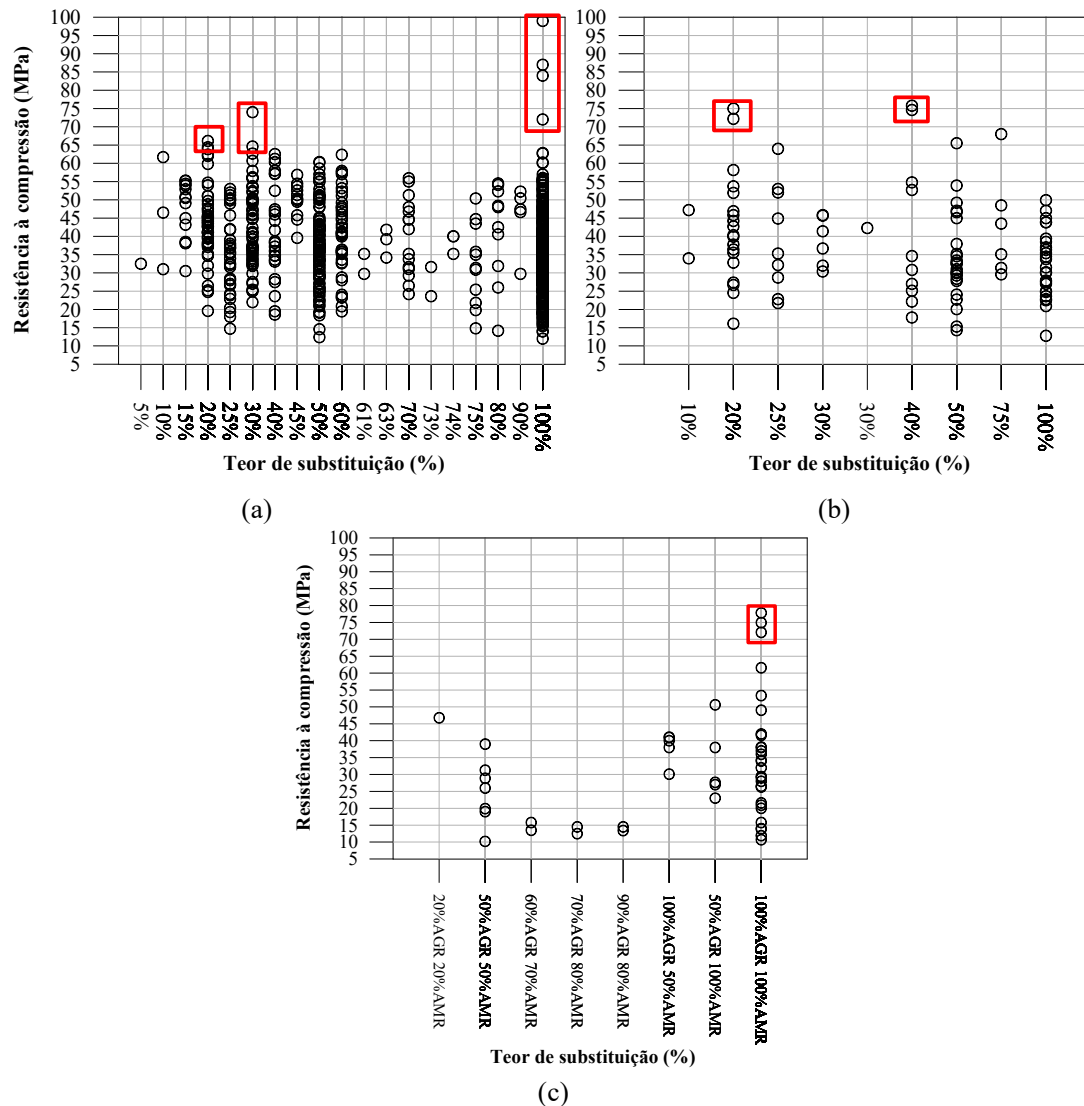
**Figura 18** Consumo de ligantes *versus* resistência à compressão: a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diversos teores de AGR/AMR

Para qualquer dos tamanhos de agregados reciclados utilizados, pode-se observar concretos com consumos de ligante muito elevados ( $> 550$  kg). Os maiores consumos alcançados (até 750 kg) são observados para os concretos reciclados com a combinação de AGR/AMR. Esses valores descaracterizam os concretos reciclados como concretos sustentáveis, uma vez que os elevados consumos podem estar associados a elevadas emissões de  $\text{CO}_2$ , o que inviabiliza a aplicação desse tipo de concreto quando se avalia o viés ambiental. Além disso, é preciso mencionar as questões econômicas, ao considerar que o cimento é o insumo de maior custo no concreto, e as questões de desempenho, uma vez que o aumento no consumo de cimento pode conduzir a fissuração de origem térmica, maior retração e fluência autógena, entre outros aspectos.

Para os concretos com AGR, apenas 15 dos 729 dados coletados (~2,0 %) foram obtidos utilizando-se menos de 250 kg/m<sup>3</sup> de ligante, conforme destacado pelo retângulo com linha pontilhada em vermelho na Figura 18a, e o valor médio de resistência à compressão dos 15 dados é de 20,0 MPa. Para os concretos com AMR, o cenário é ainda pior, apenas 1 dos 103 dados (~1,0 %), utilizou consumo de ligante inferior a 250 kg/m<sup>3</sup>, conforme destacado pelo retângulo com linha pontilhada em vermelho na Figura 18b. Esse consumo resultou em uma resistência à compressão de 15,3 MPa, para um teor de substituição de 50 % de AMR e com o uso de agregado misto (LEITE, 2001). Para os concretos com AGR/AMR, apenas 2 dos 52 dados coletados (~4,0 %) utilizaram consumo de ligante inferior a 250 kg/m<sup>3</sup>, conforme destacado pelo retângulo com linha pontilhada em vermelho na Figura 18c, e o valor médio de resistência à compressão dos 2 dados é de 10,0 MPa. Ou seja, os estudos com menores consumos de ligantes não apresentam uma boa eficiência, pois o reduzido consumo de ligante está associado a baixíssimas resistências à compressão.

Para os concretos com agregados graúdos, na Figura 19a observa-se uma grande concentração dos estudos com teores entre 15 e 60 % de AGR (~50 % dos dados) e depois 100 % de AGR (~40 % dos dados). Os maiores valores de resistência à compressão ( $f_c > 80$  MPa) são para as misturas com substituições de 20, 30 e 100 % de agregados graúdos naturais por reciclados, conforme destacado pelos retângulos com linha contínua em vermelho na Figura 19a. Os concretos com teores de 20 e 30 % de AGR são provenientes do estudo de Babu *et al.* (2015) e Tam, Kotrayothar e Xiao (2015) e as misturas com 100 % de AGR dos estudos de Ryu (2002) e Otsuki, Miyazato e Yodsudjai (2003), cujas características estão apresentadas na Tabela 10.

Para os concretos com agregados miúdos, na Figura 19b observa-se uma grande concentração dos dados para concretos com teores de até 50 % de AMR (~70 % dos dados). Os maiores valores de resistência à compressão ( $f_c > 70$  MPa) são para as misturas com substituições de 20 e 40 % de agregados miúdos naturais por reciclados, conforme destacado pelos retângulos com linha contínua em vermelho na Figura 19b. Esses resultados são provenientes dos estudos de Branco (2012) e Hu, Wang e Kim (2013), cujas características estão apresentadas na Tabela 10.



**Figura 19** Resistência à compressão *versus* teor de substituição: a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR

Para as misturas com a combinação de agregados graúdos e miúdos reciclados, observa-se as maiores concentrações dos dados para a combinação de 50 % de AGR e 50 % de AMR (~14 % dos dados) e 100 % de AGR e 100 % de AMR (~54 % dos dados). Os maiores valores de resistência à compressão ( $f_c > 70$  MPa) são para os concretos com substituições de 100 % de agregados miúdos e 100 % de agregados graúdos naturais por reciclados, conforme destacado pelo retângulo em vermelho na Figura 19c. Esses dados são provenientes do estudo de Pedro *et al.* (2019), cujas características estão apresentadas na Tabela 10.

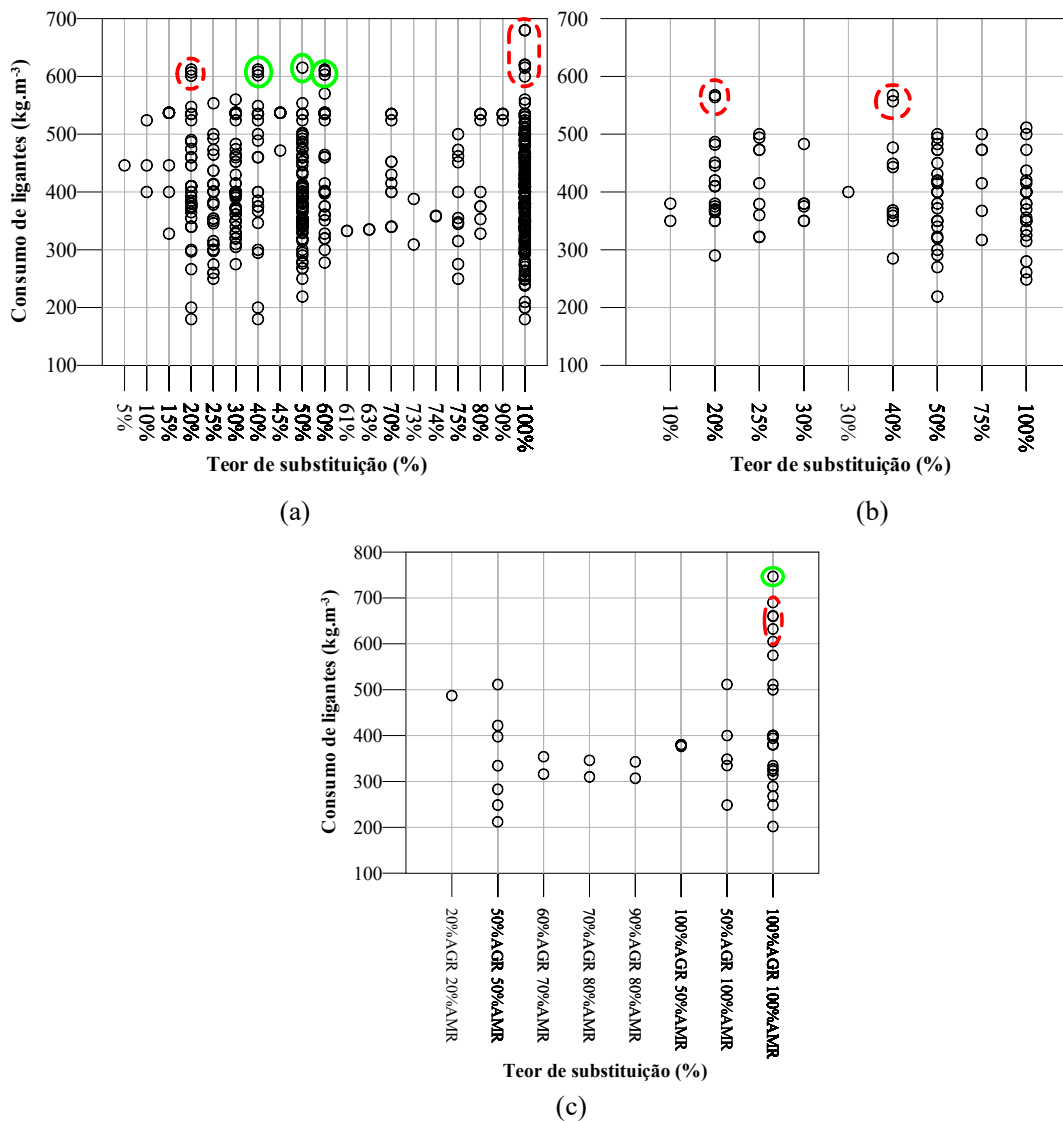
**Tabela 10** Resultados dos estudos com maiores valores de resistência à compressão para os concretos com AGR, AMR e AGR/AMR

Tamanho do AR no CR	Estudo	Teor de AR (%)	Origem do AR	C <sup>(1)</sup> (kg)	a/c	Adição mineral		Aditivo		fc (MPa)
						Tipo	Teor (kg)	Tipo	Teor (%)	
AGR	Babu <i>et al.</i> (2015)	20	Concreto	535	0,26	CV	35,00	SP	1,50	64,50
		20	Concreto	535	0,26	CV	35,00	SP	1,50	66,15
		30	Concreto	535	0,26	CV	35,00	SP	1,50	64,60
	Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	30	Concreto	535	0,45	-	-	-	-	74,01
	Otsuki, Miyazato e Yodsudjai (2003)	100	Concreto	620	0,25	CV	62,00	SP	0,20	87,00
	Ryu (2002)	100	Concreto	620	0,25	CV	62,00	-	-	99,00
AMR	Branco (2012)	100	Concreto	620	0,25	CV	62,00	-	-	72,00
		100	Concreto	620	0,25	CV	62,00	-	-	84,00
		20	Concreto	564	0,37	-	-	SP	1,00	72,20
		20	Concreto	567	0,35	-	-	SP	1,00	75,00
	40	Concreto	557	0,38	-	-	SP	1,00	74,60	
Hu, Wang e Kim (2013)	40	Concreto	567	0,36	-	-	SP	1,00	75,80	
AGR/AMR	Pedro <i>et al.</i> (2019)	75	Concreto	473	0,33	CV	83,00	VMA/SP	1,40/2,20	68,00
		100/100	Concreto	605	0,31	CV	55,00	SP	2,00	72,08
		100/100	Concreto	633	0,32	CV/SA	55,00/27,50	SP	1,90	74,96
		100/100	Concreto	660	0,32	CV/SA	55,00/55,00	SP	1,83	77,84

Nota: AR–agregado reciclado; CR–concreto reciclado; C–Consumo de ligantes, em kg para produzir 1 m<sup>3</sup> de concreto; fc–resistência à compressão, aos 28 dias; a/c–relação água cimento; CV–Cinza volante; SA–Sílica ativa; SP–Superplastificante; VMA–Agente modificador de viscosidade.

<sup>(1)</sup> Consumo de ligantes corresponde ao somatório do consumo de cimento Portland e de adições minerais (pozolânicas e/ou inertes), quando for o caso.

Observa-se na Figura 20a e 20c que as misturas com os maiores consumos de ligantes (destacados pela linha contínua em verde), não estão necessariamente associadas com as misturas que apresentam as maiores resistências (destacados pela linha contínua em vermelho) mostradas na Figura 19a e 19c. Já para os concretos com AMR, os maiores consumos de ligantes correspondem aos resultados com maiores resistências, conforme destacado na Figura 20b (linha pontilhada em vermelho).



**Figura 20** Consumo de ligantes *versus* teor de substituição: a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR

Na Tabela 10 observa-se para os concretos com AGR que as elevadas resistências das misturas com teor de substituição de 100 % estão associadas a um elevado consumo de ligantes (> 600 kg), baixa relação a/c, utilização de superplastificante e cinza volante, como adição mineral. O melhor resultado de ecoeficiência refere-se ao estudo de Babu *et*

*al.* (2015), com 20 % de AGR, consumo de ligantes de 535 kg e resistência à compressão de 82,6 MPa, que gera um IL de  $\sim 6,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ . Neste estudo, os autores concluíram que o agregado reciclado pode substituir o natural em até 50 % para concretos com resistências elevadas ( $f_c > 70 \text{ MPa}$ ), sem perda da resistência em comparação com o concreto de referência. Porém, para se alcançar esses resultados, os agregados passaram por um tratamento para retirar a argamassa antiga aderida, que afeta a porosidade e reduz sua qualidade. Contudo, é importante enfatizar que isso gera um consumo energético que não foi contabilizado, mas é expressivo do ponto de vista ambiental, o que pode diminuir a ecoeficiência deste tipo de concreto.

Para as misturas com AMR, o resultado com maior eficiência de ligantes refere-se ao estudo de Hu, Wang e Kim (2013) que apresenta uma resistência elevada (68 MPa) para um consumo de ligantes de  $473 \text{ kg}/\text{m}^3$ , gerando um IL de  $6,96 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ , com utilização de aditivo modificador de viscosidade e superplastificante, cinza volante e uma relação a/c baixa. Houve um aumento de aproximadamente 4,50 % no valor de resistência à compressão para a mistura com 75 % de AMR em comparação com o concreto de referência. Tal comportamento pode estar relacionado com a melhoria da matriz e da zona de transição do CR, devido à existência de maior quantidade de finos presentes no AMR e a cinza volante usada na mistura, que favorecem o fechamento dos poros e promovem o empacotamento das partículas, juntamente com a melhor dispersão promovida pelo aditivo superplastificante e pelo agente modificador de viscosidade. Além disso, os autores utilizaram o método de mistura em duas etapas. Alguns estudos apontam para a eficiência desse método de mistura na produção de concretos reciclados de maneira a contribuir para uma melhor resistência à compressão e durabilidade do concreto reciclado, quando comparado aos concretos reciclados preparados com o método de mistura convencional (TAM *et al.*, 2007; MOITINHO; LEITE, 2015; LEITE; MONTEIRO, 2016).

Observa-se, para os concretos com a combinação de ambos agregados reciclados (AGR e AMR), que as elevadas resistências estão associadas a um elevado consumo de ligantes ( $> 600 \text{ kg}$ ), baixa relação a/c, utilização de superplastificante, e cinza volante e sílica ativa como adições minerais. O melhor comportamento refere-se ao estudo de Pedro *et al.* (2019), com consumo de ligantes de  $605 \text{ kg}/\text{m}^3$  e resistência à compressão de 72,08 MPa, isso gera um IL de  $\sim 8,39 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ . Os autores avaliaram concretos de alto desempenho com substituição total dos agregados grãos e miúdos naturais por

agregados reciclados de concreto provenientes de misturas comerciais de concreto pré-moldado, que sofreram apenas britagem e peneiramento mecânico. Obteve-se elevadas resistências para um concreto sem agregados naturais na composição da mistura, com consumo elevado de ligantes.

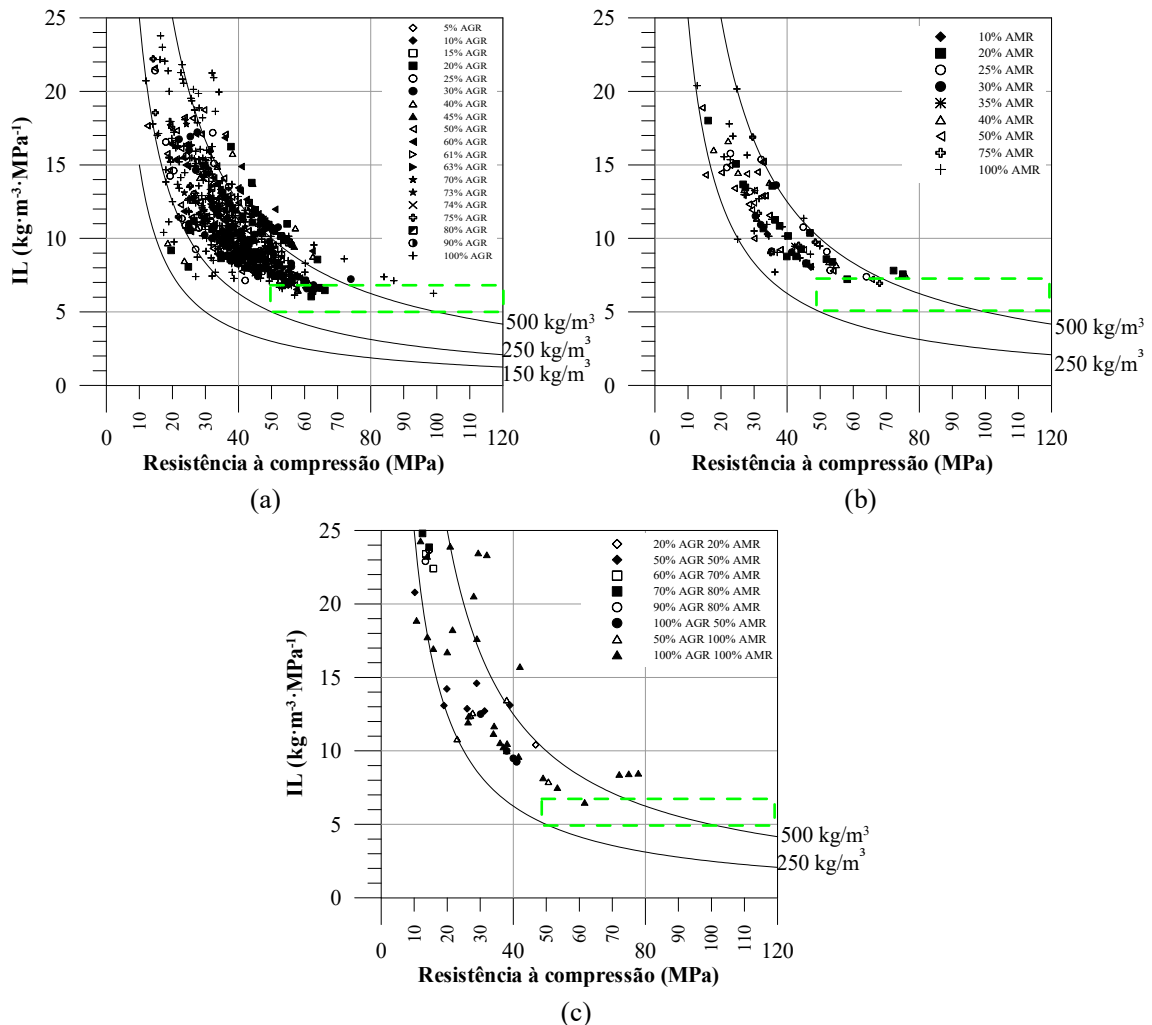
Para grande maioria dos dados dos concretos com agregados reciclados avaliados, observa-se que as elevadas resistências estão associadas a elevados consumos de cimento Portland, o que pode inviabilizar a utilização desses tipos de concretos do ponto de vista ambiental. Por outro lado, de modo geral, os estudos mostram que o uso de adições e aditivos químicos, de agregados reciclados de concreto, de relações  $a/c$  menores que 0,45, e a limitação da proporção desses agregados na mistura pode conduzir a obtenção de concretos com menor intensidade de ligantes.

## 5.2 INTENSIDADE DE LIGANTES

A Intensidade de Ligantes (IL) em função da resistência à compressão das misturas de concreto reciclado cujos dados estão disponíveis na literatura, calculada conforme descrito no Item 4.2, pode ser observada nos gráficos da Figura 21. O panorama foi estabelecido para os concretos reciclados de acordo com o teor de substituição: para as misturas com AGR (Figura 21a), as misturas com AMR (Figura 21b) e as misturas com a combinação de AGR/AMR (Figura 21c).

De modo geral, os concretos reciclados apresentaram IL variando numa faixa ampla de 6 a 25  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ . Em geral, os dados apontam um maior consumo de ligantes, e conseqüente menor eficiência, para os concretos reciclados com maior teor de substituição dos agregados naturais por agregados reciclados (BABU *et al.*, 2015; BAHRAMI *et al.*, 2020; BUTLER; WEST; TIGHE, 2013; CHEN, YEN; CHEN, 2003; DUAN *et al.*, 2020; ISMAIL; RAMLI, 2013; LIMBACHIYA; DHIR, 2000; OTSUKI; MIYAZATO; YODSUDJAI, 2003; RYU, 2002; VIEIRA, 2003; ZONG-PING CHEN, 2010).





**Figura 21** Relação entre a Intensidade de ligantes ( $IL$ ) versus resistência à compressão: a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR

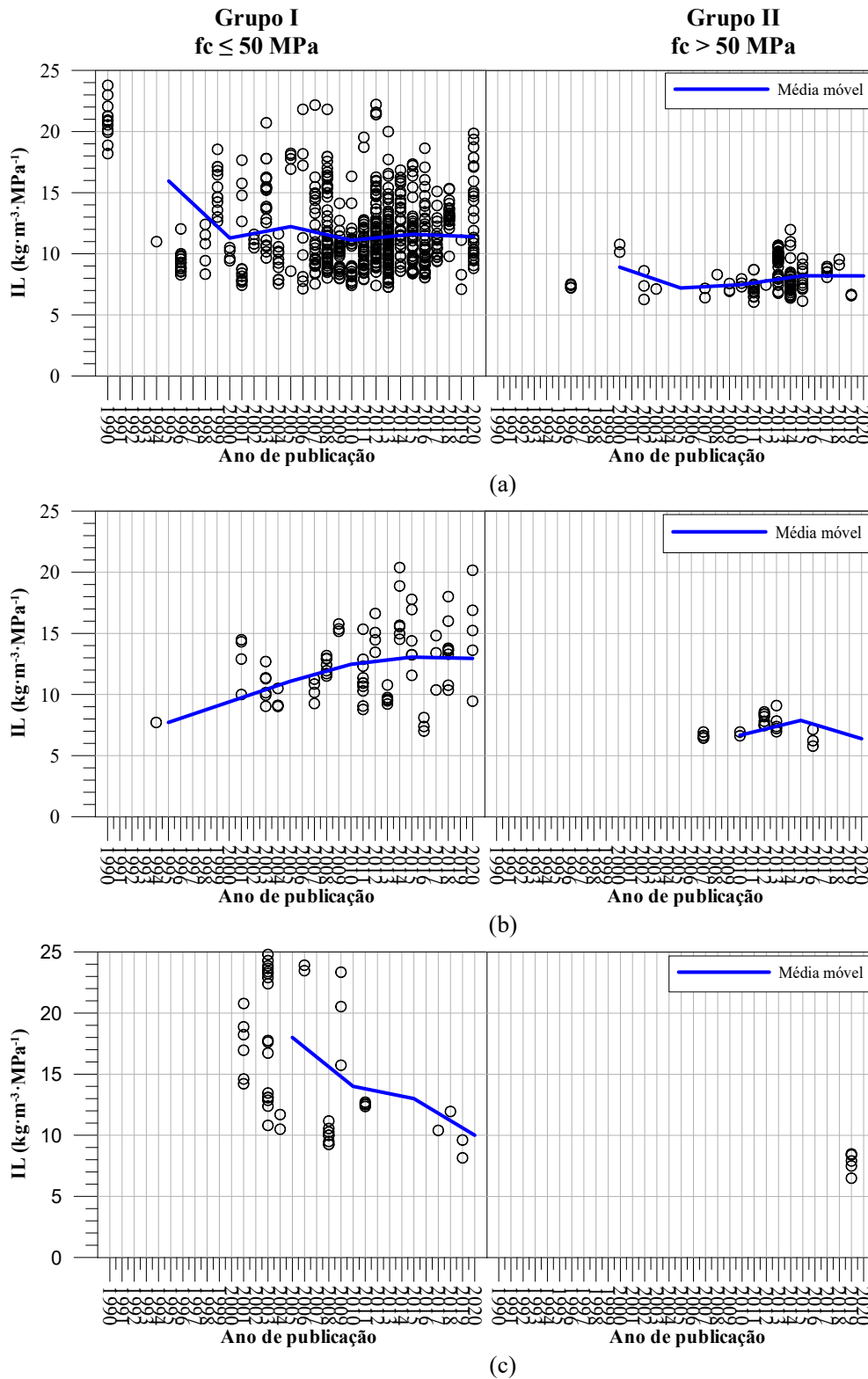
Os critérios de seleção para os dados dos concretos com as melhores eficiências em termos de  $IL$  que serão discutidos nos Itens 5.2.1, 5.2.2 e 5.3.3 foram definidos considerando as seguintes características:

- Para concretos com AGR:
  - i.  $IL \leq 8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$  para os concretos do Grupo I ( $f_c \leq 50 \text{ MPa}$ );
  - i.  $IL \leq 7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$  para os concretos do Grupo II ( $f_c > 50 \text{ MPa}$ );
  - ii. Consumos de cimento Portland menores que 420 kg para ambos os grupos de resistência dos concretos reciclados avaliados.
- Para concretos com AMR e AGR/AMR:
  - ii.  $IL \leq 9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$  para os concretos do Grupo I ( $f_c \leq 50 \text{ MPa}$ );
  - iii.  $IL \leq 8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$  para os concretos do Grupo II ( $f_c > 50 \text{ MPa}$ );

- iv. Consumos de cimento Portland menores que 420 kg para ambos os grupos de resistência dos concretos reciclados avaliados.

Vale salientar que é razoável considerar consumos de cimento Portland de no máximo 420 kg, tendo em vista que valores superiores conduzem a elevadas emissões de CO<sub>2</sub> oriundas do fator de clínquer, como já foi discutido no Item 2.2. Dessa forma, os valores que apresentaram consumos de cimentos Portland superiores a 420 kg não foram discutidos como misturas com elevadas eficiências, já que podem não ser viáveis do ponto de vista das emissões de CO<sub>2</sub>. Além disso, foram escolhidos os melhores resultados de cada teor de AR para serem discutidos.

A Figura 22 mostra as tendências nos valores de IL durante os 30 anos de análise, separados por grupo de resistência (Grupo I:  $f_c \leq 50$  MPa; e, Grupo II:  $f_c > 50$  MPa) e a média móvel referente a 5 anos para as misturas com AGR (Figura 22a), as misturas com AMR (Figura 22b) e as misturas com AGR/AMR (Figura 22c). Verifica-se uma concentração de concretos com melhores eficiências entre os anos de 2010 a 2020 (IL mínimo de  $7,08 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ , médio de  $11,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$  e máximo de  $18,64 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ ) para os concretos com AGR com resistências menores que 50 MPa. Por outro lado, em geral, as eficiências dos concretos com AMR e AGR/AMR parece não terem sofrido influência ao longo do tempo e, conseqüentemente, do avanço nos estudos dos CR. Para concretos com resistências superiores a 50 MPa não se tem uma grande variação dos resultados de IL ao longo dos anos, há uma menor dispersão dos dados, para todas as misturas de concreto reciclado analisadas.

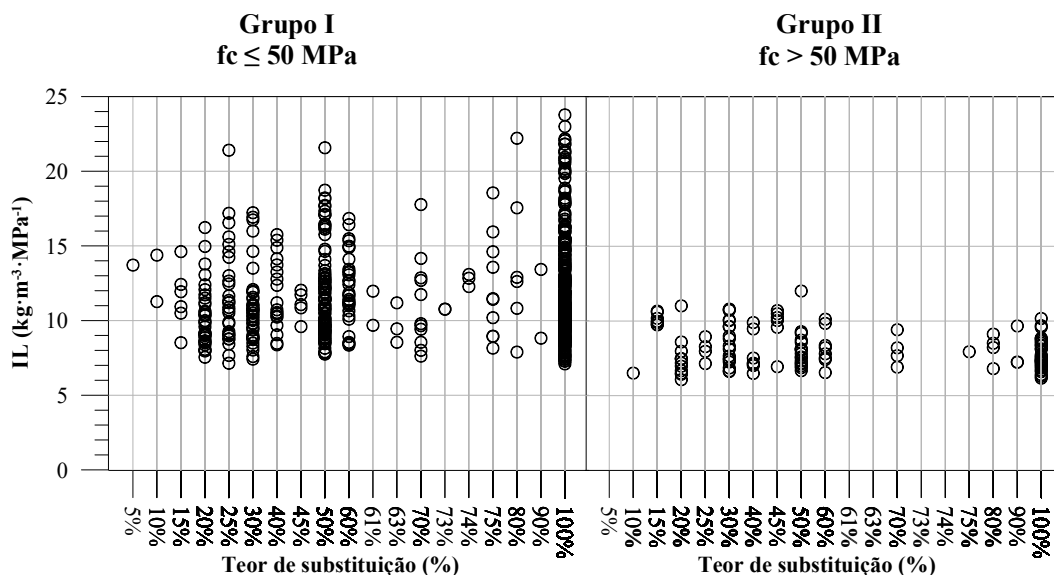


**Figura 22** Intensidade de ligantes (IL) *versus* ano: a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR

Para melhor compreender a influência do agregado reciclado sobre a eficiência dos ligantes do concreto reciclado, a seguir serão discutidos os efeitos do AGR, do AMR e da mistura de AGR/AMR em diferentes proporções sobre a intensidade de ligantes.

### 5.2.1 Efeito do AGR sobre o IL

Para os concretos com AGR, os menores resultados de IL observados variam de 6 a 7  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ , o que ocorre para concretos com resistências acima de 50 MPa (retângulo com linha pontilhada em verde na Figura 21a). Tais resultados estão evidenciados na Figura 23, na qual o conjunto de resultados foi separado em dois grupos de resistências de acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015): Grupo I, envolve os concretos com resistência à compressão menor ou igual a 50 MPa; e Grupo II, que considera os concretos com resistência à compressão maior que 50 MPa. No gráfico da Figura 23 também observa-se que para os concretos do Grupo II ( $f_c > 50$  MPa) a faixa de variação do IL é muito menor (entre 6 e 12  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ ) quando comparada com a faixa de variação dos concretos do Grupo I ( $f_c \leq 50$  MPa) que foi de 7 a 24  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ .



**Figura 23** Intensidade de ligantes (IL) versus teor de AGR

Observa-se na Tabela 11 que, para os estudos com menores IL dos concretos com AGR, todos os agregados são de concreto, os consumos de ligantes são todos inferiores a 400  $\text{kg}/\text{m}^3$ , não houve utilização de adições minerais, mas todos utilizaram aditivos superplastificantes em teores elevados.

**Tabela 11** Características dos concretos com menores IL para as misturas com diferentes teores de AGR

Estudo	Teor de AR (%)	Origem do AR	C <sup>(1)</sup> (kg)	a/c	Aditivo químico		f <sub>c</sub> (MPa)	IL (kg.m <sup>-3</sup> .MPa <sup>-1</sup> )
					Tipo	Teor (%)		
Etxeberria, Vázquez e Mari (2006)	25	Concreto	300	0,55	SP	1,66	42,00	7,14
Kou e Poon (2010)	100	Concreto	380	0,50	-	-	49,80	7,63
Akbarnezhad <i>et al.</i> (2011)	20	Concreto	375	0,45	SP	2,00	62,00	6,05
	40	Concreto	375	0,45	SP	2,00	58,00	6,47
	60	Concreto	375	0,45	SP	2,00	57,50	6,52
	80	Concreto	375	0,45	SP	2,00	54,50	6,88
Pacheco <i>et al.</i> (2015)	100	Concreto	350	0,45	SP	1,00	56,96	6,14
Pedro <i>et al.</i> (2019)	100	Concreto	350	0,42	SP	1,00	53,20	6,58
Domingo-Cabo <i>et al.</i> (2009)	100	Concreto	380	0,50	SP	1,40	54,80	6,93

Nota: AR–agregado reciclado; C–Consumo de ligantes, em kg para produzir 1 m<sup>3</sup> de concreto; a/c–relação água cimento; f<sub>c</sub>–resistência à compressão aos 28 dias; IL–Intensidade de Ligantes; SP–Superplastificante.

<sup>(1)</sup> Consumo de ligantes corresponde ao consumo de cimento Portland apenas, pois os estudos apresentados não utilizaram adições minerais (pozolânicas e/ou inertes).

O menor IL ( $7,14 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ ) para o Grupo I ( $f_c \leq 50 \text{ MPa}$ ) foi do estudo de Etxeberria, Vázquez e Marí (2006). Os autores utilizaram um cimento de alta resistência (CEM I 52.5 R8 –  $f_c \geq 52,5 \text{ MPa}$ , aos 28 dias) e os agregados reciclados foram provenientes de uma planta de reciclagem e, portanto, suas origens eram desconhecidas. O agregado apresentou uma taxa de absorção de 4,44 %, que foi compensada pelo pré umedecimento dos agregados (80 % da taxa de absorção) antes da mistura. A relação a/c manteve-se constante e a trabalhabilidade foi alcançada com um aumento da quantidade de aditivo superplastificante (1,66 %) quando comparado com o concreto de referência (1,40 %). Os autores conseguiram, para o teor de substituição de 25 % de AGR, o mesmo valor de resistência à compressão do concreto com agregados naturais.

Kou e Poon (2010) também obtiveram IL menor que  $8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$  para o Grupo I ( $f_c \leq 50 \text{ MPa}$ ) em um CR com 100 % de AGR. Os autores utilizaram o cimento CP Tipo I-ASTM C150, a informação da classe não foi fornecida. As misturas de concreto foram preparadas com uma relação a/c de 0,50 e consumo de cimento de  $380 \text{ kg}/\text{m}^3$ , mantidos constantes para os concretos com agregados reciclados e naturais. Os agregados graúdos de concreto reciclado foram submetidos a um tratamento de superfície por impregnação em PVA (acetato de polivinila), um polímero solúvel em água, utilizado para reduzir a absorção de água dos AGR e melhorar a trabalhabilidade da mistura. Os valores de resistência à compressão, aos 28 dias, foram inferiores aproximadamente 10 % em relação à mistura com agregados naturais. Apesar da redução na resistência à compressão, os autores obtiveram valores que representam elevadas eficiências no uso de ligantes para os concretos reciclados ( $IL=7,63 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ ), com resistências inferiores a 50 MPa.

Akbarnezhad *et al.* (2011) utilizaram um tratamento termomecânico com o uso de micro-ondas para aumentar a qualidade do AGR removendo parcialmente a argamassa antiga aderida às partículas. Para produzir os agregados reciclados de concreto, os autores trituraram espécimes de concreto em um britador de mandíbula e depois foi executado o peneiramento, utilizando a fração de 8-12 mm, os agregados tinham uma taxa de absorção de 4,2 % que foi compensada totalmente antes da mistura. O tipo de cimento utilizado foi o CP Tipo I-ASTM C150, a informação da classe não foi fornecida. Os autores conseguiram bons resultados de IL para teores de 20, 40, 60 e 80 % de AGR, e observou-se que para o teor de até 40 % de AGR praticamente não houve perda de resistência em relação ao concreto de referência (sem agregados reciclados). Porém, para se alcançar esses resultados, os AGR passaram por um beneficiamento termomecânico para retirar a

argamassa antiga aderida. Os concretos reciclados com AGR tratado termomecanicamente apresentaram aumento de cerca de 30 % nos resultados de resistência à compressão quando comparados com os concretos com agregados reciclados sem tratamento termomecânico no AGR. Desse modo, é importante enfatizar que isso gera um consumo energético que não foi contabilizado, o que certamente pode diminuir a ecoeficiência deste tipo de concreto. Além disso, nesse estudo, observou-se que o aumento do teor de AGR promoveu uma redução da resistência à compressão dos CR (perda de cerca 12 % para o CR com 80 % de AGR em relação ao CR com 20 % de AGR), e conseqüente perda de desempenho em termos de IL, uma vez que o consumo de ligantes, as relações a/c e o teor de aditivo foram mantidos constantes. Ou seja, foi possível perceber como a quantidade de AGR influencia negativamente na resistência à compressão, quando o consumo de ligantes se mantém constante.

Pedro *et al.* (2019) utilizaram resíduos de concreto pré-moldados provenientes de misturas comerciais de concreto de alta resistência. Os concretos passaram pelo processo de britagem e posteriormente foram classificados por peneiramento mecânico, utilizando o intervalo de tamanho de agregado graúdo de 4,0 a 22,4 mm. Os agregados tinham uma taxa de absorção de água de 3,9 % e foi utilizado o método de compensação de água prescrito por Leite (2001) na produção das misturas, de maneira a corrigir a quantidade de água efetivamente disponível para mistura e a quantidade de ligantes (a/c efetiva). O resultado apresentado na Tabela 11 corresponde ao traço com utilização de cimento CEM I 42.5R ( $f_c \geq 42,5$  MPa, aos 28 dias) e procedimento de mistura de um estágio. O teor de aditivo químico utilizado foi de 1 % em relação à massa de cimento. Os valores de resistência à compressão foram aproximadamente 8 % inferiores quando comparados com a mistura com agregados naturais. Apesar da redução na resistência à compressão quando comparado com a mistura de referência, os autores obtiveram valores que representam elevadas eficiências no uso de ligantes para os concretos reciclados ( $IL=6,58 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ ).

Pacheco *et al.* (2015) utilizaram agregados reciclados de alta qualidade (resistência à compressão de 50 MPa), proveniente de uma indústria de pré-moldados, processados em uma planta de britagem, com dimensão máxima de 20 mm, que posteriormente eram imersos em água para compensar a absorção de água dos AGR. Os autores utilizaram um cimento CEM II A-L 42.5R, que corresponde a um cimento de alta resistência ( $f_c \geq 42,5$  MPa, aos 28 dias) e 1,0 % de aditivo superplastificante em relação à massa de ligantes.

Em relação ao concreto de referência, os autores reduziram a relação água/cimento de 0,53 para 0,40, porém a trabalhabilidade foi alcançada devido à inserção do aditivo superplastificante que permitiu uma elevada dispersão do cimento, tendo em vista que o consumo de cimento permaneceu constante. Dessa forma, foi possível encontrar um valor de resistência à compressão, para a mistura com teor de 100 % de AGR, 65 % maior que o concreto de referência, e esse resultado representa uma elevada eficiência no uso de ligantes ( $IL=6,14 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ ).

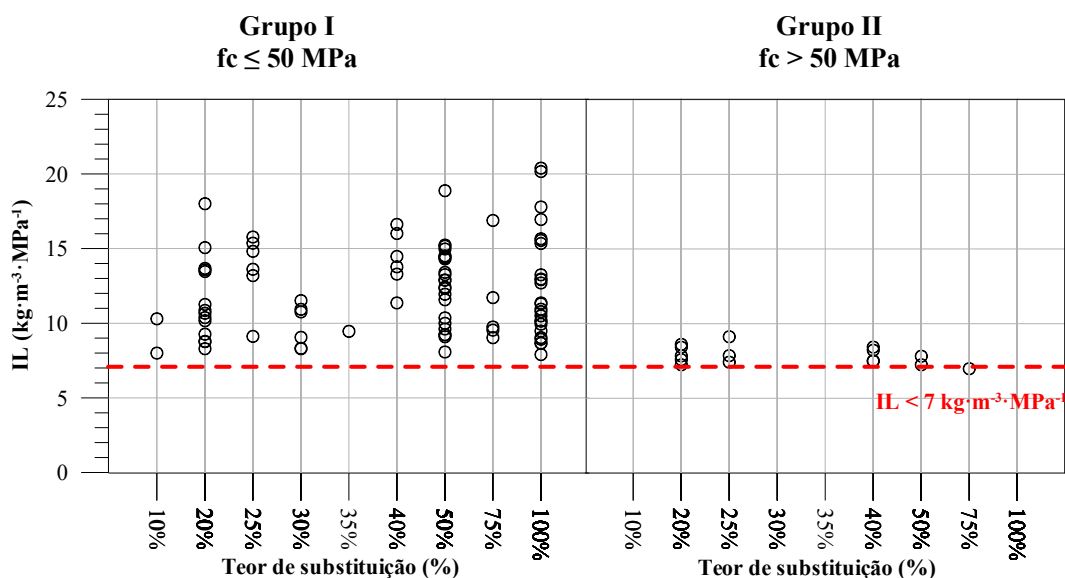
O concreto de origem do estudo de Domingo-Cabo *et al.* (2009) também foi de alta qualidade (resistência à compressão de 40 MPa). Os autores utilizaram um cimento CEM I 42.5 N/S, que corresponde a um cimento de alta resistência ( $f_c \geq 42,5 \text{ MPa}$ , aos 28 dias) e 1,40 % de aditivo superplastificante em relação à massa de ligantes. Na mistura dos componentes, a adição da água foi realizada em três etapas. A trabalhabilidade foi alcançada com a inserção do dobro de superplastificante (1,40 %) quando comparado com o concreto de referência (0,70 %), tendo em vista que a relação a/c foi mantida constante. Este fato permitiu uma elevada dispersão do ligante, que proporcionou um concreto reciclado com resistência à compressão 21 % maior que a resistência à compressão do concreto de referência.

Diante do exposto, observa-se que os teores de substituição não afetam tanto as eficiências, tendo em vista que foram verificadas boas eficiências ( $IL$  entre 6 a  $7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ ) para teores de 20 a 100 % de AGR, exceto quando o consumo de ligantes se mantém constante e o AGR utilizado é o mesmo, como é o caso do estudo de Akbarnezhad *et al.* (2011). 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  $IL$ . Sendo possível conseguir elevadas resistências para os CR com consumos de ligantes menor ou igual a  $380 \text{ kg}/\text{m}^3$ , o que representa uma elevada eficiência no consumo de ligantes.



### 5.2.2 Efeito do AMR sobre o IL

Para os concretos com AMR, os menores valores de Intensidade de Ligantes encontram-se por volta de 6 a 8  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ . Diferentemente dos concretos com AGR, apenas 1 (hum) estudo (HU; WANG; KIM, 2013) apresentou IL entre 6 a 7  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$  (retângulo com linha pontilhada em verde na Figura 21b), como pode ser melhor visualizado na Figura 24. De um modo geral, o uso do AMR na produção dos concretos reciclados promove uma melhoria na faixa de variação da Intensidade de Ligantes: o IL varia de 7 a 21  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$  para os concretos do Grupo I ( $f_c \leq 50$  MPa) e de 7 a 9  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$  para os concretos do Grupo II ( $f_c > 50$  MPa) como observado na Figura 24.



**Figura 24** Intensidade de ligantes (IL) *versus* teor de AMR

Ao avaliar as características das misturas que apresentaram menores valores de IL dos concretos com AMR, conforme se vê na Tabela 12, para o grupo I ( $f_c \leq 50$  MPa) e II ( $f_c > 50$  MPa), observa-se que todos os agregados são de concreto, os consumos de ligantes estão entre 380 e 480  $\text{kg}/\text{m}^3$ , todos os estudos utilizaram aditivos SP ou VMA, e apenas no estudo de Hu, Wang e Kim (2013) houve o uso de cinza volante.

**Tabela 12** Características dos concretos com menores IL para as misturas com diferentes teores de AMR e da combinação de AGR/AMR

Tamanho do AR no CR	Estudo	Teor de AR (%)	Origem do AR	C <sup>(1)</sup> (kg)	a/c	Adição mineral		Aditivo químico		f <sub>c</sub> (MPa)	IL (kg.m <sup>-3</sup> .MPa <sup>-1</sup> )
						Tipo	Teor (kg)	Tipo	Teor (%)		
AMR	Evangelista e Brito (2007)	10	Concreto	380	0,42	-	-	SP	1,30	47,20	8,05
		20	Concreto	380	0,43	-	-	SP	1,30	45,84	8,29
		50	Concreto	380	0,45	-	-	SP	1,30	47,04	8,09
		100	Concreto	380	0,45	-	-	SP	1,30	43,84	8,67
	Evangelista e Brito (2010)	30	Concreto	380	0,45	-	-	SP	1,30	45,80	8,29
	Bogas, Brito e Ramos (2016)	20	Concreto	420	0,35	-	-	SP	0,80	58,16	7,22
		50	Concreto	420	0,35	-	-	SP	0,80	53,92	7,79
	Hu, Wang e Kim (2013)	25	Concreto	473	0,33	CV	83	VMA/SP	1,40/2,20	64,00	7,39
		75	Concreto	473	0,33	CV	83	VMA/SP	1,40/2,20	68,00	6,96
	AGR/AMR	Pedro <i>et al.</i> (2019)	100/100	Concreto	400	0,44	CV/SA	40/40	SP	2,00	49,04
100/100			Concreto	400	0,41	CV	40	SP	2,00	61,60	6,49
Wang <i>et al.</i> (2019)		100/50	Concreto	400	0,45	-	-	SP	0,50	50,64	7,90

Nota: CR–concreto reciclado; AR–agregado reciclado; C–Consumo de ligantes, em kg para produzir 1 m<sup>3</sup> de concreto; a/c–relação água cimento; f<sub>c</sub>–resistência à compressão aos 28 dias; IL–Intensidade de Ligantes; CV–Cinza volante; SA–Sílica ativa; SP–Superplastificante; VMA–Agente modificador de viscosidade.

<sup>(1)</sup> Consumo de ligantes corresponde ao consumo de cimento Portland e de adições minerais (pozolânicas e/ou inertes), quando for o caso.

O concreto reciclado com teor de 10 % de AMR, do estudo de Evangelista e Brito (2007), corresponde a melhor eficiência no uso de ligantes ( $IL = 8,05 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ ) do grupo I ( $f_c \leq 50 \text{ MPa}$ ). Os autores utilizaram um cimento de alta resistência (CEM I 42.5 R –  $f_c \geq 42,5 \text{ MPa}$ , aos 28 dias), o AMR foi um resíduo fino de concreto, obtido de misturas de concreto produzidas especialmente em laboratório, e as etapas de trituração e peneiramento foram controladas. A taxa de absorção do AMR foi de 13,1 %, que foi compensada totalmente antes da mistura, a fim de manter a trabalhabilidade. A relação a/c do concreto de referência foi de 0,41, ou seja, houve um aumento de cerca de 2,4 % da relação a/c para o CR com 10 % de AMR ( $a/c = 0,42$ ), enquanto o consumo de ligantes permaneceu constante. A trabalhabilidade do CR foi controlada com o uso aditivo superplastificante (1,30 %) e a compensação de água do agregado. Desse modo, a resistência à compressão aumentou 4,7 % em relação ao concreto com agregados naturais, e os autores atribuem esse acréscimo a maior quantidade de cimento não hidratada existente no agregado miúdo de concreto, proveniente do concreto de origem jovem produzido em laboratório. Desse modo, pode estar ocorrendo um aumento da quantidade de cimento total na mistura e, conseqüentemente, aumento da resistência à compressão.

Hu, Wang e Kim (2013) utilizaram um agregado miúdo reciclado de concreto com tamanho máximo de 2,36 mm, obtido através da trituração do concreto em laboratório. O cimento utilizado foi o CP Tipo I-ASTM C150 (2007), a informação da classe de resistência não foi fornecida. A relação a/c foi a mesma do concreto de referência, assim como a quantidade dos aditivos químicos. O processo de mistura foi realizado em duas etapas e junto com a adição de superplastificante e o modificador de viscosidade se corrigiu a trabalhabilidade, sem ocorrência de exsudação. Houve um aumento de aproximadamente 4,50 % no valor de resistência à compressão para a mistura com 75 % de AMR em comparação com o concreto de referência. Tal comportamento pode ser atribuído à melhoria da matriz e da zona de transição do concreto, devido à existência de maior quantidade de finos, presentes no AMR e na cinza volante usada na mistura, que favorecem o fechamento dos poros e promovem o empacotamento das partículas juntamente com a melhor dispersão promovida pelo aditivo superplastificante.

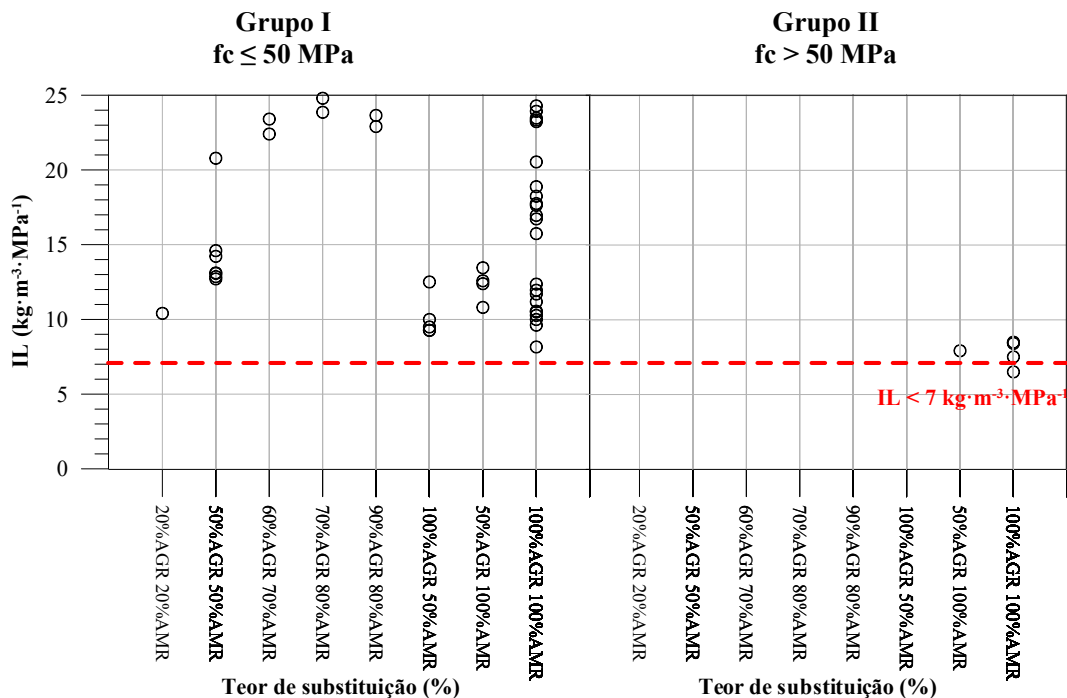
Bogas, Brito e Ramos (2016) apresentaram as misturas com a melhor eficiência para os concretos com 20 e 50 % de AMR. Os autores utilizaram um resíduo fino de concreto de Classe 25 e 30, obtidos por trituração, aos 28 dias de idade. Estes foram pré-umedecidos antes de adicionar os outros componentes da mistura, a fim de corrigir a

trabalhabilidade. O cimento utilizado foi o CEM Tipo I 42,5 R ( $f_c \geq 42,5$  MPa, aos 28 dias). Os valores de resistência à compressão foram inferiores aproximadamente 7 e 10 %, para o teor de 20 e 50 % de AMR, respectivamente, quando comparados com a mistura de referência. Apesar das reduções na resistência à compressão, os autores obtiveram valores de IL que representam elevadas eficiências no uso de ligantes para os concretos reciclados com os dois teores de AMR avaliados. Do mesmo modo que foi observado para os concretos com AGR, o aumento do teor de AMR, nesse caso de 20 para 50 %, ao utilizar o mesmo tipo de AR em misturas de CR com o mesmo consumo de ligantes (420 kg), relação a/c e teor de SP constantes, promoveu uma redução de cerca de 7,2 % na resistência à compressão do concreto, e uma consequente redução (8 %) da eficiência no uso de ligantes (o IL aumentou cerca de 8 %).

De um modo geral, os consumos de cimento Portland dos concretos reciclados com AMR foram maiores ( $C \leq 420$  kg) quando comparados com os concretos reciclados com AGR ( $C \leq 380$  kg), o que pode estar relacionado com a redução das relações a/c dos primeiros em comparação aos últimos, como pode ser verificado na Tabela 11 e na Tabela 12. Um fator comum nos estudos com melhores eficiências dos concretos com AMR, foi o uso dos aditivos superplastificantes, o uso de cinza volante, como adição mineral, e a redução da relação a/c das misturas, que promovem uma maior dispersão dos ligantes, um maior empacotamento, e maior densificação das matrizes de concreto, melhorando o comportamento mecânico e aumentando a eficiência no uso de ligantes.

### **5.2.3 Efeito do AGR/AMR sobre o IL**

Para os concretos com AGR/AMR apenas um estudo apresentou IL entre 6 a 7  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  (retângulo com linha pontilhada em verde na Figura 21c), também para resistências acima de 50 MPa, como pode ser melhor observado na Figura 25. Verifica-se que o uso dos dois tamanhos de agregados reciclados, miúdos e graúdos, promove um aumento expressivo na Intensidade de Ligantes dos concretos reciclados, principalmente para os concretos do grupo I ( $f_c \leq 50$  MPa) que apresentaram faixa de variação do IL entre 8 a 25  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ , como mostrado na Figura 25.



**Figura 25** Intensidade de ligantes (IL) versus teor de AGR/AMR

Pedro *et al.* (2019) conseguiram a melhor eficiência para os dois grupos de resistência (Grupo I e Grupo II) dentre os concretos analisados, cujas características estão apresentadas nos dados da Tabela 12. O melhor IL ( $6,49 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ ) desse grupo de misturas foi obtido com um consumo de 360 kg de cimento Portland, 40 kg de cinza volante e 2,00 % de aditivo superplastificante, semelhante ao concreto de referência. Para os dois resultados apresentados na Tabela 12, os autores utilizaram o cimento CEM I 52.5R (cimento de alta resistência,  $f_c \geq 52,5 \text{ MPa}$ , aos 28 dias), procedimento de mistura de um estágio e resíduos graúdos e miúdos de concreto provenientes de misturas comerciais de concreto de alta resistência da indústria de pré-moldados. Os concretos passaram pelo processo de britagem e posteriormente foram classificados por peneiramento mecânico, utilizando o intervalo de tamanho de agregado graúdo de 4,0 a 22,4 mm e de agregado miúdo até 4,0 mm. Os agregados graúdos apresentaram uma taxa de absorção de água de 3,9 % e os miúdos de 6,1 %, que, durante a produção das misturas, foram corrigidos pelo método de compensação de água descrito por Leite (2001). Para o melhor resultado do Grupo I e do Grupo II (apresentados na Tabela 12), os valores de resistência à compressão foram inferiores aproximadamente 7 % e 10 %, respectivamente, quando comparados com a mistura de referência. Apesar das reduções

na resistência à compressão, os autores obtiveram valores que representam elevadas eficiências no uso de ligantes para uso de 100 % dos dois tamanhos de agregados reciclados.

Wang *et al.* (2019) também obtiveram um IL menor que  $8 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para os concretos do Grupo II ( $f_c > 50 \text{ MPa}$ ) para um teor de AR de 100 % de AGR e 50% de AMR. O cimento utilizado foi o CEM Tipo I 42,5 R ( $f_c \geq 42,5 \text{ MPa}$ , aos 28 dias), os agregados graúdos e miúdos foram obtidos de um concreto com resistência à compressão de 41,5 MPa que passaram por um processo de britagem de dois estágios. O agregado graúdo reciclado foi utilizado como único agregado graúdo em todas as misturas de concreto, alterando somente o teor de agregado miúdo reciclado. Foi feita a compensação de água para o agregado miúdo reciclado a fim de alcançar a trabalhabilidade adequada e a proporção efetiva de a/c permaneceu constante em 0,45. Os valores de resistência à compressão para a mistura com 50 % de AMR foram superiores aproximadamente 5 % do que a mistura sem agregados miúdos reciclados. Os autores justificam esse acréscimo à superfície mais áspera do agregado miúdo reciclado que promove uma maior aderência da pasta com o agregado, melhorando a microestrutura e conseqüentemente, os resultados de resistência à compressão.

Os resultados demonstram que é possível formular concretos com elevadas eficiências no consumo de ligantes sem agregados naturais, para consumos de cimento Portland iguais ou inferiores a 360 kg, com a utilização de adições minerais (cinza volante e sílica ativa) e aditivos superplastificantes, e relação a/c  $\leq 0,44$ . Os aditivos promovem uma elevada dispersão das partículas finas (cimento e adições minerais) e as adições atuam no sentido de promover um maior empacotamento, reduzindo o consumo de cimento.

#### **5.2.4 Comparações entre o $IL_{CR}$ com o $IL_{CC}$**

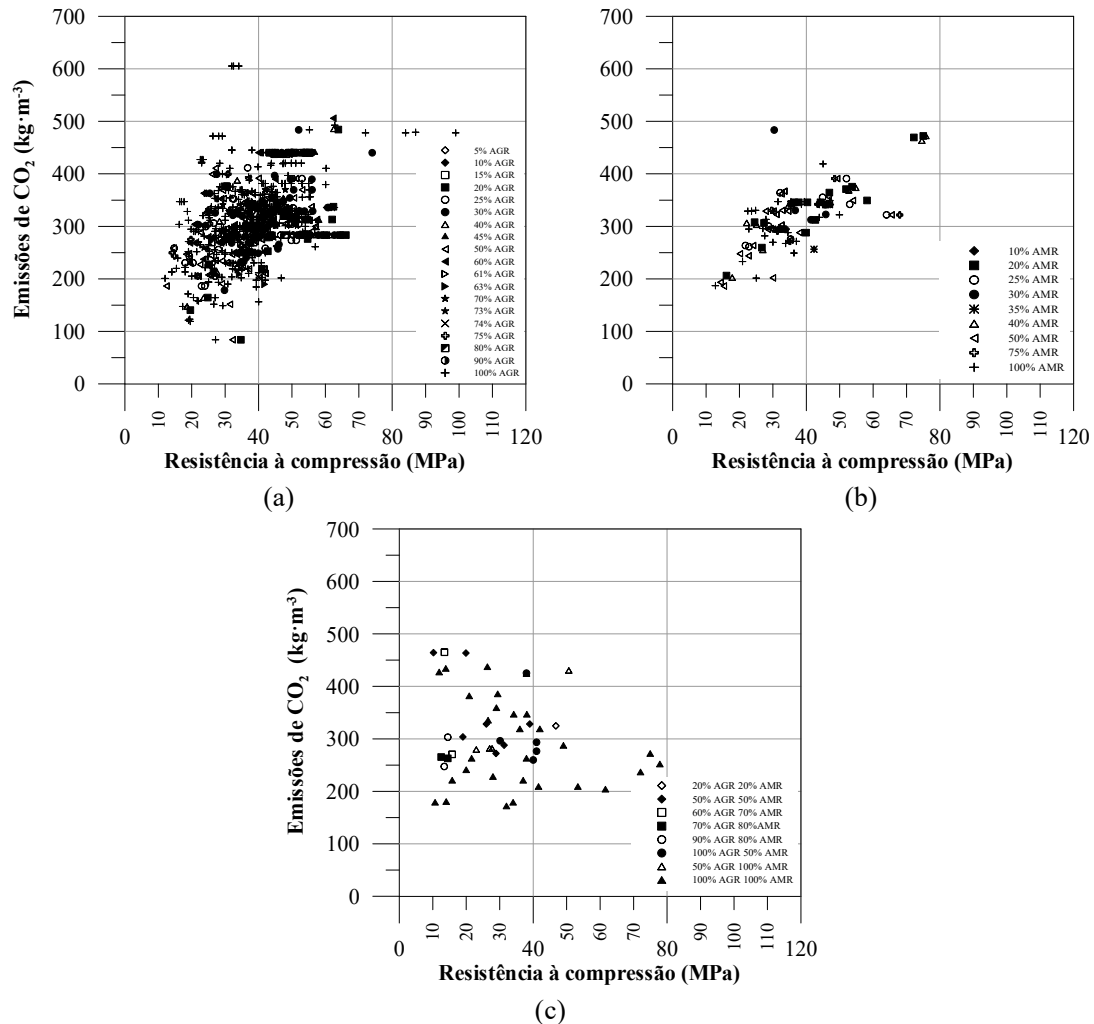
No panorama para concretos convencionais estabelecido por Damineli (2013) foram apresentados 24 resultados para os concretos cujos valores de IL foram inferiores a  $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ . Para os CR nenhum estudo apresentou IL inferior a  $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ . Ou seja, para CC já existem trabalhos com melhores desempenhos quando comparados aos CR.

Observa-se que, em geral, concretos de altas resistências ( $f_c > 50$  MPa) tendem a ser mais eficientes em termos de IL e apresentam menor dispersão dos dados. Os menores IL são conseguidos para resistências superiores a 50 MPa, a maioria dos resultados entre 5 e 7  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  são para os estudos com resistências elevadas. Concretos com resistências à compressão abaixo de 50 MPa possuem IL médio de aproximadamente 12  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para os concretos com AGR, 13  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para os concretos com AMR e 16  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para os concretos com AGR/AMR.

No panorama estabelecido por Damineli *et al.* (2010) para CC, também foi verificado essa tendência nos dados coletados, maiores eficiências para maiores resistências. Isto, porém, não faz do aumento da resistência à compressão uma ação que aumente a eficiência real no uso de ligantes. Uma maior eficiência para concretos com elevadas resistências à compressão só seria real, se este ganho diminuísse o volume de concreto (e, portanto, de cimento) a ser utilizado na execução de estruturas em que se exige maiores resistências. Essa proposta atenderia a um dos parâmetros estabelecidos por Mehta (2009) para o caminho da sustentabilidade na indústria do cimento e do concreto: a redução do volume de concreto utilizado. Porém, para concretos reciclados, vários autores (BAIRAGI; RAVANDE; PAREEK, 1993; LEITE, 2001; LEVY, 2001; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002; RAHAL, 2007; EVANGELISTA; BRITO, 2007; CORINALDESI, 2010; FONSECA *et al.*, 2011; LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012; PACHECO *et al.*, 2015) indicam que o módulo de deformação dos CR com AGR geralmente é menor que o do CC. Isto ocorre devido a maior porosidade do agregado reciclado, que ocasiona uma menor resistência e menor módulo de elasticidade do grão de agregado reciclado. Dessa forma, menores valores de módulos de deformação são esperados para concretos com elevados teores de substituição, mesmo para resistências  $> 50$  MPa, o que pode inviabilizar a redução do volume de concreto. Além disso, a diminuição da dimensão das seções, por exemplo, pode ser limitada a esforços de flambagem no caso de pilares, ou flechas máximas, no caso de vigas. Dessa forma, aumentos de eficiência (menores valores de IL) serão mais efetivos para as resistências usuais de mercado (concretos com  $f_c$  entre 25 a 40 MPa), e misturas que incorporam menores teores de AR, de modo a não comprometer o módulo de deformação dos concretos.

### 5.3 INTENSIDADE DE CO<sub>2</sub> (IC)

Os resultados de emissões totais de CO<sub>2</sub> em função da resistência à compressão, calculados conforme descrito no Item 4.3 com os dados disponíveis na literatura, estão apresentados nos gráficos da Figura 26.



**Figura 26** Emissões de CO<sub>2</sub> versus resistência à compressão: a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR

A influência do uso de diferentes teores de AGR, de AMR e do uso combinado de AGR/AMR sobre as emissões totais de CO<sub>2</sub> dos concretos reciclados mostrados na Figura 26a, 26b e 26c, respectivamente, indicam que embora se observe uma grande variação dos resultados, as misturas com maiores teores de AGR e a combinação de AGR/AMR são as que mostram maiores valores de emissões totais de CO<sub>2</sub> (resultados acima de 400 kg/m<sup>3</sup> para os concretos com AGR e resultados acima de 300 kg/m<sup>3</sup> para os concretos



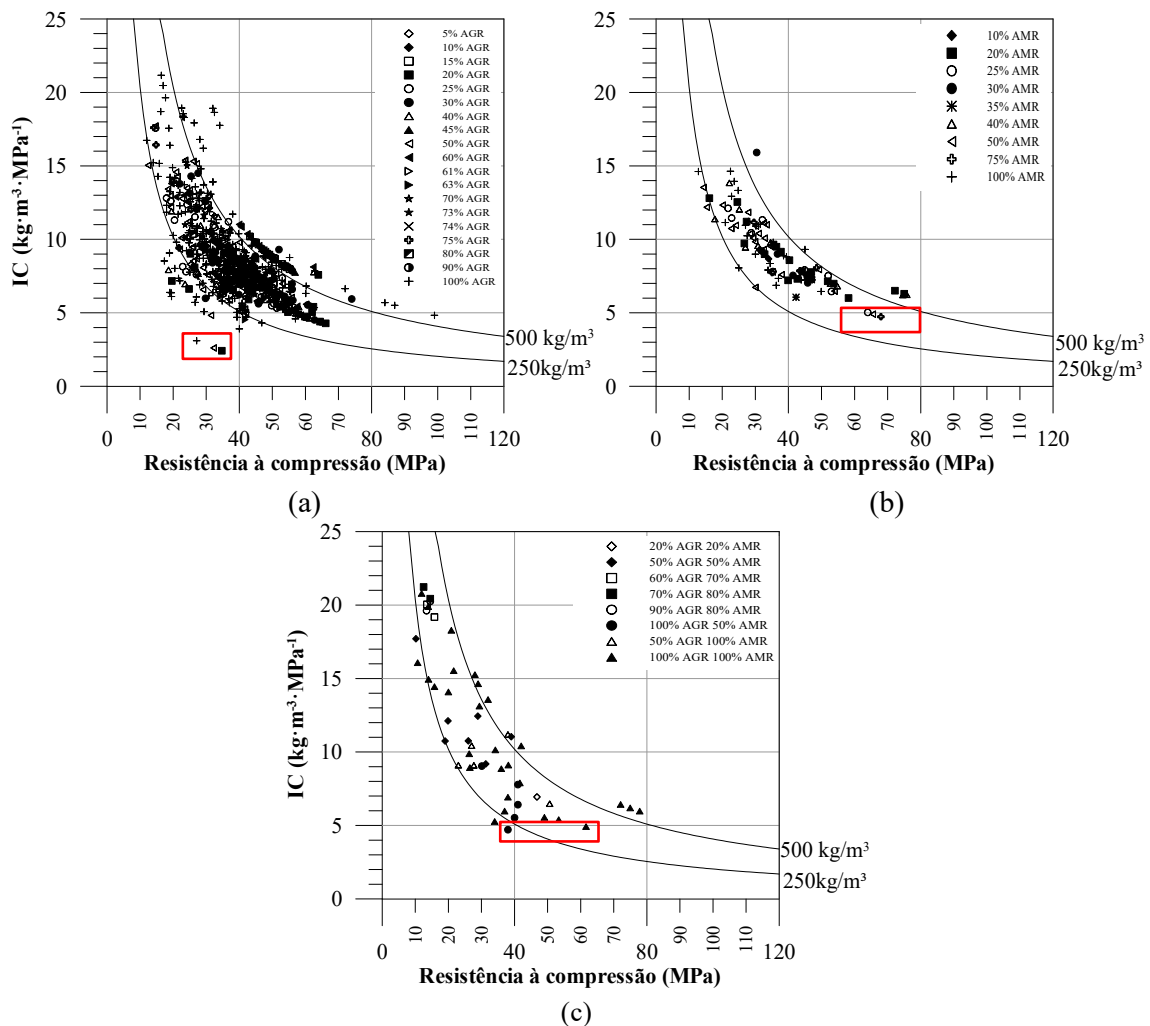
com AGR/AMR para a faixa de resistências avaliadas). Diferentemente, para os concretos com AMR, os valores de emissões totais de CO<sub>2</sub> parecem ser mais afetados pela resistência à compressão das misturas do que pelo teor de AMR. Para o concreto com AGR, a maioria dos dados apresentam emissões totais de CO<sub>2</sub> entre 150 e 450 kg.m<sup>-3</sup> (~91 %), para o concreto com AMR, entre 250 e 400 kg.m<sup>-3</sup> (~84 %) e para concreto com AGR/AMR, entre 200 e 450 kg.m<sup>-3</sup> (~87 %).

A Intensidade de CO<sub>2</sub> (IC) dos concretos reciclados, calculada conforme descrito no Item 4.3, está apresentada na Figura 27. A tendência dos dados é semelhante à observada para os resultados da intensidade de ligantes (Figura 21), uma vez que os concretos com altas resistências ( $f_c > 50$  MPa) tendem a apresentar menores intensidades de CO<sub>2</sub> e menor dispersão dos dados. Para os estudos com AGR/AMR, a maioria dos concretos apresentou resultados de resistência à compressão inferiores a 50 MPa, portanto não se verifica essa tendência. É importante lembrar que a intensidade de CO<sub>2</sub> foi calculada com base no teor médio de clínquer do cimento, somado com as emissões de CO<sub>2</sub> referentes às adições e aditivos químicos utilizados.

O critério de seleção para as melhores eficiências, em termos de IC que serão discutidos nos Itens 5.3.1, 5.3.2 e 5.3.3, estão descritos abaixo:

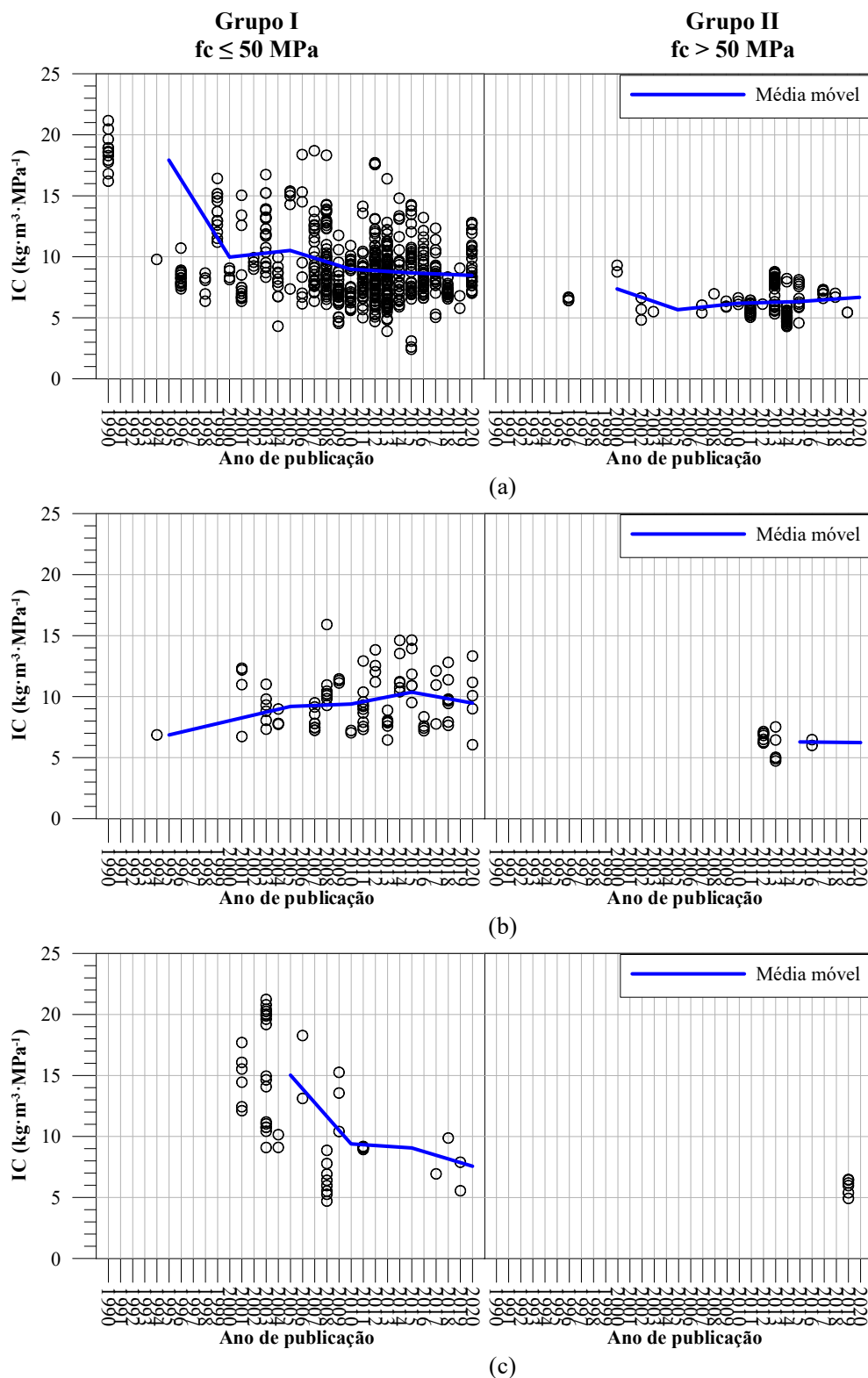
- Para concretos com AGR:
  - i.  $IC \leq 4 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para os concretos do Grupo I ( $f_c \leq 50$  MPa);
  - ii.  $IC \leq 5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para os concretos do Grupo II ( $f_c > 50$  MPa);
  - iii. Consumos de cimento Portland menores que 420 kg para ambos os grupos de resistência dos concretos reciclados avaliados.
- Para concretos com AMR e AGR/AMR:
  - i.  $IC \leq 7 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para os concretos do Grupo I ( $f_c \leq 50$  MPa);
  - ii.  $IC \leq 5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para os concretos do Grupo II ( $f_c > 50$  MPa);
  - iii. Consumos de cimento Portland menores que 420 kg para ambos os grupos de resistência dos concretos reciclados avaliados.

Assim como foi feito para o IL, os concretos que apresentaram consumos de cimento Portland superiores a 420 kg não foram discutidos como misturas com elevadas eficiências. Além disso, foram escolhidos os melhores resultados de cada teor de AR para serem discutidos.



**Figura 27** Relação entre a Intensidade de CO<sub>2</sub> (IC) *versus* resistência à compressão: a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR

A Figura 28 mostra as tendências nos IC durante os 30 anos de análise, separados por grupo de resistência (Grupo I:  $f_c \leq 50$  MPa e Grupo II:  $f_c > 50$  MPa) e a média móvel referente a 5 anos para as misturas com AGR (Figura 28a), as misturas com AMR (Figura 29b) e as misturas com AGR/AMR (Figura 28c). Verifica-se uma redução do IC a partir do ano de 2005 até 2020 para os concretos com AGR e os concretos com a combinação de AGR/AMR, para as resistências menores que 50 MPa (Grupo I). Os concretos com resistências superiores a 50 MPa para qualquer um dos tamanhos dos agregados (AGR, AMR, AGR/AMR) não se tem uma grande variação dos valores IC ao longo dos anos, e há uma menor dispersão dos dados, para todas as misturas de concreto reciclado analisadas.



**Figura 28** Intensidade de CO<sub>2</sub> (IC) versus ano: a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR

Para melhor compreender a influência do agregado reciclado sobre as emissões de CO<sub>2</sub> do concreto reciclado, a seguir serão discutidos os efeitos do AGR, do AMR e da mistura de AGR/AMR em diferentes proporções sobre a Intensidade de CO<sub>2</sub>.

### 5.3.1 Efeito do AGR sobre o IC

Para os concretos com AGR, os melhores resultados de IC variam de 2 a 4 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>, o que ocorre para concretos com resistências inferiores a 50 MPa (retângulo com linha contínua em vermelho na Figura 27a). Tais resultados estão evidenciados na Figura 29, na qual o conjunto de resultados foi separado em dois grupos de acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015): Grupo I, envolve os concretos com resistência à compressão menor ou igual a 50 MPa; e Grupo II, que considera os concretos com resistência à compressão maior que 50 MPa. No gráfico da Figura 29 também observa-se que para os concretos do Grupo II (f<sub>c</sub> > 50 MPa) a faixa de variação do IC é muito menor (entre 4 e 10 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>) quando comparada com a faixa de variação dos concretos do Grupo I (f<sub>c</sub> ≤ 50 MPa) que foi de 2 a 22 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>.

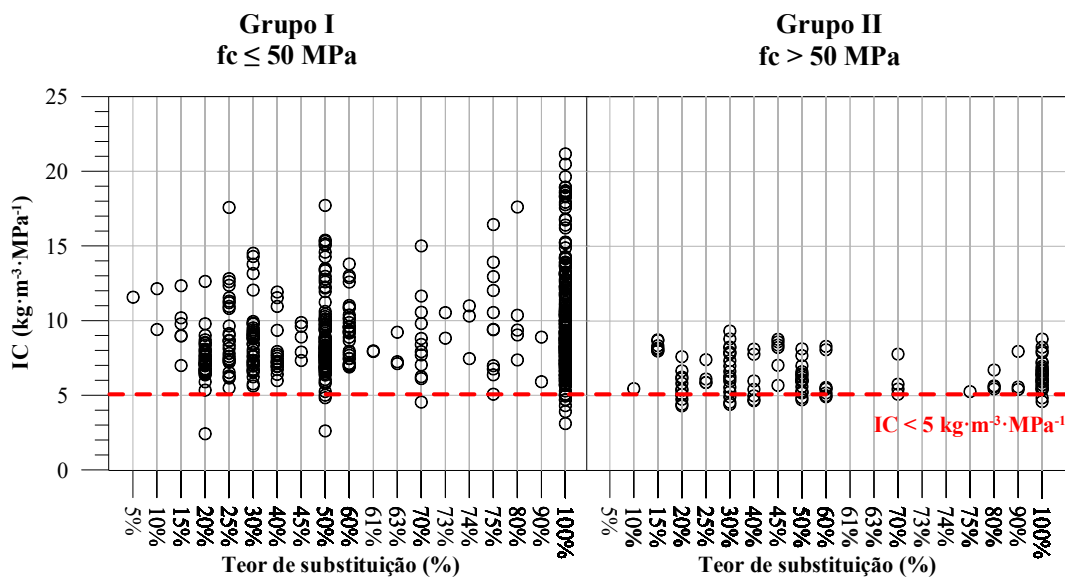


Figura 29 Intensidade de CO<sub>2</sub> (IC) versus teor de AGR

O menor valor de IC encontrado foi de 2,4 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup> para um concreto reciclado com 20 % de agregado graúdo de concreto, consumo de ligantes de 300 kg/m<sup>3</sup>, a/c de 0,60, resistência à compressão de 34,7 MPa (Grupo I - f<sub>c</sub> ≤ 50 MPa) e IL de 8,6 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup> (LOTFI *et al.*, 2015). Os autores utilizaram o cimento CEM III/B, que de acordo com a EN-197-1 (2011), apresenta um teor de clínquer variando entre 20 - 34 %. Como

as emissões de CO<sub>2</sub> das adições são bem menores que as emissões do clínquer (Tabela 8 e Tabela 9 do Item 4.2), isso gera um resultado com alta eficiência em termos de emissões de CO<sub>2</sub> (baixo resultado de IC) devido à utilização de um cimento com alto teor de adição mineral. Além desse resultado, os outros dois melhores resultados de IC para o Grupo I ( $f_c \leq 50$  MPa) são os dos CR do estudo dos mesmos autores, cujas características estão listadas na Tabela 13 e estão evidenciados na Figura 29.

O estudo de Pacheco *et al.* (2015) representou o melhor resultado para o Grupo II ( $f_c > 50$  MPa). Os autores utilizaram um cimento CEM A-L 42.5R, que corresponde a um cimento de alta resistência ( $f_c \geq 42,5$  MPa, aos 28 dias) e um teor de clínquer de 80 - 94 %. Os agregados reciclados utilizados foram de alta qualidade (resistência à compressão de 50 MPa), proveniente de uma indústria de pré-moldados, processados em uma planta de britagem, com dimensão máxima de 20 mm, que posteriormente eram imersos em água para compensar a taxa de absorção de água dos AGR. Em relação ao concreto de referência, os autores reduziram a relação água/cimento de 0,53 para 0,40, porém a trabalhabilidade foi alcançada devido à inserção do aditivo químico que permitiu uma elevada dispersão do cimento, tendo em vista que o consumo de cimento permaneceu constante. Dessa forma, foi possível encontrar um valor de resistência à compressão para o CR com 100 % de AGR, 65 % maior que o concreto de referência, e esse resultado representa uma elevada eficiência no uso de ligantes ( $IL < 7 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ ), conforme demonstrado na Tabela 13.

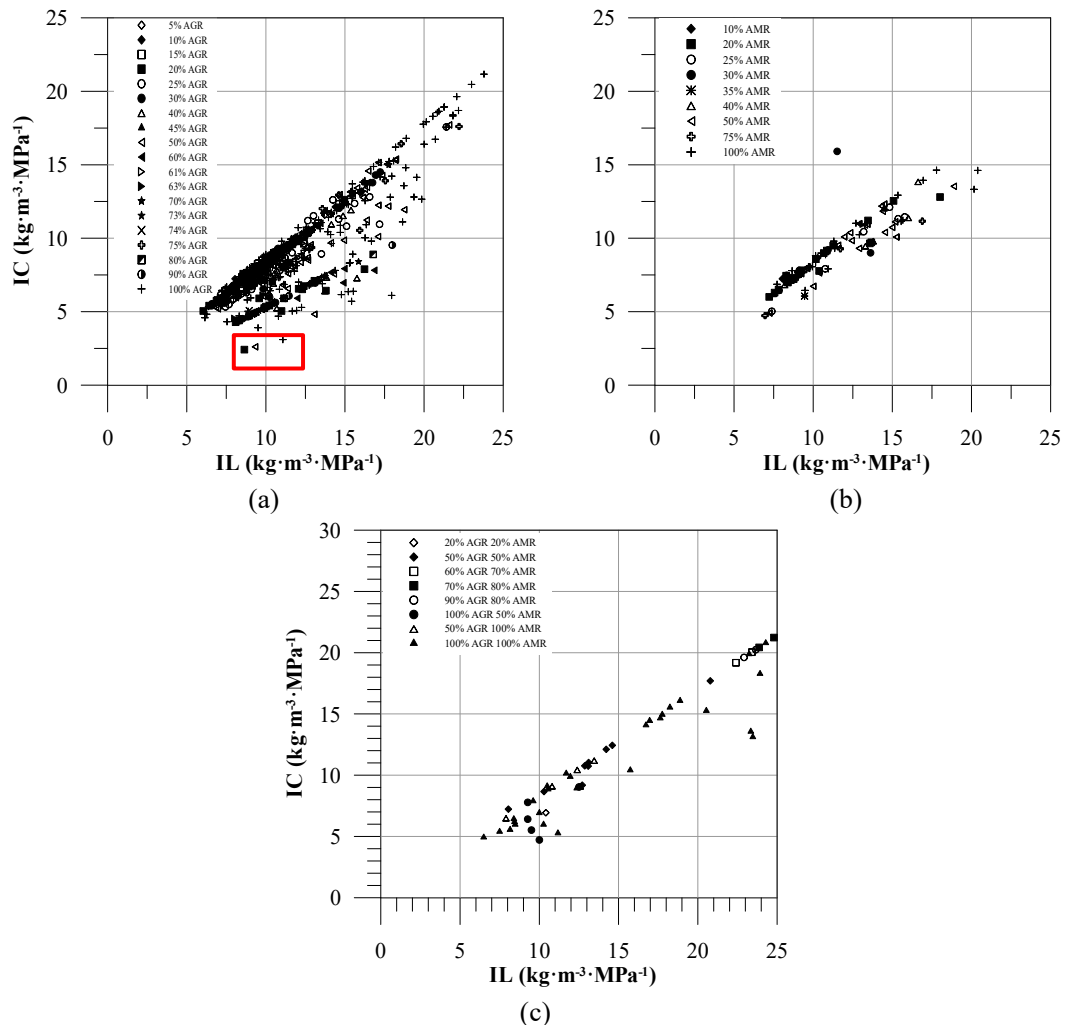
Dessa forma, o fator determinante para os menores valores de IC aqui descritos para os concretos com AGR do Grupo I ( $f_c \leq 50$  MPa) foi o cimento com alto teor de adições, no caso, o CEM III/B que apresenta elevado teor de escória de alto forno (66-80 %). Com isso, as emissões de CO<sub>2</sub> nesses concretos foram minimizadas, o que gera valores baixos de IC. Contudo, isso não significa que tais misturas tenham elevado desempenho em termos de IL, observa-se, tanto na Tabela 13, quanto no gráfico da Figura 30a (destacado pelo retângulo com linha contínua em vermelho) que tais misturas apresentam resultados de IL acima de  $7 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ . Porém, é importante lembrar que para obtenção de um concreto sustentável, uma maior taxa de substituição do clínquer apenas não representa a estratégia mais promissora. A demanda por adições pode aumentar muito e não atender a indústria cimenteira, como já mencionado, tendo em vista o aumento da produção do cimento nas próximas décadas, como destacado por Oliveira *et al.* (2014) e Damineli (2013).

**Tabela 13** Características dos concretos com os melhores resultados de IC para as misturas com diferentes teores de AGR, AMR e AGR/AMR

Tamanho do AR no CR	Estudo	Teor de AR (%)	Origem do AR	C <sup>(1)</sup> (kg)	a/c	f <sub>c</sub> (MPa)	Adição mineral		Aditivo químico		IC (kg.m <sup>-3</sup> .MPa <sup>-1</sup> )	IL (kg.m <sup>-3</sup> .MPa <sup>-1</sup> )	Tipo de cimento (teor de clínquer, %)
							Tipo	Teor (kg)	Tipo	Teor (%)			
AGR	Lotfi <i>et al.</i> (2015)	20	Concreto	300	0,60	34,70	-	-	-	-	2,40	8,60	CEM III/B (20-34)
		50	Concreto	300	0,60	32,20	-	-	-	-	2,61	9,32	CEM III/B (20-34)
		100	Concreto	300	0,60	27,10	-	-	-	-	3,10	11,07	CEM III/B (20-34)
	Pacheco <i>et al.</i> (2015)	100	Concreto	350	0,45	56,96	-	-	SP	1,00	4,58	6,14	CEM II/A (80-94)
	Vieira, Figueiredo e John (2020)	35	Concreto	400	0,51	42,30	-	-	-	-	6,07	9,46	CP II E (51-94)
AMR	Bogas, Brito e Ramos (2016)	50	Concreto	420	0,35	36,30	-	-	SP	0,80	6,48	7,79	CEM I (95-100)
		25	Concreto	473	0,33	64,00	CV	83	VMA/SP	1,40/2,20	5,00	7,39	CEM I (95-100)
	Hu, Wang e Kim (2013)	75	Concreto	473	0,33	68,00	CV	83	VMA/SP	1,40/2,20	4,73	6,96	CEM I (95-100)
		100	Concreto	473	0,33	49,90	CV	83	VMA/SP	1,40/2,20	6,45	9,48	CEM I (95-100)
AGR/AMR	Tangchirapat <i>et al.</i> (2008)	100/50	Misto	380	0,48	38,00	CCA	190	-	-	4,80	10,00	CEM I (95-100)
	Pedro <i>et al.</i> (2019)	100/100	Concreto	400	0,41	61,60	CV	40	SP	2,22	4,95	6,49	CEM I (95-100)

Nota: CR–concreto reciclado; AR–agregado reciclado; C–Consumo de ligantes, em kg para produzir 1 m<sup>3</sup> de concreto; a/c–relação água cimento; f<sub>c</sub>–resistência à compressão aos 28 dias; IC–Intensidade de CO<sub>2</sub>; IL–Intensidade de Ligantes; CV–Cinza volante; CCA–Cinza da casca de arroz; VMA–Aditivo modificador de viscosidade.

<sup>(1)</sup> Consumo de ligantes corresponde ao consumo de cimento Portland e de adições minerais (pozolânicas e/ou inertes), quando for o caso.



**Figura 30** Resultados de IC ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ ) versus resultados de IL ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ ): a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR

Já para o Grupo II ( $f_c > 50$  MPa), como o melhor resultado apresentou um elevado teor de clínquer (80 a 94 %) no cimento Portland, os fatores que influenciaram na obtenção do menor IC ( $4,58 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ ) foram: uso de AGR com elevados valores de resistência à compressão do concreto de origem ( $f_c > 50$  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. Observa-se, na Tabela 13, que esse estudo representa também um valor reduzido de IL ( $\text{IL} < 7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ ), ou seja, esse resultado representa também um elevado desempenho em termos do consumo de ligantes. Observa-

se nos dados da Tabela 13 que nenhuma das misturas apresentou consumos de ligantes acima de 350 kg. Além disso, que não foi utilizado nenhum tipo de adição mineral nos CR, seja para as misturas do Grupo I, seja para a mistura do Grupo II.

### 5.3.2 Efeito do AMR sobre o IC

Para os concretos com AMR, diferentemente dos concretos com AGR, nenhum CR apresentou  $IC < 3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ , os menores valores de IC variam de 4 a 5  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ , o que ocorre para os concretos com resistências superiores a 50 MPa (retângulo com linha contínua em vermelho na Figura 27b). Tais resultados também podem ser visualizados na Figura 31, na qual o conjunto de resultados foi separado nos dois grupos de resistência à compressão, de acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015). No gráfico da Figura 31 também observa-se que para os concretos do Grupo II ( $f_c > 50 \text{ MPa}$ ) a faixa de variação do IC é muito menor (entre 4 e 8  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ ) quando comparada com a faixa de variação dos concretos do Grupo I ( $f_c \leq 50 \text{ MPa}$ ), que foi de 6 a 16  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ .

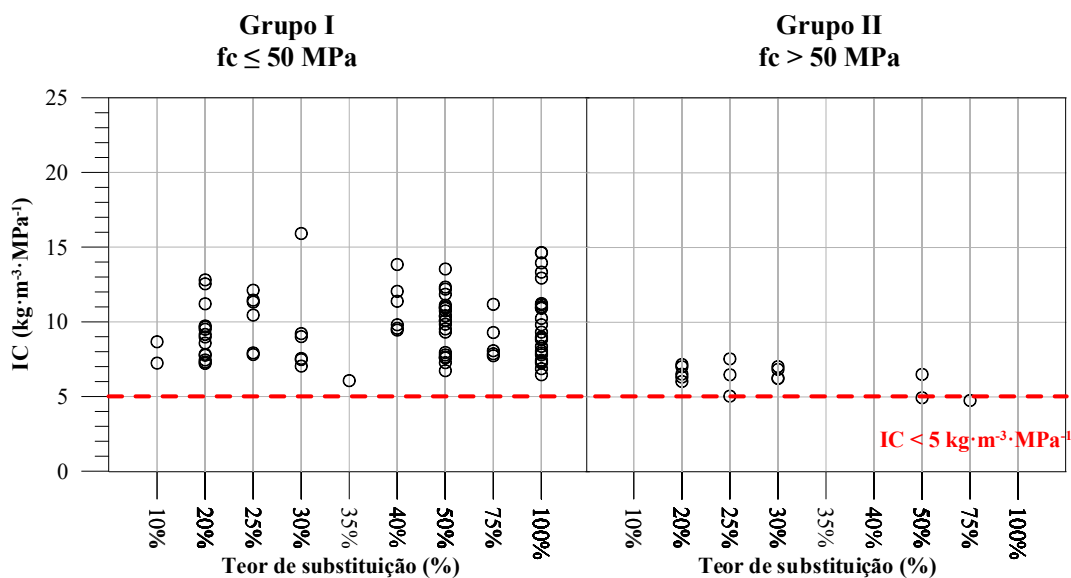


Figura 31 Intensidade de CO<sub>2</sub> (IC) versus teor de AMR

Diferente do melhor resultado dos concretos com AGR, para os concretos com AMR, os melhores valores de IC são para o Grupo II, visível na separação por grupos apresentada na Figura 31 (Grupo I -  $f_c \leq 50 \text{ MPa}$  e Grupo II -  $f_c > 50 \text{ MPa}$ ), comportamento semelhante ao da Intensidade de Ligantes, apresentado no Item 5.2.2. O IC mínimo para o Grupo I ( $f_c \leq 50 \text{ MPa}$ ) é de 6,07  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$  referente ao estudo de



Vieira, Figueiredo e John (2020), cujas características estão apresentadas na Tabela 13. Os autores utilizaram um cimento CP II E, que tem um teor de clínquer de 51 a 94 %, escória de alto forno de 6 a 34 % e material carbonático de 0 a 15 %. Ou seja, representa um cimento com uma grande variação no teor de clínquer e adições, o que conduz a menores emissões de CO<sub>2</sub>, tendo em vista que as emissões de CO<sub>2</sub> das adições são bem menores que as emissões do clínquer (Tabela 8 e 9 do Item 4.2). Além disso, os autores utilizaram 35 % de um AMR gerado a partir da britagem de concretos remanescentes de usinas de concretos pré-moldados, beneficiado dentro de 48 h após a sua produção, a relação a/c do concreto reciclado foi de 0,51 e do concreto convencional foi de 0,49. Os autores afirmam que a utilização de AMR de concretos muito jovens pode proporcionar uma redução no consumo extra de cimento para manter a resistência à compressão de CR.

Bogas, Brito e Ramos (2016) utilizaram um cimento CEM Tipo I 42,5R, com teor de clínquer de 95 - 100 %. O resíduo fino utilizado de concreto foi pré-umedecido antes de adicionar os outros componentes da mistura, a fim de corrigir a trabalhabilidade. Os valores de resistência à compressão foram inferiores aproximadamente 10 % para o teor de 50 % de AMR quando comparados com a mistura de referência. Apesar das reduções na resistência à compressão, os autores obtiveram valores de IL que representam elevadas eficiências no uso de ligantes ( $IL = 7,75 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ ) e nas emissões de CO<sub>2</sub> ( $IC = 6,48 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ ).

Para o Grupo II ( $f_c > 50 \text{ MPa}$ ), o menor valor de IC é de  $4,73 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  corresponde a um CR com teor de 75 % de AMR de concreto (Tabela 13), consumo de ligantes de  $473 \text{ kg/m}^3$ , dos quais 17,5 % corresponde a CV,  $a/c=0,33$ , resistência à compressão de 68,0 MPa e IL de  $6,96 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  (HU; WANG; KIM, 2013). Os autores utilizaram um cimento CEM I, que de acordo com a ASTM C150 (2007) apresenta elevado teor de clínquer (95 - 100 %) e um AMR de concreto, com tamanho máximo de 2,36 mm, obtido através da trituração do concreto em laboratório. A relação a/c foi a mesma do concreto de referência, assim como a quantidade dos aditivos químicos. O processo de mistura foi realizado em duas etapas e junto com a adição de superplastificante e o modificador de viscosidade se corrigiu a trabalhabilidade, sem ocorrência de exsudação.

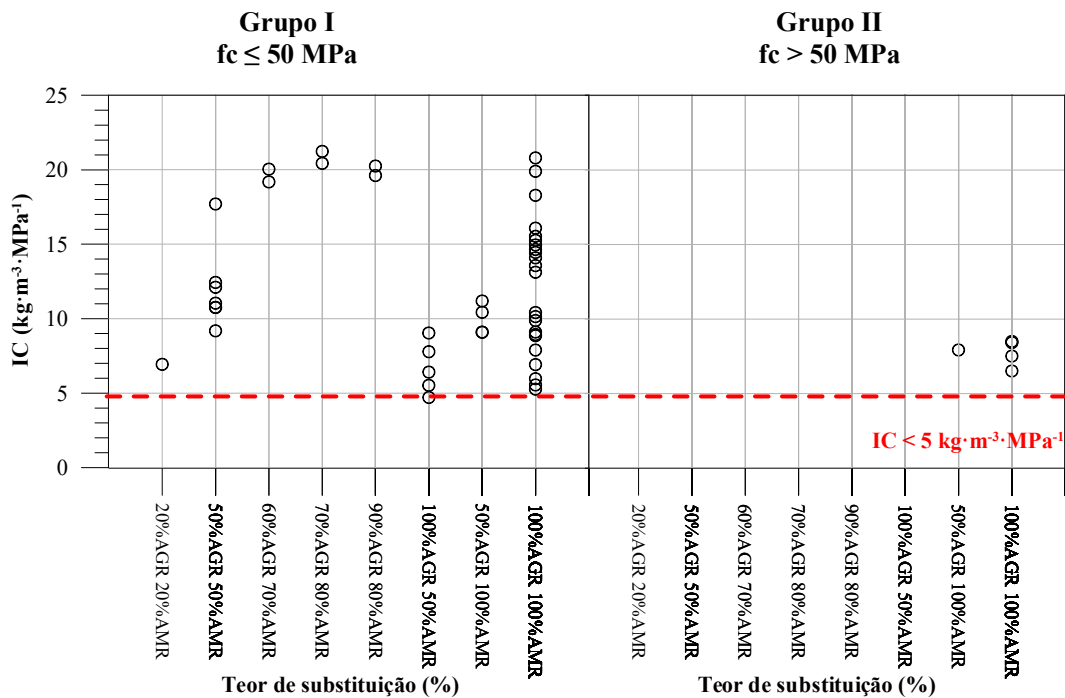
Hu, Wang e Kim (2013) apontam que houve um aumento de aproximadamente 4,50 % no valor de resistência à compressão para a mistura com 75 % de AMR em comparação

com o concreto de referência. Tal comportamento pode estar relacionado com a melhoria da matriz e da zona de transição do concreto, devido à existência de maior quantidade de finos, presentes no AMR e na cinza volante usada na mistura, que favorecem o fechamento dos poros e promovem o empacotamento das partículas, juntamente com a melhor dispersão promovida pelo aditivo superplastificante. Esse estudo também apresentou um baixo IL ( $< 7 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ ), e portanto representa uma elevada eficiência no consumo de ligantes. O estudo de Hu, Wang e Kim (2013) apresentou os melhores resultados avaliados até então, pois representam baixos IC e IL, ou seja, um ótimo desempenho para a quantidade de cimento utilizada e baixas emissões quando se avalia o viés ambiental. Observa-se que o aumento do teor de AMR em misturas de CR que apresentam mesmo consumo de ligantes e mesma relação a/c promovem uma redução na resistência à compressão, e conseqüentemente, fazem aumentar as emissões de  $\text{CO}_2$  (maiores valores de IC), com redução do desempenho das misturas (maiores valores de IL).

### 5.3.3 Efeito do AGR/AMR sobre o IC

Os concretos com AGR e AMR apresentaram valores mais elevados de IC, quando comparados com as misturas que utilizam somente AGR ou somente AMR. Nenhum estudo apresentou  $\text{IC} < 4 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ , esse comportamento segue a mesma tendência da intensidade de ligantes, para a qual os CR apresentaram também valores de IL superiores a  $6 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ . Os menores valores de IC para os concretos com alguma combinação de AGR e AMR foram de 4,80 e 4,95  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  (destacado pelo retângulo com linha contínua em vermelho, na Figura 27c). É interessante destacar que o número de dados coletados para os concretos com AGR e AMR é pequeno, portanto, as tendências aqui apresentadas devem ser validadas para uma quantidade maior de dados.

As características dessas misturas estão detalhadas na Tabela 13. No gráfico da Figura 32 observa-se que para os concretos do Grupo II ( $f_c > 50 \text{ MPa}$ ) a faixa de variação do IC é muito menor (entre 4 e 7  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ ) quando comparada com a faixa de variação dos concretos do Grupo I ( $f_c \leq 50 \text{ MPa}$ ), que foi de 4 a 22  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ .



**Figura 32** Intensidade de CO<sub>2</sub> (IC) versus teor de AGR/AMR

Para os concretos com AGR/AMR, o melhor resultado de IC para o Grupo I ( $f_c \leq 50$  MPa) foi de  $4,80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$  para uma mistura com 100%AGR/50%AMR de agregado reciclado misto, consumo de ligantes de  $380 \text{ kg/m}^3$ , a/c de 0,48, resistência à compressão de 38 MPa e IL de  $10,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$  (TANGCHIRAPAT *et al.*, 2008). Os autores utilizaram um cimento CEM I, que de acordo com a ASTM C150 (2007) apresenta elevado teor de clínquer (95 - 100 %), e substituíram o cimento em 50 % por cinza da casca de arroz (CCA). Como as emissões das adições são bem menores que as emissões do cimento, o indicador IC foi reduzido, porém o valor de IL foi elevado ( $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ ), pois para este indicador contabiliza-se o consumo de ligantes para uma resistência abaixo de 50 MPa. O ideal seria aliar uma redução do fator clínquer (maior eficiência) com um aumento na resistência à compressão (maior desempenho). Diferente dos melhores resultados dos concretos somente com AGR ou somente com AMR, para os concretos com AGR/AMR do Grupo I ( $f_c \leq 50$  MPa), o fator determinante do melhor resultado de IC é a adição mineral utilizada no concreto, em substituição ao cimento Portland, e a resistência à compressão obtida no CR.

O melhor resultado de IC ( $4,95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$ ) para o Grupo II foi do estudo de Pedro *et al.* (2019), cujas características estão apresentadas na Tabela 13. Observa-se que

essa mistura de CR corresponde aquela que apresentou também o melhor desempenho no uso de ligantes (menor valor de IL), conforme apresentado no item 5.2.3. Essa mistura foi produzida com 100%AGR/100%AMR de agregado reciclado de concreto, consumo de ligantes de 400 kg, dos quais 10 % é CV, um a/c é igual 0,41, resistência à compressão de 61,6 MPa e um IL de 6,49 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>. Os autores utilizaram o cimento Portland CEM I 52.5R, que de acordo com a ASTM C150 (2007) apresenta elevado teor de clínquer (95 - 100 %). Os valores de resistência à compressão foram aproximadamente 10 % inferiores ao da mistura de referência, mas ainda assim esse CR representa elevadas eficiências tanto nas emissões de CO<sub>2</sub> (IC < 5 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>), como no desempenho em termos de uso de ligantes (IL < 7 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>) quando se utiliza 100 % dos dois tamanhos de AR.

### 5.3.4 Comparações entre IC<sub>CR</sub> com o IC<sub>CC</sub>

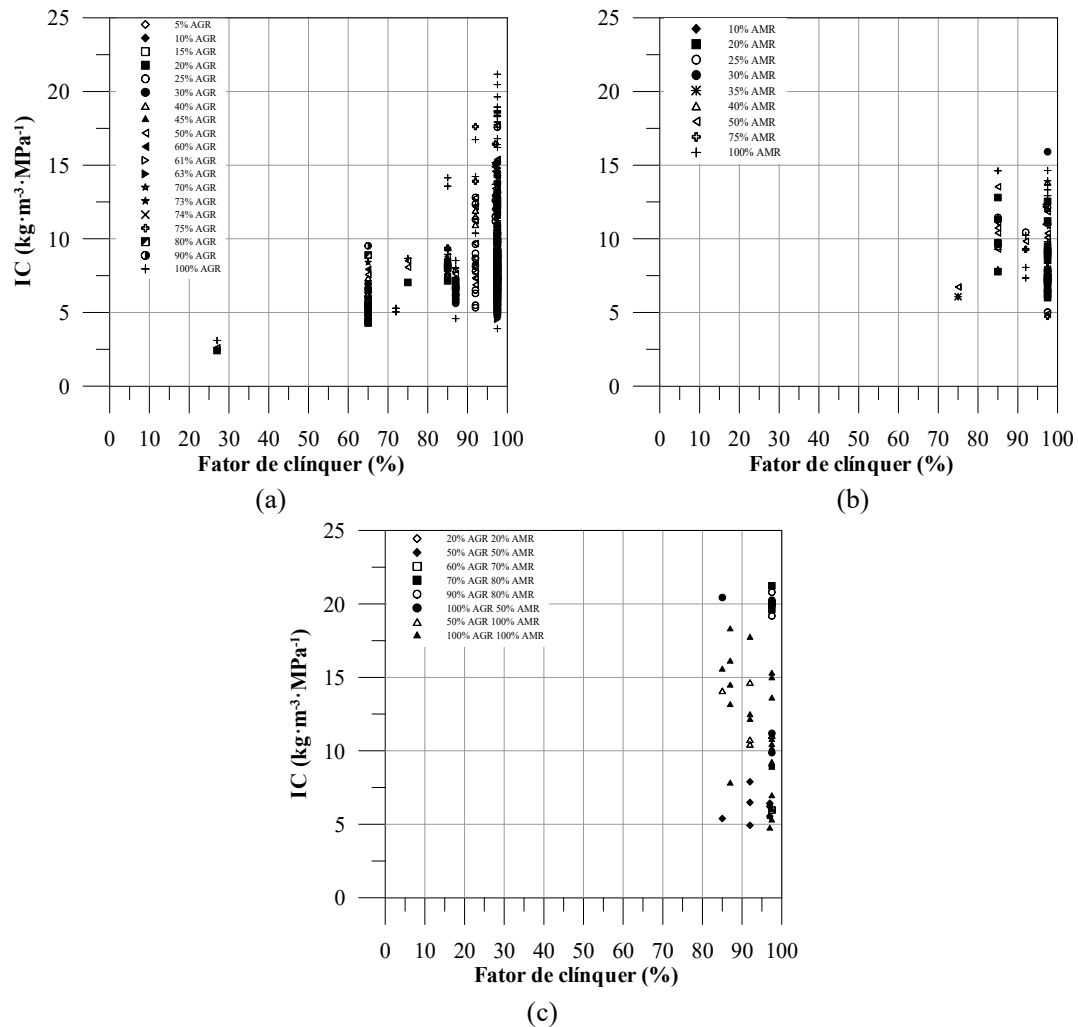
No estudo de Daminieli *et al.* (2010), a intensidade mínima de CO<sub>2</sub> encontrada para o CC foi de 1,5 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup> para todas as faixas de resistência do concreto avaliadas. Os autores não contabilizaram a contribuição das emissões referente às adições minerais e aditivos e também encontraram formulações de concretos com altos valores de IL mas baixos resultados de IC, como o estudo de Brizola *et al.* (2005) que apresentou 90 % de taxa de substituição do clínquer por cinzas volantes (70 %) e escória de alto forno (20 %) e resultou em concretos com IC < 1,6 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>, mas com IL entre 12,6 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup> e 16,9 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>.

Os menores valores de IC do presente levantamento foram superiores aos apresentados no estudo de Daminieli *et al.* (2010) para concretos convencionais. Para os CR nenhum estudo apresentou IC inferior a 2 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>, ou seja, para CC já existem trabalhos com melhores desempenhos quando comparados aos CR.

### 5.3.5 Concretos com baixo IC e baixo IL

A Figura 30 mostra que é possível formular concretos com baixos resultados de IC e baixos resultados de IL, simultaneamente. Além disso, conforme apresentado nos gráficos da Figura 33, é possível formular um concreto com uma grande quantidade de clínquer, com baixo IC. Os elevados fatores de clínquer (90 a 100 %) apresentam uma variação nos valores de IC de 4 a 24 kg.m<sup>-3</sup>.MPa<sup>-1</sup>, ou seja, baixas e altas eficiências. Os valores reduzidos de IC estão associados a um consumo de cimento Portland menor, já

que nesse caso, o cimento é o fator preponderante para determinação do IC, tendo em vista os elevados teores de clínquer.



**Figura 33** IC ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ ) versus fração de clínquer (%):a) Misturas com diferentes teores de AGR; b) Misturas com diferentes teores de AMR; c) Misturas com diferentes teores de AGR/AMR

Concretos com baixos resultados de IC e de IL representam uma das estratégias mais promissoras para se obter concretos sustentáveis, já que atende ao critério de sustentabilidade pelo valor reduzido de IC, que representa uma otimização em termos de consumo de cimento Portland e emissões de  $\text{CO}_2$ , e elevado desempenho mecânico, traduzido pelo valor reduzido do IL. Assim, dentre os resultados obtidos com o levantamento da eficiência no uso de ligantes realizado nos concretos reciclados foram selecionadas as misturas que apresentaram simultaneamente valores de  $\text{IL} < 7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$  e resultados de  $\text{IC} < 5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$ . Assim, foram selecionados os dados dos

estudos de Pacheco et al. (2015), Hu, Wang e Kim (2013) e Pedro *et al.* (2019) para o CR com AGR, o CR com AMR e o CR com AGR/AMR, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 14. Observa-se que todas as misturas de CR selecionadas apresentaram resistência à compressão acima de 50 MPa, baixas relações a/c ( $a/c \leq 0,45$ ), utilizaram aditivos químicos para melhorar a trabalhabilidade, e com exceção do CR com AGR, utilizaram CV como adição mineral, em substituição do cimento. Todas as misturas utilizaram AR de concreto em elevados teores (mínimo de 75 %, para o CR com AMR).

Os estudos listados na Tabela 14 representam boas eficiências ( $IL < 7 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  e  $IC < 5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ ) para um consumo de cimento Portland variando de 340 a 420 kg. Ou seja, uma faixa de consumo de cimento aplicável para obtenção de concretos reciclados eficientes. Estes estudos já foram detalhados e discutidos nos Itens 5.2 e 5.3.

**Tabela 14** Estudos com  $IL < 7 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  e  $IC < 5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para as misturas com diferentes teores de AGR, AMR e AGR/AMR

Tamanho do AR no CR	Estudo	Teor de AR (%)	Origem do AR	C <sup>(1)</sup> (kg)	a/c	Adição mineral		Aditivo químico		fc (MPa)	IC (kg.m <sup>-3</sup> .MPa <sup>-1</sup> )	IL (kg.m <sup>-3</sup> .MPa <sup>-1</sup> )	Tipo de cimento (teor de clínquer-%)
						Tipo	Teor (kg)	Tipo	Teor (%)				
AGR	Pacheco <i>et al.</i> (2015)	100	Concreto	350	0,45	-	-	SP	1,00	56,96	4,58	6,14	CEM II/A (80-94)
AMR	Hu, Wang e Kim (2013)	75	Concreto	473	0,33	CV	83	VMA/SP	1,40/2,20	68,00	4,73	6,96	CEM I (95-100)
AGR/AMR	Pedro <i>et al.</i> (2019)	100/100	Concreto	400	0,41	CV	40	SP	2,22	61,60	4,95	6,49	CEM I (95-100)

Nota:

AR–agregado reciclado; CR–concreto reciclado; C–Consumo de ligantes, em kg para produzir 1 m<sup>3</sup> de concreto; a/c–relação água cimento; fc–resistência à compressão aos 28 dias; IC–Intensidade de CO<sub>2</sub>; IL–Intensidade de Ligantes; CV–Cinza volante; SP–Superplastificante; VMA–Agente modificador de viscosidade.

<sup>(1)</sup> Consumo de ligantes corresponde ao consumo de cimento Portland e de adições minerais (pozolânicas e inertes), quando for o caso.

## 5.4 ADIÇÕES MINERAIS NOS CR

Além do panorama do uso de ligantes para os concretos reciclados foi possível avaliar o cenário atual de pesquisas sobre o uso de agregados graúdos, miúdos e a combinação de agregados graúdos e miúdos reciclados, associados com a aplicação de adições minerais em substituição ao cimento Portland em misturas de concreto reciclado.

A maior quantidade de estudos com adições minerais foi observada para os agregados graúdos. Dos 729 dados coletados de misturas com AGR, 205 dados utilizaram algum tipo de adição mineral (~29 %), dos 103 dados de misturas com AMR, apenas 14 utilizaram algum tipo de adição mineral (~14 %) e dos 52 dados de misturas com AGR/AMR, 15 utilizaram alguma adição (~28 %). Os tipos de adições utilizadas foram: cinza volante, sílica ativa, metacaulim, escória de alto forno, cinza da casca de arroz, nano sílica, pozolana natural, filer calcário e filer de RCD.

Os estudos mostram que os agregados reciclados podem ser reutilizados em altas porcentagens de substituição aos agregados naturais quando preferencialmente estão combinados com o uso de adições minerais ativas, obtendo elevados desempenhos para os concretos com AGR, AMR e AGR/AMR, conforme demonstrado na Tabela 15.

**Tabela 15** Proporções das misturas com elevados teores de substituição e adições minerais

Tamanho do AR no CR	Estudo	Teor de AR (%)	Origem do AR	C <sup>(1)</sup> (kg)	a/c	Adição mineral		fc (MPa)
						Tipo	Teor (kg)	
AGR	Otsuki, Miyazato e Yodsudjai (2003)	100	Concreto	620	0,25	CV	62,0	99,00
		100	Concreto	620	0,25	CV	62,0	87,00
	Ryu (2002)	10	Concreto	620	0,25	CV	62,0	84,00
AMR	Hu, Wang e Kim (2013)	75	Concreto	473	0,33	CV	83,0	68,00
AGR/AMR	Pedro <i>et al.</i> (2019)	100/100	Concreto	605	0,31	CV/SA	55,0/0,0	72,08
		100/100	Concreto	633	0,32	CV/SA	55,0/27,5	74,96
		100/100	Concreto	660	0,32	CV/SA	55,0/55,0	77,84

Nota: CR–concreto reciclado; AR–agregado reciclado; C–Consumo de ligantes, em kg, para produzir 1 m<sup>3</sup> de concreto; a/c–relação água cimento; fc–resistência à compressão, aos 28 dias; CV–Cinza volante; SA–Sílica ativa.

<sup>(1)</sup> Consumo de ligantes corresponde ao consumo de cimento Portland e de adições minerais (pozolânicas e/ou inertes), quando for o caso.

A maioria dos dados envolve o uso de cinzas volantes (CV) ou sílica ativa (SA) como adição mineral (~66 % de todos os dados coletados). Observou-se que os estudos que apresentaram maiores valores de resistência à compressão para o concreto com AGR e o concreto com AGR/AMR utilizaram ou sílica ativa e/ou cinza volante, conforme



Tabela 10 do Item 5.1. Os teores de substituição do cimento pelas adições minerais variam de acordo com o tipo de adição e o percentual de substituição dos agregados naturais pelos AR no concreto reciclado.

Para o uso de CV, a faixa de substituição que apresentou resultados favoráveis está entre 20 e 35 % para as misturas com AGR. Esses percentuais se mostraram eficientes com uso do agregado graúdo em todos os teores de AR avaliados (CORINALDESI; MORICONI, 2009; KOU; POON; AGRELA, 2011; LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012; SOMNA *et al.*, 2012 ; KOU; POON, 2012; TANGCHIRAPAT *et al.*, 2008; KAPOOR; SINGH; SINGH, 2016).

Limbachiya, Meddah e Ouchagour (2012) avaliaram a resistência à compressão de CR para teores de substituição de 30, 50 e 100 % de AGR e 30 % de cinza volante, em substituição ao cimento, em massa, para três classes de concreto (C20, C30 e C35). Os autores observaram valores de resistência à compressão dos CR maiores que a mistura de referência, para todos os teores de substituição, para as classes C20 e C30. O aumento foi da ordem de 20 % para o teor de substituição de 100 % de agregado graúdo.

González-Fonteboa e Martínez-Abella (2008), Kou, Poon e Agrela (2011) e Corinaldesi e Moriconi (2009) utilizaram SA nos teores de 8, 10 e 15 %, respectivamente. Os melhores resultados foram obtidos para as misturas com 50 % de AGR e 10 % de SA, com maiores valores de resistência à compressão e resistência à penetração de íons cloreto, em comparação ao concreto de referência.

Ainda é possível destacar que a utilização das adições minerais é fator essencial para determinação do IC. Concretos com elevados teores de substituição do cimento por adições tendem a ter menores resultados de IC, pois as emissões das adições são menores que as emissões do cimento Portland e, portanto, menor impacto ambiental, conforme demonstrado no Item 4.3.

De maneira geral, as propriedades das misturas de concreto com agregados reciclados com adições apresentaram resultados equivalentes ou superiores quando comparadas ao concreto reciclado sem adições, além do impacto ambiental ser reduzido. Dessa forma, esse tipo de concreto pode apresentar melhores resultados com o uso de adições minerais, o que favorece uma redução do consumo de cimento Portland

promovida pelo maior empacotamento das partículas, maior produção de C-S-H, refinamento da estrutura de poros, entre outros aspectos.

### 5.5 ADITIVOS QUÍMICOS NOS CR

Assim como as adições, a utilização dos aditivos químicos também impacta nos valores de IL e de IC. Observa-se que a maioria dos estudos com maiores valores de resistência à compressão utilizaram aditivos químicos para todos os tipos de misturas de CR avaliadas (AGR, AMR e AGR/AMR). Além disso, os concretos com menores valores de IL também utilizaram aditivos superplastificantes, agente modificador de viscosidade ou incorporador de ar para todos os tipos de agregados.

Diferente das adições, a maior quantidade de dados utilizando aditivos químicos foi para os concretos com AMR. Dos 729 dados coletados de concreto com AGR, 249 dados utilizaram algum tipo de aditivo químico (~34 %), dos 103 dados para concreto com AMR, 53 utilizaram algum tipo de aditivo (~51 %) e dos 52 dados para concreto com AGR/AMR, 14 utilizaram algum tipo de aditivo químico (~27 %). Os tipos de aditivos mais utilizados foram: superplastificante/plastificante, incorporador de ar e modificador de viscosidade. Mas a grande maioria dos estudos com uso de algum aditivo (~92 %) utilizou os superplastificantes.

### 5.6 METAS E DIRETRIZES

Os dados discutidos anteriormente permitem apontar um valor meta inicial para o IC e para o IL, assim como estabelecer algumas diretrizes para serem aplicadas na dosagem e produção dos concretos reciclados para o alcance dessas metas, conforme está apresentado na Figura 34.

<p style="text-align: center;">Meta</p> <p style="text-align: center;"><math>IC &lt; 5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}</math></p>	<p style="text-align: center;">Meta</p> <p style="text-align: center;"><math>IL &lt; 7 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}</math></p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usar agregados reciclados preferencialmente de concreto;</li> <li>• Usar aditivo químico que melhorem a trabalhabilidade (superplastificante, preferencialmente);</li> <li>• Usar adições minerais (pozolânicas, preferencialmente);</li> <li>• Reduzir as relações a/c das misturas, sem aumentar o consumo de ligantes;</li> <li>• Trabalhar com elevadas resistências à compressão dos CR, principalmente quando utilizar cimento Portland com elevado teor de clínquer na composição;</li> <li>• Utilizar cimentos com baixo fator de clínquer (<math>&lt; 35 \%</math>);</li> <li>• Melhorar o empacotamento das misturas;</li> <li>• Utilizar processos de beneficiamento do RCD que apresentem menor impacto em termos de consumo de energia, emissão de poluentes, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usar agregados reciclados preferencialmente de concreto;</li> <li>• Usar aditivo químico que melhorem a trabalhabilidade (superplastificante, preferencialmente);</li> <li>• Usar adições minerais (pozolânicas, preferencialmente);</li> <li>• Usar cimentos de elevadas resistências à compressão (<math>f_c &gt; 40 \text{ MPa}</math>);</li> <li>• Limitar os consumos de ligantes em função do grupo de resistência à compressão dos concretos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• C20 <math>&lt; 140 \text{ kg}</math></li> <li>• C30 <math>&lt; 210 \text{ kg}</math></li> <li>• C40 <math>&lt; 280 \text{ kg}</math></li> <li>• C50 <math>&lt; 350 \text{ kg}</math></li> <li>• Grupo II (<math>f_c &gt; 50 \text{ MPa}</math>) <math>&lt; 350 \text{ kg}</math></li> </ul> </li> <li>• Reduzir as relações a/c sem aumentar o consumo de ligantes;</li> <li>• Limitar o <math>D_{\text{máx}} = 20 \text{ mm}</math> para o AGR e <math>D_{\text{máx}} = 2,4 \text{ mm}</math> para o AMR;</li> <li>• Compensar a taxa de absorção de água do AR;</li> <li>• Usar método de mistura em duas etapas;</li> <li>• Melhorar o empacotamento das misturas.</li> </ul>

**Figura 34** Metas de IC e de IL e diretrizes gerais para dosagem e produção dos concretos reciclados

As diretrizes apontadas, provenientes dos melhores resultados dos estudos encontrados para os CR, conduzem a uma meta de no máximo  $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para o IC e a uma meta de no máximo  $7 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para o IL para que os concretos reciclados possam alcançar melhor desempenho ambiental, independente do teor de substituição. Tais metas sugerem uma melhoria da ecoeficiência no consumo de ligantes dos concretos com agregados reciclados. Todos os estudos aqui descritos nos itens 5.2 e 5.3 foram de

concretos reciclados desenvolvidos sem que o foco principal do trabalho fosse a eficiência de ligantes, dessa forma, os valores de  $IL \leq 7 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  e  $IC \leq 5 \text{ m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  representam os melhores resultados que foram estabelecidos como metas e devem ser alvos de pesquisas. Além de avaliar o desempenho em termos do uso eficiente dos ligantes, é necessário investigar sistematicamente todas as possíveis consequências da produção de concretos reciclados com baixo teor de ligantes, tais como o desempenho a longo prazo.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 CONCLUSÃO

Novas alternativas devem ser desenvolvidas para a mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> provenientes do uso do cimento nos concretos reciclados. Sem inovação, o impacto ambiental da cadeia do cimento e da cadeia do concreto só tende a crescer.

Dessa forma, é fundamental determinar a faixa de consumos de ligantes dos concretos com agregados reciclados em função das resistências à compressão e calcular os indicadores IL e IC para se estabelecer os reais benefícios de se aumentar a eficiência do uso do ligantes para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> procedentes dos concretos com agregados reciclados. Os primeiros resultados aqui demonstrados enfatizam a busca por novas alternativas para melhorar a ecoeficiência no consumo de ligantes dos concretos com agregados reciclados

A análise dos dados de literatura permitiu avaliar os consumos de ligantes dos concretos com agregados reciclados e medir a eficiência de utilização do cimento. Em geral, os concretos apresentam elevados consumos de ligantes, aproximadamente 94 % dos dados coletados está entre 250 e 500 kg/m<sup>3</sup> para resistências variando de 10 a 80 MPa. Para os concretos com AGR, apenas 18 dos 729 dados coletados (~2,5 %) foram produzidos utilizando-se menos de 250 kg/m<sup>3</sup>, para os estudos com AMR, apenas 1 dos 103 dados utilizou consumo de cimento inferior a 250 kg/m<sup>3</sup> (~1,0 %) e para os estudos com AGR/AMR, apenas 2 dos 52 dados coletados (~4,0 %) utilizaram menos de 250 kg/m<sup>3</sup>. E todos esses estudos apresentam valores de resistências à compressão reduzidos, ou seja, menores valores de consumos de cimento estão associados a baixíssimas resistências.

Em geral, um maior teor de substituição dos agregados naturais pelos reciclados elevam o consumo de cimento e reduzem a resistência à compressão. Para todos os dados dos concretos com agregados reciclados avaliados, observa-se que as elevadas resistências (64 a 99 MPa) estão associadas a elevados consumos de ligantes (473 a 660 kg), o que pode inviabilizar a utilização desses tipos de concretos do ponto de vista ambiental. Por outro lado, de modo geral, os estudos mostram que a redução da relação a/c, o uso de adições e aditivos químicos e o uso de agregados reciclados de concreto pode conduzir à obtenção de concretos com menor intensidade de ligantes.

Para todos os tamanhos de agregados reciclados estudados, os menores valores de IL observados para consumos de cimento Portland menores que 420 kg variam de 6 a 7  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ , o que ocorre para concretos com resistências acima de 50 MPa e entre 6 a 9  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para resistências menores que 50 MPa. Os concretos de altas resistências ( $f_c > 50$  MPa) tendem a ser mais eficientes em termos de IL e apresentam menor dispersão dos dados.

Os teores de substituição não afetam tanto as eficiências, tendo em vista que foram verificadas boas eficiências (IL entre 6-7  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ ) para teores de 20 % a 100 % de AGR. Alguns outros fatores como: a origem dos agregados, no caso, os agregados de concreto apresentaram melhores resultados; utilização de aditivos superplastificantes; adições minerais; cimentos de elevada resistência à compressão; limitar os consumos de ligantes em função do grupo de resistência à compressão dos concretos; reduzir as relações a/c sem aumentar o consumo de ligantes; limitar a dimensão máxima do agregado; compensar a taxa de absorção de água do agregado, ou utilizar o método de mistura em duas etapas e melhorar o empacotamento das misturas conduziram aos melhores resultados de IL. Esses dados dão razão para sugerir um IL  $< 7 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  como uma meta viável para a produção de CR de maior sustentabilidade.

Para o IC, os menores valores observados para consumos de cimento menores que 420 kg variam de 4 a 5  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$ , o que ocorre para concretos com resistências acima de 50 MPa e entre 2 a 5  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  para resistências menores que 50 MPa. Os melhores resultados conduziram uma meta de 5  $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$  e sugerem uma melhoria da ecoeficiência no consumo de ligantes dos concretos reciclados através de algumas diretrizes como: uso de agregados reciclados preferencialmente de concreto; uso de superplastificante; adições minerais (pozolânicas, preferencialmente); redução das relações a/c das misturas sem aumentar o consumo de ligantes; aumento da resistência à compressão dos CR, principalmente quando utilizar cimento Portland com elevado teor de clínquer na composição; uso de cimentos com baixo fator clínquer ( $< 35$  %); melhor empacotamento das misturas e a utilização de processos de beneficiamento do RCD que apresentem menor impacto em termos de consumo de energia, emissão de poluentes, entre outros.

Os resultados obtidos a partir dos conjuntos de dados são consistentes e propõem diretrizes que certamente irão conduzir a uma redução nos consumos de cimento dos

concretos reciclados para melhorar a eficiência e seguir a linha da sustentabilidade, princípio fundamental desse tipo de concreto. Também é necessário que as diretrizes sejam testadas experimentalmente para determinar o desempenho dos concretos também em termos de estabilidade dimensional e durabilidade.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de expandir o conhecimento sobre a ecoeficiência dos CR sugere-se a realização alguns estudos adicionais:

- Aumentar o banco de dados para se validar as tendências aqui apresentadas;
- Considerar, no cálculo do IC, as emissões referentes aos transportes dos materiais e obtenção dos agregados e quantificar a recarbonatação dos materiais cimentícios;
- Testar experimentalmente as diretrizes estabelecidas.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKBARNEZHAD, A. *et al.* Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3469-3479, 2011.

ALNAHHAL, M. F. *et al.* Assessment on engineering properties and CO<sub>2</sub> emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 203, p. 822-835, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C150**: Standard Specification for Portland Cement. West Conshohocken, PA, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C595**: Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. West Conshohocken, PA, 2019.

ANGULO, S. C. *et al.* On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete. **Materials and Structures**, v. 43, n. 4, p. 519-528, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12655** – Concreto. – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 516697**: Cimento Portland - Requisitos, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5732**: Cimento Portland comum, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5735**: Cimentos Portland de alto-forno – Especificação.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico – Especificação.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5738**: Procedimento para moldagem de Corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS– ABNT. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial – Especificação.

BABU, V. S. *et al.* Strength and durability characteristics of high-strength concrete with recycled aggregate-influence of processing. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 4, n. 1, p. 54-71, 2015.



- BABU, V. S. *et al.* Strength and durability characteristics of high-strength concrete with recycled aggregate—influence of mixing techniques. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 3, n. 2, p. 88-110, 2014.
- 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**, p. 101361, 2020.
- BAIRAGI, N. K.; RAVANDE, K.; PAREEK, V. K. Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 9, n. 1-2, p. 109-126, 1993.
- BARBOZA, L. D. S.; ALMEIDA FILHO, F. M. D. Concreto autoadensável com baixo consumo de cimento: impacto da redução do consumo de cimento na resistência à compressão. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 3, 2018.
- BARBOZA, L. D. S.; ALMEIDA FILHO, F. M. D. Estudo sobre a redução do consumo de cimento e emissão de CO<sub>2</sub> para concreto de alto desempenho. **Ciência & Engenharia**, v. 24, n. 2, p. 131-141, 2015.
- BARBOZA, L. D. S. **Estudo sobre o impacto da redução do consumo de cimento no comportamento mecânico do concreto autoadensável**. 2016. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.
- BENHELAL, E. *et al.* Global strategies and potentials to curb CO<sub>2</sub> emissions in cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 51, p. 142-161, 2013.
- BOGAS, J. A.; BRITO, J.; RAMOS, D. Freeze–thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 294-306, 2016.
- BRANCO, P. R. **Utilização de resíduos de concreto em concreto auto-adensável**. 2012. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). **BS 146:2002**. Specification for blastfurnace cements with strength properties outside the scope of BS EN 197-1. British Standards, 2002.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). **BS 4027:1996**. Specification for sulfate-resisting Portland cement. British Standards, 1996.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). **BS EN 197-1:2011**. Cement Part 1 : Composition, specifications and conformity criteria for common cements. British Standards, 2011.
- BRITO, J.; ALVES, F. Concrete with recycled aggregates: the Portuguese experimental research. **Materials and Structures**, v. 43, n. 1, p. 35-51, 2010.
- BUTLER, L.; WEST, J. S.; TIGHE, S. L. Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1292-1301, 2013.

CABRAL, A. E. B. Concrete with construction and demolition wastes (CDW). In: **Eco-efficient Concrete**. Woodhead Publishing, p. 340-367, 2013.

CAMPOS, H. F.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO, J. Proposed mix design method for sustainable high-strength concrete using particle packing optimization. **Journal of Cleaner Production**, p. 121907, 2020.

CAMPOS, R. S. **Concreto autoadensável produzido com resíduos de construção e demolição: propriedades mecânicas e reológicas**. 2017. Dissertação (Mestrado), Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

CARNEIRO, J. A. **Uso de agregado reciclado e fibras de aço em concreto simples e concreto armado sob flexão**. 2011. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2011.

CASTRO, A. L. D. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CECCONELLO, V. **Avaliação de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto e cinza da casca de arroz, com ênfase na retração**. 2013. Dissertação (Mestrado), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

CEMBUREAU, T. World Statistical Review 1996-2008 Cement Production. **Trade, Consumption Data**, 2010.

CHEN, C. *et al.* Environmental Impact of Cement Production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 5, p. 478-485, 2010.

CHEN, H. J.; YEN, T.; CHEN, K. H. Use of building rubbles as recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 1, p. 125-132, 2003.

CHEN, Z. P. *et al.* Experimental research on the flexural strength of recycled coarse aggregate concrete. In: **2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering**. IEEE, 2010. p. 1041-1043.

CORINALDESI, V. Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 9, p. 1616-1620, 2010.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G. Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 8, p. 2869-2876, 2009.

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

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Lower binder intensity eco-efficient concretes. **Eco-efficient Concrete**, v.1, n.624, 2013.

DAMINELI, B. L.; PABLOS, J.M. Preliminar Assessments for decreasing cement content on concretes made with recycled aggregates. **Non- Conventional Materials and Technologies- NOCMAT for XXI Century**, v. 7, p. 725-732, 2018.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. 2013. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32. n. 8. p. 555-562, 2010.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico. empacotamento e dispersão de partículas**. 2013. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 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, 2009.

DUAN, Z. *et al.* Combined use of recycled powder and recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 254, p. 119323, 2020.

DUMANI, N.; MAPIRAVANA, J. Environmental and performance aspects of metakaolin as an alternative ordinary Portland cement extender. **Out-Of-The Box 2018 Human Settlements**, p. 45, 2018.

ETXEERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARI, A. Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 58, n. 10, p. 683-690, 2006.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 1, p. 9-14, 2010.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 5, p. 397-401, 2007.

FEDUMENTI, M. B. **Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloreto**. 2013. Dissertação (Mestrado), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

FIGUEIRÊDO FILHO, J. G. L. **Avaliação da trabalhabilidade de concretos contendo agregado reciclado de argamassa**. 2011. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2011.

FONSECA, N.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L. The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 6, p. 637-643, 2011.

FROTTÉ, C. *et al.* Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 2, 2017.

GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength selfcompacting concrete**. 2002. Tese (Doutorado), Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: Ed.:Pini, 2009.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 8, p. 1301-1311, 2002.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F. Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 429-437, 2008.

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

HAYLES, M.; SANCHEZ, L. F.; NOËL, M. Eco-efficient low cement recycled concrete aggregate mixtures for structural applications. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 724-732, 2018..

HU, J.; WANG, Z.; KIM, Y. Feasibility study of using fine recycled concrete aggregate in producing self-consolidation concrete. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 2, n. 1, p. 20-34, 2013.

HUMPHREYS, K.; MAHASENAN, M. Toward a sustainable cement industry. Substudy 8, Climate change. **World Business Council for Sustainable Development**, v. 2, 2002.

ISMAIL, S.; RAMLI, M. Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 464-476, 2013.

ISMAIL, S.; RAMLI, M. Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 726-739, 2014.

JOHN, V. M. On the sustainability of concrete. **UNEP Industry and Environment**, v. 26, n. 2-3, p. 62-63, abr-set. 2003.

JOHN, V. M. *et al.* Rethinking cement standards: opportunities for a better future. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105832, 2019.

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, 2016.

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 5, p. 703-711, 2003.

KATZ, A. Treatments for the improvement of recycled aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 6, p. 597-603, 2004.

KHATIB, J. M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 763-769, 2005.

KOU, S. C.; POON, C. S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 69-76, 2012.

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, 2010.

KOU, S. C; POON, C. S; AGRELA, F. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 8, p. 788-795, 2011.

KOU, S. C; POON, C. S; ETXEBERRIA, M. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 2, p. 286-291, 2011.

KURDA, R.; SILVESTRE, J. D.; BRITO, J. Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 139, p. 407-417, 2018.

KUSTER JUNIOR, J. S. **Avaliação da incorporação de agregado reciclado na composição de concretos autoadensáveis**. 2018. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

LATTERZA, L. M. **Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição: um novo material para fabricação de painéis leves de vedação**. 1998. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânica de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEITE, M. B.; MONTEIRO, P. J. M. Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography. **Cement and Concrete Research**, v. 81, p. 38-48, 2016.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LI, X. Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 1-2, p. 36-44, 2008.

- LIM, T.; ELLIS, B. R.; SKERLOS, S. J. Mitigating CO<sub>2</sub> emissions of concrete manufacturing through CO<sub>2</sub>-enabled binder reduction. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 11, p. 114014, 2019.
- LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R. K. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. **Materials and Structures**, v. 33, n. 9, p. 574, 2000.
- 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, 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, 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, 2012.
- MALEŠEV, M.; RADONJANIN, V.; MARINKOVIĆ, S. Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. **Sustainability**, v. 2, n. 5, p. 1204-1225, 2010.
- MALTA, J. O. **Dosagem de Concretos Produzidos Com Agregado Miúdo Reciclado de Resíduo de Construção e Demolição**. 2012. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.
- MARANGON, E. **Desenvolvimento e caracterização de concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço**. 2006. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- MARINKOVIĆ, S. *et al.* Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. **Waste Management**, v. 30, n. 11, p. 2255-2264, 2010.
- MATOS, P. R.; SAKATA, R. D.; PRUDÊNCIO, L. R. Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 941-955, 2019.
- MEHTA, P. Global Concrete Industry Sustainability, Tools for moving forward to cut carbon emissions. **Concrete International**, ACI, p. 45-48, 2009.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Ibracon, 2008.
- MELO, A. B. (2000). **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland**. 2000. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- MILLER, S. A. *et al.* Concrete mixture proportioning for desired strength and reduced global warming potential. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 410-421, 2016.

MOITINHO, B. L. R.; LEITE, M. B. Estudo da Produção de Concretos Reciclados Utilizando Agregados de Argamassa. **Encontro Nacional Sobre Reaproveitamento de Resíduo na Construção Civil**, v. 4, 2015.

MULDER, E.; JONG, T. P.; FEENSTRA, L. Closed Cycle Construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste. **Waste Management**, v. 27, n. 10, p. 1408-1415, 2007.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. London: Longman, 1995.

OKAMURA, T.; HARADA, H.; DAIMON, M. Influence of calcium sulfate in belite-rich cement on the change in fluidity of mortar with time. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 9, p. 1297-1308, 1998.

OLIVEIRA, I. D. *et al.* Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico. **Fazendo Arte Editorial**, v. 224, p. 119-137, 2000.

OLIVEIRA, V. C. H. C. *et al.* Estratégias para a minimização da emissão de CO<sub>2</sub> de concretos. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 167-181, 2014.

OTSUKI, N.; MIYAZATO, S. I.; YODSUDJAI, W. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 15, n. 5, p. 443-451, 2003.

PACHECO, J. *et al.* Destructive Horizontal Load Tests of Full-Scale Recycled-Aggregate Concrete Structures. **ACI Structural Journal**, v. 112, n. 6, 2015.

PADOVAN, R. G. **Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto**. 2013. Dissertação (Mestrado), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

PEDRO *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, 2019.

PEDROZO, F. E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. 2008. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PEREIRA, T. A. C. (2010) **Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã de rocha ou poliamida**. 2010. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PEREIRA, T. A. C.; LIBORIO, J. B. L. (2009). Técnicas de empacotamento de partículas para obtenção de CAD. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51., 2009, Curitiba. **Anais eletrônicos...** São Paulo: IBRACON, 2009, p. 13.

QUATTRONE, M.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Energy and CO<sub>2</sub> from high performance recycled aggregate production. **Resources, conservation and recycling**, v. 90, p. 21-33, 2014.

RAHAL, K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. **Building and Environment**, v. 42, n. 1, p. 407-415, 2007.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. 2011. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

REBMANN, M. S.; TRIGO, A. P. M.; LIBORIO, J. B. L. Melhorando as características mecânicas e microestruturais de concretos com cimento CII-Z através de métodos de empacotamento e de dispersão de partículas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., 2010, Fortaleza. **Anais eletrônicos...** São Paulo: IBRACON, 2010, p. 16.

REIS, C. N. S. **Influência da utilização de agregado miúdo de RCD na aderência aço-concreto reciclado**. 2009. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana, 2009.

ROBAYO-SALAZAR, R. *et al.* Life cycle assessment (LCA) of an alkali-activated binary concrete based on natural volcanic pozzolan: A comparative analysis to OPC concrete. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 103-111, 2018.

RODRIGUES, C. R. S.; FUCALE, S. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. **Ambiente Construído**, v. 14, p. 99-111, 2014.

RYU, J. S. An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties. **Magazine of Concrete Research**, v. 54, n. 1, p. 7-12, 2002.

SCRIVENER, K. L., JOHN, V. M., GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2-26, 2018.

SHIMA, H. *et al.* An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 3, n. 1, p. 53-67, 2005.

SNIC, 2013 – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Relatório Anual 2013**. Rio de Janeiro, RJ Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-relatorio-anual.php>. Acesso em: 20 Out. 2019.

SNIC, 2018 – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Números da indústria- 2018**. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-industria.php>. Acesso em: 20 Out. 2019.

SNIC, 2019 – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <http://snic.org.br/RoadmapTecnologicoCodigoCimento>. Acesso em: 20 Out. 2019.

SOMNA, R.; JATURAPITAKKUL, C.; AMDE, A. M. Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 7, p. 848-854, 2012.



- TABSH, S. W.; ABDELFAH, A. S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 1163-1167, 2009.
- TAM, V. W.; KOTRAYOTHAR, D.; XIAO, J. Long-term deformation behaviour of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 100, p. 262-272, 2015.
- TAM, V. W.; TAM, C. M.; WANG, Y. Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 10, p. 1928-1939, 2007.
- TANGCHIRAPAT, W. *et al.* Influence of fly ash on slump loss and strength of concrete fully incorporating recycled concrete aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 2, p. 243-251, 2013.
- TANGCHIRAPAT, W. *et al.* Influence of rice husk-bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 8, p. 1812-1819, 2008.
- TUYAN, M.; MARDANI-AGHABAGLOU, A.; RAMYAR, K. Freeze-thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. **Materials & Design**, v. 53, p. 983-991, 2014.
- VAN DAMME, H. Concrete material science: Past, present, and future innovations. **Cement and Concrete Research**, v. 112, p. 5-24, 2018.
- VAN OSS, H. G.; PADOVANI, A. C. Cement manufacture and the environment part II: environmental challenges and opportunities. **Journal of Industrial Ecology**, v. 7, n. 1, p. 93-126, 2003.
- VAN OSS, H. G.; PADOVANI, A. C. Cement manufacture and the environment: part I: chemistry and technology. **Journal of Industrial Ecology**, v. 6, n. 1, p. 89-105, 2002.
- VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2003. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- VIEIRA, L. B. P.; FIGUEIREDO, A. D.; JOHN, V. M. Evaluation of the use of crushed returned concrete as recycled aggregate in ready-mix concrete plant. **Journal of Building Engineering**, p. 101408, 2020.
- WAINWRIGHT, P. J.; CABRERA, J. G. Use of demolition concrete to produce durable structural concrete. In: **Studies in Environmental Science**. Elsevier, p. 553-562, 1994.
- WANG, W. *et al.* A Material Flow Analysis (MFA)-based potential analysis of eco-efficiency indicators of China's cement and cement-based materials industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 787-796, 2016.
- WASSERMANN, R.; KATZ, A.; BENTUR, A. Minimum cement content requirements: a must or a myth?. **Materials and Structures**, v. 42, n. 7, p. 973-982, 2009.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD), **Cement Industry Energy and CO<sub>2</sub> Performance- Getting the Numbers Right (GNR)**, 2016. Disponível em <https://www.wbcscd.org/>. Acesso em: 20 jan. 2020.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD), **Global Cement Database on CO<sub>2</sub> and Energy Information**, 2014. Disponível em: [www.wbcscdcement.org/index.php/key-issues/climateprotection/gnr-database](http://www.wbcscdcement.org/index.php/key-issues/climateprotection/gnr-database). Acesso em: 20 jan. 2020.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD), **Technology Roadmap -Low-Carbon Transition in the Cement Industry**, 2018. Disponível em <https://www.wbcscd.org/>. Acesso em: 20 jan. 2020.

XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1187-1194, 2005.

YANG, K. H.; SONG, J. K.; SONG, K. I. CO<sub>2</sub> Reduction Assessment of Alkali-Activated Concrete Based on Korean Life-Cycle Inventory Database. **Handbook of Low Carbon Concrete**, p. 139, 2016.

YOUNIS, K H.; PILAKOUTAS, K. Strength prediction model and methods for improving recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 688-701, 2013.

ZAHARIEVA, R. *et al.* Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 2, p. 223-232, 2003.

ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; WIRQUIN, E. Frost resistance of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 10, p. 1927-1932, 2004.

## **APÊNDICE**

### **APÊNDICE 1 – REFERÊNCIAS UTILIZADAS PARA COLETA DE DADOS**

#### **Quadro 1** Referências utilizadas para coleta de dados

REF.	AUTORES	TÍTULO	ANO
1	WAINWRIGHT P. J.; CABRERA J. G.	Use of demoliton concrete to produce durable structural concrete.	1994
2	LATTERZA, L. DE M.	Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição: um novo material para fabricação de painéis leves de vedação.	1998
3	BAZUCO, R. S.	Utilização de agregados reciclados para produção de novos concretos	1999
4	LEVY, S. M.	Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.	2001
5	LEITE, M. A	Avaliação de propriedades mecânica de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.	2001
6	GÓMEZ-SOBERÓN, J. M.V	Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study.	2002
7	VIEIRA, G. L.	Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.	2003
8	ZAHARIEVA, R.; FRANÇOIS BUYLE- BODIN,F.; SKOCZYLAS F., WIRQUIN, E.	Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete.	2004
9	POON CS, SHUI ZH, LAM L, FOK H, KOU SC	Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete.	2004
10	KHATIB, J.M	Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate	2005
11	EVANGELISTA, L. ; BRITO J. DE	Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates.	2007
12	RAHAL, K.	Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate.	2007
13	PEDROZO, F. E	Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos.	2008

14	GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.	Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume.	2008
15	TANGCHIRAPAT, W.; BURA-NASING, R.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P.	Influence of rice husk-bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates.	2008
16	BERNDT, M. L.	Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate.	2009
17	CORINALDESI, V.; MORICONI, G.	Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete.	2009
18	REIS, C. N. S.	Influência da utilização de agregado miúdo de RCD na aderência aço-concreto reciclado.	2009
19	CORINALDESI, V.	Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates.	2010
20	MALEŠEV, M.; RADONJANIN, V.; MARINKOVIĆ, S.	Recycled concrete as aggregate for structural concrete production.	2010
21	KOU, S. C.; POON, C. S.; AGRELA, F.	Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures.	2011
22	FIGUEIRÊDO FILHO, J. G. L.	Avaliação da trabalhabilidade de concretos contendo agregado reciclado de argamassa.	2011
23	SILVA, K. A. N.	Estudo de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos Com Diferentes Agregados Reciclados.	2011
24	BRANCO, P. R.	Utilização de resíduos de concreto em concreto auto-adensável.	2012
25	LIMBACHIYA, M.; MEDDAH, M. S.; OUCHAGOUR, Y.	Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete	2012
26	SOMNA, R.; JATURAPITAKKUL, C.; CHALEE, W.; RATTANACHU, P.	Effect of the Water to Binder Ratio and Ground Fly Ash on Properties of Recycled Aggregate Concrete.	2012
27	KOU, S. C.; POON, C. S.	Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate	2012

28	BENITO MAS, A. C., TEODORO DEL OLMO, F. P.	Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use.	2012
29	TENÓRIO, J. J. L., GOMES, P. C. C., RODRIGUES, C. C., ALENCAR, T. F. F.,	Concrete produced with recycled aggregates.	2012
30	TANGCHIRAPAT, W.; RAT- TANASHOTINUNT, C.; BURA-NASING, R.; JATURAPITAKKUL, C.	Influence of Fly Ash on Slump Loss and Strength of Concrete Fully Incorporating Recycled Concrete Aggregates.	2013
31	CECCONELLO, V.	Avaliação de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto e cinza da casca de arroz, com ênfase na retração.	2013
32	FEDUMENTI, M.B.	Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloreto.	2013
33	THOMAS, C.; SETIÉN, J.; POLANCO, J.A.; ALAEJOS, P.; SANCHEZ DE JUAN, M.	Durability of recycled aggregate concrete.	2013
34	RODRIGUES, C. R. S.; FUCALE, S.	Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil.	2014
35	MOITINHO, B.L.R; LEITE, M. B.	Estudo da produção de concretos reciclados utilizando agregados de argamassa.	2015
36	AMARIO, M.	Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado de resíduo de concreto (ARC).	2015
37	SANTOS, A. A. M.	Concreto com agregado graúdo reciclado de concreto: dosagem e produção. 2016.	2016
38	ARAÚJO, D. DE L.; FELIX, L. P.; SILVA, L. C.; SANTOS, T. M.	Influência de agregados reciclados de resíduos de construção nas propriedades mecânicas do concreto.	2016
39	LÓPEZ-UCEDA A, AYUSO J, LÓPEZ M, JIMENEZ JR, AGRELA F, SIERRA MJ.	Properties of Non-Structural Concrete Made with Mixed Recycled Aggregates and Low Cement Content.	2016

40	KAPOOR, K.; SINGH, S. P. P.; SINGH, B.	Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures.	2016
41	CAMPOS, R. S.	Concreto autoadensável produzido com resíduos de construção e demolição: propriedades mecânicas e reológicas. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas-SP, 2017.	2017
42	FROTTE, C., NÚBILA, C. S. A. D., NAGALLI, A., MAZER, W., MACIOSKI, G., OLIVEIRA, L. O. S.	Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD.	2017
43	DAMINELLI, B. L.; PABLOS, J.M	Preliminar Assessments for decreasing cement content on concretes made with recycled aggregates.	2018
44	SANTANA, V. M.	Estudo de dosagem de concretos com agregados miúdos de resíduos de construção e demolição usando uma adaptação do método de dosagem do IPT. 2018.	2018
45	KUSTER JUNIOR, J.S.	Avaliação da incorporação de agregado reciclado na composição de concretos autoadensáveis.	2018
46	KAIHUA LIU, JIACHUAN YAN, QIONG HU, YAO SUN, CHAOYING ZOU,	Effects of parent concrete and mixing method on the resistance to freezing and thawing of air-entrained recycled aggregate concrete	2016
47	J. ALEXANDRE BOGAS, J. DE BRITO, DUARTE RAMOS	Freeze–thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates	2016
48	SALIH TANER YILDIRIM, CHRISTIAN MEYER, SIMON HERFELLNER,	Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze–thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates	2015
49	SOMAYEH LOTFI, MANUEL EGGIMANN, ECKHARD WAGNER, RADOSŁAW MRÓZ, JAN DEJA,	Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology	2015
50	M. CHAKRADHARA RAO, S.K. BHATTACHARYYA, S.V. BARAI,	Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load	2011
51	VIVIAN W.Y. TAM, DUANGTHIDAR KOTRAYOTHAR, JIANZHUANG XIAO,	Long-term deformation behaviour of recycled aggregate concrete	2015

52	MURAT TUYAN, ALI MARDANI-AGHABAGLOU, KAMBIZ RAMYAR,	Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate	2014
53	XIAO, J., LI, B. & ZHANG, C.	On carbonation behavior of recycled aggregate concrete.	2012
54	VILLAGRÁN-ZACCARDI, YURY ANDRÉS; ZEGA, CLAUDIO JAVIER; DI MAIO, ÁNGEL ANTONIO.	Chloride penetration and binding in recycled concrete	2008
55	SOMNA, RATTAPON; JATURAPITAKKUL, CHAI; AMDE, AMDE M.	Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete.	2012
56	CHEN, ZONG-PING <i>ET AL.</i>	Experimental research on the flexural strength of recycled coarse aggregate concrete	2010
57	ZEGA, CLAUDIO JAVIER; DI MAIO, ÁNGEL ANTONIO.	Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements.	2011
58	HUDA, SUMAIYA B.; SHAHRIA ALAM, M.	Mechanical and freeze-thaw durability properties of recycled aggregate concrete made with recycled coarse aggregate	2015
59	KWAN, WAI HOE <i>ET AL.</i>	Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties	2011
60	LI, JIUSU; XIAO, HANNING; ZHOU, YONG.	Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete	2009
61	RAO, M. CHAKRADHARA; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, S. V.	Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete	2010
62	KOU, S.-C.; POON, C.-S.	Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources.	2008
63	ETXEBERRIA, MIREN <i>ET AL.</i>	Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete.	2007
64	FONSECA, N.; DE BRITO, JORGE; EVANGELISTA, LUIS	The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste	2011
65	ELHAKAM, ALI ABD; MOHAMED, ABD ELMOATY; AWAD, ESLAM.	Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete.	2012



66	KANELLOPOULOS, ANTONIOS; NICOLAIDES, DEMETRIOS; PETROU, MICHAEL F.	Mechanical and durability properties of concretes containing recycled lime powder and recycled aggregates.	2014
67	KOU, SHI-CONG; POON,	Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash	2013
68	EVANGELISTA, LUÍS; DE BRITO, JORGE.	Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates.	2010
69	KOU, S. C.; POON, C. S.	Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates	2009
70	MATIAS, DANIEL <i>ET AL.</i>	Durability of concrete with recycled coarse aggregates: influence of superplasticizers	2014
71	DAPENA, E. <i>ET AL.</i>	Effect of recycled sand content on characteristics of mortars and concretes	2011
72	BATAYNEH, MALEK; MARIE, IQBAL; ASI, IBRAHIM.	Use of selected waste materials in concrete mixes	2007
73	GONZALEZ-FONTEBOA, BELEN; MARTINEZ-ABELLA, FERNANDO.	Shear strength of recycled concrete beams	2005
74	GONZÁLEZ-FONTEBOA, BELÉN <i>ET AL.</i>	Structural shear behaviour of recycled concrete with silica fume	2009
75	PACHECO, JOÃO <i>ET AL</i>	Destructive Horizontal Load Tests of Full-Scale Recycled-Aggregate Concrete Structures	2015
76	ARORA, SUMIT; SINGH, S. P.	Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% coarse recycled concrete aggregates	2016
77	XIAO, JIANZHUANG; SUN, YUEDONG; FALKNER, H.	Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete.	2006
78	CORINALDESI, VALERIA; MORICONI, GIACOMO.	Behavior of beam-column joints made of sustainable concrete under cyclic loading.	2006
79	SUN, YUEDONG; XIAO, JIANZHUANG; ZHOU, DEYUAN.	Experimental research on seismic behavior of recycled concrete frame under varying cyclic loading.	2008

80	CORINALDESI, VALERIA; LETELIER, VIVIANA; MORICONI, GIACOMO	Behaviour of beam–column joints made of recycled-aggregate concrete under cyclic loading	2011
81	XIAO, JIANZHUANG <i>ET AL.</i>	Shake-table model tests on recycled aggregate concrete frame structure	2012
82	YANG, YOU-FU; HAN, LIN-HAI	Compressive and flexural behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubes (RACFST) under short-term loadings	2006
83	XIAO, JIANZHUANG; HUANG, YIJIE; SUN, ZHIHUI	Seismic behavior of recycled aggregate concrete filled steel and glass fiber reinforced plastic tube columns	2014
84	YANG, YOU-FU; MA, GUO-LIANG.	Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled stainless steel tube stub columns and beams	2013
85	POON, C. SHUI; SHUI, Z. H.; LAM	Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates	2004
86	XIAO, JIANZHUANG <i>ET AL.</i>	Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation	2013
87	LI, WENGUI <i>ET AL.</i>	Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches.	2012
88	KONG, DEYU <i>ET AL.</i>	Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete.	2010
89	LEITE, M. B.; MONTEIRO, P. J. M.	Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography.	2016
90	LEE, G. C.; CHOI, H. B.	Study on interfacial transition zone properties of recycled aggregate by micro-hardness test	2013
91	SALEM, ROHI M.; BURDETTE, EDWIN G.	Role of Chemical and Mineral Admixtures on the Physical Properties and Frost-Resistance of Recycled Aggregate Concrete.	1998
92	DE OLIVEIRA, M. BARRA; VAZQUEZ, E.	The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete.	1996
93	TAVAKOLI, MOSTAFA; SOROUSHIAN, PARVIZ.	Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate.	1996

94	KOU, SHI CONG; POON, CHI SUN; CHAN, DIXON.	Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete.	2007
95	XIAO, JIANZHUANG; LI, JIABIN; ZHANG, CH.	Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading.	2005
96	SAGOE-CRENTSIL, KWESI K.; BROWN, TREVOR; TAYLOR, ALAN HARRY.	Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate.	2001
97	WANG, YUYIN <i>ET AL.</i>	Effect of elevated temperatures and cooling methods on strength of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates.	2019
98	RAJHANS, PUJA; PANDA, SARAT KUMAR; NAYAK, SANKET.	Sustainable self compacting concrete from C&D waste by improving the microstructures of concrete ITZ. <i>Construction and Building Materials</i> , v. 163, p. 557-570, 2018.	2018
99	CHEN, HOW-JI; YEN, TSONG; CHEN, KUAN-HUNG.	Use of building rubbles as recycled aggregates.	2003
100	YOUNIS, KHALEEL H.; PILAKOUTAS, KYPROS.	Strength prediction model and methods for improving recycled aggregate concrete.	2013
101	MARINKOVIĆ, SNEŽANA <i>ET AL.</i>	Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete.	2010
102	DOMINGO-CABO, ALBERTO <i>ET AL.</i>	Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete.	2009
103	ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARI, A.	Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete.	2006
104	ABDULLA, NWZAD ABDULJABAR.	Effect of recycled coarse aggregate type on concrete.	2015
105	BOUDALI, S. <i>ET AL.</i>	Microstructural Properties of the Interfacial Transition Zone and Strength Development of Concrete Incorporating Recycled Concrete Aggregate.	2017
106	ISMAIL, SALLEHAN; RAMLI, MAHYUDDIN.	Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications.	2013
107	WANG, LIANG <i>ET AL.</i>	An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates.	2017

108	ISMAIL, SALLEHAN; RAMLI, MAHYUDDIN.	Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates.	2014
109	MUKHARJEE, BIBHUTI BHUSAN; BARAI, SUDHIRKUMAR V.	Influence of nano-silica on the properties of recycled aggregate concrete.	2014
110	ZHANG, HONGRU <i>ET AL.</i>	Surface treatment on recycled coarse aggregates with nanomaterials. <i>Journal of Materials in Civil Engineering</i> , v. 28, n. 2, p. 04015094, 2016.	2016
111	SHAIKH, FAIZ <i>ET AL.</i>	Effect of mixing methods of nano silica on properties of recycled aggregate concrete.	2018
112	KOU, SHI-CONG; POON, CHI-SUN.	Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates.	2010
113	ZHU, YA-GUANG <i>ET AL.</i>	Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete.	2013
114	SAHOO, KIRTI KANTA <i>ET AL.</i>	Enhancement of properties of recycled coarse aggregate concrete using bacteria.	2016
115	ZENG, WEILAI <i>ET AL.</i>	Using microbial carbonate precipitation to improve the properties of recycled aggregate.	2019
116	DIOGO, PEDRO <i>ET AL.</i>	Microstructural features of recycled aggregate concrete: from non-structural to high-performance concrete.	2019
117	LI, LONG <i>ET AL.</i>	Effect of carbonated recycled coarse aggregate on the dynamic compressive behavior of recycled aggregate concrete.	2017
118	POON, CHI-SUN; CHAN, DIXON.	The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong.	2007
119	MATIAS, D. <i>ET AL.</i>	Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates–Influence of the use of superplasticizers. C	2013
120	AKBARNEZHAD, A. ET AL.	Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates.	2011
121	KATZ, AMNON.	Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete.	2003
122	CASUCCIO, M. <i>ET AL.</i>	Failure mechanism of recycled aggregate concrete.	2008

123	YANG, KEUN-HYEOK; CHUNG, HEON-SOO; ASHOUR, ASHRAF F.	Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties.	2008
124	RYU, J. S.	An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties.	2002
125	TABSH, SAMI W.; ABDELFAH, AKMAL S. .	Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete.	2009
126	RIDZUAN, A. R. M. <i>ET AL.</i>	The influence of recycled aggregate on the early compressive strength and drying shrinkage of concrete.	2001
127	YANG, JIAN; DU, QIANG; BAO, YIWANG.	Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks.	2011
128	YAPRAK, HASBI <i>ET AL.</i>	Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties.	2011
129	OTSUKI, NOBUAKI; MIYAZATO, SHIN-ICHI; YODSUDJAI, WANCHAI.	Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete.	2003
130	BUTLER, LIAM; WEST, JEFFREY S.; TIGHE, SUSAN L.	Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength.	2013
131	KOU, SHI-CONG; POON, CHI-SUN; ETXEBERRIA, MIREN.	Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete.	2011
132	BELÉN, GONZÁLEZ-FONTEBOA <i>ET AL.</i>	Stress–strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate.	2011
133	ZUHUD AA.	Performance of recycled aggregate concrete,	2008
134	ANN, KI YONG <i>ET AL.</i>	Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials.	2008
135	KATZ, AMNON.	Treatments for the improvement of recycled aggregate.	2004
136	ABBAS, ABDELGADIR <i>ET AL.</i>	Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method.	2009

137	KOU, SHI-CONG; POON, CHI-SUN; WAN, HUI-WEN.	Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates.	2012
138	ZAHARIEVA, ROUMIANA; BUYLE- BODIN, FRANCOIS; WIRQUIN, ERIC.	Frost resistance of recycled aggregate concrete.	2004
139	BABU, V. S. <i>ET AL.</i>	Strength and durability characteristics of high-strength concrete with recycled aggregate-influence of processing.	2015
140	HU, J.; WANG, Z.; KIM, Y.	Feasibility study of using fine recycled concrete aggregate in producing self-consolidation concrete.	2013
141	BUI, NGOC KIEN; SATOMI, TOMOAKI; TAKAHASHI, HIROSHI.	Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete basing on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate.	2013
142	TALAMONA, DIDIER; HAI TAN, KANG.	Properties of recycled aggregate concrete for sustainable urban built environment.	2012
143	ALI, RASHID; HAMID, ROSZILAH.	Workability and Compressive Strength of Recycled Concrete Waste Aggregate Concrete.	2015
144	LARBI, J. A.; STEJJAERT, P. D.	Microstructure of concretes containing artificial and recycled aggregates.	1994
145	LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R. K.	Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete.	2000
146	DUAN, ZHENHUA <i>ET AL.</i>	Combined use of recycled powder and recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste in self-compacting concrete.	2020
147	BAIRAGI, N. K.; VIDYADHARA, H. S.; RAVANDE, KISHORE.	Mix design procedure for recycled aggregate concrete.	1990
148	GÜNÇAN, NEDİM FIRAT <i>ET AL.</i>	Using waste concrete as aggregate.	1995
149	KISKU, NISHIKANT <i>ET AL.</i>	KISKU, Nishikant et al. Development of durable concrete from C&D waste by adopting identical mortar volume method in conjunction with two-stage mixing procedure.	2020
150	XIE, JUN <i>ET AL.</i>	Effect of nano metakaolin on compressive strength of recycled concrete.	2020

151	HE, ZHI-HAI <i>ET AL.</i>	Effect of shrinkage reducing admixture on creep of recycled aggregate concrete.	2020
152	BAHRAMI, NASROLLAH <i>ET AL.</i>	Optimum recycled concrete aggregate and micro-silica content in self-compacting concrete: Rheological, mechanical and microstructural properties.	2020
153	VIEIRA, LUIZ DE BRITO PRADO; DE FIGUEIREDO, ANTONIO DOMINGUES; JOHN, VANDERLEY MOACYR.	Evaluation of the use of crushed returned concrete as recycled aggregate in ready-mix concrete plant.	2020

## APÊNDICE 2 – BANCO DE DADOS PARA CONCRETOS COM AGR, AMR E AGR/AMR

Estudo	Ano	Teor de AR	fc (MPa)	C <sup>(1)</sup>	IL (kg.m <sup>-3</sup> .MPa <sup>-1</sup> )	Fator de clínquer (%)	Emissões de CO <sub>2</sub> (kg.m <sup>-3</sup> )	IC (kg.m <sup>-3</sup> .MPa <sup>-1</sup> )
Batayneh e Asi (2007)	2007	05%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	486,6	10,40	75,00	329,19	7,04
Araujo et al. (2016)	2016	19%AGR	41,23	474,5	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	266,4	10,56	97,50	227,37	9,01
Amario (2015)	2015	20%AGR	45,78	391,5	8,55	97,50	339,45	7,41
Amario (2015)	2015	20%AGR	63,88	547,2	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)	2014	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
Bazuco (1999)	1999	25%AGR	36,73	464,58	12,65	97,00	411,46	11,20
Bazuco (1999)	1999	25%AGR	26,58	345,86	13,01	97,00	306,32	11,52
Bazuco (1999)	1999	25%AGR	19,29	274,71	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	378,1	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 Marí (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	553,5	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
Goméz-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	396,67	10,66	97,50	326,45	8,77
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	34,02	393,39	11,56	97,50	323,75	9,52
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	32,30	390,16	12,08	97,50	321,09	9,94
Tam, Kotrayothar e Xiao (2015)	2015	30%AGR	74,01	534,83	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
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	31,92	319,67	10,01	97,50	268,38	8,41
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	39,97	361,1	9,03	97,50	303,16	7,58
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	41,11	414,9	10,09	97,50	348,33	8,47
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	49,55	464,29	9,37	97,50	389,79	7,87
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	37,64	319,67	8,49	97,50	268,38	7,13
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	44,99	361,1	8,03	97,50	303,16	6,74
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	47,47	414,9	8,74	97,50	348,33	7,34
Zuhud (2008)	2008	30%AGR	55,95	464,29	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	452,5	8,08	97,50	369,75	6,60
Bui e Takahashi (2017)	2017	30%AGR	50,50	452,5	8,96	97,50	369,75	7,32
Ali e Hamid (2015)	2015	30%AGR	22,00	368,4	16,75	97,50	303,18	13,78
Ali e Hamid (2015)	2015	30%AGR	27,04	395,83	14,64	97,50	325,76	12,05
Ali e Hamid (2015)	2015	30%AGR	33,11	394,74	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	372,99	9,52	97,50	299,74	7,65
Xie et al. (2020)	2020	30%AGR	42,32	372,96	8,81	97,50	296,88	7,02
Xie et al. (2020)	2020	30%AGR	41,20	373,01	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	548,9	8,78	97,50	485,84	7,77
Amario (2015)	2015	40%AGR	45,98	385,2	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	346,5	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	471,7	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
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	463,9	17,11	97,00	410,86	15,15
Bazuco (1999)	1999	50%AGR	20,85	343,31	16,47	97,00	304,06	14,58
Bazuco (1999)	1999	50%AGR	19,13	280,11	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	434,7	12,18	85,00	314,22	8,80
Pedrozo (2008)	2008	50%AGR	22,61	364,5	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	354,5	12,48	97,50	291,74	10,27
Moitinho e Leite (2015)	2015	50%AGR	22,50	276,3	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, Marinković (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	410,5	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	346,5	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	372,6	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
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
Etxeberria, Vazquez e Marí (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	452,5	8,54	97,50	369,75	6,98
Bui e Takahashi (2017)	2017	50%AGR	43,00	452,5	10,52	97,50	369,75	8,60
Ali e Hamid (2015)	2015	50%AGR	21,25	368,4	17,34	97,50	303,18	14,27
Ali e Hamid (2015)	2015	50%AGR	24,17	395,83	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	394,74	12,66	97,50	324,86	10,42
Duan et al. (2020)	2020	50%AGR	29,54	553,5	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	372,99	9,90	97,50	299,74	7,95
Xie et al. (2020)	2020	50%AGR	38,72	372,96	9,63	97,50	296,88	7,67
Xie et al. (2020)	2020	50%AGR	36,96	373,01	10,09	97,50	294,01	7,95
Bahrami et al. (2020)	2020	50%AGR	33,50	500	14,93	97,50	330,66	9,87
Goméz-Soberon (2002)	2002	60%AGR	35,80	400	11,17	97,50	342,45	9,57
Amario (2015)	2015	60%AGR	23,45	277,8	11,85	97,50	237,41	10,12
Amario (2015)	2015	60%AGR	46,90	397,3	8,47	97,50	350,31	7,47
Amario (2015)	2015	60%AGR	62,35	570,2	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
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	319,67	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	319,67	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	319,67	11,11	97,50	268,38	9,33
Zuhud (2008)	2008	60%AGR	32,83	361,1	11,00	97,50	303,16	9,23
Zuhud (2008)	2008	60%AGR	36,35	414,9	11,41	97,50	348,33	9,58
Zuhud (2008)	2008	60%AGR	45,02	464,29	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	332,76	11,19	97,50	274,27	9,22
Kisku et al. (2020)	2020	61,01%AGR	35,22	332,76	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	452,5	9,43	97,50	369,75	7,70
Bui e Takahashi (2017)	2017	70%AGR	42,00	452,5	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	451,28	14,61	97,00	399,69	12,94
Bazuco (1999)	1999	75%AGR	25,40	344,69	13,57	97,00	305,28	12,02
Bazuco (1999)	1999	75%AGR	14,83	275,13	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	347,6	17,56	92,00	275,42	13,91
Araujo et al. (2016)	2016	75%AGR	35,80	461,9	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
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	451,43	15,47	97,00	399,82	13,70
Bazuco (1999)	1999	100%AGR	19,80	332,65	16,80	97,00	294,62	14,88
Bazuco (1999)	1999	100%AGR	15,79	270,49	17,13	97,00	239,56	15,17
Berndt (2009)	2009	100%AGR	38,00	394,8	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, Marinković (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
Goméz-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	413,7	12,73	85,00	299,04	9,20
Pedrozo (2008)	2008	100%AGR	19,05	342,1	17,96	92,00	271,06	14,23
Araujo et al. (2016)	2016	100%AGR	38,30	468,6	12,23	85,00	342,69	8,95
Lotfi 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	390,16	15,45	97,50	321,09	12,71
Vieira (2003)	2003	100%AGR	12,00	248,57	20,71	92,00	200,84	16,74
Vieira (2003)	2003	100%AGR	22,00	334,55	15,21	92,00	270,31	12,29
Vieira (2003)	2003	100%AGR	39,80	511,4	12,85	92,00	413,21	10,38
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	295,1	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	534,83	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, Nicolaides 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	485,5	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 at al. (2010)	2010	100%AGR	25,70	420	16,34	97,50	280,62	10,92
Kong at 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	323,9	8,34	97,50	247,23	6,36
Salem e Burdette (1998)	1998	100%AGR	35,52	335,2	9,44	97,50	247,25	6,96
Salem e Burdette (1998)	1998	100%AGR	29,91	323,9	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
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
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	438,6	10,49	97,50	361,30	8,64
Shaikh et al. (2017)	2017	100%AGR	44,00	438,6	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
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	452,5	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	553,5	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	372,99	10,87	97,50	299,74	8,73
Xie et al. (2020)	2020	100%AGR	35,84	372,96	10,41	97,50	296,88	8,28
Xie et al. (2020)	2020	100%AGR	36,72	373,01	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
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
Evangelista e Brito (2007)	2007	10%AMR	47,20	380	8,05	97,50	341,55	7,24
Yaprak et al. (2011)	2011	10%AMR	34,00	350	10,29	97,50	294,72	8,67
Santana (2018)	2018	20%AMR	35,50	482	13,58	85,00	342,68	9,65
Santana (2018)	2018	20%AMR	26,70	365	13,67	85,00	259,50	9,72
Santana (2018)	2018	20%AMR	16,10	290	18,01	85,00	206,17	12,81
Campos (2017)	2017	20%AMR	46,90	486,6	10,38	85,00	364,42	7,77
Branco (2012)	2012	20%AMR	27,35	368,2	13,46	97,50	306,46	11,21
Branco (2012)	2012	20%AMR	51,90	445,6	8,59	97,50	370,88	7,15
Branco (2012)	2012	20%AMR	72,20	564	7,81	97,50	469,43	6,50
Branco (2012)	2012	20%AMR	24,55	370	15,07	97,50	307,96	12,54
Branco (2012)	2012	20%AMR	53,70	451	8,40	97,50	375,38	6,99
Branco (2012)	2012	20%AMR	75,00	567,3	7,56	97,50	472,18	6,30
Evangelista e Brito (2007)	2007	20%AMR	45,84	380	8,29	97,50	341,55	7,45
Bogas, Brito e Ramos (2016)	2016	20%AMR	39,92	350	8,77	97,50	288,04	7,22
Bogas, Brito e Ramos (2016)	2016	20%AMR	58,16	420	7,22	97,50	349,45	6,01
Zega e Di Maio (2011)	2011	20%AMR	42,70	375	8,78	97,50	312,29	7,31
Poon e Chan (2007)	2007	20%AMR	37,76	410	10,86	97,50	345,81	9,16
Poon e Chan (2007)	2007	20%AMR	36,40	410	11,26	97,50	345,81	9,50
Poon e Chan (2007)	2007	20%AMR	40,32	410	10,17	97,50	345,81	8,58
Poon e Chan (2007)	2007	20%AMR	44,24	410	9,27	97,50	345,81	7,82
Yaprak et al. (2011)	2011	20%AMR	32,80	350	10,67	97,50	294,72	8,99
Pedrozo (2008)	2008	25%AMR	28,75	379,2	13,19	92,00	300,46	10,45
Frotté et al. (2017)	2017	25%AMR	21,76	322,58	14,82	97,50	263,59	12,11
Khatib (2005)	2004	25%AMR	35,30	322	9,12	97,50	275,67	7,81
Reis (2009)	2009	25%AMR	22,82	360	15,78	85,00	261,45	11,46

Reis (2009)	2009	25%AMR	32,15	494	15,37	85,00	364,01	11,32
Yang e Ma (2013)	2013	25%AMR	52,00	473	9,10	97,50	391,09	7,52
Hu, Wang e Kim (2013)	2013	25%AMR	64,00	473	7,39	97,50	321,90	5,03
Hu, Wang e Kim (2013)	2013	25%AMR	53,00	415	7,83	97,50	342,01	6,45
Kuster Junior (2018)	2018	30%AMR	44,88	483	10,76	97,50	355,38	7,92
Bahrami et al. (2020)	2020	25%AMR	36,70	500	13,62	97,50	330,66	9,01
Evangelista e Brito (2007)	2007	30%AMR	45,68	380	8,32	97,50	341,55	7,48
Zega e Di Maio (2011)	2011	30%AMR	41,40	375	9,06	97,50	312,50	7,55
Evangelista e Brito (2010)	2010	30%AMR	45,84	380	8,29	97,50	322,67	7,04
Yang , Chung e Ashou (2008)	2008	30%AMR	30,40	350	11,51	97,50	483,68	15,91
Yaprak et al. (2011)	2011	30%AMR	32,00	350	10,94	97,50	294,72	9,21
Vieira, Figueiredo e John (2020)	2020	35%AMR	42,30	400	9,46	75,00	256,58	6,07
Santana (2018)	2018	40%AMR	34,60	477	13,79	85,00	339,12	9,80
Santana (2018)	2018	40%AMR	27,00	359	13,30	85,00	255,23	9,45
Santana (2018)	2018	40%AMR	17,80	285	16,01	85,00	202,62	11,38
Branco (2012)	2012	40%AMR	25,15	364	14,47	97,50	302,97	12,05
Branco (2012)	2012	40%AMR	52,70	443	8,41	97,50	368,72	7,00
Branco (2012)	2012	40%AMR	74,60	556,8	7,46	97,50	463,44	6,21
Branco (2012)	2012	40%AMR	22,15	368,3	16,63	97,50	306,54	13,84
Branco (2012)	2012	40%AMR	54,80	449	8,19	97,50	373,71	6,82
Branco (2012)	2012	40%AMR	75,80	567,3	7,48	97,50	472,18	6,23
Yaprak et al. (2011)	2011	40%AMR	30,80	350	11,36	97,50	294,72	9,57
Levy (2001)	2001	50%AMR	30,00	300	10,00	75,00	201,88	6,73
Leite (2001)	2001	50%AMR	33,40	431	12,90	97,00	367,09	10,99
Leite (2001)	2001	50%AMR	20,10	291	14,48	97,00	247,85	12,33
Leite (2001)	2001	50%AMR	15,30	219	14,31	97,00	186,53	12,19
Rodrigues e Fucale (2014)	2014	50%AMR	31,00	450	14,52	85,00	322,60	10,41
Rodrigues e Fucale (2014)	2014	50%AMR	22,70	340	14,98	85,00	243,74	10,74

Rodrigues e Fucale (2014)	2014	50%AMR	14,30	270	18,88	85,00	193,56	13,54
Kuster Junior (2018)	2018	50%AMR	46,61	483	10,36	97,50	356,47	7,65
Reis (2009)	2009	50%AMR	32,56	494	15,17	85,00	362,06	11,12
Figueredo Filho (2011)	2011	50%AMR	32,50	418,8	12,89	85,00	302,73	9,31
Pedrozo (2008)	2008	50%AMR	29,93	371,8	12,42	92,00	294,60	9,84
Frotté et al. (2017)	2017	50%AMR	24,06	322,58	13,41	97,50	263,59	10,96
Khatib (2005)	2004	50%AMR	35,20	320	9,09	97,50	273,96	7,78
Evangelista e Brito (2007)	2007	50%AMR	47,04	380	8,08	97,50	341,55	7,26
Bogas, Brito e Ramos (2016)	2016	50%AMR	37,92	350	9,23	97,50	288,04	7,60
Bogas, Brito e Ramos (2016)	2016	50%AMR	53,92	420	7,79	97,50	349,45	6,48
Yildirim, Meyer e Herfellner (2015)	2015	50%AMR	27,80	400	14,39	97,50	329,19	11,84
Yildirim, Meyer e Herfellner (2015)	2015	50%AMR	30,17	400	13,26	97,50	329,19	10,91
Yildirim, Meyer e Herfellner (2015)	2015	50%AMR	34,58	400	11,57	97,50	329,19	9,52
Yang e Ma (2013)	2013	50%AMR	49,20	473	9,61	97,50	391,09	7,95
Yang , Chung e Ashou (2008)	2008	50%AMR	29,30	350	11,95	97,50	295,74	10,09
Yaprak et al. (2011)	2011	50%AMR	28,40	350	12,32	97,50	294,72	10,38
Hu, Wang e Kim (2013)	2013	50%AMR	65,50	473	7,22	97,50	321,90	4,91
Hu, Wang e Kim (2013)	2013	50%AMR	45,00	415	9,22	97,50	342,01	7,60
Bahrami et al. (2020)	2020	50%AMR	32,80	500	15,24	97,50	330,66	10,08
Pedrozo (2008)	2008	75%AMR	31,36	367,4	11,72	92,00	291,11	9,28
Khatib (2005)	2004	75%AMR	35,10	317	9,03	97,50	271,39	7,73
Yang e Ma (2013)	2013	75%AMR	48,50	473	9,75	97,50	391,09	8,06
Hu, Wang e Kim (2013)	2013	75%AMR	68,00	473	6,96	97,50	321,90	4,73
Hu, Wang e Kim (2013)	2013	75%AMR	43,50	415	9,54	97,50	342,01	7,86
Bahrami et al. (2020)	2020	75%AMR	29,60	500	16,89	97,50	330,66	11,17
Rodrigues e Fucale (2014)	2014	100%AMR	27,90	437	15,66	85,00	313,28	11,23
Rodrigues e Fucale (2014)	2014	100%AMR	20,90	325	15,55	85,00	232,99	11,15
Rodrigues e Fucale (2014)	2014	100%AMR	12,80	261	20,39	85,00	187,11	14,62

Figueredo Filho (2011)	2011	100%AMR	33,80	369,9	10,94	85,00	267,38	7,91
Pedrozo (2008)	2008	100%AMR	27,53	355,6	12,92	92,00	281,76	10,23
Khatib (2005)	2004	100%AMR	30,00	315	10,50	97,50	269,68	8,99
Evangelista e Brito (2007)	2007	100%AMR	43,84	380	8,67	97,50	341,55	7,79
Wainwright e Cabrera (1994)	1994	100%AMR	36,30	280	7,71	97,50	249,27	6,87
Vieira (2003)	2003	100%AMR	45,00	511,4	11,36	92,00	418,99	9,31
Vieira (2003)	2003	100%AMR	37,00	334,55	9,04	92,00	271,45	7,34
Vieira (2003)	2003	100%AMR	25,00	248,57	9,94	92,00	201,40	8,06
Zaharieva et al. (2003)	2003	100%AMR	31,50	400	12,70	97,50	346,97	11,01
Zaharieva et al. (2003)	2003	100%AMR	35,40	400	11,30	97,50	346,97	9,80
Zaharieva et al. (2003)	2003	100%AMR	39,40	400	10,15	97,50	346,97	8,81
Bogas, Brito e Ramos (2016)	2016	100%AMR	34,48	350	10,15	97,50	288,04	8,35
Bogas, Brito e Ramos (2016)	2016	100%AMR	47,04	420	8,93	97,50	349,45	7,43
Yildirim, Meyer e Herfellner (2015)	2015	100%AMR	22,49	400	17,79	97,50	329,19	14,64
Yildirim, Meyer e Herfellner (2015)	2015	100%AMR	23,60	400	16,95	97,50	329,19	13,95
Yildirim, Meyer e Herfellner (2015)	2015	100%AMR	30,19	400	13,25	97,50	329,19	10,90
Evangelista e Brito (2010)	2010	100%AMR	43,84	380	8,67	97,50	317,18	7,23
Yang , Chung e Ashou (2008)	2008	100%AMR	27,00	350	12,96	97,50	295,74	10,95
Yaprak et al. (2011)	2011	100%AMR	22,80	350	15,35	97,50	294,72	12,93
Hu, Wang e Kim (2013)	2013	100%AMR	49,90	473	9,48	97,50	321,90	6,45
Hu, Wang e Kim (2013)	2013	100%AMR	38,50	415	10,78	97,50	342,01	8,88
Bahrami et al. (2020)	2020	100%AMR	24,80	500	20,16	97,50	330,66	13,33
Campos (2017)	2017	20%AMR/20%AGR	46,78	486,6	10,40	75,00	324,65	6,94
Wang et al. (2019)	2019	100%AMR/50%AGR	50,64	400	7,90	97,50	328,33	6,48
Wang et al. (2019)	2019	100%AMR/100%AGR	41,60	400	9,62	97,50	328,33	7,89
Pedro et al. (2019)	2019	100%AMR/100%AGR	61,60	400	6,49	97,50	303,58	4,93
Pedro et al. (2019)	2019	100%AMR/100%AGR	53,36	400	7,50	97,50	287,92	5,40
Pedro et al. (2019)	2019	100%AMR/100%AGR	49,04	400	8,16	97,50	272,36	5,55

Pedro et al. (2019)	2019	100%AMR/100%AGR	72,08	605	8,39	97,50	463,50	6,43
Pedro et al. (2019)	2019	100%AMR/100%AGR	74,96	632,5	8,44	97,50	464,26	6,19
Pedro et al. (2019)	2019	100%AMR/100%AGR	77,84	660	8,48	97,50	465,03	5,97
Topçu e Sengel (2003)	2003	70%AMR/60%AGR	13,50	316	23,41	97,50	270,53	20,04
Topçu e Sengel (2003)	2003	80%AMR/70%AGR	12,50	310	24,80	97,50	265,40	21,23
Topçu e Sengel (2003)	2003	80%AMR/90%AGR	13,40	307	22,91	97,50	262,83	19,61
Topçu e Sengel (2003)	2003	100%AMR/100%AGR	11,90	289	24,29	97,50	247,42	20,79
Topçu e Sengel (2003)	2003	70%AMR/60%AGR	15,80	354	22,41	97,50	303,07	19,18
Topçu e Sengel (2003)	2003	80%AMR/70%AGR	14,50	346	23,86	97,50	296,22	20,43
Topçu e Sengel (2003)	2003	80%AMR/90%AGR	14,50	343	23,66	97,50	293,65	20,25
Topçu e Sengel (2003)	2003	100%AMR/100%AGR	13,90	323	23,24	97,50	276,53	19,89
Damineli e Pablos (2018)	2018	100%AMR/100%AGR	26,30	314,4	11,95	97,50	259,84	9,88
Vieira (2003)	2003	100%AMR/50%AGR	38,00	511,4	13,46	92,00	425,34	11,19
Vieira (2003)	2003	50%AMR/50%AGR	39,00	511,4	13,11	92,00	430,54	11,04
Vieira (2003)	2003	100%AMR/100%AGR	29,00	511,4	17,63	92,00	424,77	14,65
Vieira (2003)	2003	100%AMR/50%AGR	27,00	334,55	12,39	92,00	281,66	10,43
Vieira (2003)	2003	50%AMR/50%AGR	26,00	334,55	12,87	92,00	279,77	10,76
Vieira (2003)	2003	100%AMR/100%AGR	20,00	334,55	16,73	92,00	281,66	14,08
Vieira (2003)	2003	100%AMR/50%AGR	23,00	248,57	10,81	92,00	209,27	9,10
Vieira (2003)	2003	50%AMR/50%AGR	19,00	248,57	13,08	92,00	204,21	10,75
Vieira (2003)	2003	100%AMR/100%AGR	14,00	248,57	17,76	92,00	209,27	14,95
Figueredo Filho (2011)	2011	50%AMR/50%AGR	31,30	397,8	12,71	85,00	287,55	9,19
Figueredo Filho (2011)	2011	100%AMR/ 100%AGR	26,50	327,6	12,36	85,00	236,80	8,94
Figueredo Filho (2011)	2011	100%AGR/50%AMR	30,10	376,5	12,51	85,00	272,15	9,04
Figueredo Filho (2011)	2011	100%AMR/ 50%AGR	27,70	348,6	12,58	85,00	251,98	9,10
Corinaldesi e Moroconi (2009)	2009	100%AMR/100%AGR	28,00	575	20,54	87,00	427,36	15,26
Corinaldesi e Moroconi (2009)	2009	100%AMR/100%AGR	32,00	747	23,34	87,00	434,22	13,57

Corinaldesi e Moroconi (2009)	2009	100%AMR/100%AGR	42,00	661	15,74	87,00	437,41	10,41
Leite (2001)	2001	50%AMR/50%AGR	28,90	422	14,60	97,00	359,43	12,44
Leite (2001)	2001	50%AMR/50%AGR	19,90	283	14,22	97,00	241,04	12,11
Leite (2001)	2001	50%AMR/50%AGR	10,20	212	20,78	97,00	180,56	17,70
Leite (2001)	2001	100%AMR/ 100%AGR	21,60	394	18,24	97,00	335,58	15,54
Leite (2001)	2001	100%AMR/ 100%AGR	15,80	268	16,96	97,00	228,26	14,45
Leite (2001)	2001	100%AMR/ 100%AGR	10,70	202	18,88	97,00	172,05	16,08
Tangchirapat et al. (2008)	2008	100%AGR/50%AMR	41,00	380	9,27	97,50	319,03	7,78
Tangchirapat et al. (2008)	2008	100%AGR/50%AMR	41,00	380	9,27	97,50	263,07	6,42
Tangchirapat et al. (2008)	2008	100%AGR/50%AMR	40,00	380	9,50	97,50	221,09	5,53
Tangchirapat et al. (2008)	2008	100%AGR/50%AMR	38,00	380	10,00	97,50	179,12	4,71
Tangchirapat et al. (2008)	2008	100%AMR/100%AGR	36,00	380	10,56	97,50	319,03	8,86
Tangchirapat et al. (2008)	2008	100%AMR/100%AGR	38,00	380	10,00	97,50	263,07	6,92
Tangchirapat et al. (2008)	2008	100%AMR/100%AGR	37,00	380	10,27	97,50	221,09	5,98
Tangchirapat et al. (2008)	2008	100%AMR/100%AGR	34,00	380	11,18	97,50	179,12	5,27
Corinaldesi e Moriconi (2006)	2006	100%AMR/100%AGR	20,90	500	23,92	87,00	382,02	18,28
Corinaldesi e Moriconi (2006)	2006	100%AMR/100%AGR	29,40	690	23,47	87,00	385,77	13,12
Zaharieva, Buyle-Bodin e Wirquin (2004)	2004	100%AMR/100%AGR	34,20	400	11,70	97,50	346,97	10,15
Zaharieva, Buyle-Bodin e Wirquin (2004)	2004	100%AMR/100%AGR	38,10	400	10,50	97,50	346,97	9,11

Nota: AR–agregado reciclado; C–Consumo de ligantes, em kg para produzir 1 m<sup>3</sup> de concreto; fc–resistência à compressão aos 28 dias; IC–Intensidade de CO<sub>2</sub>; IL–Intensidade de Ligantes

<sup>(1)</sup> Consumo de ligantes corresponde ao consumo de cimento Portland e de adições minerais (pozolânicas e/ou inertes), quando for o caso.