LEONARDO CAMARA MACHADO

CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO: EFICIÊNCIA NO USO DO CIMENTO

SÃO PAULO

2022

LEONARDO CAMARA MACHADO

CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO: EFICIÊNCIA NO USO DO CIMENTO

Versão corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Área de Concentração:

Engenharia de Construção Civil e Urbana

Orientador:

Prof. Dr. Sérgio Cirelli Angulo

SÃO PAULO

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação na publicação

Machado, Leonardo Camara,

Concretos com agregados reciclados de concreto: eficiência no uso do cimento/ L.C. MACHADO – Versão Corrigida -– São Paulo, 2022.

119p.

Dissertação (Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Agregado Reciclado de Concreto 2. Propriedades do concreto. 3. Intensidade de ligante

Nome: Leonardo Camara Machado

Título: Concretos com agregados reciclados de concreto: eficiência no uso do cimento

Dissertação submetida a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para cumprimento dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Civil.

Aprovado em: 19/12/2022

Banca Examinadora:

Prof. Dr.: Sérgio Cirelli Angulo (Orientador)

Instituição: Universidade de São Paulo/ USP

Decisão: Aprovado

Prof. Dr.: Bruno Luis Daminelli

Instituição: Universidade de São Paulo/ USP

Decisão: Aprovado

Prof. Dr.: Marco Pepe

Instituição: Università degli Studi di Salerno

Decisão: Aprovado

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por todas as bençãos que me concedeu, desde sempre.

Aos meus pais pelo apoio incansável em meu desenvolvimento, desde criança, que me permitiram chegar aqui.

Agradeço ao meu orientador Prof. Sérgio Ângulo por todo o apoio e orientação com qualidade, diálogo, e perseverança, desde nosso primeiro contato, sempre preocupado em fazer o melhor possível.

Agradeço ao Instituto Federal de São Paulo e a Escola Politécnica da USP pelas experiências incríveis que tive em minha vida.

Agradeço aos meus colegas do IFSP e da Escola Politécnica, que me ajudaram nos momentos mais difíceis e cansativos, me apoiando com amizade, compreensão, e até com força física quando necessário, em especial aos colegas (Lucas Nascimento, Ramoel Serafini e Ronney Agra).

Agradeço a todos professores e colegas pesquisadores que colaboraram com meu desenvolvimento na pesquisa sempre orientando e tirando dúvidas quando precisei, em especial ao Markus S. Rebmann, pelo grande apoio ao longo da jornada, e aos colegas do Laboratório de Microestrutura – LME.

Aos técnicos e funcionários do Hall tecnológico (Genilson, Jéssica, Adilson, Mario e Renata).

À CAPES pela bolsa de mestrado que me permitiu me dedicar ao mestrado com mais tempo.

Agradeço à Rafa Entulhos, que me concedeu e entregou duas toneladas de material reciclado que garantiram a continuidade da pesquisa.

Agradeço ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas, em especial ao Raphael Baldusco, por ter me aberto às portas em partes de minha pesquisa .Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram comigo, seja em forma de amizade ou auxílio para a pesquisa.

RESUMO

MACHADO, L.C. **CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO: EFICIÊNCIA NO USO DO CIMENTO**. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo, 2022.

A quantidade de cimento (fração reativa de ligante) dividida pela resistência do concreto (denominado índice de intensidade de ligante, kg. m^{-3}. MPa-1) estabelece um parâmetro de eficiência ambiental do concreto, sendo afetado por fatores como as características das matérias-primas, método de dosagem do concreto, trabalhabilidade, resistência e requisitos de durabilidade. As propriedades do concreto são afetadas quando produzidos com agregados reciclados de concreto, muitas vezes exigindo um aumento de cimento para compensar as perdas nas propriedades. Neste trabalho, propriedades de concretos com agregado reciclado de concreto nos últimos 20 anos foram coletadas na literatura, sistematizadas, analisadas e comparadas com dados internacionais, trazendo novas contribuições para como elas podem ser modeladas. A trabalhabilidade do concreto foi modelada utilizando parâmetros multi-escala de distância de separação de partículas(*IPS* e *MPT*). A resistência à compressão do concreto e o módulo de elasticidade foram modelados utilizando critérios como absorção de água ponderada dos agregados (W_w), estabelecida pela ponderação entre a massa e a absorção de água dos agregados graúdos naturais e dos reciclados (eliminando o teor de substituição), e a relação água/cimento efetiva, que desconta da água de abatimento, a água absorvida pelos agregados reciclados. Foram estabelecidos limites práticos para aplicação dos agregados reciclados, levando em conta a resistência do concreto, o consumo de ligante e a absorção de água ponderada dos agregados. Classes mais altas de resistência do cimento, fíller carbonático, seleção adequada da *Ww* e superplastificante para melhorar a trabalhabilidade reduzem o índice de intensidade de ligante, melhorando a eficiência do uso de cimento para produzir concreto reciclado. Em outro capítulo experimental, foram avaliadas estratégias para a redução do consumo de ligante (uso de aditivos dispersantes, estratégias para otimizar empacotamento e adição de fíler carbonático). Os concretos produzidos experimentalmente apresentaram-se dentro dos modelos de previsão propostos com a revisão de literatura, com redução significativa do índice de intensidade de ligante, com resistência à compressão >25MPa, usando integralmente agregados graúdos reciclados de concreto.

Palavras-chave: 1.Agregado Reciclado de Concreto 2. Propriedades do concreto 3. Intensidade de ligante

ABSTRACT

MACHADO, L.C. **CONCRETE WITH RECYCLED CONCRETE AGGREGATES: VARIABILITY AND EFFICIENCY IN THE CEMENT USE**. Dissertation (master)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - São Paulo, 2022.

The quantity of cement (reactive binder) divided by concrete strength (named binder intensity index, kg. m^{-3}. MPa^{-1}) establishes an environmental efficiency parameter of the concrete, being affected by factors like the raw materials characteristics, mix proportioning method, workability, strength, and durability requirements. The concrete properties are affected when made with recycled concrete aggregates often requiring a cement increase to compensate the reductions in concrete properties. In this paper, recycled aggregate concrete properties over the last 20 years were collected from literature, systematized, analyzed, and compared with international data, bringing new contributions to how those can be modeled. The concrete workability was modeled using multiscale parameters of particle separation distance (*IPS* and *MPT*). The concrete compressive strength and elastic modulus were modeled using as criteria the weighted water absorption of aggregates (W_w), established by the weighting between the mass and the absorption of water from natural aggregates and the recycled ones (eliminating the replacement-ratio criteria), and the effective water/cement ratio, that discounts from the water of workability, the water absorbed by recycled aggregates. Practical limits were established for the application of recycled aggregates, considering the strength of concrete, the quantity of binder and the weighted water absorption of the aggregates. High cement strength class, cement containing limestone filler, proper selection of W_w, and superplasticizer to improve workability reduce the binder intensity index ameliorating the efficiency of cement use to produce recycled concrete. In another experimental chapter, strategies to reduce the quantity of binder (use of dispersing additives, packing studies and addition of limestone filler) were evaluated. The experimentally produced concretes were within the prediction models proposed with the literature review, with a significant reduction in the quantity of binder with compressive strength >25MPa, using fully coarse recycled concrete aggregates.

Keywords: recycled concrete aggregates, concrete properties, binder intensity index,

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de Formato da curva de gradação ótima de agregados no método Dreux-Gorisse. (Fonte: [27]) 25

Figura 2 – Exemplo genérico de monograma de dosagem experimental usado no Brasil. (Fonte: Autor)..... 27

Figura 3 - Comparação dos consumos de cimento para concretos obtidos pelos diferentes métodos, para resistências à compressão prefixadas, na idade de 28 dias [37]..... 28

Figura 4 – Figura esquemática dos índices MPT e IPS (Fonte: Autor)..... 30

Figura 5 - Relação porosidade-resistência em sólidos: *a*) Cimentos curados normalmente, cimentos autoclavados e agregados; *b*) Ferro, gesso, alumina sinterizada e zirconia; *c*) Argamassas de Cimento Portland com diferentes traços. Fonte: Adaptado de Mehta; Monteiro (2013) [25]..... 31

Figura 6 – Comparação entre modelos de previsão de módulo de elasticidade de compósitos cimentícios (Fonte:[50]) 32

Figura 7 – Exemplo de composição de um ARCO. (Fonte: Autor) 33

Figura 8 - Relação entre absorção do agregado e quantidade de argamassa aderida Fonte: adaptado de [53] 33

Figura 9 –Frequência de distribuição, medida partícula à partícula de: (a) densidade em *ARCO* e *AN* (b) Absorção de água em *ARCO* e *AN*. (Fonte: Adaptado de [54])..... 34

Figura 10 - (a) Relação entre densidade (γ) e a absorção de água (A%); (b) Relação entre a absorção de água (A%) e resistência da partícula (σ_p) (Fonte: [5])..... 34

Figura 11 – Influência dos agregados reciclados no concreto com a mesma relação W/C_{ef}, f_{CNA} significa resistência à compressão do concreto referência, incluindo apenas *NA's*, e $f_{C\ RA}$ significa resistência média à compressão incluindo diferentes proporções de *RA's*. (Fonte: Adaptado [13])..... 35

Figura 12 – Módulo de elasticidade estático (*Ec*) relativo do concreto em função do teor de substituição por *ARCO*, em relação ao concreto de mesma característica com *NA*. (Fonte: Adaptado de [74]) 36

Figura 13 – Resultados de *Slump* relativos em função do teor de substituição e pré-saturação (Fonte: [9]) S_{REC}(Slump do concreto reciclado); S_{REF} (Slump do concreto referência). 38

Figura 14 – Perda de *Slump* em função do tempo, variando teores de substituição e tipos de agregados. (Fonte: [70], apud [71]). 38

Figura 15 – Índice intensidade de ligante (*bi*) vs Resistência à compressão aos 28 dias (f_c) (Fonte: Adaptado de [19] e [81]). 40

Figura 16 –(a) Distribuição bimodal, com mais e maiores vazios; (b) distribuição polimodal, com menos e menores vazios. (Fonte: [87]) 42

Figura 17 – (a) Distribuição da resistência do concreto X carregamentos (Fonte: Adaptado de [31]) (b) Distribuição da resistência do concreto à compressão (Fonte: [88]) 44

Figura 18 - Coeficiente de variação (COV %) da resistência à compressão vs classe de resistência vs teor de substituição. (Fonte: [31]) 45

Figura 19 – Fluxograma e cálculo de parâmetros e índices (Fonte: autor) 50

Figura 20 – (a) Q_C vs. Água efetiva vs. W/C_{ef}. (116 dados Brasileiros (*BRA*)); 1 *OL* resultado consideradas como outliers de [98]). (b) Q_C vs W/C_{ef} vs aditivo, 93 resultados *BRA* (69 *N.AD.*; 24. *AD.*); 87 resultados *INT* (Internacional) (66 *N.AD*; 21 *AD.*); *N.AD.* (sem aditivo); *AD* (com aditivo); *PV* (Volume de pasta); somente concretos com slump [50-150]. 55

Figura.21 – (a) *IPS vs.* W/C_{ef} vs Tipo de cimento (b) Volume de Pasta vs. *MPT*. 138 resultados *BRA*, 2 OLs de[9] 56

Figura 22 – *Slump* vs. *MPT* vs. *IPS* vs. Aditivo *SP* 45 dados brasileiros dentro dos critérios de avaliação (*slump* [50-150]; *Dmax* [<19mm]; *Ww* [<8%], sem adições minerais; concreto considerado com aditivo somente com *SP* [>0,1% - % em relação à massa de cimento. 1 OL de [15] 57

Figura 23 – *Ww* vs., Teor de substituição (*R*) vs. W_{RA} – 296 resultados - 122 dados brasileiros, 174 dados internacionais dentro dos critérios de avaliação (W_{RA} [3-15%]). 58

Figura 24 (a) *FW* vs. W/C_{ef} vs; W_W. 118 resultados *BRA*. 4 OLs de [15], [90], [98] (b) *FW* vs. Índice de vazios do concreto. 57 resultados *BRA*. 5 OLs de [65], [69]. 60

Figura 25 – (a) *FW* vs Módulo de elasticidade 55 resultados *BRA*. 2 *OLs* de [94], [96] (b) *FW* vs. Resistência à compressão (f_c). 139 resultados *BRA*. 13 *OLs* de[92], [94], [96], [97], [130]. 60

Figura 26 – (a) *FW* vs Módulo de elasticidade vs *Qc* 55 resultados *BRA*. 3 *OLs* de [94], [96] (b) *FW* vs. Resistência à compressão (f_c) vs *Qc*. 139 resultados *BRA*. 13 *OLs* de [92], [94], [96], [97], [130]. 61

Figura 27 - f_c vs. W/C_{ef} vs. Ww vs Resistencia do cimento ($f_{pc,min}$). Para (a) $f_{pc,min}$ [32]; 92 resultados (60 *BRA*, 18 *INT)* 3 OLs de [105]. (b) $f_{pc,min}$ [42]; 118 resultados (65 *BRA*; 53 *INT*) 10 OLs de [90], [94], [96], [97], [108], [120], [126]). 62

Figura. 28 – *bi* vs f_c. 139 BRA 71 INT resultados usados. ($f_{pc,min}$ [32] e $f_{pc,min}$ [42] unidos) 64

Figura.29 -Índice de intensidade de ligante vs. f_c. (a) W/C_{ef} [<0,45] e f_{pc} [<40]; (b) W/C_{ef} [<0,45] e f_{pc} [>40]; (c) W/C_{ef} [0,45-0,55] e f_{pc} [<40]; (d) W/C_{ef} [0,45-0,55] e f_{pc} [>40]; (e) W/C_{ef} [>0,55] e f_{pc} [<40]; (f) W/C_{ef} [>0,55] e f_{pc} [>40]; 202 resultados: 30 deles em (a); 28 em (b) 36 em (c) 40 em (d) 27 em (e); 50 em (f); iso-curvas de *Qc* considerando um cimento com alto teor de clínquer (97,5%). 65

Figura 30 - Descrição dos parâmetros de tamanho e morfologia na análise de imagens dinâmicas 72

Figura 31 - Granulometria do cimento e fillers utilizados 73

Figura 32 – Granulometria agregado miúdo 74

Figura 33 - Granulometria agregados graúdos 75

Figura 34 – Fluxograma das principais etapas do programa experimental. (Fonte: Autor) 80

Figura 35 – Resultados da densidade dos concretos íntegros e dos fragmentos 81

Figura 36 – Resultados de absorção de água dos concretos íntegros e fragmentos. 82

Figura 37 – Absorção de água vs Densidade 82

Figura 38 – Resultados de densidade com balança hidrostática conforme NBR 9778:2009 [141] 83

Figura 39 – Resultados de absorção de água conforme NBR 9778 [141] 84

Figura 40 – Resultados de resistência à compressão uniaxial (*fc*). 85

Figura 41 – Resultados experimentais de resistência à compressão (*fc*) vs. Correlações encontradas no capítulo 3 (Figura 25(b)) vs dados de concretos LEAP da literatura [87], [155]. 86

Figura 42 - Resultados de resistência à tração na compressão diametral (f_t). 87

Figura 43 –(a) Resistência à compressão (f_c) vs resistência à tração na compressão (f_t) – Dados experimentais (b) Relação entre resistência à compressão/tração (f_c/f_t) – Dados dos concretos do capítulo 3 para f_c [25-35]. 88

Figura 44 – Resultados de módulo de elasticidade dinâmico (E_d) 89

Figura 45 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático (E_c). 90

Figura 46 – Resultados experimentais para módulo de elasticidade estático (E_c) dentro do modelo proposto no capítulo 3 (Figura 25), com inserção de dados LEAP da literatura [155]. 91

Figura 47 –Módulo de elasticidade estático (*Ec*) vs Módulo de elasticidade dinâmico (*Ed*) vs modelos da literatura [158], [159] 91

Figura 48 – Relação entre módulo de elasticidade estático (E_c) e resistência à compressão (f_c) vs Dados e Modelos da literatura [27], [115], [155], [161] 92

Figura 49 -Análise comparativa do índice intensidade de ligante obtidos experimentalmente vs dados da literatura coletada no capítulo 3 e dados LEAP da literatura [23], [87], [155]. 93

Figura 50 – Índice intensidade de ligante (*bi*) vs Resistência à compressão (*fc*) com dados da literatura sobre concretos LEAP [23], [155]. Linhas pretas delimitam limites de *Qb* [250 e 400kg/m³], conforme Figura 14.....95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Exemplo de trecho de tabela usada no modelo americano de dosagem - Aproximação da água de abatimento e requisitos de teor de ar para diferentes *slumps* e Diâmetros máximos de agregados. (Fonte: [25], [33]) 26

Tabela 2 - Desvio-Padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto (Fonte: [29]) 44

Tabela 3 – Dados utilizados para completar informações faltantes. 49

Tabela 4 – Resumo das correlações analisadas 68

Tabela 5 - Caracterização do cimento e fillers utilizados 73

Tabela 6 - Caracterização dos agregados miúdos 74

Tabela 7 – Absorção, Densidade e Granulometria dos agregados graúdos 75

Tabela 8 – Traços utilizados. 76

Tabela 9 – Porosidade de empacotamento dos concretos elaborados 77

Tabela 10 - Resultados de densidade usando balança hidrostática – NBR 9778 [141] 83

Tabela 11 - Resultados de absorção de água conforme NBR9778:2009 [141] 84

Tabela 12 – Resultados de resistência à compressão uniaxial 85

Tabela 13 – Resultados de resistência à tração na compressão diametral. 88

Tabela 14 – Resultados de módulo de elasticidade dinâmico 89

Tabela 15 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático. 90

Tabela 16 – Resultados do Índice intensidade de ligante obtidos experimentalmente 93

Tabela 17 – Resumo do índice intensidade de ligante 94

Tabela 18 – Comparação entre resultados experimentais e guia proposto no capítulo 3. 96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AD	Aditivo
ARCI	Agregado reciclado cimentício
ARCO	Agregado reciclado de concreto
ARM	Agregado reciclado misto
ARI	Alta resistência inicial
BR	Brasileiro
COV	Coeficiente de Variação
Conv	Convencional
CP	Corpo de prova
CP I	Cimento Portland Tipo I
CP II E	Cimento Portland Tipo II E – com adição de escória
CP II F	Cimento Portland Tipo II F – com adição de fíler
CP II Z	Cimento Portland Tipo II Z – com adição de pozolanas
CP III	Cimento Portland Tipo III
CP IV	Cimento Portland Tipo IV
CP V	Cimento Portland Tipo V
DATA	Dados
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FW	Água livre (Free Water)
IPS	Distância de separação entre partículas (Interparticle Separation distance)

INT	Internacional
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LEAP	Concreto de baixa emissão de CO_2 e desempenho avançado
MF	Módulo de finura
MPT	Espessura máxima da pasta (*Maximum Paste Thickness*)
NA	Agregado Natural
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
OL	Outlier
PV	Volume de pasta
RA	Agregado Reciclado
RAC	Concreto com Agregado Reciclado
RCD	Resíduo de construção e demolição
SCM	Materiais cimentícios suplementares
SD	Desvio Padrão (*Standard Deviation*)
SP	Superplastificante
SS	Área específica (*Specific Surface*)
SSS	Saturado Superfície Seca
VS	Volume de Sólidos
VSA	Área Superficial Volumétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

bi	Índice intensidade de ligante (*Binder intensity index*)
$CaCO_3$	Carbonato de cálcio
cm	centímetro
CO_2	Dióxido de carbono
E_c	Módulo de Elasticidade Estático
E_d	Módulo de Elasticidade Dinâmico
Dmax	Diâmetro Máximo do Agregado
f_c	Resistência média à compressão
f_{ck}	Resistência característica à compressão
f_{cd}	Resistência de projeto à compressão
$f_{pc,min}$	Resistência mínima do Cimento Portland
f_t	Resistência à tração na compressão
γ	Densidade
g	Volume de agregados
g^*	Empacotamento de partículas
GPa	GigaPascal
H	Relação água/sólidos
kN	kiloNewton
MPa	MegaPascal
mm	milímetro

µm	micrometro
P_{of}	Porosidade de empacotamento
Qb	Quantidade de ligante (kg/m³ de concreto)
Q_C	Quantidade de Cimento (kg/m^3 de concreto)
Q_{FA}	Quantidade de agregado miúdo (kg/m³ de concreto)
Q_{NA}	Quantidade de NA (kg/m^3 de concreto)
Q_{RCA}	Quantidade de RCA (kg/m^3 de concreto)
Q_W	Quantidade de Água (kg/m^3 de concreto)
Qtd	Quantidade
R	Teor de substituição (*Replacement Ratio*)
Vol	Volume
W	Absorção de água (*Water Absorption*)
W_{NA}	Absorção de água do NA
W_{RA}	Absorção de água do RA
W_W	Absorção de água ponderada (*Weighted Water* Absorption)
W/C	Relação água/cimento (*Water to cement ratio)*
W/C_{ef}	Relação água/cimento efetiva (*Effective Water to cement ratio*)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 20

1.1. Objetivos 22

1.2. Estratégia da pesquisa 23

1.3. Estrutura da dissertação 23

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 25

2.1. Características e dosagem de concretos 25

2.2. Modelos de comportamento do concreto 29

2.2.1. Agregados reciclados de concreto: Principais propriedades 32

2.2.2. Efeito dos agregados reciclados de concreto nos concretos 34

2.3. Eficiência no uso do cimento em concretos 39

2.4. Variabilidade das propriedades de concretos 43

3. CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO: METANÁLISE E EFICIÊNCIA NO USO DO CIMENTO 47

3.1. Objetivo 47

3.2. Metodologia 48

3.2.1. Cálculo de parâmetros (índices) 50

3.2.2. Correlações 53

3.3. Análise de dados 54

3.3.1. Dosagem de concretos e trabalhabilidade 54

3.3.2. Porosidade 58

3.3.3. Propriedades do estado endurecido 60

3.3.4. Análise da eficiência no uso do cimento 63

3.4. Conclusões do capítulo 69

3.5. Pesquisas futuras 70

4. MELHORIA DA EFICIÊNCIA NO USO DO CIMENTO DO CONCRETO RECICLADO 71

4.1. Objetivos 71

4.2. Materiais e Métodos 71

4.2.1. Caracterização dos materiais 71

4.2.2. Formulação e caracterização dos concretos 75

4.3. Resultados 81

4.3.1. Propriedades físicas do concreto 81

4.3.2. Propriedades mecânicas do concreto 84

4.3.3. Avaliação de eficiência no uso do cimento. 93

4.3.4. Aplicação do guia de seleção 96

4.4. Conclusões do capítulo 97

5. CONCLUSÃO 99

6. REFERÊNCIAS 100

APÊNDICE A – DADOS COLETADOS 113

APÊNDICE B – ÍNDICES CALCULADOS 115

APÊNDICE C – GRÁFICOS E TABELAS COMPLEMENTARES DO CAPÍTULO 3. 116

APÊNDICE D – RESUMO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS 119

1. INTRODUÇÃO

Estima-se que o Brasil gere cerca de 100 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (*RCD*) por ano [1], onde aproximadamente 20% da massa é transformada em agregados reciclados (*RA*) para uso na construção civil (ex: na confecção de concretos, com ou sem função estrutural [2]), resultando em benefícios como a redução de: áreas de aterros; extração de matéria prima; transporte dos materiais até o local de uso; entre outros [3], [4].

Em comparação com o agregado natural (*NA*), o *RA* apresenta maior porosidade (com relação direta entre densidade e absorção de água), menor resistência, maior teor de finos, além de composição heterogênea [2], [5]–[8]. O agregado reciclado oriundo de resíduos de concreto (*ARCO*) tende apresentar menor porosidade, quando comparado com o agregado reciclado de resíduos cimentícios (*ARCI* - quando há muitos resíduos de argamassa) ou agregado reciclado oriundos de resíduos mistos (*ARM* - contendo elevados teores de cerâmica vermelha e que apresenta maior porosidade dentre os três).

Devido à maior porosidade do *RA*, em relação ao *NA*, há influência na trabalhabilidade do concreto [9]–[12] e redução nas propriedades mecânicas (principalmente resistência à compressão e módulo de elasticidade) [4], [13], [14], sendo recomendado, no Brasil, para usos estruturais, um teor de substituição em torno de 20% (somente *ARCO*), enquanto não estruturais pode-se adotar até 100% de substituição (Qualquer *RA*) [2].

Apesar de consolidado na literatura internacional, avaliar o impacto do uso dos *RA* pela abordagem do teor de substituição pode levar a uma grande variação de resultados devido à grande faixa de propriedades dos *RA* [4], [5], [15] (o que impacta o concreto em diferentes escalas), especialmente para teores de substituição de agregado natural por reciclado acima de 50% da massa. Para prever com maior precisão os impactos do uso dos *RA* no concreto, também é necessário caracterizar e classificar os agregados conforme suas propriedades. Um modelo de previsão de comportamento que unifique a qualidade dos agregados com o teor de substituição e seu impacto no concreto, simplificando as previsões com precisão, ainda não é utilizado.

Diferentes métodos e estratégias de formulação podem ter impactos relevantes nas propriedades físicas, mecânicas, e de trabalhabilidade dos concretos. Devido à particularidade dos métodos de dosagem brasileiros [16], para contornar a redução nas propriedades no estado

fresco e estado endurecido de concretos pelo uso dos *RA*, quase sempre é requerido um aumento no consumo de água ou do cimento (sem considerar necessariamente aditivos, ou estratégias para redução do consumo de cimento), o que pode não ser tão interessante do ponto de vista econômico e ambiental.

A pegada de carbono de concreto depende majoritariamente do consumo de cimento no concreto (kg/m³) [1]–[3]. Apesar de a emissão de CO_2 de cimento variar (300-800kg.CO_2/t, principalmente dependendo do ter de clínquer, quando as emissões de adições não são incluídas) é muito maior do que a dos agregados (até 5 kg.CO_2/ton) [3], [18]–[23]. A quantidade de cimento aumenta consideravelmente com o aumento da resistência à compressão [24]–[26]. Também depende do volume da matriz (pasta de cimento), que ocupa os vazios não preenchidos pelos agregados e da trabalhabilidade adotada para o concreto, contendo ou não dispersantes na mistura (que otimizam a trabalhabilidade com a mesma quantidade de água) [26]–[28]. Esses fatores são fundamentais para as emissões de CO_2 do concreto [17]–[19].

Quando concretos com *RA* não são dosados observando a eficiência no uso de cimento, em termos de redução das emissões de CO_2 em concretos reciclados, o benefício relacionado com a redução do transporte de matérias-primas pode ser contrabalanceados por impactos ambientais relacionados a maior geração de CO_2 e impactos de mudança climática [3], [18], [19], [21]–[23]. A avaliação ambiental pode ser realizada com diferentes abordagens em diferentes temas, mas certamente o aumento da pegada de carbono e os efeitos sobre as mudanças climáticas podem ser considerados mais críticos do que outros benefícios devido ao uso de agregados reciclados, como a redução dos impactos na extração de matérias-primas e a redução das áreas de aterro, limitando o interesse pela reciclagem do *RCD*. Assim, para controlar a pegada de carbono do concreto reciclado, é necessário definir limites para o uso de agregados de concreto reciclado (*ARCO)*, de preferência por métodos simplificados.

Uma forma de analisar a eficiência no uso do cimento no concreto é avaliando o consumo de cimento em relação ao desempenho obtido pelo concreto, podendo ser empregado o índice intensidade de ligante (*bi* – do inglês binder intensity index) [18], estabelecendo uma razão entre o consumo de ligante por m^3 de concreto (clínquer do cimento somando às adições minerais reativas, como escórias e pozolanas – fíller carbonático são intertes e portanto desconsiderados), e a resistência média à compressão (f_c), obtendo um indicador cuja unidade é $kg.m^{-3}.MPa^{-1}$, este indicador pode servir de base para análises de eficiência ambiental para diferentes formulações e faixas de resistência de concretos. Concretos reciclados que usam mais

do que 10% de cimento para uma resistência esperada devem ser evitados

O Brasil possui dezenas de trabalhos acadêmicos desenvolvidos nos últimos 20 anos sobre avaliação de propriedades mecânicas de concretos com *ARCO*, que não foram sistematizados e publicados em revistas científicas indexadas ou nem traduzidos para o inglês, o que dificulta o uso das informações pela comunidade internacional e, portanto, requerem sistematização e análise de dados. Esta base de dados pode ser comparada com a ampla literatura científica internacional sobre concretos produzidos com *ARCO* e trazer novas contribuições ao estado da arte, uma vez que a eficiência no uso do cimento é pouco discutida.

Além de produzir concretos com eficiência no uso do cimento, outro grande desafio é prever a variabilidade das propriedades do concreto. Em projetos estruturais, além da resistência média do concreto, é necessário avaliar o desvio padrão para especificar a resistência característica (f_{ck}) e a resistência de projeto do concreto (f_{cd}) [29], [30] . Quanto maior o desvio padrão, maior deverá ser a resistência média do concreto, impactando no consumo de cimento, e, portanto, no índice intensidade de ligante, para um mesmo f_{ck}. Ainda não há um consenso na literatura internacional quanto à influência do uso de *ARCO* no desvio padrão de concretos [31], [32]. Assim, mais investigações experimentais devem ser realizadas a fim de colaborar com o estado da arte.

1.1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivos:

a) Realizar, através de revisão sistemática da literatura brasileira:

Avaliação da eficiência no uso do cimento de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto, estabelecendo limites para a formulação de concreto reciclado considerando consumo de cimento e resistência.

Usar conceitos poucos explorados para concretos com agregados reciclados para prever propriedades no estado fresco (*IPS*, *MPT*, aditivos e conteúdo de água efetiva) e propriedades no endurecido (Absorção de água ponderada e relação água/cimento efetiva). Assim, apresentando novos modelos de previsão mais práticos e generalizáveis baseados nas características dos *ARCO* para prever propriedades de concretos reciclados, bem como apontar algumas contribuições científicas específicas da pesquisa brasileira.

b) Avaliar, experimentalmente, a influência do uso de agregados graúdos reciclados de concreto nas propriedades físicas e mecânicas (densidade, resistência a compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade) de concretos convencionais, e concretos com baixo consumo de cimento, e seu impacto no índice intensidade de ligante.

1.2. Estratégia da pesquisa

A estratégia para a revisão sistemática prevê: coleta de dados em repositórios de universidades federais e estaduais sobre pesquisas com *ARCO* utilizando palavras chaves e critérios definidos de seleção e aceitação. Avaliação de correlações entre propriedades dos agregados graúdos reciclados de concreto (*ARCO*), composição do concreto, propriedades físicas, propriedades no estado fresco e endurecido.

A estratégia experimental adotada prevê a avaliação das propriedades físicas (densidade e absorção de água) e propriedades mecânicas (resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade) de concretos, para diferentes composições de concreto (dosados convencionalmente, e dosados visando um baixo consumo de cimento) com diferentes agregados graúdos (naturais e reciclados de concreto).

1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação contém quatro capítulos: a introdução que contextualiza e mostra a relevância do tema. O segundo servindo de panorama e fundamentação teórica para outros dois capítulos indenpendentes, porém conectados. Nos capítulos independentes, serão apresentados a metodologia, apresentação e discussão dos resultados e conclusões específicas dos temas abordados.

No segundo capítulo são discutidos aspectos gerais que norteiam os capítulos 3 e 4. São apresentados conceitos sobre os objetos de estudo desta pesquisa (características e dosagem de concretos; modelos de previsão de comportamento; propriedades dos agregados reciclados e sua influência nas propriedades de concretos no estado fresco e endurecido; indicadores ambientais para avaliar a eficiência no uso do cimento de concretos).

O capítulo três apresenta, a partir de revisão sistemática da literatura, a influência das propriedades físicas dos *ARCO* e de diferentes traços na trabalhabilidade de concretos (abatimento), através de conceitos como absorção de água ponderada, água/cimento efetiva e

parâmetros multi-escala como *IPS* e *MPT*, e no estado endurecido (Resistência à compressão e módulo de elasticidade), e avalia com um indicador (Índice intensidade de ligante) a eficiência no uso do cimento. São propostas faixas de utilização dos *ARCO* para diferentes faixas de resistência, bem como são indicadas estratégias para melhorar a eficiência no uso do cimento destes concretos, estabelecendo limites para aplicações e dosagem.

O capítulo quatro apresenta o programa experimental do trabalho, onde são avaliadas as propriedades físicas e mecânicas de concretos convencionais e com baixo consumo de cimento com agregados graúdos reciclados de concreto, comparando com concretos com uso só de agregados naturais, inserindo os resultados nos modelos propostos na análise de dados do capítulo três.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Características e dosagem de concretos

Existem diversos métodos de dosagem de concreto internacionalmente, que podem impactar diretamente na eficiência do uso do cimento no concreto. Segundo Larrard e Colina [27], na França, o método Dreux-Gorisse é um método clássico, empírico e baseado em curvas ótimas de classificação (Figura 1), que considera a granulometria e origem dos agregados (Eq.1), visando a otimização da compactação do esqueleto granular, para minimizar a demanda de água e cimento.

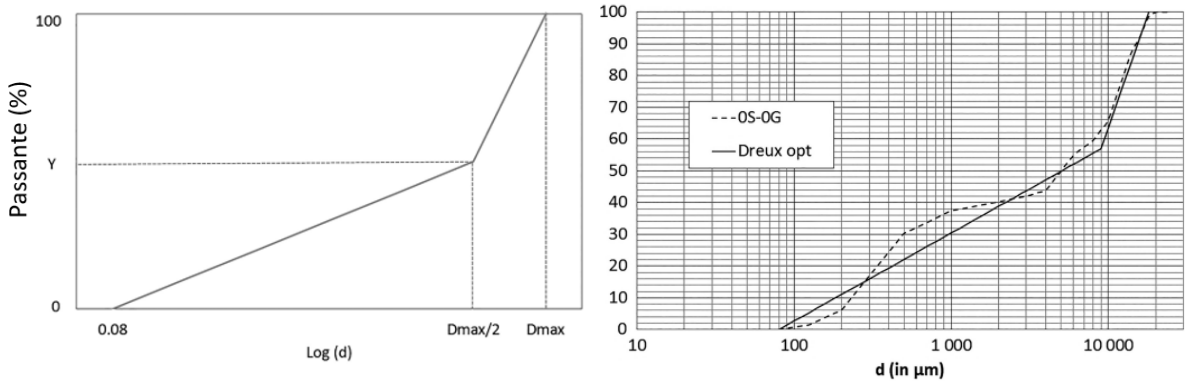


Figura 1 – Exemplo de Formato da curva de gradação ótima de agregados no método Dreux-Gorisse. (Fonte: [27])

Neste método, o ponto de inflexão *Y* é usualmente calculado pela equação 1:

$$Y = 50 - \sqrt{Dmax} + K + (6MF - 15) \qquad \text{Eq.1}$$

Onde *Dmax* é o diâmetro máximo dos agregados, *K* é um coeficiente que depende do tipo de agregado, e *MF* é o Módulo de Finura.

Mehta e Monteiro [25] apresentam o modelo americano proposto pelo ACI Committee 211 [33], cuja quantidade de materiais são calculados a partir de tabelas que utilizam distribuição de tamanho de partículas, densidade e absorção de água de agregados naturais (W_{NA}) (Tabela 1). O empacotamento do esqueleto granular é considerado entre agregados miúdos e graúdos, mas não totalmente explorada, bem como mudanças de forma nos agregados não são consideradas.

Tabela 1- Exemplo de trecho de tabela usada no modelo americano de dosagem - Aproximação da água de abatimento e requisitos de teor de ar para diferentes *slumps* e Diâmetros máximos de agregados. (Fonte: [25], [33])

Água, em L/m³* para o diâmetro máximo nominal do agregado					
Slump, cm**	9,5mm	12,5mm	19 mm	25 mm	38mm
Concreto sem ar incorporado					
3 a 5	207	198	187	178	163
8 a 10	228	216	201	192	178
15 a 18	243	228	213	201	187
Concreto com ar incorporado					
3 a 5	181	175	166	160	148
8 a 10	201	192	181	175	163
15 a 18	216	204	192	184	172

*Unidade original em lb/yd³. Foi considerado para conversão lb = libra (1 lb ~ 0,45kg); yd³ = jarda ao cubo (1 yd³ ~ 0,76m³); **valores aproximados devido arredondamento em conversão de unidade de polegadas (in) para centímetros (cm)

Dentre os métodos de dosagem existentes no Brasil, o mais difundido em pesquisas de concreto (IPT/EPUSP [11]) possui um procedimento de dosagem experimental peculiar, onde o teor ideal de argamassa, que preenche o esqueleto granular de agregados graúdos é determinado visualmente. A otimização do empacotamento dos agregados ou o uso de aditivos não são obrigatórios porque podem não refletir os materiais disponíveis. O teor de argamassa ideal para atingir determinada trabalhabilidade pode aumentar com um aumento de vazios no esqueleto granular dos agregados; partículas alongadas, e um empacotamento deficiente também resultarão em maior teor de argamassa no concreto [34].

A dosagem é realizado a partir de um monograma de dosagem experimental, conforme a Figura 2. No quadrante superior, são seguidos os princípios das leis de Abrams[35], que estabelece relação entre a resistência a compressão (f_c) e a relação água/cimento (W/C). No quadrante inferior direito, a Lei de Lyse, que estabelece a razão de massa entre água e materiais secos similar, e definição de abatimento similar para o concreto [36]. No quadrante inferior esquerdo, a Lei de Molinari que calcula o consumo de cimento por m^3 de concreto (Q_C) a partir da densidade do concreto no estado fresco, e facilita a obtenção dos consumos dos demais materiais por m^3 de concreto. Três concretos com diferentes relações de massa entre cimentos e agregados, e de mesma trabalhabilidade especificada, resultam em pontos experimentais capazes de obter equações de regressão (de ajustes experimentais). Para os três concretos, adota-se a mesma proporção de teor de argamassa (α); α é igual à massa de cimento mais areia, dividida por massa de cimento, areia, agregados graúdos. A redução da relação água/cimento

ou o aumento da trabalhabilidade do concreto implica no aumento da quantidade de cimento por metro cúbico de concreto.

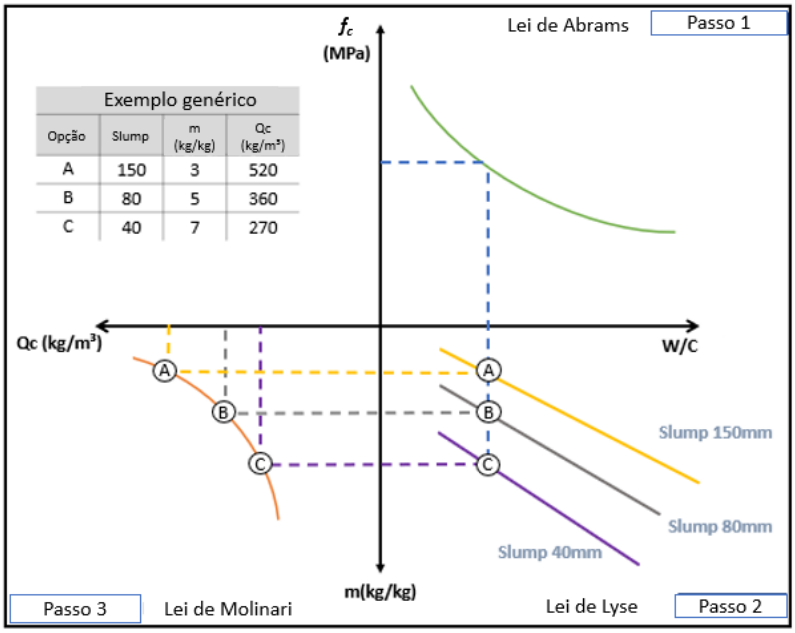


Figura 2 – Exemplo genérico de monograma de dosagem experimental usado no Brasil. (Fonte: Autor)

Quanto maior o abatimento (*slump*) do concreto, mais água é exigida (reduzindo essa demanda com aditivos ou não), e maior a quantidade de cimento (Q_C), para uma dada resistência à compressão, ou teor de argamassa (resultado da exigência de um alto *Slump*, ou falta de otimização do empacotamento dos agregados por granulometria inadequada ou forma irregular [34]).

Assim, o aumento do *slump* pode ser obtido reduzindo a quantidade de agregados, aumentando a quantidade de cimento (Q_C) e a quantidade de água (Q_W). O uso de aditivos dispersantes é importante para minimizar a quantidade de cimento, para uma dada resistência, mas não é obrigatório. A adoção de mais água e cimento para atingir trabalhabilidade impacta tanto nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos, quanto nas emissões de CO_2 do concreto, devido ao maior consumo de cimento.

Boggio, A. J. (2000) [37] apresenta um estudo experimental comparando os métodos de dosagem existentes no Brasil. A Figura 3 ilustra o consumo de cimento (Qc kg/m³) do concreto, em função da resistência à compressão aos 28 dias (fc_{28}) para cada método de dosagem. Em todos os casos, nota-se um aumento do consumo de cimento conforme aumenta-se a resistência à compressão. As setas vermelhas apontam para o método IPT/EPUSP [16].

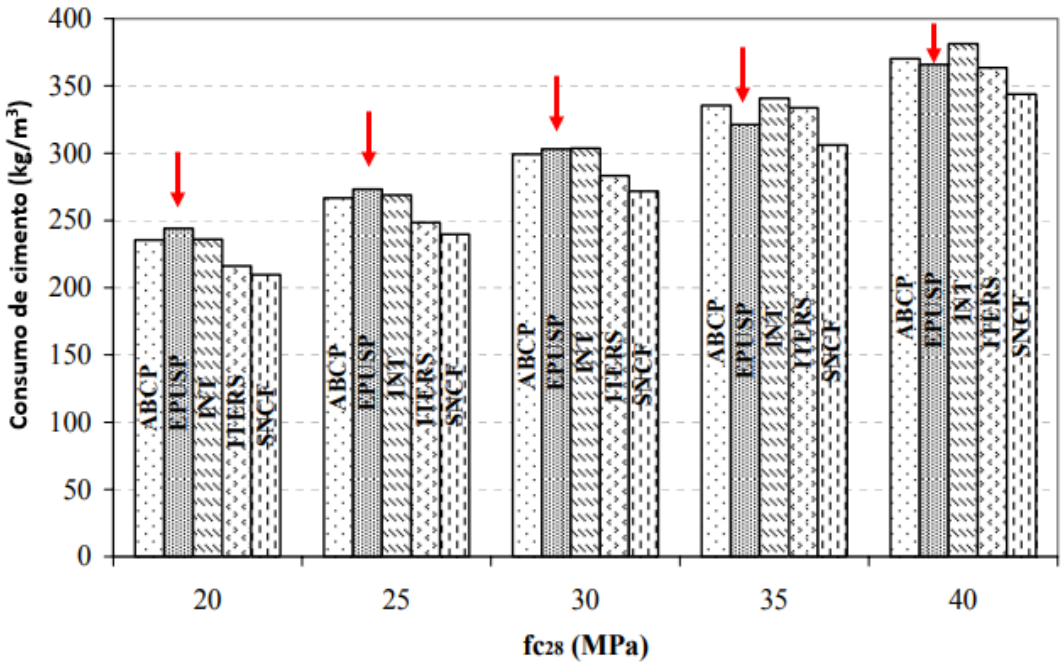


Figura 3 - Comparação dos consumos de cimento para concretos obtidos pelos diferentes métodos, para resistências à compressão prefixadas, na idade de 28 dias [37].

A diferença no *Qc* para cada um destes métodos brasileiros ocorre em função das diferentes abordagens e peculiaridades de cada método, resultado do esforço na caracterização dos materiais, ou no processo iterativo experimental. Dentre as principais variáveis deste métodos, destacadas por Boggio, A.J. (2000) [37], temos:

(a) o uso de tabelas com adoção de valores médios de características dos materiais (ex: módulo de finura do agregado míudo) pelo método da ABCP de 1990 [38], ou uso de faixas granulométricas ótimas pré-estabelecidas (a partir de um único tipo de agregado) e tabelas de combinação de agregados com diferentes diâmetros, pelo método INT de 1953 [39]). Em ambos os métodos pode-se não se representar a realidade dos materiais existentes, exigindo adaptações para aumentar o abatimento, o que pode implicar em um aumento no consumo de ligante.

(b) O método ITERS [40] propõe um grande programa experimental, elaborando ao menos 16 concretos, buscando encontrar a composição que obtenha o menor volume de pasta para dada trabalhabilidade e resistência, podendo utilizar técnicas de avaliação como o tempo de remoldagem de powers, manual ou mecanizada (com dependência da experiência do operador). O método reflete os materiais e métodos de adensamento que serão efetivamente empregados na obra.

(c) O método Francês - SNCF [41], tem fundamentos teóricos diferentes dos anteriores, necessitando de muitas informações sobre a caracterização dos materiais (densidade, massa específica, massa unitária, e conceitos pouco aplicados como “água de molhagem”), além de tentar otimizar o empacotamento dos materiais, com a argamassa preenchendo os vazios dos agregados graúdos apontados na massa unitária, e do cimento preenchendo os da areia, e etc. Este método é o que apreseta a maior complexidade, porém, resulta num menor consumo de cimento.

O método IPT/EPUSP [26] apesar de demonstrar grande versatilidade e facilidade de execução experimental em comparação com os outros métodos, sem necessidade de grandes aparatos tecnológicos e caracterização detalhada dos materiais, foi o método que, no estudo de Boggio, A.J. (2000) [37], apresentou o maior *Qc* até *fc* 30MPa.

2.2. Modelos de comportamento do concreto

No concreto convencional, as propriedades no estado fresco são governadas pelo empacotamento dos agregados (g^*), o volume de agregados (g), o volume e a fluidez da pasta, presença de dispersantes, área específica dos materiais granulares (*VSA*), entre outros [34].

Parâmetros multi-escala encontrados na literatura, que representam a distância de separação entre particulas do concreto, em diferentes escalas (finos separados pela água, areia separa pela pasta de cimento, agregados graúdos separados pela argamassa), calculado com as variáveis acima, ou outras, podem ser determinados para correlacionar com o *slump* do concreto [27], [28], [34], [42]–[45]. Parâmetros como o *IPS* (interparticle separation distance), e o *MPT* (Maximum Paste Thickness) [45], [46], também representam a distância média de separação de partículas de forma multi-escalar (Figura 4). O *IPS* é aplicado aos finos (< 0.1 mm), e está relacionado com o tipo de cimento (afeta sua área superficial) e está relacionado com o consumo de água (Q_W) e consequentemente com a relação água/cimento efetiva (W/C_{ef}). Já o *MPT*, aplicado aos agregados graúdos, está relacionado com o volume de pasta que separa os agregados. O *IPS* é um modelo teórico que assume um sistema disperso. Misturas que não usam dispersantes podem levar à uma maior variação nas correlações devido à aglomeração de partículas causadas por forças de atração.

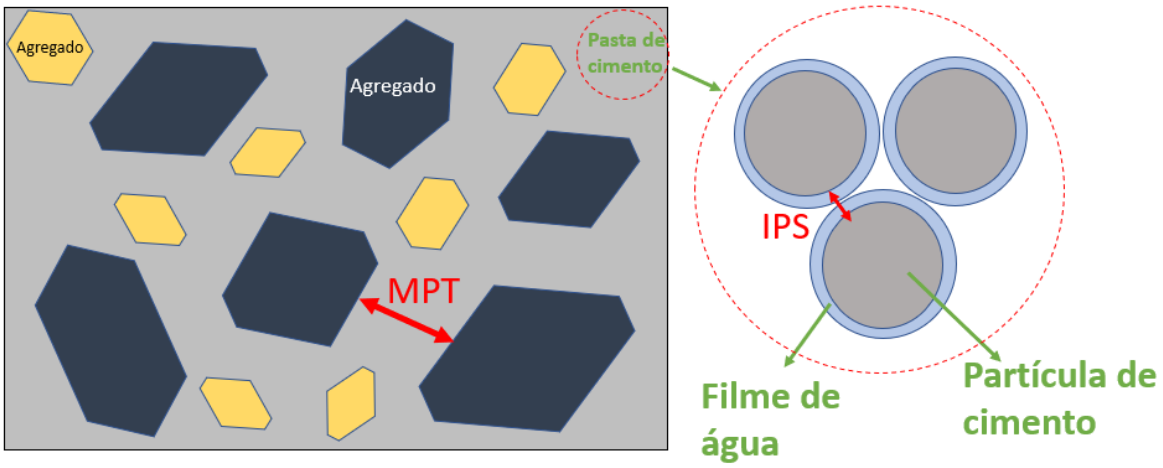


Figura 4 – Figura esquemática dos índices MPT e IPS (Fonte: Autor)

Juntos, esses parâmetros multi-escala conseguem correlacionar com certas propriedades dos materiais no estado fresco (abatimento do tronco de cone, ou parâmetros reológicos como tensão de escoamento e viscosidade), e do estado endurecido (como resistência, que é influenciada pelo volume/espessura da pasta de cimento no concreto e sua porosidade), e podem ser utilizados como ferramenta de avaliação no desenvolvimento de novos modelos de comportamento do concreto [27], [28], [34], reciclado ou não.

Para um concreto começar a obter fluidez os vazios entre os grãos dos agregados precisam ser preenchidos pela pasta de cimento. Quanto menor o volume de vazios entre os agregados, menor o volume de pasta de cimento será necesário para permitir atingir determinada trabalhabilidade, e portanto menor o *MPT* [19], [23].

Existe uma relação fundamental entre resistência à compressão e porosidade encontrada em diversos materiais [25]. A Figura 5 ilustra essa relação encontrada por diferentes pesquisadores para materiais cimentícios e outros materiais cerâmicos frágeis.

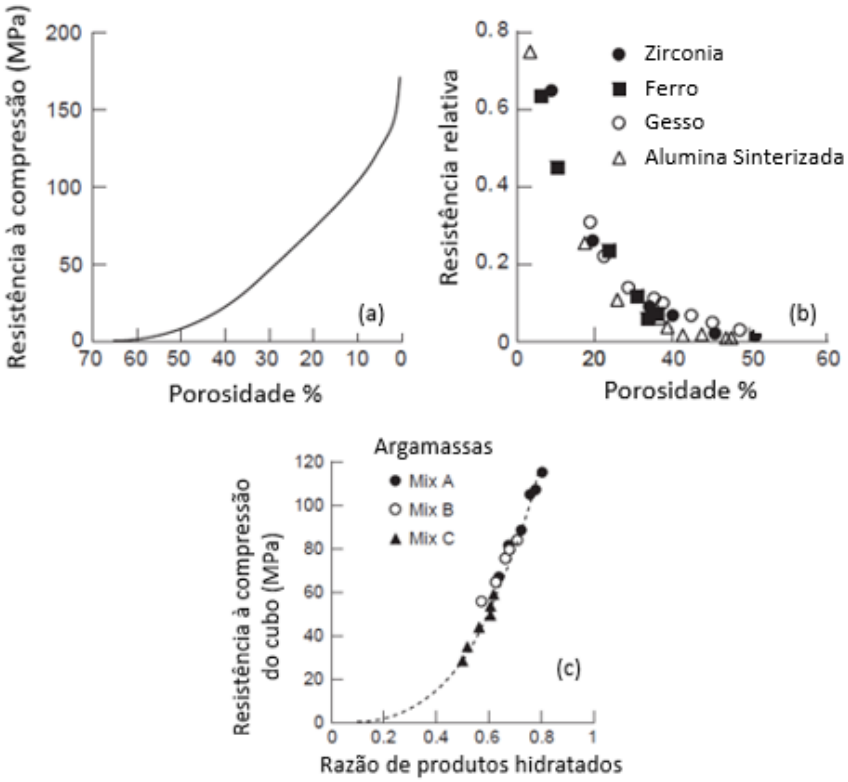


Figura 5 - Relação porosidade-resistência em sólidos: *a*) Cimentos curados normalmente, cimentos autoclavados e agregados; *b*) Ferro, gesso, alumina sinterizada e zirconia; *c*) Argamassas de Cimento Portland com diferentes traços. Fonte: Adaptado de Mehta; Monteiro (2013) [25].

A porosidade do concreto é governada principalmente pelos vazios deixados na pasta de cimento, advindos da água excedente ao necessário para a reação química do cimento (tipicamente variando entre 15% e 23% da massa de cimento, aos 28 dias, a depender do tipo de cimento e sua composição - Teor de clínquer, presença de pozzolanas, escórias, filler carbonático etc.) [24], [47], [48]. Quanto maior a relação água/cimento efetiva (W/C_{ef}), maior será o número de vazios, impactando na resistência do concreto; esta lei é conhecida como a Lei de Abrams [35], muito difundida em pesquisas da área de concreto.

Apesar de encontrarmos boas correlações entre porosidade e a resistência da pasta de cimento ou da argamassa; no concreto, devido à diversos fatores, tais como a presença de porosidade no agregado (em particular, os agregados reciclados de resíduos da construção) e presença de microfissuras na zona de transição entre os agregados graúdos e a matriz o mecanismo de fratura se torna mais complexo [25], havendo efeitos de confinamento da pasta entre o agregado, do módulo das fases (agregado, pasta), mecanismo de desvio de trinca no agregado etc [49].

O módulo de elasticidade do concreto (*E*) é governado pelos módulos de elasticidade da pasta e do agregado, e seus respectivos volumes na mistura (Figura 6). Diversos modelos de previsão são apresentados em [50]. Quanto maior o módulo elástico dos agregados e quanto maior seu volume, maior será o módulo de elasticidade do concreto.

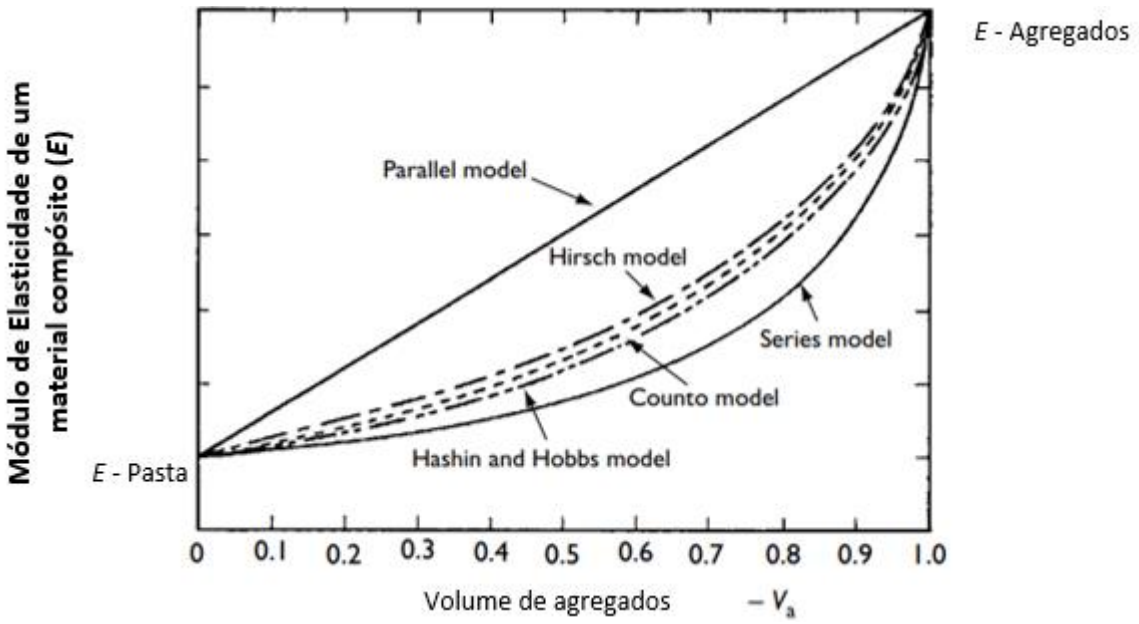


Figura 6 – Comparação entre modelos de previsão de módulo de elasticidade de compósitos cimentícios (Fonte:[50])

2.2.1. Agregados reciclados de concreto: Principais propriedades

Em comparação com o agregado natural (*NA*), o *RA* tem uma qualidade inferior por diversos fatores, maior absorção de água, maior teor de finos, e composição heterogênea etc. [2], [5]–[8], Onde observa-se diversos materiais, variando sua proporção, como concreto, cerâmicas (vermelhas, brancas), metais diversos, madeira, entre outros (solos, argilas etc.)[4], [7]. Nos *ARCO*, majoritariamente, cada agregado possui duas fases: os agregados naturais (*NA*), e a pasta aderida, como ilustra a Figura 7.

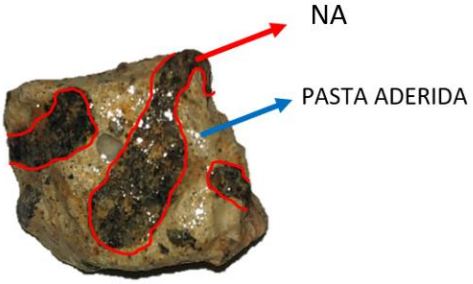


Figura 7 – Exemplo de composição de um *ARCO*. (Fonte: Autor)

A quantidade de argamassa aderida depende de concreto de origem, métodos de britagem e diâmetro do agregado obtido [51]–[53]. Quanto maior o teor de argamassa aderida, menor será a densidade do *ARCO*, e maior sua abosrção de água (Figura 8).

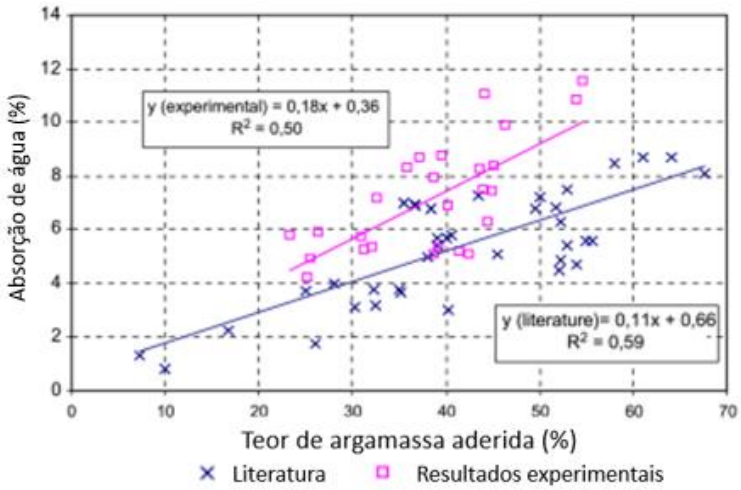


Figura 8 - Relação entre absorção do agregado e quantidade de argamassa aderida Fonte: adaptado de [53]

A absorção de água e a densidade de agregados (medições que estão entre os ensaios mais simples e rápidos para determinar a qualidade de um *ARCO* em usinas de concreto e usinas de reciclagem), são parâmetros-chave na dosagem para estabelecer relações de massa-volume, e na obtenção relação água/cimento efetiva do concreto [4], [10], [12]. A Figura 9 mostra a distribuição das densidades e das absorções de água, medidas partícula por partícula, de *NA* e *ARCO*, dentro de um mesmo lote. Além de suas médias estarem distantes, nota-se uma maior dispersão dos resultados das partículas para *ARCO*, do que para *NA*. Ou seja, dentro de um mesmo lote, pode-se encontrar partículas com alta absorção, e outras partículas com baixa absorção.

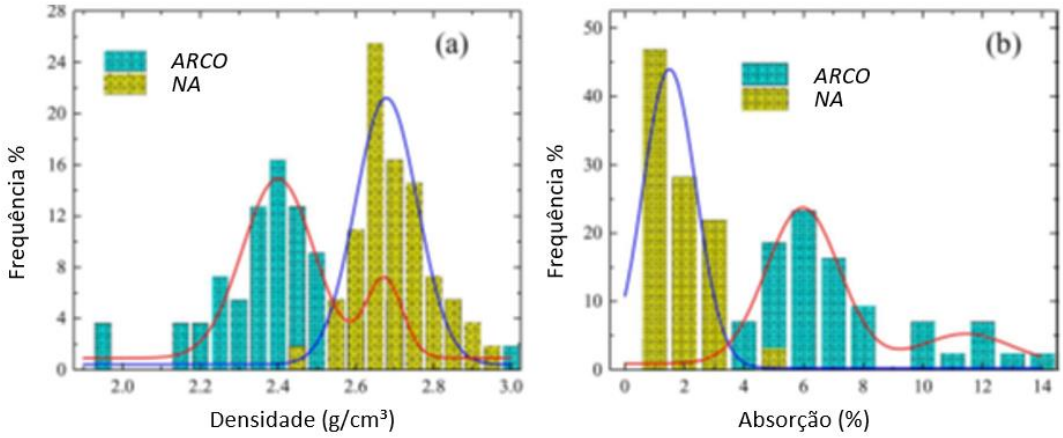


Figura 9 –Frequência de distribuição, medida partícula à partícula de: (a) densidade em *ARCO* e *AN* (b) Absorção de água em *ARCO* e *AN*. (Fonte: Adaptado de [54])

A relacão entre a absorção de água e a densidade dos agregados pode ter uma aproximação linear - Figura 10(a), ou exponencial. Estas propriedades estão ligadas com as propriedades mecânicas dos agregados. A Figura 10(b) apresenta a relação entre a absorção de água do agregado graúdo e a resistência à tração, partícula à partícula. Quanto maio a absorção de água, menor a resistência da partícula, devido à maior porosidade do material [5].

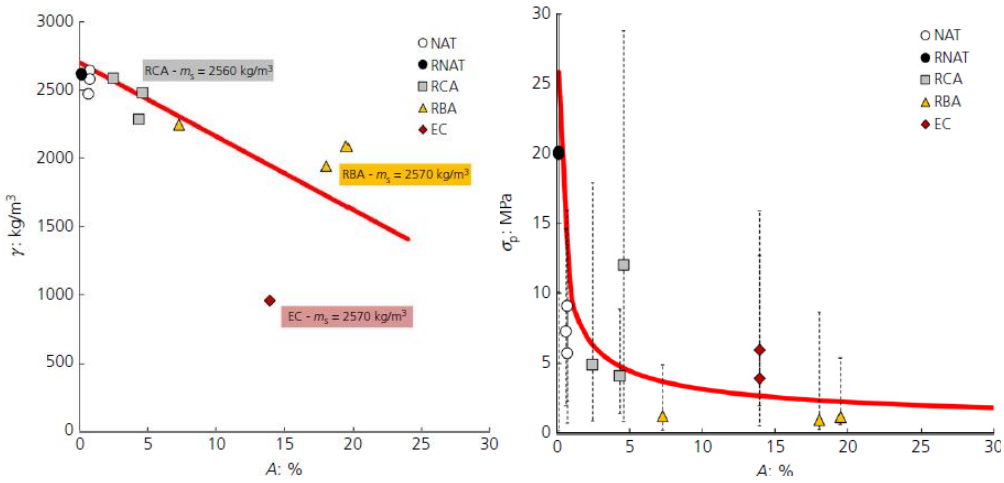


Figura 10 - (a) Relação entre densidade (γ) e a absorção de água (A%); (b) Relação entre a absorção de água (A%) e resistência da partícula (σ_p) (Fonte: [5])

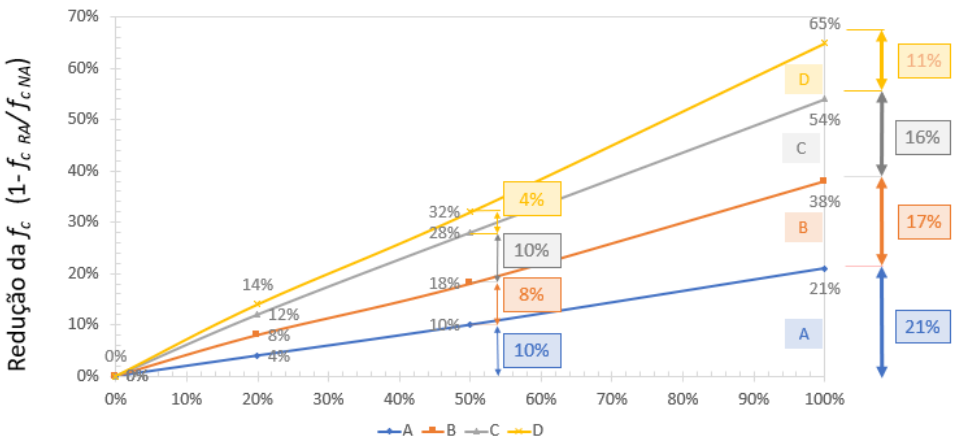
2.2.2. Efeito dos agregados reciclados de concreto nos concretos

Muitas pesquisas internacionais sobre os efeitos dos agregados reciclados nas propriedades mecânicas do concreto foram realizadas entre 1980-2000 [55]–[59]. Alguns pesquisadores procuraram sistematizar esses dados, tentando prever os efeitos dos *RA* nas

principais propriedades mecânicas do concreto (resistência à compressão, módulo elástico e resistência à tração), utilizando teores de substituição *NA* por *RA*.

Embora a literatura científica internacional recomende teores parciais de substituição (*R*) de *NA* por *RA*, especialmente para seu uso em concretos com função estrutural (acima de 20 MPa); essas proporções são muito limitadas, não excedendo, em muitos casos, 25% da massa, com restrições incluindo os tipos de condições de exposição ambiental [2], [60]–[65], e composição dos agregados (comumente, apenas teores de cerâmica abaixo de 10% são permitidos).

Dada a variabilidade da densidade dos *RA* (γ_{RA}) e da absorção de água (*W*) dos agregados reciclados de concreto (*ARCO*), a previsão das propriedades de concreto, só é possível se classificar os *ARCO* em quatro categorias [13], [27], [66] (Figura 11 , adaptada de Silva *et al*. [14]), uma vez que absorção de água dos *ARCO* (W_{RA}) pode variar de 2% a 15, dependendo da origem e beneficiamento [8], [13], [27], [60], [67]–[72]. A Figura 11 apresenta a redução média relativa da resistência à compressão, usando diferentes classes de agregados, em relação ao concreto de referência contendo apenas *NA*, sempre para a mesma relação efetiva de água de cimento (W/C_{ef}), ou seja, o efeito da porosidade do agregado reciclado e a relação água/cimento efetiva, em conjunto, para diferentes faixas de resistência não é apresentado.



Classe de agregado	A	B	C	D
Densidade mínima (seca ao forno) (kg/m³)	2600 - 2400	2300 - 2100	2000-1800	Sem limite
Máxima absorção de água (%)	3,5 - 1,5	8,5 - 5	10,5 - 15	Sem limite

Figura 11 – Influência dos agregados reciclados no concreto com a mesma relação W/C_{ef}, f_{CNA} significa resistência à compressão do concreto referência, incluindo apenas *NA's*, e $f_{C\,RA}$ significa resistência média à compressão incluindo diferentes proporções de *RA's*. (Fonte: Adaptado [13])

Essa classificação tem menor relevância apenas em teores de substituição abaixo de 20%, como mostra a Figura 11, em uma faixa que tem pouco impacto relativo (%) sobre a resistência do concreto, justificando limitações de normas internacionais. Quando o teor de substituição excede 50% da massa, é essencial subcategorizar os *RA's* para prever, com menor variação, as propriedades do concreto.

Considerando o impacto relativo (% de redução) e o impacto absoluto (em MPa), concretos não estruturais, com altos teores de substituição são os mais tecnicamente e economicamente interessantes para o uso de reciclados, pois têm o maior potencial de aplicação de *RA*, devido a um menor efeito absoluto na redução nas propriedades mecânicas do concreto [15], [73].

A aplicação do modelo de previsão de comportamento mecânico depende, portanto, da subcategorização, a partir dos ensaios de qualificação dos agregados. Não há, até o momento, método de previsão das propriedades do concreto que dispense essa subcategorização e o uso de teores de substituição, capazes de unificar, de forma mais prática, a influência dos agregados reciclados e da água/cimento.

A Figura 12 abaixo ilustra a redução do módulo de elasticidade do concreto em função do teor de substituição do agregado.

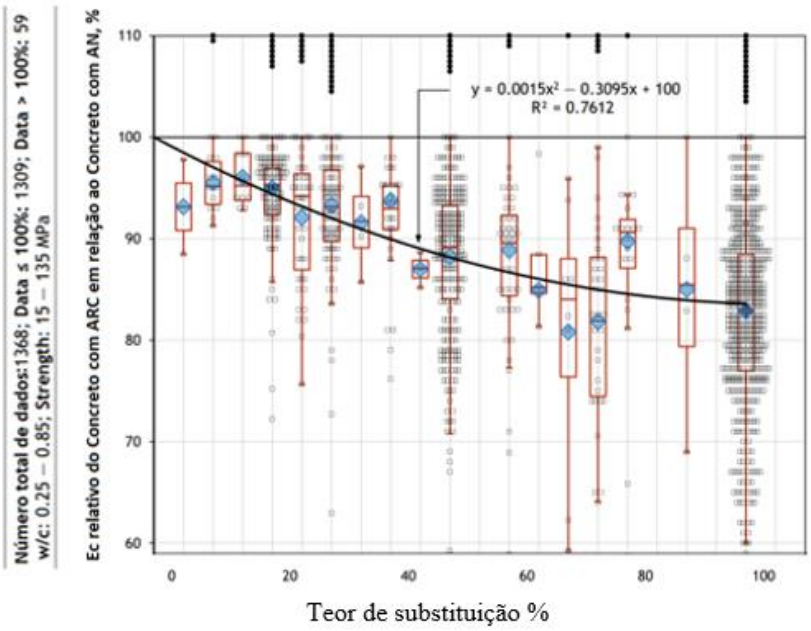


Figura 12 – Módulo de elasticidade estático (*Ec*) relativo do concreto em função do teor de substituição por *ARCO*, em relação ao concreto de mesma característica com *NA*. (Fonte: Adaptado de [74])

Apesar de haver uma linha de tendência da redução do módulo de elasticidade traçada a partir dos pontos médios de casos observados, existe uma grande dispersão dos dados para um mesmo teor de substituição e mesma relação água cimento, que ocorre devido à diferenças na qualidade dos agregados utilizados. Assim, não basta somente tentar prever o comportamento do módulo de elasticidade apenas por esses dois critérios, mas também se faz necessário avaliar a qualidade do agregado em conjunto com a pasta.

Além de afetar as propriedades do estado endurecido, ao substituir os *NA* por *ARCO*, o abatimento também afetado pela absorção de água do agregado reciclado (W_{RA}), pois a água que confere o abatimento do concreto é absorvida pelo agregado reciclado, e assim, há a redução da relação água cimento efetiva, e portanto da fluidez da pasta e consequentemente do abatimento do concreto [10]–[12], [52], [75].

Assim, é recomendado pré-saturar toda a massa de agregados, entre 70 e 90% do seu valor de W_{RA} medida em 24 horas[2], [9], [52], [76], [77], para evitar esse efeito. Outra maneira não muito diferente de se contornar esse problema é adicionar esta quantidade de água calculada para pré-saturação à quantidade total de água usada na mistura (estratégia de compensação) [2], [78]. Apesar de haver um aumento na quantidade total de água, é usual descontar da *W/C* a água calculada neste procedimento de saturação, calculando assim a relação água cimento efetiva (W/C_{ef}) [9], [11], [52], [76]–[78], para não se construir uma visão errônea de que os concretos com agregados reciclados possuem resistência superior aos concretos com agregados naturais, quando se analisa a relação água total/cimento das formulações.

Quando não observados os aspectos relativos à absorção de água do agregado, em função do seu teor de substituição e a sua condição de saturação, pode-se identificar significativas alterações no abatimento (*slump*) do concreto.

Diversos autores conduziram estudos para reunir as principais variáveis que alteram o estado fresco de concretos com agregados reciclados [9], [11], [76], [77], [79]. A Figura 13 ilustra os efeitos relativos no *Slump* do teor de substituição, para agregados miúdos (*RFA*) e para agregados graúdos (*RCA*), e o grau de pré saturação (ou grau de compensação).

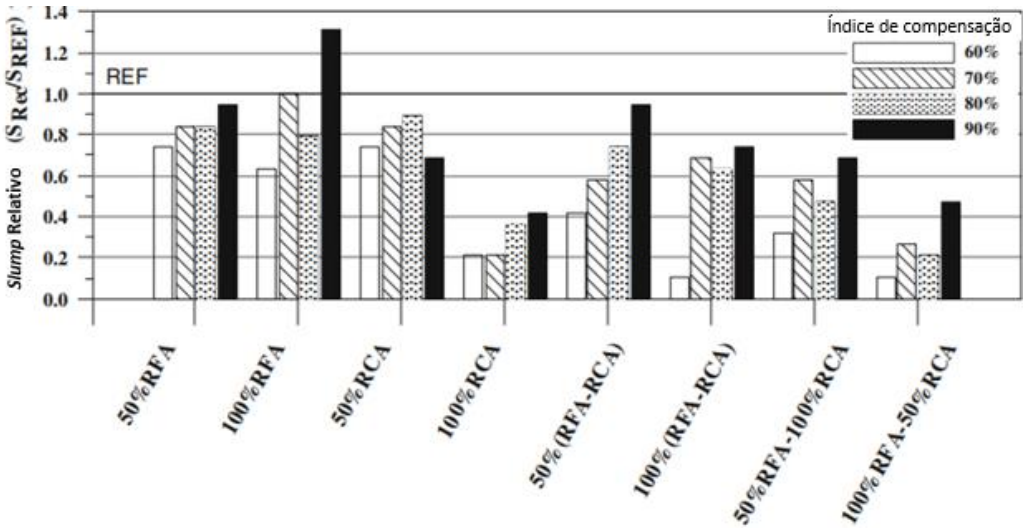


Figura 13 – Resultados de *Slump* relativos em função do teor de substituição e pré-saturação (Fonte: [9]) S_{REC}(Slump do concreto reciclado); S_{REF} (Slump do concreto referência).

Outros estudos ilustram como diferentes tipos de agregados, ainda que em condições saturadas, podem afetar o *Slump* do concreto, em função do teor de substituição, como ilustra a Figura 14, onde RA30, RA50, RA100 são traços com teores de substituição de 30%, 50% e 100%, respectivamente, e as identificações 1, 2 e 3 são referente aos tipos de agregados utilizados, onde 1, 3 são traços com agregados graúdos reciclados com absorção de água 1,93% e 6,24% respectivamente, e 2 são traços com agregados miúdos reciclados com 5,37% de absorção.

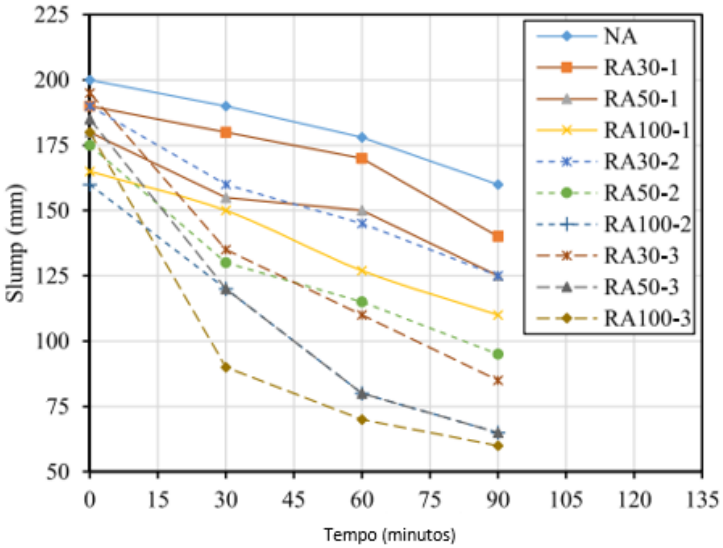


Figura 14 – Perda de *Slump* em função do tempo, variando teores de substituição e tipos de agregados. (Fonte: [70], apud [71]).

O comportamento do concreto no estado fresco com agregados reciclados (*RA*) é pouco entendido, e ainda não há um modelo de previsão de comportamento que contemple as diversas variáveis intervenientes. Assim, novos modelos de previsão de comportamento precisam ser avaliados.

Além de usualmente se fazer a pré-saturação do agregado reciclado, ainda há uma tendência em utilizar um maior consumo de pasta para contornar os efeito no estado fresco, assim como no estado endurecido, o que eleva o custo do material, além de gerar maior emissão de CO_2, o que não é interessante nem do ponto de vista econômico, e nem ambiental. Estratégias para otimizar a eficiência no uso do cimento em concretos com agregados reciclados precisam ser consideradas.

2.3. Eficiência no uso do cimento em concretos

Muitas pesquisas estudam os impactos ambientais associados a concretos com foco nas características do cimento e sua produção (redução do teor de clínquer com adições, eficiência de fornos entre outros). Apenas essas soluções não são suficientes para reduzir os impactos ambientais associados aos materiais cimentícios, uma vez que a quantidade de cimento utilizado no concreto tem maior relevância [18].

A redução do teor de clínquer, quando não observada a finura das partículas, pode impactar na quantidade de partículas hidratadas aos longo do tempo, e consequentemente pode estar acompanhada de uma redução na resistência à compressão do cimento aos 28 dias, afetando o seu desempenho mecânico e ambiental [20]. Assim, outras estratégias precisam também ser avaliadas.

A análise da eficiência no uso do cimento de concretos pode ser feita pelo índice intensidade de ligante (bi) [18], [19], determinando a razão entre o consumo de ligante (clínquer do cimento somado à materiais cimenticios suplementares reativos como escórias e pozolanas – fíllers carbonáticos são inertes e portanto desconsiderados), e a resistência do concreto [19], [80] (Figura 15). Quanto menos ligante for consumido para fornecer 1 MPa de resistência, mais eficiente será o uso do cimento no concreto. Damineli et al. [19] apresenta um grande benchmarking da literatura sobre bi, comparando diferentes faixas de consumo de cimento. John [81] propõe dividir as faixas de bi em 5 zonas (de excelente à muito ruim). A Figura 15 propõe uma adaptação dos gráficos apresentados em [19], [81], unindo e simplificando as zonas

originais propostas, unindo as zonas muito ruim e ruim, e a excelente e muito boa, estabelecendo apenas três novas zonas.

Para concretos estruturais com classe de resistência de 30MPa, é possível encontrar na literatura concretos com *bi* acima de 15 kg m^{-3} MPa^{-1}, e outros próximos a 7 kg m^{-3} MPa^{-1}. Concretos que fazem uso de aditivos dispersantes, ou estudos de empacotamento, tendem a diminuir a necessidade de água para atingir a trabalhabilidade desejada, portanto, apresentam menor porosidade, melhorando sua resistência e sua eficiência no uso do cimento [18], [19], [23], [34]. Para concretos com *RA* é comum haver um aumento do Q_C, e, portanto, a tendência é a elevação do *bi*.

Muitos normas definem um Q_C mínimo como 250kg/m³ devido à durabilidade das estruturas relacionadas à corrosão do aço. Podem ser feitas aplicações de concreto com Q_C abaixo de 250kg/m³ sem aço (Como Barragens e Contenções de Solo, Pisos Simples, Concreto de Enchimento etc.), ou se os critérios de durabilidade forem garantidos. Vale lembrar que é um volume mínimo de pasta: 1) é necessário para garantir a continuidade espacial entre os agregados; 2) depende do método de compactação; 3) depende da trabalhabilidade desejada (por exemplo, concretos autoadensáveis podem precisar de mais pasta do que concretos de consistência seca). Esses fatores, entre outros, poderiam explicar a enorme gama de pontos próximos da faixa de 20 MPa de resistência à compressão concreto, tornando difícil a definição de aceitabilidade para estas faixas de resistência, criando assim, uma zona incerta.

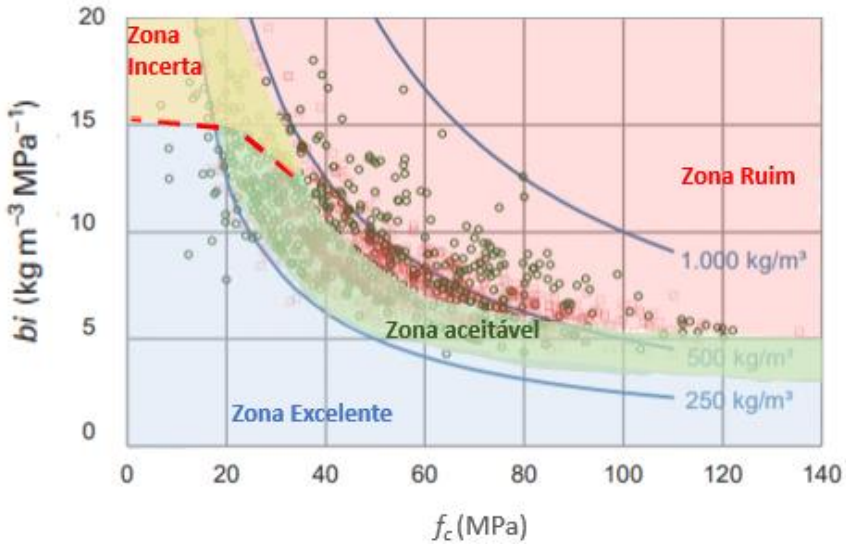


Figura 15 – Índice intensidade de ligante (*bi*) vs Resistência à compressão aos 28 dias (f_c) (Fonte: Adaptado de [19] e [81]).

Alguns trabalhos encontrados na literatura [19], [23], [34] destacam algumas estratégias que podem ser adotadas na formulação para otimização do índice intensidade de ligante. Dentre as principais estratégias citadas, temos:

1. O uso eficiente de aditivos dispersantes.

2. Estudos de empacotamento de partículas dos agregados.

3. Adição de materiais cimenticios suplementares (ex: fíler carbonático).

A adoção de aditivos dispersantes otimiza as propriedades reológicas da pasta, uma vez que as partículas de cimento, quando não dispersas com aditivos, devido à sua alta área superficial, geram grande força de atração e tendem a aglomerar, modificando a granulometria das partículas, aumentando a viscosidade, e reduzindo a mobilidade das partículas. Também geram vazios entre as partículas aglomeradas, reduzem a superfície disponível para hidratação, e aumentam o consumo de água necessária para abatimento [23].

Esses aspectos impactam nas propriedades do estado fresco e no estado endurecido. Apesar de inúmeros benefícios, o uso de aditivos aumenta o custo de produção dos concretos, sendo necessário um uso racional e eficiente, devendo-se adotar um teor que obtenha-se a melhor dispersão com o menor uso de aditivos. Para isso, alguns autores sugerem métodos de avaliação do teor ótimo de aditivo, para o cimento em uso, como por exemplo realizar ensaios com o Mini *slump*, ou Funil de Marsh [23], [84]. É certo que haverá aumento de custo do concreto, mas com benefícios ambientais.

A teoria de empacotamento de partículas tem como objetivo reduzir ao máximo os vazios entre partículas, usando diferentes tamanhos de partículas, onde a menor preenche o vazio entre as maiores [34], como ilustra a Figura 16. Diversas teorias de empacotamento foram desenvolvidas ao longo do tempo, como as de Funk e Dinger (1994) [46], Westman e Hugil (1930) [85]; Larrard (1999) [86].

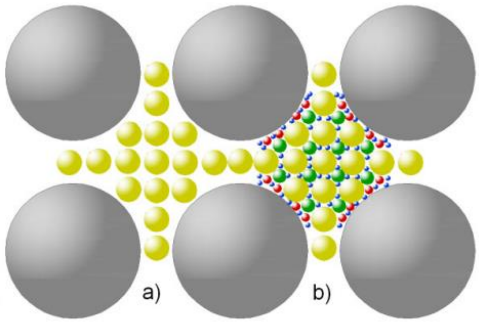


Figura 16 –(a) Distribuição bimodal, com mais e maiores vazios; (b) distribuição polimodal, com menos e menores vazios. (Fonte: [87])

Quando o método de dosagem não observa o empacotamento dos agregados e a dispersão das partículas, concretos convencionais, com agregados naturais, podem ter desempenho inferior, inclusive quando comparados com concretos com agregados reciclados de baixa qualidade, que fizeram uso da dispersão e de estudos de empacotamento [23].

Damineli e Pablos (2021) [23] apresentam essa comparação em seu programa experimental, comparando o método de dosagem usual no Brasil [16] sem dispersão e sem estudo de empacotamento, com concretos com agregados reciclados com 19% de absorção de água, com alta presença de cerâmica vermelha, substituindo agregados miúdos e graúdos, mas realizando estudo de empacotamento proposto por Funk e Dinger (1994) [46]. Mostrou-se que, adotando as técnicas corretas, é possível compensar a redução das propriedades mecânicas de concretos com *RA* sem um aumento no consumo de cimento, reduzindo os impactos ambientais associados a emissão de CO_2, e ampliando os campos de aplicação.

A redução do volume de pasta pode ser compensada, até certo limite, pela adoção de fíler carbonático, sendo também limitada por questões reológicas [34]. Estes materiais podem ser utilizados para subsitituição parcial da quantidade de cimento (quando de mesma granulometria), ou para aprimorar o empacotamento das partículas de cimento (quando mais finos que o próprio cimento). Como este material não é calcinado, seu uso contribui para redução de gastos energéticos e redução das emissões de CO_2 devido à calcinação do calcário na produção do cimento, que converte 44% da massa de $CaCO_3$ em CO_2 [81].

Todas estas avaliações são ainda mais importantes quando adota-se o uso de agregados reciclados, dada a redução das propriedades mecânicas, quando comparado com concretos somente com *NA*, principalmente onde é comum corrigir essa redução com um maior *Qc*.

Para melhorar a eficiência no uso do cimento dos concretos com *ARCO*, e delimitar faixas aceitáveis do uso de *ARCO* e Q_C, além da adoção de técnicas de otimização como as citadas acima, é fundamental estabelecer faixas de resistência à compressão (f_C), e de W/C_{ef}, compatíveis com a absorção de água dos agregados utilizados. Uma ótima opção é estabelecer a ponderação direta entre a massa e absorção de água dos agregados naturais, e dos reciclados, criando o conceito de absorção de água ponderada (W_W), com base nos seus respectivos teores de substituição admitindo estes como agregados totais usados nas misturas.

Definir limites para o uso de agregados reciclados, baseado em suas propriedades, observando os impactos ambientais através dos índice de intensidade de ligante é fundamental para controlar as emissões de CO_2 com um uso eficiente do cimento.

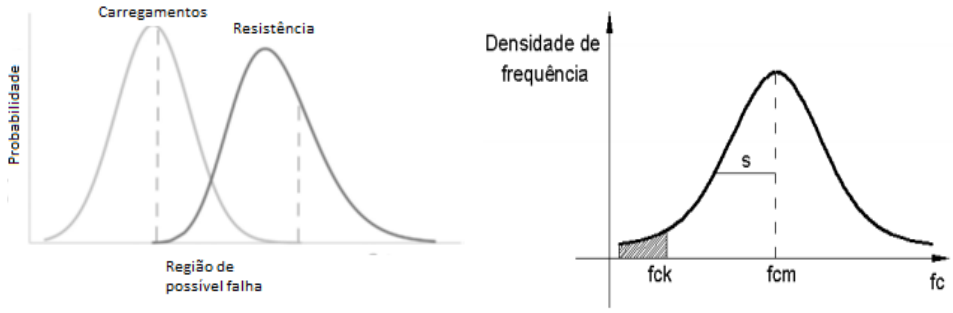
2.4. Variabilidade das propriedades de concretos

O concreto é um material multifásico, podendo ocorrer variações nas propriedades finais dentro dos lotes de materiais. Essas variações podem ser causadas por interferências como: variabilidade dos materiais, condições do ambiente, método de mistura, adensamento, cura, entre outros, sendo a de principal controle a variação na resistência à compressão [31].

No dimensionamento de estruturas, para evitar que a resistência do elemento seja menor do que a tensão de solicitação, são incluídos coeficientes de segurança, por exemplo, diminuindo a resistência característica do concreto (f_{ck}) por 1,4 [30]. A própria resistência característica do concreto (f_{ck}) é calculada com redução da resistência média (f_{cm}), aplicando um fator probabilístico, por meio de distribuição normal, de forma a garantir que 95% dos valores obtidos sejam superiores ao adotado por projeto [29]. Da resistência média do concreto deve-se subtrair o desvio padrão (*SD*) do concreto multiplicado por uma constante estatística (1,65), conforme a Equação 1.1.

$$f_{ck} = f_{cm} - 1{,}65 \times SD \qquad \text{(Eq. 2.1)}$$

A Figura 17 abaixo ilustra como estas ponderações servem para fins de segurança nas estruturas.



(a) (b)

Figura 17 – (a) Distribuição da resistência do concreto X carregamentos (Fonte: Adaptado de [31]) (b) Distribuição da resistência do concreto à compressão (Fonte: [88])

O desvio padrão (*SD*) à ser adotado no cálculo da resistência característica pode ser estimado por tabela fornecida em [29] (Tabela 2), ou, para se determinar um desvio padrão conhecido, deve-se elaborar um concreto com os mesmos materiais, equipamentos similares e condições equivalentes, sendo que o valor numérico confiável do desvio-padrão do concreto deve ser fixado com no mínimo 20 resultados consecutivos obtidos no intervalo de 30 dias, em período imediatamente anterior. Independente das condições, deve-se limitar o desvio padrão mínimo a ser considerado como 2 MPa [29].

Tabela 2 - Desvio-Padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto (Fonte: [29])

Condição de preparo do concreto	**Desvio Padrão (MPa)**
A	4,0
B	5,5
C	7,0

> "a) condição A (aplicável à todas as classes de concreto): o cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados;
>
> b) condição B (pode ser aplicada às classes C10 a C20): o cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em massa combinada com volume, de acordo com o exposto em 5.4;
>
> c) condição C (pode ser aplicada apenas aos concretos de classe C10 e C15): o cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume, a água de amassamento é medida em volume e a sua quantidade é corrigida em função da estimativa da umidade

dos agregados da determinação da consistência do concreto, conforme disposto na ABNT NBR NM 67 ou outro método normalizado" NBR 12655 - (ABNT,2015)[29]

Além das variabilidades acima descritas, concretos com *ARCO*, ainda contam com a heterogeneidade intrínseca no agregado, a presença de duas zonas de transição, a variação da argamassa aderida, teores de substituições e questões relacionadas a aleatoriedade de posição das partículas de agregados reciclados em diferentes posições na peça de concreto. A maior parte dos estudos não controla a heterogeneidade ou não há cuidados com os procedimentos de amostragem das partículas dos agregados reciclados, fazendo misturas com partículas com diferentes propriedades no mesmo concreto, o efeito disso na variação da resistência do concreto é pouco conhecido [31], [67].

Diversos estudos tem sido feitos para avaliar a confiabilidade ao projetar estruturas de concreto com *ARCO*, tanto, em estados limites último como os de serviço, mas ainda são escassos e com pouca representatividade. Pacheco e Brito (2019) [31] resumem estudos experimentais, que mostram como a resistência à compressão pode variar para um mesmo concreto com *ARCO*, em diferentes faixas de resistência e teores de substituição (Figura 18).

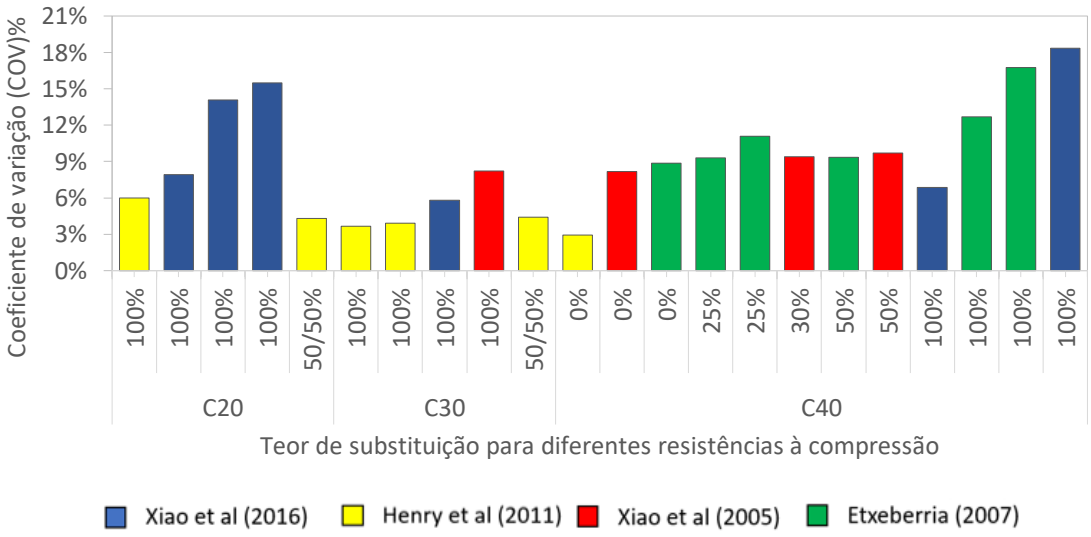


Figura 18 - Coeficiente de variação (COV %) da resistência à compressão vs classe de resistência vs teor de substituição. (Fonte: [31])

Xiao *et al.*[67] verificou a variabilidade da resistência à tração, em concretos com com 100% de teor de substituição, encotnrando COV's muito maiores (entre 15 e 30% para as amostras produzidas) [31].

Os resultados compilados na literatura apresentam alta variação, sendo necessário mais estudos para entender a previsibilidade e a variabilidade do comportamento de concretos com *ARCO*.

3. CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO: METANÁLISE E EFICIÊNCIA NO USO DO CIMENTO

O capítulo anterior discute brevemente como diversos aspectos relacionados à dosagem e características dos materiais utilizados impactam na eficiência no uso do cimento em concretos com agregados reciclados, como podemos medi-los e quais os pontos à serem observados.

No Brasil, devido à um método de dosagem peculiar, um aumento nos requisitos de resistência e trabalhabilidade pode levar à um aumento significativo no consumo de cimento, ainda que em concretos convencionais, devido a não obrigatoriedade da presença de aditivos dispersantes ou estudos de empacotamento. O uso de agregados reciclados reduz as propriedaes mecânicas e afeta a trabalhabilidade do concreto, também requerendo um maior consumo de cimento para equiparar à um concreto referencia. Esses aspectos impactam na pegada de carbono relacionada à produção dos concretos.

O Brasil possui diversos trabalhos acadêmicos sobre o tema que nunca foram sistematizados e analisados. Os modelos de previsão de comportamento mecânico encontrados na literatura, usando teor de substituição, apresentam grande variabilidade. O comportamento do concreto no estado fresco e a eficiência no uso do cimento em concetos com agregados reciclados ainda é pouco entendido e discutido.

3.1. Objetivo

Através revisão sistemática da literatura brasileira (169 composições de concretos produzidos de 1999 a 2020) sobre concretos produzidos com agregado graúdos reciclados de concreto (*ARCO*), este capítulo tem como objetivos:

a) Avaliar a eficiência do uso de cimento de concretos reciclados, utilizando o índice intensidade de ligante. Estabelecendo limites para a formulação de concreto reciclado em termos de quantidade de cimento, resistência etc.

(b) Usar o conteúdo efetivo de água e dispersante para descrever parâmetros multi-escala (distância de separação entre partículas – *IPS* – e espessura máxima da pasta – *MPT*) e sua relação com a trabalhabilidade do concreto;

c) Utilizar a absorção ponderada de água dos agregados (substituindo o teor de substituição de *AN* por *ARCO*) e da relação água/cimento efetiva para prever as propriedades mecânicas do concreto reciclado (resistência à compressão, módulo elástico).

3.2. Metodologia

A pesquisa foi realizada através de revisão sistemática da literatura brasileira publicada entre 1999 e 2020 sobre concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto (*ARCO*). Realizou-se a coleta de dissertações, teses, ou seus artigos resultantes, em bancos de dados de repositórios de universidades federais e estaduais brasileiras, buscando pelas palavras-chave: "concreto com agregado reciclado", "agregado reciclado de concreto", e "concretos com *RCD*".

Entre os estudos encontrados, os critérios para inclusão na análise foram: (1) traços de concreto que avaliaram a substituição de *NA* (somente graúdos) por *ARCO*; (2) a avaliação da resistência a compressão do concreto f_c (15-70 MPa); e (3) apresentar a caracterização das propriedades físicas dos agregados graúdos – minimamente densidade ou absorção de água. Os concretos que utilizaram agregado reciclado miúdo não foram contemplados nesta pesquisa por dados limitados e falta de dados confiávis sobre a medida da absorção de água.

Um total de 18 trabalhos que atendiam aos critérios de seleção foram selecionados [9], [15], [89]–[103], totalizando 169 traços distintos de concreto, que avaliaram a substituição de *NA* por *ARCO* graúdo. Os dados brasileiros foram parcialmente comparados com dados internacionais de artigos publicados (com menos informações que teses e dissertações) coletados e publicados pelo próprio grupo de pesquisa [104]. Os dados internacionais coletados compilam 27 trabalhos [11], [76], [105]–[129] publicados em revistas internacionais, e conferências, no período 1996 a 2018, somando 212 traços internacionais de *ARCO*, totalizando 381 traços na base de dados analisada. Parte dos dados internacionais usados neste artigo (78 traços de 7 estudos) estão inclusos nas análises feitas por Silva *et al*.[13] que inclue 787 traços de 65 publicações, entretanto, foram usados outros modelos de previsão de comportamento para concretos com agregados reciclados.

Os dados coletados foram descritos no Anexo A (Tabela A.1). Um arquivo de dados suplementar em *Excel* foi fornecido com a dissertação. Um resumo foi fornecido para construir uma visão geral dos estudos. A distribuição dos principais dados está disponível no apêndice A (quadro A.2.) Para alguns estudos foram identificados dados faltantes de propriedades dos

agregados [15], [90], [93], [96], [99], [130]. Assim, foi adotada a média dos valores de outros estudos, em função da origem do material (Tabela 3). Em um único caso, adotou-se a média geral de valores obtida no estudo (para origem não informada). 51 dados foram coletados (Apêndice A).

A densidade de agregados reciclados pode ser medida incluindo ou não poros internos, apresentando diferenças significativas. A densidade aparente seca do agregado (ASTM C 127 [126]) que inclui os poros internos foi utilizada para o cálculo do volume de agregados no concreto. Quando o estudo informou apenas a absorção de água e a densidade real, a densidade aparente seca foi estimada pela inter-relação apresentada no apêndice da ASTM C 127.

Tabela 3 – Dados utilizados para completar informações faltantes.

Agregado	Origem	Absorção	Densidade
Areia	Natural, quartzo	0,74%	2,58 g/cm^3
Graúdo Natural	Basalto	0,22%	2,80 g/cm^3
	Calcário	0,38%[132]–[134]	Dados completos*
	Granito	0,7%	2,6 g/cm^3
	Não informado	0,7%	2,72 g/cm^3

*Dados completos significa que todos os dados se encontraram disponíveis e não foi necessário adotar nenhum valor de fora do estudo.

A maioria dos estudos brasileiros não informou a quantidade de finos (<0,075mm) dos agregados reciclados. Apenas cinco estudos realizaram este teste, com resultados variando de 0,5% a 2%. Portanto, estas partículas não foram levadas em conta nas análises deste trabalho.

Neste trabalho, a análise seguiu as seguintes etapas: (i) coleta de dados; (ii) cálculo dos parâmetros de formulação e indicadores de eficiência; e (iii) análise de correlações entre os parâmetros e indicadores. Todos os dados coletados, abreviações, siglas e equações utilizadas estão detalhadas nas Tabela A.1 e Tabela B.1 (Apêndices A e B)

3.2.1. Cálculo de parâmetros (índices)

Onze índices foram calculados com as respectivas fórmulas apresentadas no Apêndice B. Os principais estão descritos na Figura 19.

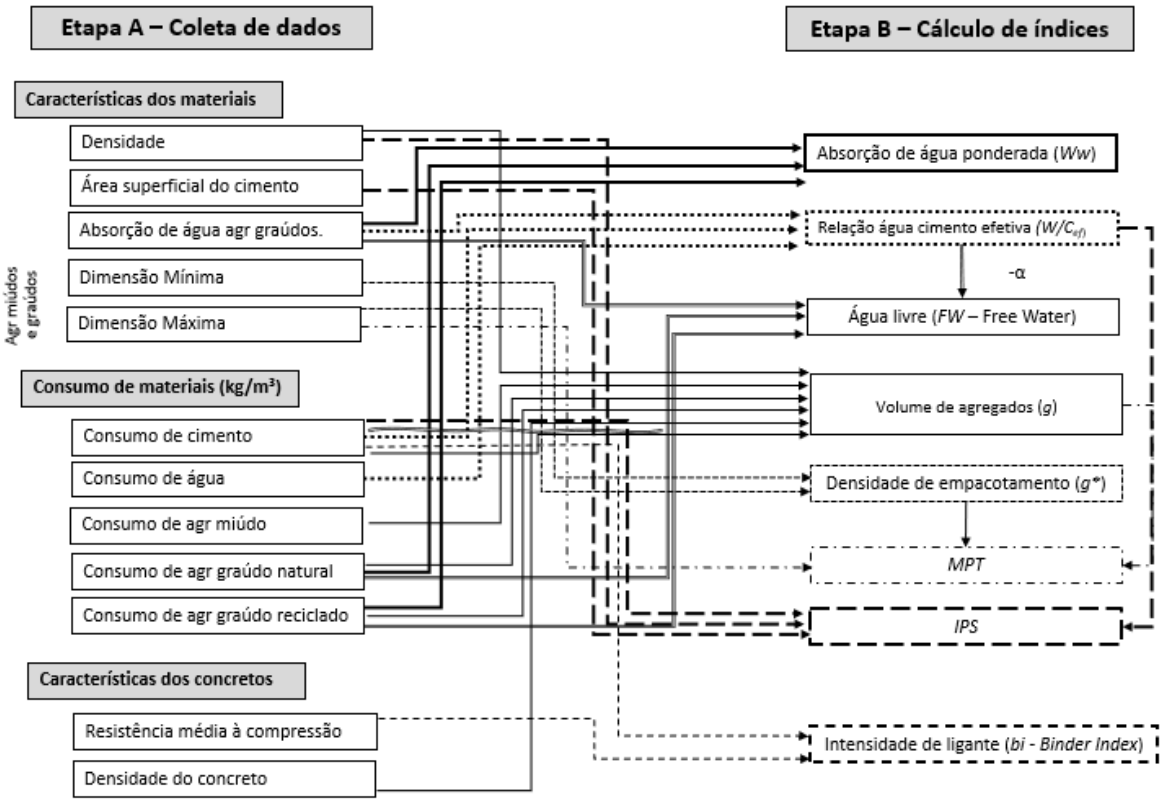


Figura 19 – Fluxograma e cálculo de parâmetros e índices (Fonte: autor)

A relação água cimento efetiva (W/C_{ef}) foi calculada pela Eq. 3.1

$$W/C_{ef} = \frac{Qw - k \times (Q_{NA} \times W_{NA} + Q_{RA} \times W_{RA})}{Q_c} \qquad \text{Eq.3.1}$$

Onde Q_W, Q_{NA}, Q_{RA}, Q_C, são os consumos em kg/m³ usados no concreto, de água, agregado graúdo natural, agregado graúdo reciclado de concreto, e cimento respectivamente, e W_{NA} e W_{RA} são as absorções de água (%) dos agregados graúdos naturais e graúdos reciclados, respectivamente. Concretos com agregados miúdos reciclados não foram coletados, e a absorção de água dos agregados miúdos naturais não foi incluída por pouca quantidade de dados disponíveis e falta de precisão no método de determinação da absorção de água dos finos. O parâmetro *k* estabelece a relação da absorção de água a 24h do agregado que absorve água da pasta nos primeiros minutos (Ver Eq. 3.2). Este parâmetro afeta o volume de pasta e a concentração de sólidos na pasta.

Um estudo de sensibilidade foi conduzido, produzindo quantidades significativas de gráficos, variando o valor de *k* entre 0,5; 0,6; 0,7 e 0,8. Foi encontrado que o valor de *k* de 0,7 teve o melhor arranjo na maior parte das correlações, e portanto, este valor foi usado em todas as análises presentes neste artigo. Na Eq. 3.1, quando os agregados foram inseridos em condição seca no processo de mistura, 0,7 da água da absorção de água ponderada (*Ww*) (Eq. 3.2.) foi descontada da pasta. Quando os agregados foram inseridos na condição saturado superfície seca, foi considerado a migração de água (k = -0,3) dos agregados para a pasta [76].

A absorção de água ponderada dos agregados graúdos (W_W) foi calculada pela Eq. 3.2.

$$W_w = \frac{(Q_{NA} \times W_{NA} + Q_{RA} \times W_{RA})}{Q_{NA} + Q_{RA}} \qquad \text{Eq. 3.2}$$

Foi calculado um índice denominado Água livre (*FW* – Free Water), que determina o a quantidade de água presente no concreto por m^3, que não faz parte da reação química do cimento, que inlcui a água que está absorvida pelos agregados; e que, por fim, representa a porosidade total do concreto. Este índice foi calculado pela Eq.3.3 O índice α é usado para representar a quantidade de água que reaje químicamente com o cimento, típicamente a 28 dias. Foi adotado um valor de 0,23 (máximo 0,27 com 90% do grau de hidratação do cimento para cimentos com alto teor de clínquer) [135] e 0,18 para cimentos com materiais cimenticios suplementares [47], [48]. Esse parâmetro é inspirado no uso da fração de água combinada (*combined water fraction – cwf)*, conceito proposto por John *et al.* [136].

$$FW = \frac{(W/C_{ef} - \alpha) \times Q_C + W_w \times (Q_{NA} + Q_{RA})}{1000} \qquad \text{Eq. 3.3}$$

O *MPT*, medido em mm, é determinado de maneira simplificada por Larrard e Belloc (1997) [28] (Eq. 3.4.)

$$MPT = D_{max} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{1 - 0{,}45 \cdot \left(\frac{D_{min}}{D_{max}}\right)^{0{,}19}}{g}} - 1 \right) \qquad \text{Eq. 3.4}$$

Em que D_{max} é o tamanho máximo da partícula de agregado graúdo em mm; D_{min} é o diâmetro mínimo do agregado miúdo em mm; e g é o volume total de agregados do concreto em m³/m³. O volume de agregados pode ser calculado usando as quantidades de agregados

(kg/m³), dividindo pelas suas respectivas densidades (kg/m³) (método A) ou subtraindo o volume de pasta de 1m³ (método B). Neste caso específico, para reduzir a possibilidade de erros, o índice *g* foi calculado pelo método B.

O IPS, (aplicada a fração fina, <0,1mm) proposto em [34], [42], [43], [46], foi calculado pela Eq. 3.5.

$$IPS = \frac{2}{VSA} * \left[\frac{1}{Vs} - \left(\frac{1}{1-P_{of}}\right)\right] \qquad \text{Eq. 3.5}$$

Onde *VSA* é a área superficial volumétrica dos finos (m²/cm³); calculada multiplicando a área específica (*SS*) (m²/g) pela densidade do cimento (g/cm³); *VS* a fração volumétrica dos sólidos na pasta (%) e P_{of} a porosidade de empacotamento do sistema (%). O *IPS* resulta em μm.

Os resultados da *SS*, quando informados, foram sempre fornecidos pelo produtor. Metade dos testes utilizou o teste do Método Blaine [137] e a outra metade não especificou o método, que provavelmente foram obtidos a partir do mesmo método, uma vez que é o padronizado na indústria cimenteira. Quando a *SS* não foi inforrmada, foi adotado o mesmo valor apontado em outro estudo que usou o mesmo tipo de cimento. Somente alguns estudos apresentaram a granulometria do cimento, e nenhum estudo elaborou ensaios para determinar o empacotamento da pasta, assim, a influência do empacotamento da pasta não pôde ser avaliada. Portanto, foi adotado um valor único para a porosidade residual do esqueleto granular, fruto do empacotamento (P_{of}) de 40% [34]. Uma análise destes dados em maior quantidade e precisão é recomendada para pesquisas futuras.

O índice intensidade de ligante (*bi*) foi calculado pela Eq. 3.6.

$$b_i = \frac{Q_c \times RF}{f_c} \qquad \text{Eq. 3.6}$$

Em que *RF* é o teor de Fração de ligante (%) no cimento (ex: Fillers carbonáticos são desconsiderados). Esses valores foram obtidos buscando a composição do cimento em normas correlacionadas (principalmente em [132], [133], [134]); f_c é a resistência média à compressão do concreto; a unidade de medida do *bi* é em $kg.m^{-3}.MPa^{-1}$.

Nos dados brasileiros, todos os corpos de prova de concreto eram cilíndricos (10x20cm). Alguns dados Internacionais eram cilíndricos e outra parte eram corpos de prova cúbicos. A resistência à compressão do cubo foi convertida, visando comparação com corpos de prova cilíndricos, multiplicando a resistência à compressão por 0,8 [140].

3.2.2. Correlações

Os índices foram usados para prever efeitos nas propriedades do estado fresco e endurecido dos diferentes traços de concreto, bem como com os indicadores de eficiência no uso do cimento destes concretos.

Nas análises de concretos no estado fresco, foram avaliados somente estudos cujo *slump* do concreto variaram entre 50 e 150 mm.

Para os dados brasileiros, 28 traços de concreto com diferenças entre a quantidade e a densidade relatada de cada material e a estimada pela soma de materiais por m³ de concreto superior a 5% foram desconsiderados. Uma vez que os estudos não informavam o teor de ar incorporado no concreto fresco, este parâmetro não foi considerado na avaliação da densidade. Assim, foram incluídos 141 dos 169 traços brasileiros. A maior parte das misturas não alcançou 100% do volume informado. Isso pode acontecer por muitas razões, como erros nas quantidades informadas; desvios nos testes de densidade realizados; aproximações devido à falta de informação etc. Esses fatores podem levar a uma leve dispersão nos resultados encontrados. Essa avaliação não foi feita em todos os estudos internacionais, uma vez que não era necessária nas discussões.

A quantidade de dados usados nas relações não são sempre as mesmas devido à informações faltantes. Como exemplo, somente 61 traços dos 141 válidos realizaram ensaios comparáveis de módulo de elasticidade no concreto.

Em alguns casos, valores outliers foram observados e desconsiderados (não incluídos nas correlações) quando limitados a cerca de 10% da população de amostras. Quando presentes, são apresentados e informados nas legendas de cada figura/correlação.

Classes de resistência do cimento (mínimo de 32,5, 42,5 ou 52,5 MPa) foram consideradas nas análises e agrupadas como ($f_{pc,min}$) [32] e ($f_{pc,min}$) [42], onde a maioria dos dados brasileiros está concentrada e integrada com a classe de resistência de cimento

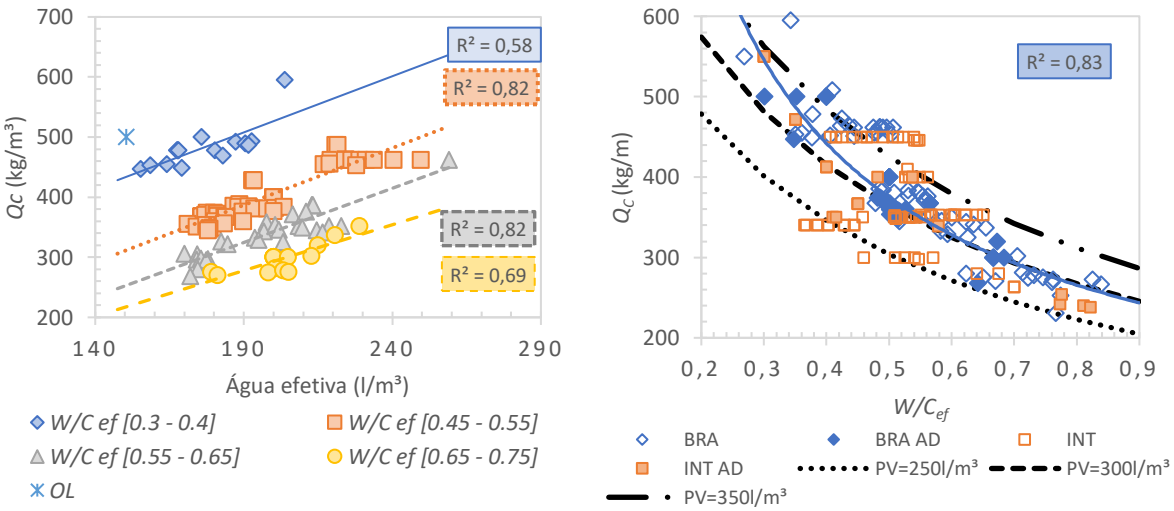
equivalente aos dados do INT. Apenas alguns estudos INT continham classe de cimento ($f_{pc,min}$) [52] e, devido à alta dispersão e à disponibilidade limitada de dados, não foram feitas análises para eles. Diferenças na resistência do cimento como devido aos corpos de prova (cúbico, cilindro) e água/cimento utilizados no teste padrão foram insuficientes para alterar as tendências observadas nas categorias de resistência mínima do cimento.

3.3. Análise de dados

3.3.1. Dosagem de concretos e trabalhabilidade

Em um meio contínuo, o volume de concreto corresponde à soma do volume de seus constituintes. Assim, o volume de pasta de cimento aumenta à medida que o volume agregado diminui (Apêndice C, Figura. C.1.). Um aumento do volume de pasta implica em um aumento no volume de cimento ou água. Particularmente no concreto reciclado, uma porção não desprezível da água adicionada é absorvida pelos agregados reciclados, alterando o volume da pasta. A água restante na pasta, aqui chamada de água efetiva (Q_W; l/m3), é o que precisa ser considerado ao calcular os parâmetros que controlam várias propriedades de estado fresco e endurecido, como o volume de pasta, a concentração de sólidos e a relação água/cimento efetiva (relação W/C_{ef}).

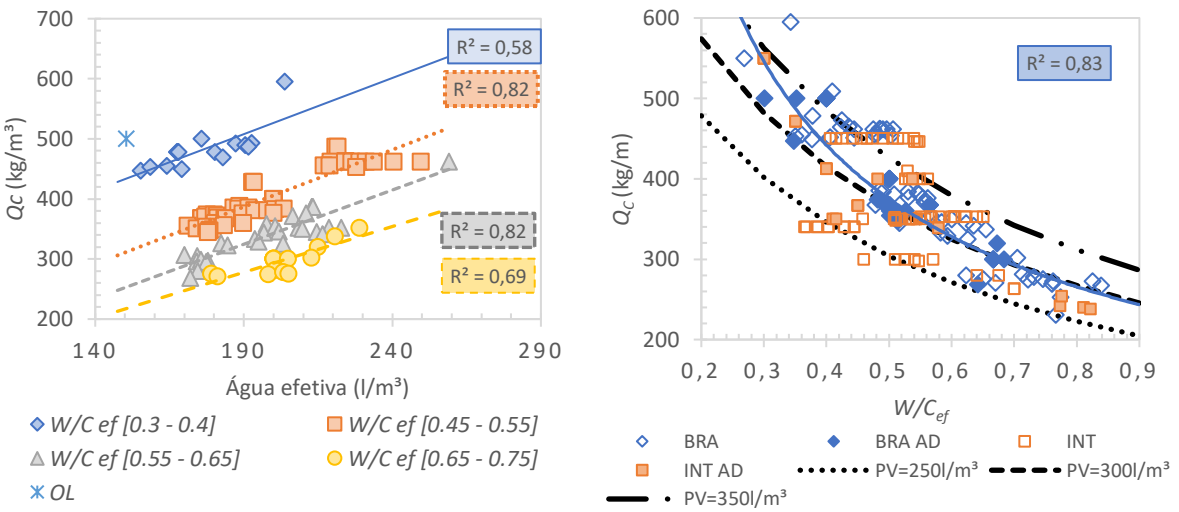
Para uma relação água/cimento efetiva semelhante, quanto maior a quantidade de água efetiva para um metro cúbico de concreto, maior a quantidade de cimento (Q_C) (Figura 20a). O efeito desses aumentos simultâneos é ilustrado na Figura 20(b),



(a) (b)

Figura 20 onde apenas concretos plásticos com *slump* entre 50 e 150 mm foram

considerados. Para os dados brasileiros, *o Qc* cresce sistematicamente ao reduzir a relação água/cimento efetiva (W/C_{ef}) independentemente da presença do (super)plastificante. Em especial, para a relação W/C_{ef} inferior a 0,4, o volume de pasta excedeu 350 L/m^3. O aumento do volume de pasta para menores W/C_{ef} pode ser atribuído ao método de dosagem no Brasil (63% dos dados utilizaram o modelo explicado na Figura 2); para manter uma relação água semelhante à dos materiais sólidos totais (*H*), para uma menor relação $W/C_{ef,}$ a quantidade de agregados deve ser reduzida, não tendo necessariamente as vantagens do aumento da densidade de empacotamento dos agregados. Os estudos internacionais apresentam um comportamento diferente, geralmente estabelecendo um *Qc* fixo e variando a relação W/C_{ef}, alterando sistematicamente o Volume da Pasta (*PV*). Essa estratégia implica em uma maior quantidade de agregados.

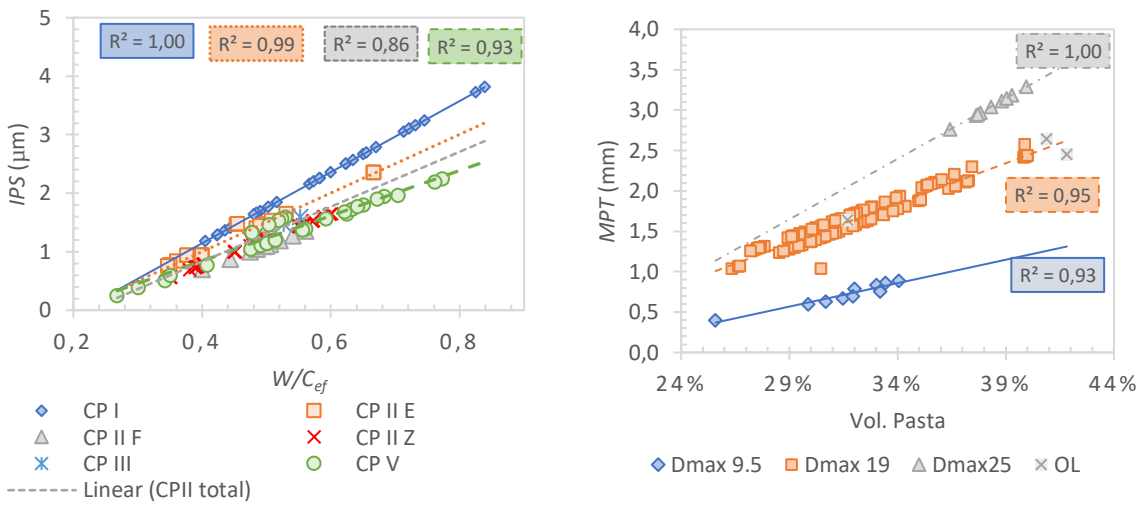


(b) (b)

Figura 20 – (a) Q_C vs. Água efetiva vs. W/C_{ef}. (116 dados Brasileiros (*BRA*)); 1 *OL* resultado consideradas como outliers de [98]). (b) Q_C vs W/C_{ef} vs aditivo, 93 resultados *BRA* (69 *N.AD.*; 24. *AD.*); 87 resultados *INT* (Internacional) (66 *N.AD*; 21 *AD.*); *N.AD.* (sem aditivo); *AD* (com aditivo); *PV* (Volume de pasta); somente concretos com slump [50-150].

De acordo com a literatura apresentada anteriormente, a trabalhabilidade do concreto pode ser modelada por parâmetros de separação de partículas multi-escala, como *IPS* e *MPT* (ver definições no tópico 2.2). O índice *IPS* aumenta com o aumento da W/C_{ef} (Figura.21a), que representa a redução da concentração de sólidos na pasta (*VS*) e depende também do tipo de cimento (sua área de superfície volumétrica; *VSA*). Como o W/C_{ef} é afetado pela água absorvida no *RCA*, a escolha do parâmetro *k* (condição de pré-saturação; 50-90% de absorção de água a 24h do *RCA* – ver tópico 3.2) e *Ww* afetará a distância entre as partículas finas (*IPS*). O índice

MPT está relacionado ao volume de pasta (Figura.21b) e ao empacotamento dos agregados, o que depende da relação entre o tamanho máximo e mínimo dos agregados, ou seja, a extensão granulométrica das partículas. Apesar da simplicidade do modelo *MPT* adotado (que necessita de melhor análise em futuras pesquisas de concretos com *ARCO*), há potencial para redução do volume de pasta pelo aumento da extensão da distribuição granulométrica (por exemplo, para *MPT* = 1mm, *Dmax* [9.5] precisa de 36% do volume da pasta, enquanto para *Dmax* [19] pode ser reduzido para 26%).



(a) (b)

Figura.21 – (a) *IPS vs.* W/C_{ef} vs Tipo de cimento (b) Volume de Pasta vs. *MPT*. 138 resultados *BRA*, 2 OLs de[9].

Há indícios que o *slump* do concreto pode ser parcialmente correlacionado com os índices *MPT* e *IPS* (Figura 22) e com o uso de superplastificantes (*SP*). Os dados apresentam indicativos de que o *slump* aumenta com o aumento do *MPT* devido à maior distância entre os agregados resultante do aumento do volume de pasta. Esse efeito foi mais evidente para os concretos com maiores concentrações de sólidos (menores W/C_{ef}). Uma linha de tendência para os concretos com *IPS* mais alto [1,06-2,3] não pôde ser estabelecida devido à faixa restrita de valores de *MPT*, mas esses dados indicam que, para *MPT's* semelhantes, maiores *slumps* poderiam ser obtidos com o aumento do *IPS*. O aumento da água efetiva na pasta de cimento resulta em uma pasta menos concentrada e mais fluida. Como o *IPS* depende também da área superficial específica, e isso não foi medido para todos os cimentos, algum grau de dispersão era esperado, pois alguns valores foram adotados, a partir de outros estudos, apenas com as informações do tipo de cimento. Os erros introduzidos com essa simplificação são mais relevantes para alguns dos tipos de cimento brasileiros (CP II e CP III), pois contêm diferentes

tipos e teores de materiais cimentícios suplementares (escória de alto-forno, fíler carbonático, pozolanas, argila calcinada, cinzas volantes; com teores que variam de 10 a 70 % do teor de cimento). Uma melhor caracterização do cimento é recomendada para estudos envolvendo concretos reciclados.

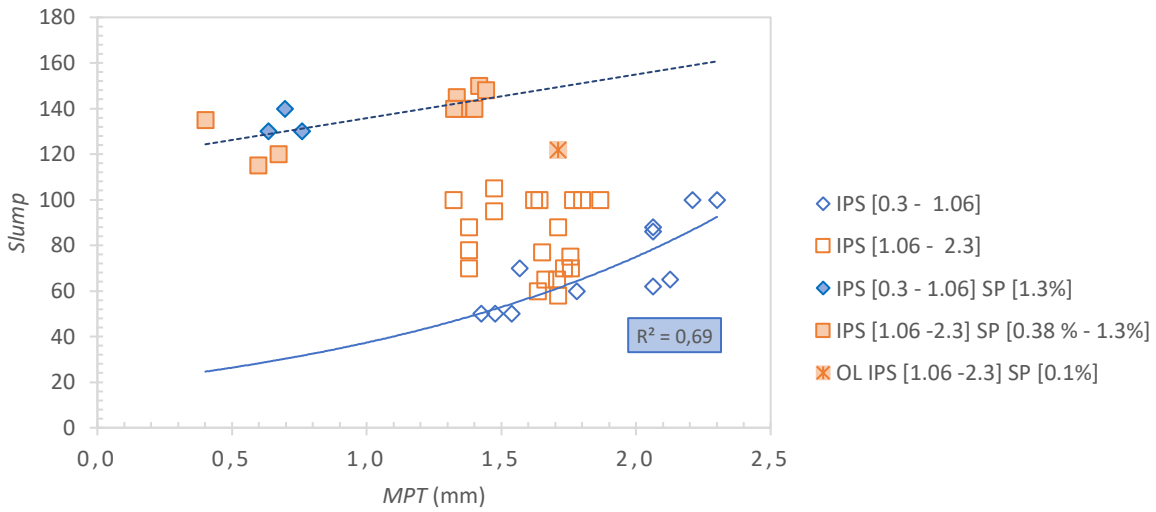


Figura 22 – *Slump* vs. *MPT* vs. *IPS* vs. Aditivo *SP* 45 dados brasileiros dentro dos critérios de avaliação (*slump* [50-150]; *Dmax* [<19mm]; *Ww* [<8%], sem adições minerais; concreto considerado com aditivo somente com *SP* [>0,1% - % em relação à massa de cimento. 1 OL de [15].

O uso de superplastificantes aumenta significativamente o *slump* do concreto, mesmo quando pequenas quantidades são adicionadas (~0,3% em relação à massa de cimento). Isso acontece mesmo sem alterar *IPS* e MPT. Essa melhora está relacionada à melhor dispersão das partículas de cimento, que fluem melhor quando isoladas umas das outras. Como nem sempre é necessário aumentar o *slump*, o uso de um dispersante permite obter o mesmo *slump* com menor *MPT*, ou seja, com menor volume de pasta, resultando em menor teor de água e cimento, o que é uma vantagem do ponto de vista ambiental.

Embora não seja possível construir um modelo final para prever o *slump*, e apesar de também não ter sido avaliada a medida desta propriedade ao longo do tempo (que é fortemente afetada pelo uso do *ARCO*), devido à quantidade e qualidade limitadas dos dados disponíveis, essa abordagem tenta esclarecer os principais mecanismos envolvidos e considera o teor efetivo de água (que depende dos agregados - *Ww*) no cálculo dos parâmetros multi-escala. Esta é uma consideração importante, porque se a água absorvida pelos agregados não for considerada nos cálculos, a avaliação pode ser prejudicada (ver apêndice C. Fig. C.2). Apesar de o *slump* ser um ensaio sujeito à erros de medidas e execução pelo operador, e que não necessariamente

consegue representar os diversos comportamentos do concreto no estado fresco, é o método de ensaio mais prático e que pode ser executado em obra. Investigações adicionais sobre este tópico envolvendo especificamente um conjunto de dados maior e um maior esforço na melhor caracterização do material são recomendadas para o desenvolvimento de um modelo científico robusto de previsão da trabalhabilidade.

3.3.2. Porosidade

A Figura 23 ilustra como o aumento do teor de substituição (*R*) de *NA* pelo *ARCO* aumenta a absorção de água ponderada (W_W) dos agregados graúdos utilizados no concreto. Porém, o teor de substituição nem sempre é o parâmetro principal, pois a porosidade dos agregados também desempenha um papel importante. Para o mesmo *R*, a *Ww* pode aumentar até 5 vezes, dependendo da absorção de *ARCO*. Assim, o *R* não é o único fator na avaliação da porosidade introduzida no concreto pelo *ARCO*. Por exemplo, o mesmo *Ww* [4%] pode ser obtido com um teor de substituição de 30% para absorção de água dos agregados reciclados (W_{RA}) alta [>7%] ou até 100% para W_{RA} mais baixa [3-5%]. Naturalmente, quanto maior o *R*, maior se torna a diferença de absorção entre os diferentes agregados reciclados, implicando mais atenção na seleção de *ARCO*. Os 3 dados *BRA* com *Ww* extremamente alto [14,6%], obtidos por meio de um processo de separação de densidade nos agregados [15], ilustram esses casos extremos. Os 9 dados *BRA* com *Ww* [8,4 – 8,6%], obtidos da britagem de concretos de baixa resistência [15-18MPa] [80], [84], também demandam atenção.

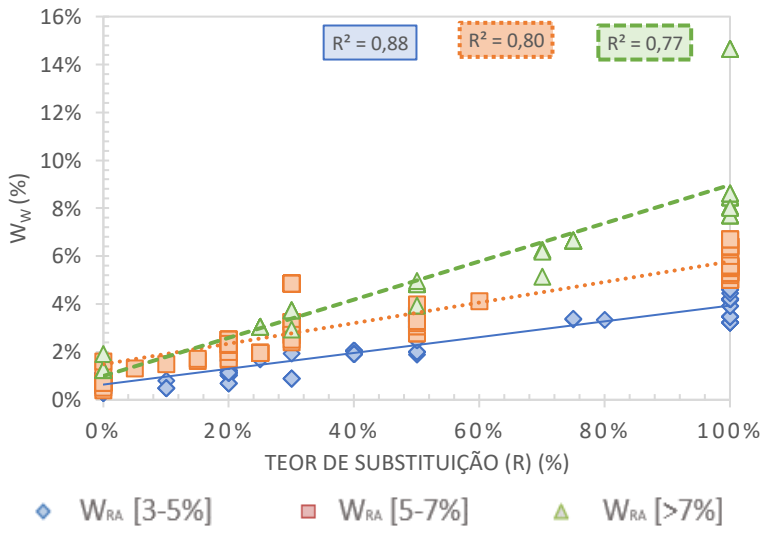
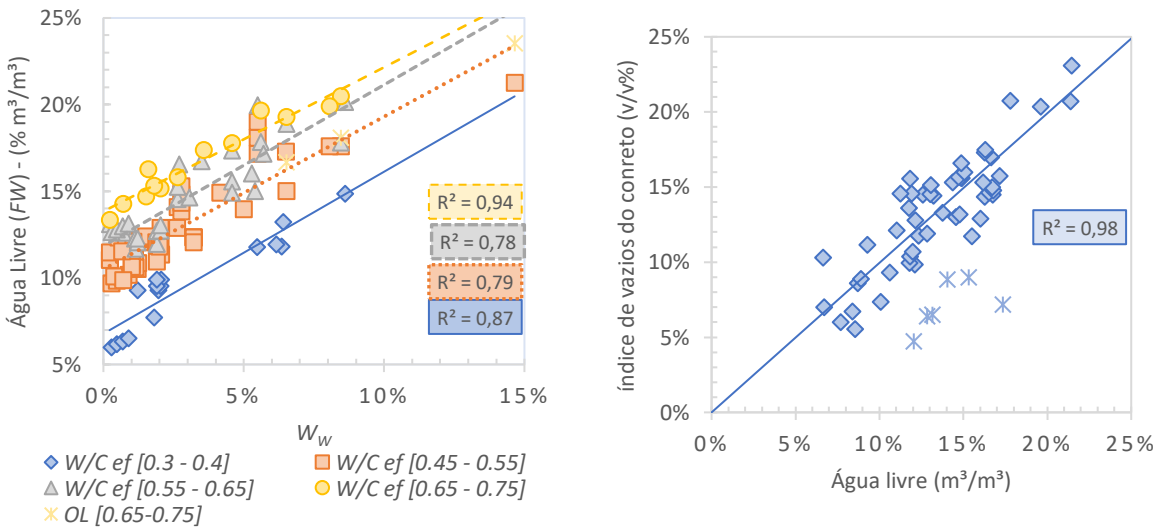


Figura 23 – *Ww* vs., Teor de substituição (*R*) vs. W_{RA} – 296 resultados - 122 dados brasileiros, 174 dados internacionais dentro dos critérios de avaliação (W_{RA} [3-15%]).

O modelo baseado no teor de substituição mal consegue prever a resistência do concreto (Apêndice C, Fig. C.3.), exigindo a implementação de subcategorias de *ARCO* com base em sua absorção de água, conforme sugerido por Silva *et al* [13], (Figura 11). O fator que governa a porosidade (e resistência) do concreto não é apenas o teor de substituição de *NA* por *ARCO*, mas também a porosidade intrínseca do *ARCO* (que depende de sua origem). Portanto, unificando a análise, utilizando *Ww*, resultou-se em boa correlação com o índice de vazios do concreto (que representa a porosidade do concreto) (Figura 24b) e com a resistência (posteriormente observada nas Figura 24 e Figura 25). O parâmetro teor de substituição é limitado a prever propriedades do concreto, especialmente aquelas com alto teor de agregados reciclados, o mais interessante para o mercado (Figura 11).

A Água Livre do concreto (*FW*), calculada de acordo com a Eq.3.3, contempla toda a água no interior do concreto que não participa da reação química do cimento, tanto no interior da pasta quanto na presente dentro dos agregados. Portanto, tanto a absorção de água ponderada em agregados (*Ww*) quanto a W/C_{ef} estão relacionadas à água livre (*FW*) (Figura 24a). A Figura 24b apresenta a relação obtida entre a *FW* calculada e o índice de vazios do concreto (ensaio realizado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005) [141]. A *FW* representa indiretamente o volume total de vazios do concreto. Para uma W/C_{ef} semelhante, o *Ww* é um fator determinante no aumento do *FW* e da porosidade do concreto reciclado. Manter uma porosidade semelhante com um *Ww* mais elevado, implica numa forte redução de W/C_{ef} (no caso do método de dosagem brasileiro, implica em um forte aumento da *Qc*). Por exemplo, uma *FW* de 15% poderia ser alcançado com W/C_{ef} [0,65-0,75] e *Ww* 1%, ou W/C_{ef} [0,3-0,4] e *Ww* 9%.Figura 24.

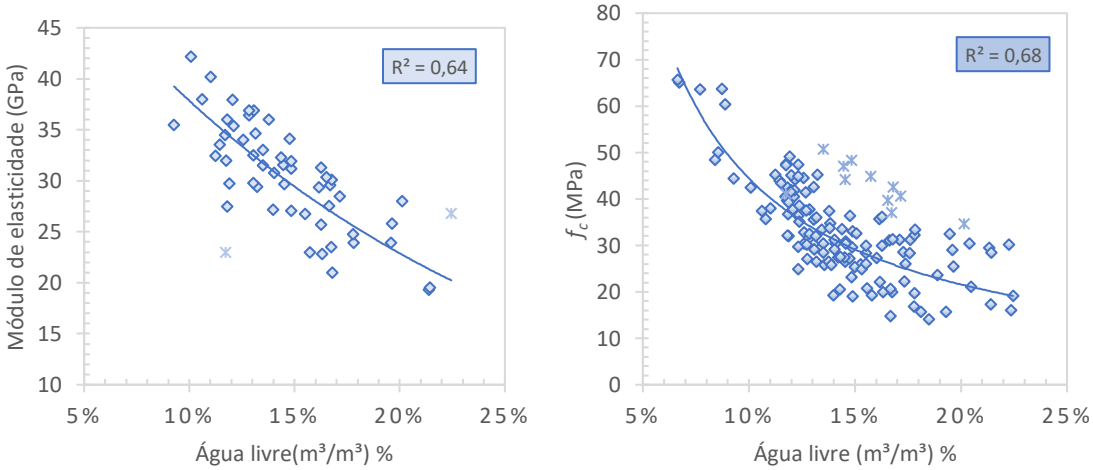


(a) (b)

Figura 24 (a) *FW* vs. W/C_{ef} vs; W_W. 118 resultados *BRA*. 4 OLs de [15], [90], [98] (b) *FW* vs. Índice de vazios do concreto. 57 resultados *BRA*. 5 OLs de [65], [69].

3.3.3. Propriedades do estado endurecido

O módulo de elasticidade do concreto depende da água livre, ou da porosidade total (Figura 25a); ou seja, a soma da porosidade dos agregados e da pasta de cimento. A porosidade do agregado reduz significativamente o módulo elástico do concreto (*E*) [40] implicando em um aumento de deformação, importante para os elementos estruturais. Da mesma forma, a resistência à compressão (f_c) do concreto também reduz com um aumento da *FW* (Figura 25b). No entanto, os ajustes de regressão entre resistência à compressão e porosidade geralmente não são precisos [25], [27], [142] uma vez que o tamanho dos defeitos também influencia nos mecanismos de fratura do concreto, volume das fases (pasta de cimento, agregados Figura 26), bem como suposições de grau de hidratação dos tipos de cimento, classes de resistência (Figura 27).



(a) (b)

Figura 25 – (a) *FW* vs Módulo de elasticidade 55 resultados *BRA*. 2 *OLs* de [94], [96] (b) *FW* vs. Resistência à compressão (f_c). 139 resultados *BRA*. 13 *OLs* de[92], [94], [96], [97], [130].

Para uma mesma relação água/cimento efetiva o aumento no consumo de cimento aumenta o volume de pasta (figura C.1b Apêndice C). A Figura 26a mostra que um aumento na quantidade de cimento reduz o módulo de elasticidade do concreto, uma vez que o módulo da pasta é menor que o do agregado, consoante os modelos apresentados na Figura 6.

Já a Figura 26b mostra que um aumento no *Qc* promove um aumento da f_c, para uma mesma *FW*, isso ocorre devido à redução da relação água/cimento efetiva (Figura 20b), que implica em um aumento da resistência da matriz. Os efeitos combinados estão apresentados na Figura 27, onde pode se observar que o efeito da relação água/cimento efetiva na resistência à compressão é mais significativo do que o efeito da porosidade do agregado. Para as Figura 26a,b as linhas de tendência "Todos", contemplam os mesmos dados das Figura 25, incluindo alguns intervalos onde não foram criadas linhas de tendência.

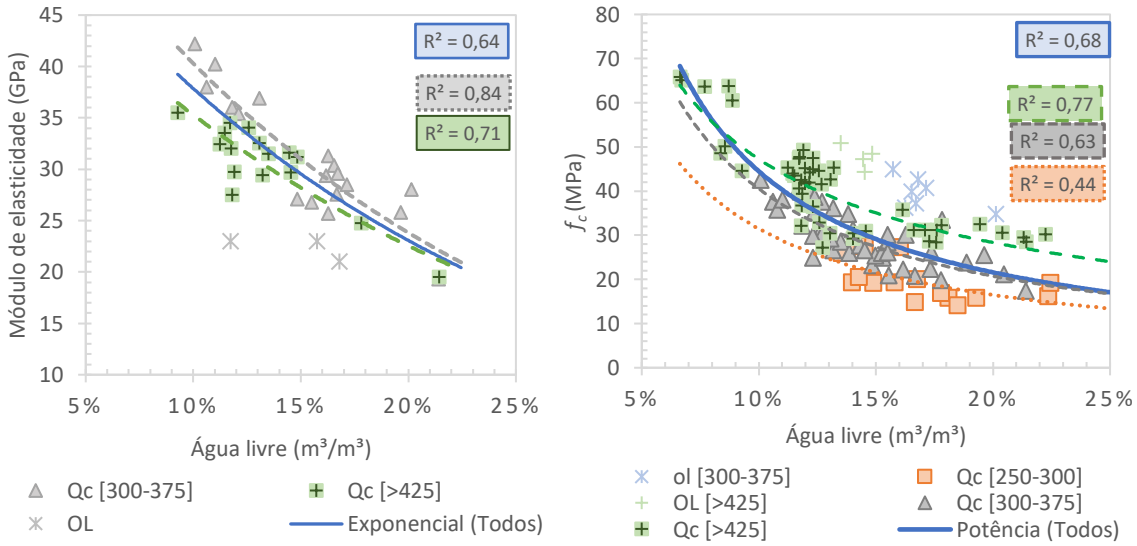
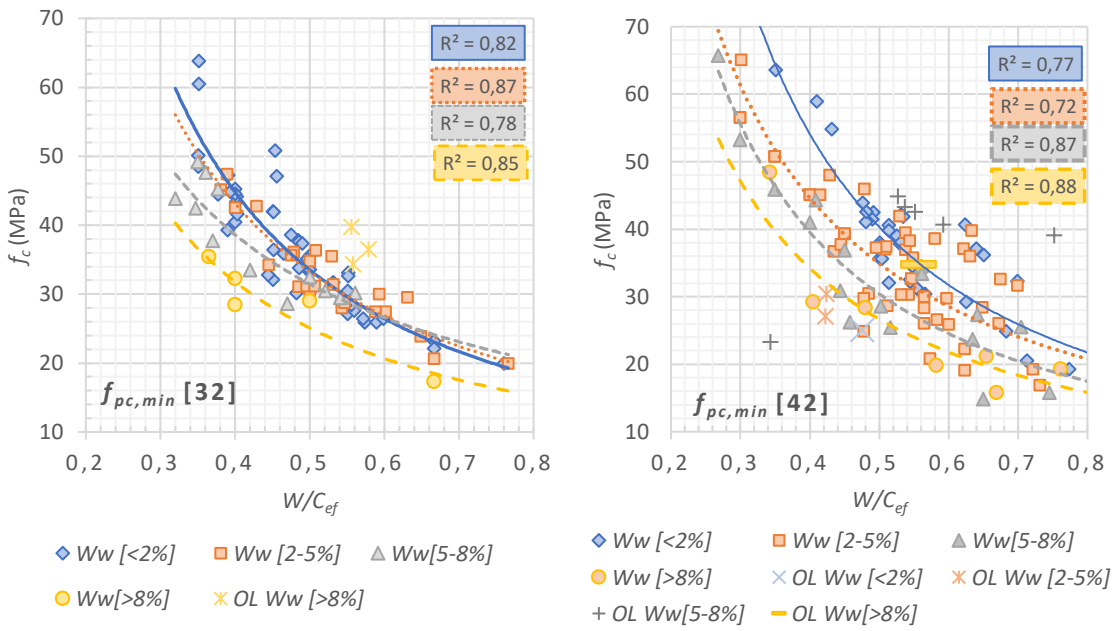


Figura 26 – (a) *FW* vs Módulo de elasticidade vs *Qc* 55 resultados *BRA*. 3 *OLs* de [94], [96] (b) *FW* vs. Resistência à compressão (f_c) vs *Qc*. 139 resultados *BRA*. 13 *OLs* de [92], [94], [96], [97], [130].

A Figura 27 mostra o impacto da *Ww*, W/C_{ef} e da resistência à compressão do cimento ($f_{pc,min}$ [32] no gráfico esquerdo e $f_{pc,min}$ [42] à direita) sobre a resistência à compressão do concreto (f_c). A linha de tendência azul [< 2%] representa os concretos feitos com agregados naturais, ou concretos com baixos teores de substituição de *ARCO*.

Ao aumentar o *Ww* dos agregados (as diferentes linhas de tendência), bem como aumentar a relação W/C_{ef}, a resistência à compressão do concreto diminui. Assim, ambos os efeitos (da pasta de cimento e dos agregados) são considerados. O uso de cimentos com maior $f_{pc,min}$ tende a aumentar a f_c do concreto para um mesmo *Ww* e $W/C_{ef.}$ A resistência do concreto é mais afetada pelo aumento da relação W/C_{ef}, uma vez que a porosidade da pasta de cimento é mandatória para limitar a resistência do concreto, em comparação aos poros dentro dos agregados, ou a resistência do cimento.



(a) (b)

Figura 27 - f_c vs. W/C_{ef} vs. Ww vs Resistencia do cimento ($f_{pc,min}$). Para (a) $f_{pc,min}$ [32]; 92 resultados (60 *BRA*, 18 *INT)* 3 OLs de [105]. (b) $f_{pc,min}$ [42]; 118 resultados (65 *BRA*; 53 *INT*) 10 OLs de [90], [94], [96], [97], [108], [120], [126]).

O modelo fornece melhores correlações do que o modelo de previsão baseado no modelo tradicional de teor de substituição, onde nenhum efeito claro do teor de substituição pôde ser visto na f_c (ver Apêndice C, Fig. C.3). Por fim, os estudos brasileiros apresentam quantidade significativa de dados em uma faixa de *Ww* mais ampla e com menor resistência do cimento do que os estudos internacionais, permitindo uma análise mais ampla (ver tabela suplementar - banco de dados).

O impacto de *Ww* na resistência à compressão do concreto (f_c) depende da W/C_{ef}. Para f_c abaixo de 25 MPa (W/C_{ef} >0,65), a redução de f_c em valor absoluto poderia chegar a aproximadamente 5 MPa, indicando maior potencial de uso de agregados reciclados mesmo para a faixa *Ww* mais alta (Apêndice C, Tabela *C.1*). Este efeito pode ser mais bem visto para concretos com $f_{pc,min}$ [32] e W/C_{ef} [>0,50], onde não há diferença ao usar *ARCO* com *Ww* até 8%. Neste caso, a resistência do concreto é governada principalmente pela porosidade da pasta de cimento, apesar da grande variação da porosidade do *ARCO*.

Para f_c acima de 35 MPa, o impacto da *Ww* é significativo e pode exceder mais de 10 MPa em valor absoluto. Nesses casos, a porosidade da pasta é menor e a porosidade do *ARCO* afeta mais significativamente a resistência do concreto. Para a classe de resistência de cimento

$f_{pc,min}$ [32] o uso de *Ww* [<5%] poderia produzir concretos com baixo impacto na $f_{c,}$ permitindo mais de 20% de teor de substituição de agregados naturais por *ARCO* (Figura 23).

Do ponto de vista mecânico, em aplicações de concreto não estrutural podem ser utilizados até mesmo agregados com *Ww* [>8%]. Para concretos estruturais, o limite de 20% de substituição de *ARCO* presente em muitas normas não é obrigatório e pode ser excedido. No entanto, neste caso, o Q_c e *o Ww* precisam ser selecionados para produzir concretos reciclados com boa eficiência no uso de cimento (ver item 3.3.4).

3.3.4. Análise da eficiência no uso do cimento

Os concretos brasileiros foram avaliados pelo índice de intensidade de ligante (*bi* – eq.6) proposto por Damineli et al.,[80], que expressa a quantidade de fração reativa de ligante (kg/m³), utilizado para produzir 1 MPa de resistência à compressão ($kg.m^{-3}.MPa^{-1}$).

Como visto nos tópicos anteriores, o *Qc* adotado, e consequentemente o *bi*, poderia variar de acordo com: (a) a trabalhabilidade (no método de dosagem brasileiro, a fluidez é comumente corrigida com um aumento do volume da pasta de cimento, como visto no apêndice A, Fig. A.1); b) Requisitos mínimos *de Qc* devido à durabilidade (ver tópico 2.3) c) A relação W/C_{ef} e resistência à compressão; d) a classe de resistência do cimento ($f_{pc,min}$); e) as características do agregado (*Ww*).

Figura. 28 mostra a relação entre f_c e *bi*, para dados brasileiros e internacionais. Os limites das zonas *bi* propostos na Figura 15 adaptados de John [81] são apresentados por linhas pretas que representam isocurvas de quantidade de ligante (*Qb)* 250 e 400kg/m³, próximas aos limites inferiores e superiores da zona aceitável, respectivamente.

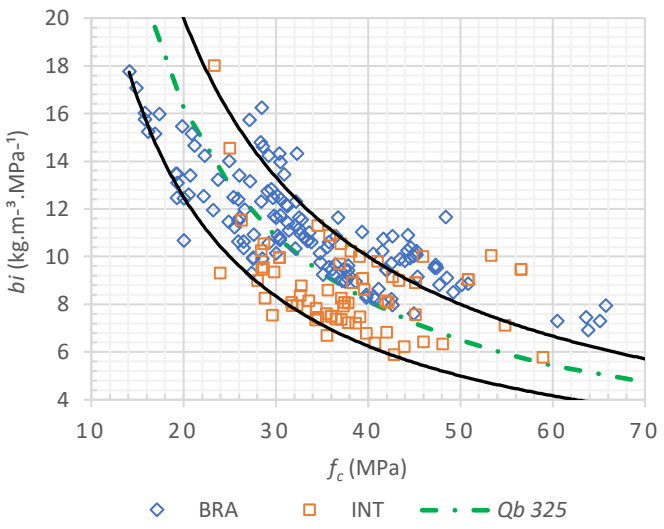


Figura. 28 – *bi* vs f_c. 139 BRA 71 INT resultados usados. ($f_{pc,min}$ [32] e $f_{pc,min}$ [42] unidos)

Em geral, quanto maior o f_c, menor o *bi*, semelhante ao encontrado em estudos em concretos com agregados naturais [18], [19], [81]. Nos estudos brasileiros avaliados, há maior quantidade de dados de concretos com menor f_c [<30 MPa] do que os dados internacionais coletados. Para uma faixa *de* f_c semelhante (por exemplo, 30-50 MPa), os concretos brasileiros tendem a apresentar um *bi* maior do que os dados internacionais.

Há maior dispersão de dados em menores f_c. Por exemplo, para f_c [25-30 MPa] o *bi* varia entre 7,5 e 16,2 (aumento de 116%), enquanto com f_c [45-50] o *bi* varia entre 6 e 11,6 (aumento de 95%).

A maior parte dos dados, dentro da zona aceitável, está dentro da quantidade de ligante *Qb* [275-350]. Para entender essa variação com maior precisão foram elaborados seis gráficos de *bi* (Figura.29a-f); cada um para uma faixa específica de W/C_{ef} e resistência ao cimento ($f_{pc,min}$), incluindo o efeito da absorção de água ponderada dos agregados.

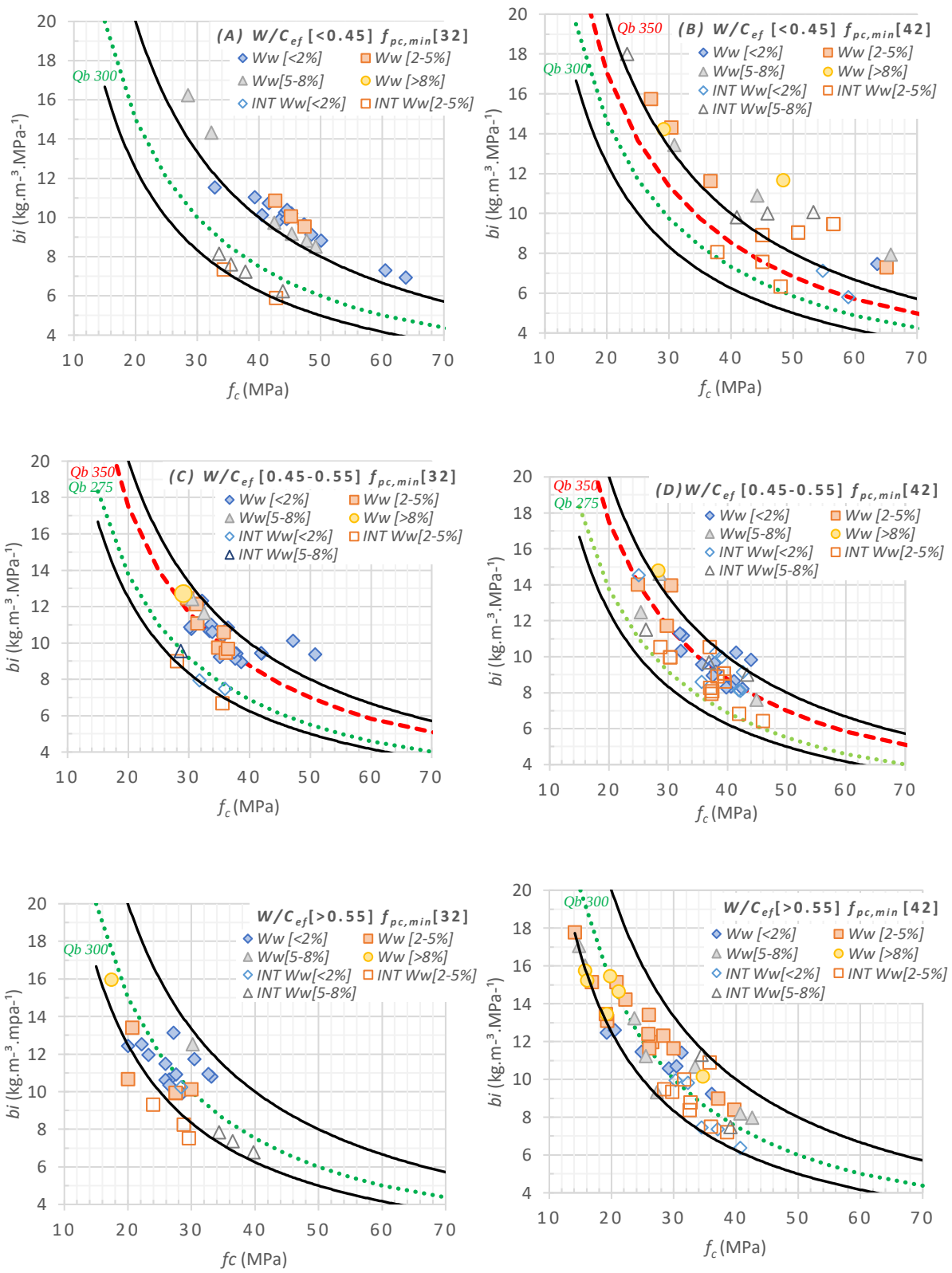


Figura.29 -Índice de intensidade de ligante vs. f_c. (a) W/C_{ef} [<0,45] e f_{pc} [<40]; (b) W/C_{ef} [<0,45] e f_{pc} [>40]; (c) W/C_{ef} [0,45-0,55] e f_{pc} [<40]; (d) W/C_{ef} [0,45-0,55] e f_{pc} [>40]; (e) W/C_{ef} [>0,55] e f_{pc} [<40]; (f) W/C_{ef} [>0,55] e f_{pc} [>40]; 202 resultados: 30 deles em (a); 28 em (b) 36 em (c) 40 em (d) 27 em (e); 50 em (f); iso-curvas de *Qc* considerando um cimento com alto teor de clínquer (97,5%).

Para W/Cef [< 0,45], a maioria dos concretos brasileiros fc [30-60] foi considerada com *bi* não aceitável, independentemente da resistência do tipo de cimento, mesmo para *Ww* [< 2%] devido à alta quantidade de cimento utilizado. Por outro lado, a maioria dos concretos internacionais foi encontrada na faixa de zona bi aceitável porque aqueles adotaram o uso de dispersantes mantendo a quantidade de ligante (*Qb*) em uma faixa aceitável [250-350], e os menores valores na Figura.29a, usando cimentos com menor teor de clínquer (~72%). Para as resistências Figura.29do concreto *fc* [40-60] e resistência do cimento fpc.min [42], a *Ww* aceitável foi de até 5%. Para as resistências do concreto *fc* [30-40] e resistência do cimento fpc.min [32], o Ww aceitável foi de até 8%.

Para W/C_{ef} [0,45-0,55], e ambos os tipos de resistência do cimento *fpc,min* [32 e 42], as resistências à compressão dos concretos variaram principalmente entre *fc* [25-40] (Figura.29c,d); assim, concretos estruturais podem ser obtidos dentro da zona bi aceitável [*Qb* 275-350] com *Ww* até 8%.

Para W/C_{ef} [> 0,55], a resistência à compressão dos concretos brasileiros f_c variou de 15-30 MPa, e, independentemente de *Ww*, estes foram considerados com *bi* aceitável, com a maior parte dos dados adotando *Qb* [250-350], além de alguns concretos serem produzidos com *Qb* [<250]. A maioria dos dados brasileiros é indicada para aplicações de concretos não estruturais.

Para a mesma faixa de resistência à compressão e trabalhabilidade dos concretos, uma redução no *bi* pode ser obtida usando superplastificantes (Fig. C.4, apêndice C). Nesta faixa, a redução da demanda d'água é fundamental para reduzir *o bi*. Embora o superplastificante possa reduzir o volume de pasta de concreto, há sempre um volume mínimo de pasta para garantir a continuidade espacial.

Estratégias para otimizar o empacotamento de agregados também podem melhorar o *bi* reduzindo o volume de pasta de cimento, para a mesma trabalhabilidade ou resistência à compressão; no entanto, é pouco explorado na literatura [23] e não pode ser profundamente discutido neste capítulo.

Faltam guias ou metodologias de formulações de concreto reciclado com base no desempenho ambiental, uma vez que é um tema pouco discutido. Com base nos resultados obtidos nesta revisão, foi proposto um guia para seleção de concretos reciclados com *bi*

aceitável, apontando os melhores resultados de *bi* aqui encontrados, utilizando a Tabela 4, seguindo os seguintes passos :

1. Estabeleça uma resistência à compressão alvo. **Ex: f_c [30 MPa]**

2. Defina um *bi*. **Ex: *bi* [8.7]**

3. Use a relação A ou B para determinar *o W/ C_{ef}* e definir a classe de resistência mínima do cimento $f_{pc,\,min}$ que atenda aos itens 1 e 2 acima.

   Ex: W/C_{ef} [>0,55] e $f_{pc,min}$ [42]

4. Selecione o tipo de cimento e calcule o *Qc* com Eq.6:

$$\boldsymbol{Ex}: \boldsymbol{Qc} = \frac{\boldsymbol{bi * fc}}{\mathbf{0.72}} \rightarrow \boldsymbol{Qc} = \frac{\mathbf{30 * 8.7}}{\mathbf{0.72}} = \frac{\mathbf{362}\boldsymbol{kg}}{\boldsymbol{m^3}}.$$

   Nota: Recomenda-se a utilização de cimentos com menor teor de ligante (ex: usando fíller carbonático – ex: CEM II/B-L 42,5 (~72% de fração ligante [138]*).*

5. Utilizar a relação C ou D, respectivamente, para determinar a *Ww* e *a W/C_{ef}* adequadas para satisfazer os pontos 1, 2, 3 e 4 supra. **Ex: *Ww* [4%] e W/C_{ef} [0,55].**

   Nota: Recomenda-se o uso de superplastificantes para melhorar a trabalhabilidade.

6. Use a Relação E para prever o Módulo Elástico.

7. Aplicar a Relação F para identificar as faixas de emissões de CO_2 para cada resistência do concreto f_c.

   Notas: Os valores bi apresentados na Relação A e B foram os melhores pontos encontrados em cada gráfico (Fig.11). A resistência do concreto foram valores médios. Os concretos estruturais foram considerados f_c [>25]. W/C_{ef} [>0,65] foram considerados para aplicações de concreto não estrutural. Verifique os problemas de durabilidade para aceitar esses concretos em aplicações reais.

Obs.: O roteiro de uso deste guia está estruturado com as relações em ordem de cima para baixo, mas nada impede de o usuário de utilizar o caminho inverso, de baixo para cima, partindo de uma *Ww* e $W/C_{ef,}$ pré-definida, e identificar a resistência *bi's* possíveis.

Tabela 4 – Resumo das correlações analisadas

Relação A – Figura.29	Faixa de análise	$f_{pc,min}$	f_c (MPa)										
			20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$bi = f(f_c)$	*W/Cef* [<0.45]	**[32]**			8.1	7.6	8.8	5.9					
	W/Cef [0.45- 0.55]			9.0	9.56	8.0	8.96						
	W/Cef [>0.55]		10.7	9.3	7.5	7.9	6.8						
$bi = f(f_c)$	*W/Cef* [<0.45]	**[42]**				8.0	8.5	8.5	6.4	7.12	5.8		
	W/Cef [0.45- 0.55]			10.5	9.9	9.6	8.6	6.43					
	W/Cef [>0.55]		13	10.5	8.0	7.5	7.5						
Relação C- Figura 27a	**Faixa de análise**	**Equação**	*W/Cef*										
			0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8
$f_{pc,min}$ [32]	*Ww* [<2%]	$f_c = 13.63 * W/C_{ef}^{-1.3}$			44.9	38.5	33.6	29.6	26.5	23.9	21.7	19.8	18.2
$f_c = f(W/Cef \times Ww) - f_{pc,min}$[32]	*Ww* [2-5%]	$f_c = 14.8 * W/C_{ef}^{-1.17}$			43.2	37.7	33.3	29.8	26.9	24.5	22.5	20.7	19.2
	Ww [5-8%]	$f_c = 16.62 * W/C_{ef}^{-0.92}$				34.6	31.4	28.8	26.6	24.7	23.1	21.7	20.4
	Ww [>8%]	$f_c = 12.02 * W/C_{ef}^{-1.06}$							20.7	19.0	17.5	16.3	15.2
Relação D- Figura 27b	**Faixa de análise**	**Equação**	*W/Cef*										
			0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8
$f_{pc,min}$ [42]	*Ww* [<2%]	$f_c = 16.21 * W/C_{ef}^{-1.32}$			54.3	46.5	40.5	35.7	31.8	28.6	26.0	23.7	21.8
$f_c = f(W/Cef \times Ww) - f_{pc.min}$[42]	*Ww* [2-5%]	$f_c = 16.24 * W/C_{ef}^{-1.11}$			44.5	39.1	34.8	31.3	28.5	26.1	24.0	22.3	20.8
	Ww [5-8%]	$f_c = 13.43 * W/C_{ef}^{-1.18}$				34.5	30.4	27.2	24.5	22.3	20.5	18.9	17.5
	Ww [>8%]	$f_c = 12.34 * W/C_{ef}^{-1.11}$							21.8	19.9	18.3	17.0	15.8
Relação E Figura 25a	**Equação**		*FW* (%) (Eq. 3)										
			8,0%	9,5%	11,0%	12,5%	14,0%	15,5%	17,0%	18,5%	20,0%	21,5%	23,0%
$E = f(FW)$	$E = 62.21\ exp^{(-5.03FW)}$		39.4	36.5	33.8	31.4	29.0	26.9	24.9	23.1	21.4	19.8	18.4
Relação F			f_c (MPa)										
			20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Faixa de emissão de CO_2 ($kg.CO_2.m^{-3}$) *			183-222	192-224	192-254	224-287	233-306	227-327	274	335	298	-	-

* Considerando todo ligante como clínquer e 0.9 $kgCO_2$/kg Clinker [143]

Aplicação estrutural | Aplicação não estrutural | Zona de BI aceitável

3.4. Conclusões do capítulo

Dados brasileiros de concretos com agregados graúdos reciclados de concreto (*ARCO*) dos últimos 20 anos foram sistematizados, analisados e comparados com a literatura internacional. O Brasil utiliza *ARCO* em uma faixa maior de absorção de água e possui um método particular de dosagem de concreto que difere dos internacionais, afetando as propriedades de estado fresco, estado endurecido e eficiência do uso do cimento.

As propriedades do concreto no estado fresco foram modeladas por parâmetros multi-escala (*IPS* e *MPT*) considerando o teor efetivo de água na mistura, empacotamento de agregados, tipo de cimento e presença de aditivos. O uso de superplastificantes desempenha um papel importante no aumento da trabalhabilidade e na redução da quantidade de água (e cimento) usada no concreto.

As propriedades mecânicas (resistência à compressão e módulo elástico) dos concretos foram modeladas, utilizando-se o critério de absorção de água ponderada dos agregados e a relação água/cimento efetiva descrevendo com melhor acurácia do que o parâmetro tradicional de teor de substituição da *ARCO* por *NA.* Este modelo de previsão é mais prático e torna o uso do *RCA* mais flexível, levando em conta a classe de resistência do cimento. Concretos estruturais e não estruturais podem ser produzidos. O limite de 20% de teor de substituição de muitas normas para concretos reciclados estruturais pode ser superado limitando o $Ww < 5\%$ em faixas de f_c [40-60 MPa], ou $Ww<8\%$ para fc[25-40MPa] . O impacto do uso de *ARCO* sobre concreto de baixa resistência tem pouco efeito em termos absolutos (< 5 MPa), e estes podem ser amplamente utilizados em aplicações não estruturais com eficiência aceitável de uso de cimento, expressa pelo índice de intensidade do ligante.

Uma análise do índice de intensidade do ligante foi conduzida incluindo dados internacionais. Os dados internacionais tendem a apresentar indicadores melhores do que os brasileiros devido ao uso de uma menor quantidade de cimento, maior resistência do cimento, uso de dispersantes. Para produzir concretos reciclados estruturais com *bi's* aceitáveis, não se deve adotar quantidade de ligante (clínquer e materiais cimentícios suplementares reativos) superior a 350 kg/m^3; para os não estruturais deve-se adotar quantidade de ligante igual ou inferior a 250 kg/m^3. Um guia foi proposto para selecionar formulações de concreto reciclado com *bi* aceitável e estabelecer limites para a absorção de água ponderada dos agregados.

3.5. Pesquisas futuras

A caracterização do cimento, partículas finas e agregados, deve ser mais detalhada, não colocada em segundo plano, principalmente para melhorar a previsão das propriedades do concreto no estado fresco. O empacotamento de partículas deve ser melhor avaliado.

Devem ser feitas calibrações de parâmetros como a água combinada, para cada tipo de cimento, para calcular o índice de Água Livre (*FW).*

O *Ww*, poderia ser aplicado para modelar propriedades com agregados reciclados mistos (com alto teor de cerâmica vermelha), bem como para incluir agregados reciclados finos.

4. MELHORIA DA EFICIÊNCIA NO USO DO CIMENTO DO CONCRETO RECICLADO

Os capítulos anteriores discutiram os efeitos do uso de *ARCO* nas propriedades dos concretos e na eficiência no uso do cimento (pelo *bi* - índice intensidade de ligante), estabelecendo limites aceitáveis para formulações. Foram brevemente apresentadas estratégias de formulação para a redução do índice intensidade de ligante, tais como uso de aditivos dispersantes, empacotamento e uso de fillers. O uso de estratégias para redução de *bi* em agregados reciclados é pouco discutido.

Diversos autores investigaram o efeito do uso de agregados reciclados na variabilidade das propriedades mecânicas de concretos, porém, a literatura ainda carece de entendimento quanto à variabilidade do comportamento em concretos com agregados reciclados, e concretos com baixo consumo de cimento com agregados reciclados.

4.1. Objetivos

Este capítulo, teve como objetivos avaliar, experimentalmente, como estratégias de uso de aditivos, adição de filler, empacotamento e o uso de *ARCO*, afetam as propriedades físicas e mecânicas de concretos (Densidade, Absorção de água, resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração), e seu índice intensidade de ligante.

Além disso, este capítulo fornece dados e análises preliminares sobre a variabilidade de algumas propriedades dos concretos, assunto que possui quantidade limitada de informações na literatura sobre o tema.

4.2. Materiais e Métodos

4.2.1. Caracterização dos materiais

Para esta pesquisa, alguns materiais pré-existentes no laboratório de materiais de construção da EPUSP, préviamente caracterizados, foram disponibilizados, tais como: Cimento CP-V-ARI, fíler carbonático de granulometria inferior à do cimento (Profine 1), fíler carbonático com granulometria similar a do cimento (Procarb 5) e agregado miúdo correspondente à areia grossa artificial de britagem, de Itapecerica da Serra.

Outra fração de agregado miúdo também foi utilizada nesta pesquisa, correspondendo à areia média natural de rio, adquirida ensacada em loja de materiais de construção na zona oeste da cidade de São Paulo. Dentre os agregados graúdos utilizados, agregados graúdos naturais de rocha britada foram adquiridos ensacados em loja de materiais de construção na Zona Oeste de São Paulo, e os agregados graúdos reciclados de concreto foram doados ensacados pela empresa Rafa Entulhos, situada na cidade de São Paulo.

Para caracterizar o cimento e os fíleres, foi realizado ensaio de granulometria através de equipamento por difração laser (HELOS KR SYMPATEC), com intervalo de análise de 0,1µm a 350 µm, em dois conjuntos de lentes (R1 + R4). Os materiais foram dispersos em água deionizada usando ultrassom por 120 segundos, e por 60 segundos usando mixer IKA RW20 e velocidade de rotação de 1000 rpm.

As areias tiveram granulometria e morfologia avaliada por difração à laser e análise de imagem dinâmicas usando dois equipamentos diferentes. O material foi separado em duas frações através de uma única peneira de 1,18mm. A distribuição granulométrica e morfológica da fração retida em 1,18mm foi determinada em um equipamento de análise de imagens dinâmicas, Qicpic (Sympatec), com dispersão por gravidade a seco e taxa de aquisição de 25 imagens/segundo. e como parâmetro de morfologia a relação de aspecto e esfericidade (Figura 30). O material passante teve análise granulométrica realizada no equipamento HELOS KR SYMPATEC, com metodologia similar a dos finos, mas que não avalia a forma das partículas finas. Para ambos equipamentos, o parâmetro de dimensão foi considerado o diâmetro de círculo com área equivalente (EQPC); assim, por termos usado o mesmo parâmetro para definir a dimensão das partículas dos finos (cimentos, adições) e agregados, a junção dos resultados de análise não afetou as estimativas de empacotamento.

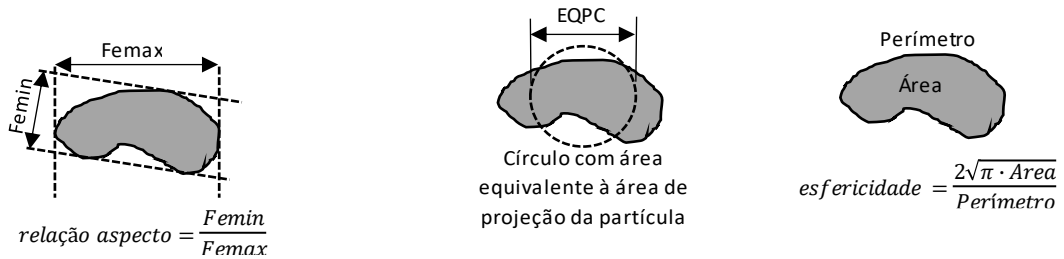


Figura 30 - Descrição dos parâmetros de tamanho e morfologia na análise de imagens dinâmicas

A densidade das areais e finos foi avaliada por picnometria por intrusão gás hélio com equipamento MultiPycnometer MVP-5DC (Quantachrome), usando amostras de 50-100g, obtida por meio de amostrador rotativo, secos em estufa à 50ºC por 24h e resfriados a temperatura ambiente com dessecador de silica-gel antes da realização do ensaio.

A Figura 31 e a Tabela 5 apresentam a granulometria, densidade e área superficial do cimento e dos fílers usados. O fíler Profine 1 apresentou granulometria significativamente menor que a do cimento, e consequentemente maior área específica, enquanto o fíler Procarb5 apresentou granulometria e área específica ligeiramente inferior a do cimento.

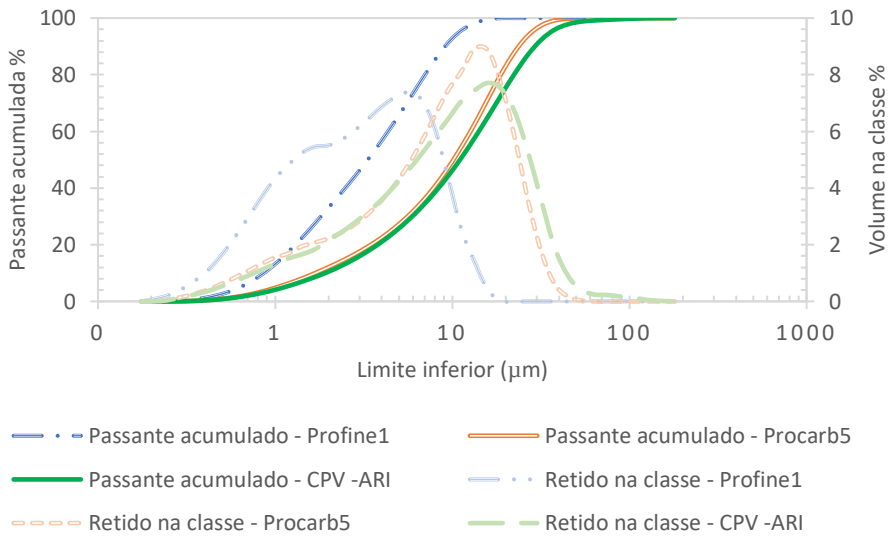


Figura 31 - Granulometria do cimento e fillers utilizados

Tabela 5 - Caracterização do cimento e fillers utilizados

Item	D_{10} (µm)	D_{50} (µm)	D_{90} (µm)	Densidade (g/cm³)	Área superficial específica (m²/g)
CPV - ARI	1,92	11,06	29,54	3,14	1,15
Profine 1	0,86	3,33	9,15	2,79	3,86
Procarb 5	1,69	10,16	23,92	2,78	1,02

A Tabela 6 e a Figura 32 apresentam a caracterização dos agregados miúdos. Os agregados utilizados foram classificados como areia grossa, e a areia de quartzo (de rio) média. A areia de britagem apresenta relação de aspecto e esfericidade discretamente diferente da areia de rio (quartzo).

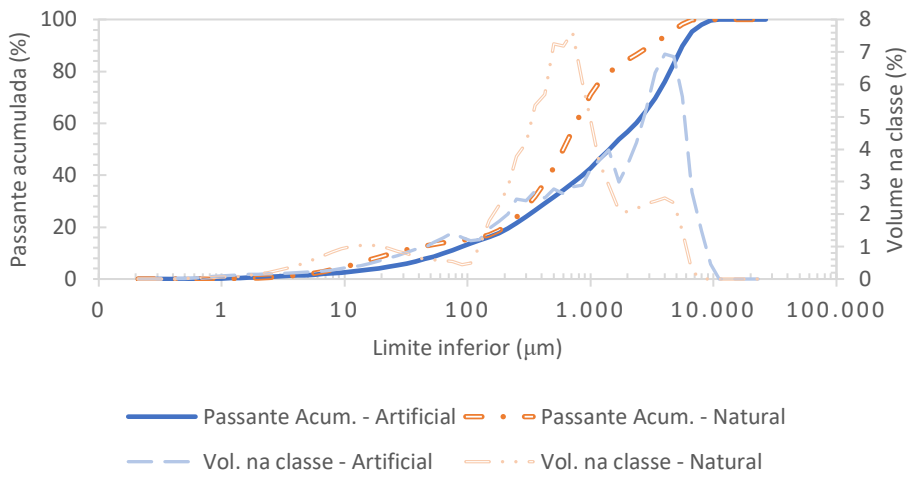


Figura 32 – Granulometria agregado miúdo

Tabela 6 - Caracterização dos agregados miúdos

Material	D_{10} (µm)	D_{50} (µm)	D_{90} (µm)	Densidade (g/cm³)	VSA (m^2/cm^3)	partículas (unid/cm³)	Módulo de finura
Areia natural	25	599	3103	2,6951	0,109	8,90E+09	2,47
Areia Artificial	65	1418	5644	2,630	0,088	1,71E+10	3,37

Material	Parâmetro	P_{10}	P_{50}	P_{90}
Areia natural	relação de aspecto	0,522	0,691	0,836
	esfericidade	0,674	0,809	0,873
Areia artificial	relação de aspecto	0,431	0,634	0,808
	esfericidade	0,724	0,816	0,871

Os agregados graúdos tiveram a granulometria determinada conforme a norma ABNT NBR NM 248 (2003) [144], incluindo a densidade e absorção de água pela norma ABNT NBR NM 53 (2009) [145]. Para os agregados reciclados, o teor de finos foi avaliado pela norma ABNT NBR NM 46 [146].

A

Tabela 7 e a Figura 33 apresentam a caracterização dos agregados graúdos quanto à densidade, absorção de água e granulometria. Os agregados reciclados apresentam maior granulometria do que os naturais, e como esperado apresentam maior absorção de água e menor densidade.

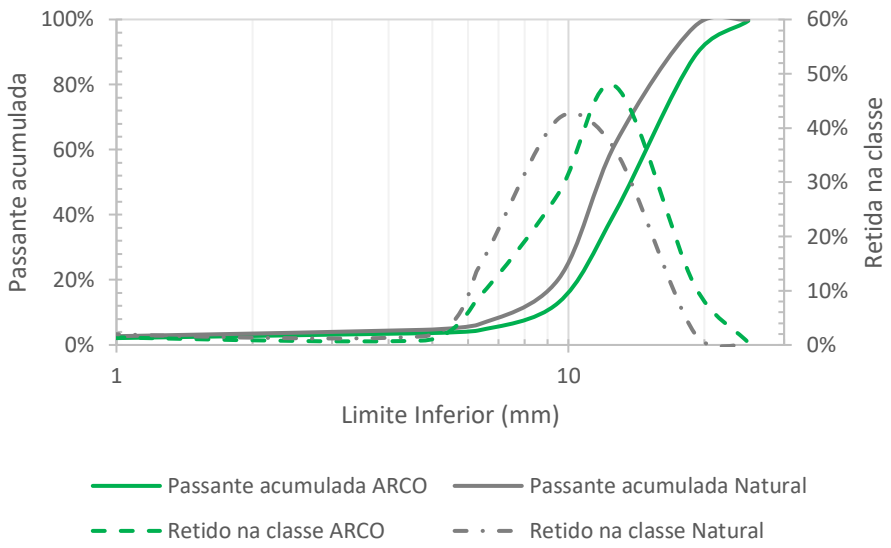


Figura 33 - Granulometria agregados graúdos

Tabela 7 – Absorção, Densidade e Granulometria dos agregados graúdos

Material	**Absorção de água**	**Densidade Agregado seco**	**Densidade Saturado Superfície Seca**	**Densidade aparente**
	%	**g/cm³**	**g/cm³**	**g/cm³**
Agregado Natural	0,75%	2,669	2,64	2,62
Agregado Reciclado	5,5%	2,59	2,39	2,27
Peneira (mm)	**Passante acumulada ARCO**	**Passante acumulada Natural**	**Retido na classe ARCO**	**Retido na classe Natural**
0	0%	0%	3,61%	4,64%
4,75	4%	5%	0,81%	1,58%
6,3	4%	6%	8,58%	13,97%
9,5	13%	20%	27,89%	41,72%
12,7	41%	62%	47,68%	35,90%
19	89%	98%	11,02%	2,20%
25	100%	100%	0,42%	0,00%
Material pulverulento				
Agregado reciclado		1,9%		
Agregado Natural		Não realizado		

4.2.2. Formulação e caracterização dos concretos

Com o objetivo de comparar os efeitos do uso de *ARCO* e de estratégias de formulação de concretos de baixo consumo de cimento (*LEAP*), foram definidos 4 traços de concretos, sendo eles:

1) Concreto convencional com agregados naturais, (*AN* CONV)

2) Concreto *LEAP* com agregado natural; (*AN LEAP*)

3) Concreto convencional com *ARCO* graúdo; (*ARCO* CONV)

4) Concreto *LEAP* com *ARCO* graúdo. (*ARCO LEAP*)

Além dos materiais básicos (cimento e agregados), os concretos convencionais continham aditivo dispersante polifuncional, enquanto que os concretos *LEAP* continham fíler carbonático (Profine1 e Procarb5), para preencher os espaços vazios entre grãos de cimento (no caso do Profine 1, devido à menor granulometria), e outro fíler calcário (Procarb 5, com granulometria similar ao cimento) para substituir parcialmente e reduzir o cimento (efeito de diluição). Além disso, também foram utilizados dois aditivos dispersantes (polifuncional e superplastificante à base de policarboxilatos).

Os traços foram obtidos partindo de um traço inicial proposto, seguidos de ajustes experimentais sucessivos, buscando atingir uma classe de resistência de 30MPa e classe de consistência S100, para o concreto referência. A Tabela 8 apresenta os consumos dos materiais utilizados nos traços.

Tabela 8 – Traços utilizados.

Consumo de materiais (kg/m³)	Traço 1 *AN CONV*	Traço 2 *AN LEAP*	Traço 3 *ARCO CONV*	Traço 4 *ARCO CONV*
Cimento	329,9	206,0	323,8	202,3
Procarb 5	0,0	117,7	0,0	115,6
Profine 1	0,0	155,0	0,0	152,2
Areia Natural	325,2	314,6	319,1	309,0
Areia Artificial	479,6	464,0	470,7	455,7
Agregado Graúdo Natural (*NA*)	996,5	964,2	0,0	0,0
Agregado Graúdo Reciclado (*ARCO*)	0,0	0,0	837,8	811,2
Água total	219,1	182,6	242,7	197,1
[1]Consumo de água pré saturação *NA*	5,2	5,1	0,0	0,0
[1]Consumo de água de pré saturação *ARCO*	0,0	0,0	32,3	31,2
% aditivo poli funcional	0,8%	2,3%	0,8%	0,6%
% aditivo *SP*	0,0%	2,0%	0,0%	0,8%
Relação água/cimento efetiva	0,65	0,86	0,65	0,86
Água Livre (*FW*) % - Eq. 3.3 (Item 3.2.1)	15,3%	14,1%	18,9%	17,6%
Classe de consistência [147] - *Slump* (cm)	S100	S160	S100	S160

[1] - Água de Pré-Saturação calculada como: 70% da absorção de água(24h) * consumo de agregados.

No traço 2, *AN LEAP*, houve desvio de pesagem nos aditivos, resultando em um teor de aditivo além do necessário. Em pesquisas futuras, recomenda-se redefinir os valores de aditivos. No traço 4 (*ARCO LEAP*) a dosagem foi corrigida, sem diferenças relevantes no abatimento, comparado ao traço 2.

Para cada traço foi calculada a porosidade de empacotamento dos materiais sólidos a partir do Método do Empacotamento Compressível, proposto por De Larrard (1999) [86], adotando parâmetro de compactação k=9 e porosidade das frações discretas 0,4. A Tabela 9 apresenta as porosidades residuais do empacotamento estimadas.

Tabela 9 – Porosidade de empacotamento dos concretos elaborados

Formulação	Porosidade de empacotamento Finos	Porosidade de empacotamento Grossos	Porosidade de empacotamento Total
Traço 1 – *AN CONV.*	22,3%	19,0%	9,7%
Traço 2 – *AN LEAP*	21,3%	19,0%	9,2%
Traço 3 – *ARCO CONV.*	22,3%	18,3%	9,4%
Traço 4 – *ARCO LEAP*	21,3%	18,3%	9,0%
(1) Diâmetro corte finos/grossos (mm):	0,106		
(2) porosidade frações discretas:	constante=0,4		

Foi adotado o método de mistura em duas etapas (TSMA [148]), seguindo as seguintes etapas: 1) Inserção dos agregados graúdos na betoneira e pré-saturação 2) Após 10 minutos de espera, foram adicionados os agregados miúdos, seguido de mistura por 60 segundos; 3) Inserção de metade da água de abatimento, seguido de mistura por 60 segundos; 4) Inserção do cimento e fíler, seguido de mistura por 30 segundos; 5) Inserção da outra metade da água, junto com aditivos e mistura por 120 segundos.

O programa experimental foi planejado para moldagem de 30 corpos de prova (*CP*) cilíndricos (diâmetro de 10cm, altura de 20cm), entretanto devido à dificuldades quanto à execução, não conseguiu-se moldar 30 corpos de prova para os traços *LEAP's*. Foram moldados 25 corpos de prova para o Traço 2 (*LEAP* com agregado natural) e 24 corpos de prova para o Traço 4 (*LEAP* com agregado reciclado), totalizando cerca de 109 CPs, conforme a NBR 5738:2016 (ABNT, 2016) [149]. O adensamento foi realizado em duas camadas com uso de haste de compactação, desmoldados 1 dia após a concretagem e mantidos em camara úmida por 28 dias. Os corpos de prova tiveram sua base preparada para avaliação das propriedades mecânicas por máquina retificadora.

Todos os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, adaptando o método normalmente empregado em argamassas da NBR 15630:2009 (ABNT,2009) [150], com equipamento propagador de ondas ultra sônicas modelo Pundit Lab+ Proceq, com frequência de onda de 54kHz. Para realização deste ensaio, foi realizada medida da densidade do concreto, na condição *SSS*, adaptando-se a NBR 13280:2005 (ABNT, 2005) [151]: Os *CP's* foram secos em pano e a massa na condição saturada superfície seca determinada. O volume aparente foi determinado com auxílio de paquímetro, tomando-se a média de 3 medidas do comprimento e diâmetro do corpo de prova, em posições diferentes.

Em seguida, para cada traço, foram realizados ensaios de compressão uniaxial em 13 corpos de prova, possibilitando, além da determinação da resistência à compressão do concreto, a delimitação dos parâmetros de ensaios de módulo de elasticidade estático (delimitar a carga a tensão aplicada até 30% da resistência à ruptura). Após isso, outros 7 *CP's* foram avaliados quanto ao módulo de elasticidade estático, e posterior ruptura para a determinação da resistência à compressão no mesmo corpo de prova. Nos concretos convencionais, com os 10 *CP's* restantes, 7 destes foram utilizados para avaliar a resistência à tração na compressão diametral, enquanto nos concretos *LEAP* a resistência à tração na compressão foi realizada em todos os *CP's* restantes (5 *CP's* para o *LEAP* convencional e 4 para o *LEAP* reciclado), conforme a NBR 7222:2011 (ABNT, 2011) [152], com taxa de aplicação de carga de 5kN/segundo,

Todos os ensaios mecânicos foram realizados com o corpo de prova na condição saturada superfície seca, em máquina Shimadzu modelo UH2000kN.

A resistência a compressão foi avaliada conforme a NBR 5739:2018 (ABNT, 2018) [153], com taxa de aplicação de carga de 4kN/segundo. Os resultados de carga de ruptura para os corpos de prova que apresentaram relação altura/diâmetro fora dos limites (h/d=2) estabelecidos em [153] tiveram um fator de correção aplicado, a partir de interpolação linear dos valores de fator de correção apresentados na respectiva norma.

O módulo de elasticidade estático foi obtido conforme NBR 8522:2017 (ABNT, 2017) [154], de acordo com a Metodologia A (descrita no Item 7.2.1 da respectiva norma), com tensão fixa (30% da tensão de ruptura), com ciclos de aplicação de carga, com velocidade de 200kN/minuto, utilizando LVDT's de 100mm.

Nos concretos convencionais, a absorção de água e massa específica foram avaliadas em três corpos de prova cílindricos inteiros usando o método proposto pela NBR9778:2009 (ABNT, 2009) [141]. Os *CPs*, após 28 dias em câmara úmida, foram secos com pano na condição saturada superfície seca, e a tiveram sua massa determinada. O volume de sólidos dos *CPs* foi determinado por meio da balança hidrostática. A massa seca dos *CPs* foi avaliada após secagem em estufa a 100 ^{o}C por 24 horas. Para aumentar a quantidade de amostras no ensaio de absorção, e viabilizar essa medida nos concretos *LEAP* (onde não sobraram *CP's* integros suficientes para este ensaio) decidiu-se adaptar o mesmo procedimento realizando-o com fragmentos de corpos de prova resultantes do ensaio de tração à compressão diametral e comparados para validação.

A Figura 34 ilustra as principais etapas e avaliações deste programa experimental, com as respectivas divisões, contendo o número de corpos de prova por propriedade avaliada.

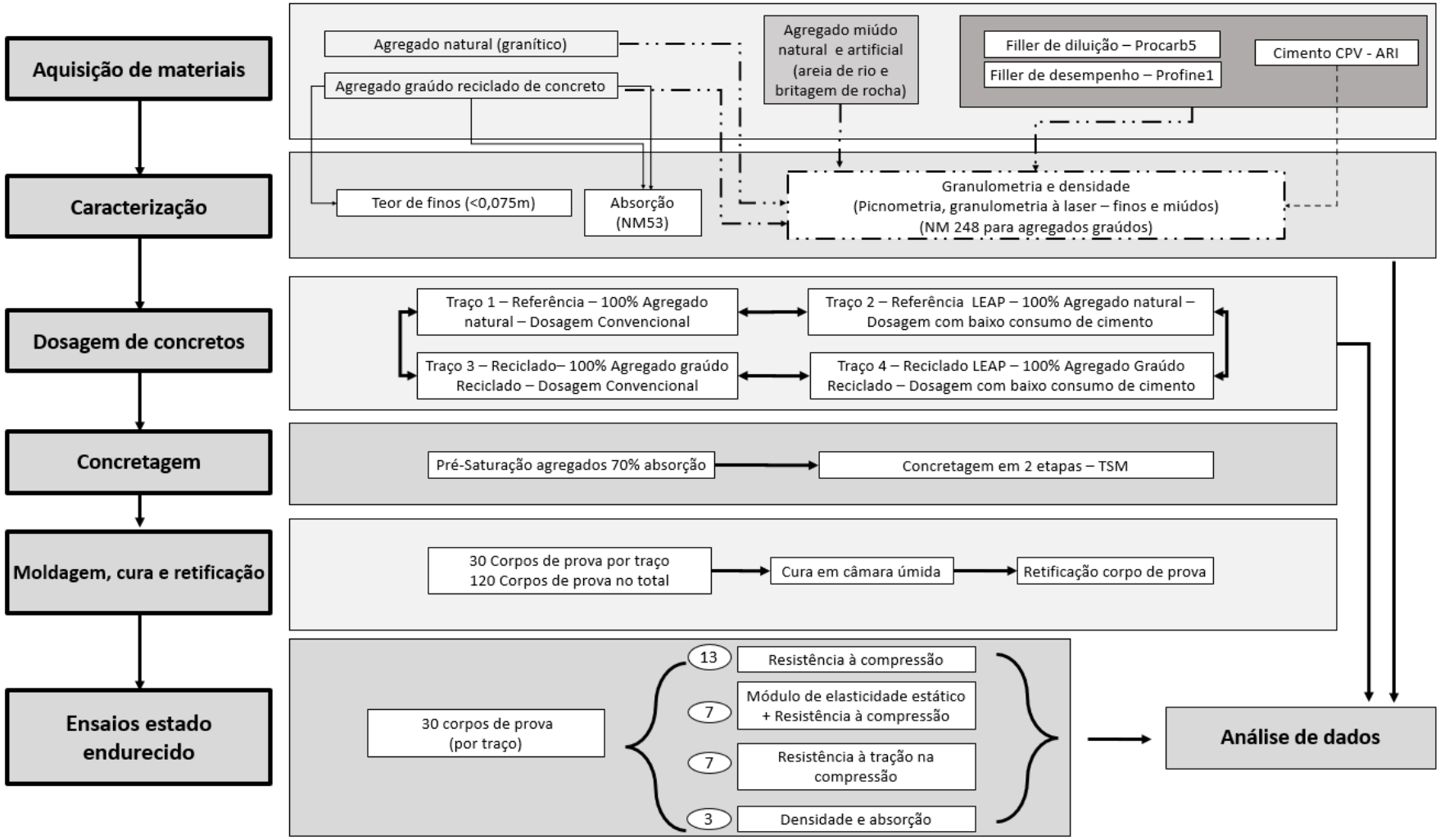


Figura 34 – Fluxograma das principais etapas do programa experimental. (Fonte: Autor)

4.3. Resultados

4.3.1. Propriedades físicas do concreto

A Figura 35 apresenta os resultados de densidade conforme NBR 9778:2009 [141] com *CP's* integros e com fragmentos de *CP's* para os traços com concretos convencionais, visando verificar a viabilidade de ampliar o número de amostras disponíveis para o estudo, uma vez que não foi possível moldar quantidade suficiente de corpos de prova em todos os traços para realizar este ensaio.

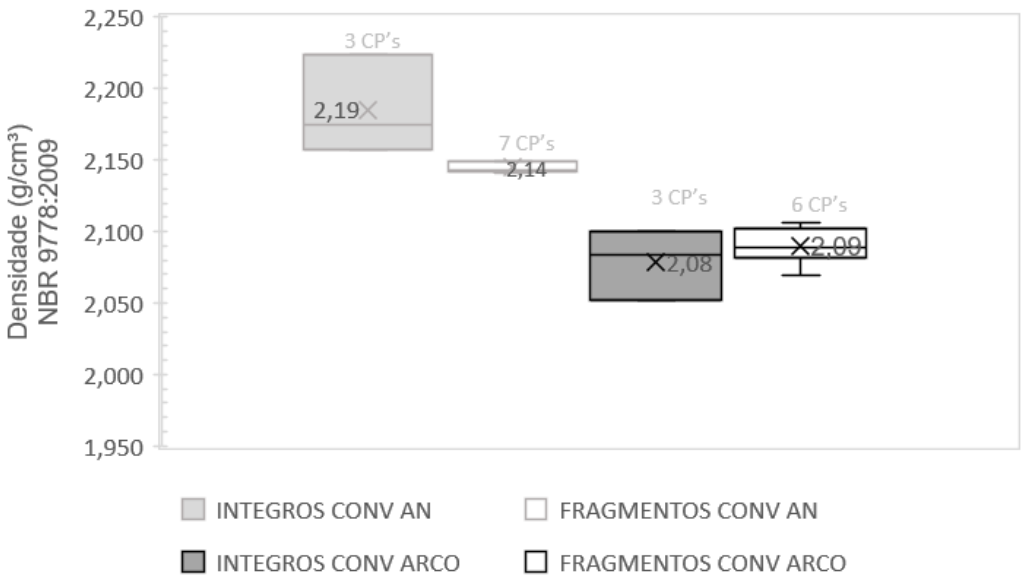


Figura 35 – Resultados da densidade dos concretos íntegros e dos fragmentos

A Figura 36 apresenta os resultados de absorção de água dos concretos íntegros e dos fragmentos. Nota-se uma maior absorção dos fragmentos em relação aos *CP's* íntegros.

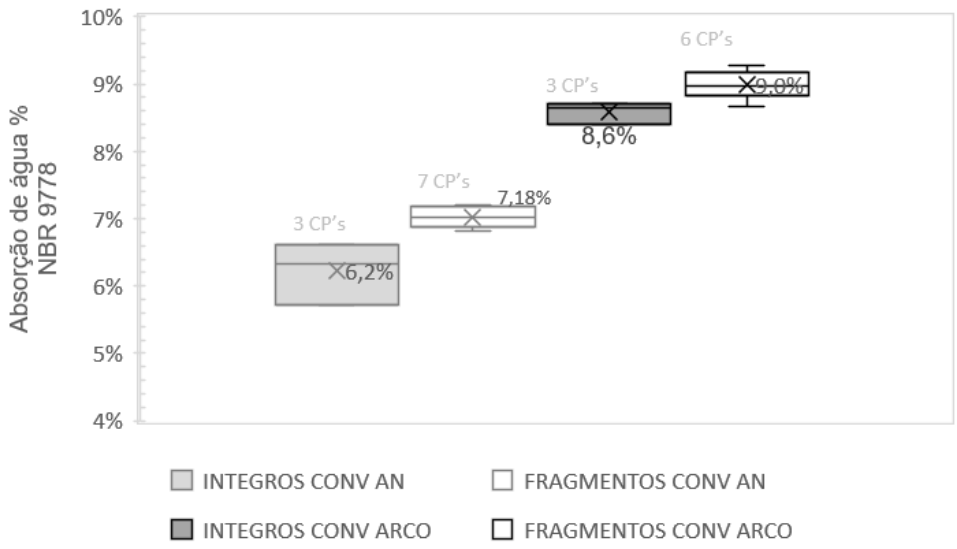


Figura 36 – Resultados de absorção de água dos concretos íntegros e fragmentos.

A Figura 37 apresenta a relação entre a absorção de água e a densidade dos concretos íntegros e dos fragmentos, dos traços convencionais.

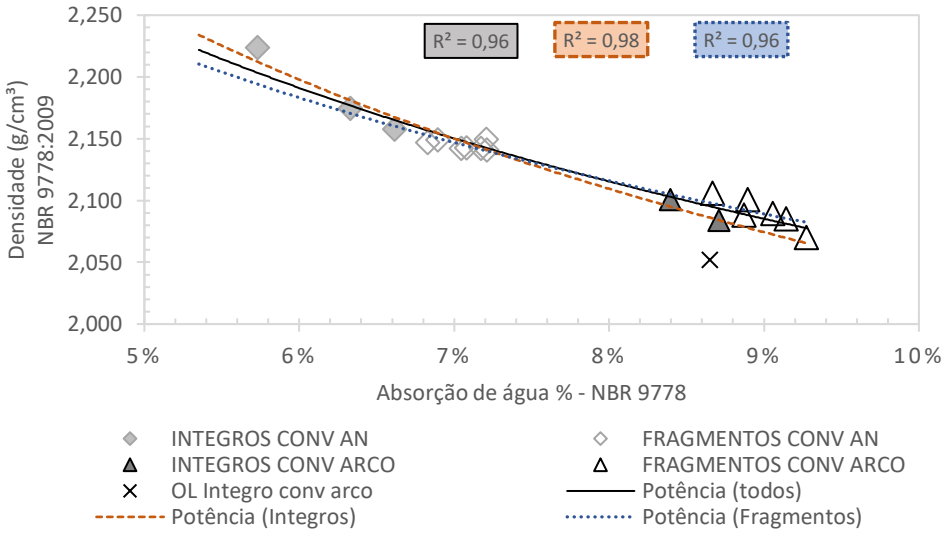


Figura 37 – Absorção de água vs Densidade

Nota-se uma ligeira diferença entre as correlações dos corpos de prova íntegros e dos fragmentos, porém, todas as 3 curvas entre absorção de água e densidade (contendo corpos integros, fragmentos e o conjunto) apresentam altos valores de R^2 e estão muito próximas. Assim, considerou-se este método para ampliar o número de amostras, juntando os dados dos corpos de prova íntegros e dos fragmentos como uma única amostra, possibilitando comparar os traços de concretos convencionais e concretos *LEAP*.

A Figura 38 e a Tabela 10 apresentam os resultados de densidade *SSS*, conforme NBR 9778:2009 [141], juntando os dados dos corpos de prova íntegros e dos fragmentos. São apresentados em todas as tabelas de resultados, a quantidade de amostras, resultados médios, mínimos, máximos, medianas, o desvio padrão populacional (*SD*) o coeficiente de variação (*SD*/Média).

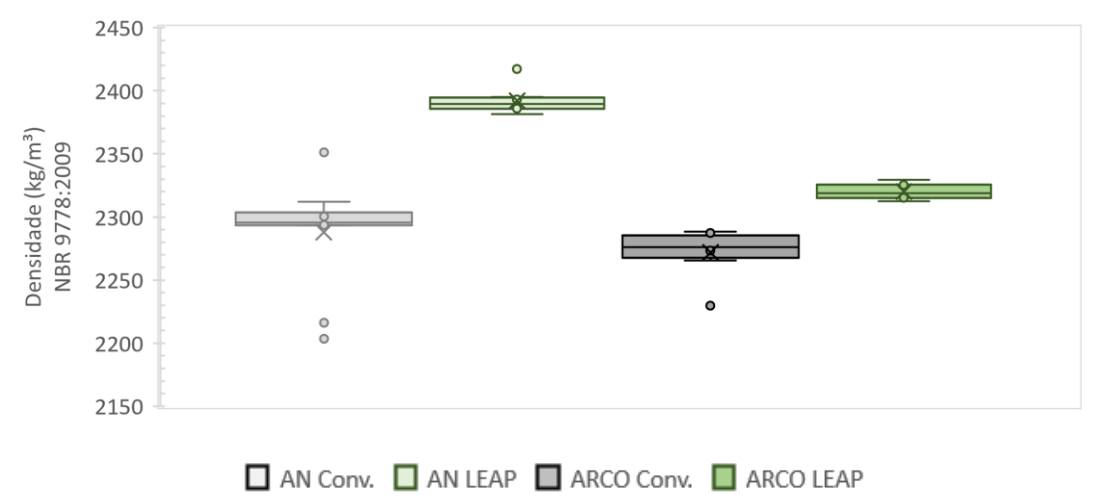


Figura 38 – Resultados de densidade com balança hidrostática conforme NBR 9778:2009 [141]

Tabela 10 - Resultados de densidade usando balança hidrostática – NBR 9778 [141]

Densidade (kg/m³) NBR 9778– 34 amostras								
Traço	Descrição	Qtd de amostras	Média	Mediana	*SD*	*COV* (%)	MÍN	MÁX
1	*AN CONV.*	10	2288,1	2389,6	38,3	1,67%	2203,5	2351,1
2	*AN LEAP*	8	2392,3	2389,6	10,3	0,43%	2381,5	2417,3
3	*ARCO CONV.*	9	2271,9	2276,3	17,4	0,77%	2229,6	2288,40
4	*ARCO LEAP*	7	2320,0	2318,9	5,4	0,23%	2312,4	2329,4

Nota-se um aumento da densidade com a inclusão de estratégias para redução do consumo de cimento, devido à inserção do fíler com granulometria inferior a do cimento, e redução da quantidade de água efetiva. Nota-se também uma redução da densidade quando utilizados agregados reciclados, devido à menor densidade do agregado.

A Figura 39 e a Tabela 11 apresentam os resultados de absorção de água conforme NBR 9778:2009 [141]. Como esperado, os resultados encontrados de absorção se apresentam inversamente proporcionais aos resultados de densidade. A inclusão de agregados reciclados

aumenta a absorção de água, enquanto o uso de estratégias para concreto *LEAP* reduz. O efeito da inclusão de *ARCO* é mais relevante. Nota-se uma redução da variabilidade (*COV*%) desta propriedade quanto incluído *ARCO* no concreto.

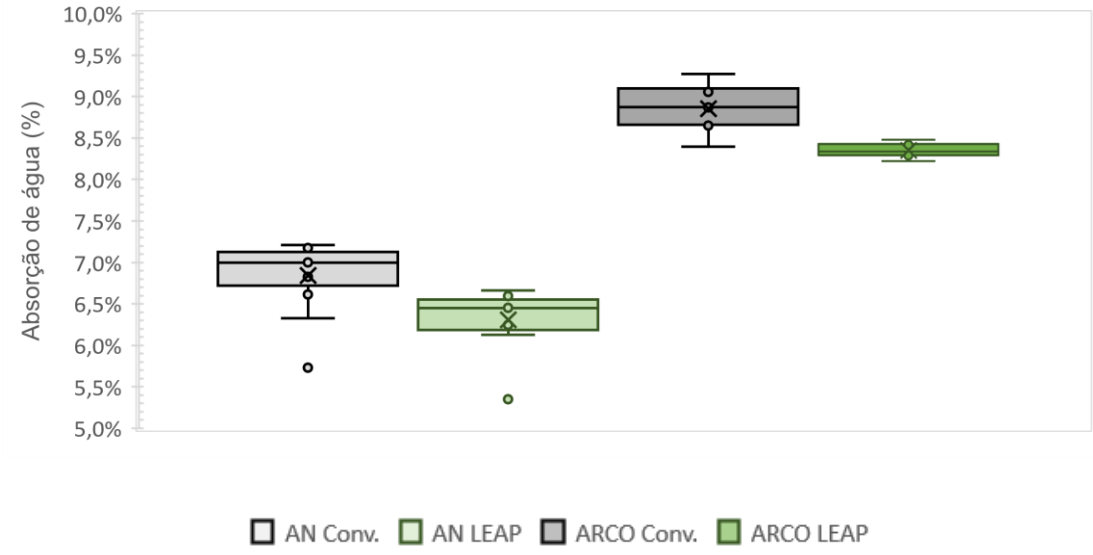


Figura 39 – Resultados de absorção de água conforme NBR 9778 [141]

Tabela 11 - Resultados de absorção de água conforme NBR9778:2009 [141]

Absorção de água (%) – 34 amostras								
Traço	Descrição	Qtd de amostras	Média	Mediana	*SD*	*COV* (%)	MÍN	MÁX
1	*AN CONV.*	10	6,8%	7,0%	0,4%	5,85%	5,7%	7,2%
2	*AN LEAP*	8	6,3%	6,4%	0,4%	5,93%	5,4%	6,7%
3	*ARCO CONV.*	9	8,9%	8,9%	0,3%	2,95%	8,4%	9,3%
4	*ARCO LEAP*	7	8,4%	8,3%	0,1%	0,97%	8,2%	8,5%

4.3.2. Propriedades mecânicas do concreto

A Figura 40 e a Tabela 12 apresentam os resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial. Como esperado, nota-se uma redução da resistência à compressão com a inserção de *ARCO* no concreto. Em dosagens *LEAP*, há uma redução da resistência à compressão; porém, há também uma redução significativa no consumo de cimento. A análise de eficiência no uso do cimento através do Índice intensidade de ligante será discutida no subtítulo 4.3.3. Há um discreto aumento da variabilidade para concretos *LEAP* nesta propriedade, entretanto, os resultados de desvio padrão (*SD*) encontrados são menores que o

desvio padrão mínimo do concreto (2MPa) à ser considerado pela NBR 12655:2015 (ABNT,2015) [29].

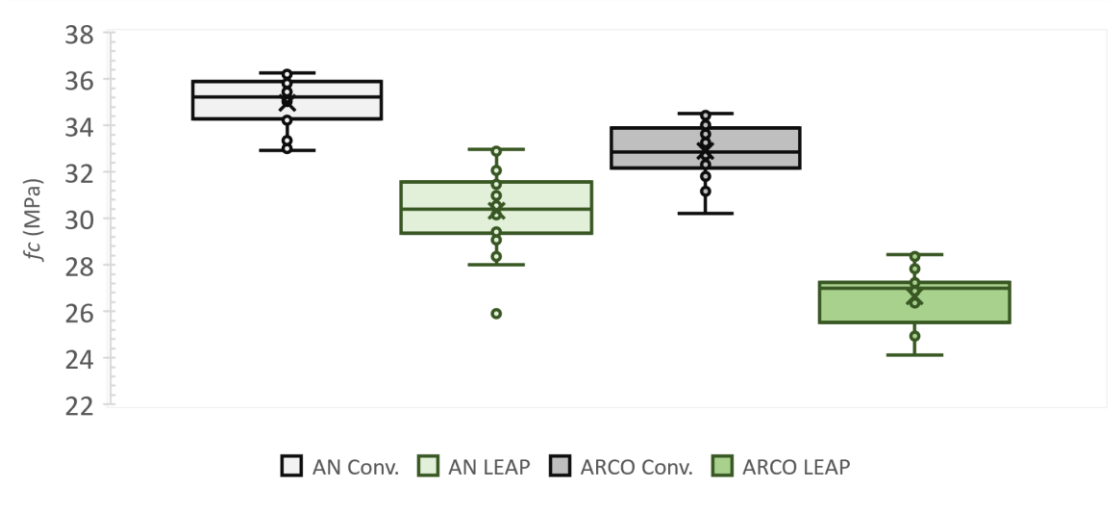


Figura 40 – Resultados de resistência à compressão uniaxial (*fc*).

Tabela 12 – Resultados de resistência à compressão uniaxial.

Resistência à Compressão (MPa) – 80 amostras								
Traço	Descrição	Qtd. De amostras	Média	Mediana	*SD* (MPa)	*COV* (%)	MÍN	MÁX
1	*AN CONV.*	20	34,98	35,23	1,06	3,0%	32,94	36,25
2	*AN LEAP*	20	30,56	30,40	1,35	4,4%	28,00	32,96
3	*ARCO CONV.*	20	32,90	32,87	1,13	3,4%	30,20	34,52
4	*ARCO LEAP*	20	26,65	27,00	1,16	4,4%	24,13	28,44

A Figura 41 ilustra os resultados obtidos de resistência à compressão dentro do modelo proposto no capítulo 3 (Figura 25b), que relaciona resistência com o índice água livre (*FW*) (Eq. 3.2 capítulo 3) , que representa a quantidade de vazios do concreto. Outros dados da literatura contendo concretos *LEAP* com agregados naturais, de Rebmann (2011) e Damineli (2013) [87], [155] e, também foram inseridos dentro do modelo para efeitos de comparação.

Damineli (2013) [87] elaborou concretos *LEAP* com *Qc* [110-270] CP-V (alto teor de clínquer) e fíllers, bem abaixo do valor mínimo de *Qc* recomendado de 250kg/m³ de muitas normas. Rebmann (2011) [155] utilizou agregados basálticos, com adições minerais como microsilica, metacaulim e alguns traços com cimento CP III, tendo os concretos referência (Rebmann (2011) REF) um *Qc* [425-437], enquanto os concretos LEAP (Rebmann (2011) *LEAP*), tinham *Qc* [200-280].

Rebmann (2011) [155] realizou ensaios de índice de vazios no concreto. Devido à uma diferença na composição e na reação química, devido às adições minerais, para obter a Água livre, apresentada no capítulo 3, a *FW* foi calculada não pelo traço original, (usando a equação 3.3 do capítulo 3) mas sim convertendo os resultados dos ensaios com dados primários de índice de vazios de Rebmann (2011) [155] com auxílio da equação da linha de tendência do modelo proposto no capítulo 3 (Figura 24b).

Foi traçada uma linha de tendência para os concretos *LEAP* de Rebman (2011) e Damineli (2013) [87], [155]. Os dados experimentais desta pesquisa, para efeito de comparação, não foram incluídos nas linhas de tendência traçadas.

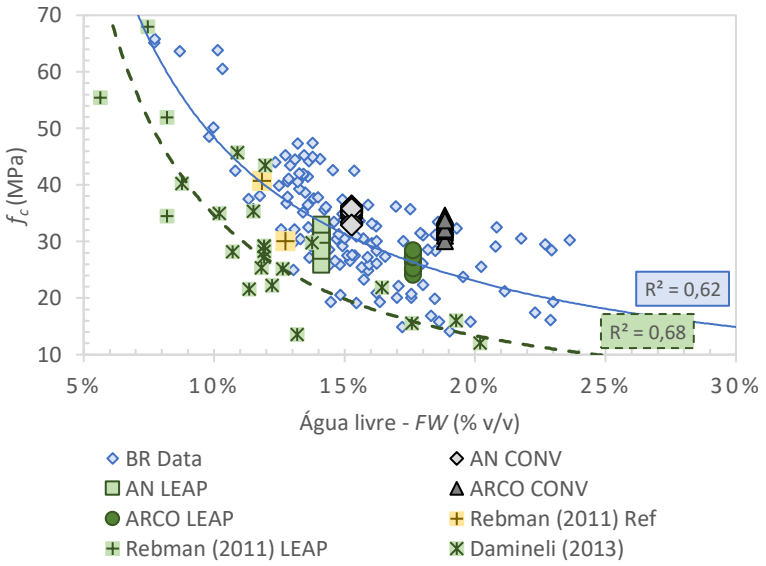


Figura 41 – Resultados experimentais de resistência à compressão (*fc*) vs. Correlações encontradas no capítulo 3 (Figura 25(b)) vs dados de concretos LEAP da literatura [87], [155].

A linha de tendência dos concretos *LEAP* apresenta-se abaixo da linha de tendência dos concretos convencionais, proposta no capítulo 3. Isso pode ocorrer devido à uma redução drástica do consumo de ligante (que será discutido no tópico 4.3.3.) em função da substituição por filler carbonático, que, quando mantida a relação água/sólidos, implica em maiores W/C_{ef}. Esse aumento pode implicar em maiores poros e interconectados, podendo impactar a resistência do concreto, consoante a análise destacada por Oliveira (2020) [156]. Nos dados apresentados, os concretos de Rebman (2011) variaram a W/C_{ef} entre 0,42 e 0,63, enquanto os de Damineli (2013) variaram a W/C_{ef} entre 0,57 e 1,27. Além disso, pode-se considerar variações referente à simplicidade da calibração da equação da *FW*, considerando a água

combinada por tipo de cimento, e adições (Rebmann 2011 utilizou pozolanas como adições minerais extras à mistura).

Os dados experimentais convencionais (*AN CONV* e *ARCO CONV*) apresentaram-se dentro da nuvem de pontos esperada, enquanto os concretos *LEAP* apresentaram-se pouco abaixo da linha de tendência para convencionais, e acima da linha de tendência de concretos *LEAP* com dados de Rebmann (2011) e Daminelli (2013). Nota-se que é possível executar concretos com baixo consumo de cimento, com resistências estruturais, e com relação água cimento efetiva muito maior (0,86 no programa experimental), devido à um menor consumo de cimento (e de água total no concreto), mesmo somente com agregados reciclados, estando fora dos valores sugeridos pelas ABNT NBR 6118:2014 [30] e ABNT NBR 15116:2021 [2]. Contudo, sabe-se que estes concretos precisam ser utilizados em ambientes de baixa agressividade, pois em ambientes de maior agressividade, pode apresentar problemas de durabilidade, que não foram avaliados nesta pesquisa, tais como corrosão do concreto armado, por baixa reserva alcalina, poros grandes e interconectados acessíveis a umidade, oxigênio, entre outros [157].

A Figura 42 e a Tabela 13 apresentam os resultados de resistência à tração na compressão diametral. Nota-se uma redução da resistência à tração média quando inserido *ARCO* ou estratégias de redução do consumo de cimento, com observação quanto à eficiência no uso do cimento similar a feita na Figura 40. A quantidade de amostras para esta propriedade foi considerada pequena para análise de variabilidade.

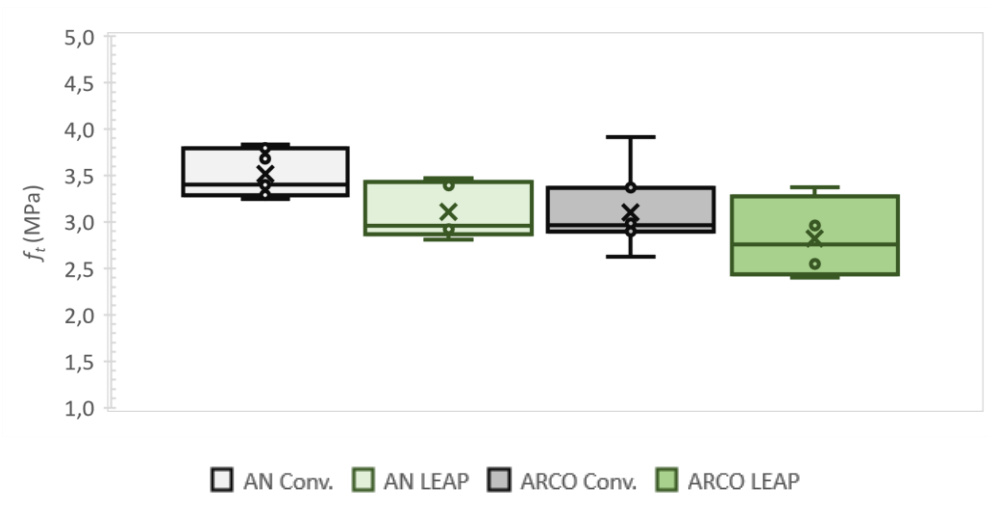
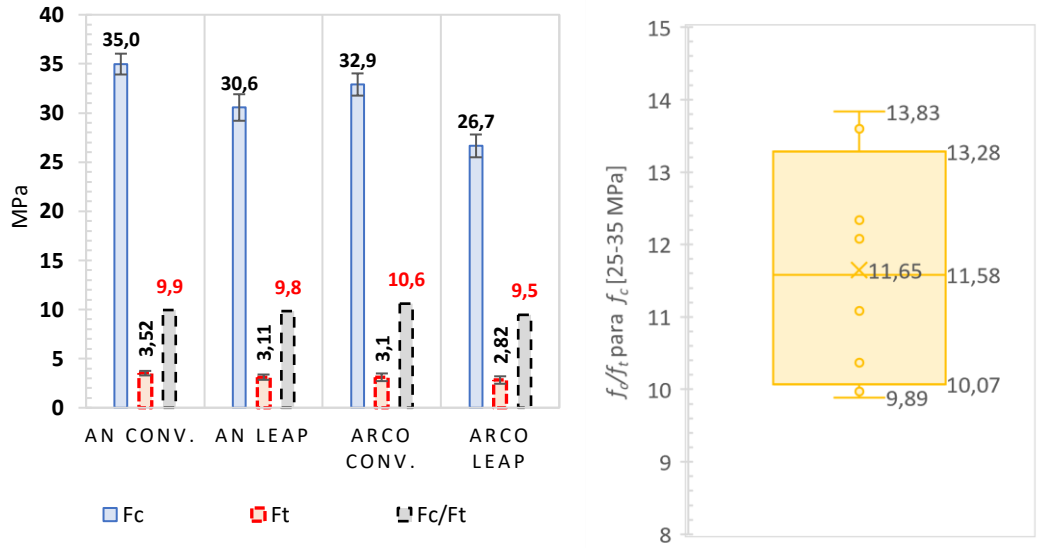


Figura 42 - Resultados de resistência à tração na compressão diametral (f_t).

Tabela 13 – Resultados de resistência à tração na compressão diametral.

Resistência à tração na Compressão (MPa) – 23 amostras								
Traço	Descrição	Qtd de amostras	Média	Mediana	*SD* (MPa)	*COV* (%)	MÍN	MÁX
1	*AN CONV.*	7	3,52	3,40	0,23	6,5%	3,25	3,84
2	*AN LEAP*	5	3,11	2,96	0,27	8,6%	2,81	3,47
3	*ARCO CONV.*	7	3,10	2,97	0,39	12,6%	2,62	3,92
4	*ARCO LEAP*	4	2,82	2,76	0,38	13,5%	2,40	3,38

A Figura 43 apresenta a relação entre resistência à compressão média (f_c) e resistência à tração na compressão diametral média (f_t), comparando os resultados com as relações obtidas nos outros estudos do capítulo 3, para a mesma faixa de resistência (f_c [25-35MPa]). Os resultados apresentam-se dentro do esperado, com resistência à tração na compressão de cerca de 10% da resistência à compressão (f_c/f_t ~10).



(a) (b)

Figura 43 –(a) Resistência à compressão (f_c) vs resistência à tração na compressão (f_t) – Dados experimentais (b) Relação entre resistência à compressão/tração (f_c/f_t) – Dados dos concretos do capítulo 3 para f_c [25-35].

A Figura 44 e a Tabela 14 apresentam os resultados de módulo de elasticidade dinâmico. Nota-se que o uso de agregados reciclados reduz o módulo de elasticidade dinâmico, enquanto o uso de estratégias para concretos com baixo consumo de cimento aumenta o módulo de elasticidade dinâmico. O efeito da incorporação de *ARCO* é maior. O aumento da módulo de elasticidade dinâmico nos concretos *LEAP* poder estar associado a redução da porosidade total, devido ao preenchimento dos vazios, originalmente deixados pela pasta de cimento, com a inserção do fíler carbonático de menor granulometria, em concordância com o cálculo de *FW*

do traço, e dos resultados encontrados para densidade *SSS* e absorção de água. Observou-se conclusão similar aos resultados encontrados por Oliveira (2020) [156]. Não há indícios de alteração de variabilidade desta propriedade.

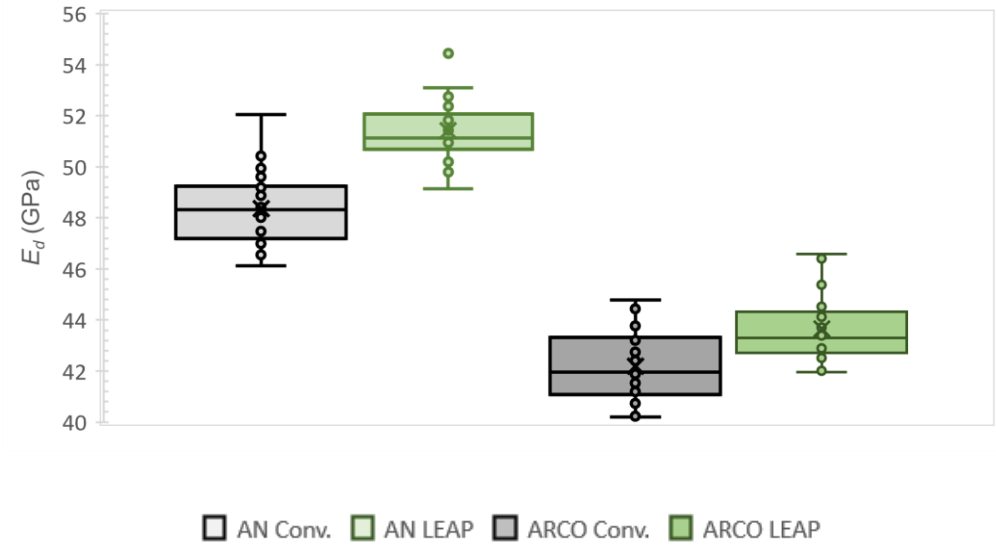


Figura 44 – Resultados de módulo de elasticidade dinâmico (E_d)

Tabela 14 – Resultados de módulo de elasticidade dinâmico

Módulo de elasticidade dinâmico (GPa) – 109 amostras								
Traço	Descrição	Qtd de amostras	Média	Mediana	*SD* (MPa)	*COV* (%)	MÍN	MÁX
1	*AN CONV.*	30	48,35	48,32	1,31	2,7%	46,12	52,04
2	*AN LEAP*	25	51,43	51,12	1,14	2,2%	49,13	54,44
3	*ARCO CONV.*	30	42,18	41,96	1,33	3,1%	40,21	44,78
4	*ARCO LEAP*	24	43,65	43,29	1,22	2,8%	41,95	46,59

A Figura 45 e a Tabela 15 apresentam os resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático. Durante a execução dos ensaios de módulo de elasticidade estático, houve no concreto *LEAP* com agregados naturais falha irrecuperável em alguns dados extraídos do software de leitura dos LVDT's sem razão específica, e por isso estes estão apresentados em um número menor de amostras na Figura 45. Os outros traços não apresentaram problemas. O número de amostras foi considerado pequeno para avaliar a variabilidade da propriedade.

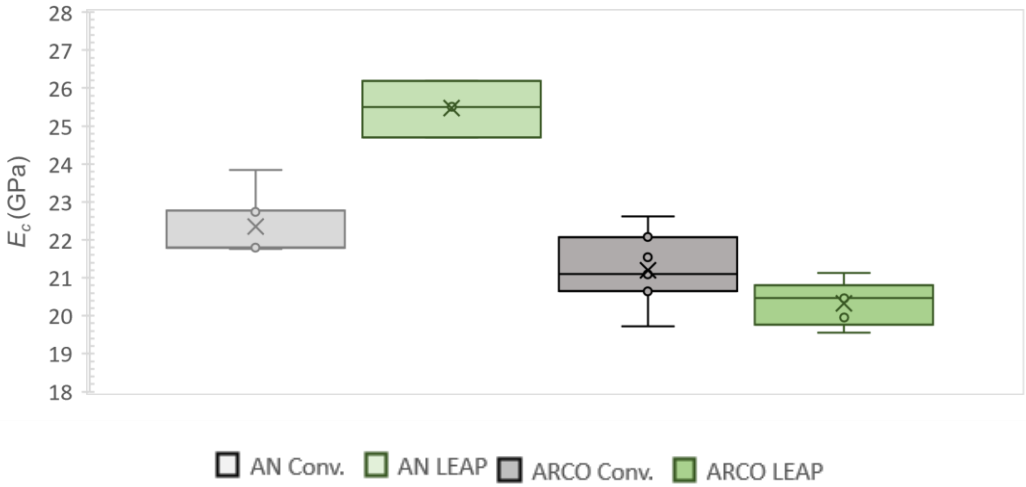


Figura 45 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático (E_c).

Tabela 15 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático.

Módulo de elasticidade estático (MPa) – 22 amostras								
Traço	Descrição	Qtd de amostras	Média	Mediana	*SD* (MPa)	*COV* (%)	MÍN	MÁX
1	*AN CONV.*	7	22,36	21,81	0,74	3,3%	21,76	23,84
2	*AN LEAP*	3	25,47	25,51	0,61	2,4%	24,70	26,19
3	*ARCO CONV.*	7	21,19	21,10	0,61	2,4%	19,72	22,62
4	*ARCO LEAP*	5	20,32	20,47	0,53	2,6%	19,56	21,13

Nota-se uma redução do módulo de elasticidade com o uso de *ARCO*, assim como no módulo de elasticidade dinâmico, entretanto, no ensaio de módulo de elasticidade estático a adoção de estratégias para reduzir o consumo de cimento resultou numa redução do módulo de elasticidade estático.

A Figura 46 mostra os resultados de módulo de elasticidade estático (E_c) dentro do modelo proposto pela Figura 25.

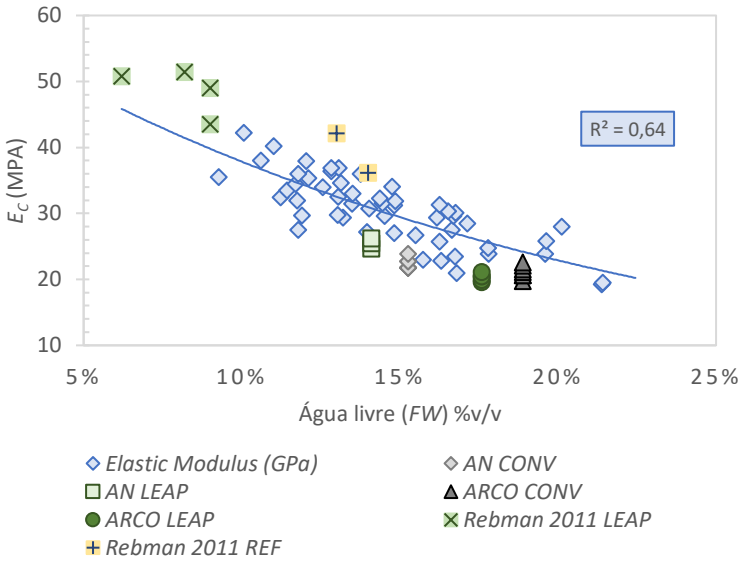


Figura 46 – Resultados experimentais para módulo de elasticidade estático (E_c) dentro do modelo proposto no capítulo 3 (Figura 25), com inserção de dados LEAP da literatura [155].

A Figura 47 apresenta comparação entre o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e o módulo de elasticidade estático (E_c), comparando com outras modelos encontrados na literatura [158], [159]. Devido ao ensaio ter sido realizado com o CP saturado, foi feita uma conversão dos dados saturados para ser comparados com dados realizados no estado seco da literatura. Foi utilizada equação proposta por Kazmierczak *et al*. [160] para a conversão.

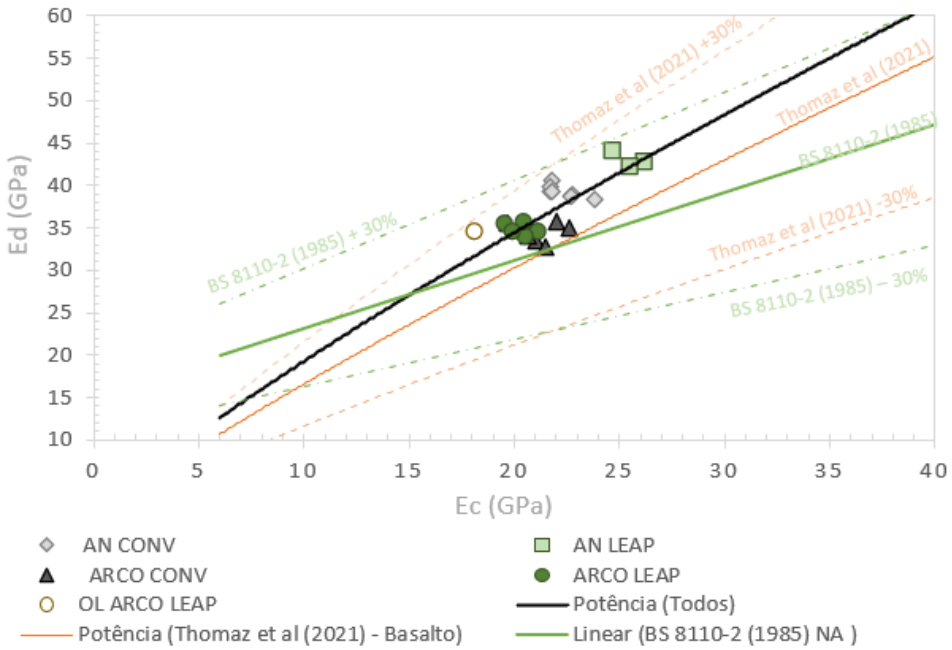


Figura 47 –Módulo de elasticidade estático (*Ec*) vs Módulo de elasticidade dinâmico (*Ed*) vs modelos da literatura [158], [159]

Nota-se que os dados apresentam-se dentro das faixas de previsão de comportamento da literatura quando as equações são somadas à uma variação de até 30%, com linha de tendência similar à encontrada por Thomaz *et al.*[159]. O módulo dinâmico é sempre maior que o estático, como também encontrados na literatura.

A Figura 48 apresenta comparação entre os resultados experimentais de módulo de elasticidade estático (E_c) e de resistência à compressão (f_c), incluindo os resultados obtidos por Rebmann (2011). Nota-se que os dados experimentais também apresentam-se dentro das faixas de previsão de comportamento da literatura quando as equações são somadas à uma variação de até 30%.

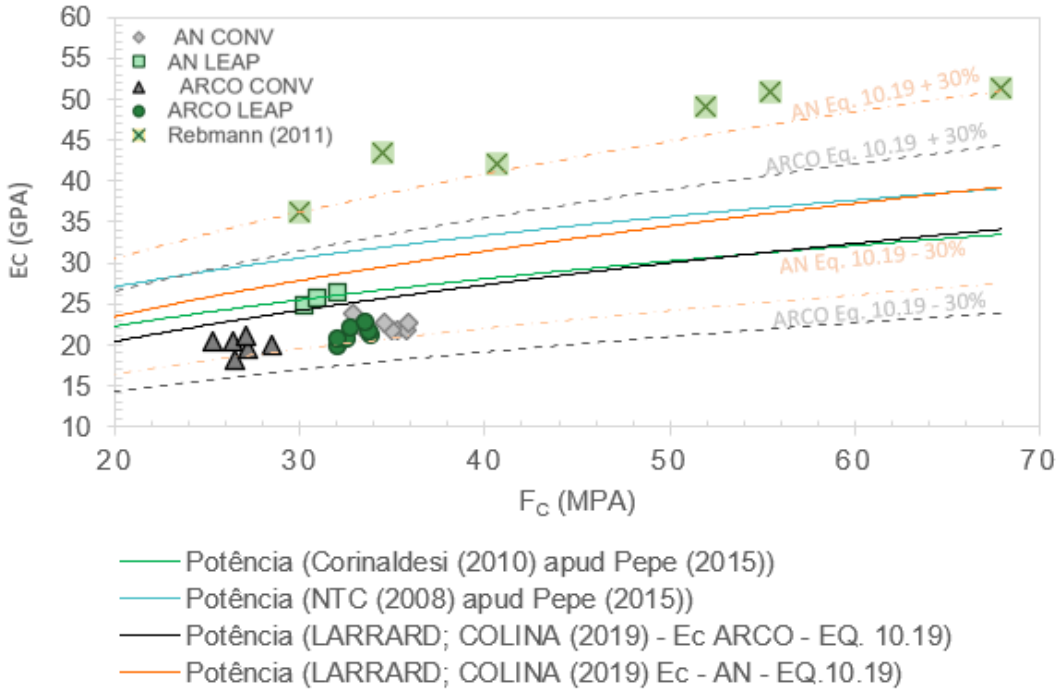


Figura 48 – Relação entre módulo de elasticidade estático (E_c) e resistência à compressão (f_c) vs Dados e Modelos da literatura [27], [115], [155], [161]

4.3.3. Avaliação de eficiência no uso do cimento.

Os resultados obtidos neste programa experimental também puderam ser comparados com os dados de índice intensidade de ligante (*bi*) obtidos no capítulo 3, e comparados com outros dados da literatura de concretos *LEAP* [23], [87], [155], ilustrados na Figura 49 e Tabela 16.

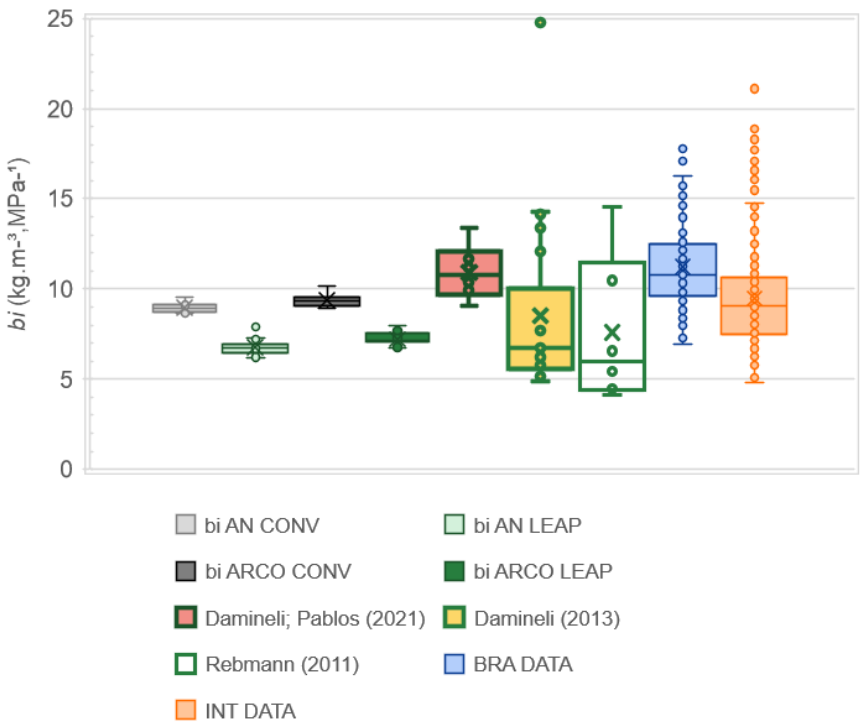


Figura 49 -Análise comparativa do índice intensidade de ligante obtidos experimentalmente vs dados da literatura coletada no capítulo 3 e dados LEAP da literatura [23], [87], [155].

Tabela 16 – Resultados do Índice intensidade de ligante obtidos experimentalmente

Índice intensidade de ligante (kg/m³) – 80 amostras								
Traço	Descrição	Qtd de amostras	Média	Mediana	*SD* (MPa)	*COV* (%)	MÍN	MÁX
1	*AN CONV.*	20	8,97	8,90	0,28	3,2%	8,65	9,52
2	*AN LEAP*	20	6,76	6,72	0,40	5,9%	6,20	7,89
3	*ARCO CONV.*	20	9,36	9,36	0,34	3,6%	8,91	10,18
4	*ARCO LEAP*	20	7,23	7,12	0,33	4,6%	6,76	7,97

A redução do *bi* ocorre em função da redução do consumo de cimento, ainda que haja uma redução da resistência à compressão. A Tabela 17 resume os dados relativos ao índice intensidade de ligante. Quando comparados ao concreto convencional com agregados naturais, a inclusão de estratégias *LEAP*, apesar de produzir redução na resistência, promove grande redução no consumo de cimento, ainda que para concretos com agregados reciclados, reduzindo em quase 20% o *bi*.

Tabela 17 – Resumo do índice intensidade de ligante

	AN CONV	*AN LEAP*	*ARCO CONV*	*ARCO LEAP*
Qc (kg/m³)	329,9	206,0	323,8	202,3
f_c média (MPa)	35,0	30,6	32,9	26,7
bi médio (kg*m^{-3}*MPa*$^{-1}$)	9,0	6,8	9,4	7,2
Redução de *Qc* (em relação ao AN CONV)	0,0%	37,6%	1,8%	38,7%
Redução de f_c média (em relação ao AN CONV)	0,0%	12,6%	5,9%	23,8%
Redução de *bi* médio (em relação ao AN CONV)	0,0%	24,6%	-4,4%	19,4%

Conforme visto no capítulo 3, o *bi* pode variar em função da trabalhabilidade; b) Requisitos mínimos de *Qc* devido à durabilidade; c) A relação W/C_{ef} e a resistência à compressão; d) a classe de resistência do cimento ($f_{pc,min}$); e) as características do agregado (*Ww*). A Figura 50 mostra a inserção dos dados experimentais de *bi* dentro do modelo da Figura.29f, em W/C_{ef}[> 0,55] e $f_{pc,min}$ [42]. Dados de Rebman (2011), Damineli (2013) e Damineli;Pablos (2021) [23], [87], [155] também foram inseridos.

Os concretos experimentais convencionais desta pesquisa encontram-se dentro da faixa aceitável de *bi*, enquanto os concreto LEAP obtidos nessa pesquisa apresentam-se dentro da faixa excelente de *bi* (com *Qb* e *Qc* <250kg/m³), em faixa de resistência estrutural, com classe de abatimento S160, em conjunto com os concretos com agregados naturais de Rebman (2011) e Damineli (2013), ainda que usando 100% de *ARCO* graúdos com absorção de água ponderada (*Ww)* 5,5%, indicando potencial técnico e ambiental na produção de concretos com baixo consumo de cimento com agregados reciclados.

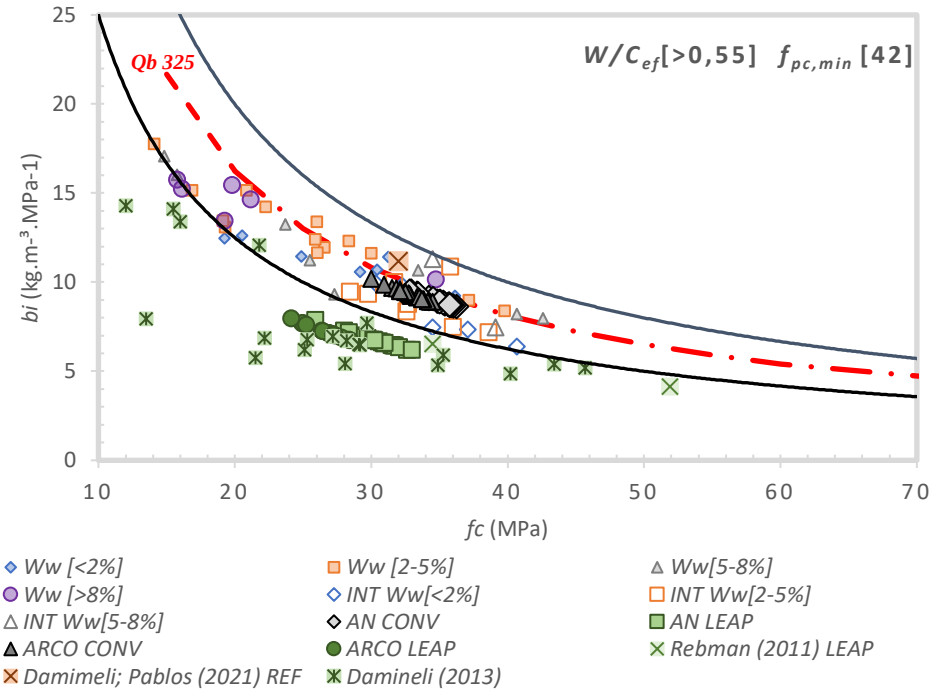


Figura 50 – Índice intensidade de ligante (*bi*) vs Resistência à compressão (*fc*) com dados da literatura sobre concretos LEAP [23], [155]. Linhas pretas delimitam limites de *Qb* [250 e 400kg/m³], conforme Figura 14.

Vale relembrar que estes resultados foram possíveis utilizando estratégias como o uso de dois tipos de agregados miúdos, aditivos dispersantes, e dois tipos de filler carbonático, um para substituição parcial do cimento e outro para preenchimento dos vazios (devido à menor granulometria). A produção destes concretos ainda é disruptiva e, mesmo que esbarre em limites normativos como consumo de cimento mínimo de 250kg/m³, aponta para um cenário promissor.

4.3.4. Aplicação do guia de seleção

Os dados obtidos experimentalmente foram comparados com o esperado no guia de selação proposta no tópico 3.3.4. (Tabela 18).

Tabela 18 – Comparação entre resultados experimentais e guia proposto no capítulo 3.

Item avaliado	AN CONV	AN LEAP	ARCO CONV	ARCO LEAP
Ww usada	0,75%	0,75%	5,5%	5,5%
W/C_{ef} usada	0,65	0,86	0,65	0,86
Qc adotado (kg/m³)	329,9	206	323,8	202,3
Qc estimado (Figura 20) **R^2=0,83**	308,7	251,6	308,7	251,6
Diferença Relativa [(*Qc* adotado / *Qc* Estimado) - 1](%)	6,9%	-18,1%	4,9%	-19,6%
f_c média obtida (MPa)	34,98	30,56	32,9	26,65
SD f_c média obtida (MPa)	1,06	1,35	1,13	1,16
f_c média estimada (MPa) (Relação D - Tabela 4)	28,6	21,8	26,1	20,8
R^2 da f_c média estimada (Fig.26b)	0,77	0,87	0,77	0,87
Diferença Absoluta [f_c obtido - f_c estimado](MPa)	6,38	8,76	6,8	5,85
Diferença Relativa [(f_c Obtido/f_c Estimado) - 1] (%)	22,3%	40,2%	26,1%	28,1%
bi médio obtido (kg.m-3.MPa-1)	8,97	6,76	9,36	7,23
bi médio esperado (kg.m-3.MPa-1) (Relação B - Tabela 4)	7,5	8	7,5	9,3
Diferença Absoluta [*bi* Obtido – melhor *bi* estimado]	1,47	-1,24	1,86	-2,07
Diferença Relativa [(*bi* Obtido/bi Estimado - 1)](%)	19,6%	-15,5%	24,8%	-22,3%

Os concretos LEAP, como esperado (por se tratarem de um modelo totalmente diferente), apresentam dados distantes do esperado em termos de consumo de cimento, resistência e *bi*. Os concretos convencionais apresentaram consumos de cimento bem próximo do estimado (*Qc* pouco acima) enquanto obtiveram resistência à compressão e bi acima do estimado. Entretanto, considerando as dispersões obtidas nos modelos, os dados encontram-se dentro da variabilidade esperada das propriedades, demonstrando potencial para o uso do guia de selação de concretos proposto no tópico 3.3.4, como parâmetros referência iniciais, podendo inclusive ser melhorados.

4.4. Conclusões do capítulo

Neste capítulo, foi avaliado como o uso de agregados reciclados de concreto e estratégias para redução do consumo de cimento impactam nas propriedades físicas e mecânicas destes concretos, tendo a eficiência no uso do cimento avaliada pelo índice intensidade de ligante (*bi*).

O uso de agregados reciclados e estratégias para a redução do consumo de cimento reduziram a resistência à compressão e a tração na compressão diametral em relação ao concretos referência. O efeito do uso de agregados reciclados é maior. Observou-se um aumento na densidade de concretos *LEAP*, e um aumento no módulo de elasticidade dinâmico.

O grande número de corpos de prova adotado na pesquisa visou colaborar com a quantidade limitada de dados da literatura sobre variabilidade de concretos com agregados reciclados de concreto. Notou-se um leve aumento na variabilidade da resistência à compressão de concretos *LEAP;* entretanto, com valores de desvio padrão menores que o mínimo normativo (2MPa). Devido ao número restrito de variáveis e experimentos de caracterização, não foi possível obter maiores conclusões acerca do tema. Em pesquisas futuras, sugere-se realizar análises em uma faixa maior de resistência à compressão, água/cimento efetiva, absorção de água ponderada e etc, incluindo a caracterização das propriedades mecânicas das fases (pasta de cimento, partículas de agregados, variabilidade)[49].

Os resultados experimentais foram inseridos dentro dos modelos propostos no capítulo 3, ficando dentro da nuvem de pontos observados, inclusive quando comparados com o guia proposto para selação de concretos. As relações entre resistência à tração e a resistência à compressão, entre módulo de elasticidade dinâmico e módulo de elasticidade estático, e a relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade estático foram comparados com modelos da literatura, estando de acordo com o esperado.

Os concretos tiveram seu índice intensidade de ligante avaliado e comparado com dados da literatura. Os concretos com dosagem convencional, tanto com agregados naturais ou reciclados, se apresentaram dentro da zona aceitável de *bi*, com resistência suficiente para a produção de concretos estruturais. Os concretos *LEAP* com agregados reciclados apresentaram-se dentro da zona excelente de *bi*, diferente de qualquer dado com agregado reciclado encontrado na literatura avaliada no capítulo 3.

A otimização de concretos na faixa de resistência avaliada, f_c [25-35 MPa], é fundamental, uma vez que há grande dispersão de resultados de *bi* encontrados na literatura, indo desde 5 a quase 20 $kg.m^{-3}.MPa^{-1}$. Esta otimização é ainda mais fundamental para concretos com agregados reciclados de concreto, uma vez que este material promove redução na resistência do concreto. Ainda assim, é necessário observar os limites de aplicação de agregados reciclados (Cap. 3), para que os seus benefícios não sejam contrapostos pelo aumento do consumo de cimento quando não utilizados em faixas de adequadas.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, através de revisão sistemática da literatura, foram utilizados conceitos pouco explorados para previsão de propriedades no estado fresco e no estado endurecido de concretos com agregados reciclados de concreto, criando modelos mais práticos e generalizáveis. Foi avaliada a eficiência no uso de cimento destes concretos, tema também pouco explorado pela literatura, estabelecendo limites práticos para formulação do concreto reciclado, considerando consumo de cimento e resistência. O limite de 20% de substituição de muitas normas pode ser superado, observando condições de aplicações tendo em vista a resistência do concreto e a absorção de água ponderada dos agregados. Foi proposto um guia para a produção de concreto com agregado reciclado com *bi's* aceitáveis.

Foi avaliado experimentalmente, a influência do uso de agregados graúdos reciclados de concreto nas propriedades físicas e mecânicas de concretos convencionais, e concretos LEAP. Os resultados experimentais encontrados foram inseridos nos modelos propostos com a revisão de literatura e apresentaram-se dentro do esperado. Os concretos LEAP elaborados com agregados reciclados apresentaram redução significativa do índice intensidade de ligante.

6. REFERÊNCIAS

[1] S. C. Angulo, L. S. Oliveira, e L. C. Machado, *Pesquisa setorial ABRECON 2020: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil*. São Paulo: EPUSP, 2021.

[2] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NBR15116 Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento portland - Requisitos e métodos de ensaio.", Rio de Janeiro, 2021.

[3] C. Jiménez, M. Barra, A. Josa, e S. Valls, "LCA of recycled and conventional concretes designed using the Equivalent Mortar Volume and classic methods", *Constr. Build. Mater.*, vol. 84, p. 245–252, jun. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.051.

[4] Angulo, S.C. e Figueiredo, A.D., *Concreto com Agregados Reciclados. Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações*, 2º ed, vol. 2, 2 vols. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto, 2011.

[5] M. Pepe, T. M. Grabois, M. A. Silva, L. M. Tavares, e R. D. Toledo Filho, "Mechanical behaviour of coarse, lightweight, recycled and natural aggregates for concrete", *Proc. Inst. Civ. Eng. - Constr. Mater.*, vol. 173, nº 2, p. 70–78, fev. 2018, doi: 10.1680/jcoma.17.00081.

[6] E. Khoury, W. Ambrós, B. Cazacliu, C. H. Sampaio, e S. Remond, "Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic variability", *Constr. Build. Mater.*, vol. 175, p. 705–713, jun. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.163.

[7] S. C. Angulo, "Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos.", Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. doi: 10.11606/T.3.2005.tde-18112005-155825.

[8] S. C. Angulo, "Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados.", Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. doi: 10.11606/D.3.2000.tde-05102005-112833.

[9] M. B. Leite, J. G. L. Figueire do Filho, e P. R. L. Lima, "Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate", *Mater. Struct.*, vol. 46, nº 10, p. 1765–1778, out. 2013, doi: 10.1617/s11527-012-0010-4.

[10] C. S. Poon, Z. H. Shui, L. Lam, H. Fok, e S. C. Kou, "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete", 2004, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00186-8.

[11] C. S. Poon, S. C. Kou, e L. Lam, "Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete", *Mater. Struct.*, vol. 40, nº 9, p. 981–988, nov. 2007, doi: 10.1617/s11527-006-9192-y.

[12] R. V. Silva, J. de Brito, e R. K. Dhir, “Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 178, p. 19–31, jul. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149.

[13] R. V. Silva, J. de Brito, e R. K. Dhir, “The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review”, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 19, nº 7, p. 825–849, 2014, doi: 10.1080/19648189.2014.974831.

[14] J. Xiao, M. Tawana, e X. Huang, “Review of studies on structural performance of recycled aggregate concrete in China”, *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 55, nº 10, p. 2727–2739, out. 2012, doi: 10.1007/s11431-012-4803-z.

[15] P. M. Carrijo, “Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto.”, Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 2005. doi: 10.11606/D.3.2005.tde-11052006-143829.

[16] P. J. M. Monteiro, P. R. L. Helene, e S. H. Kang, “Designing concrete mixtures for strength, elastic modulus and fracture energy”, *Mater. Struct.*, vol. 26, nº 8, p. 443–452, out. 1993, doi: 10.1007/BF02472804.

[17] K. L. Scrivener, V. M. John, e E. M. Gartner, “Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry”, *Cem. Concr. Res.*, vol. 114, p. 2–26, dez. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015.

[18] B. L. Damineli, F. M. Kemeid, P. S. Aguiar, e V. M. John, “Measuring the eco-efficiency of cement use”, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, nº 8, p. 555–562, set. 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009.

[19] B. L. Damineli, R. G. Pileggi, e V. M. John, *Eco-efficient concrete: 2. Lower binder intensity eco-efficient concretes*. Woodhead Publishing, 2013.

[20] D. C. Reis, P. C. R. A. Abrão, T. Sui, e V. M. John, “Influence of cement strength class on environmental impact of concrete”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 163, p. 105075, dez. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105075.

[21] M. Quattrone, S. C. Angulo, e V. M. John, “Energy and CO2 from high performance recycled aggregate production”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 90, p. 21–33, set. 2014, doi: 10.1016/j.resconrec.2014.06.003.

[22] R. Kurad, J. D. Silvestre, J. de Brito, e H. Ahmed, “Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete”, *J. Clean. Prod.*, vol. 166, p. 485–502, nov. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.236.

[23] B. L. Damineli e J. M. Pablos, “Potential of CO2 mitigation in concrete containing recycled aggregates”, *Int. J. Environ. Sustain. Dev.*, vol. 20, nº 2, p. 150–165, jan. 2021, doi: 10.1504/IJESD.2021.114565.

[24] Neville A. M, *Properties of Concrete*, 5th edition. Pearson, 2013.

[25] P. K. Mehta e P. J. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th ed. edição. New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 2013.

[26] P. J. M. Monteiro, P. R. L. Helene, e S. H. Kang, "Designing concrete mixtures for strength, elastic modulus and fracture energy", *Mater. Struct.*, vol. 26, nº 8, p. 443–452, out. 1993, doi: 10.1007/BF02472804.

[27] F. de Larrard e H. Colina, *Concrete Recycling - Research and Practice*. Florida: CRC Press Taylor & Francis Group, 2019.

[28] F. de Larrard e A. Belloc, "The Influence of Aggregate on the Compressive Strength of Normal and High-Strength Concrete", *Mater. J.*, vol. 94, nº 5, p. 417–426, set. 1997, doi: 10.14359/326.

[29] Associação Brasileira de Normas Técncias, *NBR 12655 - Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento*. 2015.

[30] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NBR 6118 Projeto de estruturas de concreto — Procedimento", Rio de Janeiro, 2014.

[31] J. Pacheco e J. de Brito, "20 - Structural reliability of recycled aggregate concrete", em *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, J. de Brito e F. Agrela, Orgs. Woodhead Publishing, 2019, p. 541–572. doi: 10.1016/B978-0-08-102480-5.00020-8.

[32] J. N. Pacheco, J. M. C. L. de Brito, C. Chastre, e L. Evangelista, *Reliability analysis: the next step towards recycled aggregates concrete affirmation*. New York: Kimberly Hall, 2017. Acessado: 2 de fevereiro de 2021. [Online]. Disponível em: https://novaresearch.unl.pt/en/publications/reliability-analysis-the-next-step-towards-recycled-aggregates-co

[33] ACI Committee 211, "ACI PRC-211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2009)". 2002.

[34] M. S. Rebmann, "Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados.", Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. doi: 10.11606/T.3.2017.tde-20012017-090400.

[35] D. A. Abrams, *Design of concrete mixtures*. Structural Materials Laboratory Chicago: Lewis Institute Bulletin, 1918.

[36] I. Lyse, "Tests on consistency and strength of concrete having constant water content", *Tests Consistency Strength Concr. Having Constant Water Content*, vol. 32, nº 32, p. 629, 1932.

[37] A. J. Boggio, "Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland", UFRGS, Porto Alegre, 2000.

[38] P. P. F. Rodrigues, *Parâmetros de dosagem do concreto*. São Paulo: ABCP, 1990.

[39] F. L. L. B. Carneiro, *Dosagem de concretos*, 2º ed. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia, 1953.

[40] E. G. R. Petrucci, *Livro: Concreto de Cimento Portland*, 13º ed. São Paulo: Globo, 1995. Acessado: 1º de dezembro de 2022. [Online]. Disponível em: https://www.estantevirtual.com.br/livros/eladio-g-r-petrucci/concreto-de-cimento-portland/1009546226

[41] Vallette Roger, *Manuel de composition des bétons méthode expérimentale Vallete*. France: Eyrolles, 1963. Acessado: 1º de dezembro de 2022. [Online]. Disponível em: https://www.abebooks.fr/Manuel-composition-b%C3%A9tons-m%C3%A9thode-exp%C3%A9rimentale-Vallette/30921211092/bd

[42] M. T. de Grazia, L. F. M. Sanchez, R. C. O. Romano, e R. G. Pileggi, "Investigation of the use of continuous particle packing models (PPMs) on the fresh and hardened properties of low-cement concrete (LCC) systems", *Constr. Build. Mater.*, vol. 195, p. 524–536, jan. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.051.

[43] M. T. De Grazia, L. F. M. Sanchez, R. Romano, e R. Pileggi, "Evaluation of the fresh and hardened state properties of low cement content systems", *Mag. Concr. Res.*, vol. 72, nº 5, p. 232–245, mar. 2020, doi: 10.1680/jmacr.18.00271.

[44] A. K. H. Kwan e L. G. Li, "Combined effects of water film, paste film and mortar film thicknesses on fresh properties of concrete", *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, p. 598–608, jan. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.014.

[45] I. R. de Oliveira, *Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico*. São Paulo: Fazendo Arte, 2000.

[46] J. E. Funk e D. R. Dinger, *Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions*. Boston, MA: Springer US, 1994. doi: 10.1007/978-1-4615-3118-0.

[47] P. C. R. A. Abrão, F. A. Cardoso, e V. M. John, "Efficiency of Portland-pozzolana cements: Water demand, chemical reactivity and environmental impact", *Constr. Build. Mater.*, vol. 247, p. 118546, jun. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118546.

[48] R. Baldusco, T. R. S. Nobre, S. C. Angulo, V. A. Quarcioni, e M. A. Cincotto, "Dehydration and Rehydration of Blast Furnace Slag Cement", *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 31, nº 8, p. 04019132, ago. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002725.

[49] N. V. D. SILVA, "Propriedades Mecânicas das Fases e seus Efeitos no Comportamento Mecânico do Concreto", Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

[50] M. Alexander e S. Mindness, *Aggregates in Concrete*. London, United Kingdom: Taylor & Francis Ltd, 2005.

[51] M. V. A. Florea e H. J. H. Brouwers, "Properties of various size fractions of crushed concrete related to process conditions and re-use", *Cem. Concr. Res.*, vol. 52, p. 11–21, out. 2013, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.05.005.

[52] S. Angulo e A. Figueiredo, “CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS”, em *Concreto: Ciência e Tecnologia*, 2º ed, IBRACON, 2011, p. 1731–1767.

[53] M. S. de Juan e P. A. Gutiérrez, “Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, nº 2, p. 872–877, fev. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012.

[54] K. P. Verian, W. Ashraf, e Y. Cao, “Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 133, p. 30–49, jun. 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.02.005.

[55] T. C. Hansen, Org., *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*. London: CRC Press, 1992. doi: 10.1201/9781482267075.

[56] RILEM TC 37-DRC, “Recycled aggregates and recycled aggregates concrete. Second state-of-the-art report. Developments 1945-1985”, *Recycl. Aggreg. Recycl. Aggreg. Concr. Second State---Art Rep. Dev. 1945-1985*, vol. 19, nº 111, p. 46, maio 1986.

[57] P. J. Nixon, “Recycled concrete as an aggregate for concrete—a review”, *Matér. Constr.*, vol. 11, nº 5, p. 371, set. 1978, doi: 10.1007/BF02473878.

[58] R. K. Dhir, Neil A. Henderson, e M. C. Limbachiya, “Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate”, em *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*, Thomas Telford Publishing, 1998, p. i–vii. doi: 10.1680/scuorca.27268.fm.

[59] T. Hansen, “Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985”, 1986, doi: 10.1007/BF02472036.

[60] J. de Brito e N. Saikia, “Concrete with Recycled Aggregates in International Codes”, em *Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste*, J. de Brito e N. Saikia, Orgs. London: Springer, 2013, p. 379–429. doi: 10.1007/978-1-4471-4540-0_7.

[61] RILEM TC 121-DRG, “Specifications for concrete with recycled aggregates”, *Specifications for concrete with recycled aggregates*, p. 3, 1994.

[62] German Institute for Standardisation, “DIN 4226-101:2017-08 Recycled aggregates for concrete in accordance with DIN EN 12620 - Part 101: Types and regulated dangerous substances”, Germany, 2017.

[63] WBTC, “Specification Facilitating the Use of Concrete Paving Units Made of Recycled Aggregates”, *Environ. Transp. Works Bur. Tech. Circ. Works No 242004*, p. 25, 2004.

[64] British Standards Institution, “BS 8500-2:2015 Concrete - complementary British Standard to BS EN 206. Specification for constituent materials and concrete (+A2:2019)”, UK, 2015.

[65] LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, “LNEC E 471:2009 - GUIA PARA A UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS GROSSOS EM BETÕES DE LIGANTES HIDRÁULICOS”, Portugal, 2009.

[66] R. V. Silva, J. de Brito, e R. K. Dhir, “Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 65, p. 201–217, ago. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117.

[67] J. Xiao, M. Tawana, e X. Huang, “Review of studies on structural performance of recycled aggregate concrete in China”, *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 55, out. 2012, doi: 10.1007/s11431-012-4803-z.

[68] E. Khoury, W. Ambrós, B. Cazacliu, e S. Rémond, “Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic variability”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 175, maio 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.163.

[69] J. de Brito, C. S. Poon, e Z. Baojian, *New Trends in Recycled Aggregate Concrete*. Switzerland: MDPI, 2019. Acessado: 31 de janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: https://www.mdpi.com/books/pdfview/book/1426

[70] J. de Brito e N. Saikia, “Methodologies for Estimating Properties of Concrete Containing Recycled Aggregates: Analyses of Experimental Research”, em *Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste*, J. de Brito e N. Saikia, Orgs. London: Springer, 2013, p. 339–378. doi: 10.1007/978-1-4471-4540-0_6.

[71] J. de Brito e N. Saikia, “Use of Construction and Demolition Waste as Aggregate: Properties of Concrete”, em *Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste*, J. de Brito e N. Saikia, Orgs. London: Springer, 2013, p. 229–337. doi: 10.1007/978-1-4471-4540-0_5.

[72] C. S. Rangel, R. D. Toledo Filho, M. Amario, M. Pepe, G. de Castro Polisseni, e G. Puente de Andrade, “Generalized quality control parameter for heterogenous recycled concrete aggregates: A pilot scale case study”, *J. Clean. Prod.*, vol. 208, p. 589–601, jan. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.110.

[73] M. B. Leite, “Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição”, UFRGS, Rio Grande do Sul, 2001.

[74] R. K. Dhir, J. de Brito, R. V. Silva, e C. Q. Lye, “9 - Deformation of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate”, em *Sustainable Construction Materials*, R. K. Dhir, J. de Brito, R. V. Silva, e C. Q. Lye, Orgs. Woodhead Publishing, 2019, p. 283–363. doi: 10.1016/B978-0-08-100985-7.00009-1.

[75] M. B. de Oliveira e E. Vazquez, “The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete”, *Waste Manag.*, vol. 16, nº 1–3, p. 113–117, 1996, doi: 10.1016/S0956-053X(96)00033-5.

[76] C. S. Poon, Z. H. Shui, L. Lam, H. Fok, e S. C. Kou, “Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete”, *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, nº 1, p. 31–36, jan. 2004, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00186-8.

[77] R. V. Silva, J. de Brito, e R. K. Dhir, “Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 178, p. 19–31, jul. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149.

[78] L. Ferreira, J. de Brito, e M. Barra, “Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties”, *Mag. Concr. Res.*, vol. 63, nº 8, p. 617–627, ago. 2011, doi: 10.1680/macr.2011.63.8.617.

[79] K.-H. Yang, H.-S. Chung, e A. F. Ashour, “Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties.”, 2008, Acessado: 12 de julho de 2022. [Online]. Disponível em: https://bradscholars.brad.ac.uk/handle/10454/7768

[80] B. L. Damineli, F. M. Kemeid, P. S. Aguiar, e V. M. John, “Measuring the eco-efficiency of cement use”, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, nº 8, p. 555–562, set. 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009.

[81] V. M. John, “Concreto Sustentável”, em *Concreto: Ciência e Tecnologia*, São Paulo: IBRACON, 2011. Acessado: 13 de abril de 2022. [Online]. Disponível em: https://www.phd.eng.br/2140-2/

[82] C. Müller, “Use of cement in concrete according to European standard EN 206-1”, *HBRC J.*, vol. 8, nº 1, p. 1–7, abr. 2012, doi: 10.1016/j.hbrcj.2012.08.001.

[83] Bureau of Indian Standard, “PLAIN AND REINFORCED CONCRETE: CODE OF PRACTICE”, BIS, India, 2000.

[84] P. C. AITCIN, *Concreto de Alto Desempenho 1ºed - Livraria Sebo Riacho*. São Paulo: Pini, 2000. Acessado: 26 de julho de 2022. [Online]. Disponível em: https://www.estantevirtual.com.br/sebo-riacho/pierre-claude-aitcin-concreto-de-alto-desempenho-1-ed-1286451402

[85] A. E. R. Westman e H. R. Hugill, “The Packing of Particles1”, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 13, nº 10, p. 767–779, 1930, doi: 10.1111/j.1151-2916.1930.tb16222.x.

[86] F. D. Larrard, *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*. London: CRC Press, 1999. doi: 10.1201/9781482272055.

[87] B. L. Damineli, “Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas.”, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

[88] L. M. Pinheiro, *FUNDAMENTOS DO CONCRETO E PROJETO DE EDIFÍCIOS*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 2017.

[89] S. M. Levy e P. Helene, “Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development”, *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, nº 11, p. 1975–1980, nov. 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.02.009.

[90] Bazuco, Régis Sandro, “Utilização de agregados reciclados de concreto para produção de novos concretos /”, UFSC, Florianópolis, 1999. Acessado: 28 de janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/80789

[91] A. E. B. Cabral, “Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD”, text, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. doi: 10.11606/T.18.2007.tde-21102007-164548.

[92] R. S. Campos, M. P. Barbosa, L. L. Pimentel, e G. de F. Maciel, “Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável”, *Matér. Rio Jan.*, vol. 23, mar. 2018, doi: 10.1590/S1517-707620170001.0300.

[93] C. M. M. de A. e Silva, “Durabilidade de concretos produzidos com agregados de resíduo de concreto submetidos a tratamentos com cimento portland e moagem”, UFPA, Belém, 2019. Acessado: 28 de janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: https://repositorio.unb.br/handle/10482/35649

[94] L. de N. P. Cordeiro, “Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto”, UFRGS, Porto Alegre, 2013. Acessado: 28 de janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/96512

[95] M. G. C. Cunha, “Viabilidade do uso de RCD proveniente da geração dos concretos convencional e de alta resistência através da utilização do jigue como agente do beneficiamento”, UFRGS, Porto Alegre, 2017. Acessado: 28 de janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/178221

[96] E. Tseng, “Reciclagem total de pavimentos de concreto como agregados para construção de novos pavimentos de concreto: o caso do Rodoanel Metropolitano Mário Covas.”, text, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. doi: 10.11606/D.3.2010.tde-20102010-164010.

[97] M. T. Gerin, “Comportamento de pilares mistos preenchidos com concreto de resíduos de concreto submetidos a compressão axial centrada: efeito do teor de substituição e da forma de aplicação da força”, UFSCar, São Carlos, 2020. Acessado: 28 de janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12327

[98] J. B. da Silva, “Comportamento sob altas temperaturas de concretos com agregados reciclados de concreto”, UFRJ, Rio de Janeiro, 2017. Acessado: 28 de janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: http://pantheon.ufrj.br/handle/11422/9755

[99] K. A. N. da Silva, “Estudo de propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes agregados reciclados”, UFAL, Maceió, 2011.

[100] K. M. de V. Moreira, “Concreto autoadensável com agregados graúdos reciclados de concreto”, UFC, Fortaleza, 2012. Acessado: 28 de janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/11382

[101] J. P. Moretti, “Estudo de viabilidade técnica da utilização da ACBC e do RCC na composição de concretos”, UFSCar, São Carlos, 2014. Acessado: 28 de janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4692

[102] V. Pelissari, “Propriedades de concretos produzidos através da utilização de agregados reciclados de concreto”, UFTPR, Curitiba, 2016. Acessado: 28 de janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/1869

[103] A. A. M. dos Santos, “Concreto com agregado graúdo reciclado de concreto: dosagem e produção”, UEFS, Feira de Santana, 2016. Acessado: 28 de janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: http://tede2.uefs.br:8080/handle/tede/435

[104] M. Quattrone, S. C. Angulo, B. L. Damineli, e V. M. John, “Influence of recycled aggregate in binder intensity of concretes”, apresentado em Concrete Innovation Conference, Oslo, 2014.

[105] M. Barra e E. Vazquez, “The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete”, *Waste Manag.*, vol. 16, nº 1, p. 113–117, jan. 1996, doi: 10.1016/S0956-053X(96)00033-5.

[106] M. C. Limbachiya, T. Leelawat, e R. K. Dhir, “Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete”, *Mater. Struct.*, vol. 33, nº 9, p. 574, nov. 2000, doi: 10.1007/BF02480538.

[107] K. K. Sagoe-Crentsil, T. Brown, e A. H. Taylor, “Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate”, *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, nº 5, p. 707–712, maio 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00476-2.

[108] F. Buyle-Bodin e R. Zaharieva, “Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete”, *Mater. Struct.*, vol. 35, p. 504–509, set. 2002, doi: 10.1007/BF02483138.

[109] J. Gómez-Soberón, “Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate - An experimental study”, *Cem. Concr. Res. - CEM CONCR RES*, vol. 32, p. 1301–1311, ago. 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00795-0.

[110] A. Katz, “Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete”, *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, nº 5, p. 703–711, maio 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(02)01033-5.

[111] Poon C. S., S. C. Kou, e D. Chan, “Influence of steam curing on hardened properties of recycled aggregate concrete”, *Mag. Concr. Res.*, vol. 58, nº 5, p. 289–299, jun. 2006, doi: 10.1680/macr.2006.58.5.289.

[112] M. Etxeberria, A. Mari, e E. Vázquez, “‘Recycled Aggregate Concrete as Structural Material’”, *Mater. Struct.*, vol. 40, p. 529–541, jan. 2007, doi: 10.1617/s11527-006-9161-5.

[113] K. Rahal, “‘Mechanical Properties of Concrete with Recycled Coarse Aggregate’”, *Build. Environ.*, vol. 42, p. 407–415, jan. 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.07.033.

[114] M. Quattrone, M. Bassan, e V. Basilico, “Structural concretes made from recycled precast elements”, apresentado em 2nd International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment, São Paulo, dez. 2009.

[115] V. Corinaldesi, “Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, p. 1616–1620, set. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.031.

[116] M. Limbachiya, “Recycled Aggregates: Production, Properties and Value-added Sustainable Applications”, *J. Wuhan Univ. Technol.-Mater Sci Ed*, vol. 25, p. 1011–1016, dez. 2010, doi: 10.1007/s11595-010-0140-x.

[117] M. Malešev, V. Radonjanin, e S. Marinkovic, “Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production”, *Sustainability*, vol. 2, maio 2010, doi: 10.3390/su2051204.

[118] V. Corinaldesi, “Structural Concrete Prepared with Coarse Recycled Concrete Aggregate: From Investigation to Design”, *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2011, jan. 2011, doi: 10.1155/2011/283984.

[119] I. Marie e H. Qasrawi, “Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates”, *J. Clean. Prod.*, vol. 37, dez. 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.07.020.

[120] J. Xiao, X. Huang, e L. Shen, “Seismic behavior of semi-precast column with recycled aggregate concrete”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, 2012, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.04.062.

[121] W.-C. Choi e H.-D. Yun, “Long-term deflection and flexural behavior of reinforced concrete beams with recycled aggregate”, *Mater. Des.*, vol. Complete, nº 51, p. 742–750, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.04.044.

[122] N. Kencanawati, S. Iizasa, e M. Shigeishi, “Fracture process and reliability of concrete made from high grade recycled aggregate using acoustic emission technique under compression”, *Mater. Struct.*, vol. 46, p. 1441–1448, set. 2013, doi: 10.1617/s11527-012-9986-z.

[123] C. Thomas, J. Setién, J. A. Polanco, P. Alaejos, e M. S. de Juan, “Durability of recycled aggregate concrete”, *Constr. Build. Mater.*, vol. Complete, nº 40, p. 1054–1065, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106.

[124] E. Vázquez, M. Barra, D. Aponte, C. Jiménez, e S. Valls, “Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 67, p. 61–67, 2013.

[125] K. H. Younis e K. Pilakoutas, “Strength prediction model and methods for improving recycled aggregate concrete”, *Constr. Build. Mater.*, vol. Complete, nº 49, p. 688–701, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.003.

[126] S. Omary, E. Ghorbel, e G. Wardeh, “Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 108, fev. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.042.

[127] N. K. Bui, T. Satomi, e H. Takahashi, “Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete basing on a new combination method between recycled

aggregate and natural aggregate", *Constr. Build. Mater.*, vol. 148, p. 376–385, set. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.084.

[128] J. Thomas, N. N. Thaickavil, e P. M. Wilson, "STRENGTH AND DURABILITY OF CONCRETE CONTAINING CRUSHED CONCRETE AGGREGATES", *J. Build. Eng.*, vol. 19, maio 2018, doi: 10.1016/j.jobe.2018.05.007.

[129] J. Pacheco, J. de Brito, C. Chastre, e L. Evangelista, "Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates", *Constr. Build. Mater.*, vol. 201, p. 110–120, mar. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.200.

[130] A. M. Buttler, "Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto : influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.", Mestrado em Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. doi: 10.11606/D.18.2003.tde-06082003-172935.

[131] American Society for Testing and Materials, "ASTM C 127 - 07 - Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate1", ASTM, set. 2007.

[132] C. Aquino, M. Inoue, H. Miura, M. Mizuta, e T. Okamoto, "The effects of limestone aggregate on concrete properties", *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, nº 12, p. 2363–2368, dez. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.05.008.

[133] M. Maslehuddin, A. M. Sharif, M. Shameem, M. Ibrahim, e M. S. Barry, "Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes", *Constr. Build. Mater.*, vol. 17, nº 2, p. 105–112, mar. 2003, doi: 10.1016/S0950-0618(02)00095-8.

[134] H. Beshr, A. A. Almusallam, e M. Maslehuddin, "Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete", *Constr. Build. Mater.*, vol. 17, nº 2, p. 97–103, mar. 2003, doi: 10.1016/S0950-0618(02)00097-1.

[135] S. C. Angulo, M. S. Guilge, V. A. Quarcioni, M. A. Cincotto, T. R. S. Nobre, e H. Pöllmann, "The role of calcium silicates and quicklime on the reactivity of rehydrated cements", *Constr. Build. Mater.*, vol. 340, p. 127625, jul. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127625.

[136] V. M. John, M. Quattrone, P. C. R. A. Abrão, e F. A. Cardoso, "Rethinking cement standards: Opportunities for a better future", *Cem. Concr. Res.*, vol. 124, p. 105832, out. 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105832.

[137] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NBR16372 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)", ABNT, RIO DE JANEIRO, 2015.

[138] British Standard Institution, "BS EN 197-1:2011 - Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements", BSI, London, United Kingdom, 2011.

[139] American Society for Testing and Materials, “ASTM C150 - Standard Specification for Portland Cement”, ASTM, USA, 2018.

[140] J. N. Pacheco, J. de Brito, C. Chastre, e L. Evangelista, “Probabilistic Conversion of the Compressive Strength of Cubes to Cylinders of Natural and Recycled Aggregate Concrete Specimens”, *Materials*, vol. 12, nº 2, Art. nº 2, jan. 2019, doi: 10.3390/ma12020280.

[141] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica”, Rio de Janeiro, 2009.

[142] K. Kendall *et al.*, “The relation between porosity, microstructure and strength, and the approach to advanced cement-based materials”, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci.*, vol. 310, nº 1511, p. 139–153, set. 1983, doi: 10.1098/rsta.1983.0073.

[143] IPCC - Intergovernamental Painel of Climate Change, “Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 3 - Chapter 2 - Industrial Processes and Product Use”, IPCC, 2006. Acessado: 9 de janeiro de 2022. [Online]. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/find_ef.php?orderby=source_data&refresh=false

[144] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR NM 248 - Determinação da composição granulométrica”, Rio de Janeiro, 2003.

[145] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR NM 53 - Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.”, Rio de Janeiro, 2009.

[146] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR NM 46 - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem”, Rio de Janeiro, 2003.

[147] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 8953 - Concretos para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência”, ABNT, Rio de Janeiro, 2015.

[148] V. W. Y. Tam, X. F. Gao, e C. M. Tam, “Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach”, *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, nº 6, p. 1195–1203, jun. 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.10.025.

[149] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova”, Rio de Janeiro, 2016.

[150] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica”, Rio de Janeiro, 2009.

[151] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido”, Rio de Janeiro, 2005.

[152] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos”, Rio de Janeiro, 2011.

[153] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos”, Rio de Janeiro, 2018.

[154] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR8522: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação à compressão.”, Rio de Janeiro, 2017.

[155] M. S. Rebmann, “Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência”, Mestrado em Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. doi: 10.11606/D.18.2011.tde-10062011-150726.

[156] F. C. de Oliveira, “Propriedades mecânicas de pastas de cimento: microestrutura, variabilidade e análises probabilísticas.”, text, Universidade de São Paulo, 2020. doi: 10.11606/D.3.2020.tde-08032021-092118.

[157] E. P. Figueiredo e G. Meira, *Boletim Técnico 6 - Corrosão das armaduras das estruturas de concreto*. México: ALCONPAT, 2013.

[158] British Standard, “BS-8110-2:1985 Structural Use of concrete - Code of practice for special circumstances”, BSI, 1985.

[159] W. de A. Thomaz, D. Y. Miyaji, e E. Possan, “Comparative study of dynamic and static Young’s modulus of concrete containing basaltic aggregates”, *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, p. e00645, dez. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00645.

[160] C. de S. Kazmierczak, J. K. B. Boaro, M. P. Lunardi, M. P. Kulakowski, e M. Mancio, “Influence of the moisture content on the dynamic modulus of elasticity of concrete made with recycled aggregate”, *Ambiente Construído*, vol. 19, p. 79–89, jun. 2019, doi: 10.1590/s1678-86212019000200309.

[161] M. Pepe, *A Conceptual Model for Designing Recycled Aggregate Concrete for Structural Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-26473-8.

APÊNDICE A – DADOS COLETADOS

Tabela A.1 - Dados coletados

ID A	Setor	Dados	Símbolo
A1	Informação do estudo	Autor	
A2		Ano	
A3		Instituto	
A4		Tipo de Documento	
A5		País	
A6		ID	
A7	Dosagem	Quantidade de água (kg/m³)	Q_W
A8		Quantidade de cimento(kg/m³)	Q_C
A9		Quantidade de agregado miúdo natural (kg/m³)	Q_{FA}
A10		Quantidade de agregado graúdo natural (kg/m³)	Q_{NA}
A11		Quantidade de agregado graúdo reciclado(kg/m³)	Q_{RCA}
A12		Teor de substituição (%)	R
A13		Quantidade de aditivo (kg/m³)	Q_{AD}
A14		Quantidade de adições (kg/m³)	
A15		Método de dosagem	
A16	Características do Cimento, adições e aditivos.	Tipo de cimento	
A17		Densidade do cimento (kg/m³)	D_C
A18		Área superficial específica do cimento	SS
A19		Classe de resistência do cimento	fpc,min
A20		Resultado do ensaio de resistência do cimento	
A21		Tipo de aditivo	
A22		Tipo de adições	
A23		Fração ligante	RF
A24	Características dos agregados miúdos	Absorção de água (%)	W_{FA}
A25		Densidade(kg/m³)	D_{FA}
A26		Diâmetro mínimo (mm)	$Dmin_{FA}$
A27		Diâmetro máximo (mm)	$Dmax_{FA}$
A28		Módulo de finura	MF_{FA}
A29		Origem	

ID A	Setor	Dados	Símbolo
A30	Características dos agregados graúdos naturais	Absorção de água (%)	W_{NA}
A31		Densidade(kg/m³)	D_{NA}
A32		Diâmetro mínimo (mm)	$Dmín_{NA}$
A33		Diâmetro máximo (mm)	$Dmáx_{NA}$
A34		Módulo de finura	MF_{NA}
A35		Origem	
A36	Características dos agregados graúdos reciclados	Absorção de água (%)	W_{RA}
A37		Densidade(kg/m³)	$D_{A\,RA}$
A38		Diâmetro mínimo (mm)	$Dmín_{RA}$
A39		Diâmetro máximo (mm)	$Dmáx_{RA}$
A40		Módulo de finura	MF_{RA}
A41		Origem	
A42		Umidade (%)	
A43		Composição	
A44		Teor de finos	
A45	Características do concreto	*slump* (mm)	
A46		Módulo de elasticidade (GPa)	E
A47		Resistência à compressão média (MPa)	f_c
A48		Geometria do corpo de prova	
A49		Absorção de água (%)	W_{Co}
A50		Densidade no estado endurecido (kg/m³)	D_{CO}
A51		Índice de vazios (%)	VI

Tabela A.2. – Resumo dos dados coletados

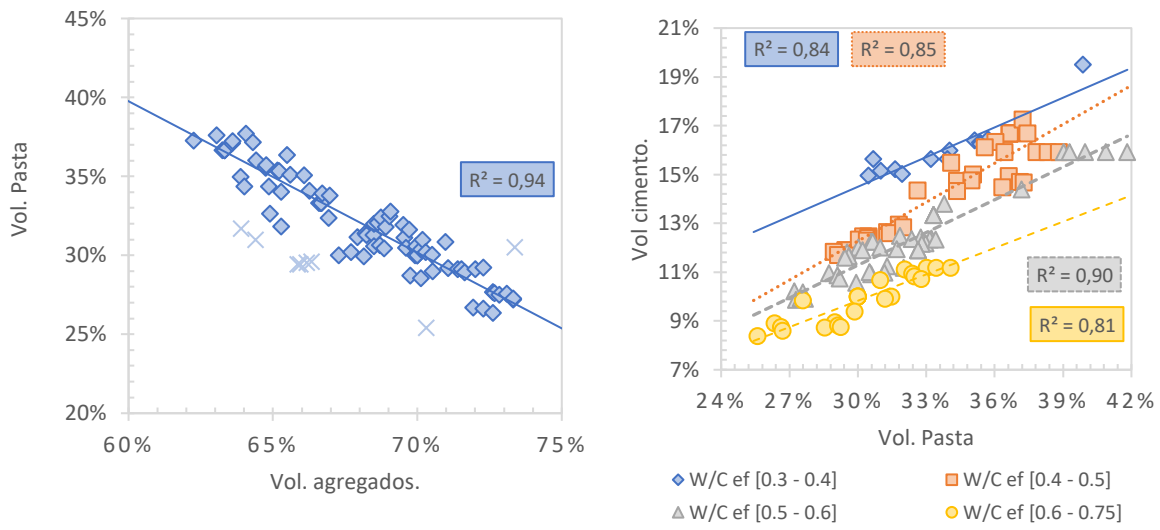
Variável	*BRA*				*INT*			
Qc (kg/m³)	<300	300-350	350-400	>400	<300	300-350	350-400	>400
Número de dados	18	24	40	59	19	60	75	58
%	13%	17%	28%	42%	9%	28%	35%	27%
Qw (kg/m³)	<170	170-200	200-220	>220	<170	170-200	200-220	>220
Número de dados	10	58	56	17	76	94	26	16
%	7%	41%	40%	12%	36%	44%	12%	8%
W/C_{ef}	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,65	>0,65	<0,4	0,4-0,5	0,5-0,65	>0,65
Número de dados	18	42	59	22	20	84	93	15
%	13%	30%	42%	16%	9%	40%	44%	7%
Teor de substituição	0-25%	25-50%	50-75%	>75%	0-25%	25-50%	50-75%	>75%
Número de dados	48	23	20	50	85	28	33	66
%	34%	16%	14%	35%	40%	13%	16%	31%
Ww	<2%	2-5%	5-8%	>8%	<2%	2-5%	5-8%	>8%
Número de dados	66	38	22	15	72	140	44	1
%	47%	27%	16%	11%	28%	54%	17%	0%
Slump (alguns dados não informados)	<50	50-100	100-150	>150	<50	50-100	100-150	>150
Número de dados	6	65	27	19	13	33	32	15
%	5%	56%	23%	16%	14%	35%	34%	16%
$f_{pc,min}$ (MPa) (alguns dados não informados)	-	32	42	52	-	32	42	52
Número de dados	0	76	65	0	52	18	53	89
%	0%	54%	46%	0%	25%	8%	25%	42%
f_c (MPa)	<25	25-35	35-45	>45	<25	25-35	35-45	>45
Número de dados	24	58	40	17	10	73	81	48
%	17%	42%	29%	12%	5%	34%	38%	23%
Módulo de elasticidade (GPa) (alguns dados não informados)	<25	25-30	30-35	>35	Não coletado			
Número de dados	13	16	21	11	-			
%	21%	26%	34%	18%				

APÊNDICE B – ÍNDICES CALCULADOS

Tabela B.1. – Índices calculados

ID B	Índice	Abreviação	Equação
B1	Relação água/cimento	*W/C*	$W/C = \frac{Q_W}{Qc}$
B2	Relação água/cimento efetiva	W/C_{ef}	$W/C_{ef} = \frac{Qw - k \times (Q_{NA} \times W_{NA} + Q_{RA} \times W_{RA})}{Q_c}$
B3	Absorção de água ponderada dos agregados graúdos	*Ww*	$W_w = \frac{(Q_{NA} \times W_{NA} + Q_{RA} \times W_{RA})}{Q_{NA} + Q_{RA}}$
B4	Free Water	*FW (%)*	$FW = \frac{(W/C_{ef} - \alpha) \times Q_C + W_w \times (Q_{NA} + Q_{RA})}{1000}$
B5	Dmax agr	$Dmax_{agr}$	$Dmax_{agr}$ = *maior valor entre* $Dmax_{NA}$ *e* $Dmax_{RA}$
B6	Volume de agregados	*g*	$g = \frac{Q_{FA}}{D_{FA}} + \frac{Q_{NA}}{D_{NA}} + \frac{Q_{RA}}{D_{RA}}$
B7	Empacotamento de partículas	*g**	$g^* = 1 - 0{,}39 \times \left(\frac{Dmin_{FA}}{Dmax_{agr}}\right)^{0{,}22}$
B8	Volume de sólidos	*VS*	$VS = g + \frac{Q_C}{D_C}$
B9	Maximum Paste Thickness	*MPT*	$MPT = Dmax_{agr} \times \left(\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1\right)$
B10	Interparticle Separation Distance	*IPS*	$IPS = \frac{2}{VSA} * \left[\frac{1}{VS} - \left(\frac{1}{1 - P_{of}}\right)\right]$
B11	Índice intensidade de ligante - Binder intensity index	*bi*	$bi = \frac{Q_c}{fc}$

APÊNDICE C – GRÁFICOS E TABELAS COMPLEMENTARES DO CAPÍTULO 3.



(a) (b)

Figura. C.1. - a) Volume de agregados vs Volume de Pasta. 104 resultados *BRA*. 8 OLs (b) Volume de pasta vs volume de cimento, para diferentes W/C_{ef}. 120 resultados *BRA*.

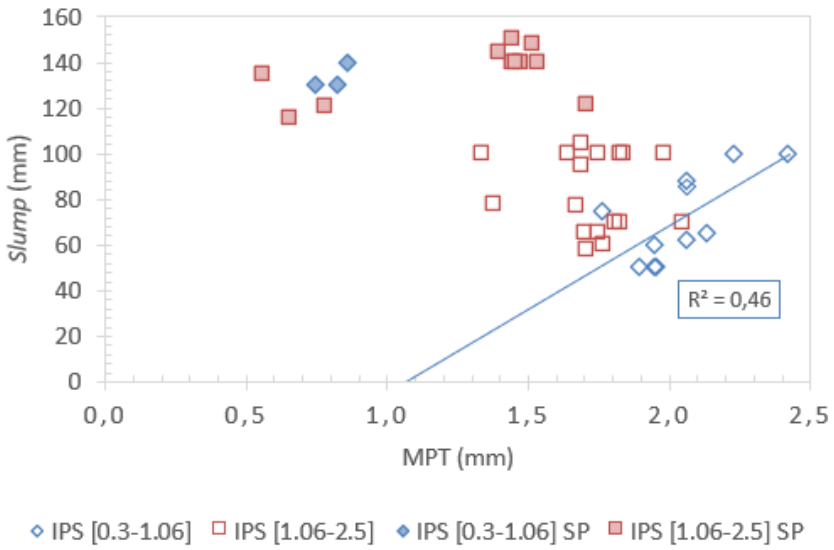


Figura C.2 - *Slump* vs. *MPT* em diferentes faixas de IPS, incluindo ou não superplastificante (*SP*) – Efeito da *Ww* desconsiderado no cálculo do IPS e MPT. *45* resultados *BRA* dentro da faixa de análise (*slump* [50-150]; *Dmax* [< 19mm]; *Ww* [<*8%*]; *SP* [>0.1%] - % (Relação entre massa de *SP* e massa de cimento (m.c.)).

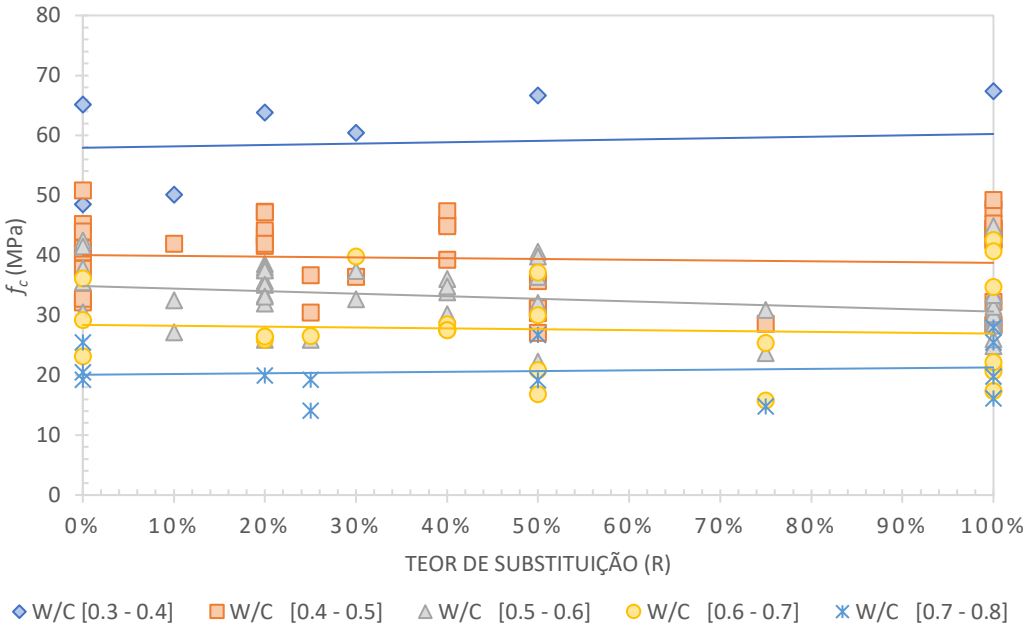


Figura. C.3 – Teor de substituição vs. f_c vs. *W/C. 138* resultados *BRA.*

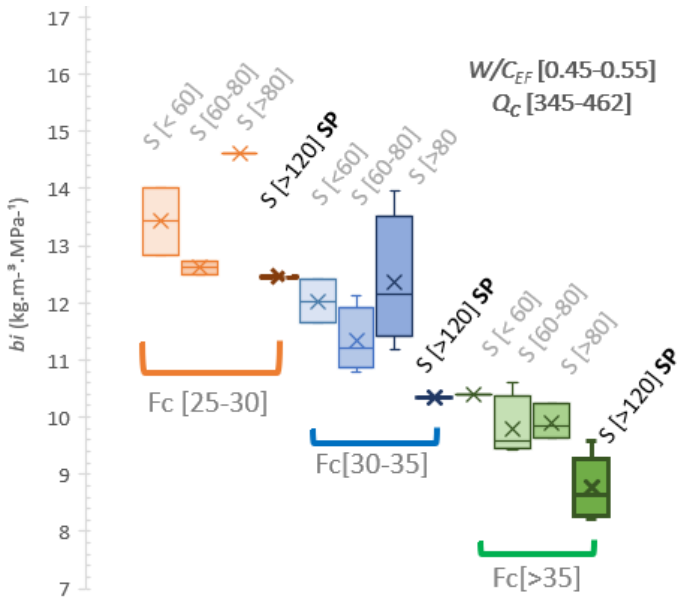


Figura. C.4 – Índice de intensidade de ligante (*bi*) vs. f_c vs. *slump* (*S*) vs Superplastificante (*SP* [>0.1%]). W/C_{ef} [0,45-0,55] 31 resultados BRA.

A Tabela C.1. mostra a redução relativa e absoluta da resistência à compressão do concreto em função de *Ww*, W/C_{ef} e $f_{pc,min}$. Para comparação, a redução foi calculada em função da *fcmax* (o valor máximo obtido a partir das linhas de tendência de regressão na Figura 27) e *fci* (o valor obtido para cada linha de tendência). As células azuis foram consideradas como concretos estruturais f_c [>25 MPa], enquanto as células laranjas, não estruturais. As células verdes mostram a região onde o impacto de *Ww* é menos significativo (< 6 MPa), enquanto as células rosas onde o efeito *Ww* foi mais significativo (> 6 MPa).

Tabela C.1 – Redução da resistência à compressão em função da *Ww*, W/C_{ef} e f_{pc}.

Faixa de análise	***fpc,min* [32]**	*W/Cef*									
		0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75
fcmax (MPa)		65.2	53,4	44,9	38,5	33,6	29,8	26,9	24,7	23,1	21,7
Ww [<2%]	*fci/fcmax*	100%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	97%	94%	91%
Ww [2-5%]		93%	95%	96%	98%	99%	100%	100%	99%	97%	96%
Ww [5-8%]		77%	82%	86%	90%	94%	97%	99%	100%	100%	100%
Ww [>8%]		66%	69%	71%	73%	75%	76%	77%	77%	76%	75%
Ww [<2%]	*fcmax – fci (MPa)*	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	0,8	1,4	1,8
Ww [2-5%]		4,7	2,8	1,6	0,8	0,3	0,0	0,0	0,2	0,6	0,9
Ww [5-8%]		14,9	9,7	6,2	3,8	2,1	1,0	0,3	0,0	0,0	0,0
Ww [>8%]		22,1	16,8	13,1	10,5	8,5	7,1	6,2	5,7	5,5	5,4
Faixa de análise	***fpc,min* [42]**	*W/Cef*									
		0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75
fcmax (Mpa)		79.4	64,8	54,3	46,5	40,5	35,7	31,8	28,6	26,0	23,7
Ww [<2%]	*fci/fcmax*	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Ww [2-5%]		77%	80%	82%	84%	86%	88%	90%	91%	93%	94%
Ww [5-8%]		70%	72%	73%	74%	75%	76%	77%	78%	79%	80%
Ww [>8%]		59%	61%	63%	64%	66%	67%	68%	70%	71%	72%
Ww [<2%]	*fcmax – fci (MPa)*	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ww [2-5%]		18,4	13,3	9,8	7,4	5,7	4,3	3,3	2,5	1,9	1,4
Ww [5-8%]		23,8	18,5	14,7	12,1	10,0	8,5	7,3	6,3	5,5	4,8
Ww [>8%]		32,5	25,2	20,2	16,6	13,8	11,7	10,1	8,7	7,6	6,7

APÊNDICE D – RESUMO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Tabela D.1 – Resumo dos resultados experimentais

Densidade (kg/m³) NBR 9778– 34 amostras								
Traço	Descrição	Qtd de amostras	Média	Mediana	*SD*	COV (%)	MÍN	MÁX
1	AN Conv.	10	2288,09	2389,59	38,26	1,67%	2203,53	2351,12
2	AN LEAP	8	2392,3	2389,59	10,31	0,43%	2381,46	2417,31
3	ARCO Conv.	9	2271,91	2276,28	17,41	0,77%	2229,64	2288,4
4	ARCO LEAP	7	2320,05	2318,91	5,41	0,23%	2312,41	2329,35
Absorção de água (%) – 34 amostras								
Traço	Descrição	Qtd de amostras	Média	Mediana	*SD*	*COV* (%)	MÍN	MÁX
1	*AN CONV.*	10	6,80%	7,00%	0,40%	5,85%	5,70%	7,20%
2	*AN LEAP*	8	6,30%	6,40%	0,40%	5,93%	5,40%	6,70%
3	*ARCO CONV.*	9	8,90%	8,90%	0,30%	2,95%	8,40%	9,30%
4	*ARCO LEAP*	7	8,40%	8,30%	0,10%	0,97%	8,20%	8,50%
Resistência à Compressão (MPa) – 80 amostras								
Traço	Descrição	Qtd. De amostras	Média	Mediana	*SD* (MPa)	*COV* (%)	MÍN	MÁX
1	*AN CONV.*	20	34,98	35,23	1,06	3,00%	32,94	36,25
2	*AN LEAP*	20	30,56	30,4	1,35	4,40%	28	32,96
3	*ARCO CONV.*	20	32,9	32,87	1,13	3,40%	30,2	34,52
4	*ARCO LEAP*	20	26,65	27	1,16	4,40%	24,13	28,44
Resistência à tração na Compressão (MPa) – 23 amostras								
Traço	Descrição	Qtd de amostras	Média	Mediana	*SD* (MPa)	*COV* (%)	MÍN	MÁX
1	*AN CONV.*	7	3,52	3,4	0,23	6,50%	3,25	3,84
2	*AN LEAP*	5	3,11	2,96	0,27	8,60%	2,81	3,47
3	*ARCO CONV.*	7	3,1	2,97	0,39	12,60%	2,62	3,92
4	*ARCO LEAP*	4	2,82	2,76	0,38	13,50%	2,4	3,38
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa) - 109 amostras								
Traço	Descrição	Qtd de amostras	Média	Mediana	*SD* (MPa)	*COV* (%)	MÍN	MÁX
1	*AN CONV.*	30	48,35	48,32	1,31	2,70%	46,12	52,04
2	*AN LEAP*	25	51,43	51,12	1,14	2,20%	49,13	54,44
3	*ARCO CONV.*	30	42,18	41,96	1,33	3,10%	40,21	44,78
4	*ARCO LEAP*	24	43,65	43,29	1,22	2,80%	41,95	46,59
Módulo de elasticidade estático (GPa) – 22 amostras								
Traço	Descrição	Qtd de amostras	Média	Mediana	*SD* (MPa)	*COV* (%)	MÍN	MÁX
1	*AN CONV.*	7	22,36	21,81	0,74	3,30%	21,76	23,84
2	*AN LEAP*	3	25,47	25,51	0,61	2,40%	24,7	26,19
3	*ARCO CONV.*	7	21,19	21,1	0,61	2,40%	19,72	22,62
4	*ARCO LEAP*	5	20,32	20,47	0,53	2,60%	19,56	21,13