



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

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

**PÓS DE RCD TRATADOS POR PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS PARA A  
COMPOSIÇÃO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS DE BAIXO CARBONO**

**MELISSA PASTORINI PROENÇA**

Foz do Iguaçu  
2023



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

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

**PÓS DE RCD TRATADOS POR PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS PARA A  
COMPOSIÇÃO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS DE BAIXO CARBONO**

**MELISSA PASTORINI PROENÇA**

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

Orientadora: Profa. Dra. Edna Possan

Coorientadora: Profa. Dra. Dayana Ruth O. Pruner

Foz do Iguaçu  
2023

MELISSA PASTORINI PROENÇA

**PÓS DE RCD TRATADOS POR PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS PARA A  
COMPOSIÇÃO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS DE BAIXO CARBONO**

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

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientadora: Prof. Dra. Edna Possan  
UNILA

---

Coorientadora: Prof. Dra. Dayana Ruth Oliveira Pruner  
UNILA

---

Prof. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilár  
UFMG

---

Prof. Dra. Nayara Soares Klein  
UFPR

Foz do Iguaçu, 14 de dezembro de 2023.

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

P964

Proença, Melissa Pastorini.

Pós de RCD tratados por processos físico-químicos para a composição de matrizes cimentícias de baixo Carbono / Melissa Pastorini Proença. - Foz do Iguaçu, 2023.

102 f.: il., color.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Foz do Iguaçu - PR, 2023.

Orientadora. Profa. Dra. Edna Possan.

Coorientadora: Profa. Dra. Dayana Ruth Oliveira Pruner.

1. Cimento ecoeficiente. 2. Tratamento de partículas. 3. Pós de RCD. 4. Ácido Tânico. 5. Moagem. 6. Material cimentício suplementar. I. Possan, Profa. Dra. Edna. II. Pruner, Profa. Dra. Dayana Ruth Oliveira. III. Título.

CDU 691

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus e Nossa Senhora por guiar e iluminar meu caminho.

À minha orientadora Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Edna Possan por compartilhar seus conhecimentos e experiências, e pela inspiração com sua dedicação à pesquisa científica, à minha coorientadora, Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Dayana Ruth Oliveira Pruner por me acompanhar e apoiar em todas as etapas, também pelo seu exemplo de dedicação. Agradeço as orientadoras pelos incentivos, e auxílio em todo desenvolvimento deste trabalho e em especial pela amizade.

Aos meus pais Paulo e Marta, minha família e meu namorado Eduardo por serem minha base e estarem sempre ao meu lado.

Aos meus amigos Emerson Perin, Kathleen Risson, Izabelle Alberelo, Reginaldo Araújo, representando todos os amigos que contribuíram e acompanharam essa etapa.

Às empresas Future e Votorantim que forneceram os suprimentos para os experimentos. À empresa Mineromix Pré-fabricados, pela disponibilização do laboratório para desenvolvimento de ensaios de resistência à compressão. À Universidade da Integração Latino-Americana (UNILA), ao Instituto Federal do Paraná – Campus Foz do Iguaçu, ao Centro Universitário União Dinâmica de Faculdades Cataratas (UDC), ao Laboratório Interdisciplinar em Ciências Físicas - LICF (UNILA), ao Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais – LADEMA (UNILA), instituições que viabilizaram o desenvolvimento da pesquisa a partir da disponibilidade de equipamentos e laboratórios.

Aos professores do PPGECI-UNILA que indiretamente também contribuíram na minha formação. A Prof. Dr<sup>a</sup> Nayara Klein e Dr. Alex Neves Junior pelos conhecimentos compartilhados em suas disciplinas. Também às contribuições do Prof. Dr. Jairo José de Oliveira Andrade e Dr. Alex Neves Junior na banca de qualificação.

Aos laboratoristas Dalila Sella, Eduardo Rigo, e Sandy González. A Juliana Abati pela ajuda com as moagens, aos meus estagiários do IFPR, Felipe Both e Ana Carolina Burilli pelo auxílio em laboratório.

A todos Gratidão!

*Aqueles que passam por nós, não vão sós, não nos deixam sós. Deixam um pouco de si, levam um pouco de nós.*

**O Pequeno Príncipe**

## RESUMO

A indústria da construção civil é responsável por uma elevada carga ambiental, devido ao alto consumo de matéria-prima, gastos energéticos, emissões de CO<sub>2</sub> e geração de resíduos. Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável - ODS 11, 12 e 13 bem como as estratégias globais para redução aquecimento global, envolvem dentre outras ações, o uso de materiais de baixo carbono, visando a produção mais limpa e a economia circular. Neste contexto, este estudo avalia o emprego do pó de resíduo de construção e demolição (RCD) misto (MP) e de concreto (CP) como substituto parcial do cimento Portland, analisando diferentes formas de ativação das partículas, a fim de promover melhora na microestrutura e potencializar a aplicação como material cimentício suplementar (MCS). Primeiramente foram realizados diferentes tratamentos, de mecanativação (0,5 e 1,0 horas), termoativação (0,5 e 1,0 horas a 800 °C) e exposição a duas concentrações de ácido tânico (0,5% e 1,0%) nos finos de RCD de origem mista e de concreto. Foram constatadas as alterações físicas e químicas promovidas nas partículas através de técnicas de fluorescência e difratometria de raio-X, termogravimetria, BET e microscopia eletrônica de varredura, analisando-se também alterações na reatividade por meio do ensaio Chappelle modificado e métodos indiretos de atividade com cal e índice de desempenho com cimento. O potencial dos pós de RCD tratados foi avaliado em substituição de 25% de cimento Portland em pastas, através da resistência à compressão e do grau de hidratação. Posteriormente foram selecionados os melhores tratamentos para produção de argamassas cimentícias na proporção 1:3 (padrão de resistência do cimento Portland), com teores de substituição de 10%, 25% e 40% de cimento Portland por pós de RCD tratados. Sendo mensurados o desempenho mecânico aos 28 dias e os indicadores ambientais índice de carbono (IC) e de ligante (IL). De um modo geral os tratamentos das partículas não foram capazes de tornar o pó de RCD pozolânico, independente da origem (mista ou de concreto). Percebeu-se que a termoativação aumenta a atividade com cal aos 7 dias, porém não o suficiente para alterar a classificação dos pós para materiais pozolânicos. O tratamento com ácido tânico densificou a microestrutura das partículas, devido à reação química do produto com o hidróxido de cálcio. Os tratamentos empregados conferiram incrementos nos índices de desempenho com cimento aos 28 dias, indicando melhoria no efeito de preenchimento (fíler) pelas partículas tratadas. No estudo em argamassas, verificou-se especialmente para o pó misto, que todos os tratamentos se demonstram efetivos no ganho de desempenho mecânico. O índice de carbono (IC) atingido foi de 5,57 kg·CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa com 40% de substituição de cimento por pó misto pré-hidratado com ácido tânico. No teor de 25% de substituição (MP termoativado e mecanoativado por 0,5 horas) o IC foi de 6,08 e 6,18 kg·CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa. No pó de concreto os menores índices de carbono foram de 6,82 kg·CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa e 7,11 kg·CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa para 40% para CP mecanoativado por 0,5 hora e 25% de substituição com CP sem tratamento, respectivamente. Os resultados encontrados correspondem a matrizes com resistência mecânica superiores a 40 MPa aos 28 dias, com IC inferiores ao do cimento CII-F-32. Constata-se o potencial dos pós de RCD estudados na contribuição da redução do fator clínquer/cimento e, conseqüentemente, na demanda de materiais cimentícios suplementares para alcance da meta de redução das emissões de carbono, com promoção da economia circular pelo aproveitamento do resíduo da construção.

**Palavras-chave:** Cimento ecoeficiente. Ácido tânico. Tratamento de partículas. Material cimentício suplementar. Termoativação.

## ABSTRACT

The construction industry is responsible for a high environmental burden due to the high consumption of raw materials, energy expenditures, CO<sub>2</sub> emissions, and waste generation. Sustainable Development Goals - SDGs 11, 12, and 13, as well as global strategies for reducing global warming, involve actions such as the use of low-carbon materials, aiming for cleaner production, and circular economy. In this context, this study evaluates the use of powder of construction and demolition waste (CDW) mixed (MP) and concrete (CP) as a partial substitute for Portland cement, analyzing different particle activation methods to improve microstructure and enhance the application as supplementary cementitious material (SCM). Various treatments were initially applied, including mechanoactivation (0.5 and 1.0 hours), thermoactivation (0.5 and 1.0 hours at 800 °C), and exposure to two concentrations of tannic acid (0.5% and 1.0%) in fines of CDW of origin mixed and concrete. Physical and chemical changes in particles were observed through X-ray fluorescence and diffractometry, thermogravimetry, BET, and scanning electron microscopy. Reactivity changes were also analyzed through the modified Chapelle test and indirect methods of activity with lime and performance index with cement. The potential of treated CDW powders was evaluated by replacing 25% of Portland cement in pastes, measuring compressive strength and hydration degree. The best treatments were then selected to produce cementitious mortars at a 1:3 ratio (standard Portland cement strength), with substitution levels of 10%, 25%, and 40% of Portland cement by treated CDW powders. Mechanical performance at 28 days and environmental indicators such as carbon index (CI) and binder index (BI) were measured. In general, particle treatments were unable to make CDW powder pozzolanic, regardless of origin (mixed or concrete). Thermoactivation increment lime activity at 7 days but not enough to change the classification of powders to pozzolanic materials. Tannic acid treatment densified particle microstructure due to the chemical reaction with calcium hydroxide. The treatments applied led to increased performance indices with cement at 28 days, indicating improvement in particle filling effect (filler). In mortar studies, especially for mixed powder, all treatments were effective in gaining mechanical performance. The carbon index (CI) achieved was 5.57 kg·CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa with 40% replacement of cement with mixed powder pre-hydrated with tannic acid. At a 25% substitution level (thermoactivated and mechanoactivated MP for 0.5 hours), the CI was 6,08 and 6,18 kg·CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa. For concrete powder, the lowest carbon indices were 6,82 kg·CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa and 7,11 kg·CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa for 40% for CP mechanoactivated for 0.5 hour and 25% replacement with PC without treatment, respectively. The results correspond to matrices with mechanical strength exceeding 40 MPa at 28 days, with CI lower than CII-F-32. The CDW powders potential was demonstrated in this study, which contribute to reduction the clinker/cement ratio and, consequently, in the demand for supplementary cementitious materials to achieve the carbon emissions reduction, promoting circular economy by utilizing construction waste.

**Key words:** Eco-efficient cement. Tannic acid. Particle treatment. Additional cementitious material. Thermoactivation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da dissertação.....	16
Figura 2 - Taxa de carbono no mundo .....	20
Figura 3 - Atuação do fíler.....	23
Figura 4 - Efeito de nucleação do fíler .....	23
Figura 5 - Disponibilidade de MCS .....	24
Figura 6 - Esquema de economia circular do RCD.....	27
Figura 7 - Estrutura molecular, e orgânicos rico em TA.....	35
Figura 8 - Projeto experimental.....	36
Figura 9 - Saturação de aditivo.....	74
Figura 10 - Emissões dos tratamentos de partículas .....	77
Figura 11 - Resistência à compressão argamassas .....	80
Figura 12 - Fator clínquer/cimento.....	83
Figura 13 - Emissões dos cimentos compostos com pó de RCD .....	84
Figura 14 - Indicadores ambientais.....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Anidros na composição do CP .....	17
Tabela 2 - Hidratos do CP.....	17
Tabela 3 - Composições das argamassas .....	74
Tabela 4 - Dados considerados na estimativa de emissões .....	75
Tabela 5 - Estimativa de emissões dos tratamentos com ácido tânico .....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos
Aft	Hidratos de trissulfoaluminato férrico – etringita
AFm	Monossulfoaluminato férrico
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
CCUS	Captura uso e armazenamento de carbono
CFC's	Clorofluorcarbonetos
CH	Portlandita
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CP	Cimento Portland
CP-II-F	Cimento Portland composto com filler
CPV-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
C <sub>3</sub> S	Sílicato tricálcico – alita
C <sub>2</sub> S	Silicato bicálcico – belita
EC	Economia circular
GCCA	Global Cement and Concrete Association
GEE's	Gases do efeito estufa
FMI	Fundo Monetário Internacional
IEA	Agência Internacional de Energia
MCS	Material cimentício suplementar
ODS's	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
CP	Pó de concreto
CP <sub>TA0,5%</sub>	Pó de concreto pré-hidratado com 0,5% de ácido tânico
CP <sub>G0,5h</sub>	Pó de concreto mecanoativado por 0,5 horas
CP <sub>C0,5h</sub>	Pó de concreto termoativado por 0,5 horas
MP	Pó misto
MP <sub>TA0,5%</sub>	Pó misto pré-hidratado com 0,5% de ácido tânico
MP <sub>G1,0h</sub>	Pó misto mecanoativado por 1,0 horas
MP <sub>C0,5h</sub>	Pó misto termoativado por 0,5 horas
RCA	<i>Recycled coarse aggregate</i>
RCD	Resíduo de construção e demolição
RFA	<i>Recycled fine aggregate</i>
RP	<i>Recycled powder</i>
SIDAC	Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção
SiO	Óxido de silício
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SP	Aditivo superplastificante
TA	Ácido tânico
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>12</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
2.1 CIMENTO PORTLAND e EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> .....	17
2.1.1 Estratégias de Mitigação das Emissões .....	21
2.1.2 Materiais Cimentícios Suplementares.....	22
2.2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO .....	25
2.2.1 Aproveitamento do Pó de RCD .....	28
2.2.2 Tratamentos Físicos e Químicos em Pó de RCD.....	29
2.2.2.1 Mecanoativação.....	30
2.2.2.2 Termoativação.....	31
2.2.2.3 Pré-hidratação com Ácido Tânico .....	33
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>36</b>
3.1 ARTIGO A .....	37
3.2 ESTUDO COMPLEMENTAR .....	73
3.2.1 Procedimentos Experimentais .....	73
3.2.1.1 Resistência à Compressão .....	74
3.2.1.2 Estimativa de Emissões .....	75
3.2.2 Resultados e Discussões.....	79
3.2.2.1 Desempenho Mecânico .....	79
3.2.2.2 Desempenho Ambiental .....	83
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>88</b>
4.1 CONCLUSÕES.....	88
4.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	89
APÊNDICE A – DADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESÃO 28 DIAS .....	90
APÊNDICE B – DADOS DAS EMISSÕES .....	92
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>93</b>

# 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A sustentabilidade no setor da construção é uma das necessidades prementes do mundo em desenvolvimento devido à escassez de recursos naturais e ao aumento das emissões de CO<sub>2</sub> especialmente relacionadas à indústria cimenteira (LIN et al., 2022; THOMAS, 2018). Quanto à escassez de recursos, a economia circular (EC) na indústria da construção pode promover o retorno à cadeia produtiva dos resíduos de construção e demolição (RCD) (OLULEYE et al., 2022), tanto como agregados graúdos e miúdos (ARUN; CHEKRAVARTY; MURALI, 2021; FAROUN; MOHAMMED, 2021; KIM, 2017; SALGADO, 2022) quanto como pó de RCD ( $\emptyset < 0,15$  mm), que pode ser empregado como material cimentício suplementar (MCS) (FANG et al., 2022; KALIYAVARADHAN; LING; MO, 2020; MEHDIZADEH et al., 2022; RUAN; KURUMISAWA, 2022; WANG et al., 2020, 2022) na produção de cimentos menos emissivos.

O pó de RCD como material cimentício suplementar ainda requer esforços em sua valoração, pois geralmente é descartado em aterros (VÁZQUEZ, 2013; XIAO et al., 2018), devido as suas características intrínsecas como a alta absorção e baixa densidade (GENG; SUN, 2013; MEHDIZADEH et al., 2021). Contudo, tratamentos físicos e químicos podem ser empregados para melhoria de suas características (DUAN et al., 2020b; XIAO et al., 2018), promovendo a completa reciclagem do RCD (DUAN et al., 2020a; SHARKAWI et al., 2018; SHARMA; KALBAR; SALMAN, 2022; XIAO et al., 2018), atendendo aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS's) 9, 11, 12 e 13, além de prover a economia circular.

Quanto às emissões de CO<sub>2</sub>, a indústria cimenteira é responsável por aproximadamente 7% das emissões globais, sendo 60 a 70% destas relacionadas ao processo químico de descarbonatação do calcário para a formação do clínquer (PCA, 2021; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018; WBCSD, 2016a; WBCSD; IEA, 2018). A parcela restante das emissões deve-se a queima de combustíveis fósseis para alcance da temperatura de 1450 °C no processo de clínquerização (BAUER, 2019; MEHTA E MONTEIRO, 2014; NEVILLE E BROOKS, 2013). As emissões diretas globais médias associadas ao clínquer são da ordem de 865 kg de CO<sub>2</sub>/tonelada (WBCSD, 2016b). No Brasil, esse indicador está entre 845 e 1049 kg de CO<sub>2</sub>/tonelada de clínquer (SIDAC, 2023),

sendo uma das chaves para o cenário Net Zero<sup>1</sup> das emissões a redução no fator clínquer/cimento (GCCA, 2022), demandando ações do setor voltadas à redução de carbono.

As principais estratégias de redução das emissões na indústria cimenteira envolvem uso de combustíveis com menos carbono, eficiência energética, redução do teor de clínquer contido no cimento e captura, uso e armazenamento de carbono (CCUS) (IEA, 2018; WBCSD, 2016a; WBCSD; IEA, 2018), os dois últimos com maior potencial de mitigar as emissões (IEA, 2018). Também nesse contexto surge a política de taxação das emissões de carbono, sendo uma estratégia promissora de incentivo a tecnologias limpas e redução das emissões (CPLC, 2021; PMR E ICAP, 2016).

Scrivener, John e Gartner, (2018) indicam que somente a eficiência energética e de combustíveis é insuficiente para atingir a redução das emissões, necessitando de uma mudança na química dos cimentos (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018), através do uso de materiais cimentícios suplementares (MCS), promovendo composições de novos cimentos de baixo carbono, com a utilização de matérias-primas recicláveis (PCA, 2021). Os MCS atuam principalmente sobre os mecanismos de efeito filer e atividade pozolânica (GHAFARI et al., 2016; GUPTA; CHAUDHARY, 2022; LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018), podendo também conter cimento anidro no caso do pó de RCD, com potencial reativo. Outra possibilidade é a produção de clínqueres mais reativos, por meio de emprego de aditivos e alterações no processo de clínquerização, possibilitando maior substituição de filer ao cimento (MAYBURY; HO; BINHOWIMAL, 2017).

Estudos atuais indicam que os pós de RCD tratados podem substituir o cimento Portland na composição de matrizes cimentícias, com melhora na microestrutura quanto às características de baixa reatividade e alta porosidade (OLIVEIRA, 2022; WANG et al., 2022). O pó de origem cerâmica pode ser cominuído e calcinado (CHEN et al., 2022; LUO et al., 2022; MAYBURY; HO; BINHOWIMAL, 2017; STEINER; BERNARDIN; PELISSER, 2015) a fim de elevar sua atividade pozolânica ou do efeito de enchimento. Na fração de pó cimentício podem ser aplicados tratamentos térmicos para promover a desidratação da matriz (YU; SHUI, 2013). Tratamentos através da reação de carbonatação de partículas podem melhorar a microestrutura e atuação como filer (KALIYAVARADHAN; LI; LING, 2022; LU et al., 2018; MEHDIZADEH et al., 2022; NEDUNURI; MOHAMMED; MUHAMMAD, 2021), Cita-se ainda o uso ativadores químicos (DASSEKPO et al., 2022; FANG et al., 2022; WANG et al., 2020, 2022), e moagem (DE et al., 2022; DUAN et al., 2020; HE et al., 2022; RICARDO et

---

<sup>1</sup>NetZero – relacionado a neutralidade de carbono, princípio pelo qual as emissões de CO<sub>2</sub> resultantes de um produto ou processo são compensadas pela redução direta de emissões de CO<sub>2</sub> ou por emissões evitadas (PCA, 2021).

al., 2020; LIU et al., 2020) como processos de tratamento que podem contribuir na melhor qualidade das partículas para aplicação como MCS.

A moagem ou mecanoativação tem potencial de reduzir o tamanho das partículas aumentando a área superficial, melhorando o índice de atividade pozolânica e reatividade (MEHDIZADEH et al., 2021; XIAO et al., 2018; ZHAO et al., 2020) contribuindo no efeito de nucleação na atuação como fíler (GUPTA; CHAUDHARY, 2022; LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011). O tratamento térmico ou termoativação melhora a reatividade das partículas através da desidroxilação (KONG; RUAN; KURUMISAWA, 2022; MOHAMMED, 2017; WU et al., 2021), podendo alterar a microestrutura tornando-a amorfa e mais reativa (ZHANG et al., 2022). O tratamento químico pode ser conduzido com ácido tânico<sup>2</sup>, (ARBENZ; AVÉROUS, 2015), o qual faz ligações com íons metálicos, como os íons de cálcio induzindo a mineralização (WEI; HAAG, 2015), podendo reduzir a porosidade do RCD, diminuindo a absorção, também formando nanopartículas que atuam como pontos de nucleação e melhoram a ligação do pó de RCD com a pasta de cimento (FANG et al., 2022; WANG et al., 2022). Outros tratamentos químicos são citados na literatura como uso de CO<sub>2</sub> (SUESCUM-MORALES; KALINOWSKA-WICHROWSKA; FERN, 2021), para carbonatação das partículas, aplicação de ativadores alcalinos químicos (LIU et al., 2023; SASUI et al., 2023), para melhoria da reatividade dos pós.

Neste sentido, este estudo avalia diferentes tratamentos físico-químicos de pós de RCD de origem mista e de concreto com vistas a melhorar as propriedades de suas partículas para aplicação como material cimentício suplementar. Almejando produzir matrizes cimentícias de baixo carbono através da redução do teor de clínquer na composição. Foram realizados os tratamentos de pré-hidratação com ácido tânico, mecanoativação e termoativação, analisados os efeitos físico-químicos e na reatividade das partículas, e quando aplicados em pastas com teor de substituição de 25%, avaliando-se o grau de hidratação e a resistência à compressão aos 28 dias. Selecionou-se os pós tratados mais promissores dentre as características, para avaliar o desempenho mecânico e ambiental quando inseridos em substituição ao cimento Portland em teores de 10%, 25% e 40%.

A possibilidade de incorporar a composição cimentícia os pós de RCD tratados com características adequadas a utilização, associado a um menor teor de emissões quando comparados ao clínquer, permite contribuir em uma alternativa de material cimentício suplementar para a composição de matrizes de baixo carbono, podendo o material ser

---

<sup>2</sup>Ácido Tânico – TA - C<sub>76</sub>H<sub>52</sub>O<sub>46</sub> biomolécula, com potencial de ligação química e indução de mineralização de íons de metálicos devido a estrutura molecular (ARBENZ; AVÉROUS, 2015).

incorporado na produção das suspensões granulares multifásicas heterogêneas reativas (pastas, concretos e argamassas) ou na própria fabricação do cimento Portland, promovendo a valoração da fração de pó do RCD, consequentemente preservando recursos naturais e reduzindo as emissões de carbono.

## 1.2 OBJETIVOS

- **Objetivo Geral**

Analisar os efeitos dos tratamentos físico-químicos nas partículas do pó de RCD e seu potencial para aplicação como material cimentício suplementar.

- **Objetivos Específicos**

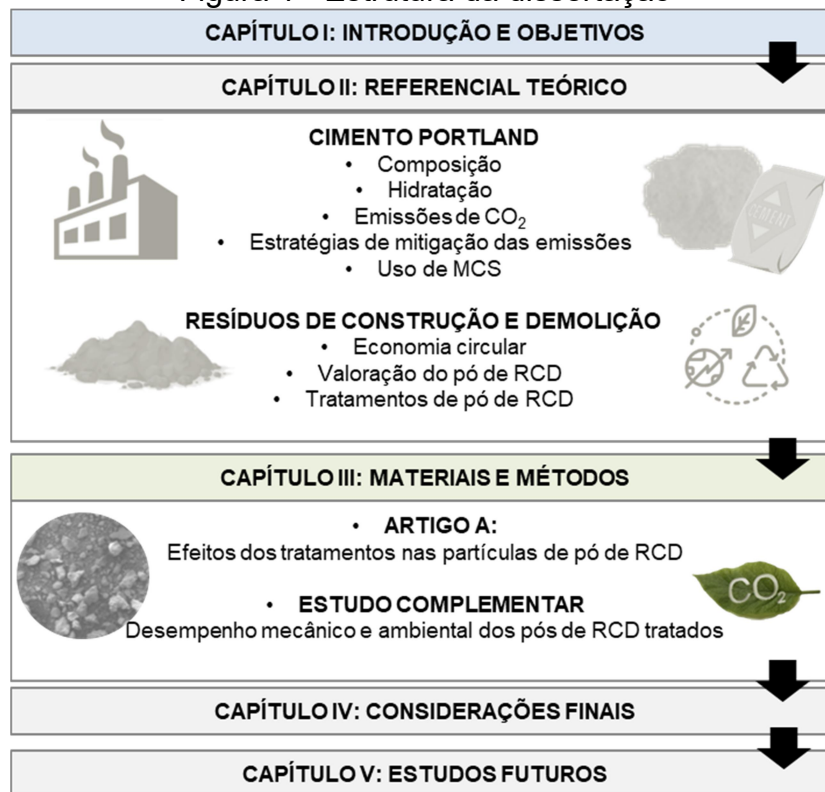
- a) Compreender e comparar os efeitos dos tratamentos de mecanoativação, pré-hidratação com ácido tânico e termoativação nas partículas de pó de RCD.
- b) Analisar o potencial de atuação dos pós de RCD tratados como MCS em diferentes teores de substituição, considerando o desempenho mecânico e ambiental em termos de índice de carbono e índice de ligante.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este estudo está subdividido em 4 capítulos (Figura 1), onde no primeiro tem-se a introdução e objetivos da pesquisa. No capítulo de referencial teórico, são abordados dois assuntos principais o cimento Portland e os resíduos de construção e demolição.

Inicialmente no capítulo 2 traz uma abordagem da química do cimento Portland, sua composição e hidratação, e a problemática de emissões de dióxido de carbono relacionadas ao processo de produção cimenteira, trazendo uma das principais estratégias para mitigação das emissões, explorada neste estudo: o uso de materiais cimentícios suplementares. A sequência do segundo capítulo trata do panorama dos resíduos de construção e demolição, principais problemáticas, e a importância da economia circular ser aplicada na valoração desses resíduos, inclusive a na fração de pó, e os tratamentos aplicados ao pó a ser aproveitado como material cimentício suplementar.

Figura 1 - Estrutura da dissertação



Fonte: Autora, 2023.

No terceiro capítulo apresenta-se o projeto experimental subdivido em um artigo científico abordando os efeitos dos tratamentos nas partículas dos pós de RCD, e um estudo complementar quanto ao desempenho mecânico e ambiental relacionadas aos teores de substituição de pós tratados quando empregados como materiais cimentícios suplementares. O capítulo 4 traz as considerações finais, com as principais conclusões do artigo A e estudo e as sugestões de estudos futuros, respectivamente.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo divide-se em uma abordagem relacionada à produção de cimento Portland, as emissões de carbono e as estratégias para mitigação destas emissões, e uma segunda parte tratando sobre os resíduos de construção e demolição, focada no aproveitamento da fração de pó através dos tratamentos de partículas.

### 2.1 CIMENTO PORTLAND e EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

Os mecanismos de reação do cimento Portland (CP) advêm da sua composição química, atrelada ao processo produtivo especialmente da etapa de clínquerização (formação do clínquer), na qual se formam os anidros (Tabela 1) (NEVILLE, 2013; MEHTA E MONTEIRO, 2014; BAUER, 2019). São os anidros constituintes do clínquer que através da reação de hidratação conferem as propriedades das matrizes cimentícias (pastas, concretos e argamassas), portanto alterações na composição do cimento Portland como o uso de materiais cimentícios suplementares, e redução do fator clínquer, devem ser investigados, pois promovem alterações no processo de hidratação e conseqüentemente nas propriedades das matrizes produzidas.

Tabela 1 - Anidros na composição do CP

Nome	Composição em óxidos	Abreviação
Silicato tricálcico (alita)	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
Silicato dicálcico (belita)	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Aluminato tricálcico	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

Fonte: Mehta e Monteiro, (2014; Bauer (2019).

A reação de hidratação dos anidros constituintes do cimento desenvolve-se simultaneamente em velocidades distintas, formando os principais hidratos, conforme Tabela 2 (NEVILLE E BROOKS, 2013; MEHTA E MONTEIRO, 2014):

Tabela 2 - Hidratos do CP

ANIDROS + H <sub>2</sub> O	HIDRATOS
2C <sub>3</sub> S + 6H	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub> + 3CH
2C <sub>2</sub> S + 4H	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub> + CH
C <sub>3</sub> A + 6H	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub>
C <sub>4</sub> AF + 2CH + 10H	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> + C <sub>3</sub> FH <sub>6</sub>

Fonte: Neville e Brooks (2013).

A hidratação do cimento Portland ainda é investigada no meio acadêmico

sendo dois mecanismos os mais difundidos, a dissolução-precipitação dominante no início da hidratação do CP e a hidratação no estado sólido (reação topoquímica), onde a hidratação ocorre na partícula residual de cimento anidro (MEHTA E MONTEIRO, 2014). De forma simplificada Bauer (2019) descreve o mecanismo de hidratação: o  $C_3S$  se quebra em  $C_2S$  e hidróxido de cálcio (que se precipita como cristal - portlandita), o  $C_2S$  hidrolisado reage com duas moléculas de água e se deposita na forma de gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). A reação do  $C_3A$  com sulfatos forma hidratos de trissulfoaluminato férrico (AFt - etringita), que se cristaliza na forma de agulhas prismáticas, mantendo-se estável até que os sulfatos estejam presentes na mistura, quando o sulfato é consumido, a etringita é gradualmente convertida em monossulfoaluminato férrico (AFm), que se cristaliza como placa hexagonais finas (MEHTA E MONTEIRO, 2014; MARCHON E FLATT, 2016).

O clínquer é um material granulado com predominância de silicatos de cálcio, com propriedade hidráulica (BAUER, 2019; NEVILLE E BROOKS, 2013; MEHTA E MONTEIRO, 2014; CNI, 2012). No processo produtivo as matérias-primas (calcário de 75% a 80% e argila de 20% a 25%) formam uma farinha crua, calcinada em forno rotativo formando o clínquer que passa por resfriamento. Então adiciona-se gipsita ou sulfato de cálcio (em torno de 5% da massa de clínquer, para controle do tempo de pega) e demais adições conforme o tipo de cimento Portland a ser produzido. O material passa por moagem final onde é pulverizado em partículas de 10 a 15  $\mu\text{m}$  e é expedido em sacos ou a granel (NEVILLE E BROOKS, 2013; MEHTA E MONTEIRO, 2014).

A produção do cimento Portland no mundo é responsável por 7% das emissões globais de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (WBCSD; IEA, 2018), sendo que em torno de 60% a 70% destas estão relacionadas ao processo químico de descarbonatação do calcário para formação do clínquer (equação 1), este processo ocorre em temperaturas de 1450 °C, onde concentra-se 30% a 40% das emissões na queima de combustíveis fósseis, sendo emissões diretas (PCA, 2021; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018; WBCSD, 2016a), e 5% em emissões indiretas com energia elétrica. No Brasil esses valores ficam em torno de 63% e 36%, sendo 1% em energia elétrica (SNIC, 2019).



John (2017) indica que para obtenção de 1,0 tonelada de clínquer são necessárias 1,15 toneladas de calcário, emitindo somente pela descarbonatação 510 kg de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera. A produção do clínquer consome entre 3,4 – 3,5 GJ/t, sendo

que os combustíveis fósseis tem predominância na geração de energia térmica. Biomassas e biocombustíveis representaram apenas 3% da energia térmica utilizada em 2020 (IEA, 2018), em 2014 no Brasil o uso de combustíveis alternativos representou 15% (SNIC E ABCP, 2019).

Em 2021 foram emitidos diretamente 590 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento produzido no mundo (IEA, 2022). No Brasil houve uma grande redução nas emissões específicas, passando de 700 kgCO<sub>2</sub>/t cimento em 1990 para 564 kgCO<sub>2</sub>/t cimento em 2014, com um aumento produtivo de 273% (26 Mt para 71 Mt), e um aumento de 223% nas emissões totais. Estima-se que para 2045 a produção seja de 127 Mt (considerando uma baixa demanda), o que exigirá do setor avanços nas ações de mitigação das emissões (SNIC E ABCP, 2019).

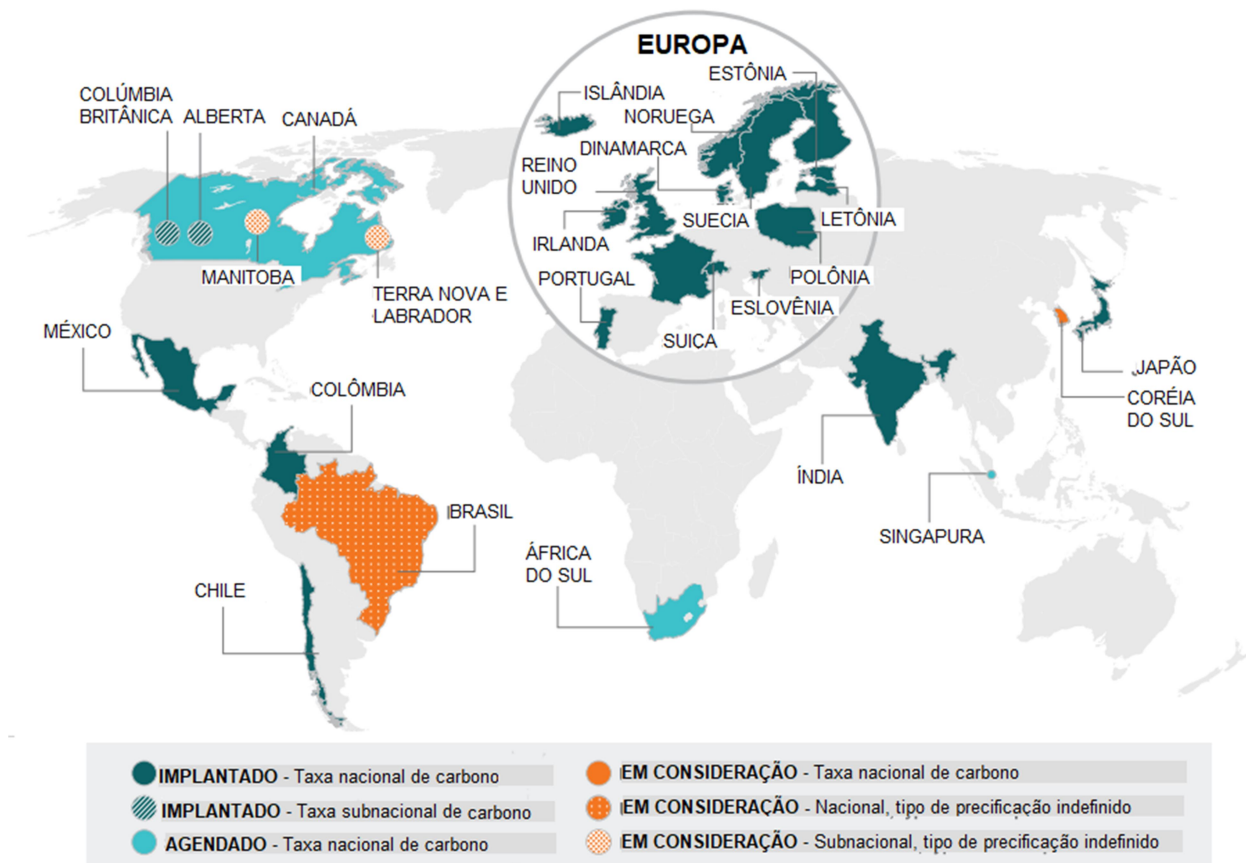
O CO<sub>2</sub> é um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa contribuindo para a mudança climática antropogênica, sendo resultante principalmente das atividades industriais e queima de combustíveis fósseis (LIN et al., 2022), somando-se aos gases metano, clorofluorcarbonetos (CFCs), ácido nítrico e ozono, que absorvem parcialmente a radiação infravermelha da superfície terrestre e irradiam de volta para a superfície à energia absorvida (JUNGES; SANTOS; MASSONI, 2018; JURAS, 2008). O efeito estufa permite manter a temperatura e a vida terrestre, porém a intensificação deste efeito através do excesso de emissões de gases do efeito estufa (GEEs) principalmente CO<sub>2</sub>, e o seu acúmulo na atmosfera, corroboram no aumento das temperaturas do planeta (JURAS, 2008).

O Acordo de Paris (2015) foi um tratado mundial para conter o aquecimento global. Objetivando refrear as mudanças climáticas no mundo com a redução de emissões dos GEEs, para manter a temperatura do planeta abaixo de 2 °C, e esforços para manter em 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais (ONU, 2015), sendo a ação contra a mudança do clima o 13º Objetivo de desenvolvimento sustentável (ODS). Para cumprir tais objetivos algumas indústrias precisam de intensivos esforços na mitigação das emissões, e há o papel fundamental das políticas públicas. Nesse cenário surge também o termo NetZero – relacionado a neutralidade de carbono, princípio pelo qual as emissões de CO<sub>2</sub> resultantes de um produto ou processo são compensadas pela redução direta de emissões de CO<sub>2</sub> ou por emissões evitadas, meta a ser alcançada até 2050 (PCA, 2021).

A precificação de carbono é uma ferramenta política que usa mecanismos de mercado para repassar o custo de emissão aos emissores de GEE, permitindo

adicionar preço no carbono e criar incentivo à redução das emissões, bem como impulsionar investimentos em tecnologias limpas (CPLC, 2021; PMR E ICAP, 2016). A precificação pode ocorrer através de imposto de carbono, sistema de comércio de emissões, mecanismos de crédito de carbono, financiamento climático baseado em resultados e precificação interna do carbono (PMR E ICAP, 2016). O Fundo Monetário Internacional – FMI, indica um valor de imposto sobre o carbono de US\$ 75,00 a tonelada em 2030, alinhado com a limitação do aquecimento global (IMF, 2022). A precificação de carbono já é uma realidade (Figura 2), principalmente países da Europa, também México, Chile, Colômbia, Índia e Japão (PMR, 2017).

Figura 2 - Taxa de carbono no mundo



Fonte: Traduzido de PMR, (2017).

A tendência da precificação do carbono gera demandas para a obtenção do NetZero em muitos setores, sobretudo na construção civil, uma das indústrias que mais consome recursos naturais, gera resíduos e emissões. O Roadmap tecnológico do cimento (IEA, 2018) objetivando o cumprimento das metas climáticas a longo prazo, traz o

cenário 2 °C (2DS), que visa limitar o aumento da temperatura global até 2050 em 2 °C, o que demandará uma combinação de soluções tecnológicas, políticas de apoio, colaboração público-privada, mecanismos de financiamento e também a aceitação social. Hansen et al., (2023) abordam uma constatação de que enquanto as emissões de gases do efeito estufa puderem ser lançadas sem custos na atmosfera o Acordo de Paris e Protocolo de Quioto, acabam não tendo efeito na redução das emissões. Indicando que na atual abordagem geopolítica o aquecimento global excederá 1,5 °C ainda na década de 2020 e 2 °C antes de 2050, reforçando a necessidade da precificação do carbono, conscientização social, cooperação Leste-Oeste (entre os países) (HANSEN et al., 2023).

Espera-se um aumento global na produção de cimento de 12% a 23% até 2050, com o aumento da população e o desenvolvimento de infraestrutura principalmente nos países menos desenvolvidos, considerando tal demanda a redução das emissões no cenário 2 °C requer baixa de 24% dos níveis de emissões de CO<sub>2</sub> nas cimenteiras até 2050, o que representa reduções de emissões acumuladas de 7,7 GtCO<sub>2</sub> em comparação até 2050, atingindo 1,7 GtCO<sub>2</sub>, equivalente a cerca de 90% do total atual de emissões industriais diretas de CO<sub>2</sub> (IEA, 2018; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018).

O Roadmap Tecnológico do Cimento Brasileiro (SNIC, 2019), apresenta dois cenários de aumento na temperatura global, baseados nos estudos desenvolvidos pelo Agência Internacional de Energia (IEA), um cenário onde em 2050 a temperatura média do planeta deve alcançar 6 °C, não havendo esforços de redução das emissões de GEEs, sendo as emissões industriais de CO<sub>2</sub> entre 45% a 65% superiores ao ano de 2014, e um cenário de menor dano climático com aumento de 2 °C, onde a indústria deverá reduzir 50% das emissões através de técnicas específicas, estima-se em 2050 sejam emitidas 66 Mt, o que aumentaria em 6 °C a temperatura do planeta, o valor pode cair em 44 Mt, com adoção de medidas de redução das emissões (SNIC E ABCP, 2019).

### 2.1.1 Estratégias de Mitigação das Emissões

Quatro principais estratégias são elencadas para redução das emissões de CO<sub>2</sub>, sendo: eficiência energética, uso de combustíveis com menos carbono, redução do teor de clínquer no cimento e implementação de novas tecnologias, como captura uso e armazenamento de carbono, sendo os dois últimos com maior potencial de contribuição (IEA, 2018; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018; SNIC E ABCP, 2019).

Independente do processo ou combustível utilizado a emissão de CO<sub>2</sub> é

intrínseca à formação química do clínquer, não há como contornar ou alterar as emissões provenientes da descarbonatação do calcário de forma viável e escalável (PCA, 2021). Deste modo apenas a eficiência energética e dos combustíveis não é capaz de impactar significativamente no panorama de emissões, há necessidade de alteração na composição dos cimentos (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018), com novas misturas de cimento e cimentos de baixo carbono (PCA, 2021).

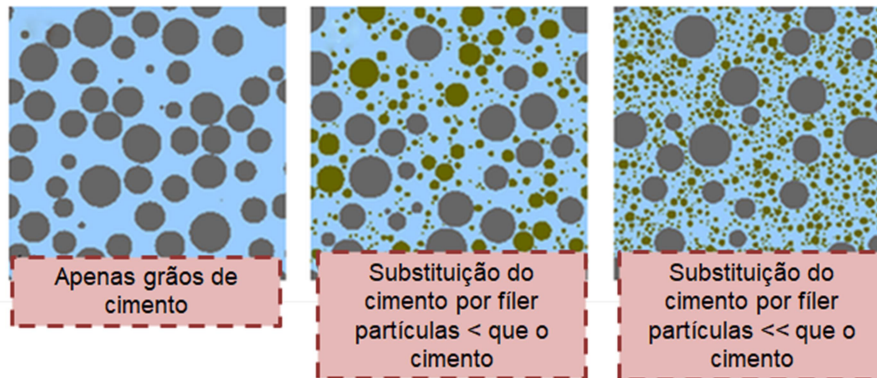
### 2.1.2 Materiais Cimentícios Suplementares

A redução do fator clínquer é estratégia fundamental para a mitigação de emissões do cimento. Em um panorama mundial, os cimentos ainda tem relação de clínquer superiores a 0,9, a tendência futura é uma redução nesse fator em 0,85, 0,80 e 0,75 em 2030, 2040 e 2050 respectivamente (PCA, 2021). Essa atual demanda depende de materiais cimentícios suplementares (MCS), que possuem capacidade de substituir o clínquer na composição do cimento podendo atuar a partir do efeito fíler ou da atividade pozolânica (ABRÃO, 2019; SKIBSTED; SNELLINGS, 2019). Scrivener, John e Gartner (2018) apontam a incorporação de MCS no cimento permitindo a redução do teor de clínquer e o melhoramento das misturas de concretos que possibilitem maior teor de fíler no cimento ou na mistura como alternativa chave para a mitigação das emissões.

A reação pozolânica ocorre a partir de uma condição de elevada finura dos materiais de origem silicosa ou silicoaluminosa (cinzas vulcânicas e artificiais: obtidas a partir de escórias, cinzas volantes, argilas cozidas, cinzas de casca de arroz, sílica ativa), onde a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) em forma amorfa reage com a portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) formando C-S-H em uma reação mais lenta que o cimento (BAUER, 2019; NEVILLE, 2016). Cimentos pozolânicos tem maior impermeabilidade consequentemente maior resistência à penetração de agentes agressivos (MEHTA E MONTEIRO, 2014; BAUER, 2019).

O efeito fíler é físico, acelera a reação de hidratação do cimento, aumentando a densidade de empacotamento, e reduzindo a porosidade, atua através da nucleação e diluição (BERODIER e SCRIVENER, 2014). As partículas do fíler ocupam vazios entre partículas de cimento melhorando a densidade de empacotamento (Figura 3), promovendo um aumento de água livre, trata-se do mecanismo de diluição (HERMANN, et al., 2016; ALMEIDA, et al., 2019), porém um alto teor de fíler pode aumentar o consumo de água para que as partículas sejam completamente envolvidas (ALMEIDA, et al., 2019).

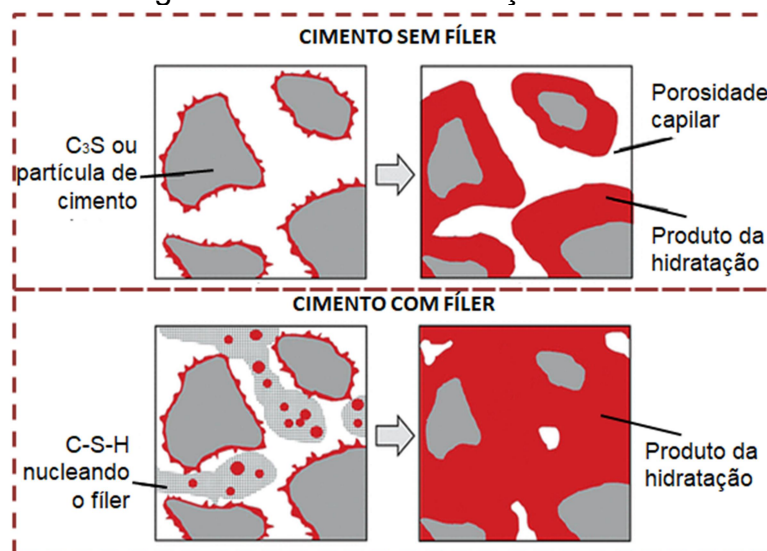
Figura 3 - Atuação do fíler



Fonte: Adaptado de Berodier e Scrivener, (2014).

Na hidratação do cimento Portland o gel C-S-H se deposita na superfície das partículas de  $C_3S$  e começa crescer no espaço dos poros, quando se tem o material de enchimento ocorre tal deposição também na superfície das partículas de fíler (nucleando-as), o que aumenta a taxa de hidratação (Figura 4) (THOMAS, JENNINGS e CHEN, 2009), portanto partículas inertes podem contribuir formando uma microestrutura mais densa através de um efeito físico, substituindo partículas reativas de clínquer. No Brasil o CPII-F (cimento Portland composto por fíler) pode conter até 25% de fíler calcário na composição (ABNT, 2018).

Figura 4 - Efeito de nucleação do fíler

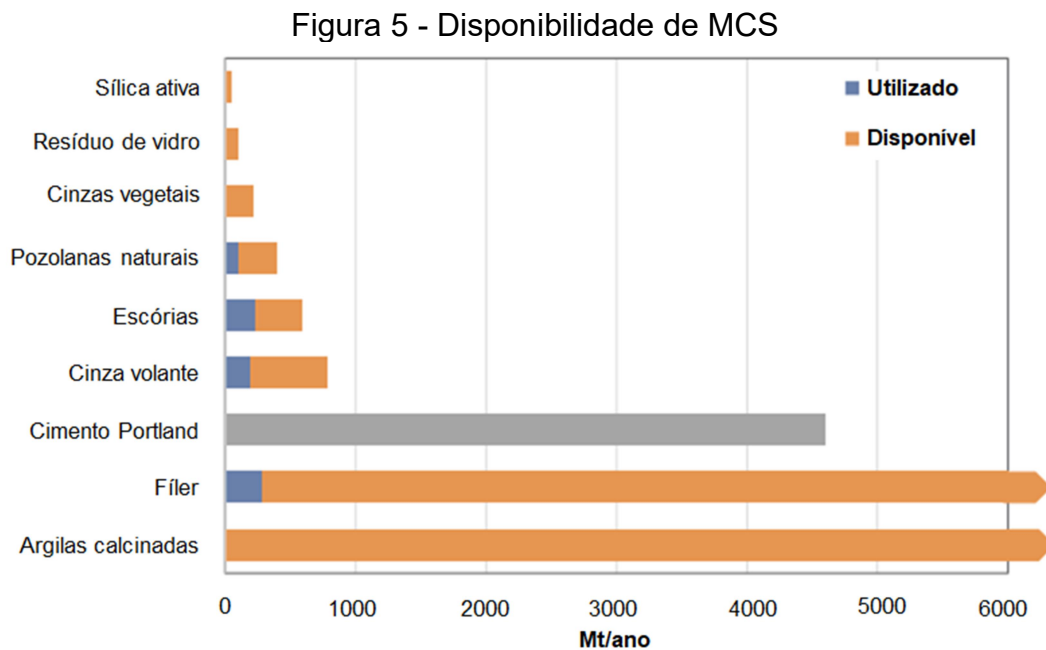


Fonte: Adaptado de Thomas, Jennings e Chen, (2009).

As adições mais comumente utilizadas no cimento são subprodutos de outros processos industriais como cinzas volantes, escórias de alto forno e material carbonático (BATTAGIN, RODRIGUES, 2014). O Brasil se destaca no uso de adições nos cimentos

nacionais, normalizados pela NBR 16697 (ABNT, 2018), que passou por recente mudança, ampliando as faixas de substituições principalmente dos cimentos compostos, especialmente o CII-F onde há possibilidade de aumento de 15% do teor de material carbonático.

A disponibilidade dos MCS convencionais (pozolanas, cinzas volantes e escórias de alto forno) é limitada, não havendo em quantidade de fornecimento suficiente para aplicação na indústria cimenteira (Figura 5), com capacidade de permitir a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, uma redução de fator clínquer para 0,75 requer substancial disponibilidade de MCS (PCA, 2021) tendo novas fontes de MCS papel fundamental (SCRIVENER et al., 2018). Nesse sentido há uma gama diversificada de novos materiais suplementares usados e propostos para uso (LOTTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).



Fonte: Traduzido de Scrivener et al, (2018).

Em 2014, no cenário brasileiro a relação clínquer cimento era 67%, e para 2050 pretende-se alcançar 52%, sendo que os materiais cimentícios suplementares tem o maior potencial de contribuição de 69% para reduzir as emissões. Porém com a limitação de disponibilidade de escórias e cinzas volantes, a tendência é uma ampliação no uso de fíler e argilas calcinadas (SNIC E ABCP, 2019).

Quimicamente os MCS são compostos geralmente de silicato, silicato de alumina, silicato de alumina calcário, escórias e calcitas, sendo que os materiais amorfos tem maior índice de atividade pozolânica (GUPTA; CHAUDHARY, 2022). O tamanho da partícula de MCS tem influência direta na reação de hidratação (LOTTHENBACH;

SCRIVENER; HOOTON, 2011). Gartner, (2004) elenca principais matérias-primas como fontes alternativas com propriedades para compor cimentos hidráulicos: argilas, sulfatos de cálcio, óxidos de ferro, sílica (quartzo, sílex, etc.), cinzas de carvão e carbonato de sódio ou cloreto de sódio (para cimentos ativados por álcalis).

Os MCS podem melhorar a hidratação do cimento e também eficiência do empacotamento das partículas (GHAFARI et al., 2016). Partículas de MCS mais finas que o cimento melhoram os efeitos de dissolução e nucleação contribuindo na hidratação (GUPTA; CHAUDHARY, 2022). Inicialmente o efeito filer aumenta a reação do clínquer, sendo que o MCS reage mais tardiamente, a depender da composição, finura e quantidade de fase amorfa (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

Os filers são partículas finas inertes ou pouco reativas, mas com potencial de grande contribuição econômica e ambiental, pois necessitam apenas de moagem, permitindo que diversos minerais sejam utilizados (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). Com a aplicação de materiais inertes na composição dos cimentos, MCS com baixa reatividade também tendem a serem incorporados, o que exigirá uma mudança na normalização nacional do cimento devido a infinidade de tipos e composições que poderão surgir (JOHN et al., 2019).

A reatividade do MCS pode ser confundida com o efeito filer, sendo muito dependente da alcalinidade da solução dos poros, contribuindo de duas formas para o preenchimento, com espaço extra, pois o MCS não forma hidratos na mesma proporção do clínquer permitindo espaço para os produtos da hidratação, e a nucleação onde as partículas de MCS atuam como pontos de nucleação dos produtos da hidratação do clínquer (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011). Avanços em estudos de distribuição de tamanhos de partículas combinados ao uso de aditivos dispersantes (reduzindo a água na mistura) permitem substituir até 70% de aglomerante por material inerte, sem prejuízo à diluição (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018).

## 2.2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são gerados na execução de novas construções, reformas, demolições, ao final da vida útil de edifícios, ou a partir de desastres (AKHTAR; SARMAH, 2018). A geração de RCD é variável nos países conforme o desenvolvimento, condições econômicas, clima, avanços e incentivos no setor da construção civil, correspondendo a uma média de 50% do total anual de resíduos

sólidos (BRASILEIRO; MATOS, 2015; SANTOS; TUBINO, 2021).

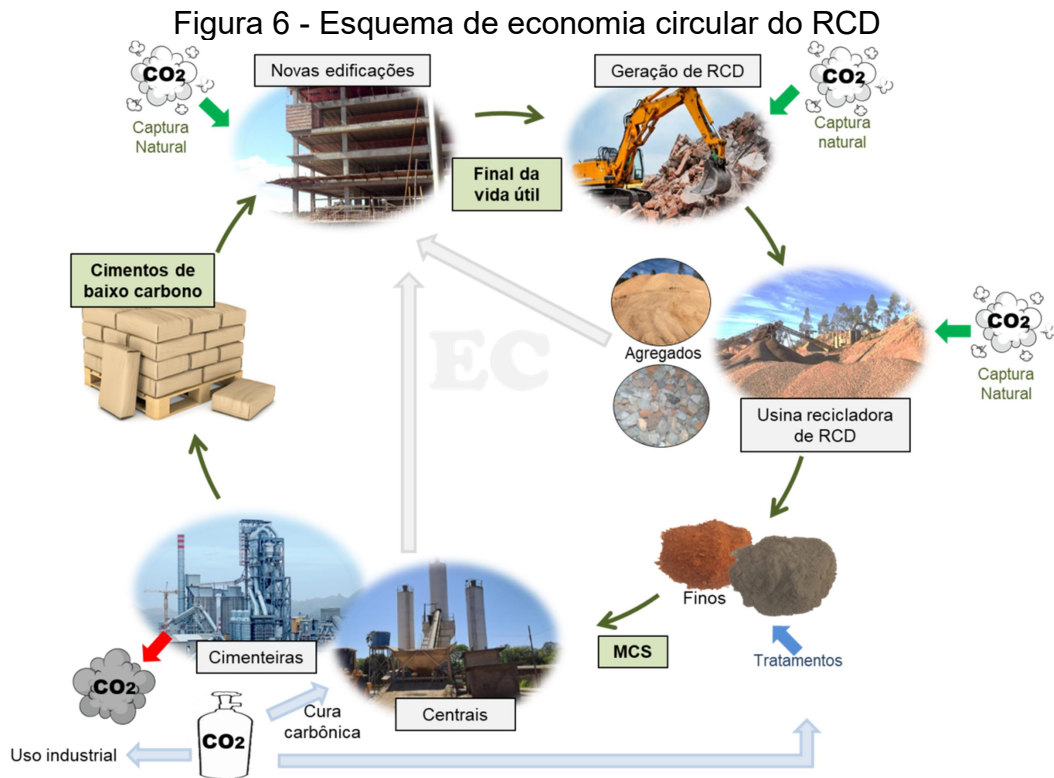
No Brasil o RCD gerado representa mais de 50% dos resíduos sólidos urbanos (ABRELPE, 2020), sendo que a taxa de reciclagem é de 15% a 20% (ABRECON, 2022), a parcela não reciclada é destinada para aterros ou em terrenos abandonados. Conforme a ABRELPE (2021), foi coletado no país em 2021 pelos municípios 221 kg/hab.ano de RCD (ABRELPE, 2021). A geração de RCD no Brasil fica entre 168 a 760 kg/hab.ano, com mediana de 500 kg/hab.ano (ABRECON, 2022), observa-se que os dados das duas instituições são divergentes. O manuseio do RCD geralmente ocorre com a destinação a aterros, onde a maioria das técnicas de processamento são inviáveis, nesse sentido também é necessário prever os problemas de escassez de terrenos para aterros e aumento dos custos de transporte, corroborando na necessidade de outras estratégias de gestão de resíduos, como redução, reutilização e reciclagem (AKHTAR; SARMAH, 2018; KIM, 2017; SANTOS; TUBINO, 2021).

A deposição inadequada dos resíduos de construção e demolição ocasiona problemas sociais e ambientais como assoreamento dos sistemas de drenagem (JOHN, 2017) além dos resíduos terem potencial de contaminação da água e do solo (LU e TAM, 2013). Devido aos grandes volumes de RCD gerados mundialmente, representam uma problemática na gestão integrada dos resíduos, principalmente em países de extensão territorial menor (SANTOS; TUBINO, 2021) e países em desenvolvimento (SHARKAWI et al., 2018).

O RCD pode ser processado na forma de agregados reciclados aplicados na construção civil como substitutos de materiais naturais (DUAN et al., 2020b; KIM, 2017), sendo uma solução ao descarte em aterros, contribuindo também com a preservação de recursos naturais (ARUN; CHEKRAVARTY; MURALI, 2021; HASSAN; FAROUN; MOHAMMED, 2021; SALGADO; SILVA, 2022). Quanto à problemática de manejo incorreto e à necessidade de promover o reaproveitamento do RCD, a viabilidade de uso deve considerar parâmetros técnicos e de sustentabilidade (VÁZQUEZ, 2013), objetivando o reaproveitamento do material com qualidade.

O setor da construção civil encontra-se em uma transição entre um modelo de economia linear para a economia circular (EC) (Figura 6) (DOUSSOULIN; BITTENCOURT, 2022; SHARMA; KALBAR; SALMAN, 2022), sendo de interesse pesquisas que promovam a EC na indústria da construção civil (OLULEYE et al., 2022). A economia circular pode estimular o desenvolvimento de inovações em áreas específicas, como reciclagem de concreto e valorização de resíduos, além da conscientização social

sobre a valoração dos resíduos de materiais na cadeia produtiva (DOUSSOULIN; BITTENCOURT, 2022). Nesse sentido as políticas públicas tem papel fundamental na regulamentação com as legislações, na implementação através de incentivos, inclusive incentivos a pesquisa científica, para viabilizar formas de valoração do RCD.



Fonte: Autora, 2023.

No Brasil a gestão dos resíduos sólidos é regida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei Federal nº 12.305/2010 estabelecendo a hierarquia na gestão integrada dos resíduos sólidos: não geração, reaproveitamento, reciclagem, tratamento e destinação final adequada, e a Resolução 307/2002 (Brasil, 2002) do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece as diretrizes de classificação e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil no país.

A Resolução 307/2002 da CONAMA categoriza o RCD em classes A, B, C e D, sendo que classe A envolve a maior parte dos resíduos (mais de 90%), incluindo tijolos, concretos, argamassas; na classe B pertencem os resíduos reutilizáveis e reciclados que contêm plástico, borracha, metal e madeira, a classe C envolve materiais que não podem ser reciclados e reutilizados e a classe D contém materiais perigosos (AKHTAR; SARMAH, 2018).

O Objetivo do Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9, estabelece o desenvolvimento de infraestrutura resiliente e sustentável, com criação de modelos de

negócios baseados na economia circular, geração de empregos e aprimorando o avanço técnico no ambiente construído. O reaproveitamento do RCD, também contribui no cumprimento dos ODS's 11 e 12 (SHARMA; KALBAR; SALMAN, 2022). Uma indústria da construção mais sustentável e a conservação de recursos naturais é crucial para o desenvolvimento contínuo (AKHTAR; SARMAH, 2018). Nesse sentido a economia circular é uma contribuição à conservação de recursos finitos, reduzindo o desperdício e promovendo o uso eficiente de materiais (OLULEYE et al., 2022).

### 2.2.1 Aproveitamento do Pó de RCD

No processamento dos agregados de RCD são gerados agregados graúdos reciclados (RCA, do inglês "*recycled coarse aggregate*") e uma grande quantidade de agregados finos reciclados (RFA, do inglês "*recycled fine aggregate*") e pó reciclado (RP, do inglês "*recycled powder*") (<0,15 mm) (DUAN et al., 2020b), o pó que também é uma fração fina constitui-se de micropartículas. O RFA e RP representam cerca de 20% a 50% da massa de RCD (VÁZQUEZ, 2013). A fração de pó com tamanho inferior a 0,15 mm é variável entre os estudos Chen et al.,(2021) citam teores na ordem de 10%, já Wang et al., (2022) indicam valor entre 5% a 20% e Oliveira et al. (2021) indicam 19,14%. A quantidade de pós gerado pode variar dependendo das características do resíduo de origem, do tipo de equipamentos de trituração e de processamento empregados.

Na produção de agregados reciclados de alta qualidade as tecnologias precisam promover a remoção da argamassa aderida nos agregados (KIM, 2017), pois essa característica promove alta porosidade e absorção de água, resultando na menor resistência desse material comparado ao agregado natural. A remoção e o reforço da argamassa aderida podem melhorar a qualidade do material, através de britagem e moagem gerando-se uma fração considerável de pó (KIM, 2017; LU et al., 2018; SHI et al., 2016).

Há anos na literatura tem-se um número significativo de pesquisas voltadas ao aproveitamento do RCA (ARUN; CHEKRAVARTY; MURALI, 2021; CHAUDHARY et al., 2022; COMINATO et al., 2022; HASSAN; FAROUN; MOHAMMED, 2021; KUMAR et al., 2022; LIU et al., 2022; MOULYA; CHANDRASHEKHAR, 2022; PRASAD DASH et al., 2022; RAHUL et al., 2022; SHI et al., 2021; YE; CHEN; SU, 2022; ZHOU et al., 2021; ZHU et al., 2022), enquanto a fração fina ainda possui pouco mercado, sendo geralmente descartada (VÁZQUEZ, 2013; XIAO et al., 2018). Isso deve-se ao fato de que em geral os agregados finos, têm maior teor de argamassa, o que culmina em uma alta absorção e baixa

densidade (ULSEN et al., 2019), sendo mais suscetíveis a presença de contaminantes, o que restringe o uso (VÁZQUEZ, 2013). Na fração de pó a alta absorção de água e alta porosidade leva a uma menor quantidade de água disponível para as reações de hidratação do cimento, o que prejudica a microestrutura, especialmente a zona de transição entre os finos de RCD e a pasta de cimento, aumentando porosidade das matrizes, permitindo maior entrada de CO<sub>2</sub> (GENG; SUN, 2013), também possuem baixa reatividade comparado ao cimento Portland (MEHDIZADEH et al., 2021).

Em geral, o RP é descartado (LU et al., 2018; XIAO et al., 2018) ou aplicado como material de enchimento (JESUS et al., 2019). A eficiência da reciclagem ocorre com a ampliação de aplicações possíveis as diferentes frações do RCD processado, aumentando o valor agregado desse material (SHARKAWI et al., 2018), sendo que o aproveitamento da fração de pó é fundamental para fechamento do ciclo de vida dos materiais de construção. Neste sentido alguns tratamentos físicos e químicos vem sendo estudados para melhoria da qualidade do pó de RCD, permitindo a aplicação como material cimentício suplementar e promovendo a valoração desse resíduo (DUAN et al., 2020b; RUTH BOLA OLIVEIRA et al., 2023; XIAO et al., 2018).

### 2.2.2 Tratamentos Físicos e Químicos em Pó de RCD

Dependendo das partículas de RCD algumas características deletérias como a alta porosidade, que leva a uma alta absorção, podem reduzir significativamente a qualidade dos compósitos cimentícios que as incorpora, afetando a resistência e durabilidade do concreto/argamassa produzido (WANG et al., 2022). Sendo necessário por vezes tratar previamente as partículas de modo a obter uma microestrutura que contribuirá de melhor forma na matriz cimentícia.

São recentes os estudos para melhoramento das características dos finos de RCD (WANG et al., 2020), sendo propostos tratamentos físicos de ativação mecânica como a moagem (DE et al., 2022; DUAN et al., 2020; HE et al., 2022; RICARDO et al., 2020; LIU et al., 2020), de ativação térmica - calcinação, e químicos, com uso de ativadores químicos (DASSEKPO et al., 2022; FANG et al., 2022; ROBAYO-SALAZAR; VALENCIA-SAAVEDRA; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, 2022; WANG et al., 2020, 2022) e CO<sub>2</sub> - carbonatação (KALIYAVARADHAN; LI; LING, 2022; MEHDIZADEH et al., 2022a; NEDUNURI; MOHAMMED; MUHAMMAD, 2021), que podem melhorar a reatividade e as características dos finos de RCD (DUAN et al., 2020b; MEHDIZADEH et al., 2021).

### 2.2.2.1 Mecanoativação

O tratamento mais comum na produção de agregados reciclados é a trituração e posterior moagem para formação de pó reciclado (DUAN et al., 2020b), a moagem em geral permite a alteração do tamanho das partículas (WANG et al., 2022), que influência diretamente nas propriedades dos pós reciclados; quanto mais fino maior a reatividade (DUAN et al., 2020a; MEHDIZADEH et al., 2021; XIAO et al., 2018; ZHAO et al., 2020). Comparados ao cimento esses pós apresentam formas mais irregulares e ásperas (KIM, 2017), e maior absorção de água (DUAN et al., 2020a).

Alguns estudos propõe que a força mecânica de moagem pode distorcer a estrutura tetraédrica de  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub> e transformá-lo em SiO amorfo (YU, X., 2017). O Ca(OH)<sub>2</sub> e C-S-H em pastas cimentícias também pode ser convertidos em formas mais amorfas por moagem (DUAN et al., 2020b), tendo maior reatividade os MCS com maior conteúdo amorfo (GUPTA; CHAUDHARY, 2022). Também a moagem, especialmente nos pós de concreto permite a exposição de partículas de cimento anidro, que tem potencial de hidratar quando incorporadas em novas matrizes cimentícias (WANG et al., 2022).

Um menor tamanho de partícula do resíduo cerâmico leva a um maior consumo de hidróxido de cálcio, devido à reatividade do material, tornando a microestrutura das matrizes produzidas mais densa (ZHAO et al., 2020). Para os pós de resíduos de concreto quanto maior a finura, maior a reatividade possivelmente devido à presença de cimento anidro contido na fração fina (OLIVEIRA; DEZEN; POSSAN, 2020).

O pó cerâmico possui uma estrutura mais porosa e portanto apresenta maior absorção que o pó de concreto, o processo de cominuição pode formar partículas mais uniformes melhorando tal condição e permitindo a atuação do pó como pontos de nucleação dos produtos da hidratação do cimento Portland (ZHAO et al., 2020). O aumento do teor de substituição de cimento por pó requer o uso de aditivo redutor de água para manter a fluidez da matriz (XIAO et al., 2018), devido a tendência da partículas de pó formarem aglomerados que retém água (OLIVEIRA, 2000), os aditivos auxiliam na dispersão das partículas, sem maior demanda de água, garantindo mobilidade.

Zhao et al., (2020) avaliando o efeito das diferentes granulometrias de pós de resíduo cerâmico (27,1; 15,8; 10,5; 3,4  $\mu$ m) em tempos de moagem em moinho de bolas de 10, 30, 60 e 120 min a 400 rpm, verificaram viabilidade na substituição em teores de até 30%, corroborando aos achados de Xiao et al., (2018) com pó de resíduo misto processado em moinho com cavidade de cone (partícula abaixo de 45  $\mu$ m). Segundo os autores, o

resíduo misto com composição de tijolos de argila queimados com uma faixa de tamanho semelhante às partículas de cimento mostrou reatividade para uso como materiais cimentícios suplementares em faixas de 15% a 30%. Oliveira, Dezen e Possan, (2020) utilizando a fração fina de pó de concreto (<0,15 mm) verificaram diâmetro médio das partículas próximo ao do cimento, porém ausência de pozolanicidade, empregando o material como um filer com potencial de substituição de cimento de até 25%.

Oliveira et al., (2023), realizaram a cominuição do pó reciclado de concreto ( $\varnothing < 0,15\text{mm}$ ) em moinho planetário de alta eficiência pelos períodos de 0, 0,5, 2 e 6 horas, aplicando o material em substituição ao cimento Portland em pastas, os autores verificaram que a presença do pó tratado aumentou o grau de hidratação das matrizes. O pó moído por 30 minutos apresentou maior grau de hidratação aos 28 dias, e quanto maior o tempo de exposição ao tratamento há aumento da área de superfície específica das partículas o que ocasiona em geral maiores resistências mecânicas (OLIVEIRA et al., 2023).

A literatura indica que o tempo de moagem é fator a ser analisado, conforme aumento do tempo há refinamento das partículas elevando consideravelmente a área de superfície específica, que promove maior reatividade do material, porém a moagem de longa duração também causa aglomeração das partículas de pó que resulta na redução da eficiência do refinamento, e aumento do consumo de água nos compósitos a ser utilizado o pó como MCS (DUAN et al., 2020a; XIAO et al., 2018; ZHAO et al., 2020). Elevados tempos de moagem também demandam mais energia, elevando os custos de processamento e aumentando a carga ambiental do produto, o que não é desejável. A utilização de pó de RCD como MCS deve ser baseada na análise do efeito dos níveis de finura e taxas de substituição nas propriedades dos compósitos obtidos, bem como a ação do MCS pode se dar através da atividade pozolânica e do efeito filer, a depender das condições do material (MA et al., 2020), também deve-se considerar que o tamanho de partícula do MCS deve ser semelhante as partículas de cimento Portland para que os efeitos de nucleação e atuação como microagregados sejam satisfatórios (TANG et al., 2020).

#### 2.2.2.2 *Termoativação*

O resíduo de construção e demolição tem predominância de constituição de carbonato de cálcio e produtos da hidratação do cimento, sílica (cerâmicos), quartzo e dolomita (dos agregados) (WU et al., 2021; ZHANG et al., 2022), essas composições podem sofrer alterações na estrutura química a partir da decomposição térmica (WU et al., 2021),

ocorrendo por mecanismos distintos a depender da origem do pó de RCD.

No pó de origem cimentícia a calcinação promove a desidratação da matriz decompondo a principal fase de C-S-H, portlandita e carbonatos de cálcio, formando óxido de cálcio (KONG; RUAN; KURUMISAWA, 2022; WU et al., 2021), no processo de calcinação o CaO pode combinar-se com o quartzo formando wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ) (KONG; RUAN; KURUMISAWA, 2022). É possível identificar a partir de difratogramas as alterações na cristalinidade da  $\text{SiO}_2$  para  $\text{SiO}_{2\text{amorfa}}$  entre 600 °C a 800 °C (ZHANG et al., 2022). A ativação térmica pode aumentar a área superficial das partículas, tornando o pó de RCD mais reativo, alterando também a distribuição granulométrica (ZHANG et al., 2022).

Na fração de resíduo argilosa a termoativação ocorre pela desidroxilação (remoção de grupos hidroxila de seus argilominerais), formando uma estrutura parcialmente amorfa de alumino-silicatos, com potencial pozolânico (MOHAMMED, 2017; MSINJILI et al., 2019). O processo térmico ocorre com as etapas: desidratação; desidroxilação estágio primordial na calcinação da argila, onde ocorre a perda de água quimicamente ligada, a partir de grupos OH que contêm os minerais argilosos destruindo sua cristalinidade, conferindo um estado amorfo; descarbonatação, a depender da quantidade de carbonatos nas argilas e resíduos; e acima de 900 °C ocorre a formação de fases cristalinas, etapa que pode reduzir a reatividade (MOHAMMED, 2017).

Resíduos cerâmicos são relatados como potenciais pozolanas artificiais (HOPPE FILHO et al., 2021; LUO et al., 2022; PITARCH et al., 2021; STEINER; BERNARDIN; PELISSER, 2015), porém a reatividade desses materiais é de difícil controle devido aos tratamentos inadequados, não sendo garantida a pozolanicidade, pois em seu processamento pode não promover necessariamente a desidroxilação total sem recristalização do material (MOHAMMED, 2017). A reatividade é dependente da variedade mineralógica da matéria-prima (MOHAMMED, 2017) e do processo de sinterização (HOPPE FILHO et al., 2021; PITARCH et al., 2021).

Wu et al., (2021) verificaram em estudo com pós de cimentos residuais com diâmetros médios de 23,5–26,5  $\mu\text{m}$ , que a faixa de temperatura de 600 a 800 °C na ativação térmica por 2 horas é sugerida para melhorar as propriedades do pó de cimento residual. Levando em consideração o consumo de energia e a eficiência da termoativação, uma temperatura superior a 600 °C forma compostos reativos a partir da desidratação e descarbonatação. Em temperaturas de 1200 °C a estrutura irregular do pó torna-se lisa, o que prejudica os efeitos de enchimento e nucleação quando inserido na matriz cimentícia (WU et al., 2021). Com resultados semelhantes e utilizando um forno de alta

temperatura (mufla) com partículas de pó de concreto reciclado entre 10,52 a 22,64  $\mu\text{m}$  de diâmetro, Zhang et al., (2022) realizaram a termoativação por 2 horas nas temperaturas de 400 °C, 600 °C, 800 °C, a uma taxa de aquecimento de 5 °C/min. Comparando com tratamentos de moagem e ativação química, constataram com base no desempenho mecânico, no índice de atividade pozolânica e nas características das partículas que o método de ativação mais viável e eficaz foi a ativação térmica à 800 °C (ZHANG et al., 2022).

Oliveira (2022) tratando a partir da calcinação em mufla a 800 °C resíduos de pó misto, em diferentes períodos de exposição verificou que quando aplicados em pastas cimentícias em substituição ao cimento Portland pós tratados por 0,5 e 1,0 horas apresentaram desempenho semelhante ao período de 2 horas após os 28 dias, enquanto que no período de 3 horas para o tratamento dos pós o desempenho mecânico da matriz foi prejudicado (OLIVEIRA, 2022).

Observa-se uma tendência nos estudos com pós de RCD na adoção de temperaturas de 800 °C para tratamento térmico, sendo realizado em forno mufla na escala de laboratório. Nesta faixa de temperatura tanto a fração cimentícia como a de origem argilosa (cerâmica), sofrem desidroxilação, e se beneficiam da formação de óxidos com potencial de reidratação a partir da descarbonatação, o que pode melhorar as possibilidades de aplicação dos pós termoativados como MCS.

### 2.2.2.3 Pré-hidratação com Ácido Tânico

Biomateriais são fontes alternativas com potencial de redução do carbono incorporado em produtos industrializados, sendo ambientalmente amigáveis (DU et al., 2021). O polifenol natural ácido tânico (TA) (CHEN et al., 2022), pertence ao grupo dos taninos vegetais, sendo a terceira maior classe de biomoléculas aromáticas naturais (ARBENZ; AVÉROUS, 2015), podendo atuar como matéria-prima alternativa em produtos, blocos de construção para o desenvolvimento de polímeros e diversos materiais (ARBENZ; AVÉROUS, 2015; CHEN et al., 2022).

Os taninos são compostos fenólicos, encontrados em diversas espécies vegetais, tendo a função de proteção das plantas quanto a predação (DAS et al., 2020; SHARMA, 2019). Presentes no carvalho (*Quercus sp*), eucalipto (*Eucalyptus*), salgueiro (*Salix caprea*), pinho (*Pinus sp*), quebracho (*Scinopsis balansae*) (CARVALHO, 2011), e em maior quantidade na acácia negra ou *Acácia mearnsii* explorados comercialmente (OGAWA; YAZAKI, 2018). Uma espécie originária do Sudeste Australiano (COSMO; GALERIANI;

NOVAKOSKI, 2020; MORA et al., 2001; NASCIMENTO, 2020), sendo atualmente o Brasil o maior produtor mundial seguido pela África do Sul, com 170 e 120 mil hectares plantados (NASCIMENTO, 2020), respondendo juntos por 89% do tanino mundial (COSMO; GALERIANI; NOVAKOSKI, 2020).

O estado do Rio Grande do Sul concentra a totalidade de produção da nacional de acácia negra (AGEFLOR, 2020), cuja a colheita ocorre entre 5 e 10 anos após o plantio, com diversas aplicações na marcenaria, indústria de celulose, energia, e destaque na produção de tanino a partir da casca (AGEFLOR, 2020; NASCIMENTO, 2020; SAYURISUYENAGA et al., 2015). O tanino exportado pelo Rio Grande do Sul em 2019 correspondeu a 61,4% da produção nacional girando um valor de US\$ 41,1 milhões, destinado principalmente para países como México, Índia e China (AGEFLOR, 2020).

A cada 100 Kg de casca de acácia negra são extraídos 30 Kg de tanino (MORA et al., 2001), estimando-se um percentual equivalente a 14% de ácido tânico em uma planta (PANSERA et al., 2003). O ácido tânico é um tipo de tanino puro obtido em um processo onde as gomas, açúcares e outros componentes insolúveis em meio alcoólico são eliminados, através de um sistema sólido-líquido empregando-se solventes orgânicos com baixa perda de volatilização e com altos índices de recuperação (CARVALHO, 2011).

O ácido tânico extraído é amplamente explorado na indústria do curtume pela capacidade de precipitar proteínas (FALCÃO; ARAÚJO, 2018), na indústria biomédica e farmacológica devido às propriedades antiinflamatórias, antitumorais e antipatogênicos (JING et al., 2022; WINIARSKA-MIECZAN et al., 2023), em filmes plastificados para embalagens de alimentos (PICCHIO et al., 2018), como agentes de estabilização de soluções de material cerâmico (CERRUTTI, 2005; FINKLER et al., 2018; WEBBER, 2017). Com vasta versatilidade de aplicação e suas características de biocompatibilidade, capacidade inteligente de automontagem e capacidade reticuladora o TA vem despertando interesse nas múltiplas áreas do conhecimento (CHEN et al., 2022).

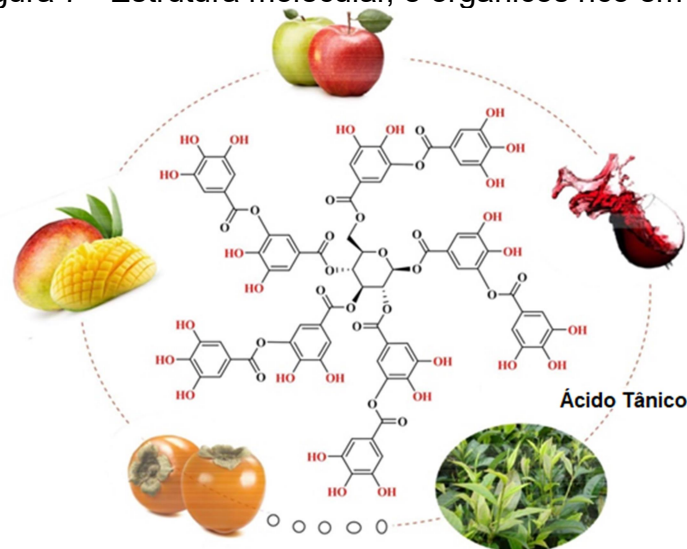
Relacionado à indústria da construção o ácido tânico pode ser aplicado como retardador de hidratação de cimentos através da quelação com íons de cálcio (KANG et al., 2023; ZHANG et al., 2023), agente na proteção de armaduras de aço contra corrosão (SINGH; YADAV, 2008), dispersante em soluções argilosas (FARIAS et al., 2007; HAFSHEJANI; MOSLEMIZADEH; SHAHBAZI, 2016; PAN et al., 2022) e também no tratamento de partículas de resíduos de construção e demolição (FANG et al., 2022; WANG et al., 2020, 2022),

Baseados no comportamento químico do ácido tânico (TA, do inglês "*Tannic*

acid”), estudos recentes exploram a capacidade de melhoramento do pó de resíduos da construção, quando submetidos ao tratamento de pré-hidratação com ácido tânico. O tratamento consiste em deixar a fração de pó de RCD em solução com concentrações inferiores a 2% de ácido (FANG et al., 2021, 2022; KHAROUF et al., 2021; WANG et al., 2020, 2022; WEI; HAAG, 2015).

Esse ácido tem facilidade de formar ligações de hidrogênio, interações eletrostáticas com muitas moléculas, isso deve-se a presença de anéis benzênicos e grupos hidroxila (a estrutura da molécula de TA pode ser observada na Figura 7), aderindo fortemente em diversas superfícies (WEI; HAAG, 2015). O grupo pirogalol na molécula de TA tem alta capacidade de capturar íons de cálcio em solução aquosa, induzindo a mineralização local (OH et al., 2015), podendo complexar também outros íons metálicos como  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  (REN et al., 2021; TAM; MCCOLL, 1990), sendo a hidratação do cimento um processo de mineralização, observa-se potencial do TA melhorar essa reação (WANG et al., 2020).

Figura 7 - Estrutura molecular, e orgânicos rico em TA



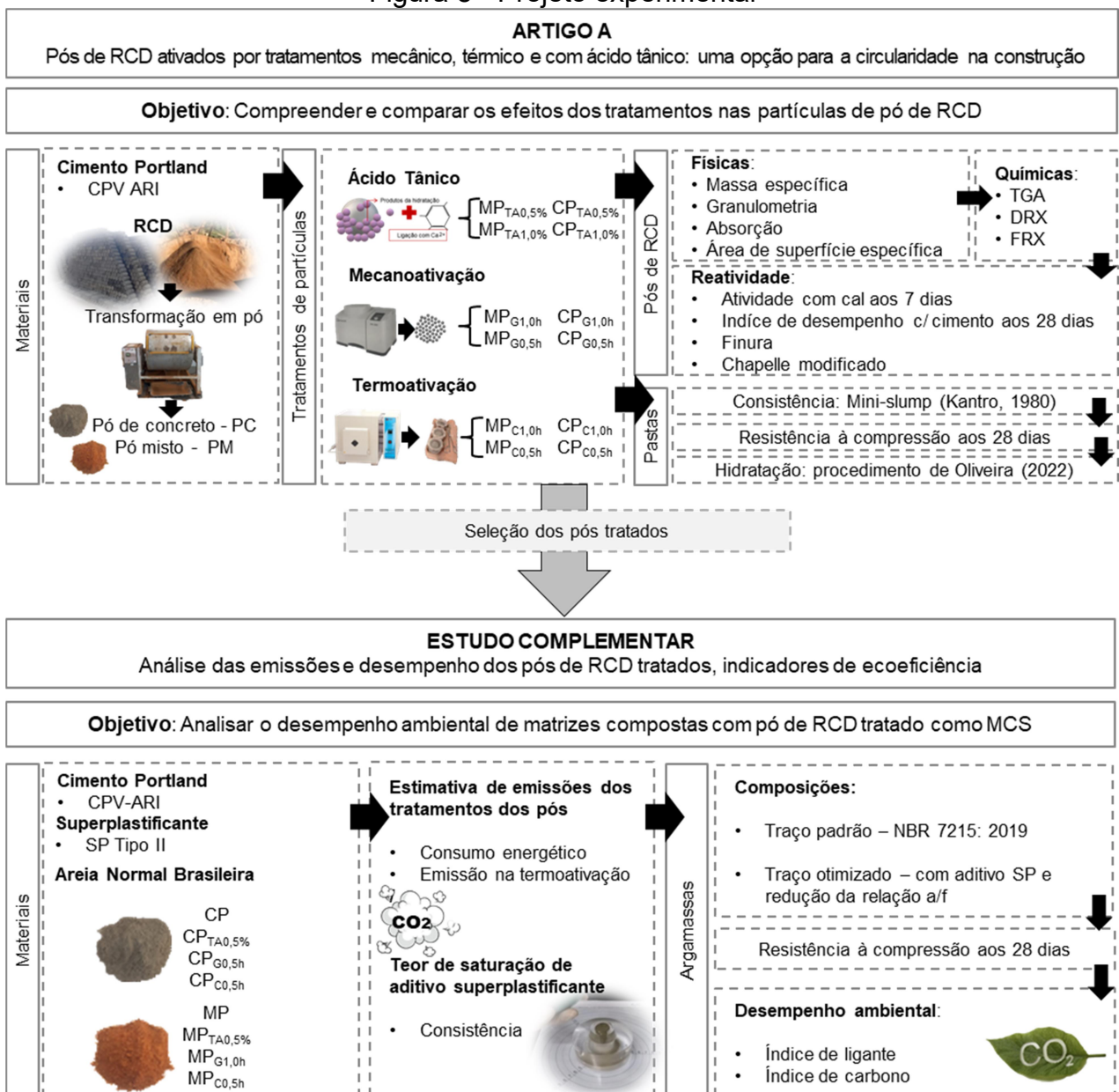
Fonte: Traduzido de Fang, 2021.

Wang et al., (2020) verificou que o TA reage com CH e calcita formando um complexo cálcio-TA na superfície dos resíduos finos de concreto, produzindo nanopartículas, que densificam a microestrutura do fino, preenchendo os poros das partículas de resíduo reduzindo a absorção e melhorando o desempenho do pó, bem como a ligação entre a pasta de cimento e o pó, essas nano partículas também podem atuar como pontos de semeadura (enchimento) para que ocorra a deposição dos produtos da hidratação através da nucleação (FANG et al., 2022; WANG et al., 2022).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados no projeto experimental (Figura 8) e os resultados e discussões são apresentados na forma de artigo científico (o artigo A foi traduzido e submetido em periódico de alto impacto). Na sequência apresenta-se um estudo complementar (o qual objetiva-se publicar como artigo B), com a avaliação do desempenho mecânico e ambiental de misturas produzidas com os pós de melhor performance avaliados no artigo A.

Figura 8 - Projeto experimental



Fonte: Autora, 2023.

### 3.1 ARTIGO A

Na sequência apresenta-se o artigo A, intitulado: Pós de RCD ativados por tratamentos mecânico, térmico e com ácido tânico: uma opção de circularidade na construção. O artigo foi elaborado e apresentado em *template* para submissão, sendo focado nos efeitos físico-químicos e na reatividade das partículas de pó de RCD misto e de concreto quando submetidas aos tratamentos propostos.

# PÓS DE RCD ATIVADOS POR TRATAMENTOS MECÂNICO, TÉRMICO E COM ÁCIDO TÂNICO: UMA OPÇÃO PARA A CIRCULARIDADE NA CONSTRUÇÃO

CDW POWDER ACTIVATED BY MECHANICAL, HEAT AND TANIC ACID TREATMENTS: AN OPTION FOR CIRCULARITY IN CONSTRUCTION

**Melissa Pastorini Proença**

Universidade Federal da Integração Latino-Americana e Instituto Federal do Paraná, Foz do Iguaçu-PR, [melissa.proenca@ifpr.edu.br](mailto:melissa.proenca@ifpr.edu.br) | ORCID 0000-0001-9742-7286

**Dayana Ruth Bola Oliveira**

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu-PR, [dayruth@gmail.com](mailto:dayruth@gmail.com) | ORCID 0000-0002-2083-0365

**Kathleen Dall Bello de Souza Risson**

Universidade Federal da Integração Latino-Americana e Instituto Federal do Paraná, Foz do Iguaçu, PR, [kathleen.souza@ifpr.edu.br](mailto:kathleen.souza@ifpr.edu.br) | ORCID 0000-0003-4296-1988

**Edna Possan**

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu-PR, [epossan@gmail.com](mailto:epossan@gmail.com) | ORCID 0000-0002-3022-7420

## HIGHLIGHTS

- Pó de CDW misto e de concreto ativados por diferentes tratamentos (calcinação, moagem e ácido tânico) para uso como MCS.
- 25% de Cimento Portland foi substituído pelos pós tratados.
- Os tratamentos das partículas elevaram o índice de desempenho com cimento aos 28 dias.
- O tratamento térmico promove a desidroxilação das partículas, aumentando o potencial de contribuir na hidratação das partículas de pó de CDW.
- O ácido tânico age quimicamente no pó de concreto consumindo a portlandita e no pó misto reduz a aglomeração das partículas.
- Ativação com ácido tânico favorece a resistência mecânica em até 18% e ativação mecânica em até 48%.

## RESUMO

A busca por materiais cimentícios suplementares (MCS), especialmente advindos de resíduos, é fundamental para redução do fator de clínquer/cimento, promoção da circularidade e o alcance do cenário Net Zero na construção. Neste estudo objetivou-se melhorar as partículas de pó de resíduos de construção e demolição, de origem mista (MP) e de concreto (CP), através de mecanoativação (0.5 e 1.0 horas), termoativação (0.5 e 1.0 horas a 800 °C) e exposição a duas concentrações de ácido tânico (0.5% e 1.0%). Fez-se a avaliação dos efeitos dos tratamentos nas características físico-químicas (massa específica, área de superfície, absorção, granulometria, fluorescência e difração de Raio-x, análise termogravimétrica), morfológicas (através da microscopia eletrônica de varredura) e reatividade dos pós (índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias, atividade com cal aos 7 dias e consumo de hidróxido de cálcio). Os pós tratados foram aplicados em pastas para um teor de 25% de substituição, com avaliação da resistência à compressão e grau de hidratação aos 28 dias. Verificou-se que o tratamento com ácido tânico a 0.5% é mais efetivo nas partículas de pó de concreto densificando a microestrutura do pó e melhorando o efeito de preenchimento, com aumento de 18% na resistência mecânica em relação à pasta de referência. No pó misto a mecanoativação por 1.0 hora mostrou-se mais relevante para a resistência mecânica com incremento de 48% em relação à referência. Constatou-se que os tratamentos nas partículas de pó de RCD mostram-se promissores para ampliar o teor de substituição ao clínquer Portland, sendo uma alternativa à composição dos cimentos, com menor pegada de carbono, promovendo a circularidade do RCD na cadeia da construção civil.

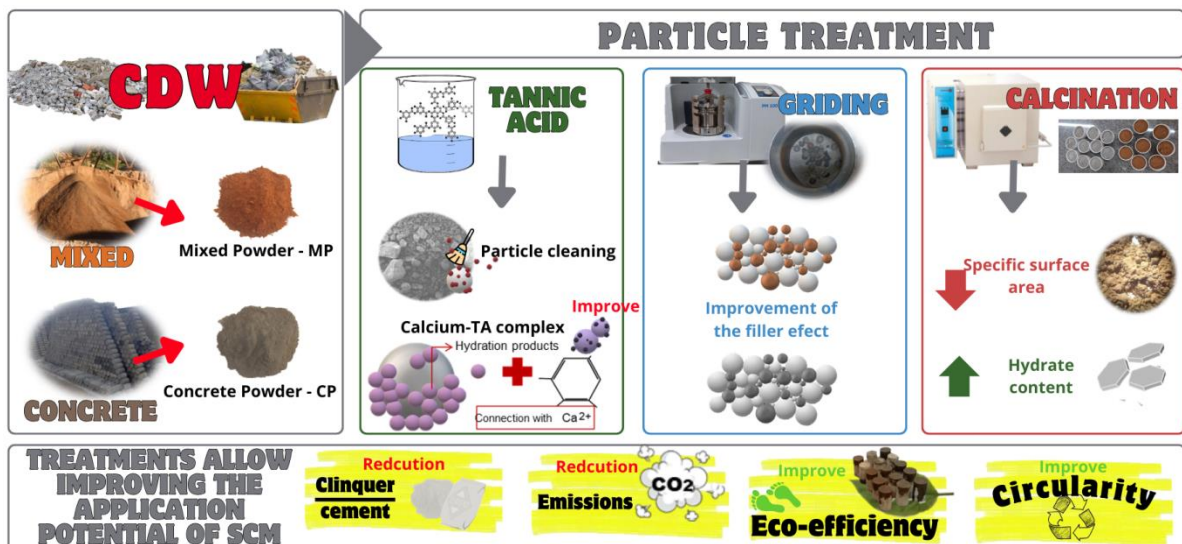
**Palavras-chave:** Tanino; Material cimentício suplementar; Moagem; Filer; Pó de concreto.

## ABSTRACT

The search for supplementary cementitious materials (SCM), especially from waste, is essential for reducing the clinker/cement factor, promoting circularity and achieving the NetZero scenario in construction. This study aimed to improve dust particles from construction and demolition waste, of mixed origin (MP) and concrete (CP), through mechanoactivation (0.5 and 1.0 hours), thermoactivation (0.5 and 1.0 hours at 800 °C) and exposure to two concentrations of tannic acid (0.5% and 1.0%). The effects of the treatments were evaluated on the physical-chemical characteristics (specific mass, surface area, absorption, granulometry, fluorescence and x-ray diffraction, thermogravimetric analysis), morphological (through scanning electron microscopy) and reactivity of the powders (performance index with Portland cement at 28 days, activity with lime at 7 days and calcium hydroxide consumption). The treated powders were applied in pastes to a 25% replacement content, with evaluation of compressive strength and degree of hydration at 28 days. It was found that treatment with 0.5% tannic acid is more effective on concrete powder particles, densifying the microstructure of the powder and improving the filling effect, with an 18% increase in mechanical resistance in relation to the reference paste. In the mixed powder, mechanoactivation for 1.0 hour proved to be more relevant for mechanical resistance, with an increase of 48% in relation to the reference. In this sense, it was noted that treatments on RCD powder particles show promise in increasing the replacement content for Portland clinker, being an alternative to the composition of cements, with a lower carbon footprint, promoting the circularity of RCD in the production chain. construction.

**Keywords:** Tannin; Supplementary cementitious material (SCM); Milling; Filer; Powder concrete.

## GRAPHICAL ABSTRACT



## 1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade no setor da construção é uma das necessidades prementes do mundo em desenvolvimento devido à escassez de recursos naturais, geração de resíduos e aumento das emissões de CO<sub>2</sub> [1,2]. A indústria cimenteira é responsável por aproximadamente 7% das emissões globais, sendo 60 a 70% destas relacionadas ao processo químico de descarbonatação do calcário para a formação do clínquer [3–5]. A parcela restante deve-se à queima de combustíveis fósseis para alcance da temperatura de clínquerização [6,7].

As emissões diretas médias associadas ao clínquer são da ordem de 865 kg de CO<sub>2</sub>/tonelada [8], cuja redução é uma das chaves para o cenário Net Zero (neutralidade de carbono), meta a ser alcançada até 2050 [9]. Para tal, emissões de CO<sub>2</sub> resultantes de um produto ou processo devem ser compensadas pela redução direta de emissões de CO<sub>2</sub> ou por emissões evitadas. Nas projeções disponíveis, a redução no fator clínquer/cimento é uma das principais estratégias na indústria cimenteira [5,10,11], sendo de fundamental importância a busca por materiais menos emissivos com potencial de emprego na fabricação do cimento.

Além das questões como a eficiência energética, emprego de combustíveis não fósseis e coprocessamento, para se atingir a redução das emissões é necessário uma mudança na química dos cimentos [3]. Como estratégias para produção de cimentos de baixo carbono destacam-se o uso de materiais cimentícios suplementares (MCS), a utilização de matérias-primas recicláveis e a formulação de novos cimentos [9]. Nesse contexto também cita-se a política de taxação das emissões de carbono, um artifício promissor de incentivo a tecnologias limpas e redução das emissões de CO<sub>2</sub> antropogênicas [12,13]. A utilização de resíduos para a fabricação de cimentos promove a economia circular (EC), podendo ser empregados no coprocessamento ou como MCS, a depender das características do resíduo. Destacando-se o potencial dos resíduos de construção e demolição (RCD) [14], que podem atuar como matéria-prima na fabricação do clínquer [15], na fabricação do cimento [16–18], e na cadeia do concreto como agregados [19–21], fechando o ciclo da indústria da construção.

Tendo em vista que os estudos na literatura são recentes, o emprego dos pós de RCD ( $\varnothing < 0.15$  mm) como MSC ainda requer esforços em sua valoração [22,23], devido características intrínsecas dos resíduos como a alta absorção e baixa densidade [24,25] e variabilidade. Tratamentos térmicos, físicos e químicos podem ser empregados para melhoria das características dos agregados e pós de RCD [23,26], provendo aproveitamento completo do resíduo com melhor eficácia.

Estudos atuais indicam que os pós de RCD tratados podem substituir o cimento Portland na composição de matrizes cimentícias com melhora na microestrutura [27]. O pó de origem cerâmica pode ser cominuído e calcinado [28–31] a fim de elevar sua atividade pozolânica ou do efeito de enchimento. Na fração de pó cimentício podem ser aplicados tratamentos térmicos para

desidratação da matriz [32], carbonatação de partículas [17,33–35], ativadores químicos [27,36–38], ou simplesmente moagem [39–41].

O efeito da moagem e da calcinação de pós de diversas origens é bastante discutido na literatura, porém para os pós de CDW tem-se poucos estudos uma vez que a maior parte das pesquisas envolvem o estudo do material como agregado graúdo e miúdo. A moagem tem potencial de reduzir o tamanho das partículas aumentando a área superficial melhorando o índice de atividade pozolânica e reatividade [23,25] contribuindo no efeito de nucleação na atuação como fíler [42,43]. Na literatura consta-se que em matrizes com 25% de substituição de cimento Portland por pó de concreto cominuído foram obtidas resistências à compressão compatíveis com um cimento classe 32 MPa [44]. Com resíduo cerâmico foram obtidas resistências à compressão aceitáveis para o cimento para um teor de substituição de 30% [45]. O tratamento térmico melhora a reatividade das partículas através da desidroxilação [18,46,47], também pode alterar a microestrutura tornando-a desarranjada devido a alta energia superficial e portanto mais reativa [48]. Zhang et al., (2022), comparando tratamentos de ativação química e moagem com a calcinação do pó de concreto, verificaram maior viabilidade no tratamento por calcinação à 800 °C pelo período de 2 horas para um teor de 30% de substituição de cimento Portland.

Tanto para agregados quanto para pós de CDW o tratamento químico pode ser conduzido com ácido tânico, [49], o qual faz ligações com íons de cálcio e diversos elementos [50], podendo reduzir a porosidade do agregado de RCD, diminuindo a absorção. Também forma nanopartículas que atuam como pontos de nucleação e melhoram a ligação do pó com a pasta de cimento [27,36]. A pré-hidratação da fração de pó com ácido tânico possui poucos estudos, sendo recentemente utilizado para tratar agregados miúdos reciclados de concreto [37], e pó de resíduos de concreto em substituição ao cimento Portland [27], também como aditivo em matrizes cimentícias [36] e como adição [51].

Não foram encontrados na literatura pesquisas comparando o potencial entre o tratamento de pós por ácido tânico com a mecanoativação e termoativação, nem a aplicação deste tratamento em pós de origem mista, sendo este o diferencial deste estudo. Neste sentido, este estudo avaliará diferentes métodos de tratamentos termo-físico-químicos de pós de RCD mistos e de concreto, com vistas à melhora das propriedades para aplicação como material cimentício suplementar. Compara-se os efeitos dos tratamentos nas partículas de pó de RCD quanto às características físicas e químicas, reatividade, e desempenho quando aplicados em substituição ao cimento Portland em pastas, atendendo os objetivos para o desenvolvimento sustentável 9 e 12, além de promover a economia circular.

O projeto experimental consistiu no tratamento de partículas de mixed powder (MP) e de concrete powder (CP), com diferentes períodos de exposição para a ativação térmica (0, 0.5 e 1.0 hora) e mecânica (0, 0.5 e 1.0 hora) e variadas concentrações (0, 0.5 e 1.0 %) para a pré-hidratação com ácido tânico. Foram analisados os efeitos nas partículas de pós em

função de características físico-químicas e reatividade, avaliando-se o comportamento dos pós tratados quando aplicados como material cimentício suplementar ao cimento Portland (CP) com teor fixo de 25% de substituição.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 OBTENÇÃO E TRATAMENTO DOS PÓS

O MP foi obtido a partir do agregado miúdo reciclado processado em usina de reciclagem de RCD, constituído por resíduos cerâmicos e cimentícios, com predominância de cor alaranjada. O CP foi gerado a partir da cominuição de corpos de prova de concreto descartados de laboratório de controle tecnológico de uma central dosadora com resistência à compressão, composição e idades variadas. Após secagem em estufa de circulação à 100 °C, os materiais foram cominuídos em moinho de bolas com 24 esferas de aço, por período de 2 horas em bateladas de aproximadamente 30 kg. Fez-se então o peneiramento reservando-se a fração passante na malha #100 mesh ( $\phi < 0.15\text{mm}$ ). O período de 2 horas de moagem foi adotado, considerando a obtenção da maior formação de pó.

Os pós (MP e CP) foram submetidos a diferentes tratamentos sendo: por pré-hidratação com ácido tânico (tannic acid - TA), mecanoativação em moinho de bolas planetário de alta eficiência (grinding - G) e termoativação em forno mufla (calcination - C) (Figura 1 e Table 1).

Tabela 1 – Nomenclatura dos pós de RCD em estudo

Powder	Treatment		Name	Description
	Type	Var		
CP	Ref -untreated		CP	Reference untreated concrete powder
	TA (%)	0.5	CP <sub>TA0.5%</sub>	Concrete powder treated with 0.5% tannic acid (TA)
		1.0	CP <sub>TA1.0%</sub>	Concrete powder treated with 1% tannic acid (TA)
	G (h)	0.5	CP <sub>G0.5h</sub>	Concrete powder with 0.5h of mechanoactivation (grinding)
		1.0	CP <sub>G1.0h</sub>	Concrete powder with 1.0h of mechanoactivation (grinding)
	C (h)	0.5	CP <sub>C0.5h</sub>	Concrete powder with 0.5h of thermoactivation (calcination)
		1.0	CP <sub>C1.0h</sub>	Concrete powder with 1.0h of thermoactivation (calcination)
	MP	Ref - Untreated		MP
TA (%)		0.5	MP <sub>TA0.5%</sub>	Mixed powder treated with 0.5% tannic acid (TA)
		1.0	MP <sub>TA1.0%</sub>	Mixed powder treated with 1% tannic acid (TA)
G (h)		0.5	MP <sub>G0.5h</sub>	Mixed powder with 0.5h of mechanoactivation (grinding)
		1.0	MP <sub>G1.0h</sub>	Mixed powder with 1.0h of mechanoactivation (grinding)
C (h)		0.5	MP <sub>C0.5h</sub>	Mixed powder with 0.5h thermoactivation (calcination)
		1.0	MP <sub>C1.0h</sub>	Mixed powder with 1.0h thermoactivation (calcination)

G-(grinding), C – calcination

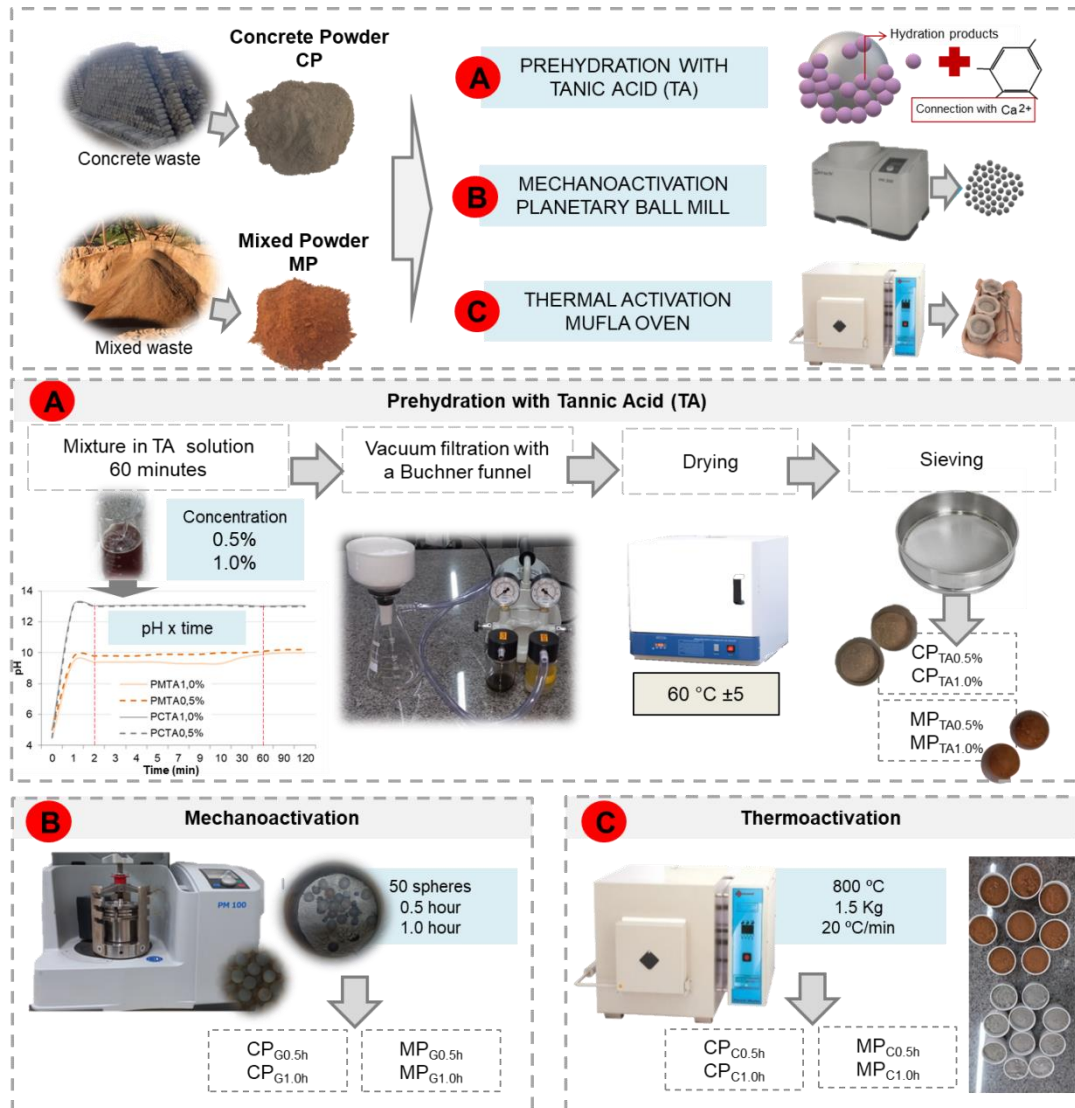


Figure 1: Tratamentos dos pós misto e de concreto

O tratamento dos finos com ácido tânico (TA) (Figura 1a) baseou-se na metodologia utilizada por [27] Wang et al., [37] para o tratamento de agregados reciclados. Para tal, foram preparadas soluções com água deionizada concentração de 0.5 e 1.0% de TA com 95% de pureza. Os resíduos foram mantidos em solução por período de 60 minutos, considerando a proporção de 1.5 kg de amostra seca para 1000 mL de solução. Transcorrido o tempo de imersão, o material foi filtrado com papel filtro no funil de Buchner com aplicação de vácuo, secando-se os sólidos em estufa à  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24 horas ou até massa constante. Verificou-se a variação de pH do pó nas soluções de TA, com pHmetro de bancada ADAMO MP-210. Foi observado a maior variação do pH nos primeiros 2 minutos, representando a ocorrência de maior parte das reações neste período, porém adotou-se período de 60 minutos conforme realizado no estudo de Wang et al.,[27].

Adotou-se  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  para secagem em estufa do pó de RCD tratado com TA, pois temperaturas entre 60 a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  podem danificar a microestrutura das pastas de cimento, removendo a

água do C-S-H e etringita [52], não havendo um método de secagem que remova apenas a água não ligada preservando a microestrutura [53].

A mecanoativação (Figura 1b) dos pós foi realizada em moinho de bolas planetário PM100, Retsch, operando de modo centrífugo na redução de tamanho das partículas, que se pulverizam por impacto e fricção, utilizando-se 50 esferas de ágata e massa de 60 gramas de pó por batelada para os tempos de moagem de 0.5 e 1.0 hora ( $CP_{G0.5h}$ ,  $CP_{G1.0h}$ ,  $MP_{G0.5h}$  e  $MP_{G1.0h}$ ).

Realizou-se a termoativação (Figura 1c) dos pós em forno mufla com taxa de aquecimento de 20 °C/min à temperatura de 800 °C, com resfriamento ao ar, considerando-se que acima desta temperatura a fração de material argiloso pode perder reatividade [47], e para a fração de resíduo cimentício em tal temperatura já ocorre à desidratação e descarbonatação, aumentando a reatividade do material [54]. Os tempos de calcinação foram de 0.5 e 1.0 hora, estabelecendo-se a nomenclatura  $CP_{C0.5h}$ ,  $CP_{C1.0h}$ ,  $MP_{0.5h}$  e  $MP_{C1.0h}$ .

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS PÓS

A massa específica dos pós reciclados e do cimento foi determinada a partir do método do balão volumétrico [55] utilizando-se álcool etílico PA, obtida com a média de duas amostras com variação inferior a 0,02 g/cm<sup>3</sup>. A análise granulométrica por difração de laser realizada no equipamento CILAS modelo 1190, sendo utilizado como meio dispersante isopropanol. A determinação da absorção dos finos baseou-se no método de Oliveira [56], onde realizou a aspersão de água sobre a amostra de material, fez a homogeneização e após 15 minutos e verificou-se a condição de saturada superfície seca com o cone de Kantro, sendo a determinação da absorção dada conforme a relação entre as massas, na condição saturada superfície seca e da massa seca em estufa.

A área de superfície específica foi determinada por meio do modelo BET (Brunauer, Emmett e Teller) no equipamento Quantachrome NOVA 3200e, com amostras de aproximadamente 200 mg. As amostras passaram por desgaseificação, promovendo a remoção das moléculas fisicamente adsorvidas para que o gás adsorvivo possa interagir diretamente nas cavidades da amostra [57]. Tal procedimento foi realizado com aplicação de vácuo por 16 horas à 40 °C, sendo recomendado para obtenção de resultados mais consistentes [57].

A caracterização química por fluorescência de raio-X (FRX) foi realizada no espectrômetro Bruker S8 Tiger, com determinação da perda ao fogo. Para a difração de raios-X (DRX) utilizou-se o difratômetro da marca Panalytical, com radiação Cu K $\alpha$  e  $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$  no modo spm, com análise dos difratogramas no software X'Pert High Score Plus V4.8 da Panalytical comparados com padrões do banco de dados COD (Crystallography Open Database). A microscopia eletrônica por varredura das amostras foi desenvolvida no Microscópio Eletrônico de Varredura

Zeiss EVO-MA10, com detector de elétrons secundários (para alto e baixo vácuo), detector de elétrons retroespalhados, sendo as amostras dos pós de RCD previamente preparadas com deposição de camada de ouro.

Realizou-se a análise termogravimétrica no equipamento Percking Elmer – STA 8000, com atmosfera de gás nitrogênio em cadinho aberto de alumina, com aproximadamente 50 mg de massa de amostra, pré-tratadas em processo isotérmico à 35 °C durante uma hora, para liberação da água livre. Aplicou-se fluxo de nitrogênio de 30mL.min<sup>-1</sup>, no intervalo de aquecimento de 35 °C a 1000 °C e taxa de aquecimento do equipamento de 10°C.min<sup>-1</sup>.

### 2.3 REATIVIDADE DOS PÓS

A reatividade dos pós tratados e in natura foi avaliada através de métodos indiretos de atividade com cal aos 7 dias conforme NBR 5752 [58] e índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias NBR 5751 [59], aplicando-se nas análises o teste Tukey com nível de significância de 5%. Também foi analisada finura dos pós conforme NBR 15894-3 [60]. Os requisitos químicos foram obtidos a partir da fluorescência de raio-X, e o consumo de hidróxido de cálcio foi determinado pelo método Chapelle modificado, NBR 15895 [61], sendo detalhados os procedimentos conforme as normas brasileiras (NBR) no Anexo A.

### 2.4 ANÁLISE EM PASTAS

Para a composição das pastas utilizou-se cimento Portland de alta resistência inicial CP-HE (equivalent to ASTM C 150/C150M Type III cement), com massa específica de 3.13 g/cm<sup>3</sup> e D<sub>50</sub> de 10.05 µm com teor máximo de 10% de adição de filer calcário [62]. Foram produzidas pastas (Tabela 1) com teor de 25% de substituição de CP-HE em massa e com relação a/f (água/finos) de 0.48. Este teor de substituição é indicado em estudos que utilizam os finos de RCD como MCS [17,63,64] sendo o teor máximo permitido de incorporação de filer calcário no cimento Portland da norma brasileira vigente [62].

Para avaliação do desempenho mecânico em pastas seguiu-se os procedimentos de Oliveira [56]. Os materiais foram previamente homogeneizados por 1 minuto de forma manual e 2 minutos em misturador Fisatrom com velocidade de 1600 rpm, em estado fresco verificou-se o índice de consistência através do cone de Kantro. Após mistura, as pastas foram vertidas nos moldes e cobertas com filme PVC por 24 horas até desmoldagem, mantidas em cura úmida por 28 dias. Sendo produzidos 5 corpos de prova cilíndricos de tamanho reduzido 25x50 mm para análise de resistência à compressão e uma pastilha de 25x5.0 mm para determinação do grau de hidratação.

Realizou-se a parada de hidratação das amostras para análise termogravimétrica conforme atingiram as idades de cura, sendo o procedimento de secagem superficial da amostra, pesagem e imersão em isopropanol, verificada a mudança de massa do material, e após secagem à vácuo, considerado o procedimento mais adequado para preservação da composição do material [52]. Utilizou-se aproximadamente 40 mL de isopropanol por amostra, sendo renovado após 24 e 72 horas [65], atingida a estabilidade de massa a amostra foi transferida para dessecador, onde permaneceu em vácuo até estabilidade de massa.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado na prensa elétrica, com capacidade de 100 tf. Para a análise estatística da resistência à compressão utilizou-se do teste Scott-Knott com nível de significância de 5%.

O grau de hidratação foi determinado com base no procedimento proposto por Oliveira et al., [44], obtido através do perfil termogravimétrico dos pós de RCD e das pastas com substituições (seguindo o protocolo descrito na seção 2.3). Sendo necessário inicialmente determinar a água quimicamente ligada (Equação 1).

$$Aqc = Di + DCa(OH)_2 + 0,41 * DCaCO_3 \text{ (equação 1)}$$

Onde:

*Aqc*: água quimicamente combinada;

*Di*: % de desidratação da gipsita, etringita, tobermorita, C-S-H, silicatos hidratados (100 °C a 380 °C );

*DCa(OH)<sub>2</sub>*: % decomposição do hidróxido de cálcio (380°C a 520°C);

*DCaCO<sub>3</sub>*: % de decomposição do carbonato de cálcio (520°C a 1000°C);

0.41 é um fator de conversão

O grau de hidratação (GH) é determinado conforme a Equação 2.

$$GH = \frac{Aqc}{0.24} * 100 \text{ (equação 2)}$$

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS PÓS

As massas específicas dos pós estudados (Figura 2) estão de acordo com os valores encontrados na literatura, da ordem de 2.4 a 2.7 g/cm<sup>3</sup> [45,66,67], sendo esta propriedade influenciada pela heterogeneidade da composição química do resíduo de origem. Apesar da

mecanoativação ser um tratamento físico das partículas, ocorreu pequena redução na massa específica dos pós, variação que deve estar associada à heterogeneidade do material. Oliveira, Dezen e Possan [66] obtiveram pequena alteração nas massas específicas de pós de concreto submetidos a processos de peneiramento.

Para as ativações químicas, a termoativação por 0.5 horas promoveu 14.5% de aumento na massa específica do MP, e de 19.8% no CP, correspondendo a maior massa específica dentre os tratamentos. O tratamento com TA gerou pequeno aumento nas massas específicas, sendo mais significativo no CP em concentração de 0.5% e no MP em concentração de 1.0%. Isso deve-se ao efeito de pré-hidratação promovido nas partículas pelo ácido tânico, que densifica a microestrutura [27].

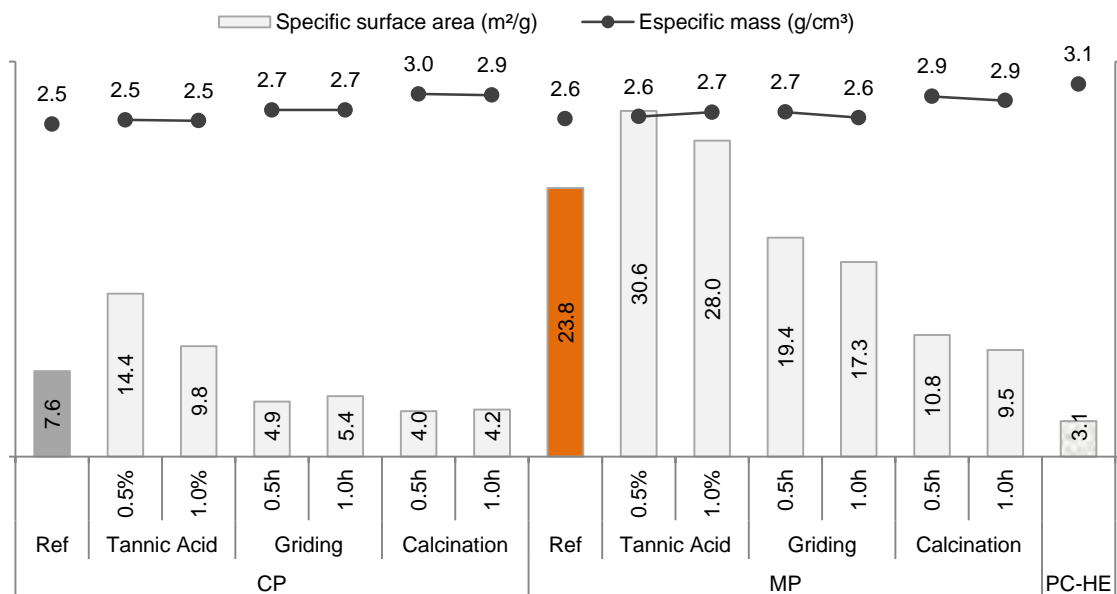


Figure 2: Massa específica e área de superfície específica

O pó misto (MP), independente do tratamento, apresenta área de superfície específica BET três vezes maior que o pó de concreto (CP) (Figura 3), o que pode ser explicado pela superfície mais irregular das partículas de MP, observada na microscopia eletrônica de varredura (Figura 5). Com relação a esta propriedade, verifica-se na literatura uma ampla gama de resultados, variando de 0.6 a 12.8 m²/g para resíduos cerâmicos, e entre 1.1 e 17.9 m²/g para resíduo de concreto [68,69] e valores de até 31.6 m²/g para resíduos mistos [56]. Essas variações estão associadas ao tipo e tempo de processamento mecânico empregado, composição do resíduo, procedimento de ensaio entre outros, o que dificulta comparações.

O tratamento com ácido tânico aumentou a área de superfície específica dos pós tratados, com resultados mais expressivos para a concentração de 0.5%. No pó misto isso pode ser atribuído às características do TA, que devido à desprotonação das hidroxilas tem predominância de cargas negativas [70,71] atuando como agentes de estabilização de soluções de material

cerâmico através do efeito dispersante [70,72,73], neste caso promove a repulsão entre as partículas, o que evita a formação de aglomerados, os agentes dispersantes agem inibindo as forças de atração naturais de Van der Waals entre as moléculas, inserindo cargas na superfície das partículas com efeito repulsivo [74].

No pó de concreto houve uma interação química com ácido tânico consumindo o hidróxido de cálcio do CP. A literatura sugere a formação de um complexo cálcio-TA [36], porém este não identificado pelas técnicas utilizadas neste estudo. O efeito interativo químico foi constatado através da difratometria de raio-X e análise termogravimétrica, sendo que tal formação deve promover a mineralização e formação de produtos hidratados aumentando a área de superfície específica.

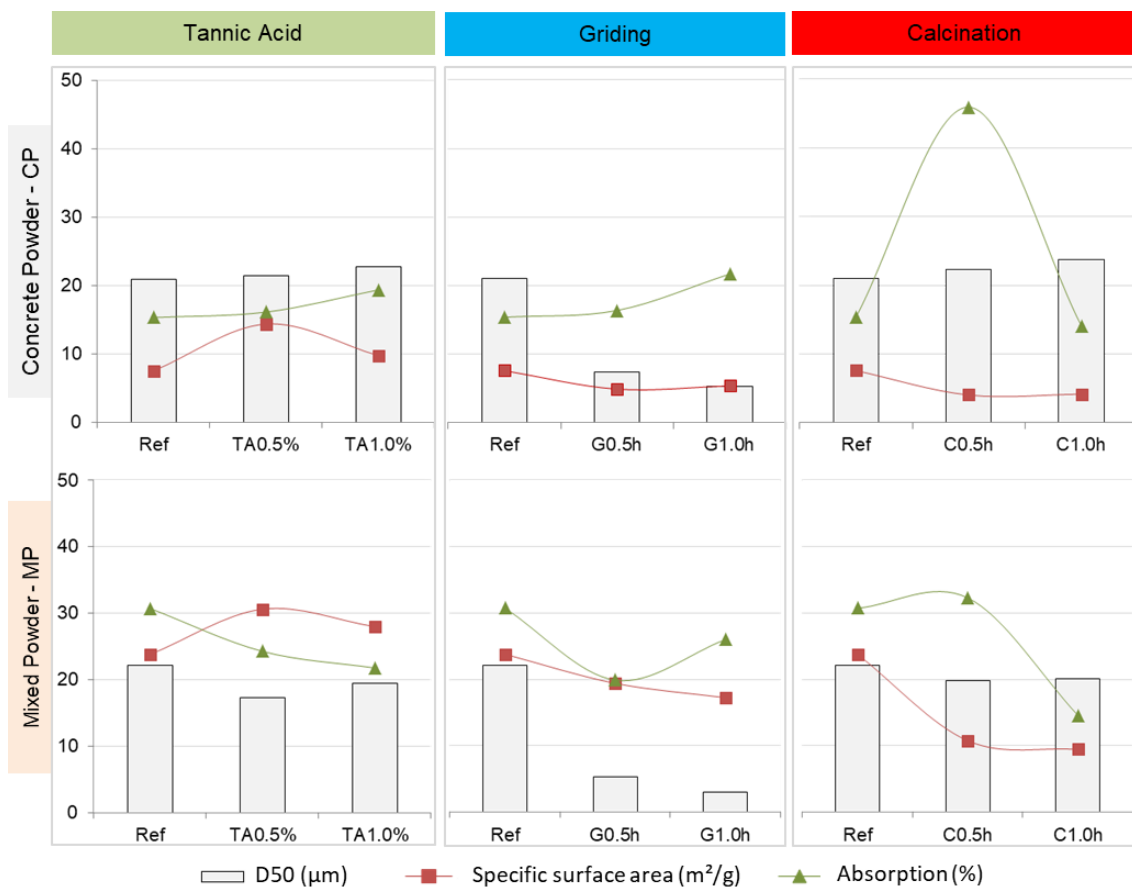


Figure 3: Correlação de propriedades físicas

A absorção de água no CP foi maior quanto mais elevado o teor de TA, ao combinar-se quimicamente com o CP, o TA induz a mineralização dos íons de metálicos [75]. Conforme observado na análise termogravimétrica houve o consumo de hidróxido de cálcio, possivelmente essa formação alterou o comportamento de absorção do material, no MP essa interação química não foi constatada. Os valores de absorção de água encontrados em CP são condizentes com os dados de Oliveira et al., (2023) [44], porém no MP os valores são significativamente superiores.

Para os pós mecanoativados observa-se redução na área de superfície específica para o MP em 18.5% e 27.3% para 0.5 e 1.0 horas de moagem, respectivamente. No CP a redução foi de 35.5% (0.5 h) e 28.9% (1.0 h), com refinamento no tamanho das partículas, produzindo  $D_{50}$  inferiores ao da partícula de cimento Portland (Figura 4), fato também constatado em outros estudos [48,68,76]. Quanto menor o diâmetro das partículas maior a área de superfície específica [56], e quanto menor a partícula maior a intensidade de forças de atração, que pode formar aglomerados [74], o que possivelmente ocorreu nas partículas em estudo.

De acordo com Zhang et al., [54] a termoativação promove o aumento na área de superfície específica o que pode auxiliar na reatividade do material, porém em tempo excedente de exposição a este tratamento tal efeito pode ser inibido devido à aglomeração das partículas [48]. Quando a temperatura atinge 800 °C há mudança de volume no material, com a transformação química de  $\alpha$ - e  $\beta$ -quartzo, o que pode aumentar o tamanho das partículas e promover a redução da massa específica [77], nas Figuras 3 e 4 observa-se o aumento do  $D_{50}$  para o  $CP_{C0.5}$ , que esta relacionado a alteração no volume das partículas, devendo tal efeito estar associado ao período que excede 0,5 horas de termoativação.

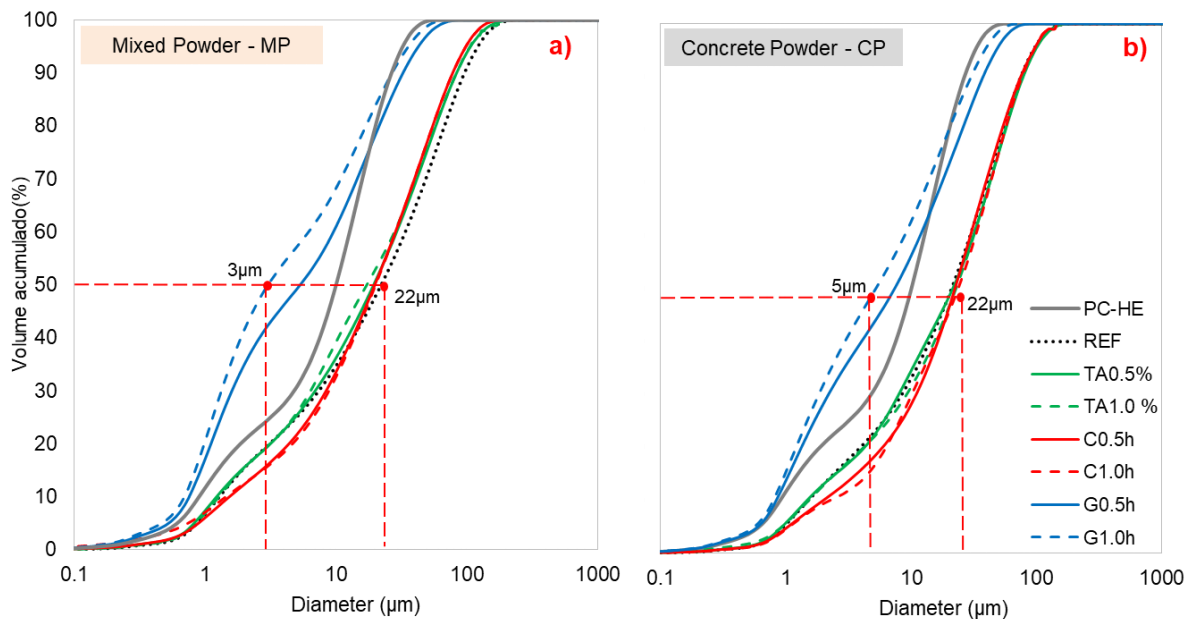


Figure 4: Curvas granulométricas: a) Pó misto; b) Pó de concreto

Quanto às características físicas verificou-se que o TA age de duas formas conforme a origem das partículas. No CP o reagente interage quimicamente aumentando a densidade de massa, a área de superfície das partículas, e a absorção de água. No pó misto, composto por materiais de origem cimentícia e argilosa, o ácido age dispersando as partículas, reduzindo a absorção e aumentando a área de superfície específica (Figura 5).

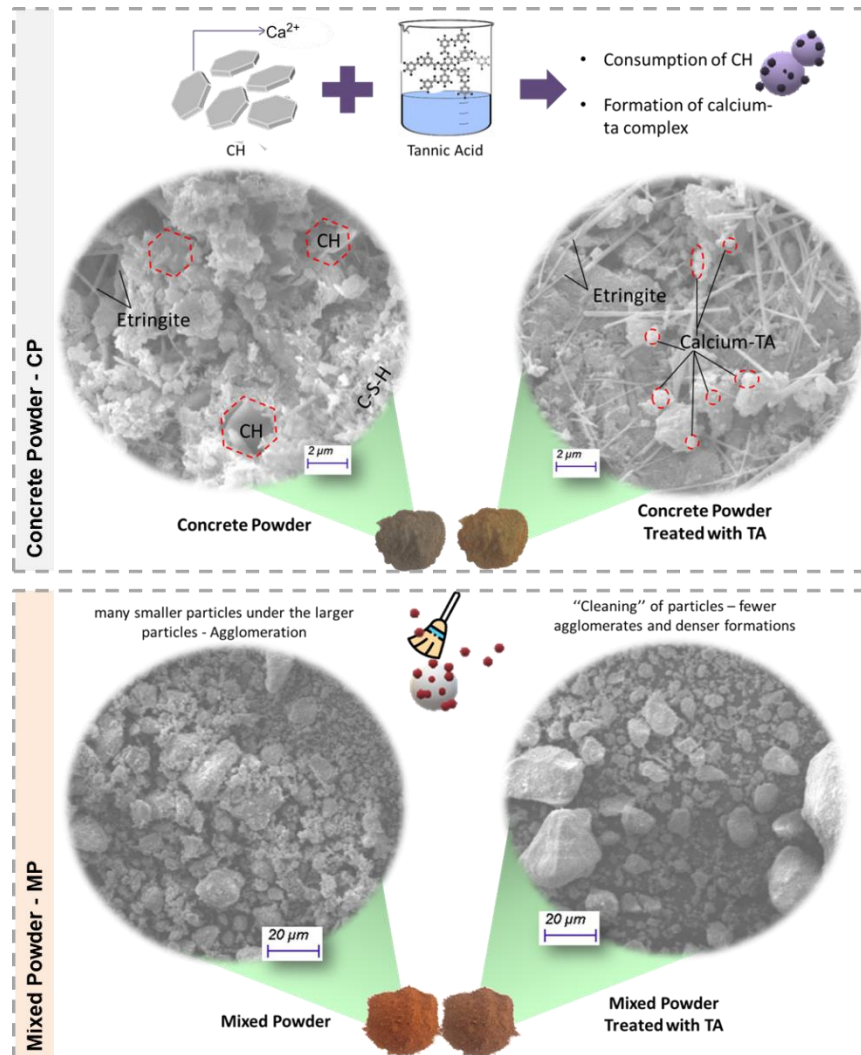


Figure 5: Atuação do ácido tânico nas partículas de pó de concreto e de pó misto

Na termoativação as partículas de MP sofreram pequena redução no  $D_{50}$ , e significativa redução na área de superfície específica, observa-se com a análise morfológica (Figura 6) que a termoativação forma aglomerados de partículas. Quando se compara ao MP sem tratamento, verifica-se menor quantidade de partículas menores sobre as partículas maiores e é possível identificar alguns contornos de formato nas partículas calcinadas, o que é condizente com uma menor área de superfície específica. Já nas partículas de pó de concreto há decomposição dos produtos de hidratação da matriz cimentícia, o que pode levar a redução da área de superfície específica, e nos pós deste estudo promoveu elevação no diâmetro das partículas conforme o tempo de exposição, que deve estar relacionado a alteração da cristalinidade das partículas, aumentando o pico principal de sílica nos difratogramas (Figura 8). A maior absorção associada ao período de 0.5 horas de exposição a termoativação deve-se a cristalinidade do material, conforme o aumento do tempo o material tende a ficar menos amorfo, reduzindo a porosidade e consequentemente a absorção de água.

A mecanoativação reduziu significativamente o diâmetro das partículas dos pós de RCD, conforme o aumento do tempo de cominuição. Porém, esse efeito não foi comprovado pela área de superfície específica BET, possivelmente devido à aglomeração ou protocolo de ensaio empregado.

### 3.2 MORFOLOGIA

Observa-se na Figura 6 que o MP possui característica mais irregular, enquanto no CP o contorno e formato das partículas são mais angulares, semelhante ao identificado por Meng et al. [76] com bordas irregulares, cantos afiados e entalhes em V. Observa-se também aglomerados de partículas, também verificados por Duan et al. [78] e Oliveira [56], o que pode elevar a demanda de água para misturas contendo pó reciclado [39].

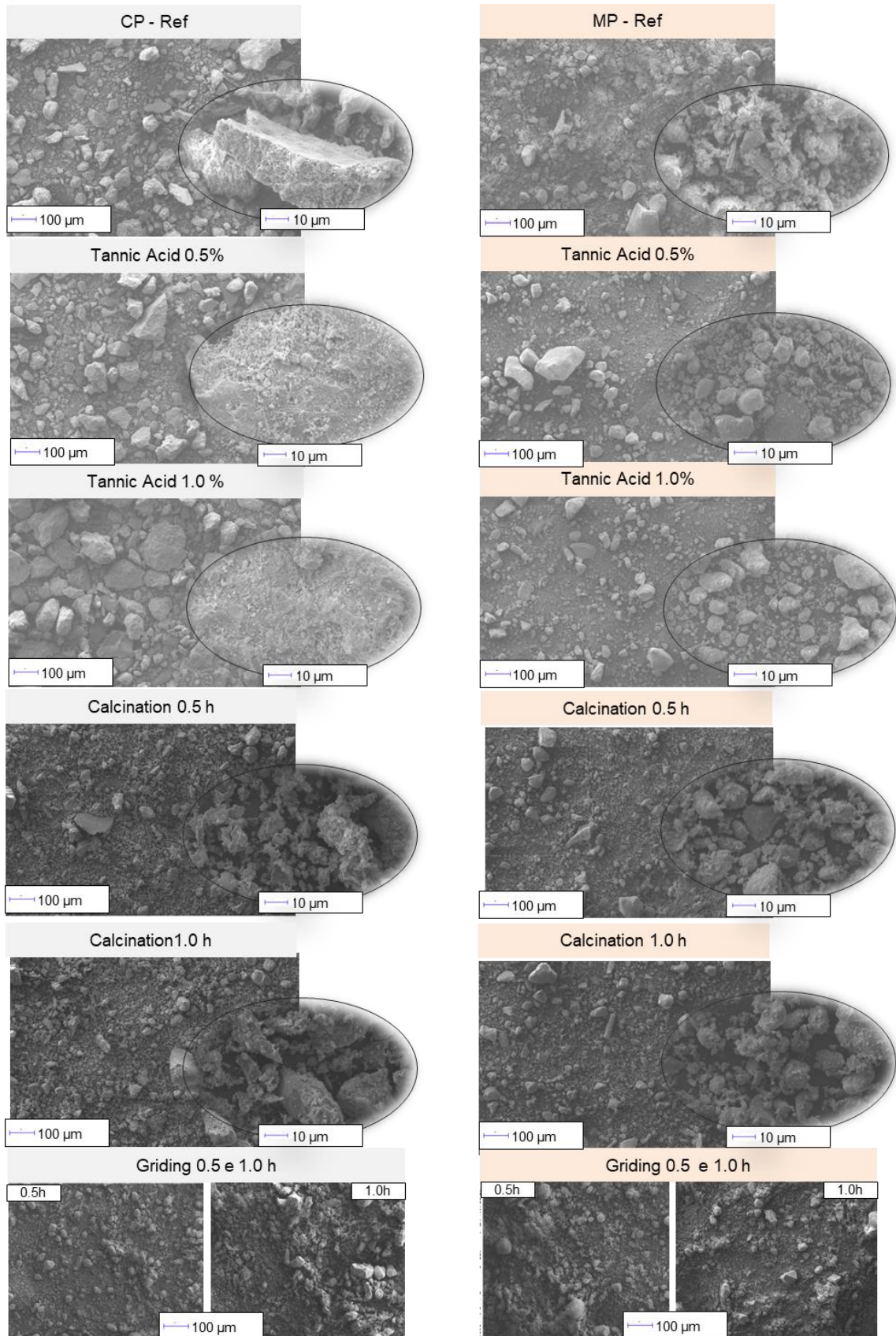


Figure 6: Microscopia eletrônica de varredura dos pós de RCD submetidos a diferentes tratamentos

Com a termoativação as partículas mantiveram as características de forma irregular e superfície áspera, porém tornaram-se menos irregulares, devido à decomposição térmica e mudança de fase dos compostos [79]. No MP e CP o TA promoveu redução na quantidade de partículas mais finas sobrepostas às partículas maiores, tornando-as mais sólidas e de formatos definidos, corroborando com achado de Wang et al., (2022), onde o pó não tratado possuía partículas finas soltas e muitos poros.

Com o tratamento com TA houve a densificação da microestrutura (Figuras 5 e 6) com o aumento da massa específica, em função da dissolução do pó solto com o ácido e os produtos dessa hidratação, preenchendo poros e depositando-se na superfície das partículas. Wang et al., e Wang et al., [27,37], identificaram nanopartículas de complexos cálcio-TA em pó de origem cimentícia. O que mais se aproxima de tal achado nesta pesquisa, foram produtos hidratados no CP tratado com 0.5% e 1.0% de TA, onde verificou-se grande quantidade de etringita agrupada a partículas esféricas, podendo ser os complexos cálcio-TA.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

A mecanoativação trata-se de um processo físico, para tanto não promove alteração química que possa ser constatada na fluorescência de raio-X (Tabela 2). Não foram observadas alterações químicas expressivas com o tratamento com TA independentemente do tipo de pó (CP ou MP). Nota-se, no entanto um pequeno aumento da perda ao fogo para o CP, devido ao processo de hidratação promovido pelo tratamento nas partículas. A termoativação a 800 °C reduziu a perda ao fogo elevando o teor de óxidos dos pós sendo proporcional ao tempo de ativação. Verifica-se um maior teor de óxido de cálcio no pó de concreto em relação ao resíduo misto, enquanto o MP apresenta maior teor de alumina, possivelmente oriunda do material argiloso. A maior perda ao fogo no pó misto pode estar relacionada à presença dos argilominerais [80].

Tabela 2 – Composição química dos pós por Fluorescência de raio-X

Sample	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	LOI
CP	47.20	8.56	6.94	21.36	3.28	1.15	0.13	1.36	2.14	0.22	0.62	7.84
CP <sub>TA1.0%</sub>	46.20	8.40	6.93	20.68	3.22	1.14	0.12	1.34	2.05	0.22	0.65	8.55
CP <sub>TA0.5%</sub>	46.08	8.34	6.90	20.67	3.23	1.14	0.12	1.33	2.02	0.21	0.63	8.34
CP <sub>C1.0h</sub>	50.12	9.05	7.35	22.60	3.52	1.22	0.13	1.45	2.24	0.24	0.69	1.21
CP <sub>C0.5h</sub>	49.62	9.07	7.37	22.26	3.49	1.21	0.13	1.45	2.22	0.23	0.70	2.32
MP	39.55	12.88	6.65	16.68	3.64	1.88	< LQ	0.28	1.00	0.11	0.45	17.08
MP <sub>TA1.0%</sub>	39.14	12.72	6.64	16.70	3.64	1.90	< LQ	0.30	1.01	0.12	0.39	17.61
MP <sub>TA0.5%</sub>	39.59	13.02	6.74	16.83	3.68	1.90	< LQ	0.31	1.02	0.12	0.39	17.41
MP <sub>C1.0h</sub>	45.53	14.94	7.73	19.35	4.25	2.19	< LQ	0.33	1.17	0.12	0.51	4.53
MP <sub>C0.5h</sub>	43.58	14.37	7.40	18.87	4.10	2.11	< LQ	0.33	1.14	0.13	0.47	8.31

LQ = Limite Dc1e quantificação. LOI = Loss on ignition.

Observa-se (Figura 7) que o MP devido ao maior teor de alumina, aloca-se na região da cinza volante, conforme diagrama ternário da composição de óxidos de Lothenbach, Scrivener e Hooton [43]. Os pós de concreto (CP) ficam mais próximos do eixo a esquerda com maior teor de CaO, o que pode conferir alguma propriedade hidráulica e não necessariamente pozolânica.

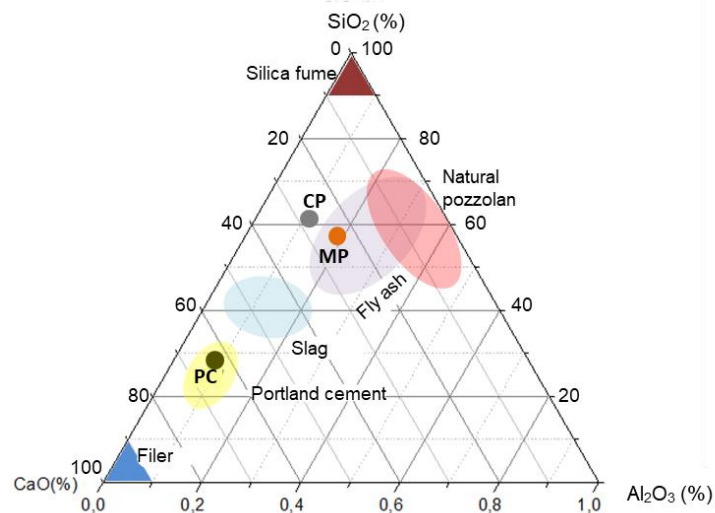


Figure 7: Diagrama ternário com localização dos pós de origem mista (MP) e de concreto (CP)

Nos difratogramas de raio-x do pó de concreto (Figura 8a) os principais minerais identificados foram sílica, portlandita, labradorite (feldspato), cristobalita (um polimorfo de sílica), calcita e dolomita, sendo que os picos de feldspato, dolomita e sílica são oriundos de concretos e argamassas [27,36,46]. Observa-se que o tratamento com TA no CP promove a ausência do pico de portlandita (hidróxido de cálcio), o que confirma a interação química com o material.

Na termoativação do CP verifica-se ausência nos pico de portlandita, redução nos picos de carbonato e dolomita, [47,48,77], e formação de magnesite (carbonato de magnésio). No período de 0.5 hora ocorre aumento no pico principal de sílica, e com 1.0 hora uma a redução deste, indicando uma condição mais amorfa com o SiO<sub>2</sub> cristalino convertido em amorfo [48].

No MP (Figura 8b) as principais fases cristalinas identificadas foram sílica, calcita, cristobalita, labradorite (feldspato) e dolomita. Na pré-hidratação com TA verificou-se um pequeno aumento nos picos de feldspato que deve estar relacionado a limpeza superficial das partículas, deixando mais expostos estes minerais [37].

A termoativação no material de origem argilosa promove a perda de água quimicamente combinada dos grupos OH contidos nos minerais argilosos. Neste processo ocorre o colapso da estrutura cristalina dos constituintes da argila, formando sílica e alumina instáveis com estrutura amorfa ou desordenada, o que contribui na reatividade [47]. Também há redução no pico de dolomita e calcita [47,48,77], indicando formação de óxidos de cálcio e magnésio, observado na

fluorescência de raio-x. No MP a sílica tem o pico reduzido com a termoativação de 0.5 hora, e aumentado com 1.0 hora, indicando condição mais amorfa no menor período de exposição.

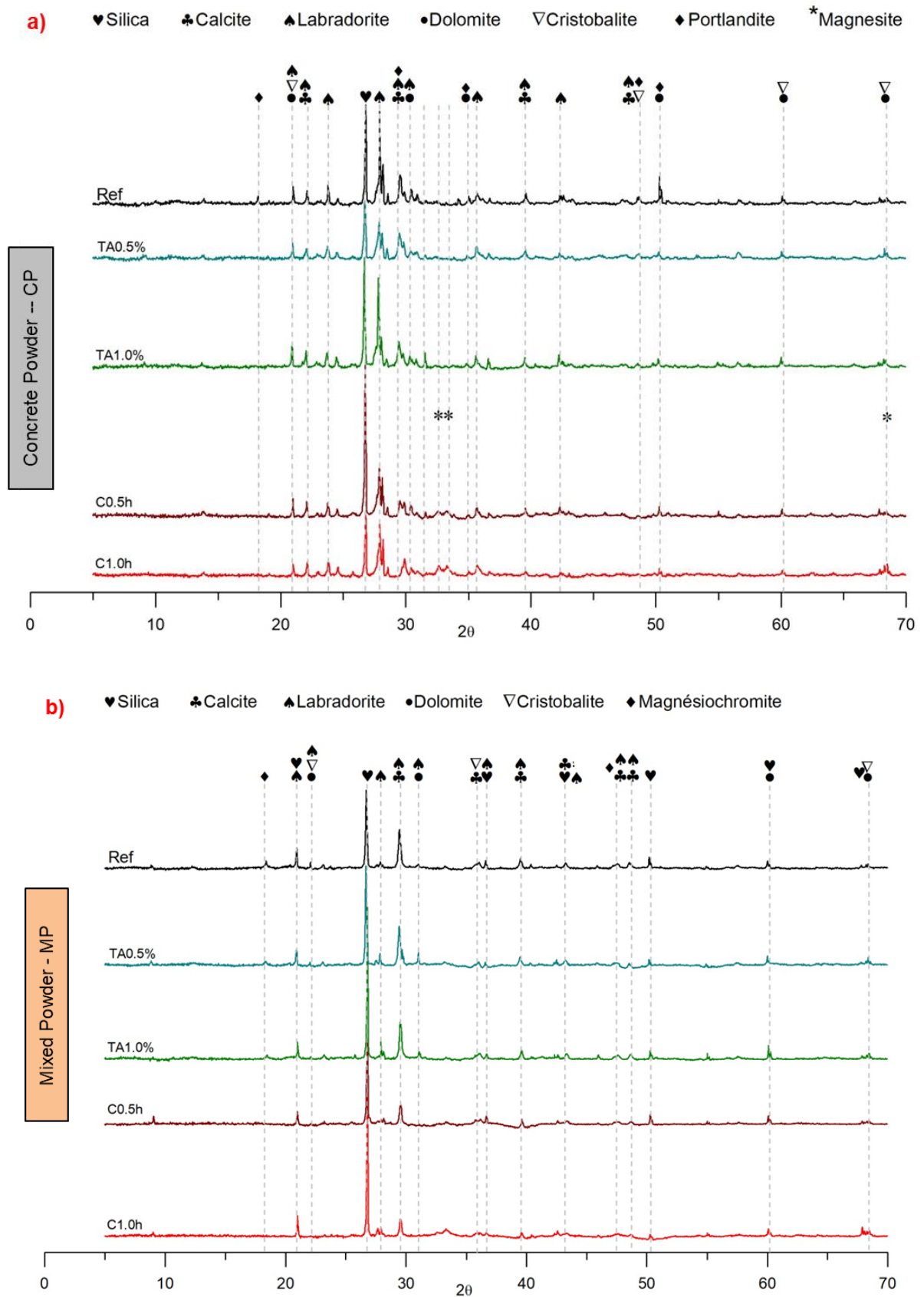


Figure 8: Difratomogramas dos pós tratados a) Pó de concreto; b) Pó misto

Na análise termogravimétrica (Figura 9) o pico 1 (200 °C), especialmente no pó de concreto, está associado à decomposição térmica do sulfato de cálcio, da etringita e do C-S-H, [44], produtos da hidratação do cimento contidos em matrizes cimentícias. No MP tem-se a ocorrência do pico 2 (50 a 200 °C) onde há a liberação da água da montmorilonita [81]. Como o MP possui material cerâmico na composição, a depender da temperatura de sinterização podem não promover a completa desidroxilação dos argilominerais [47,63,69,82] o que influencia na presença destes componentes com potencial de sofrerem desidroxilação e formarem estruturas mais amorfas a partir da termoativação.

Na faixa de 360°C até 430 °C tem-se os picos 3 e 5 no MP, estão associados a desidroxilação de álcalis em menores quantidades, relacionam-se a decomposição do hidróxido de magnésio e do hidróxido de cálcio, respectivamente [83]. O magnésio advém do resíduo de argamassas, que no Brasil são produzidas com cales dolomíticas.

O pico 4 (350 °C a 450 °C) correspondente ao hidróxido de cálcio [84], o qual não foi identificado CP nos pós tratados com TA, o TA no CP consome o pico de hidróxido de cálcio (portlandita) (Figura 10), devido ao mecanismo de atuação do reagente, combinando-se com os íons de cálcio [27,51], corroborando com os resultados da difratometria de raio-x, este comportamento não foi observado no pó misto (MP), devido a composição possuir menor quantidade de hidróxido de cálcio.

Como na difração de raio-X para o pó de resíduo misto não foram identificados argilominerais e hidróxido de cálcio, tem-se certa dificuldade em caracterizar os picos 2, 3 e 5, possivelmente no MP os picos apresentados na análise termogravimétrica correspondem a argilominerais, e hidróxido de carbonato de magnésio (sendo a perda de massa acumulada dos picos 2, 3 e 5 de aproximadamente 6%).

A termoativação promove a desidroxilação dos pós, conseqüentemente ocorre a ausência de picos de hidratos, possivelmente em  $MP_{C1.0h}$  correu liberação de água combinada dos hidratos reidratando algum componente [77]. O último pico (6) a partir de 650 °C, trata-se da decomposição do carbonato de cálcio [83].

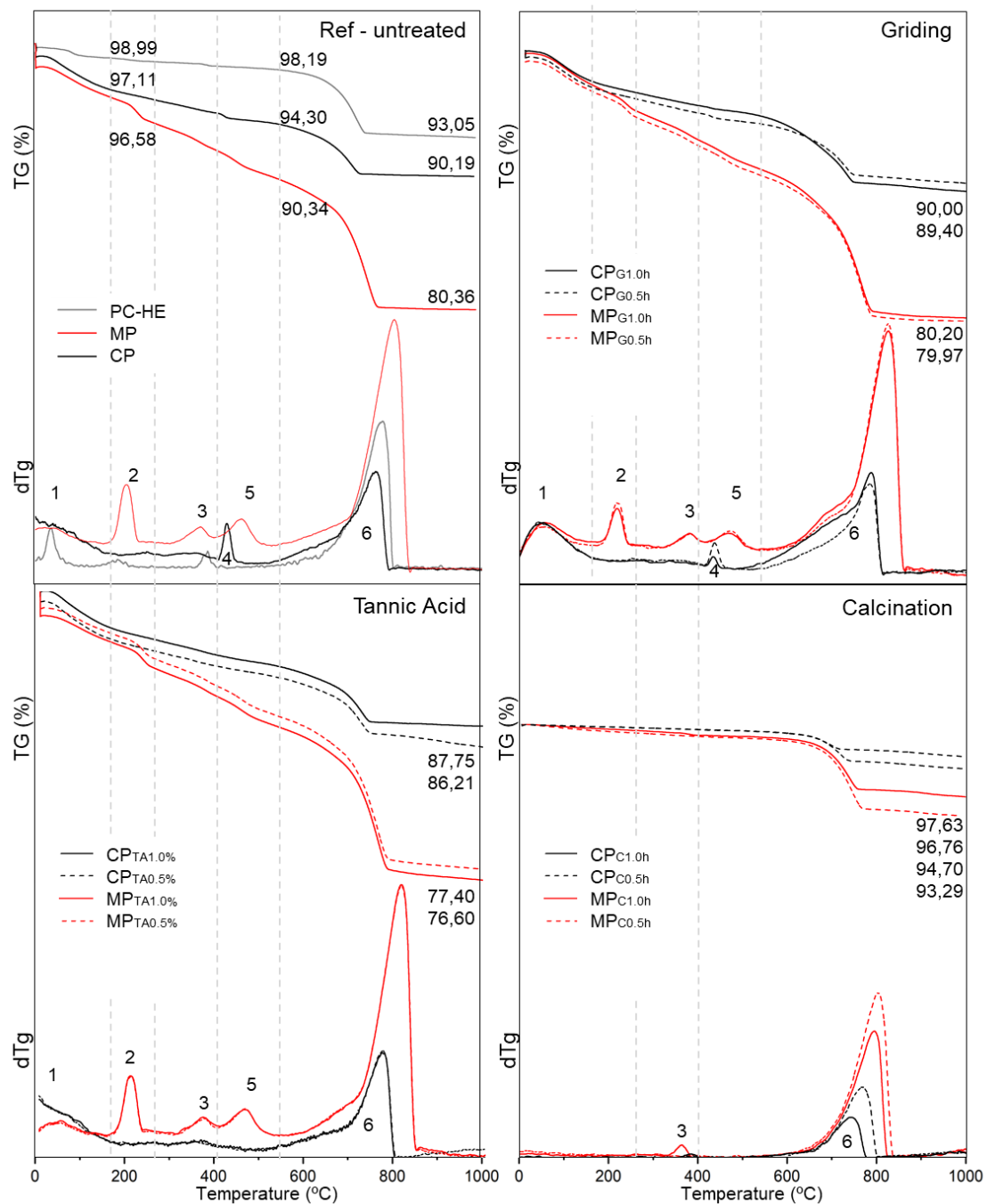


Figure 9: Análise termogravimétrica pó misto e pó de concreto para diferentes tratamentos

### 3.4 ATIVIDADE POZOLÂNICA

Todos os processos de ativação promoveram incrementos no índice de desempenho com cimento (IDC) (Figura 10) exceto CP cominuído por meia hora ( $CP_{G0,5}$ ) não atingindo o requisito mínimo da norma brasileira NBR 12653 [85]. Para ambos os pós, os resultados mais expressivos foram obtidos por termoativação.

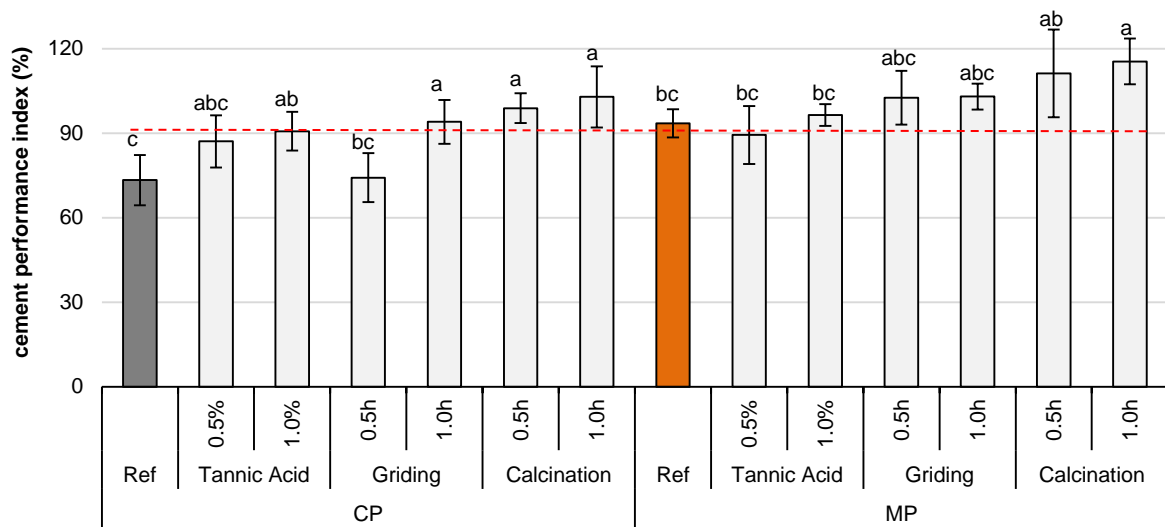


Figure 10: Índice de desempenho com cimento para os diferentes pós e tipos de tratamento

A mecanoativação no CP por 1 hora promoveu acréscimo de 21% no IDC. Houve melhora de 18.8% e 23.7% para o pó de concreto tratado com 0.5% e 1.0% de TA, respectivamente. Para o MP a termoativação por 1 hora promoveu desempenho estatisticamente superior à referência, os demais tratamentos foram estatisticamente semelhantes. A ASTM C618 (2014) tem classes semelhantes à NBR 12653 [85], porém considera um IDC de 75% como referência. Com base na norma americana todos os pós estudados enquadraram-se como materiais pozolânicos, exceto CP e CP<sub>G0.5h</sub>.

Na atividade com cal aos 7 dias (Figura 11) os pós tratados não alcançaram o requisito mínimo de 6 MPa [85]. De modo geral a termoativação promoveu uma melhora significativa na atividade, o que pode estar associado à contribuição destes pós no processo de hidratação devido à reidratação dos óxidos, formando compostos com resistência mecânica mais elevada.

A ativação mecânica não alterou o desempenho do CP enquanto o tratamento com TA gerou queda de resistência, possivelmente porque o processo pré-hidrata as partículas e consome o hidróxido de cálcio. Assim quando as partículas tratadas com TA são inseridas na mistura de argamassa de cal, não possuem potencial de hidratação. A calcinação dos pós melhorou o desempenho elevando a resistência à compressão de 1.4 MPa (CP sem tratamento) para 3.3 MPa e 2.9 MPa no CP<sub>C0.5h</sub> e CP<sub>C1.0h</sub>, respectivamente. No MP a mecanoativação por 0.5 horas, e a termoativação promoveram melhora na atividade com cal aos 7 dias, porém nenhum dos tratamentos atingiu o requisito da norma brasileira [85].

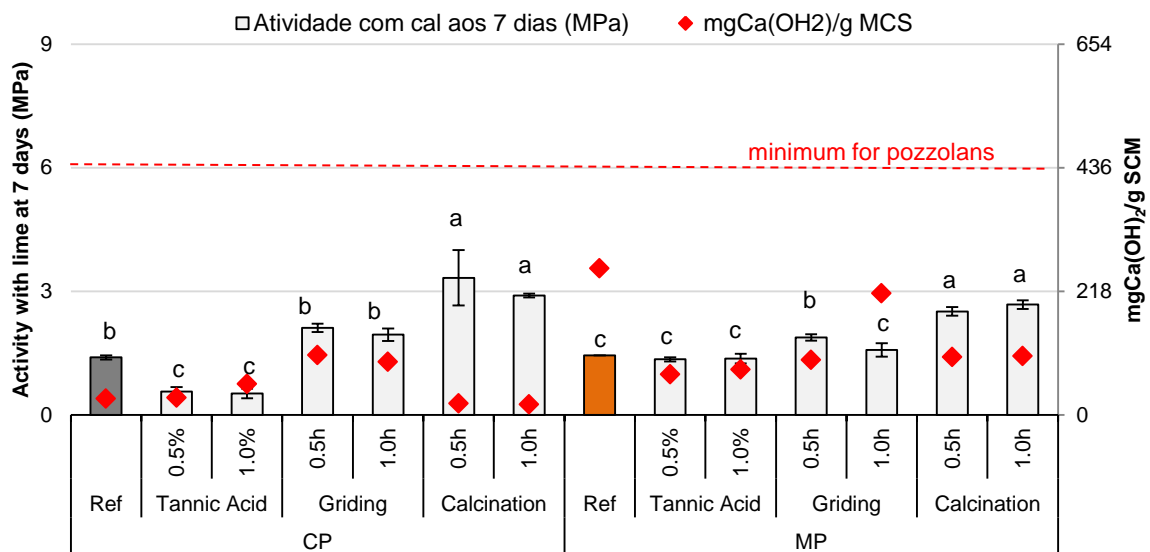


Figure 11: Atividade com cal aos 7 dias para os diferentes pós em função dos tratamentos

Brekillo [86] para pó de concreto e pó cerâmico obteve um índice de desempenho com cimento de 87.5% e 77.5%, e na atividade com cal de 6.6 e 1.1 MPa respectivamente, indicando a reatividade do pó cerâmico [86]. Para pó de concreto, Oliveira, et al [66] obtiveram de índice de desempenho com cimento de 74.8%, já Oliveira [56] relata índice de desempenho com cimento e 61.3% e 68.4% no e atividade com cal de 0.3 e 0.8 MPa para o pó de resíduo misto e pó de concreto, em respectivo.

Observando o consumo de hidróxido de cálcio (Figura 11), verifica-se que nenhum dos pós atinge ao parâmetro mínimo de 436 mg de  $\text{Ca(OH)}_2$ / g de MCS para ser considerado reativo. O maior potencial observado (258 mg de  $\text{Ca(OH)}_2$ / g de MCS) está associado ao MP, sem qualquer tratamento, o qual apresenta maior disponibilidade de alumina conforme FRX (Tabela 2). Na reação pozolânica as fases amorfas de sílica e alumina se dissolvem na água dos poros, esses íons tem reação com a portlandita formando C-S-H (silicatos de cálcio hidratados) e C-A-S-H (silicatos de aluminato de cálcio hidratados) [69,87]. Apesar do CP possuir maior teor de  $\text{SiO}_2$ , sabe-se que boa parte é advinda do agregado miúdo natural de origem quartzosa [46], material inerte que não contribui nas reações químicas de matrizes a base de cimento.

Uma sílica ativa pode ser associada a uma fixação de 1542 mg de  $\text{Ca(OH)}_2$ / g de sílica ativa, outras pozolanas convencionais como sílica da casca de arroz e metacaulim são da ordem de 1336 e 1193 mg de  $\text{Ca(OH)}_2$ / g de material, respectivamente. A composição química destes materiais entre a soma de teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  corresponde a mais de 90% [88,89]. Com base no exposto, os pós em estudos estão mais próximos de um filler quartzoso (140 mg  $\text{Ca(OH)}_2$ /g de adição) [88].

De modo geral confirma-se que a termoativação desidrata os compostos e contribui no ganho de desempenho reidratando-os, e não necessariamente consumindo hidróxido de cálcio através da reação pozolânica. No caso do pó de concreto há desidratação de portlandita da matriz cimentícia, o que reduz mais ainda o consumo de hidróxido de cálcio quando termoativado. Já o tratamento com TA hidrata previamente os pós reduzindo o potencial reativo químico. O melhor índice de desempenho com cimento deve-se ao fato de que mesmo adições inertes alteram a cinética da reação de hidratação do cimento Portland, contribuindo no ganho de desempenho [89].

Quanto ao requisito físico de finura (Figura 12), apenas a mecanoativação de 1.0 hora garantiu finura condizente com material retido na malha de 45  $\mu\text{m}$  inferior a 20%, os demais pós não atendem ao requisito da NBR 12653 (ABNT, 2014), considerando o parâmetro de 34% da ASTM C608 (2014) os pós mecanoativados atenderiam tanto para CP e MP, CP<sub>TA1.0%</sub>, e CP termoativado de 0.5 e 1.0 hora.

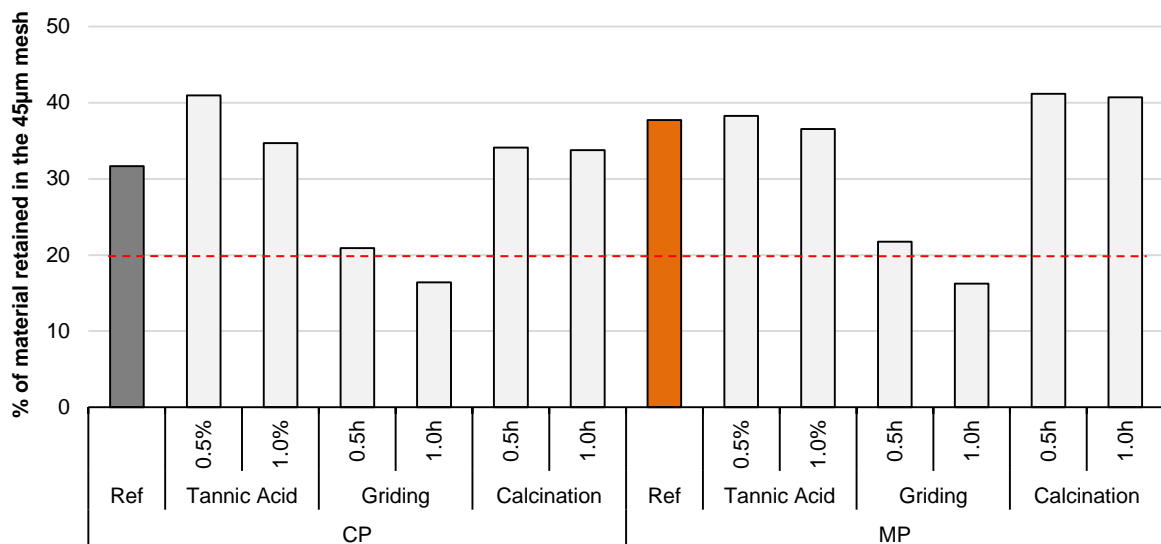


Figure 12: Material retido na malha de 45  $\mu\text{m}$

Na Tabela 3 apresenta-se a classificação dos pós em estudo conforme os requisitos químicos da NBR 12653 [85]. Os pós de RCD obtiveram bons índices de desempenho com cimento, e não alcançaram o desempenho com cal, com baixos consumos de hidróxido de cálcio, sendo que apenas o processo de mecanoativação atendeu ao requisito de finura. A partir da análise da reatividade dos pós de RCD pode-se afirmar que a interação das partículas na mistura está ligada ao efeito de fíler [68], onde as partículas contribuem com a nucleação

dos produtos de hidratação, preenchendo os poros, acelerando a hidratação [43,90] melhorando o desempenho, combinando-se a uma baixa reatividade.

Tabela 3: Caracterização parâmetros químicos para pozolanas

<b>Powder</b>	<b>SiO<sub>2</sub> +Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>LOI</b>
CP	62.70	0.62	1.36	7.84
CP <sub>TA0.5%</sub>	62.70	0.62	1.36	7.84
CP <sub>TA1.0%</sub>	62.70	0.62	1.36	7.84
CP <sub>G0.5h</sub>	61.52	0.65	1.34	8.55
CP <sub>G1.0h</sub>	61.32	0.63	1.33	8.34
CP <sub>C0.5h</sub>	66.52	0.69	1.45	1.21
CP <sub>C1.0h</sub>	66.05	0.70	1.45	2.32
MP	59.08	0.45	0.28	17.08
MP <sub>TA0.5%</sub>	59.08	0.45	0.28	17.08
MP <sub>TA1.0%</sub>	59.08	0.45	0.28	17.08
MP <sub>G0.5h</sub>	58.50	0.39	0.30	17.61
MP <sub>G1.0h</sub>	59.34	0.39	0.31	17.41
MP <sub>C0.5h</sub>	68.19	0.51	0.33	4.53
MP <sub>C1.0h</sub>	65.35	0.47	0.33	8.31
<b>Limites NBR 12653</b>				
<b>Classe</b>	<b>SiO<sub>2</sub> +Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>LOI</b>
N	≥70	≤ 4	≤ 1.5	≤ 10
C	≥70	≤ 5	≤ 1.5	≤ 6
E	≥50	≤ 5	≤ 1.5	≤ 6

Com base nos dados de FRX, verifica-se que a soma de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e F<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, para todos os pós é superior a 50% e inferior a 70%, sendo classificadas como pozolanas classe E. Já pelo teor de SO<sub>3</sub>, umidade e Na<sub>2</sub>O, os pós atendem a qualquer uma das classes. Avaliando-se o requisito de perda ao fogo, apenas os pós de concreto e os pós mistos calcinados atenderiam a classe N <10%, conforme os requisitos químicos de atividade pozolânica da NBR 12653 [85].

### 3.5 ANÁLISES EM PASTAS

Comparando-se os efeitos dos três tratamentos de partículas na resistência à compressão das composições de pastas contendo 25% de substituição (Figura 13), verifica-se que o melhor tratamento no pó de concreto foi a pré-hidratação com ácido tânico à 0.5%. A mecanoativação pelos períodos de 0.5 e 1.0 hora promoveu redução na resistência à compressão aos 28 dias, possivelmente devido à aglomeração de partículas, uma vez que não se empregou aditivo dispersante na cominuição e na produção das pastas. Os demais tratamentos tiveram

desempenho semelhante a pasta contendo CP sem tratar (Ref), como a pasta com 100% de CP-HE.

Observa-se (Figura 13) que pastas contendo 25% de CP têm um aumento na consistência com o TA conforme o aumento da concentração de TA, enquanto que para o CP a mecano e a termoativação promoveram a redução do índice de consistência das pastas. No MP, a mecanoativação elevou o índice (indicando efeito fíler), enquanto o TA promoveu redução conforme aumento da concentração. O efeito divergente do TA na consistência dos pós de concreto e misto pode estar atrelada a atuação do reagente sobre as partículas, onde as partículas de concreto são hidratadas na reação com o ácido tânico tendo uma estrutura densificada, o que pode melhorar o efeito de fíler com o aumento de área de superfície específica promovido pelo TA, já no MP como o material possui uma área de superfície significativamente maior, o aumento nesta área com o tratamento prejudica a mobilidade das partículas, demandando mais água para uma mesma consistência (o mesmo ocorre quando se tem fíler em excesso), como a mecanoativação e a termoativação no MP reduziram a área de superfície das partículas observa-se maiores índices de consistência.

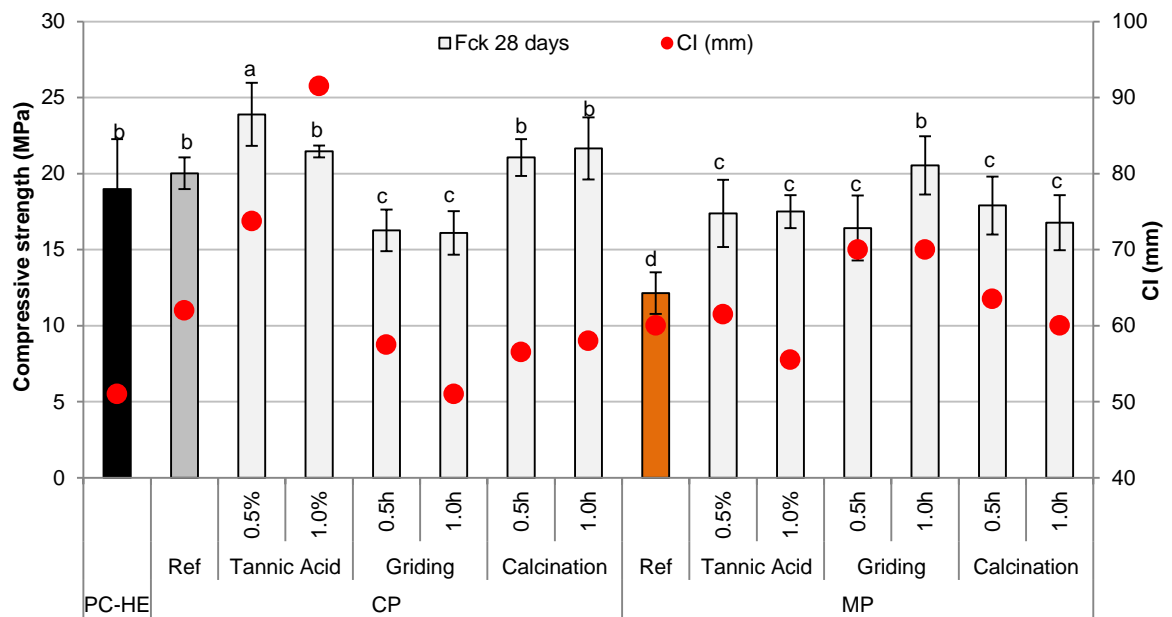


Figure 13: Índice de consistência e Resistência à compressão aos 28 dias em pastas com 25% de substituição de cimento Portland por MP e CP submetidos a diferentes tratamentos

A menor resistência à compressão foi verificada nas amostras com pó misto sem tratamento (MP). A mecanoativação por 1.0 hora no MP promoveu considerável aumento nesta propriedade (47.6%), com valor semelhante à pasta de CP-HE. Os demais tratamentos resultaram em desempenho inferior a pasta com 25% de MP<sub>M1.0h</sub> e superiores as pastas com 25% de MP.

Oliveira et al., [44] avaliaram teores de substituição de 15% e 25% de pó de concreto, propondo cimentos de classes C40 e C32 MPa, respectivamente com base no desempenho aos 91 dias. Em argamassas na composição 1:3 Duan et al., [78] utilizando pós reciclados de diferentes origens (cerâmico, misto, e concreto), obtiveram resistências inferiores à referência para teores de substituição de até 20%. Hoppe Filho et al., [69] alcançaram resistências inferiores à argamassa de referência com 30% de substituição em massa de cimento Portland por pó cerâmico. Steiner et al., [28] utilizando com MCS pó de porcelanato verificaram resistências aos 28 dias inferiores à referência, independente do teor de substituição. Aos 120 dias o teor de 25% apresentou melhora na propriedade, com resistência semelhante à referência.

As resistências à compressão inferiores a 25 MPa observadas neste estudo devem-se à relação a/f utilizada de 0,48, teor elevado para pastas. A redução a/f associada ao uso de aditivos dispersantes nos estudos em pasta, argamassa e concreto pode ser útil para potencializar a aplicação dos pós como MCS.

Independente da origem dos pós os três tratamentos de partículas promoveram redução no grau de hidratação (GH) das pastas aos 28 dias, quando comparadas as pastas de referência (pó sem tratamento) (Figura 14). Em pastas contendo 25% de substituição de pó de concreto (CP) in natura (88%) o GH foi superior à pasta com 100% de CP-HE (82.5%). Com substituição de pó misto (MP) in natura o grau de hidratação foi de 81.2%.

O maior GH obtido na pasta com substituição de CP deve-se à composição química no pó, que contém maior teor de cimento anidro [91–93], o qual possui potencial de hidratação, contribuindo na resistência mecânica. Com o aumento da água quimicamente ligada maior será o grau de hidratação [44]. Observa-se nas pastas contendo os pós de concreto que apenas o pó termoativado elevou a formação de hidratos, indicando que a termoativação possibilitou a desidratação e reidratação do material, enquanto as demais pastas tiveram teores inferiores às referências.

Já o maior GH da pasta contendo MP sem tratamento pode se justificar pela maior área de superfície específica deste pó, com aumento dos pontos de nucleação para os hidratos contribuindo no aumento da hidratação [68,94,95]. O que mostra-se mais plausível com relação a redução do grau de hidratação nos pós tratados é a redução na área de superfície específica na mecano e termoativação, o que não é válido apenas para os pós tratados com ácido tânico, onde o processo de tratamento consiste em uma pré-hidratação da partícula [36,37], conseqüentemente quando na mistura substituindo cimento estas partículas terão menor potencial de sofrer a hidratação, justificando-se um menor GH.

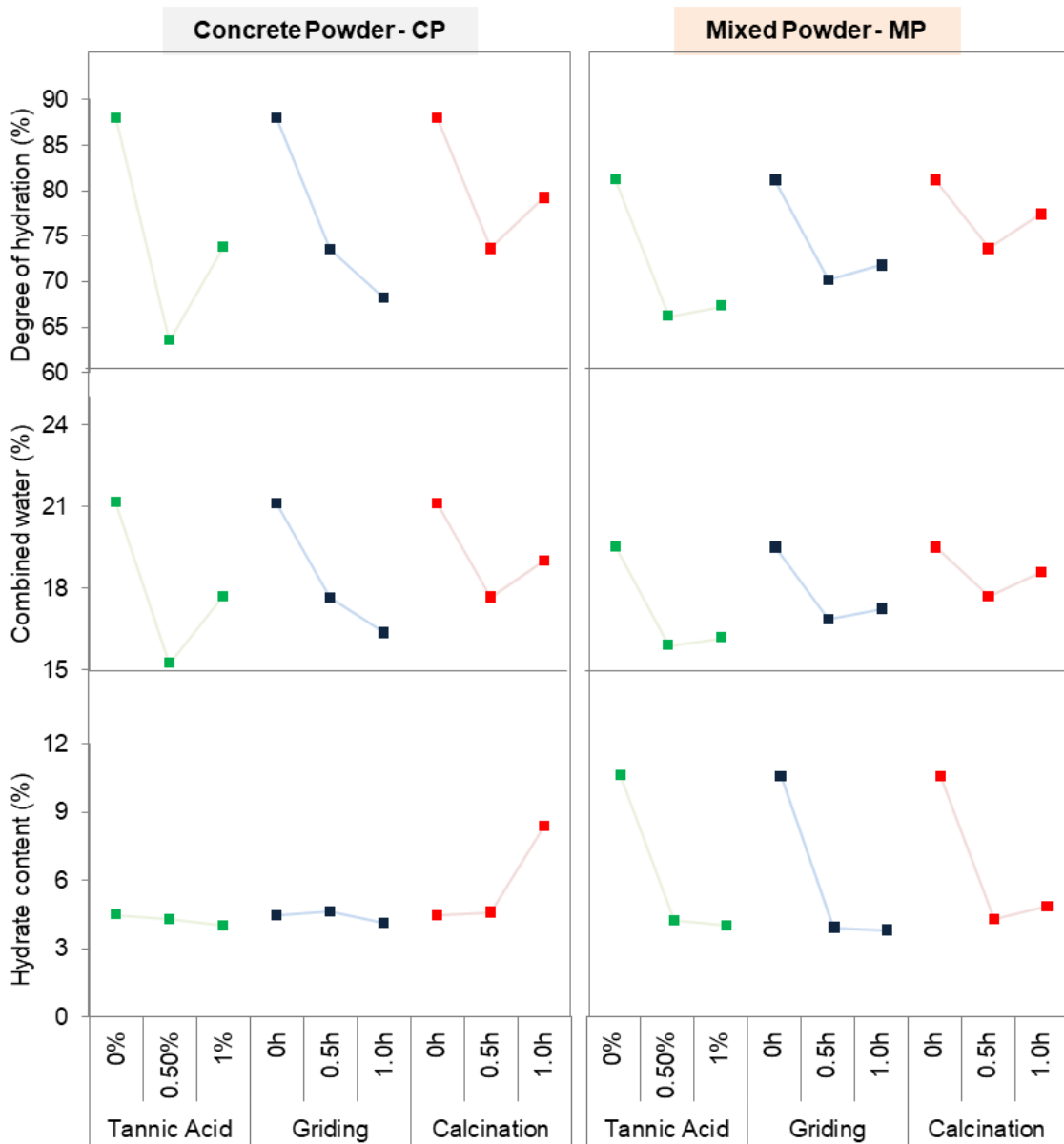


Figure 14: Grau de hidratação, água combinada e teor de hidratos

Na idade de 28 dias não foi possível identificar uma relação direta entre o grau de hidratação (Figura 14) e a resistência à compressão (Figura 13), visto que as pastas com melhor desempenho mecânico não necessariamente obtiveram maior grau de hidratação. Os pós com baixa ou inatividade pozolânica, podem ter contribuição nas matrizes pelo efeito de preenchimento da microestrutura, que melhora o desempenho mecânico [68]. Devendo ser conduzidos estudos futuros em idades mais avançadas considerando que os materiais cimentícios suplementares, podem ter reações mais lentas [95,96].

## CONCLUSÕES

Diante do objetivo proposto de avaliar os efeitos de diferentes tratamentos nas partículas de pó misto e pó de concreto, com vistas à aplicação como material cimentício suplementar, tem-se as seguintes conclusões:

- O tratamento com ácido tânico consumiu o hidróxido de cálcio do pó de concreto e não promoveu alterações químicas no pó misto. O tratamento promoveu uma densificação da microestrutura nos dois pós estudados, com pequena elevação na massa específica e aumento significativo na área de superfície específica.
- A termoativação promoveu um aumento na massa específica dos pós, com aglomeração das partículas em função da redução na área de superfície específica. A partir da desidroxilação o processo tornou os pós mais reativos. Para o pó de concreto houve maior taxa de formação de hidratos com este tratamento, devido à desidratação da pasta de cimento. No pó misto tal efeito não é percebido em virtude da composição química não ser predominantemente material cimentício.
- A mecanoativação promoveu aumento na massa específica com redução no diâmetro das partículas e aglomeração das partículas com menor área de superfície específica, sem alterações químicas.
- Os pós tratados tiveram melhor índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (acima de 90% e superior ao pó de referência, sem tratamento), sendo que tal efeito deve-se principalmente ao preenchimento da microestrutura (efeito filler).
- A menor área de superfície específica das partículas promovida pelos tratamentos térmico e mecânico, reduziram o grau de hidratação das pastas quando comparadas com pastas com pós sem tratamento.
- Para o pó de concreto o tratamento com 0.5% de TA e a termoativação a 800°C pelo período de 0.5 hora resultaram em maiores resistências mecânicas.
- Para o pó misto todos os tratamentos propostos superaram a resistência mecânica do pó de referência (sem tratamento). A mecanoativação por 1.0 hora gerou diferença estatística nos resultados, enquanto os demais tratamentos que não diferiram entre si.
- Em resumo sugere-se a mecano e termoativação por 0.5 horas, e pré-hidratação com 0.5% de ácido tânico para o pó de concreto, e para o pó misto a mecanoativação por 1.0 hora, os demais tratamentos podem ser mantidos os fatores de exposição do CP.

Os tratamentos aplicados mostram potencial de melhorar as características do pó de concreto e do pó misto, sendo promissores como forma de ampliar o teor de substituição de clínquer no cimento Portland por um material residual menos emissivo, provendo a circularidade e sustentabilidade na indústria da construção.

**Declaração de contribuição de autoria do crédito**

**Melissa Pastorini Proença:** Concepção, Metodologia, Conceituação. Procedimentos experimentais. Redação – rascunho original. **Dayana Ruth Bola Oliveira:** Supervisão. Redação, revisão e edição. **Kathleen Dall Bello de Souza Risson:** Cominuição dos pós. Redação e revisão. **Edna Possan:** Concepção, Supervisão, Metodologia, Conceituação, Fomento. Redação – revisão e edição.

**Declaração de Interesse Concorrente**

Os autores declaram que não têm interesses financeiros concorrentes conhecidos ou relacionamentos pessoais que possam parecer influenciar o trabalho relatado neste artigo.

**Disponibilidade de dados**

Os dados experimentais obtido no estudo podem ser solicitados diretamente aos autores.

**Reconhecimentos**

Os autores agradecem à Universidade Federal da Integração Latino-Americana e ao Instituto Federal do Paraná (IFPR) – Campus Foz do Iguaçu. À UNILA para Laboratório de Performance e Estruturas e Materiais – LADEMA e ao Laboratório Interdisciplinar de Ciências Físicas (LICF) pelo apoio no projeto experimental.

**Fomento**

Ao CNPq pelo fomento à pesquisa processo número 308511/2022-0. À capes pela bolsa de pesquisa da autora Dayana Ruth Oliveira Pruner (CAPES código 0001). Ao PRPPG/UNILA pelo apoio à pesquisa

## REFERÊNCIAS

- [1] Q. Lin, X. Zhang, T. Wang, C. Zheng, X. Gao, Technical Perspective of Carbon Capture, Utilization, and Storage, *Engineering*. 14 (2022) 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.12.013>.
- [2] B.S. Thomas, Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82 (2018) 3913–3923. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.081>.
- [3] K.L. Scrivener, V.M. John, E.M. Gartner, Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry, *Cem. Concr. Res.* 114 (2018) 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.
- [4] WBCSD. Low Carbon Technology Partnerships initiative. 2016a.
- [5] WBCSD; IEA. Low Carbon Technology Roadmap for the Indian Cement Sector: Status Review 2018. p. 52, 2018.
- [6] P.J.M. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, *Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais*, 2<sup>a</sup> edição, 2014.
- [7] A.M. Neville, 5<sup>a</sup> Edição, 2016.
- [8] WBCSD. Cement Sector Scope 3 GHG Accounting and Reporting Guidance. 2016b.
- [9] AMERICA'S CEMENT MANUFACTURERS. Roadmap to Carbon Neutrality. 2021.
- [10] I.E.A. IEA, Technology roadmap: Low-carbon transition in the cement industry, *Int. Energy Agency*,. (2018) 66.
- [11] GCCA, G. C. A. C. A.-. GNR 2.0 – GCCA in Numbers. <https://www.sosma.org.br/projeto/atlas-da-mata-atlantica/dados-mais-recentes/>. (accessed November 19, 2022).
- [12] CPLC, WHAT IS CARBON PRICING?, Carbon Pricing Leadersh. Coalit. (2021). <https://www.carbonpricingleadership.org/what> (accessed November 5, 2022).
- [13] PMR e ICAP, Comercio de emisiones en la práctica: manual sobre el diseño y la implementación de sistemas de comercio de emisiones, Partnersh. Mark. Readiness Int. Carbon Action Partnersh. (2016) 1–211. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/23874>.
- [14] B.I. Oluleye, D.W.M. Chan, A.B. Saka, T.O. Olawumi, Circular economy research on building construction and demolition waste: A review of current trends and future research directions, *J. Clean. Prod.* 357 (2022) 131927. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131927>.
- [15] F.N. Costa, D.V. Ribeiro, Reduction in CO<sub>2</sub> emissions during production of cement, with partial replacement of traditional raw materials by civil construction waste (CCW), *J. Clean. Prod.* 276 (2020) 123302. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123302>.
- [16] S.K. Kaliyavaradhan, T. Ling, K.H. Mo, Valorization of waste powders from cement-concrete life cycle: A pathway to circular future, *J. Clean. Prod.* 268 (2020) 122358. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122358>.
- [17] H. Mehdizadeh, X. Cheng, K.H. Mo, T. Ling, Upcycling of waste hydrated cement paste containing high-volume supplementary cementitious materials via CO<sub>2</sub> pre-treatment, *J. Build. Eng.* 52 (2022) 104396. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104396>.
- [18] Y.K. Kong, S. Ruan, K. Kurumisawa, Recycling of calcined carbonated cement pastes as cementitious materials: Proposed CCUS technology for calcium looping, *J. Environ. Chem. Eng.* 10 (2022) 108247. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108247>.
- [19] A. Arun, D. Chekravarty, K. Murali, Comparative analysis on natural and recycled coarse aggregate concrete, *Mater. Today Proc.* 46 (2021) 8837–8841. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.352>.
- [20] Y. Kim, Quality properties of self-consolidating concrete mixed with waste concrete powder, *Constr. Build. Mater.* 135 (2017) 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.174>.
- [21] F. de A. Salgado, F. de A. Silva, Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review, *J. Build.*

- Eng. 52 (2022) 104452. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104452>.
- [22] E. (Ed. . Vázquez, *Progress of Recycling in the Built Environment*, Springer Netherlands, Dordrecht, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4908-5>.
- [23] J. Xiao, Z. Ma, T. Sui, A. Akbarnezhad, Z. Duan, Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste, *J. Clean. Prod.* 188 (2018) 720–731. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.277>.
- [24] J. Geng, J. Sun, Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 49 (2013) 814–820. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.090>.
- [25] H. Mehdizadeh, T.C. Ling, X. Cheng, K.H. Mo, Effect of particle size and CO<sub>2</sub> treatment of waste cement powder on properties of cement paste, *Can. J. Civ. Eng.* 48 (2021) 522–531. <https://doi.org/10.1139/CJCE-2019-0574>.
- [26] Z. Duan, A. Singh, J. Xiao, S. Hou, Combined use of recycled powder and recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste in self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 254 (2020) 119323. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119323>.
- [27] L. Wang, J. Wang, H. Wang, Y. Fang, W. Shen, P. Chen, Y. Xu, Eco-friendly treatment of recycled concrete fines as supplementary cementitious materials, *Constr. Build. Mater.* 322 (2022) 126491. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126491>.
- [28] L.R. Steiner, A.M. Bernardin, F. Pelisser, Effectiveness of ceramic tile polishing residues as supplementary cementitious materials for cement mortars, *Sustain. Mater. Technol.* 4 (2015) 30–35. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.001>.
- [29] J. Maybury, J.C.M. Ho, S.A.M. Binhowimal, Fillers to lessen shear thickening of cement powder paste, *Constr. Build. Mater.* 142 (2017) 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.076>.
- [30] X. Chen, D. Zhang, S. Cheng, X. Xu, C. Zhao, X. Wang, Q. Wu, X. Bai, Sustainable reuse of ceramic waste powder as a supplementary cementitious material in recycled aggregate concrete: Mechanical properties, durability and microstructure assessment, *J. Build. Eng.* 52 (2022) 104418. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104418>.
- [31] X. Luo, J. Gao, S. Li, Z. Xu, G. Chen, Experimental study on the early-age properties of cement pastes with recycled brick powder, *Constr. Build. Mater.* 347 (2022) 128584. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128584>.
- [32] R. Yu, Z. Shui, Influence of agglomeration of a recycled cement additive on the hydration and microstructure development of cement based materials, *Constr. Build. Mater.* 49 (2013) 841–851. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.004>.
- [33] S.K. Kaliyavaradhan, L. Li, T. Ling, Response surface methodology for the optimization of CO<sub>2</sub> uptake using waste concrete powder, *Constr. Build. Mater.* 340 (2022) 127758. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127758>.
- [34] A.S.S.S. Nedunuri, A. yar Mohammed, S. Muhammad, Carbonation potential of concrete debris fines and its valorisation through mineral carbonation, *Constr. Build. Mater.* 310 (2021) 125162. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125162>.
- [35] B. Lu, C. Shi, J. Zhang, J. Wang, Effects of carbonated hardened cement paste powder on hydration and microstructure of Portland cement, *Constr. Build. Mater.* 186 (2018) 699–708. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.159>.
- [36] Y. Fang, J. Wang, X. Qian, L. Wang, P. Chen, P. Qiao, A renewable admixture to enhance the performance of cement mortars through a pre-hydration method, *J. Clean. Prod.* 332 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130095>.
- [37] L. Wang, J. Wang, X. Qian, Y. Fang, P. Chen, A. Tuinukuafe, Tea stain-inspired treatment for fine recycled concrete aggregates, *Constr. Build. Mater.* 262 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120027>.
- [38] J.-B.M. Dassekpo, C. Zhang, J. Bai, D. Liu, Y. Li, Z. Dong, F. Xing, Alkali-activation of calcined granitic waste: Reaction mechanisms and environmental implication for waste minimization, *Constr. Build. Mater.* 327 (2022) 126976. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126976>.

- [39] Z. Duan, S. Hou, J. Xiao, B. Li, Study on the essential properties of recycled powders from construction and demolition waste, *J. Clean. Prod.* 253 (2020) 119865. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119865>.
- [40] Z. He, X. Han, M. Zhang, Q. Yuan, J. Shi, P. Zhan, A novel development of green UHPC containing waste concrete powder derived from construction and demolition waste, *Powder Technol.* 398 (2022) 117075. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117075>.
- [41] L. Li, W. Liu, Q. You, M. Chen, Q. Zeng, Waste ceramic powder as a pozzolanic supplementary filler of cement for developing sustainable building materials, *J. Clean. Prod.* 259 (2020) 120853. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120853>.
- [42] S. Gupta, S. Chaudhary, State of the art review on supplementary cementitious materials in India – II: Characteristics of SCMs, effect on concrete and environmental impact, *J. Clean. Prod.* 357 (2022) 131945. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131945>.
- [43] B. Lothenbach, K. Scrivener, R.D. Hooton, Supplementary cementitious materials, *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 1244–1256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>.
- [44] D.R.B. Oliveira, G. Leite, E. Possan, J. Marques Filho, Concrete powder waste as a substitution for Portland cement for environment-friendly cement production, *Constr. Build. Mater.* 397 (2023) 132382. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132382>.
- [45] Y. Zhao, J. Gao, C. Liu, X. Chen, Z. Xu, The particle-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement, *J. Clean. Prod.* 242 (2020) 118521. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118521>.
- [46] H. Wu, J. Xu, D. Yang, Z. Ma, Utilizing thermal activation treatment to improve the properties of waste cementitious powder and its newmade cementitious materials, *J. Clean. Prod.* 322 (2021) 129074. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129074>.
- [47] S. Mohammed, Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: A review, *Constr. Build. Mater.* 140 (2017) 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.078>.
- [48] D. Zhang, S. Zhang, B. Huang, Q. Yang, J. Li, Comparison of mechanical, chemical, and thermal activation methods on the utilisation of recycled concrete powder from construction and demolition waste, *J. Build. Eng.* 61 (2022) 105295. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105295>.
- [49] A. Arbenz, L. Avérous, Chemical modification of tannins to elaborate aromatic biobased macromolecular architectures, *Green Chem.* 17 (2015) 2626–2646. <https://doi.org/10.1039/C5GC00282F>.
- [50] Q. Wei, R. Haag, Universal polymer coatings and their representative biomedical applications, *Mater. Horizons.* 2 (2015) 567–577. <https://doi.org/10.1039/C5MH00089K>.
- [51] Y. Fang, J. Wang, X. Qian, L. Wang, Y. Dong, P. Qiao, Low-cost, ubiquitous biomolecule as a strength enhancer for cement mortars, *Constr. Build. Mater.* 311 (2021) 125305. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125305>.
- [52] K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach, *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*, 2016. <https://doi.org/10.1201/b19074>.
- [53] A. Korpa, R. Trettin, The influence of different drying methods on cement paste microstructures as reflected by gas adsorption: Comparison between freeze-drying (F-drying), D-drying, P-drying and oven-drying methods, *Cem. Concr. Res.* 36 (2006) 634–649. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2005.11.021>.
- [54] D. Zhang, S. Zhang, B. Huang, Q. Yang, J. Li, Comparison of mechanical, chemical, and thermal activation methods on the utilisation of recycled concrete powder from construction and demolition waste, *J. Build. Eng.* 61 (2022) 105295. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.105295>.
- [55] EMBRAPA, *Manual de métodos de análise de solo*, 3ª Edição, Brasília, 2017.
- [56] OLIVEIRA, DAYANA RUTH BOLA. Aproveitamento da fração fina de resíduo de construção de demolição como alternativa para redução das emissões de CO<sub>2</sub>

- associadas ao cimento Portland. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2022.
- [57] S. Mantellato, M. Palacios, R.J. Flatt, Reliable specific surface area measurements on anhydrous cements, *Cem. Concr. Res.* 67 (2015) 286–291.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.009>.
- [58] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
- [59] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5751: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.
- [60] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15894-3: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45  $\mu\text{m}$ . Rio de Janeiro, 2010.
- [61] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.
- [62] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- [63] A.M. Pitarch, L. Reig, A.E. Tomás, G. Forcada, L. Soriano, M.V. Borrachero, J. Payá, J.M. Monzó, Pozzolanic activity of tiles, bricks and ceramic sanitary-ware in eco-friendly Portland blended cements, *J. Clean. Prod.* 279 (2021) 123713.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123713>.
- [64] L. Oksri-Nelfia, P.-Y. Mahieux, O. Amiri, P. Turcry, J. Lux, Reuse of recycled crushed concrete fines as mineral addition in cementitious materials, *Mater. Struct.* 49 (2016) 3239–3251. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0716-1>.
- [65] Z. Zhang, G.W. Scherer, A. Bauer, Morphology of cementitious material during early hydration, *Cem. Concr. Res.* 107 (2018) 85–100.  
<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2018.02.004>.
- [66] T.C.F. Oliveira, B.G.S. Dezen, E. Possan, Use of concrete fine fraction waste as a replacement of Portland cement, *J. Clean. Prod.* 273 (2020) 123126.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123126>.
- [67] F. Brekailo, E. Pereira, E. Pereira, M.M. Farias, R.A. Medeiros-Junior, Red ceramic and concrete waste as replacement of portland cement: Microstructure aspect of eco-mortar in external sulfate attack, *Clean. Mater.* 3 (2022) 100034.  
<https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100034>.
- [68] L. Likes, A. Markandeya, M.M. Haider, D. Bollinger, J.S. McCloy, S. Nassiri, Recycled concrete and brick powders as supplements to Portland cement for more sustainable concrete, *J. Clean. Prod.* 364 (2022) 132651.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132651>.
- [69] J. Hoppe Filho, C.A.O. Pires, O.D. Leite, M.R. Garcez, M.H.F. Medeiros, Red ceramic waste as supplementary cementitious material: Microstructure and mechanical properties, *Constr. Build. Mater.* 296 (2021) 123653.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123653>.
- [70] WEBBER, JAINER. Processamento coloidal de  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  e a seletividade superficial na adsorção específica de taninos. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2017.
- [71] M. Oćwieja, *Jornal de colóide e ciência de interface Adsorção de ácido tânico em monocamadas de polieletrólitos determinada in situ por meio de medições de potencial de streaming*, 438 (2015).
- [72] B.M. Cerrutti, Estabilização de Suspensões Aquosas de Alumina pela Adição de Taninos e Quitosana Quaternizada, (2005) 87. [73] M. Finkler, J. Webber, R.C.D. Cruz, J.E. Zorzi, Aditivo surfactante de fonte renovável para redução do consumo energético na extrusão de massas de cerâmica vermelha, *Cerâmica.* 64 (2018) 373–

380. <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643712342>.
- [74] I.R. et al. Oliveira, Dispersão e empacotamento de partículas, Fazenda Arte, São Paulo, 2000.
- [75] D.X. Oh, E. Prajatelista, S.-W. Ju, H. Jeong Kim, S.-J. Baek, H. Joon Cha, S. Ho Jun, J.-S. Ahn, D. Soo Hwang, A rapid, efficient and facile solution for dental hypersensitivity: The tannin–iron complex, *Sci. Rep.* 5 (2015) 10884. <https://doi.org/10.1038/srep10884>.
- [76] T. Meng, Y. Hong, K. Ying, Z. Wang, Comparison of technical properties of cement pastes with different activated recycled powder from construction and demolition waste, *Cem. Concr. Compos.* 120 (2021) 104065. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104065>.
- [77] M.V.A. Florea, Z. Ning, H.J.H. Brouwers, Activation of liberated concrete fines and their application in mortars, *Constr. Build. Mater.* 50 (2014) 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.09.012>.
- [78] Z. Duan, S. Hou, J. Xiao, B. Li, Study on the essential properties of recycled powders from construction and demolition waste, *J. Clean. Prod.* 253 (2020) 119865. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119865>.
- [79] H. Zhang, B. Zhang, L. Tang, W. Zeng, Analysis of two processing techniques applied on powders from recycling of clay bricks and concrete, in terms of efficiency, energy consumption, and cost, *Constr. Build. Mater.* 385 (2023) 131517. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131517>.
- [80] L.F.T. Queiroz, S.N. Monteiro, C.M.F. Vieira, Efeito da utilização de areia no processamento e nas propriedades de cerâmica vermelha, *Cerâmica.* 56 (2010) 279–284. <https://doi.org/10.1590/s0366-69132010000300011>.
- [81] C.P. Santos, H.A. Oliveira, R.M.P.B. Oliveira, Z.S. Macedo, Caracterização de argilas calcárias utilizadas na produção de revestimentos cerâmicos no Estado de Sergipe-Brasil, *Cerâmica.* 62 (2016) 147–156. <https://doi.org/10.1590/0366-69132016623621983>.
- [82] N.S. Msinjili, G.J.G. Gluth, P. Sturm, N. Vogler, H.-C. Kühne, Comparison of calcined illitic clays (brick clays) and low-grade kaolinitic clays as supplementary cementitious materials, *Mater. Struct.* 52 (2019) 94. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1393-2>.
- [83] L. Mazurana, P.R.S. Bittencourt, F.R. Scremin, A. Neves Junior, E. Possan, Determination of CO<sub>2</sub> capture in rendering mortars produced with recycled construction and demolition waste by thermogravimetry, *J. Therm. Anal. Calorim.* 147 (2022) 1071–1080. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10436-0>.
- [84] A. Neves Junior, J. Dweck, R.D.T. Filho, B. Ellis, V. Li, Determination of CO<sub>2</sub> capture during accelerated carbonation of engineered cementitious composite pastes by thermogravimetry, *J. Therm. Anal. Calorim.* 138 (2019) 97–109. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08210-y>.
- [85] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.
- [86] F. Brekailo, E. Pereira, E. Pereira, J.H. Filho, M.H.F. De Medeiros, Evaluation of the reactive potential of additions of red ceramic waste and comminuted concrete of CDW in cement matrix, *Cerâmica.* 65 (2019) 351–358. <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653752552>.
- [87] F. Pelisser, L.R. Steiner, A.M. Bernardin, Recycling of porcelain tile polishing residue in portland cement: Hydration efficiency, *Environ. Sci. Technol.* 46 (2012) 2368–2374. <https://doi.org/10.1021/es203118w>.
- [88] J. Hoppe Filho, A. Gobbi, E. Pereira, V.A. Quarcioni, M.H.F. De Medeiros, Atividade pozolânica de adições minerais para cimento portland (Parte i): índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-x (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e chapelle modificado, *Rev. Mater.* 22 (2017). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170003.0206>.
- [89] J. Hoppe Filho, A. Gobbi, E. Pereira, R.S. Tanaka, M.H.F. De Medeiros, Atividade pozolânica de adições minerais para cimento portland (Parte ii): índice de atividade

- pozolânica com cimento portland (IAP), difração de raios-x (DRX) e termogravimetria (TG/DTG), *Rev. Mater.* 22 (2017). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170003.0207>.
- [90] A.F. BATTAGIN, H. RODRIGUES, Recomendações sobre o uso dos distintos tipos de Cimento portland nas diferentes aplicações, *Concreto & Construções*. 73 (2014). [www.ibracon.org.br](http://www.ibracon.org.br).
- [91] M. Zajac, J. Skocek, Ł. Gołek, J. Deja, Supplementary cementitious materials based on recycled concrete paste, *J. Clean. Prod.* 387 (2023) 135743. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135743>.
- [92] V. Horsakulthai, Effect of recycled concrete powder on strength, electrical resistivity, and water absorption of self-compacting mortars, *Case Stud. Constr. Mater.* 15 (2021) e00725. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00725>.
- [93] Z. Prošek, J. Trejbal, V. Nežerka, V. Goliáš, M. Faltus, P. Tesárek, Recovery of residual anhydrous clinker in finely ground recycled concrete, *Resour. Conserv. Recycl.* 155 (2020) 104640. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104640>.
- [94] R. Snellings, P. Suraneni, J. Skibsted, Future and emerging supplementary cementitious materials, *Cem. Concr. Res.* 171 (2023) 107199. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107199>.
- [95] J. Skibsted, R. Snellings, Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends, *Cem. Concr. Res.* 124 (2019) 105799. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105799>.
- [96] P.C.R.A. Abrão, F.A. Cardoso, V.M. John, Efficiency of Portland-pozzolana cements: Water demand, chemical reactivity and environmental impact, *Constr. Build. Mater.* 247 (2020) 118546. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118546>.

### 3.2 ESTUDO COMPLEMENTAR

Objetivando explorar os potenciais de substituição dos pós de RCD submetidos a diferentes tratamentos, este estudo complementar contempla a análise do desempenho mecânico e ambiental de argamassas com substituições de 10%, 25% e 40% de cimento Portland pelos pós de RCD tratados. Com base no estudo do Artigo 1, foram mantidas as nomenclaturas do inglês *mixed powder* – MP (pó misto), e *concrete powder* - CP (pó de concreto), referindo-se aos tratamentos na composição da nomenclatura os termos são: ácido tânico (*tannic acid* – TA), moagem (*grinding* - G) e calcinação (*calcination* – C).

Foram selecionados para esta etapa o pó misto (MP) com 0,5% de TA ( $MP_{TA0,5\%}$ ), moído por 1 hora ( $MP_{G1,0h}$ ) e calcinado por meia hora ( $MP_{C0,5h}$ ). Para o pó de concreto (CP), o pó com 0,5% de TA ( $CP_{TA0,5\%}$ ), o moído por meia hora ( $CP_{G0,5h}$ ) e o calcinado por meia hora ( $CP_{C0,5h}$ ).

#### 3.2.1 Procedimentos Experimentais

Foram produzidas argamassas na proporção 1:3 conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019), como referência aos ensaios de resistência à compressão do cimento Portland, considerando relação *a/f* de 0,48. Também se fez um proporcionamento otimizado, com redução da relação *a/f* mantendo-se a consistência entre  $165 \pm 8$  mm, com incorporação de aditivo superplastificante a base de policarboxilato de terceira geração, com massa específica da  $1,1 \text{ g/cm}^3$  conforme a NBR 11768 (ABNT, 2019).

Nas composições estudadas (Tabela 3) foram utilizados pós de RCD tratados em substituições parciais de CPV-ARI (Cimento Portland de alta resistência inicial, similar ao cimento tipo III ASTM C150/C150M-22), com massa específica de  $3,12 \text{ g/cm}^3$  e teor aproximado de 85% de clínquer (determinado a partir das equações de Bogue (1929) e confirmado com os dados da análise termogravimétrica do Artigo A). Fez-se uso de água destilada e areia normal brasileira (ABNT, 2015). Utilizou-se o CPII-F-32 na produção das argamassas de referência.

Para dosagem do aditivo superplastificante (SP) foi avaliado o ponto de saturação para pastas compostas com Cimento CPV-ARI, MP e CP, fixando-se a relação água/finos (*a/f*) em 0,40, onde observou-se consistência suficiente para realização do ensaio. Fez-se a verificação da fluidez das pastas através do mini slump (Kantro, 1980), variando-se os teores de SP de 0; 0,15%; 0,30%; 0,60%; 0,90% e 1,20%, com correção da água do SP.

Tabela 3 - Composições das argamassas

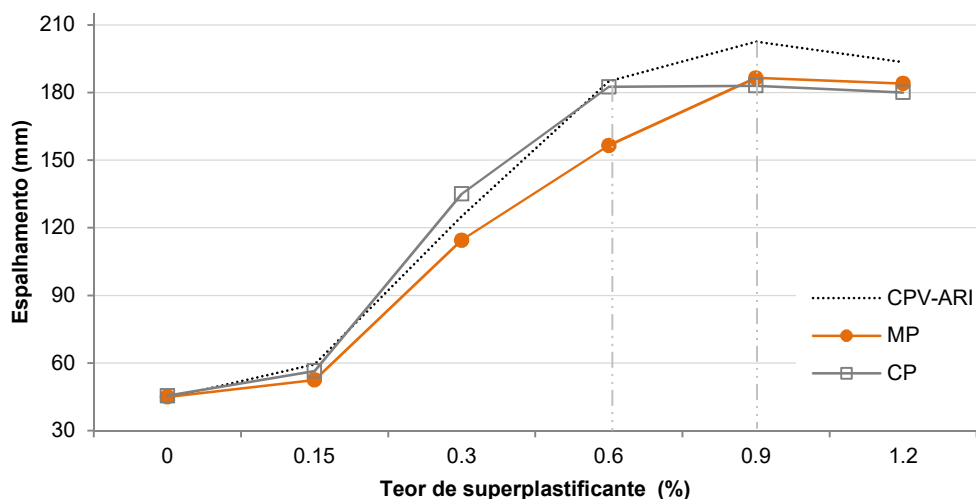
Argamassa (% de Pó)	Padrão NBR 7215*			Argamassa Otimizada								
	10	25	40	10		25		40				
Indicadores	IC (cm)			a/f	Ad (%)	IC (cm)		a/f	Ad (%)	IC (cm)		
MP	18.56	17.85	15.08	0.340		16.70	0.405		17.00	0.380	16.05	
MP <sub>T0.5%</sub>	19.24	15.73	17.44	0.338	0.90	16.05	0.341	0.90	16.30	0.419	0.90	
MP <sub>G1.0h</sub>	18.09	16.97	15.03	0.337		17.35	0.456		16.15	0.367		16.30
MP <sub>C0.5h</sub>	16.46	14.09	13.39	0.367		17.22	0.372		16.68	0.410		16.78
CP	16.59	16.89	15.72	0.320		16.50	0.328		16.23	0.374	16.90	
CP <sub>T0.5%</sub>	19.31	19.53	18.58	0.323	0.87	16.05	0.359	0.83	16.05	0.400	0.78	
CP <sub>G0.5h</sub>	20.03	20.62	19.88	0.321		16.10	0.356		17.30	0.395		16.25
CP <sub>C0.5h</sub>	19.86	16.89	15.88	0.325		16.95	0.370		16.35	0.397		16.40

IC = índice de consistência. Ad = Teor de aditivo superplastificante. a/f = relação água/finos \*Teor a/f fixo em 0,48.

Fonte: Autora, 2023.

O cone de Kantro foi posicionado em uma placa de vidro, e a pasta vertida foi adensada com 10 golpes de espátula, fazendo-se o arrasamento da superfície. Então, o molde foi erguido e após a estabilização da pasta por alguns segundos, foram coletadas três medidas do diâmetro do espalhamento. O teor de saturação é identificado quando o aumento no teor de aditivo não gera influência no espalhamento da pasta (Figura 9). Neste caso para MP e CPV-ARI o teor utilizado foi de 0,9% e para CP de 0,6%, considerados proporcionalmente nas misturas conforme teores de substituição.

Figura 9 - Saturação de aditivo



Fonte: Autora, 2023.

### 3.2.1.1 Resistência à Compressão

Para a análise da resistência à compressão foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos com dimensões de 5x10 cm conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019). As

amostras foram cobertas com filme de PVC para cura inicial (24 horas), depois desmoldadas e colocadas em cura submersa saturada até a idade de 28 dias. A superfície superior das amostras foi retificada e a resistência à compressão ensaiada em prensa elétrica, com capacidade de 100 tf, e velocidade de carregamento de  $0,25 \pm 0,05$  MPa/s. A resistência à compressão foi determinada tomando-se a média de 4 amostras, avaliada por análise estatística pelo teste Scott-Knott.

### 3.2.1.2 Estimativa de Emissões

Realizou-se a análise das emissões de dióxido de carbono considerando os dados da literatura para a emissão associada aos tratamentos das partículas e materiais utilizados conforme Tabela 4. Baseou-se nas considerações de Oliveira (2022) que com base nos dados de Czingler et al., (2020)<sup>3</sup> considerou as emissões da moagem do clínquer de 0,049 kg.CO<sub>2</sub>/kg (para o tempo de 2 horas). Para a termoativação, foram considerados os dados de Díaz et al., (2017)<sup>4</sup>, adotando-se uma média de emissões considerando três tipos de fornos (industrial, reformado e calcinador flash).

Tabela 4 - Dados considerados na estimativa de emissões de CO<sub>2</sub>

Dados da literatura para estimativa de emissões			Fonte	Kg de CO <sub>2</sub> /Kg	
Cálculo de Emissões das Argamassas	Cálculo de Emissões dos Ligantes	Cálculo de Emissões dos Pós de RCD	Tratamento primário (T1)	PAZ, 2023	0.006
			Moagem 0.5 horas - G0.5h		0.012
		Tratamentos secundário (T2)	Moagem 1.0 horas - G1.0h	OLIVEIRA, 2022	0.025
			Calcinação 0.5 horas - C0.5h		0.140
			CPV-ARI	SIDAC, 2023	0.776
			Aditivo superplastificante	EFCA - EPD, 2021	1.530
	Agregado miúdo natural	SIDAC, 2023	0.013		

Fonte: Autora, 2023.

Considerou-se para os pós de referência MP e CP as emissões relacionadas ao tratamento primário (T1), sendo este a obtenção do pó. Posteriormente os pós do tratamento primário foram submetidos aos tratamentos secundários (T2) (mecanoativação, termoativação e pré-hidratação com ácido tânico), somando-se, portanto, as emissões oriundas do processamento primário e as decorrentes do segundo tratamento (equação 2).

<sup>3</sup> CZIGLER, Thomas; REITER, Sebastian; SCHULZE, Patrick; *et al.* Laying the foundation for zero-carbon cement. **McKisys & Company**, p. 9, 2020.

<sup>4</sup> CANCIO DÍAZ, Yudiesky; SÁNCHEZ BERRIEL, Sofia; HEIERLI, Urs; *et al.* Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies. **Development Engineering**, v. 2, p. 82–91, 2017.

$$E_{T2} = E_{T1} + E_{Tratamento} \text{ (equação 2)}$$

Onde:

$E_{T2}$  = Emissões do tratamento secundário em kgCO<sub>2</sub>/Kg de pó (moagem e calcinação);

$E_{T1}$  = Emissões do tratamento primário kgCO<sub>2</sub>/Kg (conforme Tabela 4);

$E_{Tratamento}$  = Emissões do tratamento do pó de RCD em kgCO<sub>2</sub>/Kg (conforme Tabela 4).

Devido a ausência de dados na literatura quanto as emissões do tratamento de partículas com ácido tânico, realizou-se uma estimativa com base nos equipamentos em escala laboratorial, considerando-se o fator de emissões da energia elétrica de 0,0426 Kg de CO<sub>2</sub>/Kwh (MCTI, 2023), conforme a equação 3. Como o procedimento de tratamento consiste em inserir o pó em solução de ácido tânico, remover a solução com filtragem a vácuo e realizar a secagem em estufa, foram consideradas as potencias da bomba de vácuo e estufa utilizadas, bem como o tempo de cada processo Tabela 5.

$$E_{Tratamento} = \sum \left( \frac{P*t}{M*R} * F \right) \text{ (equação 3)}$$

Onde:

$P$  = Potência em Kw;

$t$  = Tempo em horas;

$M$  = Massa processada em Kg;

$R$  = rendimento em %;

$F$  = Fator de emissão em Kg de CO<sub>2</sub>/Kwh.

Os dados considerados para o cálculo de emissões do tratamento com ácido tânico representam informações considerando os equipamentos utilizados (Tabela 5), bem como o processamento realizado neste estudo, e especificamente uma condição de escala laboratorial, sendo também adotados dados de entrada da literatura, que podem possuir variações a depender do autor.

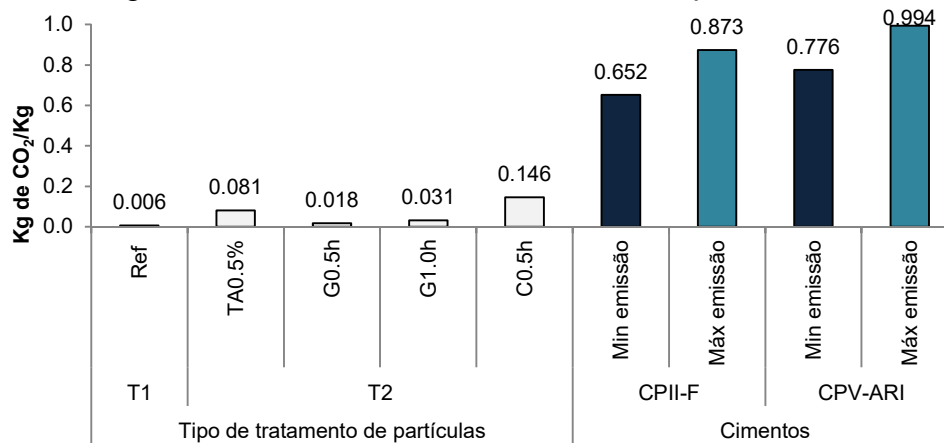
Tabela 5 - Estimativa de emissões de CO<sub>2</sub> dos tratamentos com ácido tânico

DESCRIÇÃO	T1 - Pó de RCD	T2 - Pré-hidratação com Ácido tânico	
Equipamento		Retirada de líquido - Bomba de Vácuo - New pump	Secagem - Estufa De Leo Equipamentos Laboratoriais
Potência do equipamento (KW)	Tratamento primário (T1)	0.2	1.7
Tempo (horas)		0.5	20
Massa da batelada (Kg)		1.5	20
Rendimento da batelada (Kg)		100%	100%
Emissões (Kg de CO <sub>2</sub> /Kg)	0.006	0.003	0.072
Emissões totais (Kg de CO <sub>2</sub> /Kg)		0.081	

Fonte: Autora, 2023.

Os valores de emissões associadas aos tratamentos das partículas de pó misto e de concreto foram plotados na Figura 10, de modo a facilitar a comparação entre os tratamentos com o cimento Portland, sendo inseridos para comparação o CPII-F e o CPV-ARI considerando os valores máximos e mínimos de emissões indicadas no Sistema de Informação de Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC 2023).

Figura 10 - Emissões dos tratamentos de partículas



Fonte: Autora, 2023. Dados referente ao CPII-F e CPV-ARI obtidos de SIDAC, 2023.

Fez-se necessário estimar as emissões relacionadas a cada proporção de mistura com os diferentes teores de CPV-ARI e pós tratados, aplicando-se a equação 4. Os dados de emissão calculados para os tratamentos das partículas de pó (Figura 10), cimentos, e aditivo superplastificante foram considerados com base na literatura e base de dados SIDAC conforme Tabela 4.

$$E = E_{\text{cim}} * \% \text{cim} + E_{\text{póRCD}} * \% \text{póRCD} + E_{\text{aditivo}} * \% \text{aditivo} \text{ (equação 4)}$$

Onde:

E= Emissões totais do cimento composto com pó de RCD em kgCO<sub>2</sub>/Kg;

$E_{cim}$  = Emissões do CPV-ARI em kgCO<sub>2</sub>/Kg de cimento;

$\%cim$  = Teor de CPV-ARI;

$E_{póRCD}$  = Emissões do pó de RCD ( $E_{T1}$  ou  $E_{T2}$ ) em kgCO<sub>2</sub>/Kg de cimento;

$\%póRCD$  = Teor de pó de RCD na composição;

$E_{aditivo}$  = Emissões do aditivo em kgCO<sub>2</sub>/kg (Tabela 4);

$\%aditivo$  = Teor de aditivo.

Considerando os dados de consumo do ligante (cimento + pó de RCD) o consumo de agregado para produção de 1 m<sup>3</sup> de argamassa, e as emissões em kg de CO<sub>2</sub>/kg de material é possível estimar a emissão para cada m<sup>3</sup> de argamassa (equação 5). Para o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub>, relacionadas às argamassas com as substituições parciais de cimento por pó de RCD, foram considerados os dados do Tabela 4.

$$E_{argamassa} = E * C_{Ligante} + E_{agregado} * C_{agregado} \text{ (equação 5)}$$

Onde:

$E_{argamassa}$  = Emissão de CO<sub>2</sub> por metro cúbico de material;

$C_{Ligante}$  = Consumo de ligante em kg/m<sup>3</sup>;

$E_{agregado}$  = Emissões do agregado miúdo em kgCO<sub>2</sub>/Kg agregado (da literatura Tabela 4);

$C_{agregado}$  = Consumo de agregado em kg/m<sup>3</sup>.

Utilizou-se os indicadores Índice de Ligantes (IL) e Índice de CO<sub>2</sub> (IC), de Damini et al. (2010), conforme equações 6 e 7, respectivamente.

$$IL = \frac{C_{Ligante}}{fck} \text{ (equação 6)}$$

$$IC = \frac{E_{argamassa}}{fck} \text{ (equação 7)}$$

Onde:

IL = Índice de Ligantes, em kg/m<sup>3</sup>/MPa;

fck = Resistência à compressão axial aos 28 dias;

IC = Índice de CO<sub>2</sub>, em kg/m<sup>3</sup>/MPa.

### 3.2.2 Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no estudo complementar, sendo dividido na análise do desempenho mecânico e análise do desempenho ambiental.

#### 3.2.2.1 Desempenho Mecânico

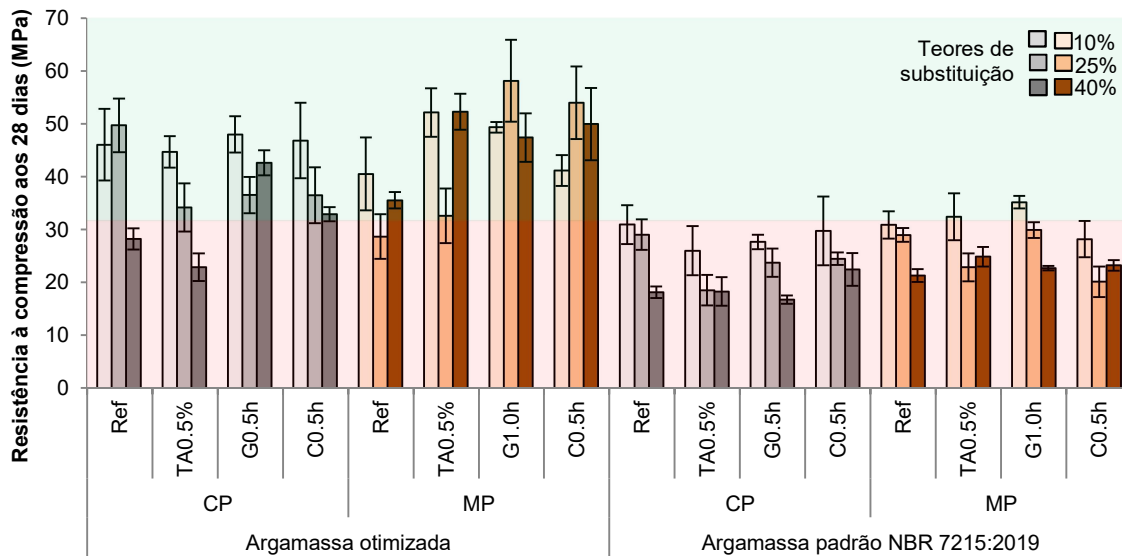
Para melhor compreensão das discussões apresentadas, esclarece-se que as misturas tratadas por “argamassas padrão” foram dosadas conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019), enquanto as “argamassas otimizadas” consistem em misturas com redução na relação água/finos e uso de aditivo superplastificante.

De forma geral os resultados (Figura 11) indicam que teores de até 10% nas argamassas padrão promovem desempenho similar ao CII-F-32, e conforme há aumento na substituição ocorre prejuízo ao desempenho mecânico. Nas misturas otimizadas com o uso de aditivo superplastificante, o aumento no teor de substituição reduz o desempenho mecânico no pó de concreto, e no pó misto isto não ocorre, apresentando resistências à compressão aos 28 dias 67%, 59% e 51% superiores ao CII-F-32 para  $MP_{TA0,5\%} > MP_{C0,5h} > MP_{G1,0h}$ , respectivamente.

Para as composições otimizadas contendo o pó de concreto em teores de 40% de substituição verifica-se que a mecanoativação e termoativação promoveram desempenhos superiores ao CP (50,75% e 16,50% respectivamente). Para 25% de substituição o desempenho das misturas com partículas tratadas foi inferior à referência com pó não tratado, porém ainda superior ao CII-F-32. Com 10% de substituição os tratamentos não foram estatisticamente significativos, apresentando o mesmo desempenho do pó de concreto sem tratamento.

Para o pó misto em composições otimizadas, o teor de 10% de substituição do  $MP_{TA0,5\%}$  e do  $MP_{G1,0h}$  foram estatisticamente iguais, e superiores ao MP e ao  $MP_{C0,5h}$ . Já no teor de 25% todos os tratamentos possibilitaram melhora no desempenho em 13%, 102% e 87% para  $MP_{TA0,5\%}$ ,  $MP_{G1,0h}$  e  $MP_{C0,5h}$ , respectivamente, o melhor desempenho dos pós tratados também foi verificado em teores de 40% sendo superiores ao CII-F-32, o que indica um bom potencial de substituição.

Figura 11 - Resistência à compressão argamassas



Fonte: Autora, 2023

Oliveira (2022), utilizando a mistura padrão da NBR 7215 (ABNT, 2019) para composições com teores de substituição determinados através de técnicas de empacotamento de partículas, obteve um desempenho inferior ao CII-F-32 com as substituições de pós cerâmicos e mistos, porém quando otimizou as misturas através da redução da relação a/f e uso de aditivo superplastificante (objetivando maior empacotamento), o desempenho das misturas foi significativamente melhorado (OLIVEIRA, 2022). Neste experimento as misturas otimizadas também obtiveram ganhos significativos no desempenho mecânico, superando a referência (CII-F-32), especialmente para o pó misto é possível ver que os tratamentos de partículas melhoram a resistência à compressão, e no pó de concreto os tratamentos não promovem melhoras tão significativas, semelhante ao comportamento obtido nas pastas do Artigo A (apresentado anteriormente).

Para argamassas com traço 1:3 com relação a/f de 0,50 Ma et al., (2022) e Zhang et al., (2023), observaram a perda de resistência à compressão nas substituições parciais do cimento Portland, sendo que para taxas de até 10% a perda de desempenho não foi significativa (MA et al., 2022; ZHANG et al., 2023a), o que também foi constatado neste estudo (Figura 11) exceto para a composição de argamassa com teor de 10% de MP<sub>TA0.5%</sub> com desempenho estatisticamente inferior ao CII-F-32. De um modo geral observa-se que o aumento no teor de substituição leva a redução de desempenho mecânico como identificado pelos autores Wu et al., (2022), Ma et al., (2022) e Zhang et al., (2023). Para o teor de 25% foi verificado desempenho estatisticamente similar ao CII-F-32 para as substituições com

MP, CP e CP<sub>G0,5h</sub>, já no teor de 40% de substituição as resistências à compressão foram significativamente prejudicadas (Apêndice A, Tabela 2).

Zhang et al., (2022) analisando argamassas cimentícias na composição 1:3 com relação a/f de 0,5 e substituição de cimento Portland de 30% por pós reciclados de concreto com diferentes tempos de moagem, verificaram que um aumento no tempo de moagem leva ao aumento na resistência mecânica, sendo o tempo ideal de 60 minutos, com obtenção de mais de 50% de partículas com diâmetro inferior 10 µm o que beneficia a microestrutura através do efeito de preenchimento resultando em melhor desempenho mecânico, porém aos 28 dias a amostra de referência obteve aproximadamente 45 MPa enquanto que a amostra contendo o MCS moído por 60 minutos aproximou-se dos 32 MPa, no mesmo estudo utilizando o pó reciclado de concreto termoativado à 800 °C obtiveram 37 MPa de resistência à compressão, indicando maior eficiência do tratamento de termoativação, quando comparado a mecanoativação (ZHANG et al., 2022), tal resultado é condizente com este estudo para o teor de 10% quando analisadas as argamassas padrão compostas de pó de concreto mecanoativado e termoativado.

Wang et al., (2022) com argamassas no traço 1:2,61 e relação a/f de 0,5, utilizando em substituição ao cimento Portland pó de concreto tratado com ácido tânico, e uma resistência à compressão de controle de 39 MPa, observaram que com 5% de substituição com pó de concreto sem tratar o desempenho mecânico foi semelhante ao controle e conforme aumenta-se o teor de substituição ocorre piora no desempenho, já no tratamento com 0,5% de ácido tânico obtiveram aproximadamente 42 MPa com teor de 10% de substituição, indicando no estudo um teor de substituição ideal entre 10 e 15% (WANG et al., 2022), apesar da contribuição dos autores verifica-se que estes teores de substituição são significativamente baixos, visto que a norma brasileira NBR 16697 permite composições com até 25% de material inerte (ABNT, 2018), especialmente para obtenção de um menor fator clínquer, deste modo é constatada a contribuição deste estudo onde foi possível substituições de até 40% e 25% respectivamente de cimento Portland por pó misto e pó de concreto quando otimizadas as argamassas.

Wu et al., (2021) também em estudo com argamassas cimentícias no traço 1:3 e relação a/f de 0,5 trabalhando com uma referência de 37 MPa e com substituições fixas de 30% em massa de cimento Portland por pós reciclado de pastas, concretos e argamassas tratados por termoativação, verificaram redução no desempenho mecânico para todas as matrizes com substituição, sendo que nas argamassas com pós não tratados o desempenho foi significativamente inferior, o que se deve a decomposição

do carbonato de cálcio e de produtos hidratados na faixa entre 600 e 800 °C temperatura que torna os produtos reativos para participarem da hidratação da matriz, contribuindo no ganho de resistência. Os melhores resultados dos autores foram 32 MPa para argamassa contendo pó de concreto tratado à 800 °C, e 33 MPa para o pó de pastas tratado à 600 °C, as composições com pó de argamassa tiveram desempenhos inferiores (WU et al., 2021), nesta pesquisa para os traços normais foi constatado desempenho semelhante ao do autor, porém no teor de 10% de substituição.

De um modo geral verifica-se na literatura que para as composições normalizadas no traço 1:3 e relação a/f fixa o desempenho mecânico das argamassas cimentícias acaba sendo inferior a referência quando utilizadas substituições ao cimento Portland, o que também foi observado neste estudo, em contrapartida quando reduzido o teor de água na mistura e adicionado aditivo com capacidade de dispersão, os resultados de resistência mecânica demonstram uma outra realidade.

O desempenho mecânico foi mais significativo nas argamassas otimizadas devido a menor porosidade da matriz cimentícia. Como os pós de RCD podem ser considerados inertes (verificado no Artigo A), a substituição do cimento deve levar a formação de menor quantidade de produtos de hidratação, mesmo que os pós de RCD possam aumentar o grau de hidratação com o efeito de fíler, tal efeito é representativo em dosagens relativamente mais baixas destes pós, enquanto que teores acima de 20% começam a ser prejudiciais (ZHANG et al., 2023a), em razão da diluição do clínquer reativo pelo pó inerte e pouco reativo (ZHANG et al., 2023b) como verificado nas argamassas padrão. Nas misturas otimizadas a redução do teor de água permitiu menor quantidade de água disponível para gerar porosidade na matriz, pois como as substituições são inertes, o excesso de água não promoverá hidratação, desta forma com o aditivo dispersante evitando a formação de aglomerados e auxiliando na fluidez, há de se melhorar o efeito de nucleação das partículas potencializando o efeito fíler.

Na composição das argamassas de uma maneira geral o pó misto apresentou desempenho superior ao pó de concreto, o que pode ser atribuído a baixa reatividade observada no Artigo A, onde mesmo sem tratamento as partículas de MP apresentaram índice de desempenho com cimento de 93% aumentando com os tratamentos, indicando a melhoria do efeito fíler, visto que em condições de desempenho químico o material não é pozolânico. A composição com 25% de substituição de  $MP_{G1.0h}$  e  $MP_{C0.5h}$  com 58 e 54 MPa (respectivamente), e  $MP_{TA0.5\%}$  com 40% de substituição e 52 MPa. Para o CP o destaque no desempenho mecânico é atribuído as composições com

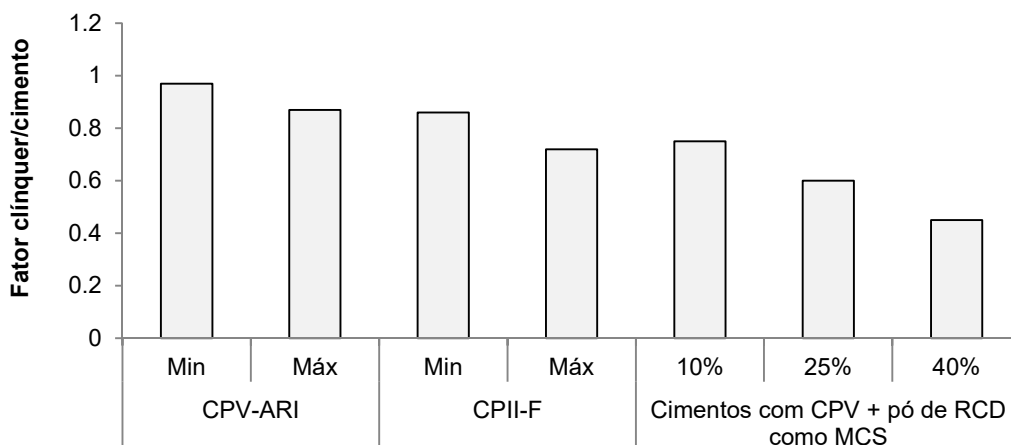
10% de substituição de  $CP_{G0,5h}$  e  $CP_{C0,5h}$  com 48,02 e 46,87 MPa respectivamente, e o teor de 25% de CP sem tratamento com 49,75 MPa.

### 3.2.2.2 Desempenho Ambiental

Quando analisa-se o potencial de redução na relação clínquer/cimento para os teores de substituição adotados neste estudo (10%, 25% e 40%), verifica-se (Figura 12) que o teor de 10% (considerando mais 5% de sulfato de cálcio e 10% de fíler na composição do CPV-ARI) assemelha-se ao CII-F com mínima emissão, o teor de 25% gera um fator de 0,6 próximo da meta de valor para 2030 e o teor de 40% permite um fator clínquer/cimento de 0,45 que é inferior a meta de redução brasileira para 2030 e 2050 com 0,59 e 0,52 respectivamente (SNIC E ABCP, 2019).

Na realidade do Roadmap to carbono Neutrality (PCA, 2021) focado no EUA, as metas de redução do fator clínquer/cimento são de 0,85 até 2030, 0,80 até 2040 e 0,75 até 2050, em estimativas globais o fator médio a ser alcançado até 2030 é de 0,64 (WBCSD; IEA, 2018), deste modo observa-se que o Brasil devido ao pioneirismo no uso de adições ao cimento Portland possui um fator clínquer consideravelmente baixo, porém estudos que promovam a redução deste fator podem ser de grande contribuição em âmbito internacional, especialmente em países com cimentos de composições mais puras em clínquer.

Figura 12 - Fator clínquer/cimento



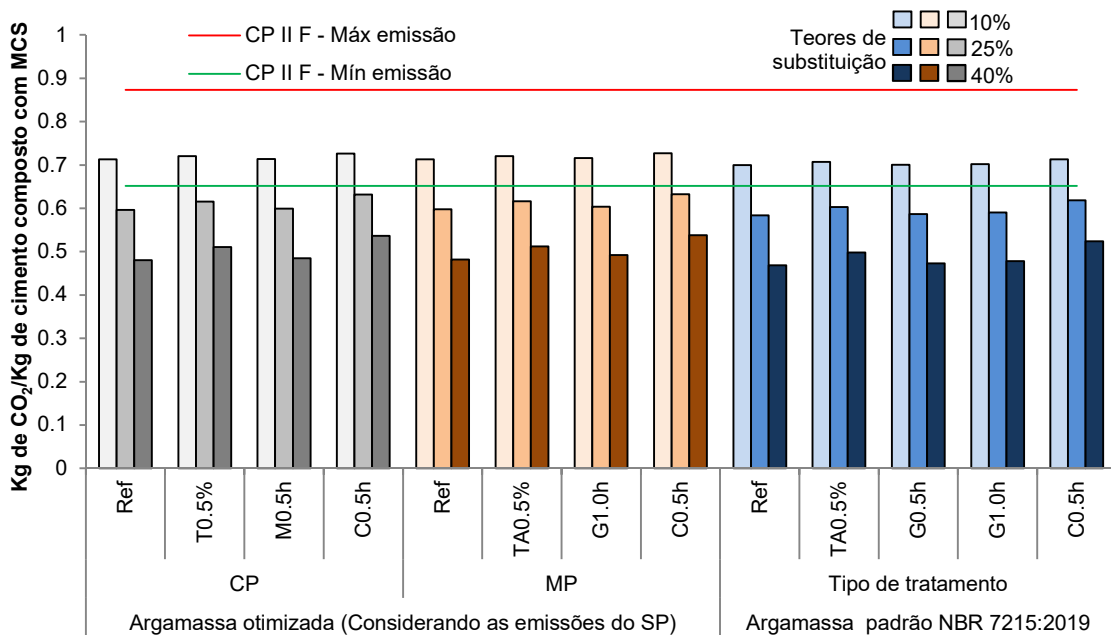
Fonte: Autora, 2023. Dados dos cimentos obtidos do SIDAC, 2023.

Como verificado no desempenho mecânico teores de 40% de substituição são prejudiciais à resistência à compressão para misturas não otimizadas, porém

utilizando-se um dispersante e reduzindo água na mistura é possível obter desempenho satisfatório, ainda que o aditivo tenha emissões associadas ao seu processo produtivo. Considerando os baixos teores de aditivo utilizados modificam de forma mínima as emissões nas composições, nota-se na Figura 13 as emissões relacionadas a composição dos ligantes das misturas normais e otimizadas, nas misturas otimizadas para representação foram consideradas as emissões do aditivo.

Considerando o tratamento de calcinação do pó (termoativação), onde são geradas as composições com maiores emissões, é possível notar uma possibilidade de redução de aproximadamente 25% nas emissões passando de 0,711 kg de CO<sub>2</sub>/kg CII-F32 (considerando a mínima emissão deste cimento), para 0,538 kg de CO<sub>2</sub>/kg de da composição contendo 40% de pó de RCD em substituição ao CPV-ARI. Quando compara-se ao valor máximo de emissão do CII-F, essa diferença seria de 38,7% menos emissões de CO<sub>2</sub> por Kg de material. Observa-se que entre os tratamentos as variações na emissão de CO<sub>2</sub> é mínima, onde a maior influência é o teor de substituição

Figura 13 - Emissões dos cimentos compostos com pó de RCD



Fonte: Autora, 2023. Dados de máxima e mínima emissão obtidos do SIDAC, 2023.

\*Na Figura são representados os teores de substituição de CPV-ARI.

O Apêndice B apresenta as emissões por m<sup>3</sup> de cada composição de argamassa, onde observa-se que quando são utilizados os pós de RCD em maior teor

menos emissivas são as argamassa por  $m^3$ , pois o processamento do material gera menores emissões do que as associadas ao cimento Portland, cabendo destaque para a composição com 40% de CP com  $257,26 \text{ kg de CO}_2/m^3$ , sendo 23,32% inferior ao CII-F ( $335,53 \text{ kg de CO}_2/m^3$ ) considerando o máximo teor de filler, Zang et al., (2023a) chegaram a reduções de emissões por  $m^3$  de argamassa entre 9 a 27% em teores de substituição de cimento por pó de RCD entre 10 e 30%, com um teor de 25% de pó de concreto He et al., (2020), obtiveram uma redução de 17,46% nas emissões de argamassas (HE et al., 2020).

As emissões por unidade de volume das argamassas, podem não representar efetivamente a capacidade de desempenho do material, nesse sentido os indicadores de ecoeficiência propostos por Damineli (2010), índice de ligante e em especial o índice de carbono, possibilitam o complemento da análise do potencial de substituição considerando não somente as emissões mas associando-as ao desempenho mecânico, podendo ser observados na Figura 14.

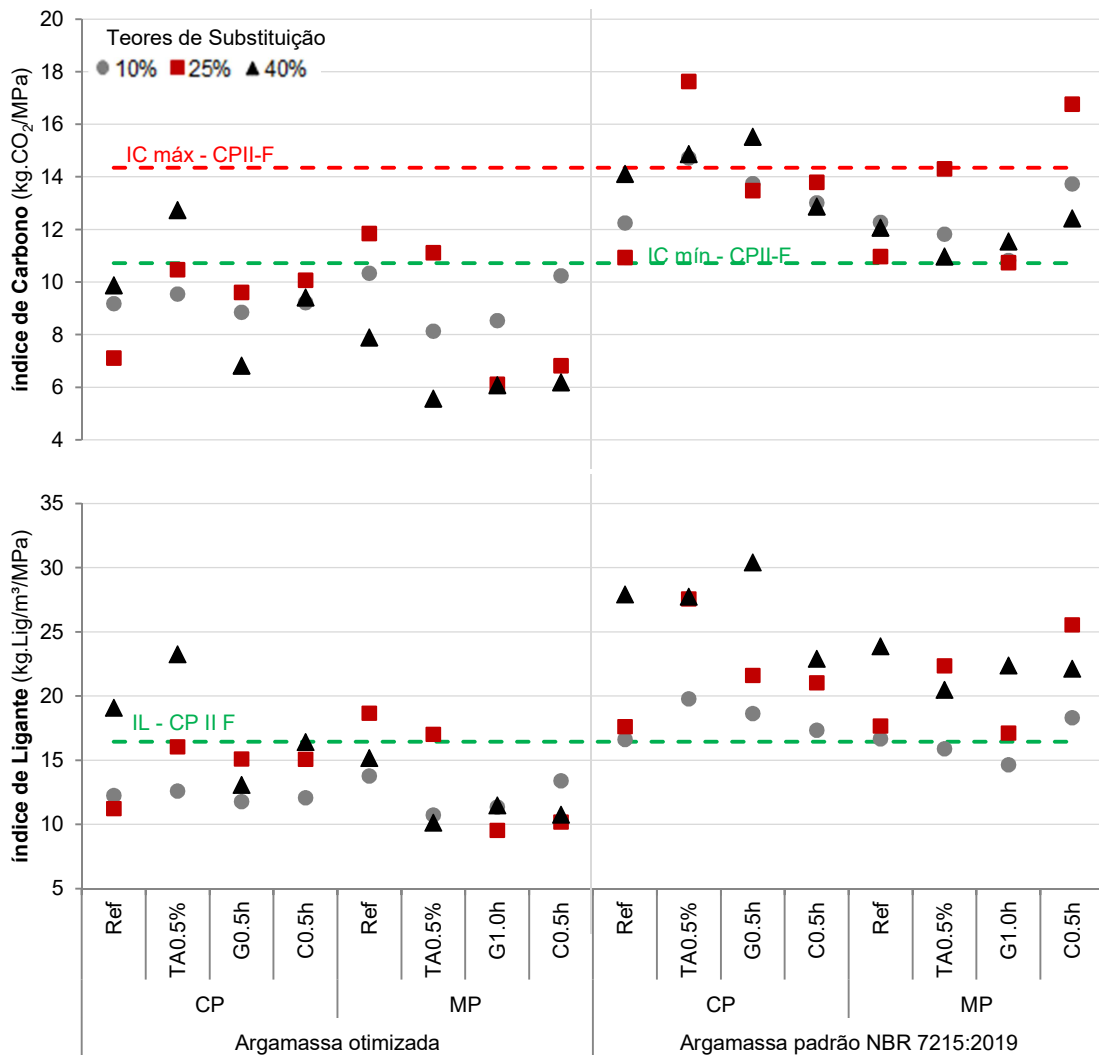
Verifica-se entre as faixas do índice de carbono mínimo e máximo para o CII-F-32 que todas as argamassas otimizadas se encontram abaixo da linha máxima, enquanto que para as argamassas não otimizadas muitas possuem índices superiores ou mais elevados, isto deve-se ao baixo desempenho mecânico obtido, o que ressalta a necessidade de utilizar aditivos dispersantes, e otimizar as misturas quando se está aplicando pó de RCD.

Foram obtidos índices de 7,11 e 11,84  $\text{kg de CO}_2/\text{MPa}$  para composições com 25% de CP e MP respectivamente. Para teores de 40% a substituição obteve-se um índice de carbono de 9,41  $\text{kg de CO}_2/\text{MPa}$  e 6,82  $\text{kg de CO}_2/\text{MPa}$  para  $CP_{C0,5h}$  e  $CP_{G0,5h}$ , respectivamente. No MP os menores índices de carbono foram para as argamassas com 40% de substituição com  $MP_{TA0,5\%}$ ,  $MP_{G0,5h}$  e  $MP_{C0,5h}$  com 5,57; 6,08 e 6,18  $\text{kg de CO}_2/\text{MPa}$ . Nas misturas otimizadas os índices são significativamente inferiores, sendo que para todas as misturas com 10% de substituição o índice de carbono é inferior ao mínimo do CII-F-32 de 10,71  $\text{kg de CO}_2/\text{MPa}$ .

De um modo geral considerando o maior potencial de substituição, o desempenho mecânico e o índice de carbono, para o pó misto mostra-se adequado o teor de 25% de  $MP_{G0,5h}$  (IC=6,11,  $f_c= 58 \text{ MPa}$ ) e com 40%  $MP_{TA0,5\%}$  (IC=5,57,  $f_c= 52 \text{ MPa}$ ), e para o pó de concreto o teor de 40% de  $CP_{G0,5h}$  (IC=6,82,  $f_c= 43 \text{ MPa}$ ) sendo ligantes de classe de resistência C40, com desempenho superior ao CII-F-32 e índices de carbono inferiores. Oliveira et al., (2023) verificaram aos 91 dias com 15% de substituição de cimento por pó de concreto cominuído por 2 horas, índice em pastas de 9,22

kg.Cim/m<sup>3</sup>/MPa e 6,73 kg.CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa. Os indicadores ambientais são muito sensíveis aos dados de entrada das emissões dos compostos, bem como as idades das matrizes, o que representa uma necessidade de análise mais cuidadosa na comparação dos índices, além da literatura contemplar amplamente misturas de concretos, com poucos dados em pastas e argamassas.

Figura 14 - Indicadores ambientais



Fonte: Autora, 2023.

Oliveira (2022) em estudo em pastas com pó de concreto, pó misto e cerâmico, verificou a possibilidade de redução de até 52% do índice de carbono e 57% do índice de ligante, aos 91 dias para o resíduo de concreto a autora atingiu 25 kg.CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa, para o misto 27 kg.CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa e para o cerâmico 34 kg.CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa, apresentando desempenho ambiental superior ao CII-F, em concretos a autora atingiu

índices de carbono de até  $3,15 \text{ kg.CO}_2/\text{m}^3/\text{MPa}$  aos 28 dias em composição com 30% de substituição de cimento por pó de concreto.

Nesta pesquisa o índice de ligante (IL) considerou o cimento Portland e as substituições na composição do ligante, as análises não são em função do consumo de cimento Portland, e sim do consumo da “composição com o MCS” para alcance de 1 MPa, como o objetivo do estudo foi aplicar substitutos ao cimento Portland na composição os consumos de ligante por  $\text{m}^3$  acabam variando um pouco em função das massas específicas dos pós serem inferiores ao cimento Portland e também dos teores de substituição.

Para as argamassas padrão devido ao desempenho mecânico ser reduzido com o aumento do teor de substituição o IL variou entre 14 e 30  $\text{kg.Lig}/\text{m}^3/\text{MPa}$ , já nas composições otimizadas ficou entre 9 e 23  $\text{kg.Lig}/\text{m}^3/\text{MPa}$ . Cabendo destaque aos menores índices para a composição com 25% de pó de concreto com 11  $\text{kg.Lig}/\text{m}^3/\text{MPa}$ , e a composição com 40% de pó de concreto moído por 0,5 horas com IL de 13  $\text{kg.Lig}/\text{m}^3/\text{MPa}$ , no pó misto encontrou-se o IL de 9,53  $\text{kg.Lig}/\text{m}^3/\text{MPa}$  para o teor de 25% de pó moído por 1,0 hora, e 10  $\text{kg.Lig}/\text{m}^3/\text{MPa}$  para o teor de 40% de pó tratado com 0,5% de ácido tânico.

Estimando-se os índices de ligante da literatura do estudo de Zhang et al., (2022) verificou-se valores de 14,06 e 12,16  $\text{kg.Lig}/\text{m}^3/\text{MPa}$  para argamassas com 30% de pó de concreto moído e termoativado à 800 °C. Para as argamassas de Wang et al., (2022) com 10% de substituição de cimento Portland por pó de concreto tratado com ácido tânico à 0,5% o IL é de 13,02  $\text{kg.Lig}/\text{m}^3/\text{MPa}$  os índices ficam próximos aos de Wu et al., (2021) com pós termoativados. Verifica-se que os valores encontrados estão de acordo com a literatura, sendo bem dependentes da resistência à compressão obtida, e a redução neste índice quando otimizadas as misturas é significativa quando compara-se a referência utilizada sendo uma argamassa de CII-F-32 com IL de 16,43  $\text{kg.Lig}/\text{m}^3/\text{MPa}$ , o que somado aos dados obtidos de índices de carbono confirmam a viabilidade e a ecoeficiência da aplicação dos pós tratados em substituição ao cimento Portland.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 4.1 CONCLUSÕES

Considerando o objetivo de analisar os efeitos dos tratamentos nas partículas de pó de resíduos de construção e demolição (RCD) e o potencial de aplicação como material cimentício suplementar, conclui-se que os tratamentos físico-químicos promoveram alterações nas partículas de pó misto e de pó de concreto, devendo-se analisar cada condição em específico, sendo possível aplicá-los como material cimentício suplementar, sendo comprovada a ecoeficiência de tal aplicação.

Quanto aos tratamentos das partículas verificou-se nos ensaios referente à atividade pozolânica um ganho significativo no desempenho mecânico dos pós termoativados o que pode ser atribuído ao processo de desidroxilação, tornando-os mais reativos, e contribuindo na hidratação da matriz. A mecanoativação promoveu a redução no tamanho das partículas o que tem potencial de contribuir no efeito fíler, e a pré-hidratação com ácido tânico demonstrou interação química apenas no pó de concreto consumindo o hidróxido de cálcio da composição, porém promoveu alterações físicas e morfológicas também no pó misto. Em geral os tratamentos não promoveram a reatividade dos pós, porém melhoraram o desempenho com cimento aos 28 dias, o que indica o potencial de auxiliar na melhora nas características das partículas para preenchimento da microestrutura. Nas pastas com teores de 25% o pó misto tiveram desempenho mecânico superior em até 69% quando submetido ao tratamento de mecanoativação. Enquanto que no pó de concreto apenas a termoativação e a pré-hidratação com ácido tânico à 0,5% apresentaram ganhos de desempenho de 14% e 25%, respectivamente com relação a pasta contendo PC sem tratamento.

Quando utilizados os MCS em argamassas verificou-se que os tratamentos de partículas foram mais significativos para o pó misto, quando comparado ao pó de concreto. Obteve-se um índice de carbono (IC) de 5,57 kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa e índice de ligante (IL) de 10 kg.Lig/m<sup>3</sup>/MPa para uma argamassa composta com 40% de substituição de cimento por pó misto pré-hidratado com ácido tânico à 0,5%, representando um compósito com 52 MPa. Em um teor de 25% de substituição com o pó misto termoativado à 800 °C por 0,5 horas o índice de carbono foi de 6,82 kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa e resistência à compressão aos 28 dias de 54 MPa, no mesmo teor para o pó misto mecanoativado por 0,5 horas o IC foi de 6,11 kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa, demonstrando o potencial dos tratamentos em contribuir melhorando as partículas e conseqüentemente o desempenho nas argamassas, gerando bons indicadores.

Já nas argamassas contendo pó de concreto o melhor desempenho

considerando os indicadores mecânicos e ambientais pode ser atribuído a composição com 40% o pó de concreto mecanoativado por 0,5 hora, gerando índice de carbono de 6,82 kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa e de índice de ligante de 13 kg.Lig/m<sup>3</sup>/MPa com 43 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. Em um teor de substituição de 25% de pó de concreto sem qualquer tratamento obteve-se um IC de 7,11 kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa e IL de 11 kg.Lig/m<sup>3</sup>/MPa com resistência de 50 MPa.

Os indicadores apresentados são inferiores ao CII-F-32 utilizado como referência comparativa na pesquisa, que fica entre 10,71 e 14,35 kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/MPa e 16,43 kg.Lig/m<sup>3</sup>/MPa, além das resistências mecânicas serem superiores a classe C32. O cimento utilizado como parâmetro de referência incorpora fíler calcário em sua composição, como verificado no estudo que os pós mesmo tratados não podem ser considerados pozolânicos, os comparativos devem ser com base principalmente em efeito de fíler.

A pesquisa demonstra a viabilidade de aplicação do pó de RCD como um material cimentício suplementar fornecendo uma alternativa para valoração desse resíduo, contribuindo na preservação de recursos naturais e na redução das emissões de carbono associadas à composição do cimento Portland. Especialmente para o pó de resíduo misto que acaba sendo tratado como uma fração menos nobre dentro das pesquisas, foi comprovada a viabilidade de tratar esta fração de pó, além disto evidenciou-se a necessidade de otimização das misturas combinando-se o uso de aditivo químico para dispersão das partículas quando aplicados teores de substituição superiores a 10% de MCS, indicando a possibilidade de ganho de desempenho mecânico e conseqüentemente dos desempenhos ambientais.

## 4.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Conforme o desenvolvimento deste estudo, dentro das limitações, foram observadas possibilidades de futuros estudos, de modo a suprimir demanda como:

- Avaliar o efeito químico na cinética de hidratação das matrizes com os pós tratados;
- Investigar o uso de ácido tânico como dispersante de moagem;
- Proporcionar composições mistas com resíduos de diferentes origens, de modo a complementar-se quimicamente;
- Verificar o potencial de captura de CO<sub>2</sub> das composições cimentícias deste estudo;
- Analisar termos de durabilidade as composições cimentícias deste estudo;

## APÊNDICE A – DADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 28 DIAS

Tabela 1 – Cimentos de referência

	Fc (MPa)	Fc média (MPa)	D.V	Anova		Fc (MPa)	Fc média (MPa)	D.V	Anova
CPV ARI	45.65	49.73	5.34	b	CP II F-32	31.98	31.32	3.45	f
	51.79					35.85			
	45.15					29.54			
	56.34					27.91			

Fonte: Autora, 2023.

Tabela 2 - Argamassa Padrão NBR 7215:2019

MCS Teor / tipo	10%				25%				40%			
	Fc (MPa)	Fc média (MPa)	D.V	Anova	Fc (MPa)	Fc média (MPa)	D.V	Anova	Fc (MPa)	Fc média (MPa)	D.V	Anova
MP	30.42	31.02	3.65	f	32.66	29.11	2.88	f	19.53	18.23	1.10	h
	32.01				26.12				18.28			
	26.42				27.57				16.83			
	35.21				30.07				18.28			
MP <sub>TA0.5</sub> %	22.72	26.08	4.65	g	15.33	18.62	2.87	h	22.03	18.38	2.69	h
	31.76				19.93				16.03			
	27.97				17.33				16.73			
	21.88				21.88				18.73			
MP <sub>G1.0h</sub>	29.67	27.73	1.37	f	26.57	23.82	2.68	g	17.68	16.86	0.78	h
	27.72				25.12				17.28			
	26.87				20.38				16.53			
	26.67				23.22				15.93			
MP <sub>C0.5h</sub>	28.12	29.83	6.49	f	22.82	24.57	1.19	g	20.08	22.53	3.10	g
	23.97				25.47				27.07			
	28.12				24.92				21.43			
	39.11				25.07				21.53			
CP	32.11	30.95	2.56	f	30.72	29.04	1.30	f	22.53	21.38	1.22	g
	27.92				27.67				20.43			
	33.81				28.47				22.33			
	29.97				29.32				20.23			
CP <sub>TA0.5%</sub>	33.86	32.49	4.40	e	24.22	22.96	2.64	g	23.97	24.96	1.85	g
	26.47				24.62				24.92			
	36.96				19.03				27.57			
	32.66				23.97				23.37			
CP <sub>G0.5h</sub>	33.86	35.22	1.18	e	29.37	29.99	1.49	f	22.62	22.81	0.43	g
	36.71				32.21				23.37			
	34.91				29.07				22.38			
	35.41				29.32				22.87			
CP <sub>C0.5h</sub>	24.27	28.27	3.41	f	17.73	20.22	2.86	h	24.47	23.31	1.00	g
	31.42				20.53				22.87			
	30.77				18.48				23.72			
	26.62				24.12				22.18			

Fonte: Autora, 2023.

Tabela 3 - Argamassa otimizada

MCS Teor / tipo	10%				25%				40%			
	Fc (MPa)	Fc média (MPa)	D.V	Anova	Fc (MPa)	Fc média (MPa)	D.V	Anova	Fc (MPa)	Fc média (MPa)	D.V	Anova
MP	34.61	40.57	6.87	d	28.02	28.76	4.20	f	36.01	35.60	1.55	e
	41.85				23.27				35.76			
	49.74				33.06				33.46			
	36.06				30.67				37.16			
MP <sub>TA0.5%</sub>	56.34	52.17	4.57	b	38.56	32.66	5.17	e	50.64	52.29	3.40	b
	45.85				35.46				56.99			
	51.99				28.37				52.39			
	54.49				28.27				49.15			
MP <sub>G1.0h</sub>	48.95	49.38	0.99	b	61.18	58.16	7.73	a	54.04	47.45	4.57	c
	49.40				48.40				47.00			
	50.74				66.63				44.40			
	48.45				56.44				44.35			
MP <sub>C0.5h</sub>	39.76	41.22	2.93	d	48.40	54.00	6.85	a	48.45	49.99	6.82	b
	42.30				58.78				41.30			
	44.75				47.85				52.99			
	38.06				60.98				57.24			
CP	53.04	46.10	6.75	c	49.50	49.74	5.07	b	25.37	28.31	1.99	f
	50.54				55.24				29.42			
	39.01				51.19				29.67			
	41.80				43.05				28.77			
CP <sub>TA0.5%</sub>	41.90	44.75	2.98	c	32.56	34.25	4.52	e	24.67	22.97	2.59	g
	46.40				30.12				23.72			
	48.10				40.65				19.13			
	42.60				33.66				24.37			
CP <sub>G0.5h</sub>	45.50	48.02	3.43	c	34.71	36.58	3.45	e	39.56	42.68	2.38	d
	52.29				41.50				42.10			
	45.00				36.36				44.65			
	49.30				33.76				44.40			
CP <sub>C0.5h</sub>	39.11	46.87	7.12	c	32.16	36.55	5.27	e	31.32	32.98	1.31	e
	45.50				40.31				33.11			
	46.55				31.86				34.51			
	56.34				41.85				32.96			

Fonte: Autora, 2023.

## APÊNDICE B – DADOS DAS EMISSÕES

Argamassas com 10% de substituição de cimento		Emissões (Kg de CO <sub>2</sub> /Kg)				Consumo (Kg/m <sup>3</sup> )		Emissões da argamassa (Kg de CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	Fc (MPa)	IC (kg.CO <sub>2</sub> /MPa)	IL (kg.C/m <sup>3</sup> /MPa)		
		Pó de RCD tratado	CPV ARI	Agregado natural	Aditivo	Ligante + aditivo	Cimento					Agregado miúdo	
Argamassa otimizada	Ref	0.01	0.78	0.01	1.53	0.71	564.25	1692.74	423.29	46.10	9.18	12.24	
	CP	TA0.5%				0.08	0.72	563.74	1691.22	427.16	44.75	9.55	12.60
		G0.5h				0.02	0.71	565.31	1695.94	424.77	48.02	8.85	11.77
		C0.5h				0.15	0.73	565.04	1695.13	431.80	46.87	9.21	12.05
		Ref				0.01	0.71	558.51	1675.53	419.25	40.57	10.33	13.77
		MP				TA0.5%	0.08	0.72	559.31	1677.94	424.06	52.17	8.13
		G1.0h	0.03	0.72	559.70	1679.11	421.54	49.38	8.54	11.33			
		C0.5h	0.15	0.73	551.83	1655.50	421.96	41.22	10.24	13.39			
Argamassa padrão NBR 7215:2019	Ref	0.01	0.78	0.01	Não aplicado	0.70	515.31	1545.92	379.72	31.02	12.24	16.61	
	CP	TA0.5%				0.08	0.71	515.60	1546.81	383.82	26.08	14.71	19.77
		G0.5h				0.02	0.70	516.24	1548.73	381.03	27.73	13.74	18.62
		C0.5h				0.15	0.71	517.11	1551.34	388.29	29.83	13.02	17.34
		Ref				0.01	0.70	515.68	1547.05	380.00	30.95	12.28	16.66
		MP				TA0.5%	0.08	0.71	515.82	1547.47	383.98	32.49	11.82
		G1.0h	0.03	0.70	515.76	1547.27	381.34	35.22	10.83	14.64			
		C0.5h	0.15	0.71	517.00	1551.00	388.20	28.27	13.73	18.29			

Argamassas com 25% de substituição de cimento		Emissões (Kg de CO <sub>2</sub> /Kg)				Consumo (Kg/m <sup>3</sup> )		Emissões da argamassa (Kg de CO <sub>2</sub> /Kg)	Fc (MPa)	IC (kg.CO <sub>2</sub> /MPa)	IL (kg.C/m <sup>3</sup> /MPa)		
		Pó de RCD tratado	CPV ARI	Agregado natural	Aditivo	Ligante + aditivo	Cimento					Agregado miúdo	
Argamassa otimizada	Ref	0.01	0.78	0.01	1.53	0.60	557.60	1672.80	353.50	49.74	7.11	11.21	
	CP	TA0.5%				0.08	0.62	548.99	1646.98	358.38	34.25	10.46	16.03
		G0.5h				0.02	0.60	551.83	1655.49	351.50	36.58	9.61	15.08
		C0.5h				0.15	0.63	549.92	1649.75	367.88	36.55	10.07	15.05
		Ref				0.01	0.60	536.02	1608.06	340.44	28.76	11.84	18.64
		MP				TA0.5%	0.08	0.62	555.43	1666.30	363.22	32.66	11.12
		G1.0h	0.03	0.60	554.13	1662.39	355.40	58.16	6.11	9.53			
		C0.5h	0.15	0.63	549.29	1647.87	368.09	54.00	6.82	10.17			
Argamassa padrão NBR 7215:2019	Ref	0.01	0.78	0.01	Não aplicado	0.58	511.93	1535.80	318.09	29.11	10.93	17.59	
	CP	TA0.5%				0.08	0.60	512.67	1538.01	328.19	18.62	17.63	27.54
		G0.5h				0.02	0.59	514.25	1542.75	321.07	23.82	13.48	21.59
		C0.5h				0.15	0.62	516.42	1549.26	338.95	24.57	13.79	21.02
		Ref				0.01	0.58	512.87	1538.60	318.67	29.04	10.97	17.66
		MP				TA0.5%	0.08	0.60	513.22	1539.65	328.54	22.96	14.31
		G1.0h	0.03	0.59	513.04	1539.13	321.99	29.99	10.74	17.11			
		C0.5h	0.15	0.62	516.13	1548.40	338.76	20.22	16.76	25.53			

Argamassas com 40% de substituição de cimento		Emissões (Kg de CO <sub>2</sub> /Kg)				Consumo (Kg/m <sup>3</sup> )		Emissões da argamassa (Kg de CO <sub>2</sub> /Kg)	Fc (MPa)	IC (kg.CO <sub>2</sub> /MPa)	IL (kg.C/m <sup>3</sup> /MPa)		
		Pó de RCD tratado	CPV ARI	Agregado natural	Aditivo	Ligante + aditivo	Cimento					Agregado miúdo	
Argamassa otimizada	Ref	0.01	0.78	0.01	1.53	0.48	539.84	1619.52	279.51	28.31	9.87	19.07	
	CP	TA0.5%				0.08	0.51	533.77	1601.31	292.43	22.97	12.73	23.23
		G0.5h				0.02	0.49	557.07	1671.22	291.10	42.68	6.82	13.05
		C0.5h				0.15	0.54	541.09	1623.28	310.45	32.98	9.41	16.41
		Ref				0.01	0.48	540.00	1619.99	280.58	35.60	7.88	15.17
		MP				TA0.5%	0.08	0.51	529.45	1588.34	291.03	52.29	5.57
		G1.0h	0.03	0.49	544.30	1632.90	288.26	47.45	6.08	11.47			
		C0.5h	0.15	0.54	537.20	1611.59	309.20	49.99	6.18	10.75			
Argamassa padrão NBR 7215:2019	Ref	0.01	0.78	0.01	Não aplicado	0.47	508.61	1525.82	257.26	18.23	14.11	27.90	
	CP	TA0.5%				0.08	0.50	509.77	1529.31	273.20	18.38	14.86	27.74
		G0.5h				0.02	0.47	512.28	1536.83	261.58	16.86	15.52	30.39
		C0.5h				0.15	0.52	515.73	1547.18	289.75	22.53	12.86	22.90
		Ref				0.01	0.47	510.08	1530.23	258.01	21.38	12.07	23.86
		MP				TA0.5%	0.08	0.50	510.64	1531.91	273.66	24.96	10.96
		G1.0h	0.03	0.48	510.36	1531.09	263.26	22.81	11.54	22.37			
		C0.5h	0.15	0.52	515.27	1545.81	289.49	23.31	12.42	22.10			

## REFERÊNCIAS

- ABRÃO, P. C. R. A. **O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais.** Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, 2019.
- ABRECON. **Pesquisa setorial ABRECON 2020: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil.** p. 104. Epusp. São Paulo, 2022.
- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020.**, v. 1, p. 52, 2020.
- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021.** p. 54, 2021.
- AGEFLOR. **A indústria de base florestal no Rio Grande do Sul 2017. Associação Gaúcha de Empresas Florestais,** p. 90, 2020.
- AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262–281, jun. 2018.
- ARBENZ, A.; AVÉROUS, L. Chemical modification of tannins to elaborate aromatic biobased macromolecular architectures. **Green Chemistry**, v. 17, n. 5, p. 2626–2646, 2015.
- ARUN, A.; CHEKRAVARTY, D.; MURALI, K. Comparative analysis on natural and recycled coarse aggregate concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, n. 4, p. 8837–8841, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 2019.
- BATTAGIN, Arnaldo Forti; RODRIGUES, Hugo. Recomendações sobre o uso dos distintos tipos de Cimento Portland nas diferentes aplicações. **Revista Concreto e Construções.** Cimentos e concretos: história, tipo, normalização, pesquisas e aplicações. IBRACON. Ano 73, pág 30 – 38, janeiro de 2014.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** Coordenação João Fernando Dias. 6ª ed. LTC. Rio de Janeiro, 2019.
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA n. 307, de 05 de julho de 2002.** Ministério do Meio Ambiente: CONAMA. 2002.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações: MCTIC. **Fatores de emissão de CO<sub>2</sub> pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil - Ano Base 2023.** 2023.

- BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Literature review: Reuse of construction and demolition waste in the construction industry. **Ceramica**, v. 61, n. 358, p. 178–189, 2015.
- CARVALHO, R. R. P. A hora e a vez dos taninos condensados. **Food Ingredients Brasil**, p. 3, 2011.
- CHAUDHARY, B. et al. Experimental investigation of strength of concrete using recycled demolished construction materials as coarse aggregate. **Materials Today: Proceedings**, v. 48, n. 2, p. 1194–1200, 2022.
- CHEN, J. J. et al. Adding granite polishing waste to reduce sand and cement contents and improve performance of mortar. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123653, jan. 2021.
- CHEN, X. et al. Sustainable reuse of ceramic waste powder as a supplementary cementitious material in recycled aggregate concrete: Mechanical properties, durability and microstructure assessment. **Journal of Building Engineering**, v. 52, p. 104418, jul. 2022.
- CNI, C. N. D. I. **Indústria brasileira de cimento: base para a construção do desenvolvimento**. Brasília, 2012.
- COMINATO, V. et al. The effect of granulometry of natural and recycled coarse aggregate on permeable concrete properties. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 1711–1718, 2022.
- COSMO, B. M. N.; GALERIANI, T. M.; NOVAKOSKI, F. P. Cultivo de acácias: acácia australiana e acácia negra. **Revista Agronomia Brasileira**, v. 4, n. 1, p. 1–5, 2020.
- CPLC. **WHAT IS CARBON PRICING?** Disponível em: <<https://www.carbonpricingleadership.org/what>>. Acesso em: 5 nov. 2022.
- DAS, A. K. et al. Review on tannins: Extraction processes, applications and possibilities. **South African Journal of Botany**, v. 135, p. 58–70, dez. 2020.
- DASSEKPO, J.-B. M. et al. Alkali-activation of calcined granitic waste: Reaction mechanisms and environmental implication for waste minimization. **Construction and Building Materials**, v. 327, p. 126976, abr. 2022.
- DE MATOS, P. R. et al. Eco-friendly ultra-high performance cement pastes produced with quarry wastes as alternative fillers. **Journal of Cleaner Production**, v. 269, p. 122308, out. 2020.
- DOUSSOULIN, J. P.; BITTENCOURT, M. How effective is the construction sector in promoting the circular economy in Brazil and France? : A waste input-output analysis. **Structural Change and Economic Dynamics**, v. 60, p. 47–58, mar. 2022.
- DUAN, Z. et al. Study on the essential properties of recycled powders from construction and demolition waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 253, p. 119865, abr. 2020a.

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

ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION. European Federation of Concrete Admixtures Associations. **Concrete admixtures – plasticizers and superplasticizers**. Brussels, 2021

FANG, Y. et al. Low-cost, ubiquitous biomolecule as a strength enhancer for cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 311, p. 125305, 13 dez. 2021.

FANG, Y. et al. A renewable admixture to enhance the performance of cement mortars through a pre-hydration method. **Journal of Cleaner Production**, v. 332, 15 jan. 2022.

GARTNER, E. Industrially interesting approaches to “low-CO<sub>2</sub>” cements. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 9, p. 1489–1498, 2004.

GCCA, G. C. A. C. A.-. **GNR 2.0 – GCCA in Numbers**. Disponível em: <<https://www.sosma.org.br/projeto/atlas-da-mata-atlantica/dados-mais-recentes/>>. Acesso em: 19 nov. 2022.

GENG, J.; SUN, J. Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 814–820, dez. 2013.

GHAFARI, E. et al. Effect of supplementary cementitious materials on autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 43–48, nov. 2016.

GUPTA, S.; CHAUDHARY, S. State of the art review on supplementary cementitious materials in India – II: Characteristics of SCMs, effect on concrete and environmental impact. **Journal of Cleaner Production**, v. 357, n. March, p. 131945, jul. 2022.

HANSEN, J. E. et al. Global warming in the pipeline. **Oxford Open Climate Change** v. 3, n. 1, 2023.

HASSAN, R. Y.; FAROUN, G. A.; MOHAMMED, S. KAREEM. Mechanical properties of concrete made with coarse and fine recycled aggregates. **Materials Today: Proceedings**, n. 6, p. 2021–2022, abr. 2021.

HE, X. et al. Feasibility of incorporating autoclaved aerated concrete waste for cement replacement in sustainable building materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 250, p. 119455, mar. 2020.

HE, Z. et al. A novel development of green UHPC containing waste concrete powder derived from construction and demolition waste. **Powder Technology**, v. 398, p. 117075, jan. 2022.

HOPPE FILHO, J. et al. Red ceramic waste as supplementary cementitious material: Microstructure and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 296, p. 123653, ago. 2021.

IEA, I. E. A. Technology roadmap: Low-carbon transition in the cement industry. **International Energy Agency**, p. 66, 2018.

IMF. **Climate Mitigation**. Disponível em: <<https://www.imf.org/en/Topics/climate-change/climate-mitigation#:~:text=Carbon taxes are one of,2°C or less.>>. Acesso em: 5 nov. 2022.

JESUS, S. et al. Rendering mortars with incorporation of very fine aggregates from construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 229, p. 116844, dez. 2019.

JOHN, V. M. Materiais de construção e o meio ambiente. In: IBRACON, 2017 (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. p. 97–121.

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

JUNGES, A. L.; SANTOS, V. Y.; MASSONI, N. T. Efeito Estufa e o Aquecimento Global: Uma abordagem conceitual a partir da física para educação básica. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 13, n. 5, p. 126–151, 2018.

JURAS, I. A. G. M. **Aquecimento global e mudanças climáticas : uma introdução**. n. 5 ed. Brasília: Plenarium, 2008. v. 5

KALIYAVARADHAN, S. K.; LI, L.; LING, T. Response surface methodology for the optimization of CO<sub>2</sub> uptake using waste concrete powder. **Construction and Building Materials**, v. 340, p. 127758, jul. 2022.

KALIYAVARADHAN, S. K.; LING, T.; MO, K. H. Valorization of waste powders from cement-concrete life cycle: A pathway to circular future. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, p. 122358, set. 2020.

KHAROUF, N. et al. Tannic acid speeds up the setting of mineral trioxide aggregate cements and improves its surface and bulk properties. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 589, p. 318–326, 1 maio 2021.

KIM, Y. Quality properties of self-consolidating concrete mixed with waste concrete powder. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 177–185, mar. 2017.

KONG, Y. K.; RUAN, S.; KURUMISAWA, K. Recycling of calcined carbonated cement pastes as cementitious materials: Proposed CCUS technology for calcium looping. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 5, p. 108247, out. 2022.

KUMAR, S. et al. A review on the properties of natural and recycled coarse aggregates concrete made with different coal ashes. **Cleaner Materials**, v. 5, p. 100109, set. 2022.

LIKES, L. et al. Recycled concrete and brick powders as supplements to Portland cement for more sustainable concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 364, p. 132651, set. 2022.

- LIN, Q. et al. Technical Perspective of Carbon Capture, Utilization, and Storage. **Engineering**, v. 14, p. 27–32, jul. 2022.
- LIU, H. et al. Hardened properties of 3D printed concrete with recycled coarse aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 159, n. 1, p. 106868, set. 2022.
- LIU, M. et al. Effect of silicate modulus and alkali content on the microstructure and macroscopic properties of alkali-activated recycled powder mortar. **Construction and Building Materials**, v. 397, p. 132365, 2023.
- LIU, Q. et al. Utilization potential of aerated concrete block powder and clay brick powder from C&D waste. **Construction and Building Materials**, v. 238, p. 117721, mar. 2020.
- LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, dez. 2011.
- LU, B. et al. Effects of carbonated hardened cement paste powder on hydration and microstructure of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 699–708, out. 2018.
- LU, W.; TAM, V. W. Construction waste management policies and their effectiveness in Hong Kong: A longitudinal review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 214–223, jul. 2013.
- LUO, X. et al. Experimental study on the early-age properties of cement pastes with recycled brick powder. **Construction and Building Materials**, v. 347, p. 128584, set. 2022.
- MA, Z. et al. Mechanical properties and water absorption of cement composites with various fineness and contents of waste brick powder from C&D waste. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103758, nov. 2020.
- MA, Z. et al. Properties and activation modification of eco-friendly cementitious materials incorporating high-volume hydrated cement powder from construction waste. **Construction and Building Materials**, v. 316, p. 125788, jan. 2022.
- MAYBURY, J.; HO, J. C. M.; BINHOWIMAL, S. A. M. Fillers to lessen shear thickening of cement powder paste. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 268–279, jul. 2017.
- MEHDIZADEH, H. et al. Effect of particle size and CO<sub>2</sub> treatment of waste cement powder on properties of cement paste. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 48, n. 5, p. 522–531, 2021.
- MEHDIZADEH, H. et al. Upcycling of waste hydrated cement paste containing high-volume supplementary cementitious materials via CO<sub>2</sub> pre-treatment. **Journal of Building Engineering**, v. 52, p. 104396, jul. 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais*. 2ª Edição. Ed.: IBRACON. 2014.

MOHAMMED, S. Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: A review. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 10–19, jun. 2017.

MORA, A. L. et al. Melhoria Genética para a Produção de Tanino no Brasil. **Worskhop sobre Melhoria Genética de Espécies Florestais e Palmáceas**, p. 141–152, 2001.

MOULYA, H. V.; CHANDRASHEKHAR, A. Experimental Investigation of Effect of Recycled Coarse Aggregate Properties on the Mechanical and Durability Characteristics of Geopolymer Concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 59, p. 1700–1707, 2022.

MSINJILI, N. S. et al. Comparison of calcined illitic clays (brick clays) and low-grade kaolinitic clays as supplementary cementitious materials. **Materials and Structures**, v. 52, n. 5, p. 94, 30 out. 2019.

NASCIMENTO, P. A. Acácia negra: no pódio das mais demandadas. **Campo & Negócios - Florestas**, p. 27–33, 2020.

NEDUNURI, A. S. S. S.; MOHAMMED, A. YAR; MUHAMMAD, S. Carbonation potential of concrete debris fines and its valorisation through mineral carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 310, p. 125162, 6 dez. 2021.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Bookman. Porto Alegre, 2016.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. *Tecnologia do concreto*. Tradução: Ruy Alberto Cremonini. 2.ed. Bookman. Porto Alegre, 2013.

OGAWA, S.; YAZAKI, Y. Tannins from *Acacia mearnsii* De Wild. Bark: Tannin determination and biological activities. **Molecules**, v. 23, n. 4, p. 1–18, 2018.

OH, D. X. et al. A rapid, efficient and facile solution for dental hypersensitivity: The tannin–iron complex. **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 10884, 3 set. 2015.

OLIVEIRA, DAYANA RUTH BOLA. **Aproveitamento da fração fina de resíduo de construção de demolição como alternativa para redução das emissões de CO2 associadas ao cimento Portland**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2022.

OLIVEIRA, D. R. B. et al. Concrete powder waste as a substitution for Portland cement for environment-friendly cement production. **Construction and Building Materials**, v. 397, p. 132382, set. 2023.

OLIVEIRA, I. R. ET AL. **Dispersão e empacotamento de partículas**. Fazenda Arte ed. São Paulo: Fazenda Arte, 2000.

- OLIVEIRA, T. C. F.; DEZEN, B. G. S.; POSSAN, E. Use of concrete fine fraction waste as a replacement of Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, p. 123126, nov. 2020.
- OLULEYE, B. I. et al. Circular economy research on building construction and demolition waste: A review of current trends and future research directions. **Journal of Cleaner Production**, v. 357, p. 131927, jul. 2022.
- ONU. Adoção do acordo paris. **Convenção Quadro sobre Mudança do Clima**, v. 4, p. 1–42, 2015.
- PANSERA, M. et al. Caracteres morfo-anatômicos de folha e caule de Bauhinia microstachya Análise de taninos totais em plantas aromáticas e medicinais cultivadas no Nordeste do Rio Grande do Sul. **revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 13, p. 17–22, 2003.
- PAZ, C. F., et al. Life cycle inventory of recycled aggregates derived from construction and demolition waste. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 1, p. 1-14, 202
- PITARCH, A. M. et al. Pozzolanic activity of tiles, bricks and ceramic sanitary-ware in eco-friendly Portland blended cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123713, jan. 2021.
- PMR. Carbon Tax Guide: A Handbook for Policy Makers. **Partnership for Market Readiness (PMR)**, p. 108, 2017.
- PMR E ICAP. Comercio de emisiones en la práctica: manual sobre el diseño y la implementación de sistemas de comercio de emisiones. **Partnership for Market Readiness International Carbon Action Partnership**, p. 1–211, 2016.
- PRASAD DASH, A. et al. Experimental study on the effect of superplasticizer on workability and strength characteristics of recycled coarse aggregate concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 60, p. 488–493, 2022.
- RAHUL, A. V. et al. 3D printable concrete with natural and recycled coarse aggregates: Rheological, mechanical and shrinkage behaviour. **Cement and Concrete Composites**, v. 125, p. 104311, jan. 2022.
- REN, X. et al. Insight into the tannic acid-based modular-assembly strategy based on inorganic-biological hybrid systems: A material suitability, loading effect, and biocompatibility study. **Materials Chemistry Frontiers**, v. 5, n. 10, p. 3867–3876, 2021.
- ROBAYO-SALAZAR, R.; VALENCIA-SAAVEDRA, W.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. Recycling of concrete, ceramic, and masonry waste via alkaline activation: Obtaining and characterization of hybrid cements. **Journal of Building Engineering**, v. 46, p. 103698, 1 abr. 2022.
- SALGADO, F. DE A.; SILVA, F. DE A. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 52, p. 104452, jul. 2022.

- SANTOS, R. P.; TUBINO, R. Potential evaluation of the use of construction and demolition waste (CDW) in the recovery of degraded soils by mining in Brazil. **Resources, Conservation & Recycling Advances**, v. 12, p. 200060, dez. 2021.
- SASUI, S. et al. Alkali activation of waste concrete powder: Effects of alkali type and concentration. **Ceramics International**, v. 49, n. 10, p. 16260–16271, maio 2023.
- SAYURISUYENAGA, E. et al. Acácia-Negra: Potenciais usos de reaproveitamento. **Revestimento Conhecimento Online**, v. 1, n. 7, p. 2–7, 2015.
- SCRIVENER, K. et al. Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 114, n. March 2017, p. 49–56, dez. 2018.
- SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, 1 dez. 2018.
- SHARKAWI, A. M. et al. Feasible Construction Applications for Different Sizes of Recycled Construction Demolition Wastes. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, n. 4, p. 3351–3366, dez. 2018.
- SHARMA, K. P. Tannin degradation by phytopathogen's tannase: A Plant's defense perspective. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 21, p. 101342, set. 2019.
- SHARMA, N.; KALBAR, P. P.; SALMAN, M. Global review of circular economy and life cycle thinking in building Demolition Waste Management: A way ahead for India. **Building and Environment**, v. 222, p. 109413, ago. 2022.
- SHI, C. et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 466–472, jan. 2016.
- SHI, C. et al. Peridynamics modeling and simulation of meso-scale fracture in recycled coarse aggregate (RCA) concretes. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 114, p. 102949, ago. 2021.
- Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção – SIDAC. 2023.
- SKIBSTED, J.; SNELLINGS, R. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105799, 1 out. 2019.
- SNIC E ABCP. Roadmap Tecnológico do Cimento. 2019.
- STEINER, L. R.; BERNARDIN, A. M.; PELISSER, F. Effectiveness of ceramic tile polishing residues as supplementary cementitious materials for cement mortars. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 4, p. 30–35, 1 jul. 2015.
- SUESCUM-MORALES, D.; KALINOWSKA-WICHROWSKA, K.; FERN, M. Accelerated carbonation of fresh cement-based products containing recycled masonry aggregates for CO<sub>2</sub> sequestration. v. 46, n. February, 2021.

TAM, S.-C.; MCCOLL, J. G. Aluminum- and Calcium-Binding Affinities of Some Organic Ligands in Acidic Conditions. **Journal of Environmental Quality**, v. 19, n. 3, p. 514–520, 1990.

TANG, Q. et al. The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, n. March, p. 103807, 2020.

THOMAS, B. S. Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 3913–3923, fev. 2018.

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

VÁZQUEZ, E. (ED. . **Progress of Recycling in the Built Environment**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. v. 8

WANG, L. et al. Tea stain-inspired treatment for fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 262, 30 nov. 2020.

WANG, L. et al. Eco-friendly treatment of recycled concrete fines as supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 322, p. 126491, 7 mar. 2022.

WBCSD. **Low Carbon Technology Partnerships initiative**. 2016a.

WBCSD. **Cement Sector Scope 3 GHG Accounting and Reporting Guidance**. 2016b.

WBCSD; IEA. **Low Carbon Technology Roadmap for the Indian Cement Sector: Status Review 2018**. p. 52, 2018.

WEI, Q.; HAAG, R. Universal polymer coatings and their representative biomedical applications. **Materials Horizons**, v. 2, n. 6, p. 567–577, 2015.

WU, H. et al. Utilizing thermal activation treatment to improve the properties of waste cementitious powder and its newmade cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 322, p. 129074, nov. 2021.

XIAO, J. et al. Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 188, p. 720–731, jul. 2018.

YE, P.; CHEN, Z.; SU, W. Mechanical properties of fully recycled coarse aggregate concrete with polypropylene fiber. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01352, dez. 2022.

YU, X., ET AL. **Effect of Mechanical Force Grinding on the Properties of Recycled Powder.pdf**. , 2017.

YU, R.; SHUI, Z. Influence of agglomeration of a recycled cement additive on the hydration and microstructure development of cement based materials. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 841–851, dez. 2013.

ZHANG, D. et al. Comparison of mechanical, chemical, and thermal activation methods on the utilisation of recycled concrete powder from construction and demolition waste. **Journal of Building Engineering**, v. 61, p. 105295, dez. 2022.

ZHANG, H. et al. Recycling fine powder collected from construction and demolition wastes as partial alternatives to cement: A comprehensive analysis on effects, mechanism, cost and CO<sub>2</sub> emission. **Journal of Building Engineering**, v. 71, p. 106507, jul. 2023a.

ZHANG, H. et al. Analysis of two processing techniques applied on powders from recycling of clay bricks and concrete, in terms of efficiency, energy consumption, and cost. **Construction and Building Materials**, v. 385, p. 131517, jul. 2023b.

ZHAO, Y. et al. The particle-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, p. 118521, jan. 2020.

ZHOU, H. et al. Static size effect of recycled coarse aggregate concrete: Experimental study, meso-scale simulation, and theoretical analysis. **Structures**, v. 34, p. 2996–3012, dez. 2021.

ZHU, L. et al. Compressive strength and microstructural analysis of recycled coarse aggregate concrete treated with silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 334, p. 127453, jun. 2022.