



**FELIPE ALEXANDER JULIO**

**UTILIZAÇÃO DE POZOLANAS COMO TRATAMENTO  
PARA MELHORIA DA ADESÃO DE AGREGADOS  
RECICLADOS DE CONCRETO**

**LAVRAS - MG  
2020**

**FELIPE ALEXANDER JULIO**

**UTILIZAÇÃO DE POZOLANAS COMO TRATAMENTO PARA MELHORIA DA  
ADESÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Saulo Rocha Ferreira  
Orientador

**LAVRAS-MG  
2020**

**FELIPE ALEXANDER JULIO**

**UTILIZAÇÃO DE POZOLANAS COMO TRATAMENTO PARA MELHORIA DA  
ADESÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO**

**UTILIZATION OF POZZOLANS AS TREATMENT TO IMPROVEMENT OF  
RECYCLED CONCRETE AGGREGATES ADHESION**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 28 de agosto de 2020.

Profa. Dra. Cristiane Alves Pereira UFLA

Prof. Dr. Keoma Defaveri do Carmo e Silva UFLA

Profa. Dra. Andréa Aparecida Ribeiro Corrêa UFLA

Prof. Dr. Saulo Rocha Ferreira  
Orientador

**LAVRAS-MG  
2020**

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pelo dom da vida plena.

Aos meus pais, Alcides Julio Filho e Lilian Carla Lemes Julio, e à minha família, que me ensinaram a trilhar o caminho da honestidade e do trabalho, e sempre me motivaram a acreditar no meu potencial.

Ao meu amor, D.C.J., pela fonte de inspiração, estrutura e companheirismo.

Aos irmãos que encontrei no Apartamento 305 do Alojamento Estudantil, Fabrício, Gustavo, João, Lunare e Tales, por todo o aprendizado multidisciplinar e demonstração de fraternidade nos momentos de alegria e de dificuldades.

À ESAL – Empreendimentos e Soluções Ambientais e ao ex-Secretário de Meio Ambiente de Sertãozinho-SP, Carlos Alexandre Ribeiro Gomes, pela oportunidade de Estágio e de crescimento profissional.

À Universidade Federal de Lavras pelo acolhimento, estrutura e oportunidades de desenvolvimento acadêmico e humano.

À equipe da Faculdade de Engenharia Química pelo empenho à oferta de um curso de Engenharia Química de excelência.

Muito obrigado!

## RESUMO

O concreto é um dos materiais de construção civil mais utilizados do mundo e que colabora com a exploração de reservas naturais à obtenção de um de seus importantes constituintes, os agregados naturais graúdos. Ainda, o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos da construção civil é um desafio importante aos municípios brasileiros. O beneficiamento de tais resíduos à produção de agregados reciclados de concretos a partir de usinas de reciclagem de resíduos da construção civil apresenta-se como uma alternativa ambientalmente adequada à minimização da exploração de recursos não renováveis, bem como ao melhor aproveitamento do solo ao não dispor tais resíduos em aterros sanitários. Entretanto, a substituição de agregados naturais por agregados reciclados à produção de concretos esbarra nas características intrínsecas dos próprios agregados reciclados, pois são geralmente menos resistentes, mais porosos e com maior capacidade de absorção percentual de água em relação aos agregados naturais. Tais características influenciam negativamente as propriedades de concretos de agregados reciclados como a trabalhabilidade do concreto fresco e a resistência à compressão no estado endurecido. Assim, o presente trabalho investigou técnicas de revestimento superficial de agregados reciclados com materiais com atividade pozolânica, ou seja, materiais finamente cominuídos que, em presença de água, reagem com cristais de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e formam silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), principal fase estrutural do concreto. Os artigos científicos foram selecionados a partir da base de dados bibliográfica *Science Direct*, utilizando as palavras-chaves “Recycled Concrete Aggregate”, “Pozzolan”, “Recycled Aggregates Concrete”, “Surface Coating”, “Treatment”. Dentre os trabalhos reportados na literatura as pozolanas mais empregadas foram a Sílica Ativa, as Cinzas Volantes e a Nano-Sílica, nesta ordem. Assim como os tipos de pozolanas empregadas, os procedimentos de revestimento superficial também variaram e podem ser divididos em duas principais categorias, sendo o pré-tratamento anterior à mistura e o tratamento durante a mistura ao preparo dos concretos, representados pelas siglas PMT (*pre-mixing treatment*) e TSMAM (*two stage mixing approach modify*), respectivamente. O revestimento superficial de agregados reciclados com Sílica Ativa, a partir do método TSMAM, dentre os resultados reportados, melhor contribuiu à melhoria da trabalhabilidade do concreto fresco e da resistência à compressão de concretos de agregados reciclados. Os mecanismos físicos e químicos que justificam os incrementos percentuais das propriedades avaliadas reportadas (trabalhabilidade e resistência à compressão) em relação às espécies de referência (concretos de agregados reciclados sem tratamento) são o efeito preenchedor e a formação adicional de C-S-H, ambos decorrentes do revestimento superficial dos agregados com pozolanas. Ainda, para a avaliação da aplicação de um material pozolânico alternativo, bem como o avanço da compreensão dos mecanismos relacionados à adesão dos agregados tratados, propôs-se a síntese e caracterização de concretos com substituição integral de agregados naturais graúdos por agregados reciclados graúdos revestidos com metakaulim, a partir do método TSMAM. Adicionalmente, propôs-se um ensaio de arrancamento para avaliar a adesão dos agregados reciclados tratados na matriz do concreto.

**Palavras-Chave:** Concretos de Agregados Reciclados. Revestimento Superficial. Agregados Reciclados de Concreto. Materiais Polozânicos.

## ABSTRACT

Concrete is one of the most widely used civil construction materials in the world and it collaborates with the exploration of natural reserves to obtain one of its important constituents, coarse natural aggregates. Furthermore, the environmentally sound management of construction waste is an important challenge for Brazilian municipalities. The processing of such residues to the production of recycled concrete aggregates from construction waste recycling plants presents itself as an environmentally appropriate alternative to minimize the exploitation of non-renewable resources, as well as to better use of the soil by not having such waste in landfills. However, the substitution of natural aggregates for recycled aggregates for the production of concrete comes up against the intrinsic characteristics of the recycled aggregates themselves, as they are generally less resistant, more porous and with a greater percentage of water absorption capacity in relation to natural aggregates. Such characteristics negatively influence the concrete properties of recycled aggregates such as the workability of fresh concrete and the resistance to compression in the hardened state. Thus, the present work investigated techniques for superficial coating of recycled aggregates with materials with pozzolanic activity, that is, finely comminuted materials that, in the presence of water, react with calcium hydroxide crystals ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) and form silicates of hydrated calcium (C-S-H), the main structural phase of concrete. Scientific articles were selected from the Science Direct bibliographic database, using the keywords "Recycled Concrete Aggregate", "Pozzolan", "Recycled Aggregates Concrete", "Surface Coating", "Treatment". Among the works reported in the literature, the most used pozzolans were Active Silica, Fly Ash and Nano-Silica, in that order. As well as the types of pozzolans used, the surface coating procedures also varied and can be divided into two main categories, with pre-treatment prior to mixing and treatment during mixing when preparing concretes, represented by the acronyms PMT (pre-mixing treatment) and TSMAM (two stage mixing approach modify), respectively. The surface coating of recycled aggregates with Active Silica, using the TSMAM method, among the reported results, best contributed to improving the workability of fresh concrete and the compressive strength of recycled aggregate concrete. The physical and chemical mechanisms that justify the percentage increments of the reported properties evaluated (workability and resistance to compression) in relation to the reference species (concrete from recycled aggregates without treatment) are the filler effect and the additional formation of CSH, both resulting from the coating surface of aggregates with pozzolans. Also, for the evaluation of the application of an alternative pozzolanic material, as well as the advance of the understanding of the mechanisms related to the adhesion of the treated aggregates, it was proposed the synthesis and characterization of concretes with integral substitution of natural aggregates coarse by recycled coarse aggregates coated with metakaolin, using the TSMAM method. Additionally, a pullout test was proposed to evaluate the adhesion of the recycled aggregates treated in the concrete matrix.

**Keywords:** Recycled Aggregates Concrete. Surface Coating. Recycled Concrete Aggregates. Pozzolanic Materials.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1</b>	<b>Agregados reciclados graúdos e o desenvolvimento sustentável</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2</b>	<b>Tecnologia de concretos convencionais</b> .....	<b>10</b>
<b>2.3</b>	<b>Agregados reciclados graúdos</b> .....	<b>21</b>
<b>2.4</b>	<b>Concretos de agregados reciclados</b> .....	<b>22</b>
<b>2.5</b>	<b>Técnicas à melhoria das propriedades de concreto de agregados reciclados</b> .....	<b>23</b>
<b>2.6</b>	<b>Materiais pozolânicos</b> .....	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>Avaliação quantitativa de artigos publicados correlatos ao presente tema por ano</b> .....	<b>30</b>
<b>4.2</b>	<b>Artigos de Pesquisa Selecionados</b> .....	<b>31</b>
<b>4.3</b>	<b>Materiais pozolânicos e métodos de revestimento de agregados reciclados de concreto empregados</b> .....	<b>34</b>
<b>4.4</b>	<b>Traço e propriedades de concretos de agregados reciclados revestidos com Sílica Ativa a partir do método PMT</b> .....	<b>37</b>
<b>4.5</b>	<b>Traço e propriedades de concretos de agregados reciclados revestidos com Nano-Sílica a partir do método PMT</b> .....	<b>39</b>
<b>4.6</b>	<b>Traço e propriedades de concretos de agregados reciclados revestidos com Cinzas Volantes a partir do método PMT</b> .....	<b>41</b>
<b>4.7</b>	<b>Traço e propriedades de concretos de agregados reciclados revestidos com Sílica Ativa a partir do método TSMAM</b> .....	<b>41</b>
<b>4.8</b>	<b>Traço e propriedades de concretos de agregados reciclados revestidos com Nano-Sílica a partir do método TSMAM</b> .....	<b>43</b>
<b>4.9</b>	<b>Traço e propriedades de concretos de agregados reciclados revestidos com Cinzas Volantes a partir do método TSMA</b> .....	<b>44</b>
<b>4.10</b>	<b>Técnicas de caracterização microestrutural à avaliação da adesão dos agregados reciclados na matriz de concretos de agregados reciclados</b> .....	<b>45</b>
<b>4.11</b>	<b>Trabalhos Futuros</b> .....	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de alternativas tecnológicas à utilização responsável dos recursos naturais e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos oriundos dos processos humanos é imprescindível ao desenvolvimento sustentável dos povos. Os processos de uso e ocupação do solo devido ao crescimento populacional e à urbanização acionam diversas atividades econômicas potencialmente poluidoras e, dentre tais, o setor da construção civil (SILVEIRA, 2018, p. 87-88, 90).

O concreto, um dos principais materiais estruturais utilizados na construção civil, é constituído por agregados de origem rochosa envolvidos fisicamente por uma matriz amorfa e porosa formada pelos produtos da hidratação do cimento; principalmente Silicatos de Cálcio Hidratados (C-S-H) e cristais de Hidróxido de Cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). As fases cimentantes são majoritariamente obtidas após processamentos térmicos e de cominuição de calcário e argila (calcinação e clínquerização), extraídos também de reservatórios naturais finitos (HEWLETT; LISKA, 2019).

Os resíduos de construção e demolição civil (RCD) representam uma elevada fração da geração diária de resíduos sólidos urbanos e a sua gestão ambientalmente correta desafia os municípios brasileiros. Dentre algumas estratégias tecnologicamente viáveis adotadas, em substituição à disposição final em aterros sanitários, é o processamento de tais resíduos a fim de obter agregados reciclados (AR), cuja aplicação, já normatizada, enquanto camadas de leito e sub-leito de pavimentos tem sido a mais difundida (NAGALLI, 2014, p. 5–6, 113-114).

A norma técnica NBR ABNT 15116/2004 estabelece os requisitos para a produção de concretos sem função estrutural, em substituição, parcial ou integral, do teor de agregados naturais na mistura (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2004). Entretanto, o design de traços que resultem em concretos com as propriedades físicas e mecânicas adequadas torna-se mais complexo devido às características intrínsecas aos agregados reciclados que, por sua vez, dependem dos materiais constituintes e do processamento do RCD de origem (MISTRI et al., 2020).

A substituição do uso de agregados naturais (AN) por agregados reciclados à síntese de concretos, portanto, representa um conjunto de soluções sustentáveis que contemplam a minimização da exploração de recursos naturais à obtenção de agregados, a reciclagem de matéria e economia de energia ao re-introduzir os materiais constituintes do RCD no leque de



materiais de construção civil, bem como o melhor aproveitamento do solo devido à diminuição dos volumes de RCD dispostos em aterros sanitários.

A perspectiva de superação dos desafios que limitam o amplo emprego de agregados reciclados na produção de concretos tem fomentado a investigação científica dos parâmetros que determinam as propriedades físicas e mecânicas do concreto, em suas diversas etapas de hidratação, influenciados pelas especificidades inerentes ao uso de agregados reciclados. A compreensão dos principais mecanismos envolvidos no progresso da cura de concretos de agregados reciclados e o aprofundamento do olhar para a interface entre o agregado reciclado e a nova matriz hidratada têm se mostrado caminhos substanciais ao desenvolvimento de estratégias que possibilitem a difusão de tecnologias de concretos sustentáveis (SHI et al., 2016; WANG, YOU, LI, 2020; MISTRI et al., 2020).

Dentre as estratégias disponíveis na literatura, a melhoria da resistência mecânica e a diminuição de absorção percentual de água dos agregados reciclados, por meio de tratamentos específicos, têm resultado em avanços importantes às propriedades físicas e mecânicas dos concretos com agregados reciclados. O revestimento superficial dos agregados reciclados com materiais pozolânicos, em estado pastoso, tem demonstrado resultados promissores e inspiram o desenvolvimento de uma revisão bibliográfica sistemática que congregue os estudos já conduzidos, de maneira articulada, a fim de subsidiar outros pesquisadores (SHI et al., 2016; WANG, YOU, LI, 2020; MISTRI et al., 2020).

Assim, a presente proposta de Trabalho de Conclusão de Curso objetiva a revisão bibliográfica sistemática do uso de materiais pozolânicos ao tratamento de agregados reciclados de concreto utilizados à produção de concretos com substituição parcial ou integral de AN grãos por AR grãos, avaliando e comparando os traços utilizados, os processos de mistura empregados, os ensaios realizados e as propriedades físicas e mecânicas reportadas (trabalhabilidade (concreto fresco) e resistência à compressão).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente referencial teórico objetiva aproximar o leitor às problemáticas e motivações concernentes ao desenvolvimento de tecnologias viáveis tecnicamente ao uso de agregados reciclados em concretos, em substituição aos agregados naturais, a partir do resgate inicial dos modelos de desenvolvimento econômico, da tecnologia de concretos de cimento Portland, das principais diferenças entre os agregados graúdos naturais e reciclados e dos desafios à produção de concretos de agregados reciclados que satisfaçam os requisitos necessários à sua difusão e amplo emprego dentre o leque de materiais de construção civil.

### 2.1 Agregados reciclados graúdos e o desenvolvimento sustentável

Os padrões de comportamento e consumo da humanidade até a atualidade permite que o modelo de desenvolvimento adotado seja representado por meio de um processo linear, no qual o meio ambiente é o sorvedouro dos resíduos gerados e o consumo dos recursos é feito de forma a considerá-los infinitos. Tal modelo, portanto, reduz as garantias às futuras gerações de um meio ambiente equilibrado, ao desafiar a sua resiliência, e a disponibilidade de recursos naturais, ao consumir irracionalmente (BRAGA et al., 2006).

O modelo de desenvolvimento sustentável, por sua vez, baseia-se em premissas fundamentais que os profissionais da engenharia devem se pautar em seu exercício profissional e, dentre tais, em contraposição ao modelo linear de desenvolvimento, destacam-se o uso racional e conservacionista de matéria e energia, a reutilização e reciclagem dos materiais e o controle da poluição. Assim, o desafio atual dos engenheiros é o de desenvolver e aplicar novas tecnologias compatíveis com o modelo de desenvolvimento sustentável (BRAGA et al., 2006).

Ainda que medidas de mitigação de impactos ambientais sejam previamente tomadas à luz das legislações correlatas, a exploração de uma reserva mineral, por meio da mineração, à obtenção de matéria-prima à indústria da construção civil, como granitos, calcários e gnaisses, por exemplo, pode acarretar em desequilíbrios ecológicos. Dentre os principais impactos ambientais, destacam-se o desmatamento, o lançamento de partículas à atmosfera (poeira), ruídos e vibrações e, em alguns casos, a diminuição de pH e contaminação por metais pesados ou outros produtos químicos de cursos d'água (CURI, 2014, p. 79, 88).

Os resíduos de construção e de demolição civil (RCD), principalmente os resíduos Classe A, têm recebido atenção especial nos últimos anos, sobretudo após a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em 2010. A má gestão de tais resíduos, passível de multas aplicadas pelos órgãos ambientais, está associada ao mau aproveitamento de materiais, ao consumo de novos recursos naturais, à proliferação de vetores, à supressão vegetal decorrente da execução de novos aterros e a inviabilidade de reciclagem de outros materiais associados devido a não segregação na fonte geradora (SILVEIRA, 2018, p. 89 - 96).

Portanto, a utilização de agregados reciclados em concretos com ou sem função estrutural representaria uma alternativa tecnológica ao consumo de ainda mais recursos naturais e aos recíprocos impactos ambientais, por meio da exploração de granitos em pedreiras, bem como representaria uma solução à disposição final ambientalmente adequada de resíduos de construção e demolição civil (RCD), conforme o modelo de desenvolvimento sustentável.

Assim, inicialmente, faz-se necessário discorrer nos tópicos seguintes do presente capítulo sobre a tecnologia de concretos, seus principais componentes, mecanismos e características relativas à hidratação, bem como as características intrínsecas aos agregados reciclados e suas influências nas propriedades físico-mecânicas de concretos. Também serão abordadas as principais características de pozolanas e a sua interação com subprodutos da hidratação do cimento.

## **2.2 Tecnologia de concretos convencionais**

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados do mundo; anualmente, a massa de concreto empregada supera o somatório da massa de todos os metais juntos. Tal material é caracterizado como um composto agregado, no qual os agregados finos (areia) e os agregados graúdos (brita), com granulometria controlada, reforçam uma matriz majoritariamente constituída por silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Os agregados finos ocupam os interstícios formados entre os agregados graúdos e a matriz. A fração volumétrica total de agregados representa cerca de 60 - 75% do volume total do concreto endurecido (SHACKELFORD, 2008, p. 322).

A matriz do concreto é uma estrutura majoritariamente amorfa e porosa, constituída por fases com características químicas e físico-mecânicas distintas, formadas a partir das

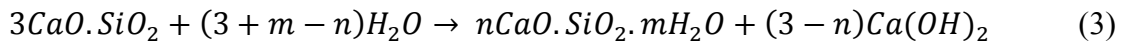
reações envolvidas na hidratação do cimento Portland (CP), um sistema multicomponente. O Silicato Tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ;  $\text{C}_3\text{S}$ ), o Silicato Bicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ;  $\text{C}_2\text{S}$ ), o Aluminato Tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{C}_3\text{A}$ ), o Ferro Aluminato Tetracálcico ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) e o Sulfato de Cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) (gipsita) são os principais constituintes deste sistema, sendo os primeiros, oriundos da cominuição dos produtos da clinquerização à  $1450^\circ\text{C}$  das matérias primas minerais calcário e argila. Tais reagem espontaneamente com a água disponível no meio reacional (mistura), liberando calor e formando as fases sólidas da matriz do concreto, a saber: C-S-H (silicato de cálcio hidratado),  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (portlandita; CH) e o trissulfato AFt (etringita) que, por sua vez, na ausência de  $\text{CaSO}_4$ , é consumido pelo  $\text{C}_3\text{A}$  não hidratado gerando a fase monossulfato AFm. O processo de hidratação é complexo, caracterizado pelo endurecimento da pasta e diminuição da porosidade da matriz, em diferentes taxas no tempo. Sequencialmente, o percurso da hidratação é caracterizado pelos períodos de pré-indução (primeiros minutos), indução (primeiras horas), aceleração (3 - 12h após a mistura) e o de pós-aceleração (HEWLETT; LISKA, 2019).

Os principais parâmetros que afetam o progresso e a cinética de hidratação do cimento Portland estão relacionados à composição e a forma de suas fases constituintes, o que inclui a qualidade e a quantidade de íons dopantes presentes na estrutura das fases cristalinas do CP; a granulometria e a superfície específica de seus grãos; a proporção mássica entre a água disponível e o cimento (a/c); as condições de cura, sobretudo a temperatura; e a presença de misturas químicas e de aditivos utilizados ao controle das taxas de hidratação e da reologia da pasta de cimento (HEWLETT; LISKA, 2019).

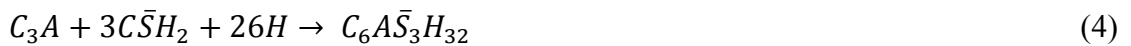
O período de pré-indução manifesta-se nos primeiros minutos da hidratação e corresponde a hidratação inicial das fases cristalinas  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ , acompanhada de intensa liberação de calor, bem como a dissolução rápida dos constituintes iônicos solúveis em água presentes no CP, como os sulfatos alcalinos ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) e o sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), até a saturação, fornecendo à fase líquida as espécies  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ , importantes ao balanço de cargas e ao controle das taxas de hidratação. Nesta etapa, apenas uma fração desprezível de  $\text{C}_2\text{S}$  é hidratada (HEWLETT; LISKA, 2019).

Neste período, ocorre a hidratação de cerca de 2% a 10% da fase alita ( $\text{C}_3\text{S}$ ), por meio da protonólise dos íons  $\text{O}^{2-}$  e  $\text{SiO}_4^{2-}$  presentes na superfície do grão, conforme as Equações 1 e 2, provocando a dissolução do material da camada atacada. Os íons  $\text{Ca}^{2+}$  da camada superficial atacada pela água, por sua vez, migram à fase líquida, contrabalanceando as cargas negativas do meio. Neste momento, a taxa de dissolução do  $\text{C}_3\text{S}$  é superior a de difusão das

espécies iônicas para o seio da solução, estabelecendo-se na vizinhança do grão um gradiente de concentração das espécies  $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}_n\text{SiO}_4^{(4-n)}$  e  $\text{Ca}^{2+}$ . Tão logo, a supersaturação na vizinhança é alcançada e uma camada da fase “C-S-H” precipita-se na superfície do grão. Segundo a *teoria da camada hidratada impermeável*, esta atua enquanto uma barreira tanto à difusão de água às camadas não reagidas do  $\text{C}_3\text{S}$ , quanto à passagem dos íons  $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}_n\text{SiO}_4^{(4-n)}$  e  $\text{Ca}^{2+}$  para a fase líquida. Assim, a taxa de hidratação cai abruptamente e o sistema entra no período de indução. A reação global de hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$  e formação das fases “C-S-H” e portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) pode ser visualizada por meio da Equação 3 (HEWLETT; LISKA, 2019).



Ainda no período de pré-indução, uma fração de 5% a 25% de  $\text{C}_3\text{A}$  solubiliza-se e reage exotermicamente com as espécies da fase líquida  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ , produzindo o trissulfato etringita (AFt), conforme a Equação 4. Na ausência de  $\text{CaSO}_4$ , quantidades muito maiores de  $\text{C}_3\text{A}$  hidratam-se ainda no período de indução, prejudicando a reologia inicial da pasta. Após a rápida hidratação inicial, uma camada de etringita ( $\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$ ) precipita-se na superfície do grão de  $\text{C}_3\text{A}$ , limitando os processos difusionais de transferência de massa, retardando a reação e dando início ao período de indução (dormência). A fase ferrita ( $\text{C}_4\text{AF}$ ), por sua vez, reage no meio da mesma forma que a fase  $\text{C}_3\text{A}$ , produzindo também o precipitado superficial etringita (AFt) (HEWLETT; LISKA, 2019).



As fases hidratadas “C-S-H” e “AFt” precipitadas nas superfícies dos respectivos grãos hidratados, durante o período de pré-indução, oferecem resistência à transferência de massa entre a superfície não hidratada e a fase líquida, tanto das espécies dissociadas quanto da água. Sendo o processo inicialmente governado pela dissociação das fases não hidratadas, as taxas de hidratação dos constituintes do CP, portanto, decaem consideravelmente em virtude destes precipitados. Assim, inicia-se o período de indução, ou dormência, que perdura durante as primeiras horas da hidratação e finda-se quando tais “barreiras” sofrem modificações estruturais que diminuem a sua resistividade à passagem das espécies reagentes, favorecendo os mecanismos de dissolução das fases não hidratadas. No período de indução, apesar das baixas taxas de hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$  e do  $\text{C}_2\text{S}$ , a concentração das espécies  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$  na fase líquida continuam a aumentar até a saturação, no final deste período. Então,

cristais de portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) começam a se precipitar entre a barreira de “C-S-H” e a superfície não hidratada. Ainda neste período, a concentração da espécie  $\text{SO}_4^{2-}$  na fase líquida continua aproximadamente constante, pois o seu consumo à formação de etringita AFt é balanceado pela dissociação do  $\text{CaSO}_4$  (HEWLETT; LISKA, 2019).

Após o período de dormência, as taxas de hidratação voltam a crescer e, desta vez, são controladas pela nucleação e crescimento dos produtos da hidratação. Neste estágio, os íons dissociados pelo ataque protolítico das superfícies não hidratadas do  $\text{C}_3\text{S}$  e do  $\text{C}_2\text{S}$  deslocam-se até o seio da solução e, após vencidas as barreiras termodinâmicas à nucleação, começam a se precipitar na forma de grãos de C-S-H e portlandita, justificando o rápido aumento das taxas de hidratação. Este período, portanto, inicia-se após o período de dormência e é caracterizado pelo retorno ao crescimento acelerado das taxas de hidratação, perdurando até 12h após a mistura. A cinética de hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$ , neste período, pode ser representada pela Equação 2.5, na qual  $\alpha$  representa o grau de hidratação,  $k_n$  é a constante de velocidade da reação controlada pela nucleação e  $t$ , o tempo. Ainda no presente período, não há mais grãos de  $\text{CaSO}_4$  e, portanto, a concentração de  $\text{SO}_4^{2-}$  na fase líquida começa a decrescer devido ao seu consumo à formação de etringita (AFt). A hidratação da fase belita ( $\text{C}_2\text{S}$ ), por sua vez, é considerável no presente período e seu mecanismo de hidratação é similar ao descrito para a fase alita ( $\text{C}_3\text{S}$ ) (HEWLETT; LISKA, 2019).

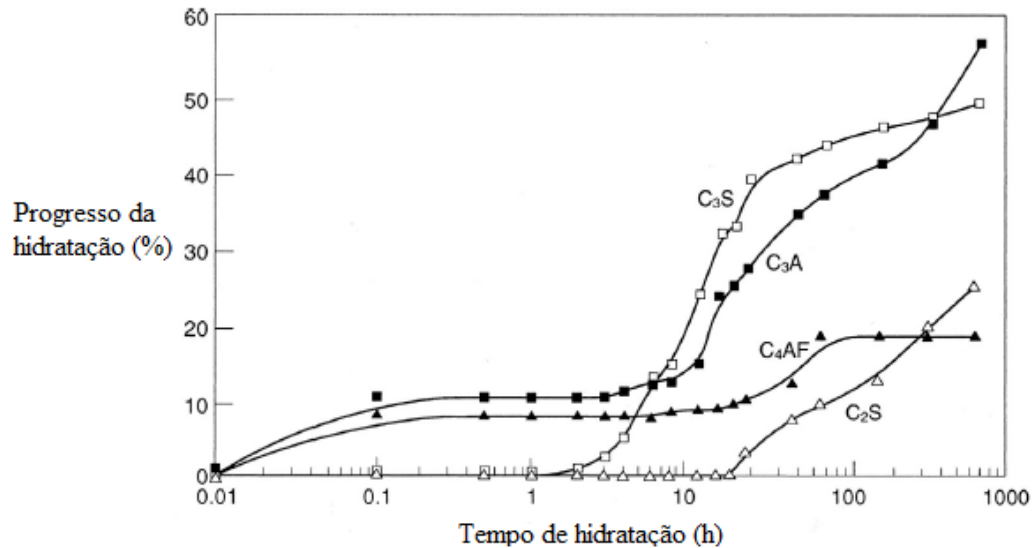
$$-\ln(1 - \alpha)^{1/3} = k_n * t \quad (5)$$

Após o período de aceleração, as taxas de hidratação novamente desaceleram e, desta vez, o processo é controlado por difusão de massa, em virtude do aumento das fases sólidas e diminuição da fase líquida. Para razões a/c suficientes, a formação dos produtos de hidratação prossegue até que as fases não hidratadas sejam quase que totalmente consumidas, diminuindo a porosidade da microestrutura. Assim, o desenvolvimento da microestrutura continua até que, aos 28 dias após a mistura, uma fração significativa de  $\text{C}_3\text{S}$  foi hidratada. Para o mesmo período, a fração de  $\text{C}_2\text{S}$  hidratada é nitidamente inferior à de  $\text{C}_3\text{S}$ . Devido à ausência de fonte para a espécie  $\text{SO}_4^{2-}$ , a fase etringita (AFt) formada nos períodos iniciais é consumida, juntamente com os teores residuais de  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_2(\text{A}, \text{F})$ , à formação da fase monossulfato AFm (HEWLETT; LISKA, 2019).

A cinética da hidratação das fases cristalinas do CP e de formação dos produtos C-S-H, CH, AFt e AFm, em temperatura ambiente, e em razões a/c satisfatórias (0,3 – 0,6), podem ser representadas por meio das Figuras 1 e 2, respectivamente. A comparação entre as curvas de percentual de hidratação no tempo para cada um dos constituintes do CP, Figura 1, permite

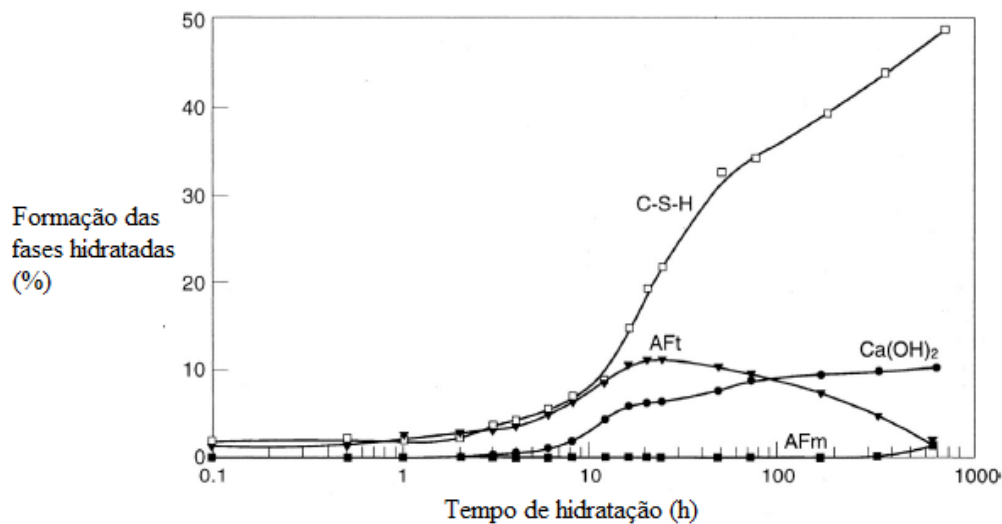
visualizar o quão rápido as fases  $C_3A$  e  $C_4AF$  são consumidas nos primeiros minutos, após a mistura, em comparação às fases alita e belita, que também apresentam comportamentos distintos. Ainda, as variações das taxas de hidratação representam os estágios sequenciais discutidos anteriormente (HEWLETT; LISKA, 2019).

Figura 1 - Progresso da hidratação dos constituintes do Cimento Portland.



Fonte: Adaptado de HEWLETT e LISKA (2019).

Figura 2 - Formação percentual das fases hidratadas a partir da hidratação do Cimento Portland.

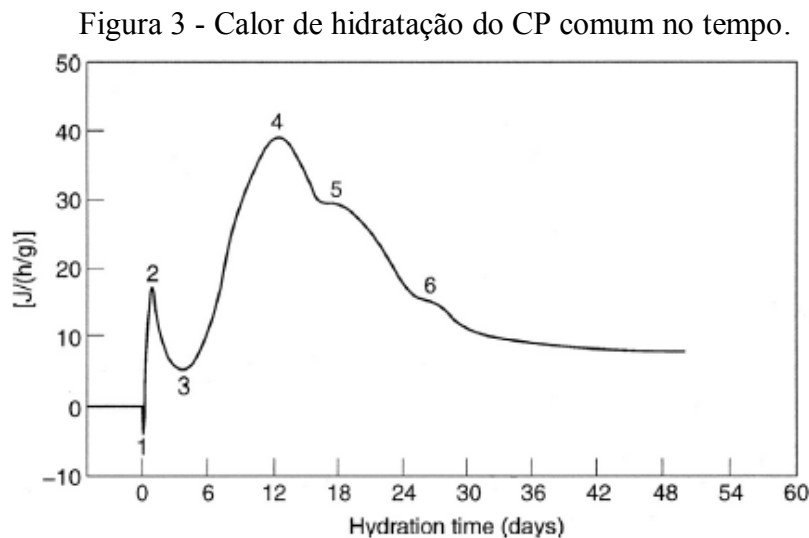


Fonte: Adaptado de HEWLETT e LISKA (2019).

A superposição das Figuras 1 e 2 permite visualizar a relação entre as taxas de consumo dos constituintes do CP e a formação das principais fases constituintes da matriz do concreto. Os estágios sequenciais de hidratação podem ser bem discriminados, na Figura 2, a

partir do período de indução (primeiras horas), após o qual as taxas de formação das fases C-S-H, AFt e  $\text{Ca(OH)}_2$  aceleram levemente até alcançar as maiores taxas de hidratação, no período de aceleração. As taxas correspondentes aos produtos mais importantes da microestrutura da matriz, C-S-H e  $\text{Ca(OH)}_2$ , mantêm-se positivas também no período pós-aceleração, em decorrência da hidratação contínua das fases  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$ . A inclinação negativa da curva referente à formação do trissulfato etringita AFt, conforme a Figura 2, demonstra o seu consumo à formação da fase monossulfato AFm, em decorrência da ausência de espécies  $\text{SO}_4^{2-}$  livres no período observado (HEWLETT; LISKA, 2019).

O comportamento do calor de hidratação no tempo associado às reações de hidratação descritas anteriormente para o Cimento Portland Comum pode ser visualizado por meio da Figura 3, na qual os picos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 referem-se, respectivamente, aos fenômenos: dissolução da espécie  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ; período de pré-indução; período de dormência; período de aceleração (formação da fase C-S-H); formação da fase AFt; conversão AFt para AFm (HEWLETT; LISKA, 2019).



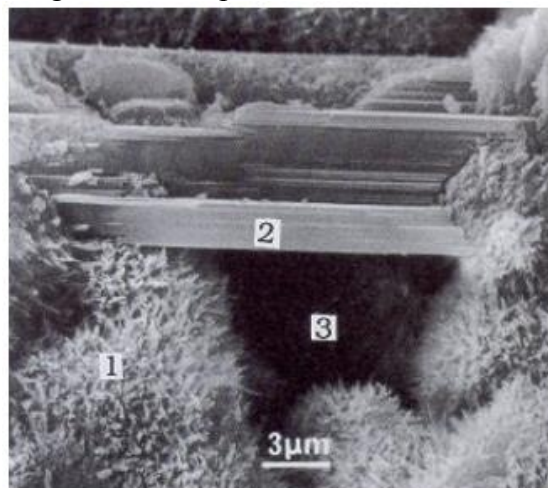
Fonte: HEWLETT e LISKA (2019).

A microestrutura do CP hidratado endurecido, além de congregar as principais fases sólidas (silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), sulfoaluminatos de cálcio (AFt e AFm), distribuídas heterogeneamente, também apresenta um teor de grãos de clínquer não hidratados, bem como um teor de vazios que influenciam negativamente as propriedades do concreto, sendo estes os poros de gel, vazios capilares e poros de ar incorporados, cujos quais podem armazenar moléculas de água não reagidas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).



Dentre os produtos da hidratação, destacam-se as fases C-S-H e CH que correspondem a cerca de 50% – 60% e 20% – 25%, respectivamente, do volume total de sólidos do CP comum hidratado e, portanto, têm um significativo papel na determinação das propriedades da matriz cimentícia de concretos. A fase C-S-H não é bem definida em relação a sua estequiometria, pois a relação Ca/Si varia entre 1,5 - 2,0 e o teor de água estrutural também não é determinado. Os modelos mais aceitos à representação de sua microestrutura a apresentam como camadas superpostas com elevadas áreas superficiais atraídas entre si por forças de Van der Waals. A estequiometria definida da fase CH ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), por sua vez, permite que a sua microestrutura seja ordenada em grandes cristais com morfologia prismática hexagonal (portlandita) e, quando comparados à microestrutura da fase C-S-H, apresentam consideravelmente menores áreas superficiais (MEHTA; MONTEIRO, 2008). As microestruturas descritas podem ser visualizadas por meio da Figura 4.

Figura 4 - Micrografia obtida por MEV das Fases hidratadas do CPC.

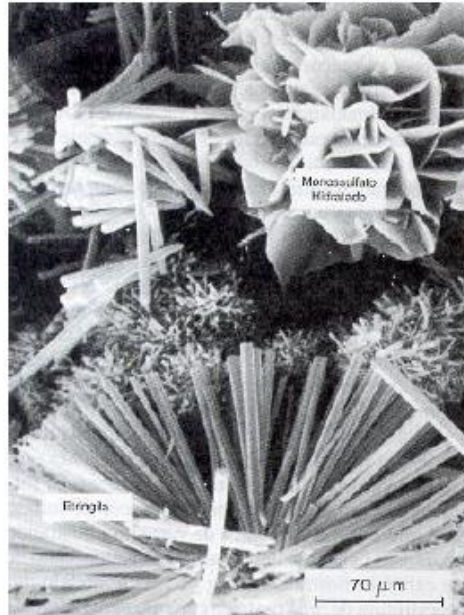


Legenda: 1 - C-S-H; 2 -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; 3 - Vazio Capilar.  
 Fonte: Malier (1992, p. 83).

Os sulfoaluminatos de cálcio (AFt e AFm) representam cerca de 15 a 20% do volume total de sólidos da matriz de CP comum hidratado e, portanto, influenciam menos nas relações microestrutura-propriedade em comparação às fases majoritárias (C-S-H e CH). O trissulfato hidratado AFt (etringita), formado principalmente nas horas iniciais de hidratação, apresenta a morfologia de cristais prismáticos no formato de agulhas, conforme pode ser observado na Figura 5. Em decorrência da ausência de espécies  $\text{SO}_4^{2-}$ , a fase trissulfato é posteriormente consumida à formação da fase monossulfato, cuja estrutura assemelha-se a cristais de placas hexagonais e também pode ser visualizada por meio da Figura 5. Assim como a fase C-S-H,

as fases AFt e AFm possuem elevadas áreas superficiais e adesividade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

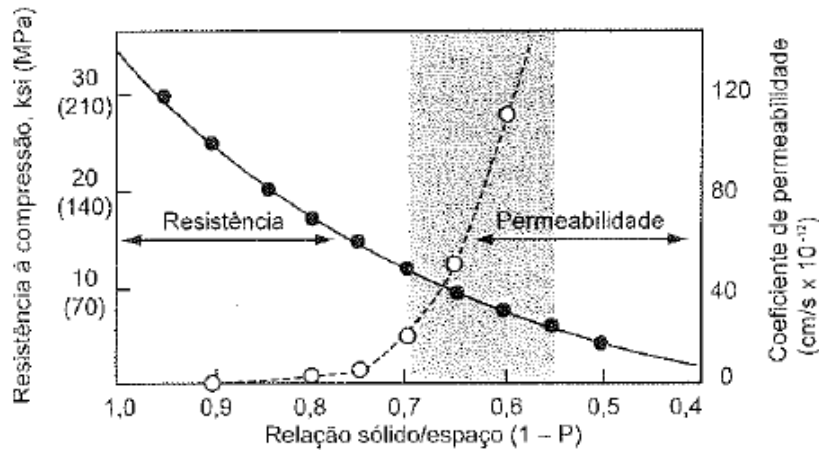
Figura 5 - Microscopia eletrônica de varredura evidenciando cristais aciculares de etringita (AFt) e as placas hexagonais cristalinas do monossulfato hidratado (AFm).



Fonte: MEHTA e MONTEIRO (1994).

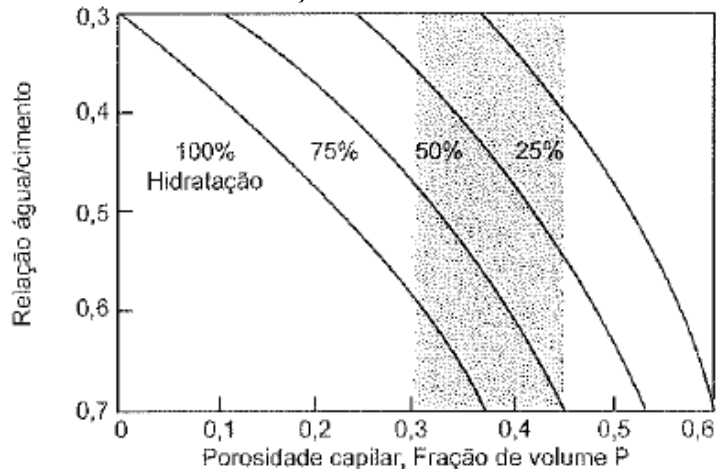
As características microestruturais da pasta de cimento hidratada influenciam fortemente as principais propriedades mecânicas do concreto endurecido, sendo estas: a resistência mecânica, a estabilidade dimensional e a durabilidade. A resistência da microestrutura da pasta cimentícia é atribuída principalmente às forças de Van der Waals estabelecidas entre superfícies sólidas com elevadas áreas superficiais, como as fases C-S-H, AFt e AFm, cujas quais tendem a aderir fortemente entre si e aos demais sólidos adjacentes. A fase CH, por sua vez, devido à sua superfície específica ser inferior à fase C-S-H, contribui limitadamente à resistência da microestrutura. Sendo a resistência de um material atribuída às suas fases sólidas, a presença de espaços vazios, portanto, enfraquece a estrutura, pois quando submetida à esforços, as tensões concentram-se nos vazios capilares e nas microfissuras existentes, acarretando na ruptura frágil do material. A Figura 6 ilustra os efeitos teóricos da porosidade à resistência de uma pasta de cimento hidratada. Já a Figura 7, a relação entre a razão a/c e a formação de espaços vazios na microestrutura de uma pasta em diversos percentuais de hidratação. O volume de vazios capilares varia no tempo e com a relação a/c inicial (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 6 - Influência da porosidade à resistência a compressão de matriz hidratada do CP.



Fonte: MEHTA e MONTEIRO (1994).

Figura 7 - Influência da relação água/cimento sobre a porosidade de uma matriz de CP em diversos níveis de hidratação.

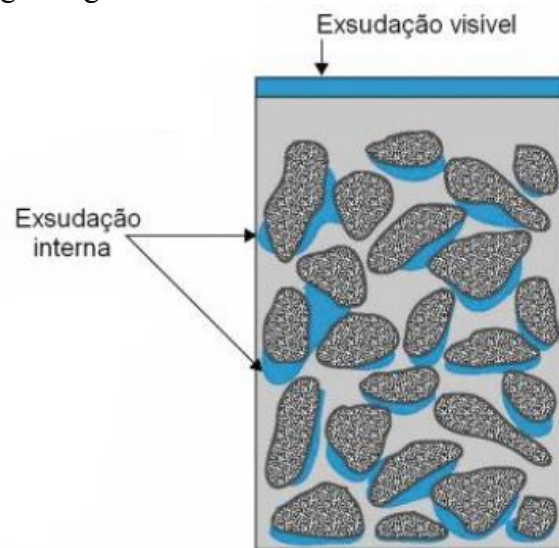


Fonte: MEHTA e MONTEIRO (1994).

A fase referente aos agregados graúdos é a principal responsável pelo módulo de elasticidade, pela massa unitária e pela estabilidade dimensional do concreto. Tais propriedades dependem de algumas características físicas dos agregados, como o volume, a densidade, a distribuição granulométrica, a morfologia (forma e textura), a porosidade e a resistência. Ordinariamente, os agregados graúdos são relativamente mais densos e resistentes do que as demais fases presentes no concreto e são constituídos, geralmente, por silicatos geológicos extraídos de depósitos minerais. Dentre os principais parâmetros que influenciam na resistência de concretos estão a porosidade, o índice de forma (razão entre o comprimento médio e a largura média do grão) e a granulometria dos agregados graúdos (MEHTA; MONTEIRO, 2008; SHACKELFORD, 2008).

Agregados porosos, volumosos e achatados permitem o acúmulo de um filme de água de exsudação na interface “agregado – pasta cimentícia” (Zona de Transição Interfacial - ZTI), conforme a Figura 8, favorecendo a formação nesta região de grandes cristais de hidróxido de cálcio (portlandita) que, devido a sua baixa área superficial, possuem pouca adesão às fases adjacentes. Além disso, o menor empacotamento relativo devido ao tamanho de tais cristais contribui ao aumento da porosidade na ZTI. Assim como entre as fases hidratadas, as forças de Van de Waals são as responsáveis pela aderência entre o CP hidratado e os agregados. A porosidade, portanto, diminui a intensidade da resultante de tais forças atrativas presentes na ZTI e, conseqüentemente, favorece a microfissuração gerada pela secagem e retração da pasta, bem como limita as distribuições de tensões entre a matriz e o agregado afetando negativamente a resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 8 - Representação da concentração de água de exsudação na superfície inferior de agregados graúdos.



Fonte: MEHTA e MONTEIRO (1994).

A Zona de Transição Interfacial (ZTI) é a região de interface entre a argamassa e a fase agregado, e é caracterizada, quando comparada às demais fases do compósito concreto, por possuir uma menor densidade e resistência devido à maior razão a/c que se estabelece superficialmente ao agregado nas etapas iniciais de hidratação do CP, e representa, portanto, a fase limitante da resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

No Brasil, a Norma Técnica ABNT NBR 7211/2019 define e disciplina o uso de agregados graúdos de origem natural, resultantes ou não da britagem de rochas, à produção de concretos de cimento Portland. O agregado é classificado como graúdo quando seus grãos

passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, durante ensaio de determinação da composição granulométrica realizado conforme a Norma Técnica ABNT NBR NM 248, utilizando as peneiras da série normal e intermediária definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1, com aberturas nominais conforme a Tabela 1. Os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, estáveis, compactos, duráveis, limpos e isentos de contaminantes que afetem a hidratação e o endurecimento do cimento Portland. Dentre os requisitos gerais elencados pela norma, a distribuição granulométrica do agregado graúdo, determinada segundo a Norma Técnica ABNT NBR NM 248, deve respeitar os limites percentuais mássicos estabelecidos para cada intervalo granulométrico, a fim de garantir uma distribuição heterogênea de tamanhos de partículas. Ainda, a norma estabelece os métodos de ensaio e os valores máximos para o “índice de forma” ( $\leq 3$ ), desgaste por abrasão “Los Angeles” ( $< 50\%$  em massa), como também para substâncias nocivas (ABNT, 2019).

Tabela 1 - Peneiras da série normal e intermediária (abertura nominal).

<b>Série normal</b>	<b>Série intermediária</b>
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 $\mu\text{m}$	-
300 $\mu\text{m}$	-
150 $\mu\text{m}$	-

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2019).

### 2.3 Agregados reciclados graúdos

Enquanto alternativa ambientalmente sustentável ao uso de agregados naturais e ao gerenciamento correto dos resíduos de construção civil (RCD), a Resolução CONAMA nº 307/2002 (que dispõe sobre as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil) classifica como “Classe A” os resíduos de construções, demolições, reformas ou reparos de pavimentação, de edificação, como também de processos de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas de concreto. Tal categoria engloba os resíduos cujo gerenciamento adequado é a sua reutilização, reciclagem ou beneficiamento à produção de agregados reciclados (NAGALLI, 2014, p. 11, 14, 113 – 114).

A Norma Técnica ABNT NBR 15116/2004 define agregados reciclados como materiais granulares produzidos após o beneficiamento de resíduos “Classe A” em áreas de reciclagem normatizadas pela ABNT NBR 15114 e que atendem aos requisitos técnicos para a utilização em obras de edificação e infra-estrutura. Em virtude da heterogeneidade dos constituintes de origem, os agregados reciclados são classificados, segundo a fração mássica de fragmentos à base de cimento Portland e de rochas que os constituem em Agregados Reciclados de Concreto (ARC) e Agregados Reciclados Mistos (ARM) (ABNT, 2004).

Ainda, tal norma estabelece os métodos de amostragem e de caracterização de lotes de agregados reciclados graúdos, bem como os requisitos técnicos à aplicação de agregados reciclados ao preparo de concreto sem função estrutural. Tais informações estão sintetizadas na Tabela 2. A composição granulométrica para tal aplicação deve estar em consonância com a ABNT NBR 7211 (ABNT, 2004).

Tabela 2 - Requisitos técnicos dos agregados reciclados a aplicação em concretos sem função estrutural.

Propriedades	Agregado Reciclado Classe A		Normas de ensaios
	ARC	ARM	
Teor de fragmentos a base de cimento e rochas (%)	$\geq 90$	$< 90$	Anexo A – ABNT NBR 15116
Absorção de água (%)	$\leq 7$	$\leq 12$	ANBT NBR NM 53
Teor total máximo de contaminantes* (%)	3		ABNT 9917; ABNT NBR 15116; ABNT NBR 7218
Teor de material passante na malha e 75 $\mu$ m (%)	$< 10$		ABNT NBR NM 46

\*Cloretos, Sulfatos, materiais não minerais e torrões de argila.

Fonte: Adaptado de ABNT (2004).

Dentre as principais diferenças entre os agregados naturais e os agregados reciclados destacam-se a menor massa específica, a maior absorção d'água percentual, a menor resistência ao ataque ácido e o maior desgaste por abrasão Los Angeles, devido ao teor residual de argamassa porosa aderida à superfície da rocha utilizada no concreto de origem (ETXEBERRIA et al., 2007; MEYER, 2009; SÁNCHEZ; JUAN; ALAEJOS, 2009). O tipo de britador utilizado à produção dos agregados reciclados e a qualidade do concreto de origem influenciam no teor residual de argamassa, bem como suas propriedades, presente no AR (ETXEBERRIA et al., 2007).

#### **2.4 Concretos de agregados reciclados**

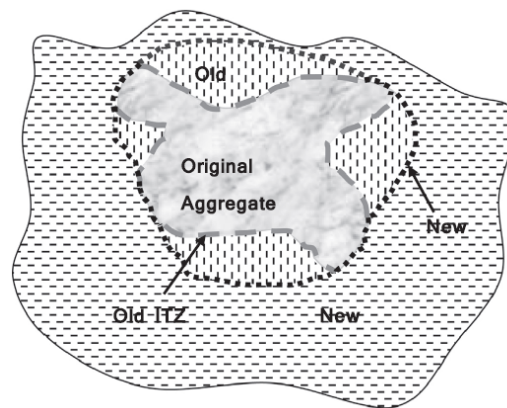
A elevada capacidade de absorção de água dos agregados reciclados demanda atenção e representa um desafio à produção de concretos de alta resistência, necessitando o emprego de técnicas que minimizem tal característica a fim de controlar a trabalhabilidade do concreto fresco e a resistência do concreto endurecido (ETXEBERRIA et al, 2007). A norma técnica ABNT NBR 15116/2004 indica a necessidade da pré-molhagem de tais agregados, previamente ao preparo de concretos sem função estrutural, utilizando o volume de água equivalente a 80% do volume de absorção total estimado a partir do ensaio de absorção d'água para o agregado reciclado (ABNT, 2004). A pré-molhagem dos agregados contribui à melhoria da trabalhabilidade da mistura de concreto fresco, reduzindo a necessidade do uso de aditivos superplastificantes (DIMITRIOU; SAVVA; PETROU, 2018).

Concretos produzidos com utilização integral de agregados reciclados graúdos sem tratamento apresentam resistência à compressão 20-25% menor, quando comparados aos concretos convencionais mantendo a mesma razão a/c efetiva e teor de cimento utilizado (ETXEBERRIA et al., 2007; MEYER, 2009; POON; SHUI; LAM, 2004). Ainda, a substituição parcial ou integral de agregados graúdos naturais por agregados reciclados, sem outras alterações no traço, também afetam e diminui a resistência à flexão, o módulo de elasticidade e a densidade do concreto produzido (DIMITRIOU; SAVVA; PETROU, 2018).

Devido ao teor residual de argamassa constante no agregado reciclado graúdo, o concreto produzido apresenta duas ZTI's de origens distintas, conforme a Figura 9. A ZTI interna à fase do agregado reciclado (antiga ZTI) possui geralmente densidade e resistência mecânica inferior à ZTI estabelecida entre a nova matriz cimentícia e o agregado reciclado (nova ZTI), atuando enquanto o elo mais fraco da microestrutura do concreto

(ETXE BERRIA et al., 2007; KISKU et al., 2016; LEE; CHOI, 2013). Diferentemente dos concretos convencionais (utilizando agregado natural) que geralmente falham em testes de compressão e tensão a partir das fissuras da ZTI, os concretos de agregados reciclados falham a partir das fissuras e vazios internos ao próprio agregado reciclado, preferencialmente através da antiga ZTI (LEE; CHOI, 2013).

Figura 09 - Representação esquemática das distintas zonas de transição interfacial presentes no concreto de agregado reciclado.



Fonte: KISKU et al. (2016).

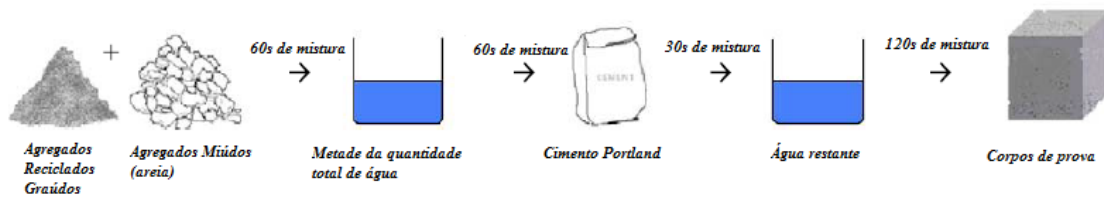
## 2.5 Técnicas à melhoria das propriedades de concreto de agregados reciclados

Alguns estudos foram conduzidos a fim de avaliar estratégias para a melhoria das propriedades de concretos de agregados reciclados, sobretudo no que tange a diminuição da porosidade e aumento da resistência do agregado reciclado, por meio do fortalecimento da antiga ZTI, bem como ao controle do teor de água à efetiva hidratação do CP e à reologia adequada da mistura. No que tange ao preparo de concretos, a forma convencional de mistura (*Normal Mixing Approach* - NMA), geralmente, implica em concretos cuja qualidade diminui proporcionalmente com o nível de substituição de agregados grãos naturais por reciclados (TAM; GAO; TAM, 2005). Então, novas técnicas de misturas foram propostas, dentre tais a mistura em dois estágios (*Two Stages Mixing Approach* – TSMA) que, devido aos seus resultados animadores, influenciou a investigação de outras variedades de mistura em dois estágios como o envelopamento dos agregados grãos com pasta cimentícia, processo nomeado por *Mortar Mixing Approach* (MMA), e o envelopamento dos agregados grãos com argamassa (pasta cimentícia + agregados miúdos), nomeado por *Sand Enveloped Mixing Approach* (SEMA) (KISKU et al., 2016; LE; BUI, 2020)



Ao preparo de concretos de agregados reciclados em duas etapas (TSMA), inicialmente são misturados os agregados graúdos e os miúdos e, após 60s em mistura, metade da quantidade total de água definida é adicionada ao meio, cujo qual sofre agitação por mais 60s e após, o teor de cimento Portland é então adicionado seguido de 30s de mistura e, finalmente, a outra metade de água é adicionada ao sistema. A mistura final permanece em agitação durante mais 120s. A representação esquemática do processo total pode ser visualizada a partir Figura 10 (TAM; GAO; TAM, 2005).

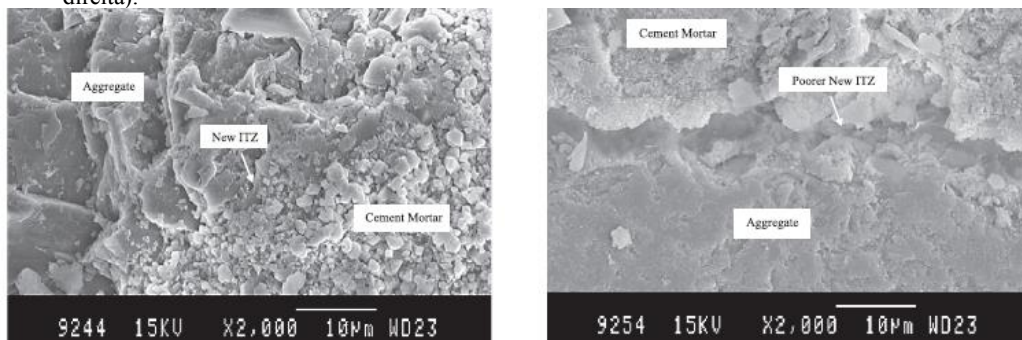
Figura 10 - Representação esquemática do método TSMA.



Fonte: TAM et al. (2005).

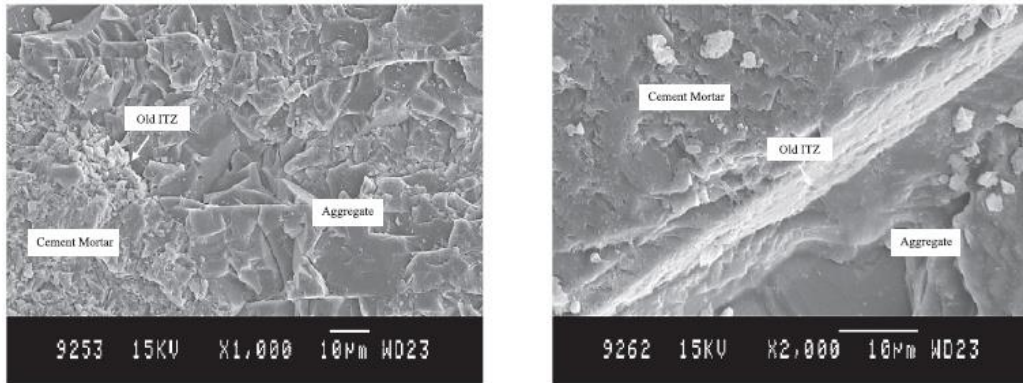
A metodologia TSMA à produção de concretos de agregados reciclados permite que os agregados sejam inicialmente envolvidos por uma estreita camada de pasta cimentícia, cuja qual permeia a estrutura porosa do teor de argamassa residual aderido aos agregados reciclados, preenchendo as fraturas e os espaços vazios. Imagens obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de ambas as zonas de transição interfaciais presentes em concretos de agregados reciclados (nova ZTI e antiga ZTI) produzidos por NMA e TSMA, Figuras 11 e 12, respectivamente, permitem concluir que o último (TSMA) acarreta no adensamento da antiga ZTI e a formação de novas zonas de transição interfaciais também mais densas, em comparação ao método de mistura tradicional. Assim, concretos de agregados reciclados produzidos por meio de TSMA apresentam resistência à compressão superior aos produzidos em uma única etapa (TAM; GAO; TAM, 2005).

Figura 11 - Micrografia da New ZTI obtida por MEV para corpos de prova obtidos por TSMA (à esquerda) e NMA (à direita).



Fonte: TAM et al. (2005).

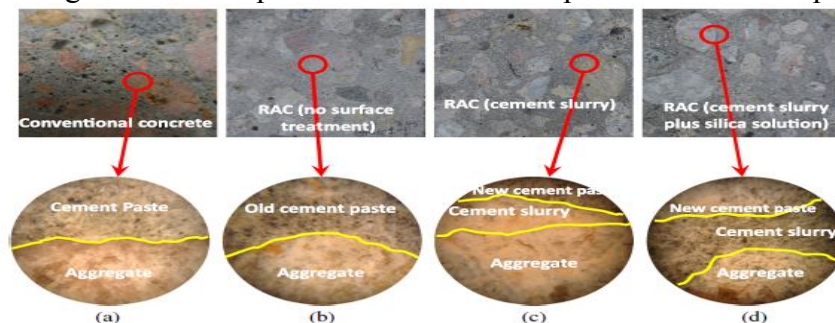
Figura 12 - Micrografia da Old ZTI obtida por MEV para corpos de prova obtidos por TSMA (à esquerda) e NMA (à direita).



Fonte: TAM et al. (2005).

Os resultados animadores obtidos a partir do método de mistura em dois estágios (TSMA) influenciaram outros pesquisadores a investigar novos caminhos à produção de concretos de agregados reciclados de alta resistência. Destes, destacam-se os métodos de revestimento superficial dos agregados reciclados por meio dos processos de mistura MMA e SEMA. Diferentemente do TSMA, no método MMA os agregados reciclados graúdos são inseridos à mistura após a formação da argamassa (75% da água total + areia + cimento (90s de mistura)) e, portanto, tais agregados tornam-se revestidos por uma camada de argamassa. Já no método SEMA, a etapa inicial de mistura consiste na mistura inicial, por 30s, de areia e 75% da água total, objetivando o envelopamento da areia com água. O cimento é então adicionado e o meio é agitado por mais 45s e, por fim, no último estágio, os agregados reciclados graúdos são inseridos. Tais métodos de mistura, utilizando a substituição integral dos agregados naturais por reciclados, foram comparados aos concretos convencionais, combinando o efeito de diferentes pré-tratamentos com os materiais de revestimento: pasta cimentícia e pasta de cimento com solução de sílica, cujas microestruturas resultantes podem ser visualizadas por meio da Figura 13 (LIANG et al., 2014).

Figura 13 - Micrografias da ZTI para amostras obtidas a partir de diferentes pré-tratamentos.



Fonte: Liang et al. (2014).

A partir da Figura 13, evidencia-se que o pré-tratamento dos agregados reciclados com suspensão de sílica adicionada à pasta de cimento possibilitou a formação de uma ZTI mais densa. De maneira geral, o revestimento superficial inicial dos agregados reciclados possibilitou o preenchimento de seus poros intrínsecos, melhorando a trabalhabilidade da mistura, bem como permitiu a adição de menores quantidades de água nas etapas posteriores à produção dos concretos de agregados reciclados e, portanto, a resistência de tais concretos pôde ser aprimorada significativamente (LIANG et al., 2014). Tais resultados serviram de base ao desenvolvimento de novas pesquisas a fim de avaliar diferentes tipos de materiais pozolânicos enquanto revestimento superficial de agregados reciclados (KISKU et al., 2016; LE; BUI, 2020).

## 2.6 Materiais pozolânicos

Materiais pozolânicos são compostos inorgânicos finamente cominuídos com atividade pozolânica capazes de reagir com o hidróxido de cálcio e água para formar silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), contribuindo à resistência mecânica de concretos e argamassas. Tais materiais podem ser obtidos a partir da cominuição de fontes naturais, como as rochas piroclásticas (origem vulcânica), bem como podem ser produzidos artificialmente, por meio de modificações químicas e ou estruturais de materiais que originalmente apresentam pouca ou nenhuma atividade pozolânica. São exemplos comuns de materiais pozolânicos artificiais as cinzas volantes (partículas finamente divididas obtidas após a queima de carvão pulverizado), as argilas e xistos queimados (temperatura da queima entre 600°C e 900°C) e o fumo de sílica ou sílica ativa (obtido após o processamento térmico em arco voltaico de metais silicosos e ferro silício em temperaturas até 2000°C) (HEWLETT; LISKA, 2019).

A atividade pozolânica de um material é aferida a partir da quantidade máxima de hidróxido de cálcio reagido com o material pozolânico, bem como pela taxa com que tal reação se processa. Dentre os parâmetros gerais que influenciam a atividade pozolânica de um material, citam-se: a natureza das fases ativas; o teor de  $\text{SiO}_2$ ; a razão entre a quantidade total de  $\text{Ca(OH)}_2$  e o material pozolânico na mistura; a duração da cura; a área superficial específica do material pozolânico; a razão entra a água e o teor de sólidos na mistura; e a temperatura (HEWLETT; LISKA, 2019). No Brasil, o método para a determinação de atividade pozolânica de materiais silicosos e sílico-aluminosos é o Chappelle modificado e é regido pela norma técnica ABNT NBR 15895/2010 (ABNT, 2010).

A norma técnica ABNT NBR 12653/2014 define, classifica e estabelece as exigências químicas e físicas aos materiais pozolânicos, com exceção à sílica ativa e ao metacaulim, à aplicação em concretos com cimento Portland. A aplicação de sílica ativa ao preparo de concretos de cimento Portland é regida, por sua vez, pela norma técnica ABNT NBR 13956-1/2012. Os requisitos físicos e químicos estabelecidos pelas normas supracitadas podem ser visualizados por meio da Tabela 3 (ABNT, 2014; ABNT, 2012).

Tabela 3 - Exigências químicas e físicas.

Propriedades	Classes de materiais pozolânicos		
	Naturais ou argilas calcinadas	Cinzas Volantes	Sílica Ativa
SiO <sub>2</sub> , % mín.	-	-	85
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % mín.	70,0	70,0	-
SO <sub>3</sub> , % máx.	4,0	5,0	-
Teor de umidade, % mín.		3,0	
Perda ao fogo, % máx.	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O, % máx.	1,5	1,5	Informar
Material retido na peneira 45 µm, % máx.	34	34	10,0
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % máx	75	75	-
Área específica (Ae) (m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> )	-	-	15 ≤ Ae ≤ 30

Fonte: Adaptado de ABNT (2014) e ABNT (2012).

### 3 METODOLOGIA

Os artigos científicos analisados foram selecionados a partir da Base de Dados de pesquisa científica e técnica *Science Direct*, acessada por meio do sistema Comunidade Acadêmica Federada (CAFE) do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

A avaliação quantitativa de artigos publicados correlatos ao presente tema nos periódicos científicos indexados na base de dados supracitada, desde 1994 até atualmente, sobre: concretos de agregados reciclados; concretos de agregados reciclados contendo materiais pozolânicos; concretos de agregados reciclados tratados contendo pozolanas; concretos de agregados reciclados tratados por meio de revestimento superficial, foi realizada utilizando as palavras-chave “Recycled Concrete Aggregate”; “Recycled Concrete Aggregate” e “Pozzolamics”; "Recycled Aggregate Concrete" e "Pozzolamics" e "Treatment"; "Recycled Aggregate Concrete" e "Pozzolamics" e "Treatment" e "Surface Coating", respectivamente.

A pesquisa de trabalhos científicos que investigaram o uso de pozolanas ao revestimento superficial de agregados reciclados objetivando a melhoria da adesão em concretos foi realizada em quatro etapas, devido à dificuldade em encontrar um número relevante de trabalhos em menor quantidade de pesquisas.

Os termos de busca utilizados para cada pesquisa realizada foram “Recycled Concrete Aggregate” e “Pozzolan” e “Surface” (1ª pesquisa), “Recycled Aggregates Concrete” e “Pozzolamics” e “Surface Coating” (2ª pesquisa), “Recycled Aggregates Concrete” e “Treatment” e “Surface Coating” (3ª pesquisa). Aos resultados de cada pesquisa foi aplicado o filtro “artigos de pesquisa” (“*research articles*”) e, posteriormente, foram elencados por relevância e pré-selecionados a partir do teor dos resumos disponíveis.

Os artigos pré-selecionados foram lidos e, os que satisfizeram o objetivo destacado inicialmente foram selecionados ao banco de artigos do presente trabalho. Os trabalhos selecionados foram tabelados e organizados por data de publicação, do mais antigo ao mais recente, a fim de proporcionar ao presente autor a compreensão da evolução cronológica das técnicas e materiais pozolânicos empregados ao tratamento de agregados reciclados de concreto ao preparo de concretos.

Ainda, a fim de avaliar a representatividade dos artigos selecionados por meio das três pesquisas iniciais, uma quarta pesquisa foi realizada e, desta vez, objetivou a seleção de

outros trabalhos de revisão bibliográfica sobre tratamentos de agregados reciclados de concreto, utilizando os termos de busca “Recycled Concrete Aggregate” e “Concrete” e “Treatment”.

Os trabalhos do banco de artigos selecionados foram lidos e fichados, avaliando: os materiais utilizados, sobretudo no que tange às características físicas e químicas dos materiais pozolânicos empregados; os métodos de tratamento dos ARC empregados; os métodos de preparo e composição dos concretos avaliados; as propriedades físicas, mecânicas e as características micro-estruturais comparadas entre concretos de agregados reciclados com e sem tratamentos. As citações dos referidos artigos foram extraídas da base de dados bibliográfica *SCOPUS*. As informações obtidas foram sistematizadas e apresentadas na seção de resultados e discussão.

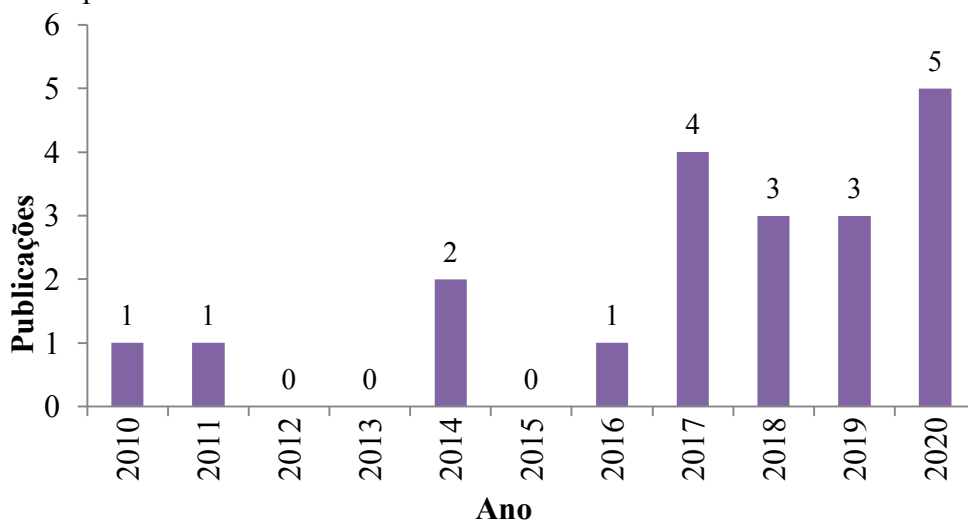
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta e discute os artigos científicos selecionados ao presente trabalho de revisão bibliográfica, bem como os tipos de materiais pozolânicos e técnicas de revestimento empregadas. Ainda, são apresentados os traços (composição dos concretos avaliados) avaliados e as variações percentuais para a trabalhabilidade (*slump*), e para a resistência à compressão dos concretos de agregados reciclados tratados em relação às espécies de controle, utilizando os materiais pozolânicos Sílica Ativa, Nano-Sílica e Cinzas Volantes a partir dos métodos PMT e TSMAM.

### 4.1 Avaliação quantitativa de artigos publicados correlatos ao presente tema por ano

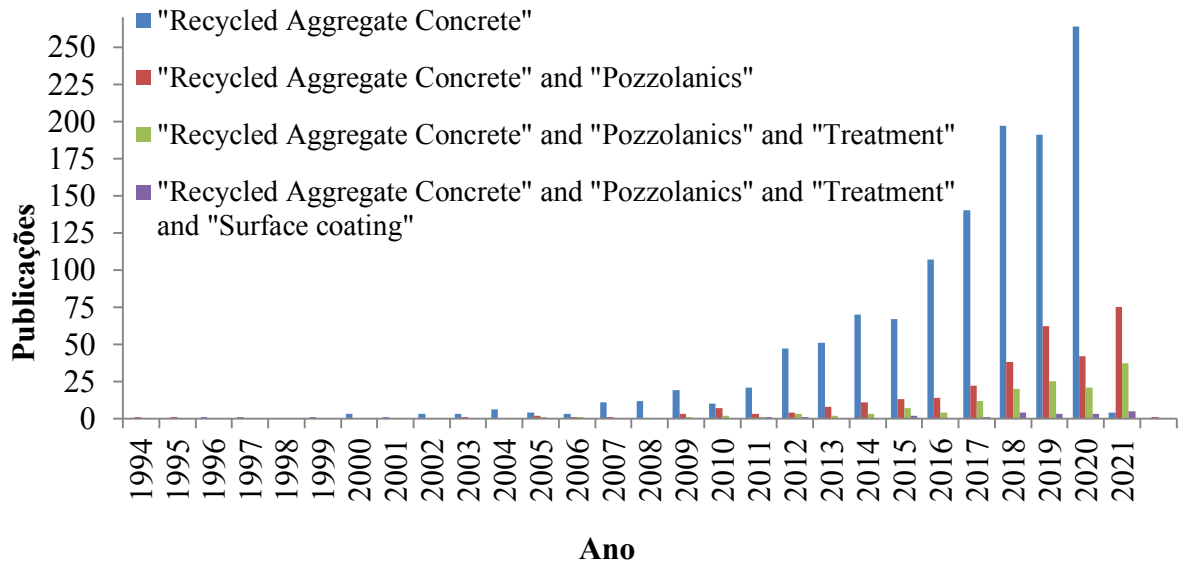
O número de artigos de pesquisa e de revisão bibliográfica publicados nos periódicos científicos indexados na base de dados bibliográfica *Science Direct*, desde 1994 até 2020, sobre concretos de agregados reciclados tratados por meio de revestimento superficial contendo pozolanas, pode ser visualizado na Figura 14. A Figura 15 relaciona o número de trabalhos encontrados sobre concretos de agregados reciclados (tratados ou não) contendo (ou não) pozolanas, e os dispõe para avaliação comparativa, legendando as séries conforme as palavras-chaves utilizadas.

Figura 14 – Número de artigos de pesquisa e de revisão sobre concretos de agregados reciclados tratados por revestimento superficial contendo materiais pozolânicos por ano.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 15 – Síntese da evolução cronológica de publicações de artigos correlatos por ano.



Fonte: Do autor (2020)

Conforme pode ser visualizado por meio das Figuras 14 e 15, as taxas anuais de publicações de artigos de pesquisa ou de revisão bibliográfica sobre os temas correlatos ao presente trabalho demonstram um crescimento mais relevante do final da última década, o que pode estar atrelado ao acirramento do debate da comunidade internacional para o desenvolvimento sustentável, o que inclui a investigação da produção e otimização de concretos de agregados reciclados enquanto estratégia ao gerenciamento ambientalmente adequado de resíduos de construção civil.

#### 4.2 Artigos de Pesquisa Selecionados

Os artigos científicos selecionados ao presente trabalho de revisão bibliográfica foram elencados cronologicamente e, conjuntamente aos respectivos periódicos científicos de origem, ano da publicação e o número de citações, podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4 - Banco de artigos selecionados à presente revisão bibliográfica (Continua).

Nº	Nome do artigo	Periódico	Ano	Citações	Citado como
1	Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate.	Journal of Materials in Civil Engineering	2004	177	(KATZ, 2004)



Tabela 4 - Banco de artigos selecionados à presente revisão bibliográfica (Continua).

Nº	Nome do artigo	Periódico	Ano	Citações	Citado como
2	Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA and TSMA <sub>sc</sub> .	Construction and Building Materials	2008	128	(TAM; TAM, 2008)
3	Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete.	Construction and Building Materials	2009	146	(LI; XIAO; ZHOU, 2009)
4	Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete.	Construction and Building Materials	2010	193	(KONG et al., 2010)
5	Strength prediction model and methods for improving recycled aggregate concrete.	Construction and Building Materials	2013	58	(YOUNIS; PILAKOUTAS, 2013)
6	Surface Treatment on Recycled Coarse Aggregates with Nanomaterials.	American Society of Civil Engineers	2015	27	(ZHANG et al., 2015)
7	Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics.	Construction and Building Materials	2016	42	(SARAVANAK UMAR; ABHIRAM; MANOJ, 2016)

Tabela 4 - Banco de artigos selecionados à presente revisão bibliográfica (Conclusão).

Nº	Nome do artigo	Periódico	Ano	Citações	Citado como
8	Effects of nano-particles on failure process and microstructural properties of recycled aggregate concrete.	Construction and Building Materials	2017	66	(LI et al., 2017)
9	Effect of mixing methods of nano silica on properties of recycled aggregate concrete.	Structural Concrete	2018	18	(SHAIKH, 2017)
10	Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate.	Construction and Building Materials	2018	33	(BUI; SATOMI; TAKAHASHI, 2018)
11	Modifying recycled aggregate concrete by aggregate surface treatment using sulphoaluminate cement and basalt powder.	Construction and Building Materials	2018	5	(ZHANG et al., 2018)
12	Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry.	Construction and Building Materials	2019	8	(MOHAMED et al., 2019)
13	An industrial applicable method to improve the properties of recycled aggregate concrete by incorporating nano-silica and micro-CaCO <sub>3</sub> .	Journal of Cleaner Production	2020	0	(YUE et al., 2020)

Fonte: Do autor (2020).

Conforme a Tabela 4, apenas 13 artigos com o conteúdo relevante ao presente trabalho foram encontrados, apesar das diferentes estratégias de pesquisa adotadas. Somando-se ao relativamente baixo número de artigos selecionados, observa-se que 62% dos artigos considerados foram publicados nos últimos 5 anos, evidenciando que o campo de pesquisa analisado é recente. Ainda, nota-se a relevância do Periódico Científico *Construction and Building Materials* (Fator de impacto: 4,419) ao presente tema, ao ser veículo de publicação para 62% dos artigos selecionados.

#### 4.3 Materiais pozolânicos e métodos de revestimento de agregados reciclados de concreto empregados

Os diferentes tipos de materiais pozolânicos e métodos ao revestimento dos agregados reciclados adotados nos artigos avaliados à produção de concretos de agregados reciclados podem ser visualizados a partir da Tabela 5. As siglas PMT e TSMAM representam o pré-tratamento anterior à mistura e o tratamento por meio da mistura em dois estágios (modificado), respectivamente.

Tabela 5 - Materiais pozolânicos e métodos de tratamentos empregados ao revestimento superficial de agregados reciclados à produção de concretos (Continua).

<b>Artigo</b>	<b>Pozolana empregada</b>	<b>Método de revestimento empregado</b>
01	Sílica Ativa (SF)	PMT
02	Sílica Ativa (SF)	TSMAM
03	Cinzas Volantes (FA), Sílica Ativa (SF), Escória de Alto Forno (S)	TSMAM
04	Cinzas Volantes (FA), Escória de Alto Forno (S)	TSMAM
05	Sílica Ativa (SF), Escória de Alto Forno (S), Cinzas Volantes (FA)	TSMAM
06	Nano-sílica (NS)	PMT
07	Sílica Ativa (SF)	PMT
08	Nano-Sílica (NS)	TSMAM
09	Nano-Sílica (NS)	PMT
10	Sílica Ativa (SF)	PMT
11	Pó de Basalto (BP)	PMT

Tabela 5 - Materiais pozolânicos e métodos de tratamentos empregados ao revestimento superficial de agregados reciclados à produção de concretos (Conclusão).

<b>Artigo</b>	<b>Pozolana empregada</b>	<b>Método de revestimento empregado</b>
12	Cinzas Volantes (FA), Sílica Ativa (SF) e Nano-Sílica (NS)	PMT
13	Sílica Ativa (SF), Cinzas Volantes (FA) e Nano-Sílica (NS)	TSMAM

Fonte: Do Autor, 2020.

A análise da Tabela 5 permite concluir que os materiais pozolânicos mais utilizados foram, em ordem decrescente, a Sílica Ativa (36%), as Cinzas Volantes (23%) e a Nano-Sílica (23%) que, juntos, representam 82% dos tipos de pozolanas empregadas. O escalonamento por data de publicação dos artigos à síntese da presente tabela permite a constatação da recente investigação do potencial da pozolana Nano-Sílica ao revestimento de agregados reciclados, cujos efeitos reportados serão discutidos posteriormente. Os valores médios referentes às propriedades físicas e químicas das principais pozolanas empregadas reportadas nos trabalhos analisados podem ser visualizados por meio da Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades físicas e químicas médias para a Sílica Ativa, Cinza Volante e Nano-Sílica (Continua).

<b>Propriedades</b>	<b>Classes de materiais pozolânicos</b>			<b>Artigo(s)</b>
	<b>Sílica Ativa</b>	<b>Cinzas Volantes</b>	<b>Nano-Sílica</b>	
SiO <sub>2</sub> (%)	93,38	47,25	97,99	1, 2, 10, 12
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	96,67	87,23	98,35	2, 10, 12
SO <sub>3</sub> (%)	0,205	0,51	0,38	2, 12
Perda ao fogo (%)	2,87	4,7	-	2, 3, 5
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O (%)	0,19	-	-	2
Material retido na peneira 45 μm (%)	-	15,8	-	4
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação ao controle (%)	107	87,95	-	4, 5

Tabela 6 - Propriedades físicas e químicas médias para a Sílica Ativa, Cinza Volante e Nano-Sílica (Conclusão).

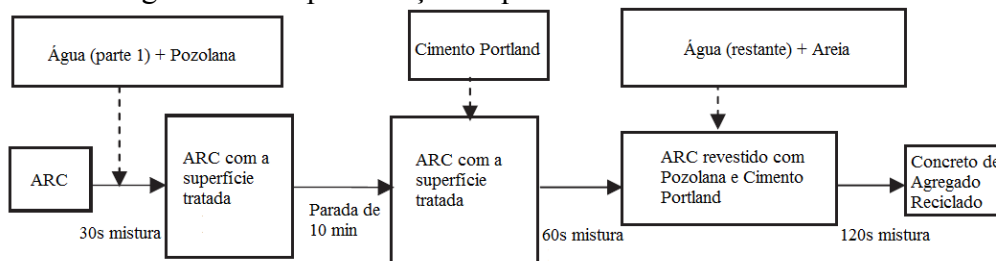
Propriedades	Classes de materiais pozolânicos			Artigo(s)
	Sílica Ativa	Cinzas Volantes	Nano-Sílica	
Área específica ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	21,45	0,41	160	1, 2, 3, 5, 12

Fonte: Do Autor, 2020.

A partir da análise comparativa entre as Tabelas 3 e 6, pode-se concluir que as pozolanas utilizadas nos estudos conduzidos estão conforme os requisitos estabelecidos pelas normas técnicas ABNT NBR 12653 e ABNT NBR 13956-1. Ainda, a partir da Tabela 2, observa-se que a Nano-Sílica é a pozolana com maior teor percentual de  $\text{SiO}_2$  (97,99%), seguida da Sílica Ativa (93,38%) que, por sua vez, apresenta índice de atividade pozolânica aos 28 dias 26% superior às Cinzas Volantes que contêm, em média, 47,25% de  $\text{SiO}_2$ .

Conforme a Tabela 6, dentre os métodos de revestimento reportados, 44% dos trabalhos empregaram o método PMT e 38% avaliaram o método TSMAM. Diferentemente do método TSMA, descrito na seção 2, no qual os agregados reciclados são revestidos com pasta de argamassa no primeiro estágio e, logo em seguida, os demais constituintes do traço são adicionados, no primeiro estágio do método TSMAM os agregados reciclados graúdos são envolvidos pela pasta formada integralmente por material pozolânico e água ou em pasta cimentícia com determinado teor de cimento Portland substituído por pozolana, conforme a Figura 16 (KONG et al., 2010; LI; XIAO; ZHOU, 2009; LI et al., 2017; TAM; TAM, 2008; YOUNIS; PILAKOUTAS, 2013; YUE et al., 2020).

Figura 16 – Representação esquemática do método TSMAM.

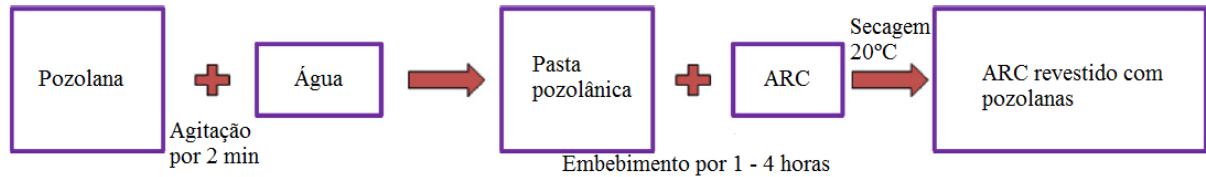


Fonte: Adaptado de Younis e Pilakoutas (2013).

Já no método PMT (Figura 17), de modo geral, os agregados reciclados graúdos são banhados em uma suspensão de pozolanas em água e, posteriormente, dispostos em condições

de umidade e temperatura específicas até que os agregados tratados atinjam uma umidade estabelecida, geralmente a condição de sólido saturado com superfície seca, previamente a sua utilização enquanto agregados reciclados graúdos da mistura de concreto (BUI; SATOMI; TAKAHASHI, 2018; KATZ, 2004; MOHAMED et al., 2019; SARAVANAKUMAR; ABHIRAM; MANOJ, 2016; SHAIKH, 2017; ZHANG et al., 2015, 2018).

Figura 17 – Representação esquemática do método PMT.



Fonte: Adaptado de Shaban et al. (2019).

O avanço percentual das propriedades físicas e mecânicas de concretos com agregados reciclados tratados a partir dos métodos PMT e TSMAm serão discutidos posteriormente.

#### 4.4 Traço e propriedades de concretos de agregados reciclados revestidos com Sílica Ativa a partir do método PMT

Os traços, teores de Sílica Ativa empregados e as variações percentuais da trabalhabilidade (*slump*) e de resistência à compressão de concretos de agregados reciclados revestidos com Sílica Ativa a partir do método PMT, reportados nos trabalhos selecionados, podem ser visualizadas a partir da Tabela 7. As variações apresentadas estão em comparação aos concretos de agregados reciclados sem tratamento de referência.

Tabela 7 - Traço e propriedades de concretos de agregados reciclados com tratamento superficial com Sílica Ativa por meio do PMT (Continua).

Artigo	Traço (ARC Graúdo : Agreg. Miúdo : Água efetiva : CP)	Proporção mássica (%) (Pozolana:CP)	Varição do <i>slump</i> (%)	Varição da resistência à compressão * (%)
01	3,38 : 1,30 : 0,53 : 1	2,5	Não informado	+16,0
07	3,12 : 1,92 : 0,45 : 1	Não informado	+15,0	+22,0
10	2,26 : 2,01 : 0,52 : 1	5,0	Não informado	+14,0

\*Propriedades aferidas aos 28 dias.

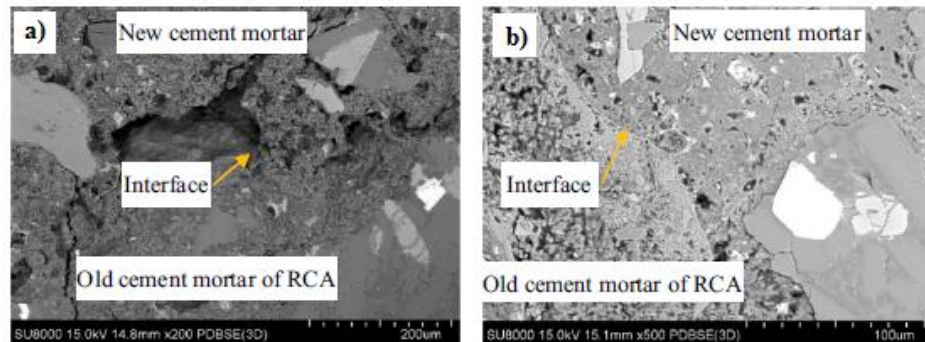
Fonte: Do autor (2020).

A partir da Tabela 7 pode-se observar que o revestimento superficial de agregados reciclados com Sílica Ativa, a partir do método PMT, resultou na melhoria do comportamento mecânico dos concretos de agregados tratados quando comparados às espécies sem tratamento em todos os estudos realizados. Em destaque, o artigo 7 (*Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics*) apresentou o melhor resultado para a resistência à compressão pois, além do revestimento superficial, os agregados reciclados foram tratados em solução de HCl a fim de remover a porosa argamassa residual comumente presente em ARC's (SARAVANAKUMAR; ABHIRAM; MANOJ, 2016). Ainda, pode-se concluir que a trabalhabilidade (*slump*) do concreto no estado fresco também foi superior ao concreto de referência.

Os presentes tratamentos empregados possibilitaram o preenchimento dos poros e microfissuras presentes nos agregados reciclados com micropartículas de Sílica Ativa, resultando na diminuição da capacidade de absorção de água e no aumento da resistência mecânica dos agregados, tanto devido ao efeito preenchedor, quanto à ação pozolânica da Sílica Ativa que converte os cristais de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  presentes em novas fases de C-S-H, densificando a microestrutura da argamassa residual presente no ARC (BUI; SATOMI; TAKAHASHI, 2018; KATZ, 2004; SARAVANAKUMAR; ABHIRAM; MANOJ, 2016).

A diminuição da capacidade de absorção de água dos agregados acarreta na formação de ZTI's mais densificadas, conforme podemos visualizar na Figura 18 e, portanto, mais resistentes, devido à menor razão água/cimento estabelecida na região durante a cura, o que desfavorece a formação local de portlandita. Ainda, as partículas de Sílica Ativa aderidas à superfície do ARC reagem com a portlandita formada na nova ZTI durante a hidratação do CP, contribuindo à formação de C-S-H, o que diminui a porosidade da ZTI e melhora o desempenho mecânico de concretos produzidos com agregados reciclados (BUI; SATOMI; TAKAHASHI, 2018; KATZ, 2004; SARAVANAKUMAR; ABHIRAM; MANOJ, 2016). A melhoria da trabalhabilidade reportada também é resultante da menor absorção de água dos agregados reciclados tratados, aumentando a disponibilidade de água efetiva à hidratação do CP (KATZ, 2004, p. 600).

Figura 18 - Micrografias da Zona de Transição Interfacial obtidas por BSE do RAC sem tratamento (a) e (b) com ARC tratados com 5% de SF.



Fonte: Bui et al. (2018).

#### 4.5 Traço e propriedades de concretos de agregados reciclados revestidos com Nano-Sílica a partir do método PMT

Os traços, os teores de Nano-Sílica empregados e as variações percentuais da trabalhabilidade (*slump*) e de resistência à compressão de concretos de agregados reciclados revestidos com Nano-Sílica a partir do método PMT, reportados nos trabalhos selecionados, podem ser visualizadas a partir da Tabela 8. As variações apresentadas estão em comparação aos concretos de agregados reciclados sem tratamento.

Tabela 8 - Traço e propriedades de concretos de agregados reciclados com tratamento superficial com Nano-Sílica por meio do PMT (Continua).

Artigo	Traço (ARC Graúdo : Agreg. Miúdo : Água efetiva : Cimento)	Proporção mássica (%) (Pozolana:CP)	Varição do <i>slump</i> (%)	Varição da resistência à compressão* (%)
06	3,26 : 2,17 : 0,50 : 1	1,44	+12,0	+14,0
09	2,79 : 1,52 : 0,40 : 1	2,00	+64,0	+25,0

\*Propriedades aferidas aos 28 dias.

Fonte: Do autor (2020).

Assim como para o revestimento superficial com Sílica Ativa, a utilização de Nano-Sílica ao tratamento de agregados reciclados ao preparo de concretos também afetou positivamente a trabalhabilidade e a resistência à compressão dos concretos de agregados reciclados avaliados, conforme pode ser visualizado na Tabela 8. Ainda, a comparação entre os desempenhos de concretos tratados com Sílica Ativa e com Nano-Sílica, a partir das



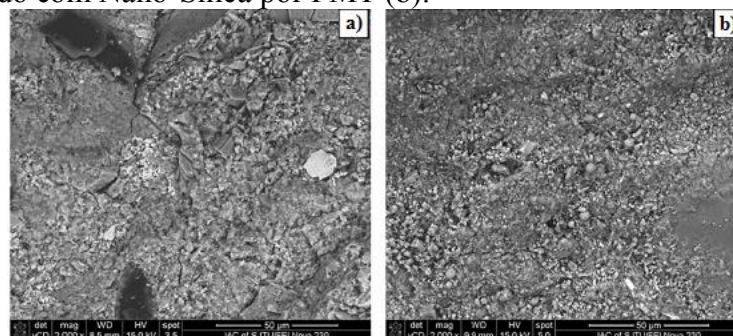
Tabelas 7 e 8, permite constatar que, apesar dos menores teores percentuais de Nano-Sílica, as variações para o *slump* e para a resistência à compressão avaliadas foram tão positivas, ou superiores, quanto aos tratamentos com Sílica Ativa.

O notável ganho de trabalhabilidade reportado pelo Artigo 09 deve-se também à utilização de 4,38 kg/m<sup>3</sup> de superplastificantes no concreto com agregados reciclados tratados. Em comparação, os concretos de agregados reciclados sem tratamento (referência) não foram elaborados com a adição de superplastificantes (SHAIKH, 2017, p. 4).

No que tange ao comportamento mecânico, avaliado pelos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, a melhoria alcançada deve-se ao papel fortalecedor da Nano-Sílica às ZTI's desenvolvidas entre o ARC e a nova matriz cimentícia e ao fortalecimento do próprio ARC, tanto por meio do efeito preenchedor, quanto pela elevada atividade pozolânica que contribui à formação de C-S-H adicional na ZTI e internamente à argamassa residual do ARC, densificando tais regiões e aumentando as forças de ligação entre a nova argamassa e o ARC (SHAIKH, 2017; ZHANG et al., 2015).

A comparação entre as superfícies de agregados reciclados não tratados e os revestidos superficialmente com Nano-Sílica pode ser realizada a partir das micrografias obtidas por MEV (Figura 19) das superfícies de ambos os tipos de agregados. Os agregados reciclados não tratados apresentam superfície rugosa, não homogênea e largamente porosa, conforme a Figura 19 (a). Já a superfície dos agregados revestidos com Nano-Sílica, Figura 19 (b), apresenta-se mais homogênea, com menor porosidade e volume de vazios. Conseqüentemente, a trabalhabilidade do concreto com tais agregados reciclados tratados no estado fresco, em virtude da menor porosidade e menor rugosidade superficial, é superior ao sem tratamento (MOHAMED et al., 2019).

Figura 19 - Imagem SEM (2.000 x) da superfície agregado reciclado sem tratamento (a) e tratado com Nano-Sílica por PMT (b).



Fonte: Mohamed et al. (2019).

#### 4.6 Traço e propriedades de concretos de agregados reciclados revestidos com Cinzas Volantes a partir do método PMT

Dentre os trabalhos avaliados, apenas um dos estudos (Artigo 12) realizou o revestimento superficial de agregados com Cinzas Volantes a partir do método PMT. Entretanto, além das Cinzas Volantes, a suspensão utilizada no pré-tratamento adotado também incluiu um teor de Sílica Ativa, portanto, não foi possível a análise do efeito individual das Cinzas Volantes enquanto revestimento superficial de agregados reciclados de concreto.

#### 4.7 Traço e propriedades de concretos de agregados reciclados revestidos com Sílica Ativa a partir do método TSMAM

Os traços, os teores de Sílica Ativa empregados e as variações percentuais da trabalhabilidade (*slump*) e de resistência à compressão de concretos de agregados reciclados revestidos com Nano-Sílica a partir do método TSMAM, reportados nos trabalhos selecionados, podem ser visualizadas a partir da Tabela 9. As variações apresentadas estão em comparação aos concretos de agregados reciclados sem tratamento.

Tabela 9 - Traço e propriedades de concretos de agregados reciclados com tratamento superficial com Sílica Ativa por meio do TSMAM.

Artigo	Traço (Agreg. Graúdo: Agreg. Miúdo : Água efetiva : Aglomerantes)	Proporção mássica (%) (Pozolana:CP)	Variação do <i>slump</i> (%)	Varição da resistência à compressão* (%)
02	2,70** : 1,80 : 0,45 : 1	2,00	Não informado	+19,50
03	2,52 : 1,30 : 0,44 : 1	25,00	+18,00	+22,00
05	3,94 : 1,64 : 0,47 : 1	1,90	+00,00	+17,00

\*Propriedades aferidas aos 28 dias.  
\*\* 25% ARC; 75% AN

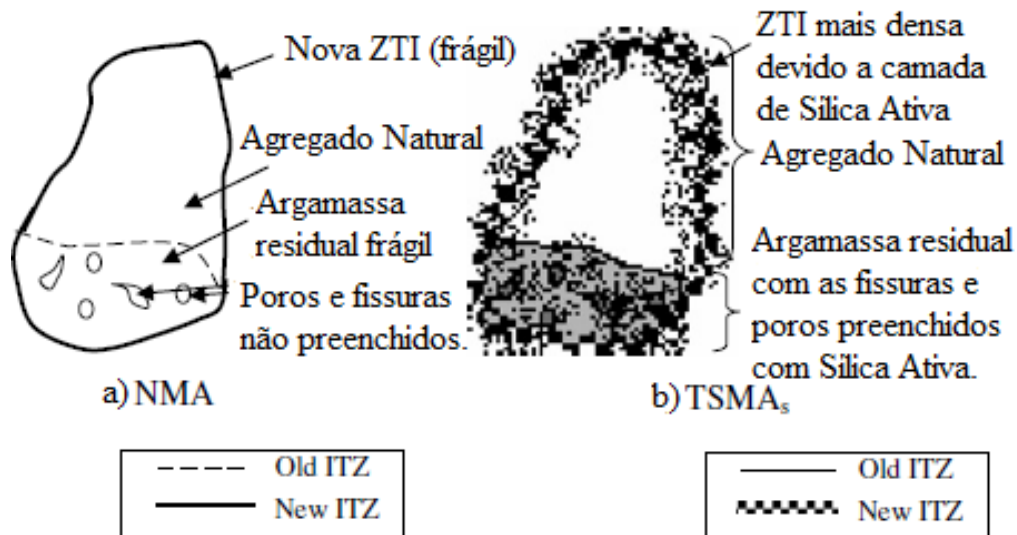
Fonte: Do autor (2020).

Conforme podemos observar a partir da Tabela 9, o revestimento superficial de agregados reciclados com Sílica Ativa pelo método TSMAM também tem efeitos positivos

sobre a resistência à compressão e à trabalhabilidade do concreto no estado fresco (para maiores teores de Sílica Ativa empregados).

Diferentemente do método convencional de preparo de concretos (NMA), nos presentes tratamentos (TSMAM com Sílica Ativa) os agregados reciclados são revestidos durante a mistura por uma camada superficial de Sílica Ativa que atua enquanto agente de reforço, preenchendo os espaços vazios internos ao agregado reciclado, sobretudo os existentes no teor de argamassa residual, densificando e fortalecendo a estrutura, conforme a Figura 20 (b) (TAM; TAM, 2008).

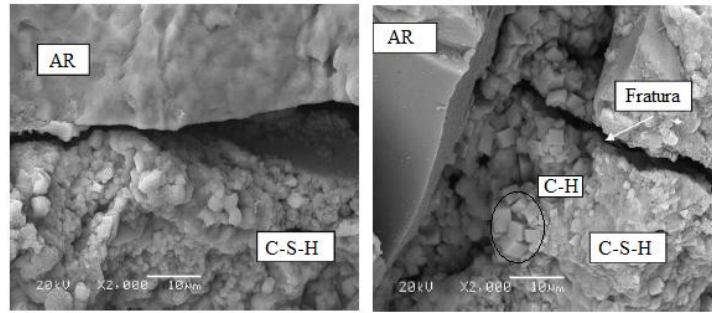
Figura 20 - Representação da estrutura do ARC adotando (a) NMA e (b) TSMAM.



Fonte: Tam e Tam (2008).

O aumento da trabalhabilidade, conforme reportado pelo Artigo 3 (Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete), deve-se ao espesso filme de revestimento formado ao redor do agregado reciclado, cujo qual oferece resistência à difusão da água disponível à hidratação do CP (água efetiva) ao interior do ARC. Tal filme não apenas influencia a trabalhabilidade, como também permite o desenvolvimento de uma Zona de Transição Interfacial majoritariamente composta por C-S-H, como pode ser visualizado na Figura 21 (a) e, portanto, melhorando o comportamento mecânico do concreto de agregado reciclado. Em comparação, a Figura 21 (b) apresenta a microestrutura fraturada da ZTI desenvolvida sem revestimento com Sílica Ativa e com elevado teor de C-H (LI; XIAO; ZHOU, 2009).

Figura 21 - MEV da ZTI de RAC com tratamento (a) e sem tratamento (b).



Fonte: Adaptado de Li, Xiao e Zhou (2009).

Ainda, tal tratamento empregado não apenas gera ZTI's mais densas e resistentes, como também fortalece o próprio agregado reciclado ao preencher seus espaços vazios (efeito filler), ao reagir com o teor de CH acumulado na argamassa residual do ARC gerando C-S-H e ao melhorar a adesão das partículas “soltas” superficiais, residuais do processo de obtenção do ARC, à estrutura do ARC (YOUNIS; PILAKOUTAS, 2013).

#### 4.8 Traço e propriedades de concretos de agregados reciclados revestidos com Nano-Sílica a partir do método TSMAM

Os traços, os teores de Nano-Sílica empregados e as variações percentuais da trabalhabilidade (*slump*) e de resistência à compressão de concretos de agregados reciclados revestidos com Nano-Sílica a partir do método TSMAM, reportados nos trabalhos selecionados, podem ser visualizadas a partir da Tabela 10. As variações apresentadas estão em comparação aos concretos de agregados reciclados sem tratamentos.

Tabela 10 - Traço e propriedades de concretos de agregados reciclados com tratamento superficial com Nano Sílica por meio do TSMAM.

Artigo	Traço (Agreg. Graúdo: Agreg. Miúdo : Água efetiva : Aglomerantes)	Proporção mássica (%) (Pozolana:CP)	Variação do <i>slump</i> (%)	Varição da resistência à compressão* (%)
08	3,24** : 1,67 : 0,50 : 1	2,00	Não	+21,60
13	1,99 : 1,07 : 0,44 : 1***		informado	+17,00

\*Propriedades aferidas aos 28 dias.

\*\*30% ARC

\*\*\*10% FA; 5% SF; 2% NS; 1% MC; 82% CP

Fonte: Do autor (2020).

Conforme pode ser observado na Tabela 10, os tratamentos empregados resultaram em importantes contribuições às resistências a compressão dos concretos de agregados reciclados produzidos. Tais trabalhos não investigaram a trabalhabilidade dos concretos avaliados.

Diferentemente do método PMT, no qual o teor excedente de material pozzolânico empregado ao revestimento é removido anteriormente à mistura, no método TSMAM o teor de pozolana empregado é significativo quando se avalia a hidratação do CP. A adição de Nano-Sílica, mesmo nos teores reportados, acelera as taxas de hidratação do CP, ao atuar no meio enquanto ponto de nucleação para C-S-H. Nos períodos iniciais da hidratação o ganho de resistência é devido tanto ao fornecimento de pontos de nucleação, quanto à reação pozzolânica entre a Nano-Sílica e o  $\text{Ca(OH)}_2$  (YUE et al., 2020).

A incorporação de Nano-Sílica por meio do método TSMAM, além de acelerar as taxas de hidratação do CP, também fortalece o teor de argamassa residual existente originalmente nos ARC's, tanto devido aos efeitos físicos (efeito preenchedor), quanto à ação pozzolânica que forma, adicionalmente, C-S-H, preenchendo os espaços vazios. Ainda, tal pozolana é capaz de alcançar com facilidade e fortalecer as ZTI's novas e antigas, formando mais produtos de hidratação, como o C-S-H, em tais regiões (LI et al., 2017).

#### 4.9 Traço e propriedades de concretos de agregados reciclados revestidos com Cinzas Volantes a partir do método TSMAM

Os traços, os teores de Cinzas Volantes empregados e as variações percentuais da trabalhabilidade (*slump*) e de resistência à compressão de concretos de agregados reciclados revestidos com Cinzas Volantes a partir do método TSMAM, reportados nos trabalhos selecionados, podem ser visualizadas a partir da Tabela 11. As variações apresentadas estão em comparação aos concretos de agregados reciclados sem tratamentos.

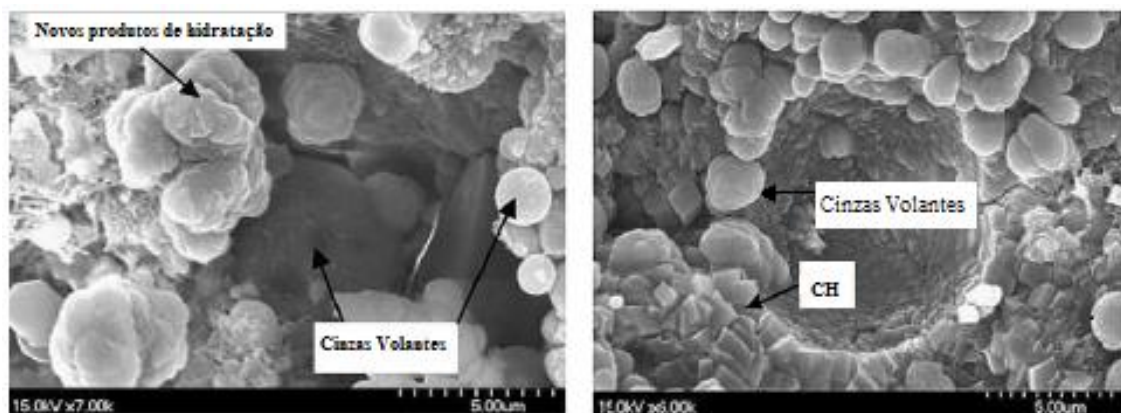
Tabela 11 - Traço e propriedades de concretos de agregados reciclados com tratamento superficial com Cinzas Volantes por meio do TSMAM.

Artigo	Traço (ARC Graúdo: Agreg. Miúdo : Água efetiva : CP)	Proporção mássica (%) (Pozolana:CP)	Variação do <i>slump</i> (%)	Varição da resistência à compressão (%)
03	2,02 : 1,04 : 0,44 : 1	25,00	+83,30	+0,5
05	3,68 : 1,60 : 0,47 : 1	1,1	+7,70	-2,62

Fonte: Do autor (2020).

Conforme pode ser visualizado a partir da Tabela 11, o emprego de Cinzas Volantes ao revestimento superficial de agregados reciclados graúdos não resultou em significativo aumento da resistência à compressão. Tal comportamento é justificado pela incapacidade de tal pozolana em preencher as microfissuras presentes na superfície do ARC, bem como em reagir com cristais de CH à geração de C-S-H adicional, conforme pode ser visualizado na Figura 22 que, aos 28 dias de cura, quantidades significativas de CH ainda estão presentes na ZTI (YOUNIS; PILAKOUTAS, 2013). Entretanto, a adição de 25% de material pozolânico, com relação à massa de cimento, acarretou na melhoria da trabalhabilidade dos concretos de agregados reciclados. As melhorias das trabalhabilidades reportadas é consequência do espesso filme que reveste os agregados reciclados, o que dificulta a absorção de água, permitindo o aumento da trabalhabilidade (LI; XIAO; ZHOU, 2009).

Figura 22 - Micrografias obtida por MEV da Zona de Transição Interfacial entre a argamassa residual do ARC e a nova argamassa formada pela hidratação do CP ao 1º dia de cura (à esquerda) e ao 28º dia de cura (à direita).



Fonte: Kong et al. (2010).

#### 4.10 Técnicas de caracterização microestrutural à avaliação da adesão dos agregados reciclados na matriz de concretos de agregados reciclados

Dentre os artigos avaliados, diversas técnicas de caracterização foram empregadas à avaliação microestrutural da região de interface entre os agregados reciclados graúdos tratados e a nova matriz de CP hidratada (nova ZTI) a fim de investigar as propriedades macroestruturais, como a resistência a compressão, reportadas. Tais técnicas estão sintetizadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Técnicas de caracterização microestrutural reportadas.

Artigos	Técnica(s) adotada(s)
2, 3	Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV
4, 5, 12	Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV aliada à análise de composição elementar por Espectroscopia de energia dispersiva de raios X - EDX
6	Nanoidentação – NI
7	MEV e Difractometria de Raios X – DRX
8, 9	MEV e Porosimetria por Intrusão de Mercúrio - MIP
10	Elétrons Retroespalhados – BSE
11	Ensaio de Microdureza (Dureza Vickers) e MEV
13	Análise Termogravimétrica – TG, DRX, MEV e NI

Fonte: Do autor (2020).

A partir de micrografias obtidas por MEV e BSE foi possível identificar visualmente as principais fases hidratadas, bem como a presença de vazios ou microfissuras constantes nas ZTI's estabelecidas entre os AR's e as novas matrizes de CP hidratadas. Assim, a constatação visual das ZTI's de concretos de agregados reciclados tratados mais densas, ou seja, com menor porosidade, maior presença de C-S-H e menores teores de cristais de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , em comparação aos concretos de agregados reciclados sem tratamento, aliada às variações percentuais positivas à resistência a compressão, justificou as propriedades macroestruturais reportadas e permitiu a avaliação da efetividade do tipo de revestimento superficial empregado à melhoria da adesão dos agregados reciclados de concreto (TAM; TAM, 2008; LI; XIAO; ZHOU, 2009).

Em complemento às técnicas visuais, a avaliação da composição elementar por EDX das regiões micrografadas das ZTI's possibilitou a identificação das fases observadas com maior acurácia, bem como a avaliação das razões atômicas locais Ca/Si. ZTI's mais porosas apresentaram em concretos de agregados reciclados sem tratamento elevadas razões atômicas Ca/Si, o que mostra a prevalência quantitativa da fase portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) em comparação à de C-S-H, corroborando as imagens obtidas por MEV. A redução das razões atômicas Ca/Si locais em ZTI's de concretos de agregados reciclados tratados com revestimento superficial por pozolanas indicou tanto a menor razão água/cimento local durante as idades iniciais de hidratação devido ao efeito impermeabilizante de tais revestimentos, quanto à própria ação

pozolânica dos materiais empregados (KONG et al., 2010; YOUNIS; PILAKOUTAS, 2013; MOHAMED et al., 2019).

Os ensaios de dureza localizados, como a nanoindentação e o ensaio de microdureza Vickers permitiu aos autores o mapeamento bidimensional da distribuição do módulo de elasticidade (MPa), da microdureza (MPa) e a determinação largura média das ZTI's ( $\mu\text{m}$ ). A comparação entre tais informações permitiu o correlacionamento com as propriedades macroestruturais reportadas, sobretudo à resistência a compressão. Os concretos de agregados reciclados tratados com revestimento superficial com materiais pozolânicos reportaram variações positivas do módulo de elasticidade e da microdureza tanto das ZTI's estabelecidas entre os agregados reciclados e a nova matriz de CP hidratado, quanto do teor residual de argamassa aderida aos agregados reciclados (ZHANG et al., 2015; ZHANG et al., 2018; YUE et al., 2020).

A realização de ensaios termogravimétricos (TG) e de difratometria de raios X (DRX), por sua vez, possibilitaram aos pesquisadores a determinação dos teores de  $\text{Ca(OH)}_2$  de concretos de agregados reciclados produzidos com ou sem tratamento por revestimento superficial com pozolanas. Em geral, os concretos produzidos com agregados reciclados tratados apresentaram menores teores de portlandita em comparação aos não tratados, devido, principalmente, ao consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  à formação de C-S-H adicional, por meio das reações pozolânicas (SARAVANAKUMAR; ABHIRAM; MANOJ, 2016; YUE et al., 2020).

As propriedades macroestruturais reportadas dentre os tratamentos avaliados em comparação aos concretos com agregados reciclados não tratados, como a resistência à compressão, puderam então ser analisadas conjuntamente às técnicas de caracterização microestruturais adotadas. Entretanto, a avaliação das forças de tração, em módulo, necessárias ao rompimento da adesão entre os agregados reciclados tratados e a nova matriz de CP hidratada não foi reportada, o que evidencia a necessidade do desenvolvimento de técnicas específica para tal ao melhor entendimento e avaliação das metodologias de tratamento empregadas.

#### **4.11 Trabalhos Futuros**

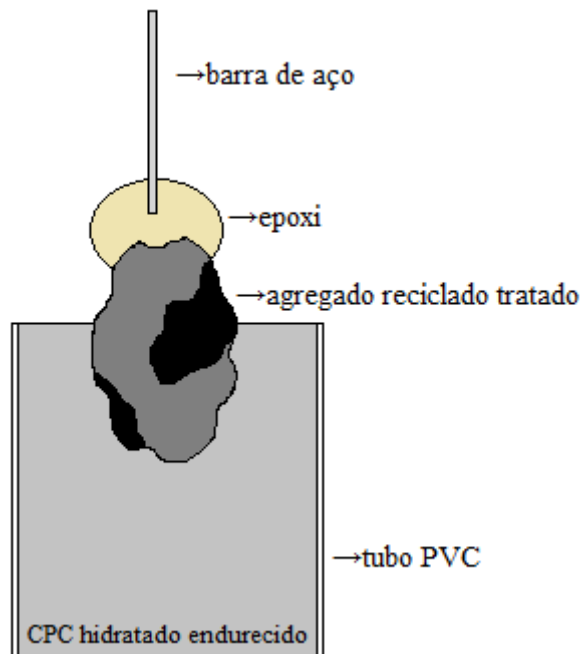
Diante dos resultados obtidos, sugere-se como avanço para trabalhos futuros a síntese de concretos com razão água/cimento de 0,45, elaborados a partir da substituição de 2% (em peso) de Cimento *Portland* Comum (CPC) por metacaulim (MTK), outro material



pozolânico, formando uma mistura aglomerante ao revestimento superficial de agregados reciclados de concreto a partir do método TSMAM, aplicando a substituição integral de AN por AR (gráudos), e caracterizá-los segundo a trabalhabilidade (concreto fresco) e resistência à compressão (concreto endurecido), comparando os resultados obtidos com o traço de referência (100% de CPC e 100% de AN) e os disponíveis na literatura.

Ainda, propõe-se a realização de ensaios de “arrancamento” (*pullout*) para avaliar a adesão entre os agregados reciclados graúdos tratados e a nova matriz de CPC hidratado aos 7 e 12 dias de cura. O ensaio de arrancamento, em adaptação ao método proposto por Ferreira *et al.* (2015), pode ser realizado por meio do posicionamento do sistema representado pela Figura 23 em máquina de ensaio de tração, com célula de carga de 10 kN e aplicando taxa de deslocamento de 0,1mm/min.

Figura 23 – Sistema adaptado ao ensaio de arrancamento de agregado reciclado em concretos.



Fonte: Do autor (2020).

O sistema representado acima é fixado à máquina de ensaios por meio da barra de aço galvanizado SAE 1010, unida à superfície do agregado inserido parcialmente na matriz de CPC hidratado por meio de uma resina epóxi. Então, a tração será transmitida ao agregado, sendo possível avaliar a sua adesão à matriz de CPC e contribuir a investigação do efeito do tratamento de revestimento superficial dos agregados reciclados empregado.

## 5 CONCLUSÃO

A partir da revisão bibliográfica realizada pode-se constatar, primeiramente, que o relativo baixo número de estudos realizados sobre a temática reflete o quão recente ainda está a investigação do revestimento superficial de agregados reciclados graúdos de concretos com materiais pozolânicos à melhoria da adesão em concretos de agregados reciclados.

Dentre os materiais e os métodos de tratamento empregados, destacam-se o revestimento superficial dos agregados reciclados com Sílica Ativa e Nano-Sílica, tanto pelo método PMT quanto pelo TSMAM, no que tange à trabalhabilidade do concreto fresco e a resistência mecânica do concreto endurecido aos 28 dias.

O revestimento superficial de agregados reciclados com Sílica Ativa e Nano-Sílica, por meio do método PMT, implica no aumento da resistência do próprio agregado reciclado, devido ao preenchimento dos espaços vazios e microfissuras presentes na argamassa residual e ao consumo de CH à formação de C-S-H, densificando a estrutura. Ainda, fortalece a Zona de Transição Interfacial estabelecida entre o agregado reciclado e a nova matriz de CP hidratado, ao reduzir a razão água/cimento local e ao contribuir com a formação adicional de C-S-H, devido à ação pozolânica.

Já a utilização de tais pozolanas pelo método TSMAM, além dos efeitos citados para o método PMT, o teor de pozolana utilizada residual acelera a hidratação do CP, ao consumir o subproduto formado ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e atuar enquanto pontos de nucleação ao desenvolvimento dos grãos de C-S-H. Outra vantagem do método TSMAM é com relação ao tempo total de processo, pois no método PMT os agregados reciclados secos são primeiramente tratados por meio de banho em suspensões com pozolanas e, posteriormente secos previamente ao preparo dos concretos, enquanto que no método TSMAM, os agregados são tratados durante o preparo dos concretos.

As caracterizações microestruturais reportadas empregaram análises de micrografias das ZTI's por meio de MEV e BSE, análises elementares por meio de EDX, ensaios de nanoindentação e microdureza, análises termogravimétricas (TG) e de difratometria de raios X (DRX).

Então, conclui-se que o revestimento superficial de agregados reciclados de concretos com pozolanas à melhoria da adesão em concretos de agregados reciclados é uma alternativa ambientalmente sustentável, pois além de explorar e empregar materiais que geralmente são resíduos de outros processos químicos, como a Sílica Ativa e a Nano Sílica, ainda permite a

substituição de agregados naturais por agregados reciclados em concretos, diminuindo a exploração de reservas naturais e reduzindo o volume de aterros sanitários ocupados por Resíduos de Construção Civil.

Ademais, sugere-se a síntese de concretos elaborados a partir da substituição parcial de Cimento *Portland* de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI) por metacaulim (MTK), outro material pozolânico, formando uma mistura aglomerante ao revestimento superficial de agregados reciclados de concreto a partir do método TSMAM, aplicando a substituição integral de AN por AR (gráudos), e caracterizá-los segundo a trabalhabilidade (concreto fresco) e às resistências à compressão e à flexão e comparar os resultados obtidos com o traço de referência (100% de CPV-ARI e 100% de AN) e os disponíveis na literatura.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos: Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado: Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956-1**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta: parte 1: requisitos. Rio de Janeiro, 2012.
- BRAGA, B. et. al. **Introdução à engenharia ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.
- BUI, N. K.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Mechanical properties of concrete containing 100 % treated coarse recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 496–507, 2018. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.131
- CURI, A. **Minas a Céu Aberto**: planejamento de lavra. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- DIMITRIOU, G.; SAVVA, P.; PETROU, M. F. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 228–235, 2018.
- ETXEBERRIA, M. et al. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 735–742, 2007. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.02.002
- FERREIRA, S. R. et al. Effect Of Fiber Treatments On The Sisal Fiber Properties And Fiber-Matrix Bond In Cement Based Systems. **Construction & Building Materials**, v. 101, p. 730-740, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.120
- HEWLETT, P.C.; LISKA, M. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 5. ed. Elsevier, 2019.
- KATZ, A. Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 16, n. 06, p. 597–603, 2004. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(597)
- KISKU, N. et al. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as

sustainable construction material. **Construction and Building Materials**, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029

KONG, D. et al. Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 701–708, 2010. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.038

LE, H.; BUI, Q. Recycled aggregate concretes – A state-of-the-art from the microstructure to the structural performance. **Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119522, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119522

LEE, G. C.; CHOI, H. B. Study on interfacial transition zone properties of recycled aggregate by micro-hardness test. **Construction and Building Materials**. v. 40, p. 455–460, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.114

LI, J.; XIAO, H.; ZHOU, Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 3, p. 1287–1291, 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.07.019

LI, W. et al. Effects of nano-particles on failure process and microstructural properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 42–50, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.051

LIANG, Y. et al. Development of Processing Methods to Improve Strength of Concrete with 100 % Recycled Coarse Aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, p. 1–9, 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000909

MALIER, Y. **High Performance Concrete**. 1. ed. Londres: CRC Press, 1992.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON – INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2008.

MEYER, C. The greening of the concrete industry. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, p. 601–605, 2009. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010

MISTRI, A et al. A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials. **Construction and Building Materials**, v. 233, p. 01 - 12, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117894

MOHAMED, W. et al. Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry. **Construction and Building Materials**, v. 216, p. 632–647, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.231

NAGALLI, A. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos na Construção Civil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 18,

p. 461–468, 2004. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

SILVEIRA, A. L. **Gestão de Resíduos Sólidos: cenários e mudanças de paradigma**. Editora Intersaberes, 2018.

SÁNCHEZ, M.; JUAN, D.; ALAEJOS, P. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**. v. 23, p. 872–877, 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012

SARAVANAKUMAR, P.; ABHIRAM, K.; MANOJ, B. Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 611–617, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.064

SHAIKH, F. Effect of mixing methods of nano silica on properties of recycled aggregate concrete. **Structural Concrete**, p. 1–13, 2017. DOI: 10.1002/suco.201700091

SHI, C. et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 466 - 472, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.08.057

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**. v. 35, p. 1195–1203, 2005. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.10.025

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. Diversifying two-stage mixing approach ( TSMA ) for recycled aggregate concrete : TSMA s and TSMA sc. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 2068–2077, 2008. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.024

WANG, R.; YU, N; LI, Y. Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review. **Construction and Building Materials**, v. 242, p. 01-18, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118164

YOUNIS, K. H.; PILAKOUTAS, K. Strength prediction model and methods for improving recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 688–701, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.003.

YUE, Y. et al. An industrial applicable method to improve the properties of recycled aggregate concrete by incorporating nano-silica and micro-CaCO<sub>3</sub>. **Journal of Cleaner Production**, v. 259, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120920

ZHANG, H. et al. Surface Treatment on Recycled Coarse Aggregates with Nanomaterials. **Construction and Building Materials**, p. 1–11, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.160

ZHANG, H. et al. Modifying recycled aggregate concrete by aggregate surface treatment using sulphoaluminate cement and basalt powder. **American Society of Civil Engineerings**, v. 192, p. 526–537, 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001368