

Ligante sustentável obtido por termoativação de resíduos de construção e demolição

RAPHAEL BALDUSCO - MSc. - <https://orcid.org/0009-0007-5061-9062> – IPT
VALDECIR ANGELO QUARCIONI - Dr. - <https://orcid.org/0000-0003-0840-4758> – IPT
VALDIR MORAES PEREIRA - Dr. - <https://orcid.org/0000-0002-0691-2348> – Poli USP
SÉRGIO CIRELLI ÂNGULO - Prof. Dr. - <https://orcid.org/0000-0001-9700-1621> – Poli USP
SEIITI SUZUKI - MSc. - <http://lattes.cnpq.br/4276370212216414> – InterCement

RESUMO

DADO QUE A PRODUÇÃO DO CIMENTO PORTLAND LIBERA APROXIMADAMENTE 10% DE CO₂ ANTROPOGÊNICO NA ATMOSFERA, EXISTE GRANDE DEMANDA EM NÍVEL MUNDIAL PARA A OBTENÇÃO E USO DE LIGANTES COM BAIXA PEGADA DE CARBONO. NESTE CONTEXTO, O PRESENTE TRABALHO APRESENTA O DESENVOLVIMENTO DE UM LIGANTE PRODUZIDO A PARTIR DA TERMOATIVAÇÃO DA FRAÇÃO FINA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD). DIFERENTES TIPOS DE RESÍDUOS DE RCD FORAM AMOSTRADOS, PROCESSADOS E SUBMETIDOS À CALCINAÇÃO ENTRE 300 °C E 600 °C, SENDO POSTERIORMENTE AVALIADOS QUANTO À SUA REATIVIDADE QUÍMICA E DESEMPENHO MECÂNICO. O LIGANTE OBTIDO A PARTIR DE RESÍDUO MISTO TERMOATIVADO APRESENTOU RESULTADOS PROMISSORES NO ESTUDO LABORATORIAL E FOI, ENTÃO, APLICADO EM MISTURAS PARA ESTABILIZAÇÃO DE BASES DE PAVIMENTOS E VALIDADA EM TRECHO PILOTO. OS RESULTADOS EVIDENCIAM O POTENCIAL DOS FINOS DE RCD PARA A PRODUÇÃO DE LIGANTES ALTERNATIVOS DE BAIXO CARBONO, CONTRIBUINDO, DESSA FORMA, PARA A ECONOMIA CIRCULAR E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.

PALAVRAS-CHAVE: RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD), TERMOATIVAÇÃO, CIMENTO RECICLADO.

1. INTRODUÇÃO

A emergência climática tem impulsionado o desenvolvimento de materiais cimentícios mais sustentáveis.

Nesse contexto, a descarbonização da indústria do cimento, responsável por cerca de 7-8% das emissões globais de CO₂, depende de estratégias como a redução do teor de clínquer, o uso de materiais cimentícios suplementares e o aproveitamento de resíduos minerais para a produção de novos ligantes (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018).

O Brasil gera cerca de 106 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) por ano (ABRECON, 2022), onde cerca de um terço do RCD são beneficiados em usinas de reciclagem para produção de agregados reciclados destinados a diferentes aplicações na construção civil. Embora britas e areias recicladas, ou combinados destes, como a bica corrida reciclada, já apresentem aplicações consolidadas, a fração fina do RCD, especialmente partículas inferiores a 0,30 mm, ainda possui aplicação tecnológica limitada, sem valor econômico bem definido.

Contudo, essa fração fina apresenta elevado potencial para aplicação como ligante alternativo (CARRIÇO, BOGAS e GUEDES, 2020) devido à presença de compostos cimentícios hidratados e fases cerâmicas amorfas ricas em silicatos e aluminatos, que podem adquirir (re)atividade quando calcinado (ÂNGULO; ZANOVELLO, 2025). A termoativação desses materiais promove a formação de fases amorfas derivadas do C-S-H desidratado, em vez da gera-

ção de cal livre (CaO) ou silicatos dicálcicos cristalinos do tipo belita (ÂNGULO *et al.*, 2022). Além disso, a redução da demanda de água e o controle da porosidade, por meio do uso de aditivos, contribuem para a melhoria do desempenho mecânico desses ligantes (SILVA, 2018; ZANOVELLO *et al.*, 2023). Estudos recentes também indicam que a incorporação de materiais pozolânicos pode potencializar ainda mais suas propriedades mecânicas (ÂNGULO; ZANOVELLO, 2025). Nesse contexto, a ativação térmica de finos de RCD surge como uma alternativa promissora para a produção de ligantes de baixo carbono e adições cimentícias voltadas à pavimentação e obras geotécnicas.

O Laboratório de Materiais para Produtos de Construção (LMPC) do IPT desenvolveu um projeto de pesquisa, desenvolvimento e inovação (P&D&I) voltado à produção de ligantes termoativados (e de baixo carbono), a partir da fração fina de resíduos de construção e demolição (RCD) para aplicação em pavimentação, em cooperação com a Intercement e o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Esta publicação comenta sobre o avanço do conhecimento obtido no aproveitamento de finos de resíduos de construção e demolição como matéria-prima para a produção de ligantes alternativos, demonstrando o potencial da termoativação como estratégia de baixo carbono e valorização desses materiais.

2. AMOSTRAGEM E PROCESSAMENTO DOS RCD

Inicialmente, foram amostrados resíduos provenientes de diferentes fontes geradoras, de modo a contemplar a diversidade de materiais presentes nos resíduos de construção e demolição (RCD) produzidos na região metropolitana de São Paulo. Para isso, foram selecionados resíduos de concreto provenientes de concreteiras, resíduos cimentícios de usinas de reciclagem, resíduos cerâmicos de olarias, resíduos mistos de áreas de transbordo e triagem (ATT) e solos urbanos depositados em aterros de inertes (Figura 1). Essa estratégia permitiu avaliar a melhor forma de combinar e otimizar a reatividade dos materiais que compõem os RCD.

Após a amostragem, os materiais foram britados em frações inferiores a 25 mm e peneirados para obtenção da fração fina menor que 0,30 mm. Em seguida, os finos foram moídos em moinho de bolas até atingirem granulometria passante em peneira de 0,075 mm,

semelhante à finura do cimento Portland. Posteriormente, os materiais foram submetidos à calcinação em forno estático de batelada, em temperaturas entre 300 °C e 600 °C, e homogeneizados mecanicamente, conforme ilustrado na Figura 2. O processo de termoativação promoveu a desidratação do resíduo de cimento, constituído por fases hidratadas do cimento, como o C-S-H, dentre outras. A desidratação permite a obtenção de fases reativas e recuperar parcialmente o potencial ligante dos materiais cimentícios.

3. DESENVOLVIMENTO DA REATIVIDADE DOS FINOS DE RCD

Com o objetivo de avaliar a reatividade dos materiais obtidos, os finos termoativados foram caracterizados por diferentes técnicas físico-químicas e mineralógicas, incluindo fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX), análise termogravimétrica (TG), calorimetria isotérmica

e reometria de pastas. Essas análises permitiram investigar a composição química, as transformações mineralógicas promovidas pela termoativação, o potencial de reidratação das fases cimentícias e a evolução do endurecimento das pastas.

Adicionalmente, foram produzidas pastas contendo 100% de finos termoativados de RCD, utilizando relações água/material de 0,40 e 0,45, associadas à adição de cal hidratada para compensar a deficiência de cálcio observada em determinadas composições. O desempenho das formulações foi avaliado por meio de ensaios de resistência à compressão, permitindo a seleção dos materiais mais promissores.

Entre as diferentes composições estudadas, destacou-se a formulação produzida com finos de resíduo misto e adição suplementar de cal hidratada, que apresentou resultados de resistência mecânica satisfatórios e elevada disponibilidade nos centros urbanos, sendo, portanto, selecionada para as



Resíduo misto



Resíduo cimentício



Resíduo de cerâmica vermelha



Resíduo de concreto



Solo urbano

FIGURA 1

RESÍDUOS AMOSTRADOS NO PROJETO

etapas subsequentes do projeto e para a execução do trecho piloto.

Os resultados da Figura 3 mostram que o tratamento térmico dos finos de resíduo misto exerceu influência decisiva no desenvolvimento da resistência à compressão das pastas cimentícias. Observa-se um aumento progressivo da resistência com a elevação da temperatura de termoativação, passando de valores inferiores a 6 MPa nas condições ambiente e 300 °C para resistências superiores a 12 MPa nas amostras tratadas a 500 °C e 600 °C.

Além disso, como esperado, as formulações com menor relação água/sólidos ($a/s = 0,40$) apresentaram desempenho mecânico superior em comparação às de $a/s = 0,45$, especialmente nas maiores temperaturas de tratamento. O ganho de resistência observado entre 7 e 28 dias confirma a continuidade das reações de hidratação e reativação das fases cimentícias presentes no resíduo. Já, o incremento adicional de resistência entre 28 e 91 dias, mais pronunciado nas amostras termoativadas a 500 °C e 600 °C, sugere a ocorrência de reações pozolânicas tardias associadas aos compostos ricos em sílica e alumina presentes na fração cerâmica e cimentícia do resíduo misto. Essas reações promovem a formação gradual de produtos cimentícios secundários, contribuindo para a densificação da microestrutura e para o aumento contínuo da resistência mecânica ao longo do tempo.

De modo geral, os resultados demonstram o potencial da ativação térmica dos finos de RCD como estratégia tecnológica para a produção de ligantes reciclados com propriedades mecânicas aprimoradas, contribuindo para a circularidade de materiais e para a redução da pegada de carbono na construção civil.

4. APLICAÇÃO DO CIMENTO RECICLADO

Após o desenvolvimento da reatividade dos finos de RCD e a definição da formulação de cimento reciclado com desempenho mecânico satisfatório, foram desenvolvidas misturas de brita graduada tratada com cimento (BGTC) e brita graduada simples (BGS) visando sua aplicação em camadas de base de pavimentos.

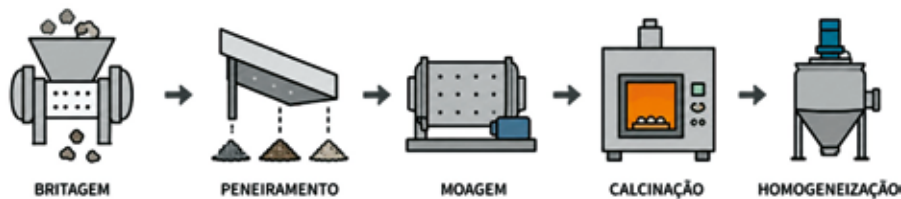


FIGURA 2

OPERAÇÕES UNITÁRIAS PARA OBTENÇÃO DO CIMENTO RECICLADO

Nessa etapa, foram avaliadas diferentes combinações de agregados reciclados e naturais associadas ao ligante termoativado, com o objetivo de verificar sua viabilidade técnica para uso em infraestrutura viária. Os resultados obtidos permitiram a seleção das composições mais promissoras para aplicação em escala real, culminando na execução de trechos piloto destinados à avaliação do desempenho estrutural e funcional do pavimento. Informações detalhadas sobre o desenvolvimento das misturas, a execução dos trechos experimentais e os resultados de monitoramento podem ser encontradas em Pereira et al. (2024).

Com base nas formulações selecionadas, foram executados quatro trechos experimentais em escala piloto na Rua Miguel Biondi - Guarulhos (SP), contemplando bases de pavimento compostas por brita graduada reciclada tratada com cimento reciclado (BG_{R,TC_R}), brita graduada natural tratada com cimento reciclado

(BG_{N,TC_R}), brita graduada tratada com cimento Portland (BGTC) e brita graduada simples (BGS). A implantação dos trechos permitiu comparar diretamente o desempenho estrutural de soluções contendo cimento reciclado em relação às alternativas convencionais. Para o monitoramento da evolução estrutural ao longo do tempo, foram realizadas avaliações deflectométricas, possibilitando analisar a capacidade de suporte das estruturas e o comportamento mecânico das diferentes composições sob condições reais de serviço.

Na Figura 4 são apresentados alguns registros fotográficos da execução do pavimento.

Os dados apresentados acima demonstram o potencial dos finos termoativados de RCD como ligante alternativo para estabilização de camadas de pavimentos, com indicativo de ser viável em outras aplicações de menor exigência estrutural, como artefatos de concreto, contribuindo para a valorização de

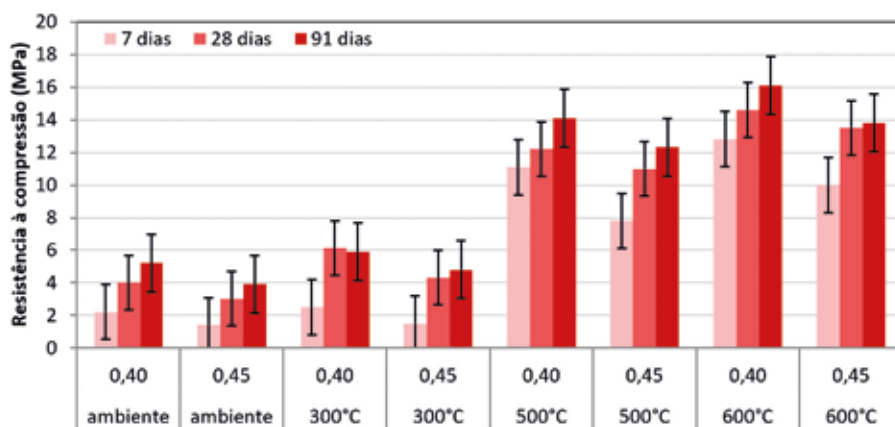


FIGURA 3

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE PASTAS DE CIMENTO COM FINOS DE AGREGADO RECICLADO MISTO E SUPLEMENTO DE CAL HIDRATADA



TRECHO 1 – BG_RTC_R – Brita graduada reciclada tratada com cimento reciclado



TRECHO 2 – BG_NTC_R – Brita graduada natural tratada com cimento reciclado



TRECHO 3 – BGTC – Brita graduada tratada com cimento



TRECHO 4 – Brita graduada simples



Pavimento asfaltado finalizando a execução



Pavimento asfaltado após 8 anos de uso

FIGURA 4

EXECUÇÃO DOS TRECHOS PILOTO COM AS FORMULAÇÕES COM CIMENTO RECICLADO E CONVENCIONAL

resíduos e para redução da pegada de carbono associada aos materiais cimentícios. Essa abordagem resultou no desenvolvimento e concessão da Patente BR 102013030981-8 (QUARCIONI, ANGULO; GUILGE, 2026), reforçando a relevância da pesquisa nacional na busca por soluções tecnológicas alinhadas às demandas futuras da infraestrutura e da indústria de materiais cimentícios.

Em estudos como Zanovello *et al.* (2024) e Rocha; Rocha e Toledo Filho (2023), são observadas abordagens complementares onde o cimento reciclado termoativado é incorporado como material cimentício suplementar (MCS) em sistemas híbridos de baixo carbono, combinando-se teores reduzidos de clínquer Portland e obtenção de desempenho mecânico superior aos obtidos neste estudo. Nesse contexto, a integração de estratégias de reciclagem de cimento com otimização granulométrica e outros materiais para desenvolver ligantes circulares de baixo carbono amplia as possibi-

lidades de aplicação dos finos de RCD em diferentes setores da construção civil.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A valorização dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) é um imperativo para a sociedade brasileira atual e futura, em especial nos centros urbanos, cujo crescimento progressivo leva à saturação de novas áreas disponíveis para a construção. Com o passar dos anos, prevê-se uma demanda progressiva para a desconstrução de edifícios multipavimentos em concreto armado — a começar pelos mais longevos no Brasil — e a necessária substituição por novas obras com tecnologias modernas e sustentáveis. Estes cenários sugerem uma demanda crescente pelo tratamento adequado de grandes volumes de RCD e por seu reaproveitamento em novas edificações e demais aplicações na construção civil, pautando-se por uma prática tecnicamente sustentável e economicamente viável. A tecnologia de termoativação de finos cimentícios de RCD pode representar

uma contribuição para esta vasta demanda, presente e futura, no campo do reaproveitamento sustentável desses materiais.

Nesse contexto, a tecnologia de termoativação surge como uma alternativa promissora para transformar resíduos em novos insumos para a construção civil, contribuindo para os desafios globais de descarbonização e gestão sustentável de resíduos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao BNDES pelo fomento financeiro não reembolsável para esta pesquisa e à InterCement. Igualmente, registram agradecimentos ao IPT pela disponibilização de sua infraestrutura laboratorial e técnico-administrativa, ao Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da USP e à Prefeitura de Guarulhos/SP pelo apoio para a execução do trecho piloto de pavimentação, com o suporte direto, à época, da equipe da Proguaru (Progresso e Desenvolvimento de Guarulhos S/A). ©

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANGULO, Sergio C.; GUILGE, Mário S.; QUARCIONI, Valdecir A.; CINCOTTO, Maria A.; NOBRE, Thiago R.S.; PÖLLMANN, Herbert. The role of calcium silicates and quicklime on the reactivity of rehydrated cements. *Construction and Building Materials*, [S.L.], v. 340, p. 127625, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127625>.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (ABRECON). Pesquisa Setorial ABRECON 2022. São Paulo: ABRECON, 2022.
- [3] CARRIÇO, Ana; BOGAS, José A.; GUEDES, Mafalda. Thermoactivated cementitious materials - A review. *Construction and Building Materials*, [S.L.], v. 250, p. 118873, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>.
- [4] PEREIRA, Valdir M; BALDUSCO, Raphael; SILVA, Patricia B; QUARCIONI, Valdecir A.; MOTTA, Rosângela S.; SUZUKI, Seiiti; ANGULO, Sergio C.. Thermoactivated cement from construction and demolition waste for pavement base stabilization: a case study in Brazil. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, [S.L.], v. 43, n. 1, p. 121-132, 21 fev. 2024. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x241227370>.
- [5] QUARCIONI, Valdecir Angelo; ANGULO, Sérgio Cirelli; GUILGE, Mario Sérgio. Processo de produção de cimento pozolânico de baixo impacto ambiental, obtido por resíduo misto de construção e demolição (RCD), e produtos resultantes para a construção civil. Titulares: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A IPT; Intercement Brasil S.A. BR 102013030981-8. Depósito: 02 dez. 2013. Concessão: 26 maio 2026.
- [6] ROCHA, Joaquin Humberto Aquino; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. The utilization of recycled concrete powder as supplementary cementitious material in cement-based materials: a systematic literature review. *Journal of Building Engineering*, [S.L.], v. 76, p. 107319, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107319>.
- [7] SCRIVENER, Karen L.; JOHN, Vanderley M.; GARTNER, Ellis M.. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-co2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, [S.L.], v. 114, p. 2-26, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.
- [8] SILVA, Raphael Baldusco da. Reidratação de cimento de alto forno: Análise e otimização por técnicas combinadas de caracterização. 2018. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- [9] ZANOVELLO, M.; ANGULO, S.. Thermoactivated recycled cement waste: optimal dehydration temperature and binder properties insights. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 25, e143282, jan./dez. 2025. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. 1 <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212025000100889>.
- [10] ZANOVELLO, Mateus; BALDUSCO, Raphael; JOHN, Vanderley M.; ANGULO, Sérgio C.. Strength-porosity correlation and environmental analysis of recycled Portland cement. *Resources, Conservation and Recycling*, [S.L.], v. 190, p. 106763, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106763>.
- [11] ZANOVELLO, Mateus; JOHN, Vanderley M.; WHITE, Claire E.; ANGULO, Sérgio C.. Engineered Blended Thermoactivated Recycled Cement: a study on reactivity, water demand, strength-porosity, and co2 emissions. *Acs Sustainable Chemistry & Engineering*, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 800-814, 27 dez. 2024. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c06567>.

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON CONCRETO AUTOADENSÁVEL

COMITÊ TÉCNICO CT-202



Prática Recomendada IBRACON Concreto Autoadensável

COORDENADOR Bernardo Fonseca Tutikian
SECRETÁRIO Roberto Christ

Traz para a comunidade técnica os conceitos relacionados ao concreto autoadensável, as recomendações para seleção de materiais, os métodos de dosagem, os procedimentos de mistura, as recomendações para a aceitação do concreto no estado fresco e para seu transporte, lançamento e rastreamento

A obra é resultado do trabalho do Comitê Técnico IBRACON sobre Concreto Autoadensável (CT 202), voltando-se aos profissionais que lidam com a tecnologia do concreto autoadensável nos canteiros de obras, nas indústrias de pré-fabricados, nos laboratórios de controle tecnológico e nas universidades.

DADOS TÉCNICOS

ISBN / ISSN: 978-85-98576-25-1
Edição: 1ª edição
Formato: Eletrônico
Páginas: 78
Acabamento: Digital
Ano da publicação: 2015

Patrocínio

