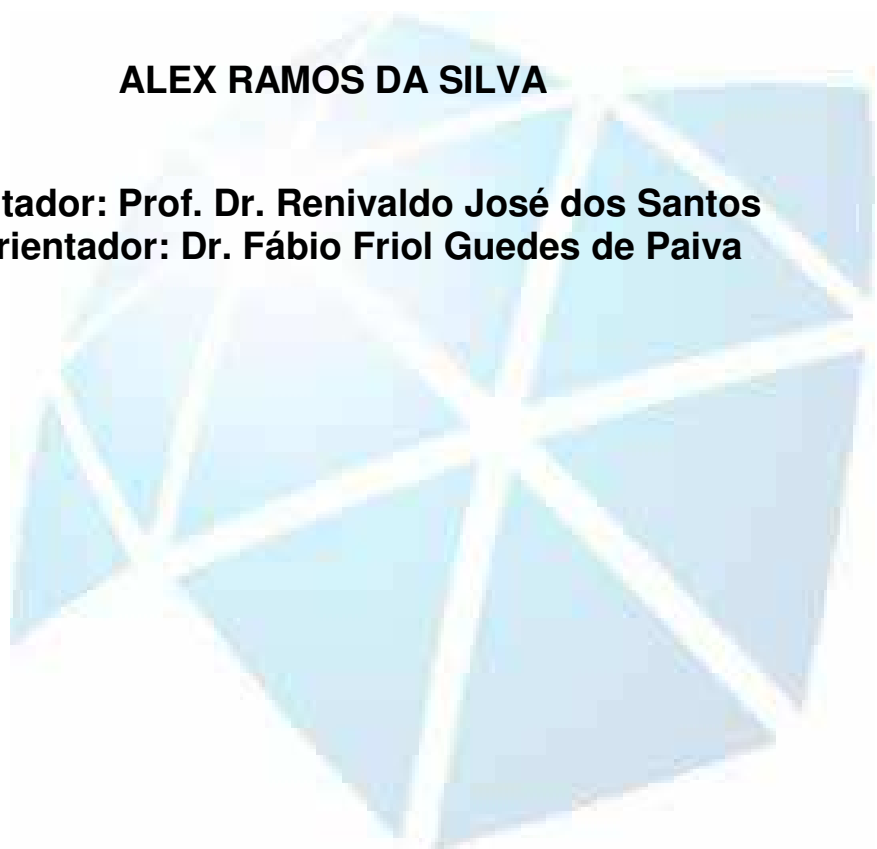


Universidade Estadual Paulista – UNESP
“Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente
Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais – POSMAT

**AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DA CINZA DE
RERREFINO DE ÓLEO LUBRIFICANTE EM COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS**

ALEX RAMOS DA SILVA

**Orientador: Prof. Dr. Renivaldo José dos Santos
Coorientador: Dr. Fábio Friol Guedes de Paiva**



Alex Ramos da Silva

**AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DA CINZA DE
RERREFINO DE ÓLEO LUBRIFICANTE EM COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS**

**Dissertação apresentada como requisito à
obtenção do título de Mestre à Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” -
Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Tecnologia de Materiais, linha de pesquisa de
Caracterização de Materiais, sob a orientação
do Prof. Dr. Renivaldo José dos Santos e
coorientação do Dr. Fábio Friol Guedes de
Paiva.**

Presidente Prudente

2023

S586a	Silva, Alex Ramos da Avaliação da atividade pozolânica da cinza de rerrefino de óleo lubrificante em compósitos cimentícios / Alex Ramos da Silva. -- Presidente Prudente, 2023 72 p. : tabs., fotos Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente Orientador: Renivaldo José dos Santos Coorientador: Fábio Friol Guedes de Paiva 1. Compósito cimentício. 2. Rerrefino de óleo lubrificante. 3. Borra. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ALEX RAMOS DA SILVA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 19 dias do mês de abril do ano de 2023, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ALEX RAMOS DA SILVA, intitulada **“AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DA CINZA DE RERREFINO DE ÓLEO LUBRIFICANTE EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS”**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. RENIVALDO JOSE DOS SANTOS (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Unesp - Campus de Rosana, Prof. Dr. GIOVANNI BARRERA TORRES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia do Desenho Industrial / Instituto Tecnológico Metropolitano, Prof. Dr. AUGUSTO BATAGIN NETO (Participação Virtual) do(a) Coordenadoria de Curso de Engenharia de Produção / Instituto de Ciências e Engenharia - Unesp/ Campus de Itapeva. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: aprovado . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

RENIVALDO JOSE DOS
SANTOS:27178864869

Assinado de forma digital por
RENIVALDO JOSE DOS
SANTOS:27178864869
Dados: 2023.04.19 14:34:01 -03'00'

Prof. Dr. RENIVALDO JOSE DOS SANTOS

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Renivaldo José dos Santos pela orientação e por toda ajuda e apoio durante o desenvolvimento e execução desse trabalho. Um agradecimento especial ao amigo e doutorando Lucas H. P. Silva pelas incontáveis horas imersos em testes e ensaios de laboratório, sem as quais a pesquisa não seria possível.

Agradeço imensamente ao meu grande amigo e coorientador Dr. Fábio Friol Guedes de Paiva, que me guiou em todo o processo do mestrado, desde a concepção da ideia inicial até as discussões dos resultados finais. Além das contribuições acadêmicas, fica aqui o meu agradecimento de coração por me apresentar ao mundo das pesquisas científicas, abrindo novas portas e possibilitando novas oportunidades em minha vida.

Agradeço ao Prof. Dr. Silvio Rainho Teixeira e o Prof. Dr. Aldo Eloizo Job, que me receberam de portas abertas em seu laboratório, pela contribuição na pesquisa. Agradeço ao amigo Luis Fernando que contribuiu com importantes análises no laboratório do Prof. Silvio, sempre disposto a realizar os ensaios da forma mais rápida possível.

Agradeço aos professores Adela Perez Galvín e Antonio Lopez Uceda, da Universidade de Córdoba, pela contribuição na pesquisa científica.

Por fim agradeço aos meus pais, familiares e amigos, que mesmo a distância seguiram acreditando em mim e me dando total apoio para seguir em frente.

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos
não é senão uma gota de água no mar. Mas
o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.*

(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

Avaliação da atividade pozolânica da cinza de rerrefino de óleo lubrificante em compósitos cimentícios.

De acordo com a Lista Europeia de Resíduos, que tem a função de classificar os resíduos na União Europeia (UE), todo resíduo de óleo lubrificante (ROL) é considerado um resíduo perigoso, pois o descarte de ROL no meio ambiente pode representar um alto risco de danos aos ecossistemas. Atualmente, existem poucos estudos sobre a utilização do ROL, sendo apenas aproveitado na geração de energia e como agregado na produção de tijolos. Este trabalho estuda a viabilidade do uso de cinzas de rerrefino de óleo lubrificante (CROL) como material pozolânico em compósitos de argamassa, de acordo com as normas vigentes, reduzindo assim os riscos ao meio ambiente devido ao encapsulamento de substâncias perigosas. Compósitos de argamassa com 0%, 10%, 20%, 30% e 40% de cimento substituído por CROL foram estudados para determinar o teor ótimo. A atividade pozolânica foi verificada por meio de análise termogravimétrica e difração de raios X, e mostrou que CROL apresenta alta reatividade pozolânica, aumentando o consumo de portlandita, contribuindo para a formação adicional de gel hidratado de silicato de cálcio. Os resultados revelaram que com a substituição de até 30% do cimento por CROL não houve redução na resistência à compressão das argamassas proporcionando também redução no custo da argamassa em até 24,80%. O teste de lixiviação mostrou que o CROL bruto libera 9 substâncias perigosas, incluindo 6 metais pesados. A argamassa mostrou-se eficaz no encapsulamento de todas as substâncias estudadas, além de contribuir para a redução da deposição de resíduos perigosos em aterros industriais e redução do custo (<24%) e energia incorporada (<29%) de materiais cimentícios ecologicamente corretos. Assim, fica demonstrado o potencial das cinzas de rerrefino de óleo lubrificante tratado termicamente para aplicação na construção civil, indicando resultados relevantes para substituição do cimento. Além disso, o presente estudo contribui para a redução da deposição de resíduos perigosos em aterros industriais e do uso de recursos naturais.

Palavras-chave: *Borra; Rerrefino de óleo lubrificante; Compósito cimentício.*

ABSTRACT

Evaluation of the pozzolanic activity of lubricating oil re-refining ash in cementitious composites.

According to the European Waste List, which has the function of classifying waste in the European Union (EU), all lubricating oil waste (LOW) is considered a hazardous waste, since the disposal of LOW in the environment can represent a high risk of damage to ecosystems. Currently, there are few studies on the use of LOW, being only used in energy generation and as an aggregate in the production of bricks. This work studies the feasibility of using ash from lubricating oil re-refining (LORR) as a pozzolanic material in mortar composites, in accordance with current regulations, thus reducing risks to the environment due to the encapsulation of hazardous substances. Mortar composites with 0%, 10%, 20%, 30% and 40% of cement replaced by LORR were studied to determine the optimal content. The pozzolanic activity was verified by means of thermogravimetric analysis and X-ray diffraction, and showed that LORR presents high pozzolanic reactivity, increasing the portlandite consumption, contributing to the additional formation of hydrated calcium silicate gel. The results revealed that with the replacement of up to 30% of the cement by LORR, there was no reduction in the compressive strength of the mortars, also providing a reduction in the cost of the mortar by up to 24.80%. The leaching test showed that crude LORR releases 9 hazardous substances, including 6 heavy metals. The mortar proved to be effective in encapsulating all the substances studied, in addition to contributing to the reduction of the deposition of hazardous waste in industrial landfills and reducing the cost (<24%) and embodied energy (<29%) of ecologically correct cementitious materials. Thus, the potential of heat-treated lubricating oil re-refining ash for application in civil construction is demonstrated, indicating relevant results for the replacement of cement. In addition, the present study contributes to reducing the deposition of hazardous waste in industrial landfills and the use of natural resources.

Keywords: *Sludge; lubricating oil re-refining; cementitious composites.*

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Aluminas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al₂O₃ – Óxido de Alumínio

ASTM – *American Society for Testing And Materials* (Associação Americana de Testes e Materiais)

BCA – Bagaço da Cana-de-açúcar

CFB – Cinza de Folha de Bambu

CH – Hidróxido de Cálcio – Ca(OH)₂

CV – Cinzas Volantes

CO₂ – Dióxido de Carbono

C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado - CaO:SiO₂:H₂O

CROL – Cinzas de Rerrefino de Óleo Lubrificante

DP – Desvio Padrão

DRX – Difração de Raios X

DTG – Termogravimetria Derivada

EGAF – Escória Granulada de Alto-Forno

Fe₂O₃ – Óxido de Ferro III

HAP – Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

IAF – Índice de Atividade De Força

LSC – Louças Sanitárias de Cerâmica

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MPa - Megapascal

NaOH – Hidróxido de Sódio

NBR – Norma Brasileira

OH – Hidroxila

Paf – Perda ao Fogo

PNI – Perda Na Ignição

PP – Propriedade Perigosa

PV – Pó de Vidro

RC – Resíduos Cerâmicos

RCL – Resíduos Cerâmicos de Ladrilho

RV – Resíduo de Vidro

S – Enxofre

Si – Sílica

SiO₂ – Óxido de Silício

TBV – Tijolo de Barro Vermelho

TG – Teste Termogravimétrico

TGA – Termogravimetria

UE – União Europeia

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Aterro da empresa Prolub	19
Figura 2: <i>CROL antes (A) e depois (B) de ser calcinado</i>	35
Figura 3: Métodos experimentais e fases de estudo para avaliação ambiental por ensaios de lixiviação	39
Figura 4: Análise termogravimétrica de CROL.....	42
Figura 5: Distribuição de CROL, moída por 50min, e cimento.	43
Figura 6: a) Micrografia SEM do cimento CP-2-F-32; b) Micrografia SEM de CROL.	44
Figura 7: Difração de pó de raios X da cinza de CROL.....	46
Figura 8: a) Padrões de DRX de amostras de controle e CROL aos 7 e 28 dias de cura.	48
Figura 9: a) TGA e b) DTG das pastas de controle e CROL após 7 e 28 dias de cura.	49
Figura 10: Resistência à compressão dos corpos de prova de acordo com o tempo de cura.	50
Figura 11: Resistência à flexão dos corpos de prova de acordo com o tempo de cura.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Efeitos dos contaminantes presentes nos óleos lubrificantes usados ou contaminados sobre o organismo humano.	20
Tabela 2: Proporção de mistura para 1m ³ de argamassa.....	36
Tabela 3: Proporção de mistura para amostras de argamassas (% em peso).	41
Tabela 4: Concentração de lixiviado (mg/kg) por teste de lixiviação de conformidade para partículas CROL não tratadas (CROL-U) e tratadas termicamente (CROL) na proporção L/S 10.....	45
Tabela 5: Resistência à compressão de argamassas para ensaio de atividade de força aos 28 dias.	47
Tabela 6: Índice de vazios e absorção de água de argamassas conforme ASTM C642-06.	52
Tabela 7: Concentrações de lixiviado (mg/kg) por teste de lixiviação de conformidade para argamassas trituradas fabricadas com WFPS na relação L/S 10.	53
Tabela 8: Estimativa de custo de 1m ³ controle e CROL30% de compósitos de argamassa.....	54
Tabela 9: Caracterização química do resíduo em diferentes temperaturas.....	71
Tabela 10: Caracterização química do resíduo em diferentes temperaturas após processo de lavagem.	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Importância da Pesquisa	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	Rerrefino de Óleo Lubrificante.....	18
2.1.1	Saúde e Meio Ambiente	19
2.1.2	Aplicações.....	23
2.2	Materiais Pozolânicos.....	24
2.2.1	Origem das pozolanas	25
2.2.2	Classificação pozolânica	25
2.3	Aplicação de Resíduos como Substituto do Cimento	26
2.3.1	Cinza de folha de bambu	26
2.3.2	Cinza de bagaço de cana-de-açúcar.....	27
2.3.3	Escória de fundição.....	28
2.3.4	Resíduos de cerâmica.....	29
2.3.5	Resíduos de vidro	31
3	ESTUDO EXPERIMENTAL	34
3.1	Materiais.....	34
3.2	Configurações e procedimentos de teste	35
3.2.1	Caracterização de CROL	35
3.2.2	Produção de corpos de prova de argamassas.....	36
3.2.3	Índice de atividade de força (IAF)	37
3.3	Monitoramento da reação pozolânica através de DRX, TGA e DTG	37
3.4	Propriedades das argamassas em estado sólido	38
3.5	Avaliação ambiental por teste de lixiviação	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41

4.1	Características químicas	41
4.2	Análise termogravimétrica de CROL	41
4.3	Perda na ignição (PNI)	42
4.4	Tamanho da partícula	42
4.5	Análise morfológica	43
4.6	Teste de lixiviação de resíduos	44
4.7	Composição mineralógica	46
4.8	Índice de atividade de força (IAF) de CROL	47
4.9	Monitoramento da atividade pozolânica	47
4.10	Resistência à compressão e à flexão de argamassas	50
4.11	Comportamento da lixiviação em argamassas de cimento triturado com CROL	52
4.12	Custo e ecoeficiência	54
5	CONCLUSÕES	55
	REFERÊNCIAS	56
	APÊNDICES	71
	APÊNDICE A – Calcinação da Borra do Resíduo de Rerrefino de Óleo Lubrificante	71

1 INTRODUÇÃO

Na construção civil, a produção de cimento aumentou significativamente, tornando-se um dos produtos mais utilizados no planeta (AL-KUTTI; SAIFUL ISLAM; NASIR, 2019). No entanto, existem algumas desvantagens ambientais no processo de produção desse material, como alto consumo de energia e emissão excessiva de gases de efeito estufa na atmosfera. Atualmente, as empresas de cimento produzem cerca de 2 bilhões de toneladas de cimento por ano, sendo responsáveis por emitir cerca de 7% das emissões de todo CO² produzido globalmente, para sua produção (SOUSA; BOGAS, 2021). Assim, diversos ligantes alternativos menos nocivos ao meio ambiente vêm sendo estudados como substitutos (pelo menos parcialmente) do cimento, atribuindo atividade pozolânica, como resíduos de construção e demolição (HE *et al.*, 2021; PITARCH *et al.*, 2021), cinzas agroindustriais (BRAZ *et al.*, 2019; MARTINS TORRES *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2021), vidro (LI *et al.*, 2022; TREZZA; RAHHAL, 2019), e outros (PAIVA *et al.*, 2021).

Na indústria automobilística, um dos resíduos mais produzidos por veículos e máquinas é o óleo lubrificante, que tem como principal função preservar as partes internas dos motores e as juntas mecânicas, reduzindo o desgaste por atrito e corrosão, entre outras características (KUPAREVA; MÄKI-ARVELA; MURZIN, 2013). A decomposição dos aditivos e as interações entre os componentes resultantes do desgaste do motor são as principais fontes dos contaminantes do óleo lubrificante (YANG *et al.*, 2016). Os componentes do óleo lubrificante têm grande potencial para poluir o meio ambiente. Ao despejá-los em locais impróprios, podem atingir os lençóis freáticos, ou, se forem queimados de forma não apropriada, há emissões de óxidos metálicos e gases tóxicos, como dióxido de carbono e óxidos de enxofre (PARK *et al.*, 2009).

Em 2019, foram produzidas 36,8 milhões de toneladas de óleo lubrificante (GARSIDE, 2020). A reciclagem do óleo lubrificante gera 19 litros de óleo reciclado para cada 25 litros, no entanto, o processo resulta no resíduo denominado “borra”, constituído pela parte mais degradada do lubrificante utilizado. É composto por polímeros, resinas, aditivos, metais e carbono (fuligem), sendo classificado como resíduo perigoso (classe I), na Norma Brasileira e Europeia (LWART, 2014; NBR 10004, 2004).

De acordo com a Lista Europeia de Resíduos, que apresenta a classificação dos resíduos na União Europeia (UE), todo resíduo de óleo lubrificante (ROL) é considerado um resíduo perigoso. Isso ocorre porque o resíduo possui pelo menos uma Propriedade Perigosa (PP) listada no Regulamento da Comissão (UE) nº 1357/2014, independentemente de sua composição e/ou origem. HP5 (Toxicidade de Aspiração), HP7 (cancerígeno) e/ou HP14 (eco tóxico) são comumente vistos em resíduos de óleo lubrificantes (PINHEIRO; QUINA; GANDO-FERREIRA, 2021; UK, 2015). O combustível não queimado e os subprodutos da combustão também podem levar à formação de produtos químicos como os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP). A Agência Internacional de Pesquisa em Câncer classificou esses compostos constituídos por vários anéis, como o benzo[a]pireno, como cancerígenos para humanos (PINHEIRO; QUINA; GANDO-FERREIRA, 2021).

Atualmente, existem poucos estudos sobre o uso da borra de rerrefino de óleo lubrificante. Dentre as investigações existentes, o resíduo vem sendo aplicado na geração de energia, no qual é utilizado como combustível alternativo, aproveitando seu poder calorífico (SILVA; FRANCISCO; L, 2017). Além disso, são poucos os estudos de aplicação das cinzas geradas no processo de queima. Dentre as existentes, esta cinza composta por bentonita, óleos e resíduos, vem sendo utilizada como substituto na produção de tijolos, com resultados positivos quando 10% em peso do resíduo é incorporado em sua produção (TEIXEIRA, SILVIO R.; SANTOS, 2008).

A argila bentonítica presente nas cinzas, indica potencial para ser utilizada como material para substituição parcial do cimento em argamassas e concretos. Embora haja um efeito negativo na trabalhabilidade de concretos e das argamassas com a mistura de bentonita com cimento, esse problema pode ser facilmente resolvido com o uso de aditivos modificadores da trabalhabilidade. Assim, embora reduza a trabalhabilidade, a mistura de bentonita com cimento tem a capacidade de melhorar a viscosidade de argamassas e concreto (MAYUR MADHUKAR MASKE, NANDKUMAR KRISHNARAO PATIL, 2021).

Laidani et al. (2022) analisaram o uso de bentonita simples para substituir parcialmente o cimento na produção de concreto (LAIDANI *et al.*, 2022). Notaram que com a quantidade de bentonita sendo misturada com cimento, as novas propriedades do concreto como trabalhabilidade, densidade e absorção de água diminuíram. Porém, houve uma melhora de resistência mecânica do concreto. Essa melhora na resistência à compressão do concreto se deve à ação pozolânica de aluminosilicates

amorfos encontrados na bentonita calcificada com portlandita produzida durante a hidratação do cimento, o que resulta em mais CSH na relação Ca/Si baixa a alta (LAIDANI *et al.*, 2022). Para Zadražil *et al.* (2004), esse aumento na resistência deve-se à densificação da estrutura dos poros, o que resulta na redução das tensões térmicas geradas nas proximidades dos poros do gel (ZADRAŽIL; VODÁK; KAPIČKOVÁ, 2004). Outras fontes relataram resultados semelhantes, demonstrando o impacto positivo da bentonita calcinada como substituto parcial do cimento (LIMA-GUERRA *et al.*, 2014; TAYLOR-LANGE *et al.*, 2015).

O presente trabalho apresenta uma argamassa alternativa com substituição parcial do cimento por cinzas de rerrefino de óleo lubrificante. Suas propriedades estruturais, morfológicas e físico-mecânicas foram estudadas. Além disso, também é demonstrado seu potencial de encapsulamento de substâncias perigosas, possibilitando suas aplicações na construção civil como material pozolânico em substituição ao cimento. Assim, apresentamos uma alternativa mais sustentável à substituição do cimento e também uma solução para o tratamento de um resíduo perigoso classificado como eco tóxico, cancerígeno e outros potenciais problemas para o ser humano e o meio ambiente.

1.1 Importância da Pesquisa

A substituição de agregados miúdos, agregados graúdos e cimento por alguns resíduos tem sido estudada com sucesso em materiais cimentícios mais ecológicos. No entanto, ainda há poucos relatos na literatura sobre cinzas de rerrefino de óleo lubrificante (CROL) para aplicação na construção civil, e não há relato como material complementar em compósitos cimentícios. Devido a sua composição química, este resíduo é classificado como perigoso, e alternativas para seu tratamento e uso são investigadas nesta pesquisa. O CROL tem sido utilizado para combustão, reduzindo o custo da queima industrial e resultando em uma cinza com alta concentração de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Assim, estudos com cinzas CROL como material pozolânico são promissores e também fornecem novas formas de reutilizar CROL e avaliar o encapsulamento de metais pesados perigosos, desenvolvendo materiais cimentícios mais ecológicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais processos e características na produção dos resíduos de rerrefino de óleo lubrificantes, seus perigos e aplicações. Também será apontado os principais conceitos dos materiais pozolânicos e suas normas vigentes que regulamentam os requisitos obrigatórios que as pozolanas devem seguir. Por fim, é apresentado uma revisão bibliográfica sobre resíduos industriais pozolânicos, derivados da agroindustrial, da indústria de fundição e da construção civil, que são utilizados como substituto parcial ao cimento.

2.1 Rerrefino de Óleo Lubrificante

O rerrefino de óleos lubrificantes é um processo muito importante, que visa a recuperação de uma fração de óleo não oxidado e separação de impurezas e poluentes. Esse processo se faz necessário, pois o óleo lubrificante usado contém metais provenientes de aditivos ou desgaste do motor, bem como compostos orgânicos voláteis. Os principais metais descobertos no óleo usado são, Fe, Pb, Zn, Cu, As, Cd, Ag, Ba e Cr (SAIKIA *et al.*, 2001). Porém, o processo de rerrefino produz uma grande quantidade de resíduos ricos em argila, metais, resíduos químicos e óleo não recuperável (TEIXEIRA, 2014). Assim, as empresas autorizadas necessitam de grandes espaços para utilizarem de depósito, além de todo um cuidado no manuseio e armazenamento desse material. A empresa PROLUB Rerrefino Lubrificantes, localizada em Presidente Prudente – SP, coleta e armazena esse material, como podemos ver na Figura 1, além de rerrefinar o óleo lubrificante.

Apesar de existirem diversos processos de reciclagem de óleo usado, o processo denominado ácido/argila (Bernd-Meinken) é o mais adotado pelas empresas no Brasil. Esse processo consiste das seguintes fases: (a) tratamento térmico (desidratação), (b) acidulação, (c) decantação, (d) neutralização, (e) destilação e (f) filtração. Uma quantidade considerável de resíduos é gerada ao final do processo, sendo principalmente de dois tipos: (1) borra ácida obtida na decantação e (2) torta de filtro (argila impregnada com óleo). A borra e a torta de filtro podem ser ácidas ou neutralizadas com hidróxido de sódio (NaOH) ou com cal (CaCO_3) (TEIXEIRA, 2006).

Figura 1: Aterro da empresa Prolub



Fonte: Autoria Própria

A borra é composta principalmente de óleo, subprodutos do aquecimento do óleo durante o uso e sujeira que entra no coletor durante as trocas e manutenção do óleo do motor. Já a torta de filtro, é composta principalmente de argila e óleo descartado (TEIXEIRA, 2014). A argila presente na torta de filtro é a bentonita (ou a terra fuller montmorilonítica), sendo utilizada para clarificação e filtragem, sendo composta essencialmente por montmorilonita ou por outros minerais do grupo das esmectitas (TEIXEIRA, 2006).

Por ser rica em argila (bentonita), a torta de filtro tem grande potencial para ser utilizada e incorporada em materiais cimentícios.

2.1.1 Saúde e Meio Ambiente

As vantagens e benefícios dos óleos lubrificantes são inúmeras, além de ter uma importância econômica estratégica, porém, é imprescindível não se esquecer que os óleos lubrificantes usados ou contaminados são resíduos perigosos e devem ser manuseados, armazenados e descartados adequadamente para proteger a saúde dos trabalhadores diretamente envolvidos em seu manuseio, a saúde do público em geral e o meio ambiente (KWAU-BOATENG *et al.*, 2022).

Mesmo um óleo lubrificante novo deve ser considerado um produto com algum grau de periculosidade que exige cuidado no manuseio, pois, além de ser derivado do petróleo, frequentemente contém uma série de aditivos que, em altas concentrações, são tóxicos. Além de possuir esse fator inicial de risco, o óleo lubrificante usado ou

contaminado torna-se ainda mais tóxico porque, à medida que seus constituintes se decompõem, liberam compostos como dioxinas, ácidos orgânicos, cetonas e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos que são mais perigosos para a saúde humana e o ambiente (APROMAC, 2011).

Além de que, o óleo lubrificante usado ou contaminado contém várias substâncias nocivas oriundas da formula original e também que foram absorvidas pelo motor ou outro equipamento durante a produção, como por exemplo, cromo, cádmio, chumbo e arsênico (APROMAC, 2011). A Tabela 1 descreve os problemas de saúde substanciais que esses poluentes, a maioria dos quais são bioacumuláveis (permanecem no corpo), causam:

Tabela 1: Efeitos dos contaminantes presentes nos óleos lubrificantes usados ou contaminados sobre o organismo humano.

Contaminantes	Efeitos no Organismo Humano
Cádmio	• Intoxicação aguda – diarreia; dor de cabeça; dores musculares; dores no peito e nas pernas; salivação; sensação de gosto metálico; dores abdominais; tosse com saliva sangrenta; fraqueza; danos no fígado e falha renal. • Intoxicação crônica – perda de olfato; tosse; dispneia; perda de peso; irritabilidade; debilitação dos ossos; danos aos sistemas nervoso, respiratório, digestivo, sanguíneo e aos ossos. • Cancerígeno para pulmões e traqueia. • Acumula principalmente nos rins, ossos e fígado.
Arsênio	• Intoxicação aguda – violenta gastroenterite; queimação no esôfago; diarreia sanguinolenta; vômito; queda da pressão sanguínea; suor sangrento; dispneia; edema pulmonar; delírio; convulsões e coma. • Intoxicação crônica – dermatite; escurecimento da pele; edema; danos no sistema nervoso central, cardiovascular; nefrite crônica; cirrose hepática; perda de olfato; tosse; dispneia; perda de peso; irritabilidade; debilitação dos ossos; danos nos sistemas nervoso, respiratório, digestivo, sanguíneo e aos ossos.

	• Cancerígeno para pele, pulmões e fígado.
Cromo	• O cromo hexavalente – Cr(VI)- é extremamente tóxico diferentemente do cromo trivalente – Cr(III) - que é essencial na potencialização da insulina. O Cr (VI) é gerado em processos a partir do Cr (III). • Intoxicação aguda – vertigem; sede intensa; dor abdominal; vômito; oligúria e anúria. • Intoxicação crônica – dermatite; edema de pele; ulceração nasal; conjuntivite; náuseas; vômito; perda de apetite; rápido crescimento do fígado. • Cancerígeno para pele; pulmões e fígado.
Dioxinas	• Organocloradas, persistentes na natureza, extremamente tóxicas, carcinogênicas e teratogênicas. • Essas substâncias agressivas são geradas quando da queima do óleo lubrificante usado ou contaminado, que é ilegal. • As várias dioxinas possuem, cada uma, diversos efeitos danosos à saúde humana. • Apesar da variedade de sintomas, a título ilustrativo, é possível generalizar destacando que todas elas são cancerígenas para sistema respiratório e causam vômito, dores e fraqueza muscular, falhas na pressão sanguínea, distúrbios cardíacos.
Hidrocarbonetos Policíclicos (Poli nucleares) Aromáticos	• Compostos caracterizados por possuírem dois ou mais anéis aromáticos (por exemplo benzeno) condensados. • Têm longa persistência no ambiente. • São cancerígenos. • Quando resultantes da queima do óleo lubrificante, que é ilegal, afetam os pulmões, o sistema reprodutor e o desenvolvimento do feto (teratogênico).

Fonte: (APROMAC, 2011)

Do mesmo modo que causa danos à saúde da população, o óleo lubrificante usado ou contaminado, quando descartado no meio ambiente de maneira incorreta, pode causar grandes desastres e prejuízos, afetando diretamente a vida selvagem e a flora (APROMAC, 2011). Seguem alguns fatos ambientais pertinentes em relação ao descarte inadequado desse lixo, como exemplo:

- Devido a não ser biodegradável, o óleo lubrificante usado ou poluído leva décadas para se degradar;
- Em casos de vazamento ou despejo indevido no solo, inutiliza o solo para construção e cultivo, destruindo o húmus, matando plantas e microrganismos, tornando a área infértil, levando à formação de vapores de hidrocarbonetos;
- Além disso, também pode penetrar no lençol freático e deixar os poços próximos inoperantes;
- Um milhão de litros de água pode ser contaminado por apenas um litro de óleo lubrificante usado ou contaminado, comprometendo sua oxigenação;
- Apenas 1 litro de óleo lubrificante usado ou contaminado pode atingir 1.000 m² de superfície aquosa;
- Se despejado no esgoto, pode comprometer o funcionamento das estações de tratamento de esgoto, podendo em algumas situações ocasionar a interrupção desse serviço fundamental;
- Se queimados (o que é uma prática ilegal e passível de punição judicial), acarretam forte concentração de poluentes em um raio médio de 2 km;
- Se queimados (o que é uma prática ilegal e passível de punição judicial), eles produzem volumes significativos de particulados (fuligem), que se precipitam como minúsculas partículas que aderem fisicamente à pele e entram no sistema respiratório das pessoas.

O manuseio e descarte indevido dos óleos lubrificantes podem acarretar em sérios riscos para a nossa saúde e para o meio ambiente, porém, os mesmos podem ser reciclados de forma sustentável e eficiente, economizando energia e evitando a contaminação do meio ambiente (KWAQ-BOATENG *et al.*, 2022).

2.1.2 Aplicações

Alguns estudos foram publicados sobre a inclusão de resíduos de óleo lubrificante em massas argilosas utilizadas pela indústria cerâmica para fazer tijolos (MONTEIRO, 2004; SILVA, 2000; SOUZA, G. P.; HOLANDA, 2000; TEIXEIRA, SILVIO R.; SANTOS, 2008).

Ensaio semelhante realizou Teixeira (TEIXEIRA, SILVIO R.; SANTOS, 2008), onde foi utilizada a torta de filtro dividida em duas amostras, sendo elas: torta bruta (chamada pelo autor de T1); e torta tratada (T2), onde 30% do óleo foi extraído com solventes. Os corpos cerâmicos tiveram diferentes concentrações de resíduos agregados na sua composição. Os resultados demonstraram que devido à grande quantidade de óleo presente na amostra T1, a porosidade da amostra aumentou, piorando assim suas propriedades. Porém, a incorporação de 5% de T1 ainda apresenta resultados satisfatórios na produção de tijolos. Enquanto que a incorporação de 10% de T2 resultou em uma melhora considerável das propriedades cerâmicas.

Silva (2000) investigou a emissão gasosa gerada a partir da calcinação dos tijolos com substituição de 0%, 10% e 20% por resíduos de óleo lubrificante encapsuladas à massa argilosa. A queima foi realizada em temperatura controlada de 800°C, com o intuito de investigar os gases liberados pelos tijolos sem resíduos e os tijolos contendo borra de petróleo encapsulada. A investigação mostrou que ocorre uma fixação da maioria dos metais, como prata, bário, cádmio, cobre, ferro, sódio, chumbo, manganês, zinco e mercúrio, pela massa argilosa e que a adição do resíduo acarretou em uma modificação na composição química da mistura gasosa, apresentando gases como o dióxido de enxofre e metano, além de aumentar a concentração de monóxido de carbono e dióxido de carbono.

Souza *et. al.* (SOUZA, G. P.; HOLANDA, 2000) analisou os efeitos da adição de borra de petróleo encapsulada, nas proporções de 0, 5 e 10% em peso, na fabricação de produtos cerâmicos. As amostras foram calcinadas em nove temperaturas diferentes, entre 750 e 1150°C, por um período de 1 hora. Como resultado, a porosidades das amostras (com e sem resíduo) tiveram uma redução até a temperatura de calcinação de 900°C, com um leve aumento de porosidade (redução de densidade) em 950°C, e novamente, uma queda de porosidade para temperaturas de queima mais elevadas. Os corpos cerâmicos tiveram um aumento da resistência

mecânica, conforme o aumento da temperatura, com pouca interferência do resíduo nesta propriedade. Por fim, a adição do resíduo se mostrou favorável até a calcinação de 1000°C, com uma leve melhora das propriedades mecânicas da cerâmica.

Outra alternativa de uso para o resíduo de óleo lubrificante é na geração de energia, no qual o resíduo é utilizado como um combustível alternativo, aproveitando seu poder calorífico. Silva et. al. (SILVA; FRANCISCO; L, 2017) utilizou os resíduos gerados no rerrefino de óleo lubrificante no coprocessamento em fornos de cimento. Essa aplicação permitiu atingir alta eficiência na destruição térmica do resíduo, além de gerar energia e diminuir a emissão de poluentes. A pesquisa se mostrou eficaz do ponto de vista ambiental, porém, do ponto de vista econômico não se mostrou interessante para as empresas, devido aos limites máximos de emissão de gases poluentes no Brasil ser mais elevados em comparação a Europa.

Com base nas pesquisas existentes, é possível afirmar que o resíduo de óleo lubrificante apresenta potencial para ser incorporado às massas argilosas, para aplicação na construção civil.

2.2 Materiais Pozolânicos

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2015b), os materiais pozolânicos são produtos siliciosos (SiO_2) ou sílico aluminosos, que apresentam pouca ou quase nenhuma propriedade aglomerante. Entretanto, quando esse material é moído e entra em contato com a água e cal reage com o hidróxido de cálcio, adquirindo assim propriedades cimentantes. Essa reação química que se dá entre a mistura de produtos siliciosos, água e hidróxido de cálcio é chamada de reação pozolânica (NEVILLE, 2016).

Outra reação que ocorre com as pozolanas, é o chamando efeito filler que esse material por ser fino pode proporcionar. Nesse caso, por se tratar de um material muito fino, a reação resulta em uma melhora no empacotamento das partículas dos aglomerantes, modificando a sua microestrutura, agindo como um agente de nucleação e assim, acaba por reduzir a quantidade de vazios presentes no material original, seja ele argamassa ou concreto.

Quimicamente, as sílicas (S) e aluminas (A) amorfas presentes na reação pozolânica combinam-se com a cal (CH), criando assim mais silicatos e aluminatos

de cálcio hidratados (C-S-H, C-A-H, C-S-A-H), aumentando a resistência da matriz do material original da mistura (DAL MOLIN, 2005).

Sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz e cinza volante estão entre os materiais pozolânicos mais utilizados pela indústria e compartilham um alto teor de SiO_2 e/ou Al_2O_3 que é responsável pelas reações químicas com o hidróxido de cálcio, garantindo uma propriedade aglomerante (NEVILLE, 2016).

2.2.1 Origem das pozolanas

A origem dos materiais pozolânicos não é algo simples, pois o termo pozolanas acaba englobando materiais de origens e naturezas químicas e mineralógicas muito distintas, porém, esses materiais têm algo em comum, as suas reações quando são misturados com água e cal.

Segundo a NBR 5736 (NBR 5736, 1991) as pozolanas podem ser classificadas como naturais ou artificiais.

As pozolanas com origem das rochas ou minerais vulcânicos, são chamadas de pozolanas naturais. Para esses materiais, é preciso apenas britagem e moagem para se obter um produto com as qualidades de uma pozolana, sem a necessidade de processos ou fatores antropogênicos. Um porém nesses materiais, é a impureza encontrada em sua composição, que acaba por afetar a sua reatividade.

No caso das pozolanas artificiais, elas ocorrem a partir de ações antropogênicas, as quais resultam devido a uma modificação da estrutura física e/ou química de um produto, ganhando assim propriedades reativas (MORAES, 2019).

2.2.2 Classificação pozolânica

A NBR 12653 (ABNT, 2015b) é a responsável pela regulamentação dos materiais pozolânicos, estabelecendo os requisitos físicos e químicos que as pozolanas devem atender, além de classificar os materiais em classes (N, C e E). A classe N é composta por pozolanas de origem natural ou artificial, materiais vulcânicos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. Já a classe C, é composta pelas pozolanas geradas por meio de combustão de carvão mineral, derivadas de usinas termoeletricas. Quanto a classe E, ela é composta por aquelas pozolanas que não se enquadram nas classes anteriores.

Enquanto isso, a norma D5370 (ASTM, 2014) é a normativa americana responsável pela regulamentação dos materiais pozzolânicos internacionalmente, classificando em 5 tipos específicos, sendo eles: tipo F (cinza volante classe F); tipo C (cinza volante classe C); tipo CKD (escória granulada de alto forno); tipo SF (sílica ativa); e tipo M (metacaulim).

A diferença entre a cinza volante de classe F e C se dá pela quantidade de sílica, óxido de ferro e alumínio presente em sua composição, sendo a classe C a mais pura (>70%), enquanto a cinza volante classe F possuem valores reduzidos (>50%). A norma também menciona que um mesmo material pode ser classificado em mais de um tipo de classificação, levando em consideração como critério de ordem a maior massa de material. Uma pozolana com 70% do tipo C e 40% do tipo M, por exemplo, será chamada de tipo CM (ASTM, 2014).

2.3 Aplicação de Resíduos como Substituto do Cimento

Com a crescente extração e consumo dos recursos naturais, aliado a preocupação ambiental, a construção civil vem se tornando cada vez mais um meio oportuno de aproveitamento de subprodutos industriais. Assim, novas pesquisas voltadas para o desenvolvimento de materiais alternativos vem sendo realizadas, buscando substituir materiais de fontes não renováveis, como o cimento, por diversos resíduos inorgânicos, como por exemplo: cinza de folha de bambu, cinza de bagaço de cana-de-açúcar, escória de fundição, resíduos de cerâmica, resíduos de vidro, entre outros.

2.3.1 Cinza de folha de bambu

O bambu é uma planta de crescimento rápido que pode prosperar em solo deteriorado. Possui uma alta capacidade de sequestro de dióxido de carbono e pode ser usado para reflorestamento de zonas ribeirinhas (GHOSH, 2017). O Brasil possui as maiores reservas nativas e biodiversidade, com 180.000 km², porém, apenas a indústria de celulose utiliza o bambu (PAIVA *et al.*, 2021).

O Brasil produz anualmente 500 milhões de toneladas de papel, o que acaba gerando um grande volume residual de folhas (190 milhões de toneladas por ano). Estes resíduos, apesar de serem deixados de lado nas áreas de plantio, possuem

propriedades interessantes que podem ser aplicadas de diferentes maneiras (VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2011). Assim como outros resíduos agroindustriais, ele tem potencial para ser utilizado como biomassa e aproveitado na geração de energia, além de ser possível empregar as cinzas produzidas, constituídas principalmente por SiO_2 , como aditivo mineral em compósitos cimentícios. Como resultado, menos impacto ambiental é causado, pois a produção de cimento usa menos energia e emite menos produtos químicos nocivos como o dióxido de carbono (CO_2) (GHOSH, 2017).

A fim de transformar a cinza de folha de bambu (CFB) em uma substância que possa ser utilizada como aglutinante em materiais de construção civil, inúmeras investigações têm sido realizadas. A caracterização química revelou um material rico em sílica com valores entre 70,5% e 80,2%, esses valores são ideais para usar CFB como um material cimentício adicional (MORAES *et al.*, 2019; RODIER *et al.*, 2019). Para determinar a faixa de temperatura que produziu a maior quantidade de sílica amorfa, o procedimento de temperatura de calcinação foi examinado. Para materiais pozolânicos, as cinzas formadas entre 500 e 600 °C ofereceram resultados superiores (DWIVEDI *et al.*, 2006; VILLAR COCIÑA *et al.*, 2018).

Estudos mecânicos em compósitos cimentícios onde o CFB foi usado para substituir o cimento Portland comum revelaram que uma substituição de massa de 30% é adequada. Quando comparados aos compósitos convencionais, porcentagens maiores de substituição resultam em perda de resistência (DHINAKARAN; CHANDANA, 2016; SINGH; SINGH; RAI, 2000). Frias *et al.* (2012), testando a abordagem da atividade pozolânica, alcançou um material altamente reativo que era semelhante à sílica ativa. Aos três dias de reação, praticamente toda a cal disponível havia sido dissolvida pelas cinzas. Estudos ainda são necessários para determinar os efeitos da inclusão de CFB em compósitos cimentícios, principalmente a longo prazo. Além disso, faltam pesquisas sobre a caracterização de uma variedade de CFB (MORAES *et al.*, 2019).

2.3.2 Cinza de bagaço de cana-de-açúcar

Atualmente, o etanol de cana-de-açúcar é um substituto de combustível melhor aos combustíveis fósseis. Não só porque é sustentável, mas também porque é barato. O principal subproduto deste setor é o bagaço de cana-de-açúcar (BCA), que é produzido em cerca de 1,9 bilhão de toneladas por ano (FAO, 2016). Cerca de 0,3%

das cinzas produzidas após a sua combustão para energia renovável têm propriedades que podem ser integradas em compósitos cimentícios (CORDEIRO, GUILHERME CHAGAS; ANDREÃO; TAVARES, 2019). Os dois países que mais produzem cana-de-açúcar no mundo são o Brasil e a Índia; em 2016, o Brasil produziu cerca de 706 milhões de toneladas (FAO, 2016).

As pesquisas sobre a viabilidade da incorporação da cana-de-açúcar se iniciaram em 1998, quando foram encontrados resultados animadores, indicando a formação de silicatos hidratados e o consumo de hidróxido de cálcio em compósitos onde a cinza do bagaço de cana havia sido incorporada (MARTIRENA HERNÁNDEZ *et al.*, 1998). As propriedades físicas, mecânicas e a durabilidade dos materiais cimentícios foram melhoradas com a substituição do cimento por BCA (RODIER *et al.*, 2019). Singh *et al.* (SINGH; SINGH; RAI, 2000) averiguou compósitos com substituição de 10% e a pesquisa revelou uma melhora na resistência à compressão em todas as idades. Ganesan *et al.* (GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2007) analisaram concretos com maiores níveis de substituição, até 30%, e constatou-se que usar até 20% de BCA melhorou as propriedades mecânicas do concreto. Pesquisas adicionais centradas na substituição com diferentes quantidades de cimento, encontraram os mesmos resultados. A substituição em até 20% resulta em um aumento ou pelo menos na preservação da resistência a compressão do concreto em relação a referência (CORDEIRO, GUILHERME C.; KURTIS, 2017; CORDEIRO, GUILHERME CHAGAS; ANDREÃO; TAVARES, 2019).

2.3.3 Escória de fundição

As propriedades químicas da escória de fundição, subproduto da fundição de materiais metálicos na indústria, variam de acordo com o metal produzido (ferro, zinco, cobre, aço, etc.). A produção da escória granulada é feita resfriando rapidamente a escória fundida com água em lagoa ou com jatos de água de alta pressão, produzindo um pó fino, granular, quase inteiramente não cristalino e com propriedades hidráulicas (PAL; MUKHERJEE; PATHAK, 2003).

Vários pesquisadores examinaram a substituição parcial de cimento Portland e areia de quartzo por escória de fundição como uma alternativa sustentável para a produção de argamassas e concretos (JAVALI *et al.*, 2017; LADOMERSKÝ *et al.*, 2016; RAJASEKAR; ARUNACHALAM; KOTTAISAMY, 2019; SHARMA, DEVINDER,

2016; TORRES; BARTLETT; PILGRIM, 2017). A composição da escória de fundição normalmente contém 95% de sílica, cálcio, alumínio, magnésio e oxigênio, sendo esta composição química importante para alcançar uma melhor ação hidráulica (ÖZBAY; ERDEMİR; DURMUŞ, 2016).

Gholampour et al. (GHOLAMPOUR; OZBAKKALOGLU, 2017) examinaram os resultados do concreto com 50, 70 e 90% de cimento substituído por escória granulada de alto-forno (EGAF). Devido à menor capilaridade das misturas de EGAF, que também reduz a quantidade de água que o concreto absorve, 90% de EGAF no lugar do cimento causou uma redução de 51% nas propriedades de abatimento. Entretanto, as misturas de EGAF obtiveram uma compressão igual ou até melhor em comparação ao concreto de controle, devido ao período de cura ser mais longos (28 e 90 dias).

Esses resultados estão diretamente ligados ao maior teor de SiO_2 (35%) e Al_2O_3 (13%) em relação ao cimento Portland. Assim, esses componentes aumentaram a hidratação nos períodos tardios, gerando uma maior formação de silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S) e aluminato tricálcico (C_3A) na composição. A reação pozolânica, que é mais lenta e leva mais tempo para gerar hidróxido de cálcio, também está ligada à reação tardia (ONER; AKYUZ, 2007). Em contrapartida, Javali et al. (2017) examinaram a substituição parcial (5-20%) de cimento por escória de alumínio e descobriram que com 5% de substituição, os atributos eram semelhantes ao concreto controle, mas com 10 a 20% de substituição, havia uma perda significativa de resistência mecânica força.

Dessa maneira, a escória de fundição tem sido considerada como uma substituta do cimento, resultando em argamassas com qualidades mecânicas comparáveis. Porém, por haver maior volume de SiO_2 e Al_2O_3 na escória de fundição, os processos pozolânicos no início da hidratação são mais lentos, portanto, mais tempo é necessário para atingir qualidades comparáveis ou superiores ao concreto controle.

2.3.4 Resíduos de cerâmica

As cerâmicas são utilizadas na construção civil há décadas, como por exemplo nas telhas, azulejos e pisos de tijolos. Sua composição é constituída praticamente por materiais naturais com alto teor de argilominerais, sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), representando >80% de sua composição (AWOYERA, PAUL O. *et al.*, 2018; S. EL-

DIEB; R. TAHA; I. ABU-EISHAH, 2019). Anualmente, cerca de 22 bilhões de toneladas de lixo cerâmico são produzidas em escala global, porém, devido a erros de produção, cerca de 30% de todo material produzido é descartado (AWOYERA, PAUL O. *et al.*, 2018; MEDINA; FRÍAS; SÁNCHEZ DE ROJAS, 2012). De acordo com a origem da matéria-prima, os resíduos cerâmicos são frequentemente divididos em dois tipos. O primeiro tipo é o subproduto do processo de calcinação, que é muito difundido nas indústrias de olaria e cerâmica e produz componentes para uso em telhados (tijolos e telhas). O segundo tipo incluem os resíduos de cerâmica com tratamento de superfície, como ladrilhos, pisos e louças sanitárias (AWOYERA, PAUL O.; ADESINA; GOBINATH, 2019).

Várias investigações demonstram a viabilidade do uso de resíduos cerâmicos em compósitos de matriz cimentícia em substituição aos agregados naturais grossos (ANDERSON; SMITH; AU, 2016; KESHAVARZ; MOSTOFINEJAD, 2019; RASHID *et al.*, 2017) e finos (ABADOU; MITICHE-KETTAB; GHRIEB, 2016; AWOYERA, P.O. *et al.*, 2018; PENTEADO; VIVIANI DE CARVALHO; LINTZ, 2016; SIDDIQUE *et al.*, 2018). A substituição parcial dos agregados naturais pelos resíduos cerâmicos (RC), podem resultar em uma melhora da resistência à compressão. Ao empregar resíduos cerâmicos como agregado miúdo e ligante (em substituição ao cimento) em argamassas, Mohammadhosseini *et al.* (MOHAMMADHOSSEINI *et al.*, 2019) relataram melhor desempenho de resistência mecânica. Quando comparadas com a argamassa tradicional, as amostras com 40% de RC em substituição ao cimento e 100% em substituição aos agregados miúdos apresentaram maiores resistências à compressão e à tração após 90 dias de cura.

Achados semelhantes foram feitos por Awoyera *et al.* e outros (AWOYERA, P.O. *et al.*, 2017; SIDDIQUE *et al.*, 2018; SIDDIQUE; SHRIVASTAVA; CHAUDHARY, 2019). A reação pozolânica entre óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), que está presente em grandes quantidades no RC, e subprodutos da hidratação do cimento Portland comum, como o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), é responsável pelo aumento da resistência da argamassa.

Pitarch *et al.* (PITARCH *et al.*, 2019) averiguaram diversos resíduos cerâmicos como agregados para concreto estrutural. Resíduos cerâmicos de ladrilhos (RCL), tijolos de barro vermelho (TBV) e louças sanitárias de cerâmica (LSC) foram aproveitados em substituição aos agregados naturais de calcário em uma proporção de 14 e 30%. Após 28 dias de cura, o concreto infundido com resíduo cerâmico

superou o concreto convencional em termos de resistência à compressão, atingindo 7% a mais que a referência. Aos 28 dias, os concretos com 30% de substituição de LSC apresentaram resistência à compressão comparável à dos concretos convencionais. Os maiores percentuais de perda de resistência (até 18,4%, após 7 dias de cura) foram observados com o concreto TBV (30% de substituição). Essas descobertas mostram que é possível produzir concreto estrutural utilizando agregados reciclados como RCL e LSC.

De modo geral, as propriedades mecânicas melhoraram quando agregados miúdos e graúdos foram substituídos em até 100% por resíduos cerâmicos. Isso ocorre porque as partículas de cerâmica oferecem uma matriz densa, potencial pozolânico e também maior dureza do que o agregado graúdo convencional, o que melhora a ligação com a pasta de cimento. No entanto, El-Dieb et al. e outros (EL-DIEB *et al.*, 2018; HEIDARI; TAVAKOLI; TAVAKOLI, 2019; PAVLÍK *et al.*, 2016) relataram que a substituição do cimento por resíduo cerâmico reduz a resistência mecânica, o que pode estar relacionado à reação pozolânica imatura, impactada pelo pó cerâmico não hidráulico, retardando o desenvolvimento da resistência.

2.3.5 Resíduos de vidro

O vidro é uma substância fisicamente homogênea, inorgânica e amorfa (C162-05; ASTM C162-05, 2015). É criado através da fusão e posterior resfriamento até um estado rígido sem cristalização (SHARMA, RACHIT, 2017).

De modo geral, os resíduos de vidro (RV) da construção civil abrangem componentes de janelas, lâmpadas, cristais, tijolos ocos, tubos de néon e outros itens (MORAIS *et al.*, 2016). A reutilização de RV do setor de construção é uma prática ambientalmente favorável e bem estabelecida (BURSI *et al.*, 2018; TREZZA; RAHHAL, 2019). Pesquisas têm sido desenvolvidas sobre o uso de RV como um material cimentício adicional na fabricação de compósitos cimentícios (HAJIMOHAMMADI; NGO; KASHANI, 2018; HAN, WEIWEI *et al.*, 2016; RASHID *et al.*, 2018).

Segundo alguns pesquisadores, a substituição parcial de cimento por pó de vidro (PV), resultaram em uma melhoria da reologia (SAMARAKOON; RANJITH; DE SILVA, 2020), a resistência mecânica e a durabilidade dos concretos (ELAQRA; HALOUB; RUSTOM, 2019; TREZZA; RAHHAL, 2019). Elaqra, Haloub e Rustom

(2019) a fim de investigar os efeitos do PV na substituição do cimento em concreto fresco e endurecido, analisaram quatro porcentagens de prevalência de 0%, 10%, 20% e 30%. A análise foi composta por dois métodos de mistura, sendo o método convencional (o PV foi adicionado ao cimento e agregados), e a segunda abordagem (o PV foi dissolvido em água antes da adição ao cimento e agregados). O segundo método de mistura, que foi usado para criar os concretos com 20% de PV, produziu concreto com maior resistência à compressão do que as amostras de controle após 90 dias (estabelecido em 25 MPa).

Os autores confirmaram que o aumento está relacionado à hidrólise do PV em íons livres de SiO_2 , CaO e Na_2O na solução aquosa, formando mais C–S–H do que as amostras controle. Da mesma forma, Kamali e Ghahremaninezhad (KAMALI; GHahremaninezhad, 2015) examinaram o efeito do PV na resistência mecânica, durabilidade e comportamento de materiais cimentícios modificados com dois tipos de PV e uma adição de cinza volante classe F (CV) a vários níveis de cimento substituição. As misturas têm a relação água/cimento fixada em 0,50, com substituição do cimento por PV a 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e ainda, outro aditivo com substituição de 20% de cimento por cinza volante (CV).

Os autores constataram que o aumento é causado pela hidrólise do PV em íons livres de SiO_2 , CaO e Na_2O na solução aquosa, resultando na formação de mais C-S-H do que nas amostras controle. Semelhante a isso, Kamali e Ghahremaninezhad (KAMALI; GHahremaninezhad, 2015) observaram como o PV afetou a resistência mecânica, a durabilidade e o comportamento de materiais cimentícios modificados com dois tipos de PV e a adição de cinzas volantes (CV) de classe F a quantidades variáveis de substituição de cimento. As misturas contêm uma proporção de água para cimento de 0,50, com PV substituindo o cimento em 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, além de outro aditivo com substituição de 20% de cimento por CV.

Foram usados dois pós de vidro de 8,4 mm (PV 1 e 2). O PV1 é um subproduto pós-industrial de resíduos de fibra de vidro, e o PV2 é um subproduto pós-consumo feito de vidro reciclado. Os ensaios de resistência à flexão foram realizados aos 28 e 91 dias de cura, enquanto os de resistência à compressão foram realizados aos 7, 28 e 91 dias. De acordo com os resultados, o pó de vidro aumentou a resistência à compressão de todas as argamassas e concretos. Além do mais, após 91 dias, a resistência à flexão foi aprimorada usando PV2 no lugar do cimento. Devido à sua característica pozolânica, produziu um produto de hidratação secundária (C-S-H).

Quando comparados às dosagens com CV, o concreto e a argamassa preparados com aditivos de PV tiveram melhor desempenho em termos de resistência.

As investigações indicaram que os resíduos de vidro podem ser utilizados como substituto parcial ao cimento. Pó de vidro, sílica ativa e cinzas volantes podem ser usados como aditivos em cimento de matriz. Devido à reação pozolânica e à liberação de álcalis de resíduos de vidro, o PV usado como substituto parcial do cimento em concreto e argamassa geralmente resulta em um aumento na resistência à compressão quando utilizado como substituto de até 20%.

Devido à sua natureza amorfa, que eventualmente participará da reação e produzirá uma forte matriz compacta, o resíduo de vidro pode substituir até 50% da areia natural, melhorando ligeiramente as qualidades mecânicas. Porém, devido a superfície lisa do vidro e a menor absorção de água em relação aos agregados graúdos naturais, ocorre uma má ligação entre o agregado e a matriz quando empregados o pó de vidro como substituto do agregado graúdo em concretos, o que geralmente resulta em queda na resistência mecânica (RASHID *et al.*, 2018). Como poucas pesquisas examinaram seu uso como agregado graúdo, é aconselhável encontrar uma faixa percentual de resíduos de vidro como agregados que não afetarão as propriedades dos compósitos.

3 ESTUDO EXPERIMENTAL

Neste trabalho foi analisada a substituição do cimento nas proporções de 0%, 10%, 20%, 30% e 40% por cinzas de rerrefino de óleo lubrificante (CROL). O objetivo foi descobrir a proporção ideal de substituição de CROL para produzir uma argamassa de boa qualidade. Foram determinadas as seguintes propriedades físico-mecânicas: resistência à flexão e compressão, trabalhabilidade, absorção de água e índice de vazios. Além disso, as reações de hidratação em diferentes períodos de cura foram monitoradas por análise de termogravimetria, termogravimetria derivada e difração de raios X. A análise das reações de hidratação foi correlacionada com as propriedades físico-mecânicas da argamassa obtida. Por fim, foi realizado a avaliação ambiental de lixiviação do resíduo, bem como o potencial de encapsulamento dos contaminantes na matriz cimentícia.

3.1 Materiais

A cinza de rerrefino de óleo lubrificante foi usada como principal material de estudo neste trabalho. A cinza é o resultado da calcinação do resíduo denominado “borra”, sendo este um subproduto da reciclagem do óleo lubrificante das máquinas. A borra foi coletada na empresa Prolub Rerrefino de Lubrificantes Ltda., localizada na cidade de Presidente Prudente – estado de São Paulo, Brasil. Após a coleta, o material foi calcinado em mufla (SP-1200DM/B- SPLABOR) em temperatura controlada de 650°C por 3 horas (ver Apêndice A), para a remoção do óleo e impurezas presentes. A Figura 2 apresenta a amostra de CROL coletada antes (1A) e depois de ser calcinada (1B). Em seguida, foi realizado o processo de lavagem; o material foi imerso em água (1:0,25 – água/resíduo) e agitado por 30 min para reduzir a quantidade de enxofre presente nos resíduos por solubilização. Os resíduos foram subsequentemente filtrados a vácuo usando um papel de filtro de 4-12 µm. Este processo foi realizado devido ao alto teor de SO₃ em análises anteriores de fluorescência de raios X (XRF), composição que pode afetar a hidratação, resistência mecânica e durabilidade de materiais cimentícios (ANDRADE NETO; DE LA TORRE; KIRCHHEIM, 2021). O cimento Portland utilizado está disponível no Brasil como CP II – F - 32, que é o tipo de cimento utilizado para aplicações de argamassa (NBR 16697, 2018).

Para atender à exigência de um material fino com maior área superficial específica e reatividade, a cinza foi moída em moinho de bolas (Solab, modelo SL-34) por 50 minutos. Depois disso, o tamanho das partículas foi medido.

Figura 2: CROL antes (A) e depois (B) de ser calcinado.



Fonte: Autoria Própria

3.2 Configurações e procedimentos de teste

3.2.1 Caracterização de CROL

O espectrômetro de fluorescência de raios X XRF Shimadzu Modelo 7000 foi usado para determinar a composição química das cinzas de rerrefino de óleo lubrificante (CROL). A difração a laser da Malvern Instruments, modelo ZEN3600, foi utilizada para determinar a distribuição granulométrica das cinzas CROL e do cimento. O teste termogravimétrico (TG) foi realizado utilizando o NIETZSCH, modelo TG 209 F1 Libra®, para avaliar a temperatura para remoção de óleo e impurezas do LORR. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para avaliar a morfologia das partículas de cinza de CROL e cimento. As micrografias foram obtidas com microscópio Hitachi, Modelo SU3800. Análises realizadas sem metalização superficial. A composição mineralógica foi determinada usando uma Difração de Raios X (DRX) em um difratômetro Shimadzu (Modelo XRD 6000). A perda ao fogo (PaF)

foi determinada de acordo com AMN NM 18 (ANM, 2012), por perda de peso de cinzas secas a 950°C.

3.2.2 Produção de corpos de prova de argamassas

A composição da mistura de argamassa foi determinada com base na ASTM C305 – 20 (ASTM C305-20, 2020). Foram preparadas cinco misturas de argamassa: Controle (CC-0), 10%, 20%, 30% e 40% de cinzas CROL, conforme Tabela 2. Devido à natureza hidrofílica de CROL (cinza de bentonita), superplastificante foi utilizado para obter trabalhabilidade semelhante ao controle ($24 \pm 1,5$ cm).

A trabalhabilidade do material foi verificada seguindo a norma ASTM C1437 (ASTM C1437-20, 2020). A amostra fresca foi adicionada em duas camadas de mesma altura em um molde metálico, aplicando-se 20 golpes uniformes e distribuídos homogeneamente em cada camada com uma haste metálica. Em seguida, foi retirado o molde metálico e iniciadas 25 quedas na mesa de fluxo em um período de 15 segundos, levando a argamassa a espalhar. O diâmetro da argamassa espalhada foi medido em 5 direções.

Tabela 2: Proporção de mistura para 1m³ de argamassa

Amostras	Cimento	CROL	Areia	Água	Plastificante
	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)
CC – 0	578,13	0	1589,84	280,46	0
CROL10%	520,32	57,81	1589,84	280,46	0,2
CROL20%	462,51	115,62	1589,84	280,46	0,2
CROL30%	404,70	173,43	1589,84	280,46	0,2
CROL40%	346,89	231,24	1589,84	280,46	0,2

Fonte: Autoria Própria

Foram utilizados corpos de prova prismáticos, conforme ASTM C348 – 20 (ASTM C348-20, 2020) com dimensões de 160 x 40 x 40 mm. No processo de mistura, foi dada importância à ordem de adição dos materiais, iniciando com água, seguido de cimento e CROL (exceto nos controles), areia e aditivo. O aditivo plastificante líquido utilizado foi o MidFLOW 400, à base de material policarboxilato, composto por tenso ativos e materiais orgânicos com densidade de 1,04 g/cm³ e pH de 4,75.

A duração da mistura foi de 4 minutos em equipamento específico. Em seguida, os corpos de prova foram moldados em moldes prismáticos, conforme ASTM C305:2020 (ASTM C305-20, 2020). Por fim, os corpos de prova nos moldes foram submetidos a uma mesa vibratória por 15s a fim de melhorar a homogeneização dos materiais.

3.2.3 Índice de atividade de força (IAF)

O teste IAF especificado pela ABNT NBR 5752 (NBR 5752:2014, 2014) foi feito para confirmar se o CROL atende aos requisitos estabelecidos pela norma para materiais pozzolânicos. Foram ensaiadas duas misturas de argamassa: 1- Referência (com cimento tipo brasileiro (CP-II-F 32) e areia de rio, sem material pozzolânico); 2- teste (com cimento tipo brasileiro (CP-II-F 32), 25% de CROL e areia de rio). Assim, foram moldados cinco corpos de prova de argamassa para cada tipo de amostra. Os corpos de prova foram então rompidos por compressão aos 28 dias para avaliar a resistência à compressão de ambas as misturas e a relação entre elas resultou no Índice de Atividade de Resistência (IAF), que está relacionado ao desempenho do material pozzolânico.

3.3 Monitoramento da reação pozzolânica através de DRX, TGA e DTG

Foram produzidos corpos de prova de pasta de cimento com relação água-cimento de 0,50 (em peso) e diferentes proporções de substituição em massa de cimento por CROL (0 a 40%). Após a mistura, as pastas foram moldadas em recipientes plásticos (205ml) e armazenadas a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 horas. Posteriormente, as amostras foram desenformadas e então colocadas em imersão total em água por 7 e 28 dias para cura. As amostras de pasta foram então trituradas, embebidas em etanol (99,5%) por 24 horas e secas em estufa a 60°C por 24 horas para interromper o processo de hidratação (após 7 e 28 dias) (HAN, JIANGUO *et al.*, 2014, 2016). Em seguida, as amostras foram trituradas em um almofariz de ágata até que o tamanho das partículas fosse inferior a $75\ \mu\text{m}$ e submetidas a testes de DRX (difração de raios X), análise de termogravimetria (TGA) e termogravimetria derivada (DTG). O teste de TGA foi realizado usando o equipamento SDT Q600 da TA Instrument a uma taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ de 35 a 600°C em atmosfera de nitrogênio (vazão de 100

ml/min). As fases minerais encontradas nas pastas foram detectadas usando DRX em um difratômetro Shimadzu XRD 6000. Os difratogramas foram adquiridos na faixa de 5–40° 2θ (tamanho do passo de 0,02/0,02° e varredura de velocidade de 2°/min) usando radiação Cu Kα, com um instrumento operando a 1,2 kW (40 kV e 30 mA).

3.4 Propriedades das argamassas em estado sólido

Os compósitos de argamassa foram moldados em moldes prismáticos de aço de 160 x 40 x 40 mm. Após 24 horas as amostras foram retiradas dos moldes e curadas em água à temperatura ambiente (21 ± 2°C). No período de 7 e 28 dias, a resistência à flexão de todas as misturas foram medidas em cinco amostras de cada composição. Em seguida, foi realizado o ensaio de resistência à compressão com as peças resultantes do rompimento; assim, foram utilizados dez peças de prismas, conforme a ASTM C348 e ASTM C349 (ASTM C348-20, 2020; ASTM C349-18, 2018).

A absorção de água e o índice de vazios foram medidos em triplicata de acordo com ASTM C642 (ASTM C642-13, 2013). As argamassas foram preparadas em moldes metálicos cilíndricos de 100 x 60 mm, contendo a massa mínima de 800g. Os moldes foram curados por 24 h a 21°C e sob umidade relativa de 90%. Em seguida, os moldes foram removidos e colocados em água a 21°C por 28 dias. A absorção de água (A%) e o índice de vazios (Iv) foram calculados usando as Equações 1 e 2. Essas amostras não foram utilizadas para os ensaios de resistência mecânica.

$$A (\%) = \frac{M_{ASAI} - M_S}{M_S} \times 100 \quad (1)$$

$$Iv = \frac{M_{ASAI} - M_S}{M_{ASAI} - M_I} \cdot 100 \quad (2)$$

No qual:

A: absorção total de água (%)

M_{ASAI}: massa de amostra saturada após imersão (g);

M_S: massa da amostra seca em estufa 110 ± 5 °C (g);

M_I: massa de amostra saturada imersa em água (em equilíbrio hidrostático);

T_V: Taxa de vazios.

3.5 Avaliação ambiental por teste de lixiviação

Os contaminantes do rerrefino de óleos lubrificantes levam a desafios ambientais, por isso o presente estudo avaliou o potencial de seu reuso. Além de

avaliar os efeitos nas propriedades mecânicas, também é de grande importância avaliar a redução das substâncias poluentes no encapsulamento pelos materiais cimentícios.

O procedimento experimental de duas fases diferentes pode ser observado na Figura 3. Na Fase 1, a caracterização da lixiviação através do Ensaio de Conformidade, UNE 12457-4:2003, foi realizada em CROL não tratado e CROL tratado termicamente para avaliar seu potencial poluente como material granular. Em seguida, na Fase 2, após a incorporação desses resíduos nas argamassas de cimento, essas argamassas foram submetidas a um ensaio de Conformidade após a britagem. Este procedimento simula condições desfavoráveis que ocorrem no fim de vida quando o material é quebrado pelo alto contato entre o lixiviante e o sólido.

Figura 3: Métodos experimentais e fases de estudo para avaliação ambiental por ensaios de lixiviação

		MATERIAL TESTE	PADRÃO LABORATORIO	CONDIÇÕES MATERIAIS
FASE 1: Caracterização de resíduos		CROL: Não tratado Tratado	Compliance Test UNE-EN 12457-4	CROL <10 mm
FASE 2: Classificação das argamassas com resíduos		Argamassas trituradas: CC-0 CROL10% CROL20% CROL30% CROL40%	Compliance Test UNE-EN 12457-4	Argamassas trituradas <10 mm

Fonte: Autoria Própria

O teste de lixiviação em lote para materiais granulares, de acordo com o teste de Conformidade (semelhante à ABNT 10005:2004), indica os limites legais da Diretriz de Aterros da UE (Diretiva 2003/33), classificando os materiais em resíduos inertes, não perigosos ou perigosos. O protocolo consiste na extração dos lixiviados com relação líquido/sólido (L/S) de 10 L/kg, utilizando 90g de amostras de material seco (partículas CROL e argamassas trituradas), com granulometria inferior a 10,0 mm e água deionizada. A solução foi mantida sob agitação mecânica de 10 rpm por $24 \pm 0,5$ h (NBR 10005:2004, 2004). Após cada teste, os lixiviados obtidos foram filtrados com uma membrana (0,45µm) e analisados para medição de metais pesados, ânions e

teor de carbono orgânico dissolvido (COD) por ICP-MS e cromatografia para obter a liberação do poluente (expresso em mg/ kg).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Características químicas

A composição química das cinzas de rerrefino de óleo lubrificante, determinada pela técnica de fluorescência de raios-X, é mostrada na Tabela 3.

Os elementos mais importantes (expressos como óxidos) obtidos nas cinzas de óleo lubrificante foram a sílica (SiO_2), seguida de Al_2O_3 , SO_3 , Fe_2O_3 , CaO , P_2O_5 e ZnO . Óxidos como K_2O e TiO_2 apresentaram teores abaixo de 2%. Para uso como material pozzolânico, a norma recomenda um mínimo de 70% na soma de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 (ABNT, 2015a; ASTM C618, 2019). Assim a cinza está dentro do padrão, com uma somatória de 70,81%. Devido ao uso de tratamento ácido (sulfonação) para a regeneração do óleo residual, observa-se uma alta concentração de SO_3 (12,16).

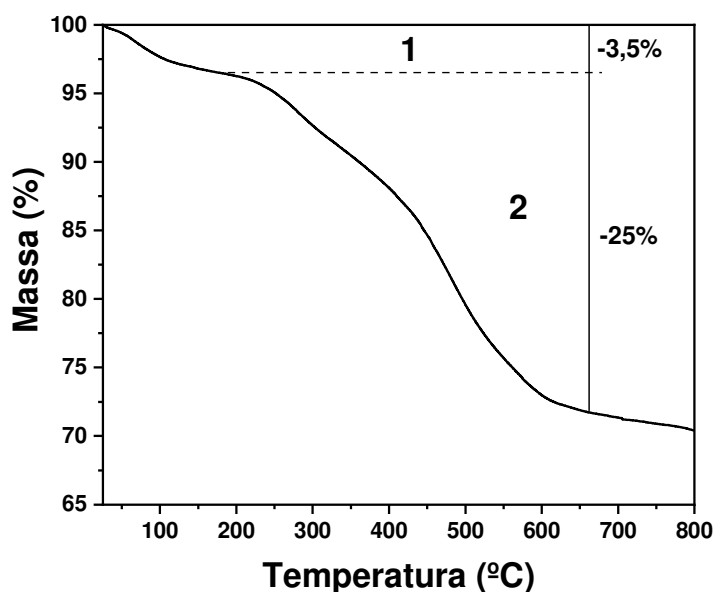
Tabela 3: Proporção de mistura para amostras de argamassas (% em peso).

SiO_2	Al_2O_3	SO_3	Fe_2O_3	CaO	P_2O_5	ZnO	K_2O	TiO_2
45,71	15,44	12,16	9,66	7,08	4,28	2,11	1,88	1,22

Fonte: Autoria Própria

4.2 Análise termogravimétrica de CROL

A TGA do CROL é mostrada na Figura 4. Primeiramente, na região 1, observa-se a perda de massa de 3,5% até 150° C, o que pode estar associado aos solventes utilizados no processo de rerrefino do óleo e, a partir de 100° C, início da combustão de hidrocarbonetos (SAIKIA *et al.*, 2001). A combustão de hidrocarbonetos ocorre entre 100° C e 550° C, sendo observada perda de massa de 25% na região 2. Além disso, a perda de massa entre 200 e 600° C pode estar associada a outros resíduos presentes no LORR bruto e perda de hidroxilas pela argila bentonítica (TEIXEIRA, SILVIO R.; SANTOS, 2008). Portanto, visando um menor gasto energético e devido à eliminação de hidrocarbonetos e resíduos presentes até 600° C, bem como a estabilização da perda de massa a partir de 650° C, este estudo foi realizado com a queima de LORR a 650° C para aplicação em compósitos de cimento.

Figura 4: Análise termogravimétrica de CROL.

Fonte: Autoria Própria

4.3 Perda na ignição (PNI)

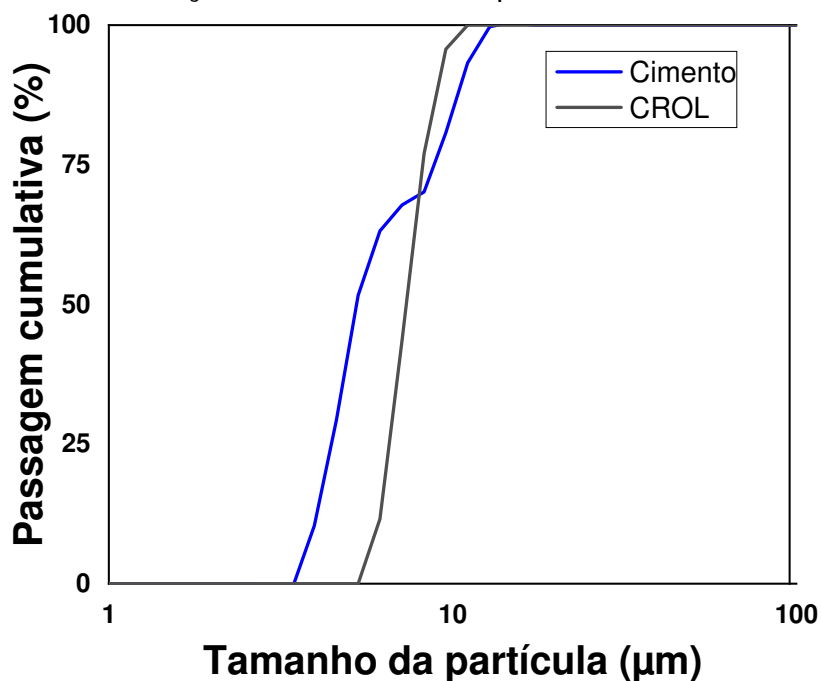
O teste PNI para CROL (queimado a 650° C) foi realizado de acordo com os procedimentos descritos no Método 1 da norma NM 18 (ANM, 2012), que se destina a todos os tipos de cimento, exceto aqueles que contêm adições de escória granulada de alto-forno.

O PNI médio obtido foi de 6,39%. Este valor é inferior ao valor máximo (10%) permitido para materiais classificados na Classe N, atendendo assim a exigência da legislação (ABNT, 2015a).

4.4 Tamanho da partícula

A cinza de CROL foi moída por 50 minutos, resultando nas distribuições de tamanho de partícula mostradas na Figura 5. Os resultados apresentaram uma granulometria fina, com tamanhos de grão variando de 5,5 a 9 µm de cinza de CROL e 3,5 a 10 µm de cimento. O tamanho médio (D50) da cinza de CROL e do cimento é de 7,09 e 4,46 µm, respectivamente. O processo de moagem de 50 min mostrou-se eficiente, com tamanhos de partículas CROL semelhantes ao cimento comercial.

Figura 5: Distribuição de CROL, moída por 50min, e cimento.



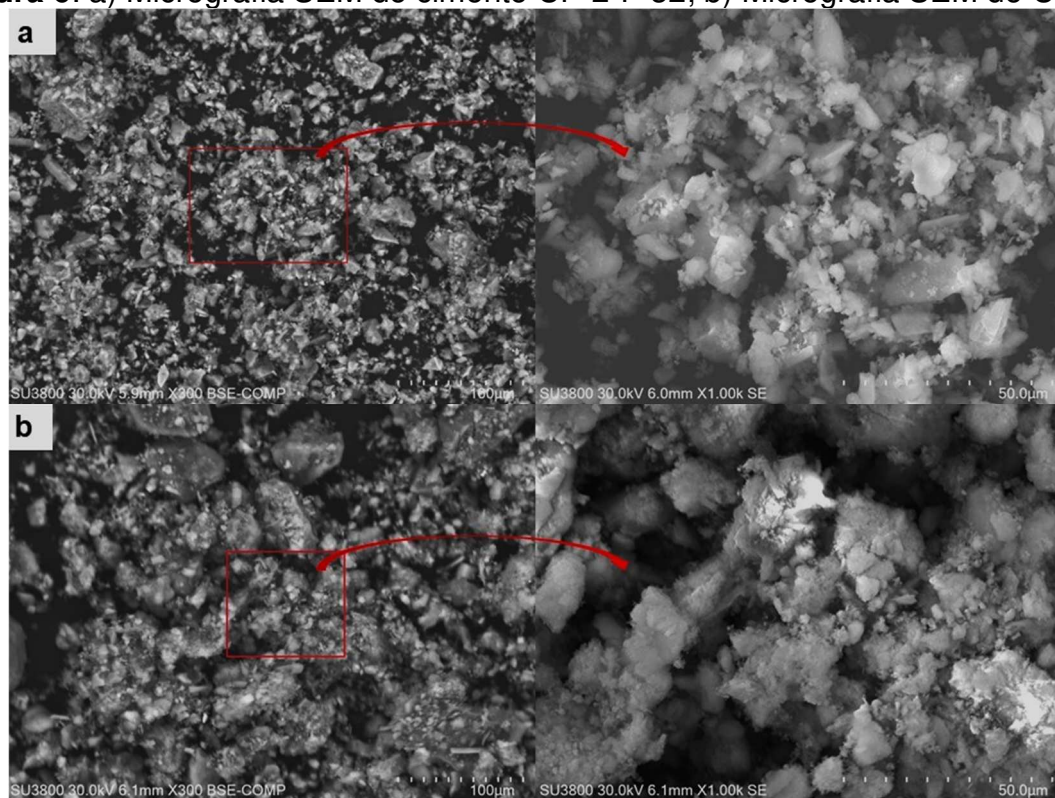
Fonte: Autoria Própria

4.5 Análise morfológica

A micrografia de CROL e do cimento são vistos na

Figura 6. Diferentes tamanhos e tipos de partículas podem ser observados nas imagens SEM CROL, com partículas maiores para cinzas CROL em comparação com o cimento (Fig. 3a). Observa-se em ambos os materiais, pequenas partículas aglomeradas em partículas maiores, além disso, nota-se que o CROL e partículas de cimento possuem morfologia heterogênea.

Figura 6: a) Micrografia SEM do cimento CP-2-F-32; b) Micrografia SEM de CROL.



Fonte: Autoria Própria

4.6 Teste de lixiviação de resíduos

A avaliação ambiental pelo teste de lixiviação de partículas de CROL não tratadas e tratadas termicamente são apresentadas na Tabela 4, como parte da fase 1. Os níveis de liberação de ânions (sulfato, cloreto e flúor), metais pesados e DOC (carbono orgânico dissolvido) tiveram valores dentro dos limites listados pela Diretiva Europeia de Aterros. As substâncias cancerígenas do petróleo foram relatadas anteriormente, como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) (RAUCKYTE; HARGREAVES; PAWLAK, 2006) e metais pesados como Mo, Ni, Pb, Cr, Cd e Ca (entre outros) em derivados de petróleo (KIM; HWANG; KIM, 1997; SADEEK *et al.*, 2014). O resíduo é classificado como perigoso quando os resultados do teste de lixiviação excedem os limites regulamentares, que são divididos em inertes (limites da UE na Tabela 4), não perigosos e perigosos.

Tabela 4: Concentração de lixiviado (mg/kg) por teste de lixiviação de conformidade para partículas CROL não tratadas (CROL-U) e tratadas termicamente (CROL) na proporção L/S 10.

mg/kg	CROL-U	CROL	LIMITE INERTE EUROPEU
Cond mS/cm	19220	5300	-
pH 20 °C	2	5	-
As	0,56	0,07	0,5
Ba	3,18	0,52	20
Cd	0,26	0,05	0,04
Cr	51,93	0,03	0,5
Cu	80,14	0,07	2
Hg	n.d.	n.d.	0,01
Mo	38,40	209,27	0,5
Ni	21,86	0,38	0,4
Pb	10,95	n.d.	0,5
Sb	0,06	0,06	0,06
Se	0,19	n.d.	0,1
Zn	3814,46	6,61	4
Sulfato	245760	20	1000
Cloreto	2	2	800
Fluoreto	260	2	10
DOC	3000	110	1000

n.d. não detectado e abaixo do limite de detecção. Relação L/S (em L/kg). Carbono orgânico dissolvido (DOC)

Fonte: Autoria Própria

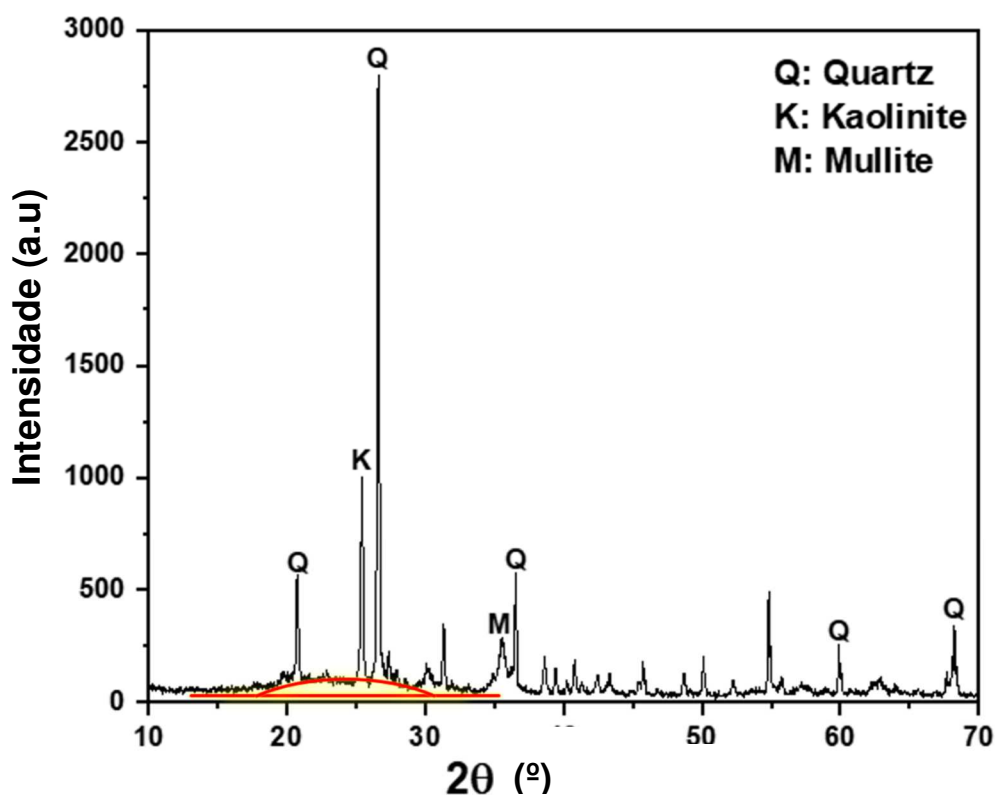
Os resultados mostraram que o CROL-U pode ser classificado como resíduo perigoso, pois excedeu os limites perigosos de Cr (10 mg/kg), Cu (50 mg/kg), Mo (10 mg/kg), Ni (10 mg/kg /kg), Zn (50 mg/kg) e Pb (10 mg/kg). Além disso, devido ao processo de tratamento químico do óleo lubrificante com ácido sulfúrico, foi observado um nível de liberação quase 250 vezes superior ao limite normativo (1000 mg/kg) para o ânion sulfato. Contudo, os níveis de liberação de sulfato para a amostra CROL (após o tratamento térmico) foram controlados (inferior a 20 mg/kg). No entanto, quando o tratamento térmico foi realizado, o CROL resultou apenas em Mo acima do limite para ser considerado um resíduo perigoso e deixou o Zn como um material não inerte. Esse óleo é reconhecido como de risco carcinogênico ao ser humano, e a mitigação desse resíduo em materiais cimentícios pode ser uma forma de encapsular metais pesados, produzir materiais mais ecologicamente corretos e manter o comportamento poluente sob forma monolítica (que são algumas das vantagens encontrados no presente trabalho).

4.7 Composição mineralógica

No difratograma, podemos observar a formação de um halo em materiais amorfos, com desvio da linha de base (convexa conformação), enquanto os materiais cristalinos têm como característica uma quantidade intensa de picos (SILVA *et al.*, 2021). O desvio da linha de base, que pode ser observado na faixa de 15 a 30° 2 θ graus, corrobora a existência de fases amorfas nas cinzas de CROL, conforme mostrado na Figura 7.

As cinzas de CROL apresentaram picos atribuídos a quartzo (Q, SiO₂), mulita (M, Al₆Si₂O₁₃) e caulinita (K, Al₂Si₂O₅(OH)₄). Essas fases cristalinas normalmente se formam em cinzas de argila (PITARCH *et al.*, 2021). Embora não seja um requisito padrão, a caracterização mineralógica é uma análise importante, uma vez que materiais cristalinos possuem baixa reatividade enquanto materiais amorfos possuem alto potencial pozolânico.

Figura 7: Difração de pó de raios X da cinza de CROL.



Fonte: Autoria Própria

4.8 Índice de atividade de força (IAF) de CROL

A Tabela 5 apresenta a resistência à compressão das amostras de referência e das amostras de teste após 28 dias de cura. A razão entre eles (Teste/Referência) foi utilizada para determinar o IAF. O cimento foi substituído por 25% de CROL em massa (CROL25%).

Os resultados obtidos neste ensaio estão de acordo com a exigência da ABNT, norma NBR 12653, sendo 90% (ABNT, 2015a) e ASTM C618, 75% (ASTM, 2019).

Tabela 5: Resistência à compressão de argamassas para ensaio de atividade de força aos 28 dias.

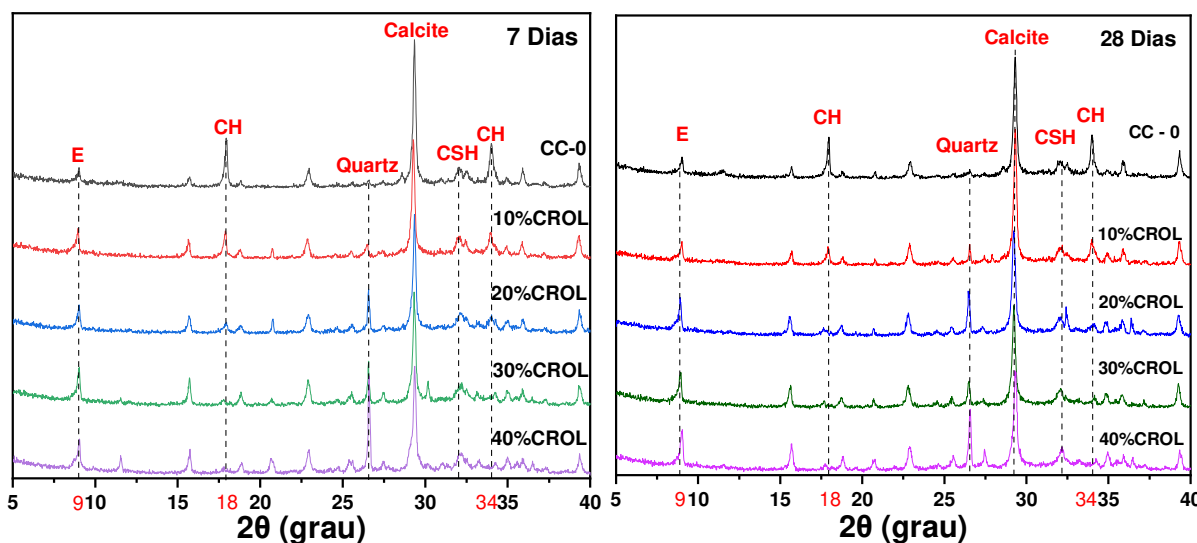
Amostras	Material Pozolânico (%)	Aditivo (%)	Força Compressiva (MPa)	IAF
CC-0 (Referência)	-	-	38,02 ± 1,90	115,14%
CROL25% (Teste)	25	0,3	43,78 ± 3,18	

Fonte: Autoria Própria

4.9 Monitoramento da atividade pozolânica

A reação pozolânica foi monitorada por difratogramas de raios X e os aspectos estruturais foram identificados na Figura 8. Ao considerar as fases etringita (E), presentes nos picos a 9°, pode-se notar um ligeiro aumento da fase com a adição de resíduo, provavelmente devido à presença e interação com o Ca(OH)_2 presente no cimento Portland (BERENGUER *et al.*, 2021). Nota-se um aumento do pico a 29,5° de calcita, provavelmente como resultado do aumento da reação pozolânica (MARTINS TORRES *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2021). Uma diminuição nos picos de CH (18° e 34°) foi observada à medida que a porcentagem de CROL aumentou. Devido à reatividade do CROL, foi observada uma queda nos picos a 18° e 34° à medida que a porcentagem de CROL aumentou, o que pode ser atribuído ao consumo do Ca(OH)_2 no processo de reação pozolânica para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidrato de aluminato de cálcio (C-A-H) e gel de hidrato de sulfoaluminato de cálcio (C-A-S-H) (HE *et al.*, 2021).

Figura 8: a) Padrões de DRX de amostras de controle e CROL aos 7 e 28 dias de cura.

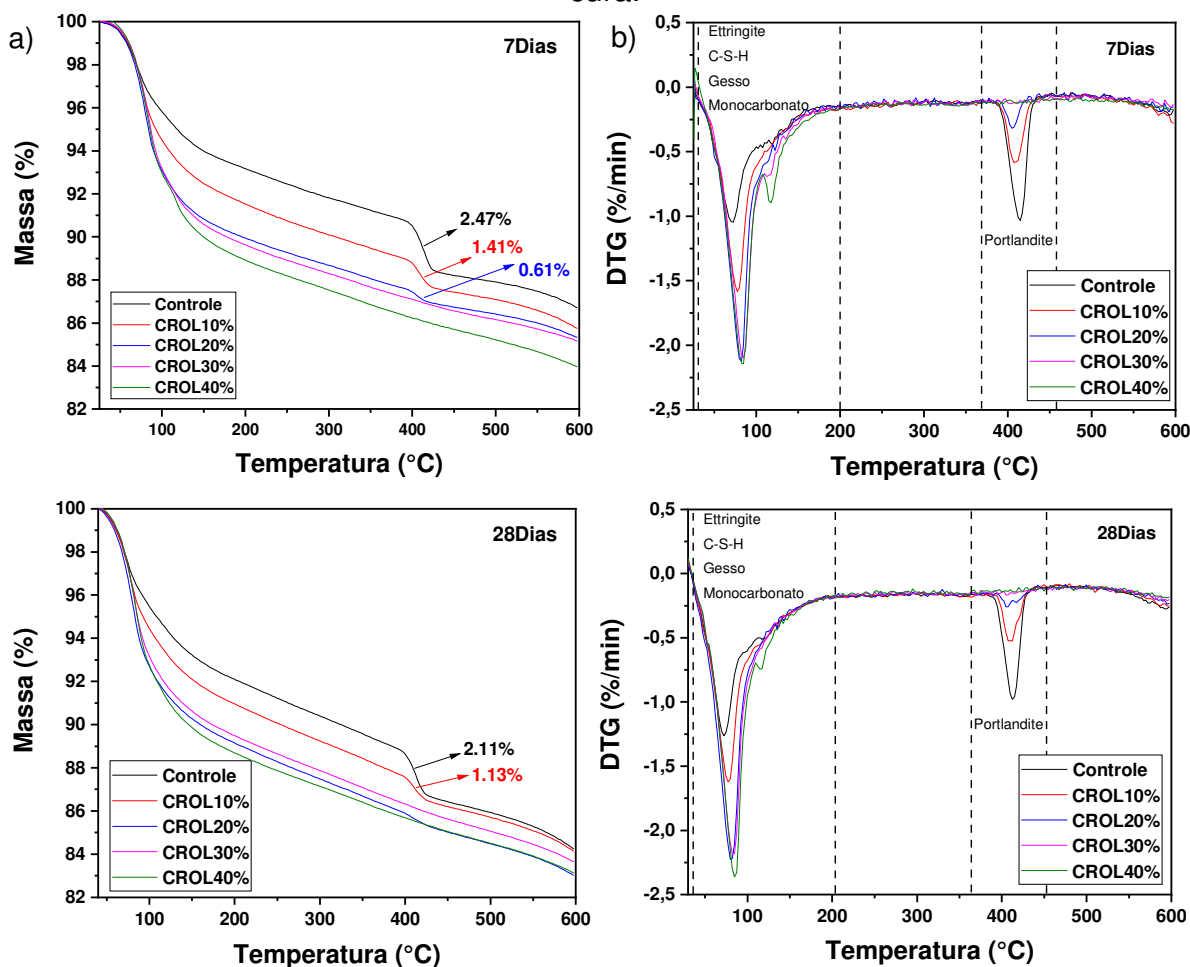


Fonte: Autoria Própria

Os resultados da análise térmica das pastas de cimento com e sem CROL são mostrados na Figura 9. A perda de massa entre 30°C e 200°C é devido à desidratação de componentes resistentes gerados por gel C-S-H, estratlingita, etringita e outros aluminossilicatos hidratados (KHANDELWAL; RHEE, 2022; ROJAS; CABRERA, 2002). A decomposição da portlandita Ca(OH)_2 é observada aproximadamente em 420°C. A análise termogravimétrica, assim como a análise de DRX, permite monitorar a reatividade pozolânica de CROL em pastas, aumentando o consumo de CH, de acordo com a diminuição da perda de massa a 420°C em pastas de CROL, conforme mostrado pelo DTG na Figura 9.

O CROL proporciona um consumo de CH mais rápido, e consequentemente há uma menor quantidade de CH na matriz cimentícia. A degradação térmica dessa matriz deve refletir essa redução com picos menos intensos nessa fase, conforme observado na Figura 9. Características semelhantes foram encontradas em diversos estudos com resíduos pozolânicos (MARTINS TORRES *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2021). Esses resultados corroboram os obtidos por DRX, onde o maior consumo de Ca(OH)_2 resultou na maior quantidade de C-S-H, hidrato de aluminato de cálcio (C-A-H) e gel de hidrato de sulfoaluminato de cálcio (C-A-S-H), com picos mais intensos de DTG com maior substituição de cimento por LORR..

Figura 9: a) TGA e b) DTG das pastas de controle e CROL após 7 e 28 dias de cura.



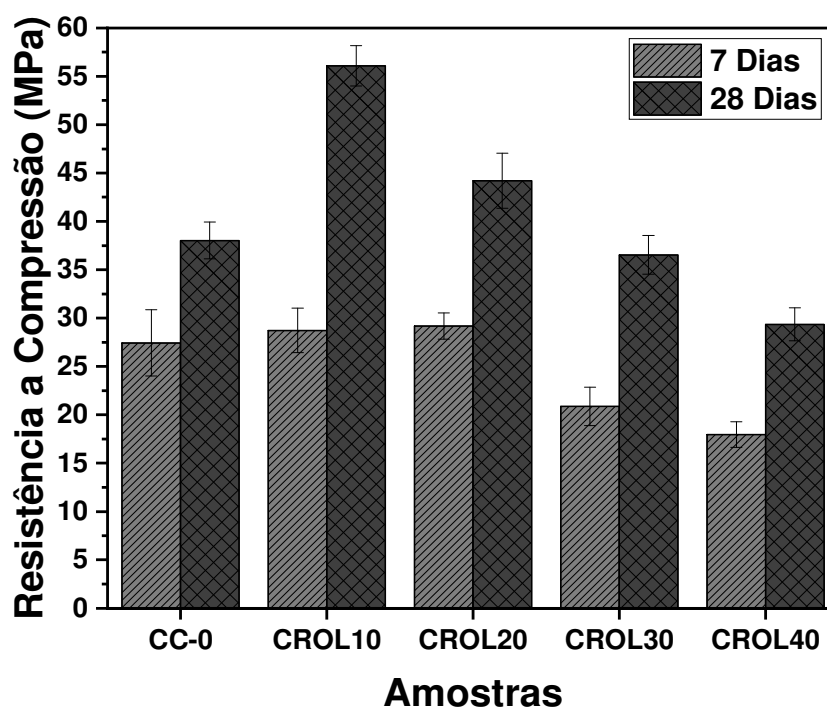
Fonte: Autoria Própria

As pastas de cimento com cinza de CROL apresentam teor reduzido de portlandita que ficou evidente a partir da análise de DRX com 7 e 28 dias de hidratação, suportando a atividade pozolânica da cinza de CROL. Vários estudos com bentonita e cinza de argila relataram características semelhantes (KIZHAKKUMODOM VENKATANARAYANAN; RANGARAJU, 2015; MARTINS TORRES *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2018). Por fim, o consumo mais rápido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, forma adicional de gel de hidrato de silicato de cálcio (C-S-H), pode contribuir para a maior durabilidade dos materiais cimentícios, uma vez que o hidróxido de cálcio é o principal alvo dos meios corrosivos para a deterioração do concreto (BAI; WILD; SABIR, 2003; KHAN; AHMAD; AL-GAHTANI, 2017).

4.10 Resistência à compressão e à flexão de argamassas

Na Figura 10 é apresentado a média e desvio padrão (dp) da resistência à compressão da argamassa controle e com 10%, 20%, 30% e 40% de substituição do cimento por CROL, com tempo de cura de 7 e 28 dias. Pode-se observar que a resistência à compressão de todas as argamassas aumenta com o tempo de cura.

Figura 10: Resistência à compressão dos corpos de prova de acordo com o tempo de cura.

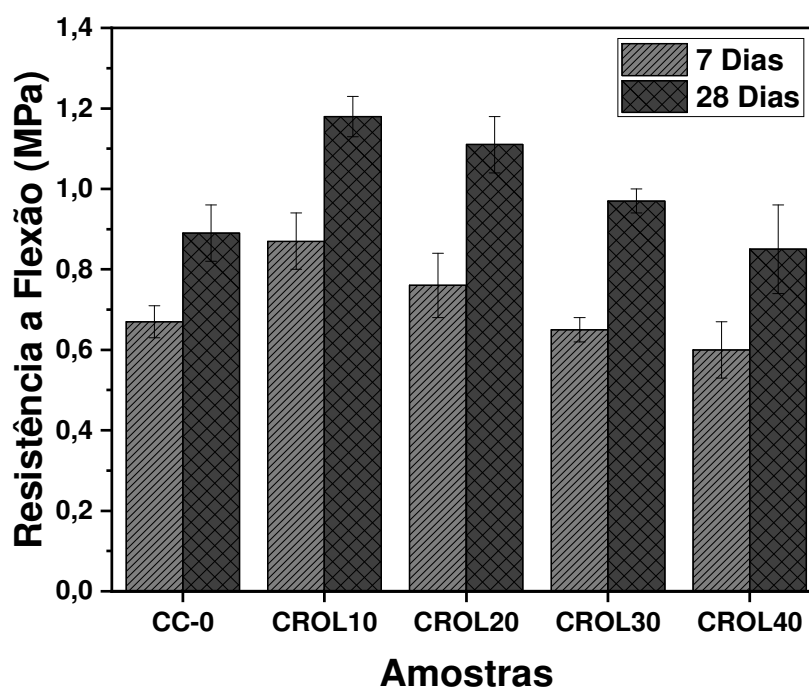


Fonte: Autoria Própria

Aos 7 dias de cura, foi observada resistência à compressão semelhante até CROL20% em argamassas em comparação com CC-0. No entanto, aos 28 dias de cura, CROL 10% e CROL 20% apresentaram um aumento da resistência à compressão em 47% e 15% em relação ao controle, respectivamente. Além disso, a substituição do cimento por CROL mostrou-se eficaz até 30% de substituição, com resistência mecânica semelhante ao controle. Isso provavelmente se deve à reação entre sílica, aluminossílica e hidróxido de cálcio, que forma um C-S-H adicional (RODIER *et al.*, 2019).

Resultados semelhantes foram encontrados para a resistência à flexão. A Figura 11 mostra a média e desvio padrão (dp) da resistência à flexão das argamassas, com tempo de cura de 7 e 28 dias.

Figura 11: Resistência à flexão dos corpos de prova de acordo com o tempo de cura.



Fonte: Autoria Própria

Aos 7 e 28 dias de cura, foi possível substituir o cimento por até 40% CROL, atingindo resistência à flexão semelhante ao controle. A resistência à flexão ótima foi observada com as argamassas CROL a 10%, com aumento de 32% em relação ao controle. Um material pozzolânico precisa de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (CH) para criar produtos de hidratação (atividade pozzolânica); o material cimentício é composto por CaO e quando materiais pozzolânicos são usados em conjunto com o cimento Portland, libera o CH durante a hidratação para ativar o material pozzolânico. No entanto, a quantidade de CH é limitada à quantidade de CaO liberada pelo cimento. Assim, após uma quantidade crítica de pozzolana, a resistência diminui (PAPADAKIS, 2000).

Com 20% e 30% obtivemos um aumento na resistência à flexão de 24,71% e 8,98%, respectivamente, em 28 dias de cura. Isso se deve à alta reatividade do CROL, rápido consumo de CH e produção adicional de gel C-S-H, assim como aos altos valores de resistência mecânica que permitem maior substituição do cimento pelo

CROL. Outros autores obtiveram resultados semelhantes com argila bentonítica (ASHRAF *et al.*, 2022; ZAREEI *et al.*, 2019).

A Tabela 6 apresenta o efeito do CROL no índice de vazios e absorção após imersão das argamassas. Observa-se que o índice de vazios e a absorção de água aumentam com a maior proporção de CROL nas argamassas. O índice de vazios teve um aumento de 23% ao utilizar 40% de CROL. Quanto à absorção após imersão, houve um aumento de 34,71%, respectivamente. A maior quantidade de vazios pode influenciar gerando mais pontos de fragilidade quando submetidos à resistência mecânica, sendo um fator de redução da resistência com maiores proporções de substituição do cimento.

Tabela 6: Índice de vazios e absorção de água de argamassas conforme ASTM C642-06.

Amostras	Índice de Vazios	Absorção após imersão
	(%)	(%)
CC-0	19,01 ± 0,19	9,65 ± 0,09
CROL10%	21,11 ± 0,64	10,92 ± 0,41
CROL20%	22,53 ± 0,92	11,94 ± 0,60
CROL30%	22,75 ± 0,92	12,13 ± 0,55
CROL40%	23,50 ± 0,89	13,00 ± 0,73

Fonte: Autoria Própria

4.11 Comportamento da lixiviação em argamassas de cimento triturado com CROL

Após caracterizar o CROL como material granular através do Ensaio de Conformidade, avaliou-se o desempenho de argamassas com cinza de CROL incorporada, simulando condições desfavoráveis como britagem. As argamassas trituradas foram analisadas de acordo com o teste de conformidade UNE 12457-4:2003, e os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Concentrações de lixiviado (mg/kg) por teste de lixiviação de conformidade para argamassas trituradas fabricadas com WFPS na relação L/S 10.

mg/kg	CC-0	CROL10%	CROL20%	CROL30%	CROL40%	LIMITE INERTE EUROPEU
σ (mS/cm)	6040	5120	3320	1637	1160	-
pH 20 °C	10	10	10	10	10	-
As	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,5
Ba	7,55	7,11	4,49	1,33	1,00	20
Cd	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,04
Cr	0,14	0,10	0,08	0,12	0,09	0,5
Cu	0,01	0,02	0,02	0,03	0,05	2
Hg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,01
Mo	0,03	0,70	1,83	3,67	4,14	0,5
Ni	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,4
Pb	n.d.	0,01	n.d.	n.d.	n.d.	0,5
Sb	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,06
Se	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,1
Zn	0,05	0,09	0,07	0,06	0,11	4
Sulfato	20	20	210	950	20	1000
Cloreto	30	30	20	20	20	800
Fluoreto	5	5	4	2	2	10

n.d. não detectado e abaixo do limite de detecção. Relação L/S (em L/kg).

Fonte: Autoria Própria

De acordo com os dados da Tabela 7, os metais pesados e ânions estabelecidos pela Diretiva Aterros atendem aos limites legais estabelecidos para serem classificados como produtos não perigosos. As amostras não podem ser consideradas materiais inertes devido à concentração de Mo que foi superior a 0,5 mg/kg; mas seria classificado como não perigoso, pois estava abaixo de 5 mg/kg. O ensaio de lixiviação é realizado com argamassas trituradas, pois simula uma condição real de descarte. De acordo com o comportamento de lixiviação das diferentes amostras testadas, as cinzas de CROL incorporadas aos materiais cimentícios nas taxas de incorporação estudadas são classificadas como material não perigoso, o que modifica sua categoria, de perigoso para não perigoso; reduzindo assim os riscos ambientais após a incorporação em argamassas.

4.12 Custo e ecoeficiência

A substituição parcial do cimento por CROL e o potencial de sustentabilidade da argamassa foram analisados e apresentados na Tabela 8.

Para avaliar a viabilidade dessa aplicação, é necessário ter uma relação custo-benefício. Os custos por kg dos materiais utilizados na produção da argamassa foram baseados no preço de compra na região de Presidente Prudente, São Paulo, Brasil, e os custos de transporte, manuseio, execução e controle de qualidade foram desconsiderados. O custo de produção da queima de CROL foi desprezado, devido ao óleo presente servir de combustão em equipamentos de incineração de resíduos industriais das empresas consultadas (SILVA; FRANCISCO; L, 2017). Com base no mesmo princípio de utilização do óleo presente no CROL como combustão em incineradores, a energia incorporada também foi considerada nula.

Tabela 8: Estimativa de custo de 1 m³ controle e CROL30% de compósitos de argamassa.

Material	Quantidade (kg/m ³)		Preço (USD/kg)	Total (USD/m ³)	
	Controle	CROL30%		Controle	CROL30%
Cimento	578.13	404.69	0.146	84.40	59.08
Areia Natural	1589.84	1589.84	0.011	17.48	17.48
CROL30%	0	173.44	0.000	0	0
Água	280.46	280.46	0.001	0.28	0.28
Custo Total				102.16	76.84

Fonte: Autoria Própria

O custo de 1 m³ de CROL e o controle são mostrados na Tabela 8. O custo de 1 m³ de argamassa de controle é de 102,16 USD e com 30% de cimento substituído por CROL, é de 85,74 USD. Portanto, a argamassa com 30% de substituição por CROL, apresentou redução de custo de 24,80%. Os resultados demonstram um grande potencial deste sistema na redução de impactos ambientais e de custos na produção de materiais cimentícios.

5 CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados, o CROL produzido neste trabalho mostrou-se um excelente material pozolânico, atendendo as normas e requisitos específicos, como granulometria, composição química e IAF. As seguintes conclusões são tiradas desta investigação:

1. Os resultados do DTG mostraram que o CROL contribui para o aumento da atividade pozolânica, aumentando o consumo de portlandita, gerando a maior quantidade de C-S-H, C-A-H e C-A-S-H;
2. Corroborando os resultados do DTG, o ensaio de DRX também mostrou a alta reatividade do CROL, consumindo CH rapidamente e contribuindo para a formação adicional de gel de hidrato de silicato de cálcio (C-S-H);
3. A substituição de cimento por CROL até 30% resultam em sistemas com resistências mecânicas semelhante em comparação com argamassas de controle, sendo uma alternativa de baixo custo como material cimentício complementar;
4. O consumo mais rápido de Ca(OH)_2 , forma adicional de gel de hidrato de silicato de cálcio (C-S-H), pode contribuir para a maior durabilidade dos materiais cimentícios, uma vez que o hidróxido de cálcio é o principal alvo dos meios corrosivos para a deterioração do concreto;
5. Os testes de lixiviação através do Compliance Test mostraram que o CROL bruto libera altos níveis de alguns metais pesados e ânions, que foram classificados como resíduos perigosos. O tratamento realizado no CROL contribuiu para reduzir os níveis de liberação da maioria dos metais pesados e ânions. No entanto, a matriz cimentícia mostrou-se eficaz em encapsular os metais pesados nas cinzas de CROL, uma vez que os níveis de liberação das argamassas britadas ficaram abaixo dos limites perigosos, portanto, classificadas como não perigosas. Consequentemente, não apresenta risco ao meio ambiente no final de sua vida quando o material está fragmentado, com alto contato entre o lixiviado e o sólido;
6. A estimativa de custo mostrou que o uso do CROL pode reduzir o custo das argamassas em até 24,80%, respectivamente, sendo uma alternativa sustentável ao aproveitamento de um resíduo industrial perigoso em sua forma original.

REFERÊNCIAS

ABADOU, Yacine; MITICHE-KETTAB, Ratiba; GHRIEB, Abderrahmane. **Ceramic waste influence on dune sand mortar performance.** *Construction and Building Materials*, v. 125, p. 703–713, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.083>>.

ABNT. *NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015a.

ABNT. *NBR 12653 - Pozzolan materials — Requirements*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b.

AL-KUTTI, Walid; SAIFUL ISLAM, A. B.M.; NASIR, Muhammad. **Potential use of date palm ash in cement-based materials.** *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, v. 31, n. 1, p. 26–31, 2019.

ANDERSON, Derrick J.; SMITH, Scott T.; AU, Francis T.K. **Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate.** *Construction and Building Materials*, v. 117, p. 20–28, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.153>>.

ANDRADE NETO, José da Silva; DE LA TORRE, Angeles G.; KIRCHHEIM, Ana Paula. **Effects of sulfates on the hydration of Portland cement – A review.** *Construction and Building Materials*, v. 279, p. 122428, 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821001884>>.

ANM. NM 18 - **Portland cement - Chemical analysis - Determination of loss on ignition.** p. 4, 2012.

APROMAC. **Gerenciamento de Óleos Lubrificantes Usados ou Contaminados.** p. 333, 2011. Disponível em: <<https://static-sindirrefino-prod.s3.amazonaws.com/upload/manuaisetreinamentos/00001500.pdf>>.

ASHRAF, Muhammad *et al.* **Developing a sustainable concrete incorporating bentonite clay and silica fume: Mechanical and durability performance.** *Journal of Cleaner Production*, v. 337, p. 130315, 2022. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652621044796>>.

ASTM. **ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.** West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2019.

ASTM. D5370-14, **Standard Specification for Pozzolanic Blended Materials in Construction Applications.** West Conshohocken, ASTM, p. 3 p., 2014.

ASTM C1437-20. **Standard test method for flow of hydraulic cement mortar.** p. 2, 2020. Disponível em: <www.astm.org>.

ASTM C305-20. **Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.** p. 3, 2020. Disponível em: <www.astm.org>.

ASTM C348-20. **Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars.** p. 6, 2020. Disponível em: <www.astm.org>.

ASTM C349-18. **Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars.** p. 4, 2018. Disponível em: <www.astm.org>.

ASTM C618. **Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.** . West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 2019.

ASTM C642-13. **Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.** p. 3, 2013. Disponível em: <www.astm.org>.

AWOYERA, P.O. *et al.* **Microstructural characteristics, porosity and strength development in ceramic-laterized concrete.** *Cement and Concrete Composites*, v. 86, p. 224–237, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946517306583>>.

AWOYERA, P.O. *et al.* **Suitability of mortars produced using laterite and ceramic wastes: Mechanical and microscale analysis.** *Construction and Building Materials*, v. 148, p. 195–203, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817309236>>.

AWOYERA, Paul O. *et al.* **Characterization of ceramic waste aggregate concrete.** *HBRC Journal*, v. 14, n. 3, p. 282–287, 2018. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1016/j.hbrcj.2016.11.003>>.

AWOYERA, Paul O.; ADESINA, Adeyemi; GOBINATH, Ravindran. **Role of recycling fine materials as filler for improving performance of concrete - a review.** *Australian Journal of Civil Engineering*, v. 17, n. 2, p. 85–95, 2019. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14488353.2019.1626692>>.

BAI, J.; WILD, S.; SABIR, B.B. **Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC–PFA–MK binder compositions exposed to synthetic seawater.** *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 3, p. 353–362, 2003. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884602009614>>.

BERENGUER, R. *et al.* **Cement-based materials: Pozzolanic activities of mineral additions are compromised by the presence of reactive oxides.** *Journal of Building Engineering*, v. 41, p. 102358, 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S235271022100214X>>.

BRAZ, Inara Guglielmetti *et al.* **Effect of the Addition of Aluminum Recycling Waste on the Pozzolanic Activity of Sugarcane Bagasse Ash and Zeolite.** *Waste and Biomass Valorization*, v. 10, n. 11, p. 3493–3513, 2019. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12649-018-0342-6>>.

BURSI, Elena *et al.* **Chelating Agent Treatment on Leaded Residuals from Glass Separated Urban Collection to Be Used in Cement Mortars.** *Waste and Biomass Valorization*, v. 9, n. 12, p. 2493–2501, 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12649-018-0254-5>>.

C162-05; ASTM C162-05. **Standard terminology of glass and glass products.** *ASTM International*, v. 05, n. Reapproved, p. 16, 2015.

CORDEIRO, Guilherme C.; KURTIS, Kimberly E. **Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity.** *Cement and Concrete Research*, v. 97, p. 41–49, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884616310122>>.

CORDEIRO, Guilherme Chagas; ANDREÃO, Pryscila Vinco; TAVARES, Luís Marcelo. **Pozzolanic properties of ultrafine sugar cane bagasse ash produced by controlled burning.** *Heliyon*, v. 5, n. 10, p. e02566, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844019362267>>.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural.** V. 1 ed. São Paulo, SP: IBRACON, 2005.

DHINAKARAN, G.; CHANDANA, Gangava Hari. **Compressive Strength and Durability of Bamboo Leaf Ash Concrete.** *Jordan Journal of Civil Engineering*, v. 10, n. 3, p. 279–289, 2016. Disponível em: <https://elearning.just.edu.jo/jjce/issues/show_paper.php?pid=3601>.

DWIVEDI, V.N. *et al.* **A new pozzolanic material for cement industry: Bamboo leaf ash.** *INTERNATIONAL JOURNAL OF THE PHYSICAL SCIENCES*, v. 1, n. 3, p. 106–111, 2006.

EL-DIEB, Amr S. *et al.* **Ceramic waste powder: from landfill to sustainable concretes.** *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, v. 171, n. 3, p. 109–116, 2018. Disponível em: <<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/jcoma.17.00019>>.

ELAQRA, Hossam A.; HALOUB, Mohamed A. Abou; RUSTOM, Rifat N. **Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior of concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 203, p. 75–82, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819300923>>.

FAO. **Food and Agricultural Organization Statistical Yearbook.** 2016. Disponível em: <www.fao.org>.

FRÍAS, Moisés *et al.* **Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes.** *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 9, p. 1019–1023, 2012. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946512001151>>.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. **Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material.** *Cement and Concrete Composites*, v. 29, n.

6, p. 515–524, 2007. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946507000418>>.

GARSDIE, M. **Global demand for lubricants from 2000 to 2019**. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/411616/lubricants-demand-worldwide/>>.

GHOLAMPOUR, Aliakbar; OZBAKKALOGU, Togay. **Performance of sustainable concretes containing very high volume Class-F fly ash and ground granulated blast furnace slag**. *Journal of Cleaner Production*, v. 162, p. 1407–1417, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965261731257X>>.

GHOSH, Sadhan Kumar. **Sustainable Waste Management: Policies and Case Studies**. 2017, Singapore: Springer Singapore, 2017. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-981-13-7071-7>>.

HAJIMOHAMMADI, Ailar; NGO, Tuan; KASHANI, Alireza. **Glass waste versus sand as aggregates: The characteristics of the evolving geopolymer binders**. *Journal of Cleaner Production*, v. 193, p. 593–603, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618314227>>.

HAN, Jianguo *et al.* **Influence of sodium aluminate on cement hydration and concrete properties**. *Construction and Building Materials*, v. 64, p. 342–349, 2014. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814004061>>.

HAN, Jianguo *et al.* **Study of aluminum sulfate and anhydrite on cement hydration process**. *Materials and Structures*, v. 49, n. 4, p. 1105–1114, 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1617/s11527-015-0561-2>>.

HAN, Weiwei *et al.* **Using of borosilicate glass waste as a cement additive**. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, v. 381, p. 11–15, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168583X16302208>>.

HE, Ziming *et al.* **Research progress on recycled clay brick waste as an alternative to cement for sustainable construction materials**. *Construction and Building Materials*, v. 274, p. 122113, 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820341167>>.

HEIDARI, Ali; TAVAKOLI, Shiva; TAVAKOLI, Davoud. **Reusing Waste Ceramic and Waste Sanitary Ware in Concrete as Pozzolans with Nano-Silica and Metakaolin.** *International Journal of Sustainable Construction Engineering Technology*, v. 10, n. 1, 2019. Disponível em: <<https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/IJSCET/article/view/4863/2933>>.

JAVALI, Shriraksha *et al.* **Eco-concrete for sustainability: utilizing aluminium dross and iron slag as partial replacement materials.** *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 19, n. 9, p. 2291–2304, 2017. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10098-017-1419-9>>.

KAMALI, Mahsa; GHAHREMANINEZHAD, Ali. **Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials.** *Construction and Building Materials*, v. 98, p. 407–416, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181500687X>>.

KESHAVARZ, Zahra; MOSTOFINEJAD, Davood. **Porcelain and red ceramic wastes used as replacements for coarse aggregate in concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 195, p. 218–230, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818326989>>.

KHAN, Muhammad Umar; AHMAD, Shamsad; AL-GAHTANI, Husain Jubran. **Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete: An Overview on Chloride Diffusion and Prediction of Corrosion Initiation Time.** *International Journal of Corrosion*, v. 2017, p. 1–9, 2017. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/ijc/2017/5819202/>>.

KHANDELWAL, Saurabh; RHEE, Kyong Yop. **Evaluation of pozzolanic activity, heterogeneous nucleation, and microstructure of cement composites with modified bentonite clays.** *Construction and Building Materials*, v. 323, p. 126617, 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061822003087>>.

KIM, Myung-Soo; HWANG, Jong-Sic; KIM, Hyung-Rak. **Re-refining of waste lube oils by vacuum distillation with petroleum atmospheric residuum.** *Journal of Environmental Science and Health . Part A: Environmental Science and Engineering*

and Toxicology, v. 32, p. 1013–1024, 1997.

KIZHAKKUMODOM VENKATANARAYANAN, Harish; RANGARAJU, Prasada Rao. **Effect of grinding of low-carbon rice husk ash on the microstructure and performance properties of blended cement concrete.** *Cement and Concrete Composites*, v. 55, p. 348–363, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946514001838>>.

KUPAREVA, Antonina; MÄKI-ARVELA, Päivi; MURZIN, Dmitry Yu. **Technology for rerefining used lube oils applied in Europe: a review.** *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, v. 88, n. 10, p. 1780–1793, 2013. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/jctb.4137>>.

KWAO-BOATENG, Emmanuela *et al.* **Re-refining Used Engine Oil in Ghana Using Solvent Extraction and Acid-Clay Treatment.** *International Journal of Chemical Engineering*, v. 2022, p. 1–8, 2022. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/ijce/2022/6344409/>>.

LADOMERSKÝ, Juraj *et al.* **One-year properties of concrete with partial substitution of natural aggregate by cupola foundry slag.** *Journal of Cleaner Production*, v. 131, p. 739–746, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616303778>>.

LAIDANI, Zine El-Abidine *et al.* **Potential pozzolanicity of Algerian calcined bentonite used as cement replacement: optimisation of calcination temperature and effect on strength of self-compacting mortars.** *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, v. 26, n. 4, p. 1379–1401, 2022.

LI, Qiong *et al.* **Performance of waste glass powder as a pozzolanic material in blended cement mortar.** *Construction and Building Materials*, v. 324, p. 126531, 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061822002239>>.

LIMA-GUERRA, D. J. *et al.* **Use of Bentonite and Organobentonite as Alternatives of Partial Substitution of Cement in Concrete Manufacturing.** *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 8, n. 1, p. 15–26, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s40069-013-0066-8>>.

LWART. **Como é realizado rerrefino na fábrica da Iwart.** Disponível em: <<http://www.lwart.com.br/site/content/lubrificantes>>.

MARTINS TORRES, Sara *et al.* **Assessing the pozzolanic activity of sugarcane bagasse ash using X-ray diffraction.** *Construction and Building Materials*, v. 264, p. 120684, 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820326891>>. Acesso em: 13 abr. 2022.

MARTIRENA HERNÁNDEZ, J.F. *et al.* **Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction.** *Cement and Concrete Research*, v. 28, n. 11, p. 1525–1536, 1998. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884698001306>>.

MAYUR MADHUKAR MASKE, NANDKUMAR KRISHNARAO PATIL, Amey Deepak Katdare. **Review of application of plain and calcined bentonite as a cement blending material in concrete and mortar.** *PSYCHOLOGY AND EDUCATION*, v. 58, n. 1, p. 873–878, 2021.

MEDINA, C.; FRÍAS, M.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M.I. **Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate.** *Construction and Building Materials*, v. 31, p. 112–118, 2012. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061811007653>>.

MOHAMMADHOSSEINI, Hossein *et al.* **Enhanced performance of green mortar comprising high volume of ceramic waste in aggressive environments.** *Construction and Building Materials*, v. 212, p. 607–617, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819308682>>.

MONTEIRO, S. **Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brazil.** *Applied Clay Science*, v. 27, n. 3–4, p. 229–234, 2004. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169131704000316>>.

MORAES, M. J. B. De. **Estudo do potencial da cinza de folha de bambu para sua utilização como material pozolânico e sustentável em matrizes cimentantes.** p. 90, 2019.

MORAES, M.J.B. *et al.* **Production of bamboo leaf ash by auto-combustion for pozzolanic and sustainable use in cementitious matrices.** *Construction and Building Materials*, v. 208, p. 369–380, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819304805>>.

MORAIS, Aline Sardinha Cordeiro *et al.* **Fluorescent Lamp Glass Waste Incorporation into Clay Ceramic: A Perfect Solution.** *JOM*, v. 68, n. 9, p. 2425–2434, 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11837-016-1985-z>>.

NBR 10004. **Solid waste – Classification.** ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 1–71, 2004.

NBR 10005:2004. **procedure for obtention leaching extract of solid wastes.** ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 1–16, 2004.

NBR 16697. **Portland cement - Requirements.** ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 12, 2018.

NBR 5736, ABNT. **Cimento Portland pozolânico.** ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 1 pag., 1991.

NBR 5752:2014. **Pozzolanic materials — Determination of the performance index with Portland cement at 28 days.** ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 4, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** Bookman ed. Porto Alegre: 5ª ed., 2016.

ONER, A.; AKYUZ, S. **An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete.** *Cement and Concrete Composites*, v. 29, n. 6, p. 505–514, 2007.

ÖZBAY, Erdoğan Erdoğan; ERDEMİR, Mustafa; DURMUŞ, Halil İbrahim İbrahim. **Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review.** *Construction and Building Materials*, v. 105, p. 423–434, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815308254>>.

PAIVA, Fábio Friol Guedes De *et al.* **Utilization of inorganic solid wastes in cementitious materials – A systematic literature review.** *Construction and Building*

Materials, v. 285, p. 122833, 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821005936>>.

PAL, S.C; MUKHERJEE, A; PATHAK, S.R. **Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete.** *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 9, p. 1481–1486, 2003. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884603000620>>.

PAPADAKIS, Vagelis G. **Effect of fly ash on Portland cement systems.** *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 10, p. 1647–1654, 2000.

PARK, Sung-Woo *et al.* **Electrokinetic remediation of contaminated soil with waste-lubricant oils and zinc.** *Journal of Hazardous Materials*, v. 169, n. 1–3, p. 1168–1172, 2009. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389409006256>>.

PAVLÍK, Zbyšek *et al.* **DSC and TG Analysis of a Blended Binder Based on Waste Ceramic Powder and Portland Cement.** *International Journal of Thermophysics*, v. 37, n. 3, p. 32, 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10765-016-2043-3>>.

PENTEADO, Carmenlucia Santos Giordano; VIVIANI DE CARVALHO, Eduardo; LINTZ, Rosa Cristina Cecche. **Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing.** *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 514–520, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652615008756>>.

PINHEIRO, Carolina T.; QUINA, Margarida J.; GANDO-FERREIRA, Licínio M. **Management of waste lubricant oil in Europe: A circular economy approach.** *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 51, n. 18, p. 2015–2050, 2021. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10643389.2020.1771887>>.

PITARCH, A. M. *et al.* **Effect of Tiles, Bricks and Ceramic Sanitary-Ware Recycled Aggregates on Structural Concrete Properties.** *Waste and Biomass Valorization*, v. 10, n. 6, p. 1779–1793, 2019. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12649-017-0154-0>>.

PITARCH, A.M. *et al.* **Pozzolanic activity of tiles, bricks and ceramic sanitary-ware in eco-friendly Portland blended cements.** *Journal of Cleaner Production*, v. 279, p. 123713, 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620337586>>.

RAJASEKAR, A.; ARUNACHALAM, K.; KOTTAISAMY, M. **Assessment of strength and durability characteristics of copper slag incorporated ultra high strength concrete.** *Journal of Cleaner Production*, v. 208, p. 402–414, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618331342>>.

RASHID, Khuram *et al.* **Analytical framework for value added utilization of glass waste in concrete: Mechanical and environmental performance.** *Waste Management*, v. 79, p. 312–323, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X18304835>>.

RASHID, Khuram *et al.* **Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate.** *Construction and Building Materials*, v. 154, p. 829–840, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817315702>>.

RAUCKYTE, Teresa; HARGREAVES, Douglas J.; PAWLAK, Zenon. **Determination of heavy metals and volatile aromatic compounds in used engine oils and sludges.** *Fuel*, v. 85, n. 4, p. 481–485, 2006. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001623610500267X>>.

RODIER, Loïc *et al.* **Potential use of sugarcane bagasse and bamboo leaf ashes for elaboration of green cementitious materials.** *Journal of Cleaner Production*, v. 231, p. 54–63, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619317421>>.

ROJAS, Moisés Frías; CABRERA, Joseph. **The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin–lime–water systems.** *Cement and Concrete Research*, v. 32, n. 1, p. 133–138, 2002. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884601006421>>.

S. EL-DIEB, Amr; R. TAHA, Mahmoud; I. ABU-EISHAH, Samir. **The Use of Ceramic Waste Powder (CWP) in Making Eco-Friendly Concretes.** *Ceramic Materials -*

Synthesis, Characterization, Applications and Recycling, 2019. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/books/ceramic-materials-synthesis-characterization-applications-and-recycling/the-use-of-ceramic-waste-powder-cwp-in-making-eco-friendly-concretes>>.

SADDEEK, Sadeek A. *et al.* **Hydrotreating of waste lube oil by rejuvenated spent hydrotreating catalyst.** *Egyptian Journal of Petroleum*, v. 23, n. 1, p. 53–60, 2014. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1110062114000105>>.

SAIKIA, N.J *et al.* **Physicochemical and cementitious properties of sludge from oil field effluent treatment plant.** *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 8, p. 1221–1225, 2001. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884601005506>>.

SAMARAKOON, M.H. H.; RANJITH, P.G. G.; DE SILVA, V.R.S. R.S. **Effect of soda-lime glass powder on alkali-activated binders: Rheology, strength and microstructure characterization.** *Construction and Building Materials*, v. 241, p. 118013, 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820300180>>. Acesso em: 13 abr. 2022.

SHARMA, Devinder. **Utilization of Waste Foundry Slag and Alccofine for Developing High Strength Concrete.** *International Journal of Electrochemical Science*, p. 3190–3205, 2016. Disponível em: <<http://www.electrochemsci.org/abstracts/vol11/110403190.pdf>>.

SHARMA, Rachit. **Laboratory Study on Effect of Construction Wastes and Admixtures on Compressive Strength of Concrete.** *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 42, n. 9, p. 3945–3962, 2017. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s13369-017-2540-0>>.

SIDDIQUE, Salman *et al.* **Strength and impact resistance properties of concrete containing fine bone china ceramic aggregate.** *Construction and Building Materials*, v. 169, p. 289–298, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818304744>>.

SIDDIQUE, Salman; SHRIVASTAVA, Sandeep; CHAUDHARY, Sandeep. **Influence**

of ceramic waste on the fresh properties and compressive strength of concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, v. 23, n. 2, p. 212–225, 2019. Disponível em:

<<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19648189.2016.1275985>>.

SILVA, Rogério José Da; FRANCISCO, Renata Vitor Chaves S. G.; L, Alexandre Oliveira. **Co processing of Scrap Tires and Waste from the Re refining of Used Lube Oil in Cement Kilns.** *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 4, n. 6, p. 4, 2017.

SILVA, F. A. N. **Avaliação ambiental de peças cerâmicas industriais contendo resíduo da indústria petrolífera.** *Anais do 57º Congresso da Associação Brasileira de Metais e Metalurgia*, p. 12, 2000.

SILVA, Lucas Henrique Pereira *et al.* **Bamboo leaf ash for use as mineral addition with Portland cement.** *Journal of Building Engineering*, v. 42, n. February, p. 1–9, 2021.

SINGH, N.B; SINGH, V.D; RAI, Sarita. **Hydration of bagasse ash-blended portland cement.** *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 9, p. 1485–1488, 2000. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884600003240>>.

SOUSA, Vitor; BOGAS, José Alexandre. **Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production.** *Journal of Cleaner Production*, v. 306, p. 127277, 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652621014967>>.

SOUZA, G. P.; HOLANDA, J. N. F. **Propriedades Cerâmicas de Massas Argilosas Contendo Resíduo de Borra de Petróleo Encapsulada.** *Anais do 14º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECIMAT*, 2000.

TAYLOR-LANGE, Sarah C. *et al.* **Calcined kaolinite–bentonite clay blends as supplementary cementitious materials.** *Applied Clay Science*, v. 108, p. 84–93, 2015. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169131715000423>>.

TEIXEIRA, Silvio R.; SANTOS, Gleyson T. de A. **Incorporation of waste from used**

lube oil re-refining in ceramic body: characterization and properties. *REVISTA CIÊNCIAS EXATAS – UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ*, v. 2, n. 1, p. 6, 2008.

TEIXEIRA, Silvio Rainho. **CARACTERIZAÇÃO DE ARGILAS USADAS PARA PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA E ESTUDO DAS ALTERAÇÕES NAS SUAS PROPRIEDADES PELA ADIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.** 2006. 182 f. Universidade Estadual Paulista, 2006.

TEIXEIRA, Silvio Rainho. **CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS PRODUZIDOS EM USINA DE RE-REFINO DE ÓLEO LUBRIFICANTE USADO VISANDO SEU APROVEITAMENTO.** *Research, Society and Development*, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/267249278_CARACTERIZACAO_DE_RESIDUOS_PRODUZIDOS_EM_USINA_DE_RE-REFINO_DE_OLEO_LUBRIFICANTE_USADO_VISANDO_SEU_APROVEITAMENTO>.

TORRES, Anthony; BARTLETT, Laura; PILGRIM, Cole. **Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland Cement Concrete.** *Construction and Building Materials*, v. 135, p. 674–681, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817300405>>.

TREZZA, M. A.; RAHHAL, V. F. **Self-activation of slag-cements with glass waste powder.** *Materiales de Construcción*, v. 69, n. 336, p. 203, 2019. Disponível em: <<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/2267>>.

UK, Environment Agency. **Technical guidance WM3: Waste classification - Guidance on the classification and assessment of waste.** Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1021051/Waste_classification_technical_guidance_WM3.pdf>.

VILLAR-COCIÑA, Ernesto *et al.* **Pozzolanic behavior of bamboo leaf ash: Characterization and determination of the kinetic parameters.** *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 1, p. 68–73, 2011. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946510001332>>.

VILLAR COCIÑA, Ernesto *et al.* **Pozzolanic Characterization of Cuban Bamboo Leaf Ash: Calcining Temperature and Kinetic Parameters.** *Waste and Biomass*

Valorization, v. 9, n. 4, p. 691–699, 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12649-016-9741-8>>.

WANG, Wenjing *et al.* **Effect of physical properties of recycled coarse aggregate on the mechanical properties of recycled aggregate thermal insulation concrete (RATIC).** *Construction and Building Materials*, v. 180, p. 229–238, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818313163>>.

YANG, Chun *et al.* **Characterization and differentiation of chemical fingerprints of virgin and used lubricating oils for identification of contamination or adulteration sources.** *Fuel*, v. 163, p. 271–281, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236115009679>>.

ZADRAŽIL, T.; VODÁK, F.; KAPIČKOVÁ, O. **Effect of Temperature and Age of Concrete on Strength – Porosity Relation.** *Acta Polytechnica*, v. 44, n. 1, 2004. Disponível em: <<https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/516>>.

ZAREEI, Seyed Alireza *et al.* **Recycled ceramic waste high strength concrete containing wollastonite particles and micro-silica: A comprehensive experimental study.** *Construction and Building Materials*, v. 201, p. 11–32, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818331519>>.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Calcinação da Borra do Resíduo de Rerrefino de Óleo Lubrificante

Conforme requisitos da norma americana ASTM C618 (ASTM C618, 2019), o resíduo em análise precisa ser composto por no mínimo 70% da somatória de sílica (SiO_2), alumínio (Al_2O_3) e ferro (Fe_2O_3), para ser utilizado como um aditivo em compósitos cimentícios.

Com base nesses valores, CROL foi submetido a um teste de caracterização, para análise da sua composição química, sendo calcinado nas seguintes temperaturas: 650°C, 700°C, 850°C e 1000°C. Os resultados das amostras podem ser analisados a seguir, na Tabela 9.

Tabela 9: Caracterização química do resíduo em diferentes temperaturas.

Temp. °C	Sílica (%)	Alumínio (%)	Ferro (%)	Enxofre (%)	Cálcio (%)	Outros (%)	Somatória (%)
650°C	40%	11%	7%	22%	10%	10%	58%
700°C	38%	11%	7%	23%	11%	10%	56%
850°C	39%	12%	8%	18%	12%	11%	59%
1000°C	39%	13%	10%	6%	16%	16%	62%

Fonte: Autoria Própria

Após uma primeira etapa de análises, constatou-se que em ambas as temperaturas de calcinação, o resíduo se mostrou inadequado para o uso.

Com base nas informações obtidas, notou-se uma porcentagem elevada de enxofre, assim, foi realizado o processo de lavagem; o material foi imerso em água (1:0,25 – água/resíduo) e agitado por 30 min para reduzir a quantidade de enxofre presente nos resíduos por solubilização. Na Tabela 10 podemos observar as características químicas do resíduo após o processo de lavagem.

Tabela 10: Caracterização química do resíduo em diferentes temperaturas após processo de lavagem.

Temp. °C	Sílica (%)	Alumínio (%)	Ferro (%)	Enxofre (%)	Cálcio (%)	Outros (%)	Somatória (%)
650°C	45,71%	15,44%	9,66%	12,16%	7,1%	10%	70,81%
700°C	53,94%	12,53%	8,37%	8,67%	4,97%	11,52%	74,84%
850°C	48,79%	12,59%	8,23%	10,37%	7,82%	12,2%	69,61%
1000°C	48,64%	12,72%	8,98%	2,14%	11,60%	15,92%	70,34%

Fonte: Autoria Própria

Assim, a calcinação de CROL em temperaturas de 650°C, 700°C e 1000°C se mostraram acima da estabelecida pelas normas vigentes. Por se tratar de uma primeira pesquisa, este trabalho optou por utilizar a temperatura de calcinação em 650°C como a padrão, visando também um menor custo energético para sua produção. Porém, os resultados da Tabela 10 sugerem possibilidades de estudos futuros e a viabilidade da utilização do resíduo em temperaturas de queimas de 700°C, onde a somatória de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 foi a melhor obtida e na temperatura de queima de 1000°C, onde a porcentagem de SO_3 foi a menor dentre as estudadas.