

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM
ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE

ESTUDO DA APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE BORRACHA E DO
POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COMO AGREGADO LEVE NO
CONCRETO

Autor: Abner Santos Baroni Sales
Orientador: Prof. Dr. Bacus de Oliveira Nahime

RIO VERDE - GO
Janeiro - 2024

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM
ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE

ESTUDO DA APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE BORRACHA E DO
POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COMO AGREGADO LEVE NO
CONCRETO

Autor: Abner Santos Baroni Sales
Orientador: Prof. Dr. Bacus de Oliveira Nahime

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, ao Programa de Pós-Graduação – *Stricto Sensu* em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde - Área de concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

RIO VERDE - GO
Dezembro – 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

Sales, Abner
SSales ESTUDO DA APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE BORRACHA E DO
, POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COMO AGREGADO LEVE NO
Abnere CONCRETO / Abner Sales; orientadora Bacus de
Oliveira Nahimie. -- Rio Verde, 2024.
50 p.

Dissertação (Mestrado em Pós-Graduação em Engenharia
Aplicada e Sustentabilidade) -- Instituto Federal
Goiano, Campus Rio Verde, 2024.

1. Massa específica. 2. Sustentabilidade. 3.
Agregado leve. 4. Reaproveitamento. 5. Borracha de
pneu. I. de Oliveira Nahimie, Bacus, orient. II.
Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- Tese (doutorado) Artigo científico
 Dissertação (mestrado) Capítulo de livro
 Monografia (especialização) Livro
 TCC (graduação) Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Abner Santos Baroni Sales

Matrícula:

2019102331440018

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 25 / 01 / 2024

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde - GO

Local

12 / 01 / 2024

Data



Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

BACUS DE OLIVEIRA Assinado eletronicamente por
NAHIME:77234154191 BACUS DE OLIVEIRA
NAHIME:77234154191
Data: 2024.01.15 14:57 -0300

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 24/2021 - GGRAD-RV/DE-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO

ATA Nº/37

BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos dois dias do mês de março do ano de dois mil e vinte e um, às 20h40min (vinte horas e quarenta minutos), reuniram-se os componentes da banca examinadora em sessão pública realizada por videoconferência, para procederem a avaliação da defesa de dissertação, em nível de mestrado, de autoria de **Abner Santos Baroni Sales**, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Bacus de Oliveira Nahime, que fez a apresentação formal dos membros da banca. A palavra, a seguir, foi concedida ao autor para, em 30 minutos, proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o examinado, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedidas às correções recomendadas, a dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade**, na área de concentração em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, a defesa perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60 (sessenta) dias** da sua ocorrência. A banca examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa dissertação em periódicos após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e para constar, foi lavrada a presente ata, que, após lida e achada conforme, será assinada eletronicamente pelos membros da banca examinadora.

Membros da banca examinadora:

| Nome | Instituição | Situação no programa |
|------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Prof. Dr. Bacus de Oliveira Nahime | IF Goiano – Campus Rio Verde | Presidente |
| Prof. Dr. Idalci Cruvinel dos Reis | IF Goiano – Campus Rio Verde | Membro externo |
| | | |

| | | |
|----------------------------------|--|----------------|
| Prof. Dr. Elton Carvalho de Lima | Universidade Federal de Tocantis (UFT) | Membro externo |
|----------------------------------|--|----------------|

Documento assinado eletronicamente por:

- Elton Carvalho de Lima, Elton Carvalho de Lima - Professor Avaliador de Banca - Universidade Federal do Tocantins (1), em 05/03/2021 13:28:35.
- Idalci Cruvinel dos Reis, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 03/03/2021 21:35:26.
- Bacus de Oliveira Nahime, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 03/03/2021 20:45:21.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 03/03/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 245285

Código de Autenticação: 4689032d19



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3620-5600



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 23/2021 - NREPG-RV/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE BORRACHA E DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) COMO
AGREGADO LEVE NO CONCRETO**

Autor: Abner Santos Baroni Sales
Orientador: Dr. Bacus de Oliveira Nahime

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - Área de
Concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

APROVADO em 02 de março de 2021.

Prof. Dr. Elton Carvalho de Lima
Avaliador externo - UFT / Porto
Nacional

Prof. Dr. Idalci Cruvinel dos Reis
Avaliador interno - IF Goiano / Rio
Verde

Prof. Dr. Bacus de Oliveira Nahime
Presidente da Banca - IF Goiano / Rio Verde

Documento assinado eletronicamente por:

- Idalci Cruvinel dos Reis, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/03/2021 13:35:36.
- Elton Carvalho de Lima, Elton Carvalho de Lima - Professor Avaliador de Banca - Universidade Federal do Tocantins (1), em 05/03/2021 15:59:23.
- Bacus de Oliveira Nahime, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 05/03/2021 15:10:51.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 03/03/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 245254
Código de Autenticação: e2336c86e2



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3620-5600

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me dar força e iluminar com esperança para dias de luta para realizar as etapas para a conclusão de sonhos.

Agradecimentos à minha família, em especial aos meus pais Abílio Baroni Sales e Hulda Dias Santos Sales, por me apoiarem sempre e propiciarem condições para fazer o mestrado.

Agradecimento à minha noiva Gabriella Alves Ribeiro, que me inspira e encoraja em cada etapa, não apenas no mestrado, mas, também na vida, mostrando ser uma verdadeira companheira. Crucial o apoio para enfrentar os desafios que o mestrado apresentou.

Ao meu orientador, Bacus de Oliveira Nahime, pelas orientações nos estudos no mestrado.

Ao meu coorientador, Alexsandro dos Santos Felipe, pelos aprendizados e ajuda em todas as etapas do mestrado.

Agradecimento ao Murilo Santos Peixoto, pela ajuda no laboratório, desde as caracterizações dos materiais até as confecções e os rompimentos. Ao Igor Soares dos Santos e ao César Martins, pela realização dos rompimentos dos corpos de prova.

Agradecimento em especial a Fagner Silva dos Santos, por me ajudar e pelo ensinamento com a escrita.

A Devaney Ribeiro do Carmo, por permitir a utilização do laboratório na Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus Ilha Solteira – SP.

Agradecimento à GCP Applied Technologies, pelo fornecimento do superplastificantes. À ISOCENTRO, pelo fornecimento das pérolas de poliestireno expandido. À Recapagem Carajás, pelo resíduo de borracha fornecido.

Agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano Campus Rio Verde – GO (IFGO), à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus Ilha Solteira – SP, e à Universidade de Rio Verde (UniRV), Campus Rio Verde, por proporcionar equipamentos para a pesquisa.

Agradecimento em especial ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano Campus Rio Verde – GO (IFGO), por proporcionar a oportunidade de cursar o mestrado.

Aos colegas de mestrado, por todo esse tempo de convivência e aprendizado.

Agradeço a todos que de certa forma contribuíram para a realização desse sonho.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Abner Santos Baroni Sales, nascido em 12 de junho de 1993 na cidade de Rio Verde, Goiás, filho de Abilio Baroni Sales e Hulda Dias Santos Sales. Concluiu o ensino médio no Colégio São Thomas (COOPEN). Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Tocantins (UFT). Especializou-se em MBA em Gestão de Obras na Construção Civil pela UniBF. Ingressou no Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade (PPGEAS) no primeiro semestre de 2019.

ÍNDICE

| | Página |
|---|--------|
| ÍNDICE DE TABELAS..... | v |
| ÍNDICE DE FIGURAS | vi |
| LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES..... | vii |
| RESUMO | x |
| ABSTRACT | xi |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Justificativa | 3 |
| 1.2 Microestrutura das pastas cimentícias..... | 4 |
| 1.2.1 Silicato Tricálcico | 4 |
| 1.2.2 Silicato Bicálcico | 5 |
| 1.2.3 Aluminato Tricálcico | 5 |
| 1.2.4 Ferroaluminato Tricálcico..... | 5 |
| 1.2.5 Hidratação do Cimento Portland..... | 5 |
| 1.3 Origem do Pneu de Borracha..... | 7 |
| 1.4 Processo de reciclagem e trituração dos pneus | 7 |
| 1.5 Concretos com Resíduo de Borracha..... | 8 |
| 1.6 Concreto com poliestireno expandido (EPS)..... | 9 |
| 1.7 Referências..... | 11 |
| 2. OBJETIVOS | 15 |
| 2.1 Objetivo Geral..... | 15 |
| 2.2 Objetivos Específicos..... | 15 |
| 3 CAPÍTULO 1 | 16 |
| ABSTRACT | 16 |
| RESUMO | 17 |
| INTRODUÇÃO..... | 17 |
| 1 MATERIALS AND METHODS | 19 |
| 2 RESULTS AND DISCUSSION..... | 23 |
| 3 CONCLUSIONS | 31 |
| CONCLUSÃO GERAL | 35 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | Página |
|--|--------|
| INTRODUÇÃO | |
| Tabela 1 -_Formulação química do cimento | 4 |
| | |
| CAPÍTULO I: STUDY OF TIRE RUBBER RESIDUE IN CEMENTITIOUS COMPOSITE COMPARED TO EXPANDED POLYSTYRENE, TO MAKE A LIGHTWEIGHT CONCRETE | |
| Table 1 - Chemical composition of cement Portland V (CP V) and silica fume | 19 |
| Tabela 2 - Proportions of concrete mixtures (kg/m ³). SP = Superplasticizer (% in relation of cement), EPS = Expanded polystyrene. | 21 |
| Tabela 3 - Physical properties of fresh concrete compositions..... | 23 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Página |
|--|--------|
| INTRODUÇÃO | |
| Figura 1 - Morfologia da portlandita, aumento de 3000 vezes..... | 7 |
| | |
| CAPÍTULO I: STUDY OF TIRE RUBBER RESIDUE IN CEMENTITIOUS COMPOSITE COMPARED TO EXPANDED POLYSTYRENE, TO MAKE A LIGHTWEIGHT CONCRETE | |
| Figure 1 - Tire Rubber | 20 |
| Figure 2 - EPS..... | 20 |
| Figure 3 - Compressive strength of the samples cured from 28 to 90 days..... | 24 |
| Figure 4 - Influence of the composition and cure on the elastic modulus and on the tensile strength of the samples. | 25 |
| Figure 5 - a) SEM of the REF composition with 100x approximation. b) SEM of the REF composition with 250x approximation. | 26 |
| Figure 6 - SEM of the RB0% sample at 1000x magnification. | 26 |
| Figure 7 - SEM of the RB7% sample at 1000x magnification. | 27 |
| Figure 8 - SEM of the RB 10% sample at 1000x magnification. | 27 |
| Figure 9 - a) XRD of the compositions with 90 days of curing. b) Portlandite peaks present in the compositions..... | 28 |
| Figure 10 - a) TG and DTG with 90 days of samples: (a) EPS, (b) RB0%, (c) RB7% and (d) RB10%. | 30 |

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

| Símbolo/ Sigla | Significado (Unidade de Medida) |
|-----------------------|---|
| RB | Resíduo de borracha de pneu |
| CAGL | Concreto de agregado leve |
| CL | Concreto leve |
| CLNE | Concreto leve não estrutural |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| CSH | Silicato de cálcio hidratado |
| CASH | Sílico-aluminato de cálcio hidratado |
| EPS | Poliestireno expandido |
| ME | Massa específica |
| ACT | Abatimento do cone tronco |
| C ₃ S | Silicato tricálcico |
| C ₂ S | Silicato bicálcico |
| C ₃ A | Aluminato tricálcico |
| C ₄ AF | Ferro aluminato tetracálcico |
| REF. | Composição referencial, concreto com EPS |
| CEPS | Composição com EPS |
| RB0% | Composição com resíduo de borracha, 0% de sílica |
| RB7% | Composição com resíduo de borracha, 7% de sílica |
| RB10% | Composição com resíduo de borracha, 10% de sílica |
| JK | Josef Kiefer |
| 3D | Três dimensões |
| K ₂ O | Óxido de potássio |
| Na ₂ O | Óxido de sódio |
| NBR | Norma brasileira |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| ACI | American Concrete Institute |
| CRTI | Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação |
| MEV | Microscopia Eletrônica de Varredura |
| DRX | Difração de raios-X |
| Fig. | Figura |
| σ_c | Compressão axial |

| | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| σ_R | Compressão diametral |
| Eci | Módulo de elasticidade |
| CaCO ₃ | Carbonato de cálcio |
| CaO | Óxido de cálcio |
| Ca(OH) ₂ | Hidróxido de cálcio/Portlandita |
| CO | Monóxido de carbono |
| CO ₂ | Dióxido de enxofre |
| Fe ₂ O ₃ | Óxido de ferro |
| MgO | Óxido de magnésio/Periclase |
| O ₂ | Oxigênio |
| SiO ₂ | Dióxido de silício / sílica |
| SO ₃ | Óxido sulfúrico |
| °C | Graus Celsius |
| °C/min | Graus Celsius/Minutos |
| kg | Quilograma |
| kg/m ³ | Quilograma/metro cúbico |
| kV | QuiloVolt |
| KN | Quilo Newton |
| kWh | Quilowatt-hora |
| m | Metros |
| mA | Miliampère |
| m ³ | Metros cúbicos |
| min | Minutos |
| mL | Mililitros |
| mm | Milímetros |
| MPa | Megapascal |
| GPa | Gigapascal |
| θ | Ângulo de Difração de Bragg (°) |
| γ | Gama |
| α | Alfa |
| β | Beta |
| Δ | Delta |
| $\Delta W\%$ | Percentage mass loss |

| | |
|--------|------------------|
| ° | Graus |
| ρ | Massa específica |
| % | Porcentagem |

RESUMO

SALES, ABNER SANTOS BARONI. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO. **Reaproveitamento de Resíduo de Borracha Para Concreto Leve Sustentável.** Orientador: Bacus de Oliveira Nahime. Coorientador: Aleksandro dos Santos Felipe.

A grande rede de consumo capitalista acarreta consigo uma série de impactos negativos ao meio ambiente, gerando infinidade de resíduos perigosos que, quando não gerenciados adequadamente, provocam impactos irreversíveis ao meio ambiente e à saúde pública. Neste contexto, estima-se que o descarte de pneus chegue a cerca de 1,5 bilhão de unidades ao longo do ano, fazendo-se necessária a busca por tecnologias que incorporem tais resíduos como matéria-prima para as tecnologias de construção civil. Assim, este estudo avaliou as propriedades do resíduo da borracha de pneu (RB) para a produção de concreto leve, comparando-o com o Poliestireno Expansível (EPS), um agregado leve já consolidado. Buscando promover a substituição total do agregado graúdo por EPS e posteriormente pelo resíduo de borracha do pneu, procurou-se caracterizar os materiais com técnicas de microanálise e avaliar o comportamento mecânico do concreto leve. Os concretos leves desenvolvidos apresentaram propriedades mecânicas próximas tanto aquele com EPS quanto os com resíduo de borracha, o EPS apresentou resistência mecânica com valores superiores a 8 MPa nas composições desenvolvidas, evidenciando a viabilidade de aplicação como concreto leve, o mesmo fato ocorreu para o resíduo de borracha de pneu, que apresentou comportamento semelhante. O concreto com RB comparando-se com o concreto convencional, apresentou a redução de massa específica em aproximadamente 1000 kg/m³, demonstrando o grande potencial do RB na geração de concretos leves. Já o EPS apresentou redução de aproximadamente 1300 kg/m³, o que viabiliza as duas composições. Análises como as de tenacidade e de formação de fases cristalinas foram fundamentais e conclusivas para este estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Massa Específica, Sustentabilidade, Agregado leve, Reaproveitamento.

ABSTRACT

SALES, ABNER SANTOS BARONI. Instituto Federal Goiano – Câmpus Rio Verde – GO. **Reaproveitamento de Resíduo de Borracha Para Concreto Leve Sustentável.** Orientador: Bacus de Oliveira Nahime. Coorientador: Alexsandro dos Santos Felipe.

The large network of capitalist consumption brings with it a series of negative impacts on the environment, generating a multitude of hazardous waste that, when not properly managed, cause irreversible impacts on the environment and public health. In this context, it is estimated that tire disposal will reach around 1.5 billion units throughout the year, making it necessary to search for technologies that incorporate such waste as raw material for civil construction technologies. Thus, this study evaluated the properties of the tire rubber residue (RB) to produce lightweight concrete, comparing it with Expandable Polystyrene (EPS), a lightweight aggregate already consolidated. Seeking to promote the total replacement of the coarse aggregate by EPS and later by the rubber residue of the tire, we tried to characterize the materials with microanalysis techniques and to evaluate the mechanical behavior of lightweight concrete. The developed lightweight concretes showed mechanical properties like both those with EPS and those with rubber residue, EPS showed mechanical strength with values greater than 8 MPa in the developed compositions, showing the viability of application as lightweight concrete, the same fact occurred for the residue tire rubber, which exhibited similar behavior. The concrete with RB compared to conventional concrete, showed a reduction in density in approximately 1000 kg / m³, demonstrating the great RB potential in the generation of light concretes. EPS, on the other hand, showed a reduction of approximately 1300 kg/m³, which makes both compositions feasible. Analyzes such as those of tenacity and formation of crystalline phases were fundamental and conclusive for this study.

KEYWORDS: Density, Sustainability, Adhesion, Lightweight Aggregate, Reuse.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais consumido na construção civil, tendo inúmeras aplicações, principalmente pela simples dosagem, abundância dos materiais envolvidos na composição, fácil moldagem, excelentes propriedades mecânicas, entre outros fatores. Contudo, no cimento Portland, um dos seus componentes, durante o processo de produção, causa diversos impactos ambientais, sendo eles: emissão de CO₂; e esgotamento de jazidas de minérios que fazem parte da sua composição, como, por exemplo, argila, calcário e outros componentes. Além disso, o concreto é composto por cimento, agregados miúdos e graúdos, água, ainda sendo possível acrescentar aditivos. Esse material é responsável pelo consumo de grande parte dos recursos naturais extraídos da natureza (JOHN, 2007).

Buscando a sustentabilidade na construção civil, foram estudados diversos resíduos industriais que podem substituir parte das matérias-primas com aplicação de técnicas sustentáveis para obtenção de concreto leve. Cabe ressaltar que os resíduos utilizados são de difícil descarte e atualmente têm destinação inadequada, por consequência, a incorporação do concreto leve na construção civil traz benefícios ao meio ambiente como redução na emissão de gases, além da possibilidade de alcance de benefícios acústicos e térmicos, sendo ainda que alguns resíduos, em substituição aos agregados naturais, podem resultar em redução substancial da massa específica (CHUNG *et al.*, 2019).

O resíduo de borracha proveniente de descarte de pneu automobilístico (RB) é preocupação global, em razão do grande volume e da dificuldade de destinação, por não ser biodegradável e gerar bilhões de toneladas RB anualmente no planeta. Pneus descartados de forma inadequada também apresentam muitos tipos de riscos à saúde, tais como problemas ambientais, de saúde pública, poluição da água, do ar e do solo (SIDDIKA *et al.*, 2019). A destinação mais comum desse resíduo é feita em aterros sanitários ou queimas, e ambos os métodos causam poluição. No aterro sanitário, pode causar lixiviação e contaminação ao solo, gerando tal acúmulo locais propícios para reprodução de vetores que transmitem doenças. Já a queima dos pneus causa toxicidade ao ar, uma vez que os pneus contêm estireno, componente altamente tóxico quando levado à temperatura de queima (SIDDIKA *et al.*, 2019).

Aliada à necessidade global de sustentabilidade, a indústria da construção civil, conjuntamente com pesquisadores, começou a estudar o RB como agregado para o concreto em diferentes áreas de aplicação (FAZZAN, 2011). Incorporar RB a qualquer material cimentício da engenharia traz vantagens como a redução de emissões de CO₂, entre outros benefícios ambientais, reduzindo os impactos provocados ao meio ambiente. A substituição dos agregados naturais por RB colabora duplamente com o meio ambiente, pois contribui com a reciclagem de resíduos com destinação inadequada, diminui o consumo de reservas finitas de materiais naturais e contribui com o desenvolvimento sustentável (BOLDEN J., ABU-LEBDEH T., FINI E., 2013).

O RB como agregado tem algumas vantagens, sendo uma delas melhorar o comportamento no estágio pós-fissuração, pois a incorporação de RB gera um material mais tenaz, fazendo com que seja mais resistente a impactos. Outra grande vantagem do resíduo como agregado é a sua massa específica, baixa em comparação com a brita e a areia, uma vez que o RB chega a ter menos que 30% da massa específica dos agregados naturais, constituindo em grande potencial para gerar concretos de agregados leves (CAGL) (ASUTKAR; SHINDE; PATEL, 2017).

O CAGL pode trazer benefícios à construção civil, pois, além de ter menor densidade, agrega também conforto acústico e térmico, se comparado ao concreto convencional, oferecendo vantagens econômicas e ambientais (TAJRA *et al.*, 2019). O concreto leve pode chegar a massas específicas inferiores a 60% da composição convencional como comprovado por Liu e Chen (2014), que conseguiram chegar a uma massa específica do CAGL de 1134 kg/m³, enquanto o concreto convencional tem massa específica de 2084 kg/m³. Imaginando os valores de Liu e Chen (2014) em uma aplicação na regularização da laje de um prédio de 5 pavimentos, cada pavimento com 120 m², regendo a norma NBR 13753 (ABNT, 2005) em que a espessura possa ser de 3 cm, em uma única camada, o uso do CAGL, ao invés do convencional, conseguiria a redução de 17,1 toneladas no peso gerado pela camada de regularização com o CAGL.

Em se tratando de RB como agregado leve, é possível identificar queda no comportamento mecânico, também na coesão, sendo uma das formas de correção substituir o cimento por material pozolânico, e um dos materiais comumente utilizados como adição é a microssílica, que apresenta excelente propriedade como material pozolânico (SIDDIKA *et al.*, 2019). A microssílica nucleia e pode formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H), contribuindo para maior resistência mecânica em idades

avançadas. Outra de sua propriedade é a baixa massa específica, em comparação com o cimento, que geraria redução da densidade do concreto (PANJEHPOUR; ALI; DEMIRBOGA, 2011)

Em se tratando de CAGL, com a substituição de agregado graúdo por RB, fez-se necessário comparar com outro agregado leve, já exaustivamente estudado e consolidado entre os pesquisadores, assim, como objeto de comparação, buscou-se o poliestireno expandido (EPS) como agregado leve. O EPS é um material já bastante utilizado no mercado da construção civil, com algumas vantagens sobre os demais, como baixa densidade, conforto térmico e acústico (XIE *et al.*, 2019).

Dessa forma, este trabalho visou a analisar as propriedades do CAGL com a adição de diferentes porcentagens de RB, com a finalidade de melhorar a coesão. O aglomerante Cimento Portland foi controlado e substituído em diferentes porcentagens por microssílica (sílica ativa), após a verificação da consistência. O próximo passo foi verificar microanálises, massa específica, comportamentos térmicos e mecânicos.

1.1 Justificativa

Um grande problema enfrentado no século XXI é a dificuldade da destinação de resíduos industriais. Estima-se que 30 milhões de pneus inservíveis sejam descartados anualmente no Brasil (CEMPRE, 2000). A decomposição do pneu pode levar até 600 anos, e quando queimado gera inúmeros problemas ambientais pela emissão de produtos tóxicos, ambiente propício para proliferação de mosquitos e lixiviação, entre outros.

Em razão dos inúmeros problemas da destinação inadequada do pneu e seu longo tempo de decomposição, sobretudo depois de 2002, quando entrou em vigor a resolução 258, editada em agosto de 1999 pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), para cumprir esta resolução, pesquisadores estudam o melhor descarte, surgindo algumas possibilidades, entre elas a utilização do resíduo como agregado para produção de concreto na indústria da construção civil. Esse resíduo surge como solução, diminuindo o consumo de minérios utilizados na produção de concreto, assim o resíduo de borracha de pneu como agregado reduz o consumo de matéria-prima (areia e brita).

Estudos de Fazzan (2011), Batayneh, Marie e Asi (2008), Mehmet e Erhan (2007) apontam para o uso do RB como agregado, mas, apesar de apresentar baixa massa específica, poucos estudos avaliam o uso do RB na geração de concreto leve, justificando a necessidade de estudo minucioso da adição de RB na dosagem e também a possibilidade de produção de concreto leve.

1.2 Microestrutura das pastas cimentícias

O processo de produção do cimento Portland tem como matérias-primas básicas o carbonato de cálcio e as argilas. As argilas agem como fonte de sílica, alumina e óxido de ferro. Na produção, sofrem o processo de calcinação, formando o clínquer, posteriormente moído com a gipsita para formação do cimento Portland. Sendo assim, formam as fases majoritárias silicato tricálcico (alita), silicato bicálcico (belita), aluminato tricálcico e ferroaluminato tetracálcico (MEHTA; MONTEIRO, 2014), cujas fórmulas químicas e abreviações utilizadas na área da engenharia civil são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Formulação química do cimento

| Composto | Fórmula química | Abreviação |
|-----------------------------|---|-----------------------|
| Silicato Tricálcico | $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | C_3S |
| Silicato Bicálcico | $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | C_2S |
| Aluminato Tricálcico | $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ | C_3A |
| Ferroaluminato Tetracálcico | $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | C_4AF |

Fonte: Adaptado de Metha; Monteiro (2014).

Além dessas fases principais, outras fases podem ser encontradas no cimento Portland, como cal livre (CaO), óxido de magnésio (MgO) e outros álcalis (K₂O e Na₂O). Variar as concentrações destes diferentes componentes químicos e de suas características físicas permite a fabricação de diferentes tipos de cimento e suas aplicações (TAYLOR, 1997).

Entre os tipos de cimento existentes no mercado, existe o do tipo V pela NBR 16697 (ABNT, 2018), descrito como tipo III pela ASTM C 150 (ASTM, 2018), que apresenta maiores frações de alita e maior finura do clínquer utilizado, tornando-o propício para levar resistência mecânica na compressão superior a 34 Mpa, após 7 dias de cura (TAYLOR, 1997).

1.2.1 Silicato Tricálcico

A alita pode apresentar polimorfismo em diferentes temperaturas. Courtial, Noirfontaine, Dunstetter, Gasecki e Signes-Frehel (2003) apontam que a identificação da natureza dos polimorfos da alita presentes no clínquer pode ser feita a partir de análises de padrões de difração. Neste estudo, os autores identificaram que, entre 31,5° - 33,5° e 36,0° - 38°C, ocorrem picos característicos que permitem a diferenciação dos polimorfos M₁, M₂ e M₃. No entanto, Maki e Kato (1982) identificaram que, entre 51° - 52°, é possível identificar o M₁ e M₃, tendo em vista que nessa fase o M₁ apresenta pico duplo e o M₃,

pico único nessas fases.

1.2.2 Silicato Bicálcico

O clínquer, geralmente é constituído de 15% a 30% de C_2S (THOMAS; GHAZIZADEH; MASOERO, 2017). A fase de silicato bicálcico tem cinco polimorfos: o tipo γ α (hexagonal), α'_L (ortorrômbica), α'_H (ortorrômbica) e β (monoclínica) (TAYLOR, 1997).

O beta-silicato de cálcio (β - C_2S), chamado de belita, é o mais encontrado nos clínqueres. A estrutura da belita apresenta irregularidade, mas tem menos vazios que a alita, apresentando menor reatividade (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Sendo assim, os compostos cimentícios que apresentarem maiores frações de belita apresentaram menores reações, resultando em menores resistências em idades iniciais (ÁVALOS-RENDÓN et al., 2018).

1.2.3 Aluminato Tricálcico

O clínquer, geralmente é constituído de aproximadamente 10% de C_3A (MANZANO; DOLADO; AYUELA, 2009). No geral, o C_3A não é polimorfo, porém, por apresentar íons externos, possibilita a formação de polimorfos com forma cúbica, ortorrômbica e monoclínica, estando sua reatividade relacionada à quantidade e aos tipos de íons presentes. A fase, por ter os íons externos, torna-se, entre as fases majoritárias no clínquer, a de maior reatividade (OLDER, 1998).

1.2.4 Ferroaluminato Tricálcico

O clínquer, geralmente é constituído de 10% a 12% de ferroaluminato tetracálcico. A fase apresenta baixa reatividade e pouca influência no comportamento mecânico nas composições cimentícias. O composto é o elemento que confere a tonalidade cinza (GOBBO, 2003).

1.2.5 Hidratação do Cimento Portland

Hewwlett (1998) define a reação de hidratação pelo início entre o primeiro contato do cimento com a água, inicialmente em processo de dissolução de alguns compostos presentes, gerando formação de hidratos, silicatos e aluminatos.

O aluminato tricálcico é o primeiro a reagir mesmo sendo das fases majoritárias o de menor fração. O C_3A reage com a água formando fases hidratadas de aluminato de cálcio. A pega instantânea que ocorre gera perda de trabalhabilidade, sendo prejudicial.

Como forma de inibir a perda de trabalhabilidade, é adicionado gesso ao cimento, com a hidratação com o gesso, são formados precipitados de trissulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita) e monossulfoaluminato de cálcio hidratado. Com a conversão da etringita para a fase de monossulfato, a fase final da hidratação dos aluminatos é conhecida como fase C-A-S-H (sílico-aluminato de cálcio hidratado) (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Taylor, Famy e Scrivener (2001) afirmam que a etringita pode permanecer nas matrizes cimentícias por vários anos.

As fases de silicatos hidratam-se e formam compostos com estruturas semelhantes, denominadas de fase C-S-H (silicato de cálcio hidratado), pouco cristalinas e com características de gel rígido. O C-S-H influencia diretamente as propriedades mecânicas da matriz cimentícia. Aproximadamente 70% das reações do silicato tricálcico (C_3S) ocorrem até 28 dias de cura. Já o C_2S , como tem reação mais lenta, cerca de 30% até os 28 dias, influencia principalmente nas resistências mecânicas finais e na durabilidade dos compostos cimentícios. A fase C-S-H é a que mais influencia as propriedades mecânicas de matrizes cimentícias, representando de 50% a 60% do volume de sólidos da pasta (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Além dos silicatos hidratados, a reação do C_2S e do C_3S com a água gera como subproduto o hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$, também descrito como portlandita, representada no contexto da reação de hidratação do cimento por CH, que aparece nas formas de cristais com estrutura hexagonal e esbelta, tornando-o muito quebradiço (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A etringita apresenta imagens microscópicas, correspondendo a cristais de agulhas finas, que são formadas em função da disposição de espaços livres para precipitação. As microestruturas C-S-H apresentam morfologia tipo folha em períodos iniciais da hidratação e característica compacta em idades avançadas (OLDER, 1998). Já o CH, normalmente se precipita na forma de cristais de portlandita, os quais apresentam estrutura hexagonal (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A Figura 1 mostra a geometria característica da portlandita.

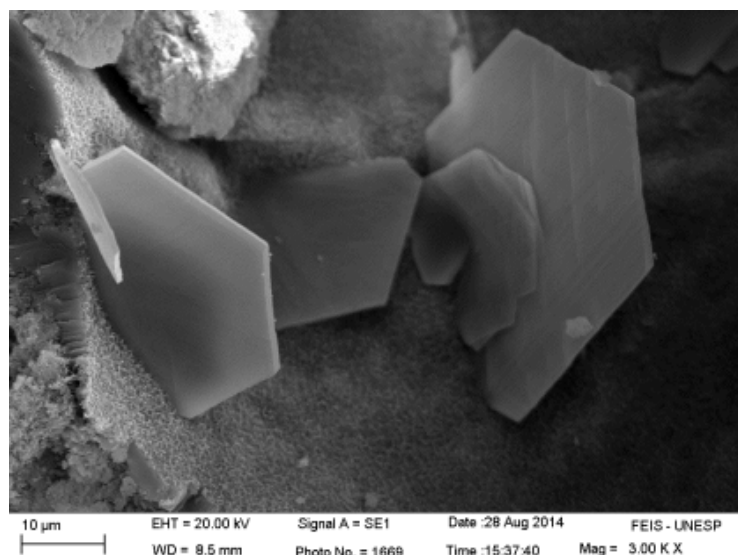


Figura 1 - Morfologia da portlandita, aumento de 3000 vezes.
Fonte: Felipe (2015).

1.3 Origem do Pneu de Borracha

A origem do pneu surgiu com Charles Goodyear, que aqueceu a borracha e removeu o enxofre, criando o processo de vulcanização, patenteando o método e criando o novo mundo em 1841.

Posteriormente, Robert William Thomson (1822-1873) inventou o pneu atual, primeiro pneumático de borracha vulcanizada (inflável). Thomson patenteou seu pneu em 1845 e, ao mesmo tempo, sua invenção funcionou bem, mas era demasiadamente dispendiosa para ser usada.

Isso mudou com John Boyd Dunlop (1840-1921), um veterinário escocês, inventor reconhecido do primeiro pneu prático. Sua patente, concedida em 1888, não era para pneus de automóvel, mas, em vez disso, pretendeu criar pneus para bicicletas. Philip Strauss inventou o pneu combinado com um tubo interior cheio de ar em 1911, assim, os pneumáticos puderam ser usados em automóveis com sucesso.

1.4 Processo de reciclagem e trituração dos pneus

O principal constituinte do pneu é a borracha. A borracha natural é proveniente do látex. O Brasil é um dos principais exportadores desta matéria-prima. O composto da borracha representa cerca de 80% do peso de um pneu de veículos de passeio e 75% do pneu de veículos pesados (Basel Convention, 1999)

Um pneu contém até 30 tipos de borracha sintética, 8 tipos de borracha natural, outros componentes como carbono, cabos de aço, poliéster, nylon, fio de cordão de aço, silicone e quarenta tipos diferentes de produtos químicos, ceras, óleos e pigmentos

(WBCSD, 2008)

Segundo Martins (2005), na recauchutagem, é feita uma raspagem da banda de rodagem para que a carcaça do pneu fique apta a sofrer efetivamente o processo de recauchutagem (aderência de uma nova banda de rodagem) e então retorne ao uso. A banda de rodagem raspada transforma-se em pequenas partículas, em diferentes formatos, fibra e granular (tipo pó), sendo chamadas de resíduos de borracha de pneu (RB)

Segundo Bertollo, Fernandes e Schalch (2002), a reciclagem de pneus envolve etapas que vão desde a coleta, transporte e trituração até a separação dos materiais (borracha, aço, náilon, entre outros). Esses materiais são separados e retornam à indústria para possíveis utilizações.

1.5 Concretos com Resíduo de Borracha

Pesquisas comprovaram que, com a substituição dos agregados naturais por RB, obtém-se menor resistência. Segundo Thomas e Gupta (2016), quanto maior o consumo de RB por metro cúbico, menor a resistência à flexão, compressão e tração. A formação de fissuras ocorre, geralmente através do agregado leve, cuja resistência mecânica do agregado leve é inferior ao cimento hidratado. As cavidades formadas sugerem que a borracha se desprende do aglomerante, de modo que a ligação entre elas é falha. Além disso, há rachaduras e vazios ao redor das partículas de borracha, refletindo na ligação fraca entre a borracha fragmentada e a argamassa de cimento, levando à redução da resistência mecânica do concreto. A flexibilidade das partículas de borracha acarreta algum grau de ductilidade ao concreto.

Segundo Asutkar, Shinde e Patel (2017), observa-se que a massa específica e a densidade aparente dos agregados de borracha são menores em comparação com os agregados graúdos naturais. A densidade do concreto diminui quando o uso de agregados de borracha no concreto aumenta, porém o concreto leve ajuda a reduzir o peso da estrutura. Mas, a resistência à compressão diminui e a tenacidade do concreto aumenta se a porcentagem de borracha aumentar.

Segundo Siddika, Mamun, Alyousef, Amran, Aslani e Alabduljabbar (2019), em geral, a adição de borracha no concreto reduz as propriedades mecânicas, aumentando com a quantidade de borracha inserida. Um efeito que ocorre diz respeito a zona de transição (ITZ) grande, porosa e fraca, em razão da baixa adesão da borracha à pasta de cimento. A redução da resistência à tração e à flexão é menor que a redução da resistência à compressão axial. O processo de pré-tratamento e de aditivos, como sílica ativa e

enchimento mineral, aumenta a resistência do concreto emborrachado.

Batayneh, Marie e Asi (2008) avaliaram as principais influências nas propriedades dos concretos frescos e endurecidos decorrentes da utilização de partículas de pneus inservíveis. Porcentagens entre 60% e 80% podem deixar o concreto mais tenaz.

Mehmet e Erhan (2007) investigaram o efeito do resíduo de borracha na redução da massa específica do concreto, tendo chegado à conclusão que o peso unitário do concreto emborrachado diminui com o aumento da porcentagem de borracha adicionada. Em seu estudo, chegaram a redução do peso unitário de até 18%, fato comprovado por outros pesquisadores. Segundo Zhang, Ma e Qian (2015), a densidade da composição diminui com o aumento da porcentagem de substituição de borracha fragmentada. O efeito da redução na densidade pela borracha fragmentada é mais acentuado quando a borracha tem menor tamanho. A densidade das composições com borracha fragmentada chegou a valores de 1640 kg/m^3 , sendo classificado pelas normas concreto leve.

Aliabdo, Elmoaty e Abdelbaset (2015) investigaram o uso de borracha em concretos não estruturais e verificaram que o uso de borracha em concretos reduz significativamente a resistência mecânica de composições cimentícias. No entanto, o concreto com presença de teores diferentes de resíduo de borracha apresenta resultados bons, em relação à densidade, condutividade térmica e atenuação sonora. Este estudo baseou-se na substituição de agregados miúdos em 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. O teor de cimento utilizado foi de 400 kg/m^3 e o fator a/c foi mantido para todos em 0,3. Foram feitos experimentos de condutividade térmica, sonora, densidade, absorção e resistências mecânicas.

No ensaio de condutividade térmica, o concreto emborrachado conseguiu 58,5% de redução. O mesmo efeito aconteceu na condutividade sonora, cuja redução foi de 69% utilizando 100% de resíduo de borracha em substituição aos agregados finos. Em relação à densidade, foi possível chegar a redução de 20% com a substituição do agregado fino. Quanto à resistência à compressão, com teor de 100% houve queda de 93%. No entanto, mesmo com a queda das resistências mecânicas, foi comprovado que o concreto com mais teores torna-se menos frágil a impactos, tornando mais tenaz.

1.6 Concreto com poliestireno expandido (EPS)

Os pesquisadores, de modo geral, usam o EPS para fazer concretos leves. Segundo Tessari (2006), o concreto leve de EPS consiste na substituição parcial ou total dos agregados naturais por EPS. A substituição dos agregados naturais por EPS pode chegar

a valores compreendidos entre 600 e 1600 kg/m³. O EPS utilizado pode ser sob a forma de pérola ou até mesmo de placas trituradas transformando em grânulos, e tanto as pérolas como os grânulos podem ter diâmetros que variam de 1 a 8 mm aproximadamente.

Liu e Chen (2014) fizeram várias análises com diferentes quantidades de material cimentício, proporções diferentes de EPS e inclusão de sílica ativa. Estes autores conseguiram valores ótimos em relação à densidade em comparação com a resistência mecânica, podendo ser considerado o melhor valor. A densidade foi de 1134 kg/m³ e a resistência a compressão chegou a 12,2 MPa. No entanto, para chegar a esses valores, tiveram que aumentar significativamente a quantidade de cimento e sílica, a quantidade de cimento foi de 422,52 kg/m³ e de sílica foi de 126,76 kg/m³, a quantidade de porcentagem de EPS foi de 46% em volume. Com base nos valores encontrados, chegaram à conclusão que a resistência do concreto EPS deve-se à resistência da matriz, uma vez que a resistência do EPS é considerada desprezível. Outra conclusão foi que quanto maior a partícula ou pérola de EPS, a resistência cairá de forma exponencial. Ainda, foi possível determinar que quanto maior a fração de volume de EPS melhor é a deformação plástica.

Maaroufi, Abahri, Hachem e Belarbi (2018) fizeram um estudo microestrutural do concreto EPS com variações térmicas. O estudo chegou a algumas conclusões que contradizem alguns conceitos da literatura. O estudo feito por MEV mostrou que, numa boa interface entre a matriz de cimento e o poliestireno, sem zona de transição, o cimento fica sobreposto ao poliestireno. Outra conclusão da análise a que chegaram os pesquisadores foi que exposição da composição a altas temperaturas mostrou que pode chegar a temperatura de até 90°C sem alterar a estrutura, mas acima 100°C os grânulos de poliestireno encolhem e apenas o espaço vazio que ficava os grânulos é apresentado.

Mousavi, Zahrai e Bahrami-Rad (2014) fizeram um estudo sobre a aplicação de concreto EPS em paredes JK (Joseph Kiefer), que é uma rede 3D de tiras de aço criada por punção e tensionamento de uma placa de aço galvanizado sem soldagem. Neste estudo, construíram paredes JK à base de concreto EPS e submetem a cargas laterais cíclicas. O EPS usado era de 5 mm e tinha a densidade de 12 kg/m³. O concreto EPS para a parede consumiu 515 kg por m³ de cimento e chegou à densidade de 1043 kg/m³, resistência de 5,5 MPa a 33 dias de cura e baixo módulo de elasticidade, sendo tratado como dúctil. Em contraste com os concretos de alta resistência, o concreto EPS não sofre nenhuma falha explosiva súbita na compressão. Os pesquisadores afirmam que é preferível utilizar o concreto EPS em junção ao sistema JK do que os convencionais, com

vergalhões transversais.

A viabilidade deste trabalho se deu pela necessidade do descarte adequado e do grande volume de resíduos de borracha produzidos anualmente, podendo ainda ser transformados em subproduto com valor agregado, contribuindo, com o desenvolvimento sustentável, que respeita três pilares: o econômico, com a agregação de valor; o social, que traz benefícios à sociedade e ao meio ambiente, pois, além de diminuir a extração de minerais da natureza, ainda diminui a poluição do meio ambiente; e a proliferação de vetores que provocam doenças, como, por exemplo, a dengue.

A seguir, serão apresentados em forma de artigo os resultados da pesquisa.

1.7 Referências

ALIABDO, Ali A.; ELMOATY, Abd Elmoaty M. Abd; ABDELBASET, Mostafa M.. Utilization of waste rubber in non-structural applications. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 91, p. 195-207, ago. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.080>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASTM C150 / C150M, Standard Test Method for Portland Cement, 2018, Annual Book of ASTM Standards, Pennsylvania, USA.

ASUTKAR, Priyanka; SHINDE, S.B.; PATEL, Rakesh. Study on the behaviour of rubber aggregates concrete beams using analytical approach. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, [S.L.], v. 20, n. 1, p. 151-159, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2016.07.007>.

ÁVALOS-RENDÓN, T. L.; CHELALA, E. A.P.; ESCOBEDO, C. J. M.; FIGUEROA, I. A.; LARA, V. H. PALACIOS-ROMERO, L. M. **Synthesis of belite cements at low temperature from silica fume and natural commercial zeolite**. *Materials Science and Engineering B*. v. 229, p. 79 – 85, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.12.020>

Basel Convention (1999) “on the Control of Transboundary Movements of Hazardous

BATAYNEH, Malek K.; MARIE, Iqbal; ASI, Ibrahim. Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries. **Waste Management**, [S.L.], v. 28, n. 11, p. 2171-2176, nov. 2008. Elsevier BV.

BERTOLLO, S.A.M.; FERNANDES JR., J.L.; SCHALCH, V. Benefícios da incorporação de borracha de pneus em pavimentos asfálticos. XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Ambiental e Sanitária. Cancun, México, 2002. 8p. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.035>. *Wastes and their Disposal – Technical Guidelines on Hazardous Wastes: Identification and Management of Uses Tyres*” Basel Convention Series/SBC No: 99/008.

CEMPRE: Compromisso empresarial para reciclagem. Pneus. Ficha Técnica 8, 2000. Disponível em :< <http://www.cempre.org.br/fichas/ficha8.html> > Acesso em 28/02/2014

CONAMA. Resolução N°258. Brasília, 1999.

COURTIAL, M.; de NOIRFONTAINE, M.-N.; DUNSTETTER, F.; GASECKI, G.; SIGNER-FREHEL, M. **Polymorphism of tricalcium silicate in Portland cement**: a fast visual identification of structure and superstructure. *Powder Diffraction*, v. 18 (1), p. 7 – 15, 2003. <https://doi.org/10.1154/1.1523079>

FAZZAN, J. V., **Comportamento Estrutural de Lajes Prémoldadas Treliçadas com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu**. Tese de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil, 2011.

FELIPE, A.S., **Utilização de nanotubos de carbono e nano-SiO₂ em argamassas produzidas com cinzas do lodo de esgoto em substituição parcial do cimento Portland**. Tese de D.Sc., IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

GOBBO, L. A. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios X e quantificação por refinamento de Rietveld**. 2003. 157 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

HEWWLETT, P.C., **Lea´s Chemistry of Cement and Concrete**. Fourth Edition. Ed. Arnold – 1998.

JOHN, Vanderley M. Palestra: Resíduos de Construção e Demolição. Palestra apresentada no dia 05 de novembro de 2001 na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo no evento Seminário de Resíduos Sólidos/Pares Poli - Ações responsáveis e Soluções sustentáveis. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/Pares%20-%20Poli_vmjohn.pdf>.

LIU, Ning; CHEN, Bing. Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 68, p. 227-232, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.062>.

MAAROUFI, Maroua; ABAHRI, Kamilia; HACHEM, Chady El; BELARBI, Rafik. Characterization of EPS lightweight concrete microstructure by X-ray tomography with consideration of thermal variations. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 178, p. 339-348, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.142>.

MAKI, I.; KATO, K.. Phase identification of alite in portland cement clinker. **Cement and Concrete Research**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 93-100, jan. 1982. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(82\)90103-x](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(82)90103-x).

MANZANO, H.; DOLADO, J. S.; AYUELA, A. **Structural, mechanical, and reactivity properties of tricalcium aluminate using first-principles calculations**. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 92 (4), p.897 – 902, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.02963.x>

MARTINS, I. R. F. Concreto de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu. 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

Mehmet Gosoglu, Erhan Guneyisi Desenvolvimento de resistência e penetração de cloreto de concretos emborrachados com e sem fumaça de sílica Mater. Struct. , 40 (2007) , pp. 953 – 964

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª Ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.

MOUSAVI, Seyed Amin; ZAHRAI, Seyed Mehdi; BAHRAMI-RAD, Asghar. Quasi-static cyclic tests on super-lightweight EPS concrete shear walls. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 65, p. 62-75, abr. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.02.003>.

ODLER, I. **Hydration, setting and hardening of Portland cement**. In: HEWLETT, P. C. **Lea's chemistry of cement and concrete**. Londres: ARNOLD, 1998, p. 241 – 297.

PANJEHPOUR, Mohammad; ALI, Abang Abdullah Abang; DEMIRBOGA, Ramazan. A REVIEW FOR CHARACTERIZATION OF SILICA FUME AND ITS EFFECTS ON CONCRETE PROPERTIES. *Int. J. Sustainable Constr. Eng. Technol.*, 2(2) (2011).

SIDDIKA, Ayesha; MAMUN, Md. Abdullah Al; ALYOUSEF, Rayed; AMRAN, Y.H. Mugahed; ASLANI, Farhad; ALABDULJABBAR, Hisham. Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: a review. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 224, p. 711-731, nov. 2019. Elsevier BV.

TAYLOR, H. F. W. **Cement and Chemistry**. 2ª Ed. Londres: THOMAS TELFORD, 1997. 459 p.

TAYLOR, H. F. W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K. L. **Delayed ettringite formation**. *Cement and Concrete Research*. v. 31 (5), p. 683 – 693, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00466-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00466-5)

TESSARI, Janaina. Utilização de Poliestireno Expandido e Potencial de Aproveitamento de seus Resíduos pela Construção Civil. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

THOMAS, Blessen Skariah; GUPTA, Ramesh Chandra. Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 113, p. 86-92, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.019>.

THOMAS, J. J.; GHAZIZADEH, S.; MASOERO, E. **Kinetic mechanisms and activation energies for hydration of standard and highly reactive forms of β -dicalcium silicate (C_2S)**. *Cement and Concrete Research*, v. 100, p. 322 – 328, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.06.001>

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. **The cement sustainability initiative, our agenda for action**. Suíça, 2002. Disponível em: <<https://www.wbcscement.org/documents/Agenda-for-Action.pdf>> Acesso em: 22

de dezembro de 2020.

ZHANG, Zhigang; MA, Hui; QIAN, Shunzhi. Investigation on Properties of ECC Incorporating Crumb Rubber of Different Sizes. **Journal of Advanced Concrete Technology**, [S.L.], v. 13, n. 5, p. 241-251, 13 maio 2015. Japan Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.3151/jact.13.241>.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Compreender a utilização de concreto leve com substituição total do agregado graúdo pelo resíduo de borracha de pneu, utilizando como adição a sílica ativa em substituição parcial ao cimento Portland, com análises das propriedades físicas e mecânicas, ainda comparando com o resíduo de borracha a um agregado leve já consolidado pelos pesquisadores.

2.2 Objetivos Específicos

- I. Desenvolver as dosagens da referência com EPS e as composições com resíduo de borracha e as substituições de cimento por sílica ativa;
- II. Verificar as propriedades mecânicas de resistência à compressão axial, tração e módulo de elasticidade;
- III. Avaliar índices de vazios (I), absorção (Abs) e Massa específica (ρ) das composições;
- IV. Analisar a formação de Portlandita nas composições compostas com adição de sílica por meio do ensaio de difração de raios X;
- V. Comparar a microestrutura por meio das micrografias geradas pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- VI. Realizar tratamento estatístico dos resultados;
- VII. Comparar as composições de borracha gerada pelas diferentes porcentagens de substituição do cimento por sílica ativa com a composição de EPS (composição referencial).

3 CAPÍTULO 1

(Normas de acordo com a revista CONCILIUM)

Study of tire rubber residue in cementitious composite compared to expanded polystyrene, to make a lightweight concrete

Estudo do resíduo de borracha de pneu em compósitos cimentícios comparado a pérola de poliestireno expandido, na confecção de concreto leve

Received: 2023-00-00 | Accepted: 2023-00-00 | Published: 2023-00-00

Abner Santos Baroni Sales

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2155-7476>
IFGoiano - Rio Verde, Brasil
E-mail: abnersbsales@gmail.com
CPF: 036.730.101-66

Bacus de Oliveira Nahime

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7292-7919>
IFGoiano - Rio Verde, Brasil
E-mail: bacusrnahime@ifgoiano.edu.br

Elton Carvalho de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8534-3621>
UFT – Porto Nacional, Brasil
E-mail: eltonlima@mail.uft.edu.br

Idalci Cruvinel dos Reis

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3098-3912>
IFGoiano - Rio Verde, Brasil
E-mail: idalci.reis@ifgoiano.edu.br

ABSTRACT

Incorrect tire disposal has a major impact on the environment, making it necessary to search for technologies. Thus, this study evaluated the effect of adding silica fume on the mechanical, microstructural and thermal properties of lightweight concrete using waste tire rubber (RB) for the production of lightweight cementitious composite compared to the cementitious composite with expanded polystyrene (EPS). A reduction in density was observed in 9% of the samples with 10% replacement of the cement with silica. The results showed low compressive strength to be applied as a structural material, however the value proved to be effective for several other functions, a gain in tensile strength was observed compared to the composite with EPS, the RB showed a better tenacity. The microstructure analysis revealed regions that do not produce good contact between the different phases present. Rubber concrete showed greater impermeability with the addition of silica fume, indicating greater resistance to chemical attacks. Thus, the results showed that large percentages of rubber in the cementitious composite can bring benefits even if there is a certain reduction in mechanical properties.

Keywords: engineered cementitious composites; tire rubber; expanded polystyrene; lightweight aggregate.

RESUMO

O descarte incorreto de pneus causa grande impacto ao meio ambiente, sendo necessária a busca por tecnologias. Assim, este estudo avaliou o efeito da adição de sílica ativa nas propriedades mecânicas, microestruturais e térmicas do concreto leve utilizando resíduos de borracha de pneu (RB) para produção de compósito cimentício leve em comparação ao compósito cimentício com poliestireno expandido (EPS). Foi observada redução na densidade em 9% das amostras com substituição de 10% do cimento por sílica. Os resultados mostraram baixa resistência à compressão para ser aplicado como material estrutural, porém o valor mostrou-se eficaz para diversas outras funções, foi observado um ganho na resistência à tração comparado ao compósito com EPS, o RB apresentou uma melhor tenacidade. A análise da microestrutura revelou regiões que não produzem um bom contato entre as diferentes fases presentes. O concreto borracha apresentou maior impermeabilidade com adição de sílica ativa, indicando maior resistência a ataques químicos. Assim, os resultados mostraram que grandes percentuais de borracha no compósito cimentício podem trazer benefícios mesmo que haja certa redução nas propriedades mecânicas.

Palavras-chave: engenharia dos compostos cimentícios; borracha de pneu, poliestireno expandido; agregado leve.

INTRODUÇÃO

Waste tires generate a series of negative impacts on the environment when inappropriately disposed of these materials reflect a scenario that poses a serious threat to the environment due to sanitary problems such as the increased proliferation of harmful agents, rodents, and mosquitoes, which can transmit diseases. Certain residues, if ignited, are difficult to destroy without causing damage to the environment, generating environmental pollution by hydrocarbons and other hazardous compounds. It is estimated that around 1.5 billion tires are discarded in the world per year. As it is a material considered difficult to absorb by the environment, several researchers have been looking for alternatives for its recycling to mitigate its impacts (MOHAJERANI *et al.*, 2020).

The negative impact estimation of these practices leads the scientific community to consider alternative ways to reuse these materials. Thus, recycling waste tire rubber in the form of aggregates as supplementary construction material is a form that has been studied and reproduced in different scenarios (SIDDIKA *et al.*, 2019). In this direction, one of the lines of investigation is the use of tire rubber waste as an aggregate for civil construction, as it has low density, having ideal characteristics for use in cementitious compounds, bringing lower specific mass when compared to traditional cementitious compounds. An example of lightweight cement composites is lightweight concrete. which has a specific mass ranging from 1120 kg/m³ to 1920 kg/m³ (ACI 213R-03/2003); the conventional concrete, on the other hand, has a specific mass between 2,000 kg/m³ and 2,800 kg/m³ (LIU; CHEN, 2014). Consequently, the application of lightweight concrete reduces the load on structures.

The use of industrial or recycled aggregates reduces the use of natural aggregates

in cementitious compounds which reduces the environmental impacts, promoting the sustainability of raw materials and the sustainability of the environment, considering that these materials are not biodegradable. The use of lightweight aggregates such as expanded polystyrene (EPS), which presents itself as an aspect to produce lightweight cement composites, enables its use both in civil construction and in bridge barriers, wall panels, concrete blocks, among other applications. Xie et al. (2019) verified that EPS has greater advantages compared to other light aggregates due to its low density, low thermal conductivity, and hydrophobic properties. Lightweight aggregates have great potential for their low density and thermoacoustic properties, but their inclusion in concrete brings a significant loss in mechanical strength in function of more pores in cementitious composites. Therefore, the use of pozzolanic materials such as silica fume is an alternative to improve the mechanical performance and less porosity of cement paste (FATHI; YOUSEFIPOUR; FAROKHY, 2017).

Research has shown that replacing natural aggregates with tire rubber provides less resistance to compression. According to Thomas and Gupta (2016), the greater the consumption of tire rubber per cubic meter, the lower the resistance. They also reported the cracks formation that usually occur through light aggregate, whose mechanical strength of light aggregate is lower than that of hydrated cement. The formed cavities suggest that the rubber comes off the binder, so that the bond between them is faulty. Furthermore, there are cracks and voids around the rubber particles, which is reflected in the weak bond between the fragmented rubber and the cement mortar, leading to a reduction in the mechanical strength of the concrete. The rubber particles flexibility brings some degree of ductility to the concrete.

According to Siddika et al. (2019), in general, the rubber addition to concrete reduces mechanical properties, increasing with the amount of rubber inserted. One effect that occurs is related to the appearance of a large, porous, and weak transition zone due to the low adhesion of rubber to the cement paste. The reduction in tensile and tensile strength is less than the reduction in axial compressive strength.

Due to the ability of rubber in large percentages to impair the mechanical properties of cementitious compounds, there is little research that supports its use in large proportions as an aggregate, in short, most research uses up to 20%, which is generally lower and not advising a larger amount ((SIDDIKA *et al.*, 2019), (THOMAS; GUPTA, 2016), (SHANMUGAM *et al.*, 2023)). However, it is possible to use it in larger proportions, achieving other interesting properties. In this way, a detailed study of a larger amount of rubber is necessary, because in addition to the gain in the sustainability of civil

construction and a smaller environmental impact, the use of a large amount of rubber can be interesting, mainly in the use as a light aggregate. To prove the potential use of rubber in large quantities as a lightweight aggregate, it is necessary to compare it with an aggregate already established by the industry, such as EPS.

As lightweight aggregate brings some harm to cementitious composites, the use of pozzolanic materials such as silica fume is necessary to improve properties and transition zone. Thus, this work aimed to evaluate the effect of cementitious composites with tire rubber waste, to generate a light cementitious compound and possible applications. But to generate materials with better results, cement was replaced by silica fume. Still to consolidate the result of the light cementitious compounds based on rubber waste, a light cementitious compound based on expanded polystyrene beads was used for comparison. The study evaluated the mechanical, fresh, hardened and microstructural properties of cement composites.

1 MATERIALS AND METHODS

The cement used for this study was Portland cement (Type V). The fine aggregate used was natural river sand, with a specific mass of 2645.6 kg/m³. Condensed silica fume Elkem Microsilica™, with a specific mass of 2232 kg/m³ was also used. Commercial EPS in the form of grains produced by Innova, separated in a sieve with a 2.36 mm opening, with a specific mass of 12 kg/m³, was used to produce a sample of lightweight cement composites for comparison purposes with rubber composites. The rubber was collected at the company Recapagem Carajás, with rubber being one of the residues in the retreading process for truck tires. Crumb tire rubber with a specific mass of 574,8 kg/m³, were separated in a sieve with a 2.36 mm opening.

Table 1 - Chemical composition of cement Portland V (CP V) and silica fume

| Chemical Composition (%) | | |
|--------------------------------|-------|-------------|
| | CP V | Silica Fume |
| SiO ₂ | 19,95 | 94,45 |
| Al ₂ O ₃ | 4,16 | <0,01 |
| MgO | 1,78 | 0,51 |
| Fe ₂ O ₃ | 2,19 | 0,21 |
| CaO | 63,58 | 0,75 |
| Na ₂ O | 0,41 | 0,41 |
| K ₂ O | 0,38 | 1,01 |
| TiO ₂ | 0,25 | 0,05 |
| P ₂ O ₅ | 0,19 | 0,18 |

Fonte: Own Authorship

Figure 1 - Tire Rubber

Fonte: Own Authorship

Figure 2 - EPS

Fonte: Own Authorship

For this study, four mixtures were prepared according to the proportions shown in Table 2. EPS pearls are a well-known lightweight aggregate that has been well studied in the literature, so samples of lightweight cement composites were prepared to be used as a reference material. Based on the samples using EPS, another composition was developed using the rubber residue maintaining the same volume per cubic meter of aggregate in lightweight concrete. Once the reference samples were defined, the samples were composed to fulfill the objective of the research, through the partial replacement of cement by active silica in the proportions of 7% and 10%, respectively. With this, it is possible to safely verify the physical, chemical and microstructural properties of replacing cement with active silica in lightweight concrete using the residue from the retreading of tires.

The mixtures proportion were determined from the ACI 211.2-98 (2004) standard, which is based on lightweight concrete, using the weight method. The weight method is defined by keeping the fine aggregate, the sand and changing the coarse aggregate (generally gravel) for light aggregate, the choice is due to the interest of replacing gravel with EPS aggregates and rubber waste. As the lightweight aggregates chosen in the studies are given as fine or not coarse aggregates, the lightweight cementitious compound has the appearance of mortar, even though the study transits some of the methods used to be based on concrete.

Tabela 2 - Proportions of concrete mixtures (kg/m³). SP = Superplasticizer (% in relation of cement), EPS = Expanded polystyrene.

| Compositions | Cement | Water | Sand | Rubber | Silica Fume | SP | EPS |
|--------------|--------|-------|-------|--------|-------------|------|------|
| EPS (REF.) | 557.1 | 228.4 | 360.0 | – | – | – | 7.25 |
| RB0 | 557.1 | 228.4 | 360.0 | 333.5 | – | 0.3 | – |
| RB7 | 518.1 | 228.4 | 360.0 | 333.5 | 39.0 | 0.38 | – |
| RB10 | 501.4 | 228.4 | 360.0 | 333.5 | 55.7 | 0.38 | – |

Fonte: Own Authorship

In the fresh cementitious compound, the cone of the trunk was slumped, using the value of 11 ± 1 cm as a reference to define the amount of superplasticizer to be added. The hardened cementitious composite was divided into mechanical tests (axial compression, diametrical compression and modulus of elasticity), absorption and void indexes. To determine the specific mass, absorption index and void index, the NBR 9778 (2005) standard was used, and cylindrical specimens with dimensions of 10 x 20 cm were used for the tests with molding and curing procedure according to NBR 5738 (2015). The samples were placed in the oven at a constant temperature of 105°C for a period of 72 hours and their dry mass (m_s) recorded. Afterwards, they were submerged in water at room temperature and the temperature was progressively raised to the boiling point, where they remained for a period of 5 hours, keeping the water volume approximately constant. The water was allowed to cool and, with the aid of a hydrostatic balance, the mass of the saturated samples immersed in water after boiling (m_i) was recorded. After removing the samples from the water and wiping them with a damp cloth, the saturated mass (m_{sat}) was determined. With these data, it was possible to calculate the values of specific mass (equation I), absorption index (equation II) and void index (equation III).

$$\rho_i = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (\text{Equation I})$$

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} * 100 \quad (\text{Equation II})$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} * 100 \quad (\text{Equation III})$$

Mechanical tests of axial compression strength (NBR 5739, 2019), diametrical compression (NBR 7222, 2011) and modulus of elasticity (NBR 8522, 2017) were performed in an INSTRON EMIC 23-300 press using bodies cylindrical test pieces measuring 10 x 20 cm according to the 28 and 90 days of cure.

For the axial compression test, the upper and lower surfaces of the specimens

were regularized with sulfur capping to improve the load distribution. With the aid of a caliper with 0.1 mm precision, the dimensions were measured. The test load was applied continuously and without shocks at a speed of (0.45 ± 0.15) MPa/s until failure.

In the diametrical compression test, the specimen is placed in such a way that the axial plane defined by diametrically opposed generatrices is loaded at a tensile stress speed of (0.05 ± 0.02) MPa/s until failure. The tensile strength by diametrical compression being calculated by equation IV. Where F is the strength, d is the specimen diameter and l the sample length.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 * F}{\pi * d * l} \quad (\text{Equation IV})$$

The elasticity modulus was determined using electrical strain gauges of the EE08 model resistive type with a resolution of 0.001mm. To verify the reproducibility of test results, statistical treatment for all ages and mechanical tests were performed using the Tukey test.

Scanning electron microscopy analysis was performed to verify the characteristics of the cementitious composite microstructure and analyze the transition zone between the different phases of the produced concrete. The microstructure of the prepared cement pastes sample surfaces was observed under scanning electron microscope using a JEOL JSM IT300LV.

To verify if the pozzolanic reaction occurred without interference from the low-boiling components present in the rubber used (such as oils), XRD and thermogravimetric tests were carried out to evaluate the hydration products generated. The analysis of the crystalline phases in the different mixtures was studied with an X-ray diffractometer (XRD), and the analysis was performed with a Bruker D8 Discover. Monochromatic radiation from a tube with a copper anode coupled to a Johansson monochromator was used for $K\alpha_1$ operating at 40 kV and 40 mA, Bragg-Brentano θ - 2θ configuration. Scans were collected between 5° and 90° with a step size of 0.01° and a scan rate of 15 rpm during measurement. Thermal analysis was performed with differential thermal analysis (DTG) and thermogravimetric (TG) analysis, using Shimadzu DTG-60H equipment. Measurements were performed in the temperature range from 25°C to 800°C , with a heating rate of $20^\circ\text{C}/\text{min}$, oxygen flow of 100 ml/min and nitrogen flow of 100 ml/min, in a platinum crucible. of 70 μl .

2 RESULTS AND DISCUSSION

When the mixtures were made, it was based on light concrete, but as the entire portion of coarse aggregate was replaced, it was observed that the cementitious composite obtained mortar properties and could be called lightweight mortar.

Lightweight aggregate composite cement was prepared to evaluate the specific mass, porosity, microstructural, thermal, and mechanical properties of the compounds. Table 3 summarizes the results for the specific mass, absorption index, and voids index. According to the results obtained, the specific mass for EPS composite cement showed the lowest specific mass when compared to samples produced with the silica fume addition. Although the rubberized concretes presented higher specific mass values, it was observed that the RB10% sample reduced the specific mass by 9% when compared to RB0%. This demonstrates the effect of adding silica fume which reduced the density of concrete produced. Another important factor in the effect of silica fume is the reduction of porosity, absorption and void ratios. Including giving less absorption than the EPS benchmark. With 10% silica fume replacing the cement in the cementitious rubber compound, an 81% reduction in absorption was achieved.

Tabela 3 - Physical properties of fresh concrete compositions.

| Compositions | Specific mass (kg/m ³) | Absorption (%) | Voids index (%) |
|--------------|------------------------------------|----------------|-----------------|
| EPS | 1 217 ± 18 | 7.0 ± 0.5 | 6.9 ± 0.2 |
| RC0% | 1 508 ± 25 | 9.8 ± 0.3 | 12.6 ± 0.2 |
| RC7% | 1 370 ± 17 | 7.7 ± 0.2 | 10.4 ± 0.2 |
| RC10% | 1 372 ± 18 | 5.4 ± 0.3 | 7.5 ± 0.4 |

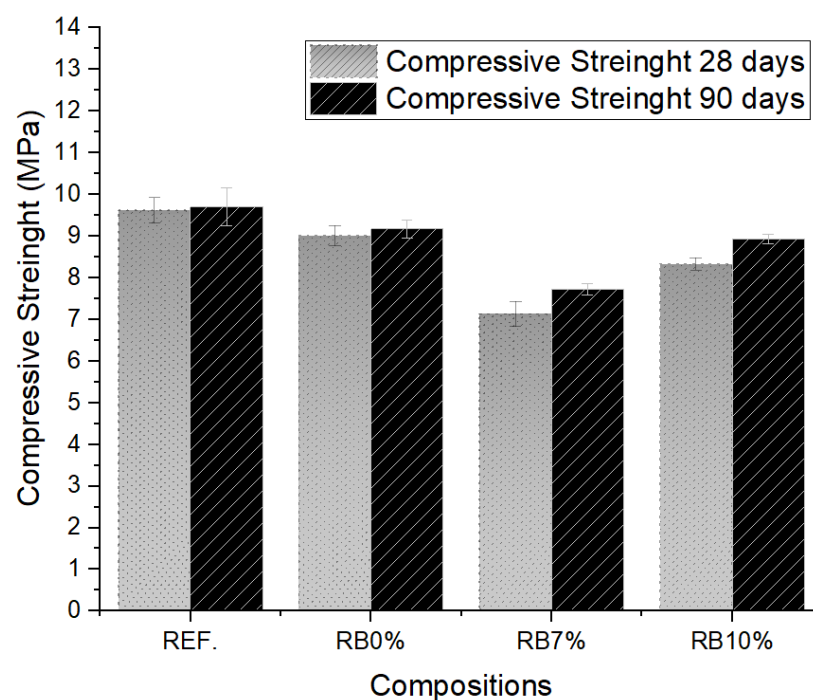
Fonte: Own Authorship

Schackow *et al.* (2014) studied lightweight concrete with EPS and vermiculite with an air-entraining agent. In this study, they obtained specific mass values for EPS lightweight concrete; values between 1250 kg/m³ and 1070 kg/m³ were found, which demonstrates that the EPS composition studied in this work presented values close to those of the literature, even without the air incorporating agent. The specific mass of RB0%, RB7% and RB10% showed higher values than the results found for studies with the replacement of vermiculite and EPS, a fact that can be explained by the fact that the rubber waste has a higher specific mass when compared to EPS and vermiculite. Rubber waste is around 46 times greater than EPS.

Figure 3 presents the compressive strength results after 28 and 90 days of cure. The compressive strength of composite cement with EPS was higher than that of concrete with rubber. For the 28-day results, the compressive strength of the

EPS was 6.3% higher than that of the RC0% rubber concrete. The inclusion of silica fume in the RB7% sample decreased compressive strength by about 20.9% when compared to the RB0% sample. Otherwise, with the silica increase to 10%, there was an increase of 16.8% in compressive strength for RB10% concrete. Thus, the same mechanical behavior can be observed for the samples with 90 days of age; all the compressive strengths of the studied compositions had higher compressive strength values when compared to 28 days of age. Mechanical behaviors with rubberized concretes report the same behavior described in this work (PANJEHPOUR; ALI; DEMIMRBOGA, 2011).

Figure 3 - Compressive strength of the samples cured from 28 to 90 days.

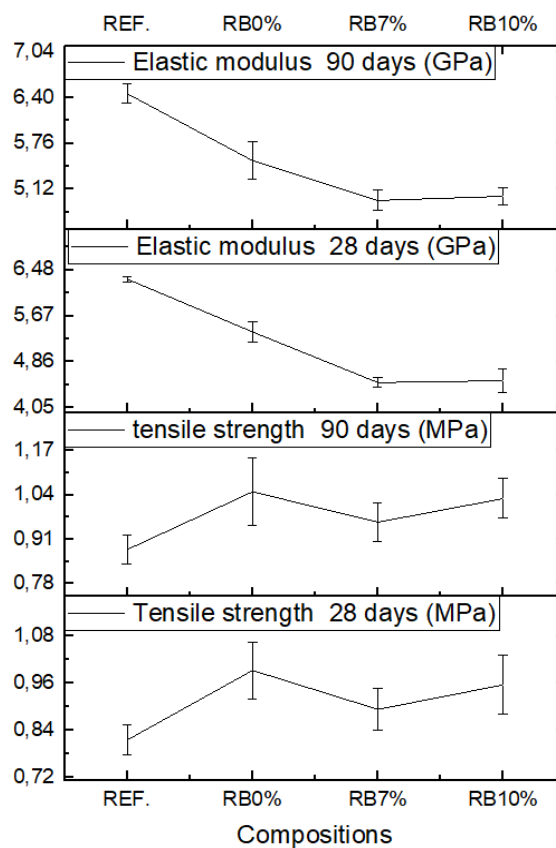


Fonte: Own Authorship

Figure 3 shows that all compositions evaluated at the ages of 28 and 90 days showed mechanical strength values above the minimum recommended by the Brazilian association of technical standards NBR 13281 (2005) standard, so the results found are suitable for applications such as non-structural mortar and in the slabs regularization. This could contribute to the slenderness of structures and to economy and sustainability by minimizing the use of materials that make up the structural system. Although the results do not show improvements in mechanical strength with fume silica and rubber waste, the results are favorable for the application of non-structural cementitious composites, which may include wall coverings, slabs and even wall coverings.

The behavior of the elastic modulus and tensile strength are presented in Figure 4 for the investigated samples. In Figure 4 (a), the elastic modulus decreases with increasing amounts of silica fume when compared to EPS and this decrease is more accentuated for samples produced with the silica fume addition, RB7% and RB10%. Figure 4 (b) shows that respective tensile strength increased for the rubber compositions and shows gains in relation to the EPS composition. This combination of tensile strength gains and reduction of elastic modulus increase tenacity in ascending order for the compositions RB0%, RB7%, and RB10%, consequently presenting a decrease in the elastic modulus. The union of the mechanical results showed that the rubber residue made the cementitious composites become more ductile and more tenacious, mainly compared to the EPS. Thus, the rubber residue leaves the cementitious compound better for some applications, such as wall and slab coating. To understand the results presented, microstructural characterizations were carried out to understand the problem on a smaller scale.

Figure 4 - Influence of the composition and cure on the elastic modulus and on the tensile strength of the samples.

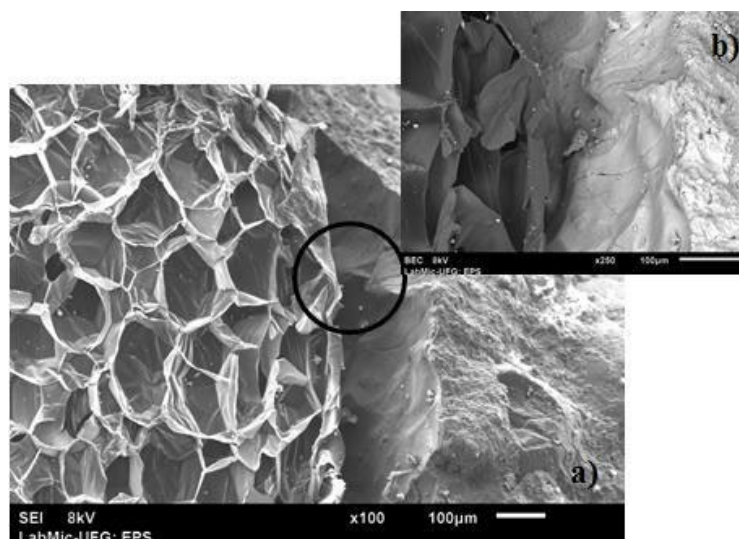


Fonte: Own Authorship

Figure 5 (a) and Figure 6 (b) show, respectively, the EPS composition micrograph, where it is possible to observe the transition zone between the cement matrix and the EPS

pearls.

Figure 5 - a) SEM of the REF composition with 100x approximation. b) SEM of the REF composition with 250x approximation.

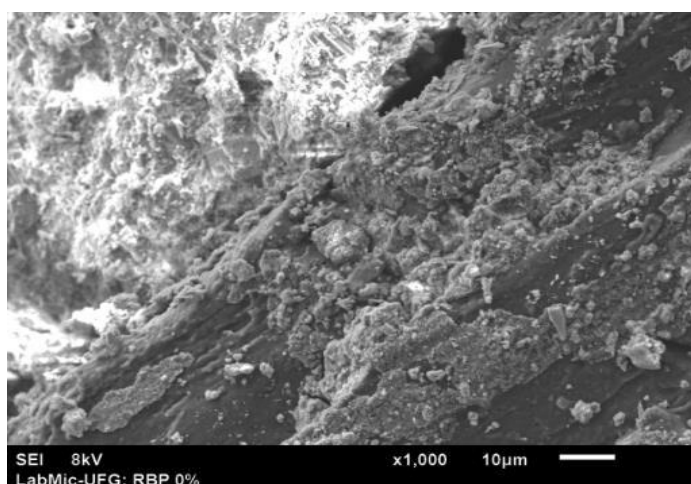


Fonte: Own Authorship

By Figure 5 (a) (100x magnification) and Figure 5 (b) (250x magnification), it is possible to notice that the EPS was deformed in a contracted manner, leaving a strip without bonding with the cement paste. Through this image, it is possible to disagree with the statement of Maaroufi et al. (MAAROUFI *et al.*, 2018) when they conclude that only after the EPS concrete undergoes heating above 100°C would it begin to shrink, leaving empty spaces. According to the same authors, up to a temperature of 90°C, the structure would not change its morphology. Figure 5 (a) and Figure 5 (b) show that EPS deforms through shrinkage at normal curing temperatures, and this effect can be attributed to the very weight of the mortar compacting the EPS due to its high ductility.

Figures 5, 6 and 7 show the images with 1000x magnification of the compositions with the addition of 0%, 7% and 10%, respectively, of silica fume.

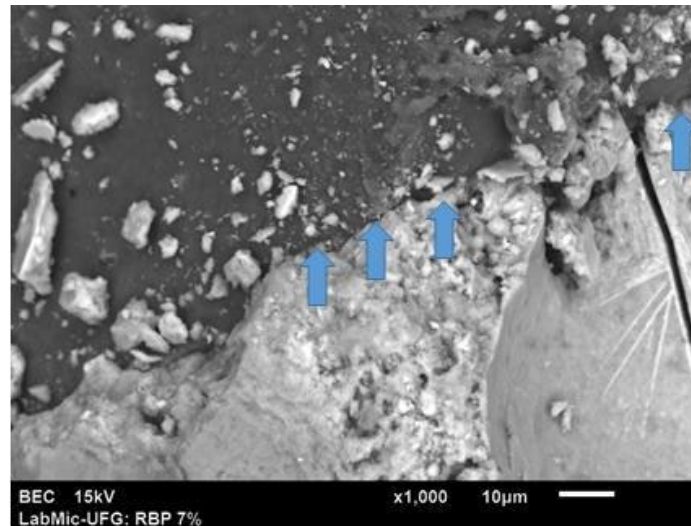
Figure 6 - SEM of the RB0% sample at 1000x magnification.



Fonte: Own Authorship

In Figure 6, it is possible to verify that there was an improvement in the adhesion between the proposed lightweight aggregate (RB0%) in relation to the EPS composition, showing that, even without the addition of silica fume, the adhesion was more efficient with rubber than EPS.

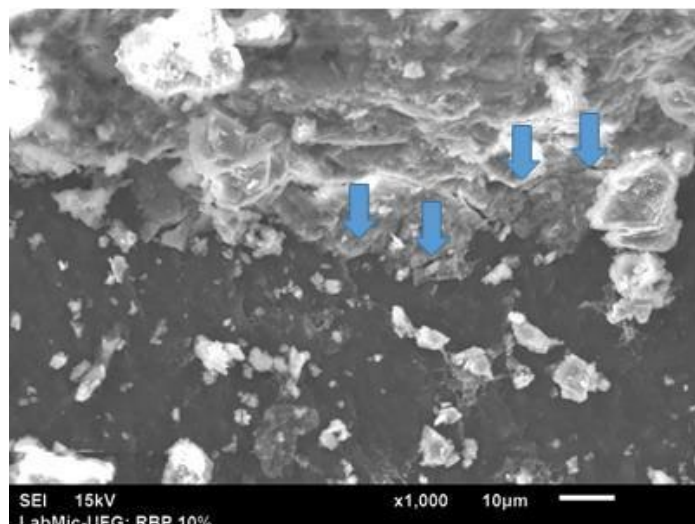
Figure 7 - SEM of the RB7% sample at 1000x magnification.



Fonte: Own Authorship

Figure 7 refers to the RB7% composition, in which an improvement in the union of the light aggregate with the cement paste was verified, compared to the REF and RB0% compositions, since the EPS did not show efficient union with the cement paste. This demonstrates that this aggregate is sensitive to normal cement curing temperatures, causing a change in its volume (reduction) because the material has amorphous characteristics and high ductility, since the rubber did not show any change in its morphology in this temperature range. The addition of silica fume contributed to the adhesion of the rubber with the paste.

Figure 8 - SEM of the RB 10% sample at 1000x magnification.

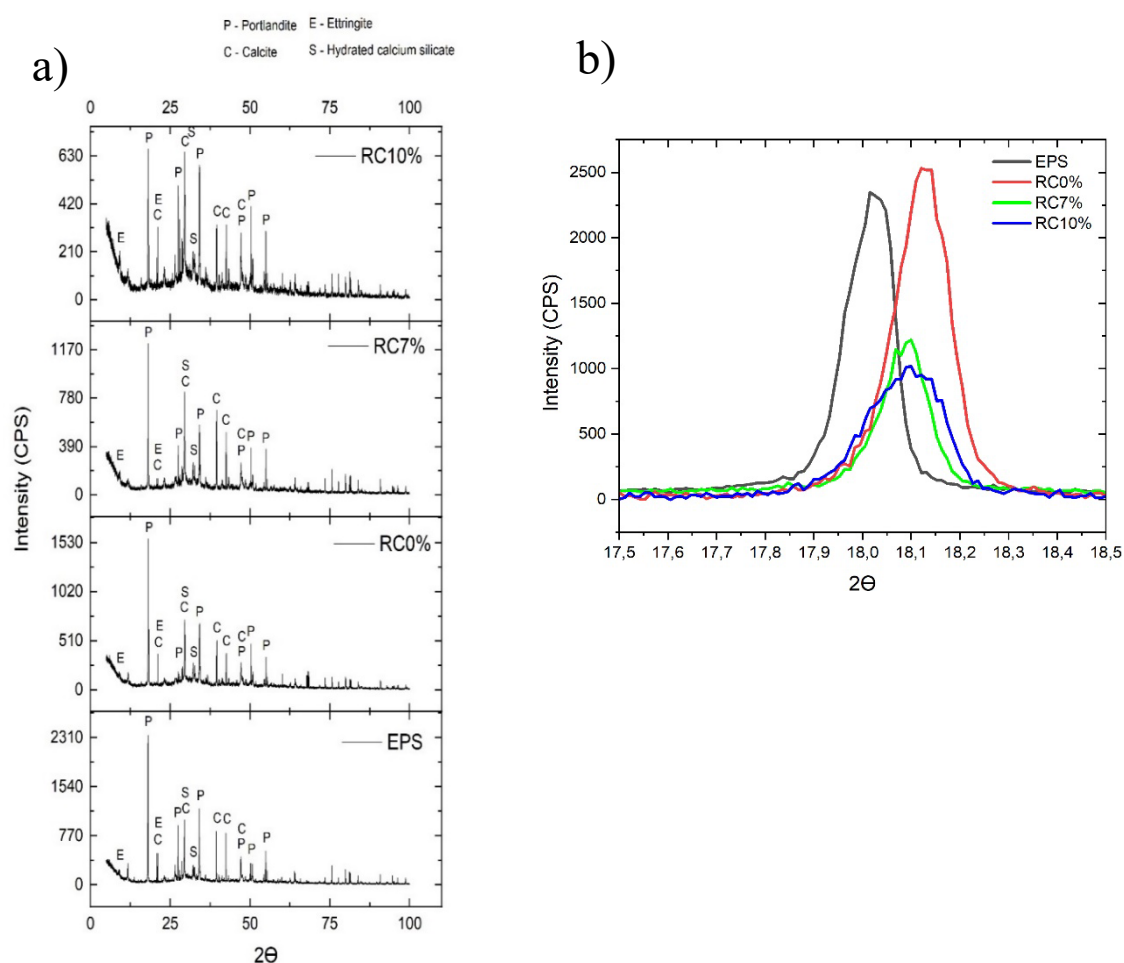


Fonte: Own Authorship

Figure 8 shows that the rubber bonding region with the cement paste of the RB10% composition offers greater adhesion among all the compositions in this study. In Figure 7, good adhesion is also noted for the RB7% composition, however, observing in detail the proximities of the indicated regions, small depressions are noted. In Figure 8, a greater bond can be seen, which gives the RB10% composition better adhesion between the paste and the RB. In this study of concrete with tire rubber, it was observed that the addition of silica fume substantially improved the composition, since, in addition to the contribution to reduce the specific mass, allied to the improvement in cohesion, which favored lower absorption and lower porosity.

In the XRD analysis, the consumption of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ was discussed. Figure 9 depicts selected profiles of cement composites with different compositions and ages. According to the crystallographic information extracted from the database, the indexed peaks (hkl) in the figure refer to four phases: portlandite (P), ettringite (E), calcite (C) and hydrated calcium silicate (S).

Figure 9 - a) XRD of the compositions with 90 days of curing. b) Portlandite peaks present in the compositions.

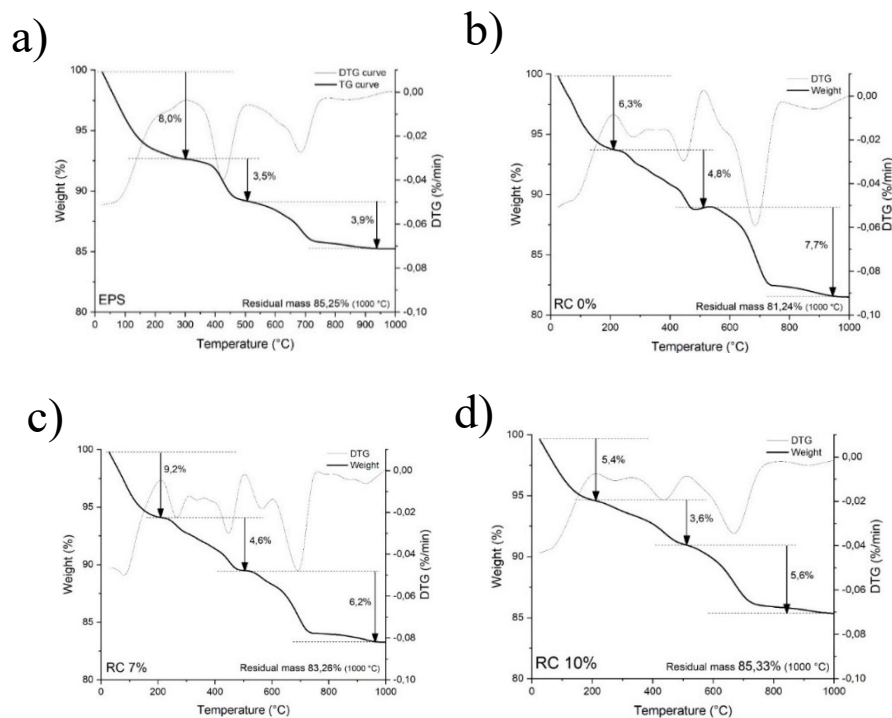


Early ages do not usually present hydrated products of pozzolanic origin, since these reactions occur due to differences in solubility of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (remaining Portlandite). At more advanced ages, this is more conclusive, and it is possible to observe an increase in the calcite peak near 30 and 40° , for $\theta/2\theta$ Bragg incidences.

Figure 9 (a) shows that at the age of 90 days the consumption of Portlandite ($2\theta \approx 18^\circ$) was more evident, since this type of reaction occurs at more advanced ages. It can be seen that the greater the addition of silica fume in the tire rubber compositions, the smaller the peak, with emphasis on the RB10% composition. Figure 9 (b) shows more prominently the reductions of the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ peaks. Another fact that justifies these smaller peaks is the lower amount of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ due to the lower amount of cement made by replacing silica fume, confirming the study by Hot et al. (2015), who state that the greater the amount of silica fume in the cementitious material, the lower the peak of Portlandite. There is an increase in the calcite phase for RB7% cement. This fact corroborates the decrease in the mechanical properties observed for the same sample.

During the heating of the materials, the TG and DTG curves presented in Figure 8. In this case, three main stages of decomposition can be distinguished by the elastomeric composition of styrene-butadiene rubber (SBR)/NR in tire formulations (FERNÁNDEZ-BERRIDI *et al.*, 2006). The first peak of the derived thermogravimetric curve (DTG) is due to the loss of chemically unbound water in hydrates with temperature between 25°C and 150°C . At temperatures between 100°C and 300°C , dehydration of C–S–H gel and ettringite occurs. The temperature at which these compounds lose water depends on the $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ ratio available in the hydrated cement matrix ((VEDALAKSHMI *et al.*, 2003), (BARBHUIYA *et al.*, 2009)). Calcium hydroxide is dehydrated in the temperature range between 380°C to 460°C . The last step is the calcium carbonate decomposition, through the elimination of CO_2 , which is in the temperature range of 520°C to 730°C , some small variations in these ranges may occur ((NEVES JUNIOR *et al.* 2014), (DWECK *et al.*, 2000)). As shown in Figure 10, the TG and DTG curves provide the clearest notation of the phase decompositions that occur during heating for the prepared composites.

Figure 10 - a) TG and DTG with 90 days of samples: (a) EPS, (b) RB0%, (c) RB7% and (d) RB10%.



Fonte: Own Authorship

The crumb rubber addition to composite cementitious showed different thermal decomposition when compared to EPS. While the cement with EPS showed three main decompositions, the rubberized concrete presented with decompositions attributed to the volatilization of the oil processing, or any other low boiling components present in the rubber used, changing the pattern of the thermogravimetric curve between 315°C and 400°C as evidenced in the DTG.

When replacing cement with silica, it is possible to observe an increase in residual mass, due to the loss of mass in the range of 370-470 °C having reduced with the fumed silica addition, which indicated a reduction in the CH content, in this way it can be stated that the pozzolanic reaction occurs normally even with the low boiling components present in the rubber and that the CH was gradually consumed by the pozzolanic reaction with silica fume.

In this way, the microstructural studies, SEM, DTG and XRD, showed a greater pozzolanic effect due to the greater formation of CSH gel, which culminated in a material that increased the adherence of the rubber to the cementitious matrix, decreasing the porosity and the transition zone.

Thus, we can associate all the results as successful with the use of rubber in large percentages. Because despite the low resistance to the use of structural materials, the

result is sufficient for other functions, comparing the results obtained with articles and technical standards, it is estimated that the compound with rubber aggregate could be used as a sealing wall, floor regularization, wall plastering and more ((NBR 13753, 1996), (TUTIKIAN *et al.*, 2017), (PACHECO *et al.*, 2017), (NBR 6136, 2016)).

3 CONCLUSIONS

This study describes experimental research with the objective of reporting and qualifying the physical and chemical properties of the light cementitious composites with the addition of a large percentage of rubber residue in comparison with the cementitious composite with EPS, having the main intention to prove the viability of the use of large percentages of rubber for light aggregate purposes. The main conclusions of this investigation are summarized as follows:

1) It was observed that the compositions with rubber had a lower mechanical resistance to compression than the reference composition (EPS) after 28 days, however, after 90 days of curing, there was equivalence between the control composition and the RC0% and RC10% compositions, and with the use of rubber, there is a stability in the tensile strength, however a significant drop in the elastic modulus, indicating a gain in toughness, which becomes very effective for, because the tenacity brings the property of deforming without breaking;

2) Concrete with rubber proved to be efficient in absorption, assuming greater impermeability with the increase in the silica fume addition, achieving the best result with 10% silica fume replacing cement;

3) The adhesion of EPS-type lightweight aggregate proved to be inefficient in the interaction with the cementitious paste, presenting a reduction in volume during the normal curing temperatures of the cementitious mass. The other compositions, with tire rubber, had better adhesion, mainly with the adhesion of silica fume.

4) the microstructures of the compound with rubber proved to be better than the compound with EPS, corroborating the use of rubber with light aggregate

5) The light cementitious compound with rubber residue and partial replacement of cement by silica is indicated for environments that require lighter materials than conventional concrete, since it managed to reach a specific mass below 1370 kg/m^3 , superior resistance to applications of lightweight non-structural cementitious compounds, combined with its low absorption of water and voids, which helps to improve resistance to environments subject to chemical attack;

6) With the results obtained, we can conclude that the rubber waste aggregate

brought benefits to the cementitious compound, validating the use of rubber waste as a lightweight aggregate. Although the lightweight cementitious composites with tire rubber has good results for application in wall and slab coverings, even in non-structural walls.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete, **ACI 211.2-98**, 2004.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. Guide for structural lightweight aggregate concrete, **ACI 213R-03**. ACI Manual of Concrete Practice, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas.: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, **Associação Brasileira de Normas Técnicas** (2005) NBR 9778.

Associação Brasileira de Normas Técnicas.: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, **Associação Brasileira de Normas Técnicas** (2015) NBR 5738.

Associação Brasileira de Normas Técnicas.: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, **Associação Brasileira de Normas Técnicas** (2018) NBR 5739.

Associação Brasileira de Normas Técnicas.: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, **Associação Brasileira de Normas Técnicas** (2011) NBR 7222.

Associação Brasileira de Normas Técnicas.: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, **Associação Brasileira de Normas Técnicas** (2017) NBR 8522.

Associação Brasileira de Normas Técnicas.: Concreto - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Requisitos. Rio de Janeiro, **Associação Brasileira de Normas Técnicas** (2016) NBR 6136.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 13753: Revestimento de piso interno ou externo com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante - Procedimento. Rio de Janeiro, 1996.

Associação Brasileira de Normas Técnicas.: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos—Requisitos. Rio de Janeiro, **Associação Brasileira de Normas Técnicas** (2005) NBR 13281.

BARBHUIYA, S. A. et al. Properties of fly ash concrete modified with hydrated lime and silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 10, p. 3233-3239, 2009.

DWECK, Jo; BUCHLER, Pedro Mauricio; COELHO, Antonio Carlos Vieira; CARTLEDGE, Frank K. Hydration of a Portland cement blended with calcium

carbonate. **Thermochimica Acta**, [S.L.], v. 346, n. 1-2, p. 105-113, mar. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6031\(99\)00369-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6031(99)00369-x).

FATHI, Mojtaba; YOUSEFIPOUR, Abed; FAROKHY, Ehsan Hematpoury. Mechanical and physical properties of expanded polystyrene structural concretes containing Micro-silica and Nano-silica. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 136, p. 590-597, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.040>.

FERNÁNDEZ-BERRIDI, María José; GONZÁLEZ, Nekane; MUGICA, Agurtzane; BERNICOT, Caroline. Pyrolysis-FTIR and TGA techniques as tools in the characterization of blends of natural rubber and SBR. **Thermochimica Acta**, [S.L.], v. 444, n. 1, p. 65-70, maio 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2006.02.027>.

HOT, Julie; CYR, Martin; AUGÉARD, Eric; EEKHOUT, Mikael. An investigation of CaSi silica fume characteristics and its possible utilization in cement-based and alkali-activated materials. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 101, p. 456-465, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.051>.

LIU, Ning; CHEN, Bing. Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 68, p. 227-232, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.062>.

MAAROUFI, Maroua; ABAHRI, Kamilia; HACHEM, Chady El; BELARBI, Rafik. Characterization of EPS lightweight concrete microstructure by X-ray tomography with consideration of thermal variations. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 178, p. 339-348, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.142>.

MOHAJERANI, Abbas; BURNETT, Lucas; SMITH, John V.; MARKOVSKI, Stefan; RODWELL, Glen; RAHMAN, Md Tareq; KURMUS, Halenur; MIRZABABAEI, Mehdi; ARULRAJAH, Arul; HORPIBULSUK, Suksun. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: a review. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 155, p. 104679, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>.

NEVES JUNIOR, Alex; TOLEDO FILHO, Romildo Dias; FAIRBAIRN, Eduardo de Moraes Rego; DWECK, Jo. A study of the carbonation profile of cement pastes by thermogravimetry and its effect on the compressive strength. **Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry**, [S.L.], v. 116, n. 1, p. 69-76, 11 dez. 2013. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-013-3556-7>.

PACHECO, Fernanda; KRUMENAUER, Marcelo; MEDEIROS, Daniel Reis de; NUNES, Maria Fernanda; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca. Development of lightweight concrete subfloor with ethylene vinyl acetate (EVA) aggregates waste to reduce impact sound in flooring system. **Dyna**, [S.L.], v. 84, n. 201, p. 290-295, 12 jun. 2017. Universidad Nacional de Colombia. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n201.61491>.

PANJEHPOUR, M.; ALI, A.A.A.; DEMIRBOGA, R., A review for characterization of silica fume and its effects on concrete properties. **Int J Sustainable**

Constr Eng Technol. 2 (2) (2011) 1–7,
<https://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/IJSCET/article/view/343>.

SCHACKOW, Adilson; EFFTING, Carneane; FOLGUERAS, Marilena V.; GÜTHS, Saulo; MENDES, Gabriela A.. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 57, p. 190-197, abr. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.009>.

SHANMUGAM, R.; SOWMIYA, S.; DINESH, V.; VENKATRAMANA, N.; NAVEEN, S., A study on eco- friendly composite blocks incorporating scrap tyre rubber and steel slag as coarse aggregate with sisal fiber, **Materials Today: Proceedings**, 2023.

SIDDIKA, Ayesha; MAMUN, Md. Abdullah Al; ALYOUSEF, Rayed; AMRAN, Y.H. Mugahed; ASLANI, Farhad; ALABDULJABBAR, Hisham. Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: a review. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 224, p. 711-731, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108>.

THOMAS, Blessen Skariah; GUPTA, Ramesh Chandra. Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 113, p. 86-92, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.019>.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; ZUCHETTO, Letícia Kauer; SOUZA, Rodrigo Périco de; OLIVEIRA, Maria Fernanda Nunes de. Uso de agregado leve de EVA em contrapiso argamassado para isolamento ao ruído de impacto em edificações 60 residenciais. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 17, n. 3, p. 295-306, jul. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000300177>.

VEDALAKSHMI, R. et al. Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique. **Thermochimica Acta**, v. 407, n. 1-2, p. 49-60, 2003.

XIE, Yue; LI, Jun; LU, Zhongyuan; JIANG, Jun; NIU, Yunhui. Preparation and properties of ultra-lightweight EPS concrete based on pre-saturated bentonite. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 195, p. 505-514, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.091>.

CONCLUSÃO GERAL

O grande descarte de pneus causa sérios problemas ambientais e sociais, necessitando a aplicação desses resíduos na indústria, havendo diferentes formas de reutilizá-los, sendo uma delas seu uso como agregado no concreto. Este estudo mostrou a grande viabilidade do seu uso como agregado, obtendo concreto leve. No entanto, em razão da redução das resistências mecânicas, uma parte do cimento foi substituída por microssílica, demonstrando maior redução na massa específica, chegando a redução da massa específica de mais de 1000 kg/m^3 , aproximando-se do valor do concreto com EPS. A borracha mostrou certa deficiência para a trabalhabilidade e a segregação com a pasta do concreto, facilmente corrigida com o uso de superplastificante. A borracha ainda apresentou grande redução na propriedade mecânica, em comparação com o concreto convencional, mas, em relação ao concreto leve com pérola de EPS, obteve resultados próximos e, em algumas das análises, até superiores, também apresentou resultados significativos para sua aplicação. Essas aplicações poderiam ser de concreto para regularização de laje, blocos de concreto e telhas de concreto. Em comparação ao agregado EPS, um agregado já consolidado para concreto leve, o resíduo de borracha mostrou potencial de uso como agregado leve.